

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamili Buziak „Modelowanie procesu wytlaczania**  
**jednoślimakowego polimerowych kompozytów drzewnych”**

Recenzję przygotowałem zgodnie z pismem MT.521.5.2022 z dnia 15.09.2022 r. Dziękana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Chmielewskiego. Przewód doktorski obejmujący recenzowaną rozprawę otwarty został w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn (obecnie inżynieria mechaniczna).

Recenzowana rozprawa związana jest z problematyką technologii przetwórstwa materiałów polimerowych, a ściślej technologii wytłaczania jednoślimakowego specyficznej i słabo poznanej od strony reologicznej oraz przetwórczej grupy tworzyw polimerowych, tzn. termoplastów, zwłaszcza poliiolefin, napełnianych mączką drzewną w ilości dochodzącej do 80%. Materiały takie znajdują coraz szersze zastosowanie w wyrobach drewnopodobnych zastępujących wiele dotychczasowych elementów drewnianych. Sprzyja temu fakt, że można je często wykonywać z surowców odpadowych, np. zmielonych wiórów drzewnych i termoplastów pochodzących z recyklingu. Oprócz wielu korzystnych cech takich jak relatywnie niska cena oraz dobra charakterystyka mechaniczna i odporność na warunki atmosferyczne materiały te mają jednak parę wad zwłaszcza od strony przetwórczej. Zaliczyć do nich głównie można małą a niekiedy bardzo małą płynność, specyficzne cechy trybologiczne oraz ograniczoną odporność termiczną w warunkach przetwórstwa (napełniacz organiczny). Utrudnia to homogenizację składników i formowanie profili realizowane zwykle w wytłaczarkach, co wymaga odpowiedniej konstrukcji urządzeń w oparciu o znajomość przebiegu procesów homogenizacji i formowania w połączeniu z charakterystyką reologiczną, fizykochemiczną i przetwórczą z wykorzystaniem metod modelowania komputerowego. Pomimo doniesień na temat mniej lub bardziej udanych prób wytwarzania i przetwarzania tworzyw drewnopodobnych reologiczne i fizykochemiczne podstawy ich przetwórstwa były dotychczas słabo poznane. Stąd decyzja podjęcia tej tematyki przez doktorantkę jest jak najbardziej uzasadniona i godna pochwały. Należy także podkreślić, że przyjęty tytuł rozprawy „Modelowanie procesu wytłaczania jednoślimakowego polimerowych kompozytów drzewnych” zwięźle lecz bardzo trafnie oddaje jej treść.

Recenzowana rozprawa ma typowy format A-5 i 134 strony. Na początku zawiera streszczenia w języku polskim i angielskim (2s), spis treści (2s) oraz wstęp (2s). Właściwa praca podzielona jest na 4 rozdziały: 1. Aktualny stan wiedzy (6s), 2. Sformułowanie problemu (2s), 3. Badania doświadczalne (35s), 4. Badania teoretyczne (68s). Podsumowanie wyników pracy wraz z wnioskami zawiera Zakończenie (3s), a całość uzupełnia bogaty Spis literatury (10s). Rozdziały główne podzieliła autorka na kilka podrozdziałów, w których omówiła wszystkie najbardziej istotne dokonania zarówno od strony metodycznej jak i wynikowej. Te ostatnie koncentrują się na charakterystyce reologicznej i przetwórczej (podczas wytłaczania) użytych materiałów oraz badaniach symulacyjnych i porównawczych przebiegu wytłaczania tych materiałów z wykorzystaniem opracowanego modelu. Taka forma rozprawy nie budzi więc zastrzeżeń tym bardziej, że napisana jest ona w sposób jasny oraz zrozumiały z użyciem poprawnego nazewnictwa bez istotnych uchybień stylistycznych, językowych, gramatycznych, interpunkcyjnych i ortograficznych (drobna uwaga: poprawnie należy chyba pisać „nienewtonowski” zamiast „nie-Newtonowski” w odniesieniu do cieczy, charakteru, itp., gdyż jest to pochodzący od nazwiska przymiotnik odpowiadający na pytanie jaki? a nie czyj? podobnie jak np. „rewolucja kopernikańska”). Praca jest też bardzo starannie zredagowana. Dotyczy to zarówno układu tekstu jak i sposobu prezentacji tabel (6) oraz bardzo licznych rysunków – zdjęcia, wykresy, schematy – (106). Niektóre z nich, zwłaszcza prezentujące dane doświadczalne badań profilu złoża w zwojach ślimaka, są niezwykle pomysłowe i poglądowe łącząc elementy zdjęć i wykresów. Ogólnie widać bardzo dużą pracowitość doktorantki nad zapewnieniem rozprawie odpowiedniej formy, dzięki czemu czyta się ją z przyjemnością.

Praca zawiera 131 pozycji dobrze dobranej i aktualnej literatury, z których 30 powstało w zespole kierowanym przez promotora w tym 10 przy współudziale doktorantki. Te ostatnie opublikowane zostały w ostatnich kilku latach w renomowanych czasopismach i związane są częściowo z tematyką pracy zawierając wiele przedstawionych w niej wyników. Wskazuje to na bardzo dużą aktywność badawczą i publikacyjną autorki, zwłaszcza jeśli doliczyć do tego potencjalne wystąpienia konferencyjne i inne formy działalności (spisu nie otrzymałem).

Uwzględniając powyższe uwagi w podsumowaniu strony formalnej pracy należy stwierdzić, że spełnia ona wszystkie podstawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Oceniając treść pracy trzeba jeszcze raz powtórzyć, że jej tytuł „Modelowanie procesu wytłaczania jednoślindakowego polimerowych kompozytów drzewnych” adekwatnie oddaje istotę problemów, którymi zajmowała się doktorantka. Wstęp pracy jasno nakreśla motywację zajęcia się problematyką będącą przedmiotem rozprawy. Zagadnienia zasygnalizowane we

wstępie zostały przez doktorantkę rozwinięte w omówieniu aktualnego stanu wiedzy. Omówienie to jest stosunkowo krótkie lecz jasno i przejrzysto przedstawione. Widać, że doktorantka ma gruntowną znajomość literatury związanej z pracą, a zwłaszcza problematyką transportu ślimakowego, reologii i modelowania komputerowego. Świadczy o tym fakt, że autorka zajmowała się też badaniami wyłaczania jednoślindakowego kompozytów drzewnych z regulowanym (głodującym) zasilaniem wyłaczarki (3 art.) oraz wtryskiwania (1 art.). Ta praca obejmuje zasadniczo wyłaczanie przy grawitacyjnym (klasycznym) zasilaniu. Szkoda więc, że w tym miejscu nie podano dla porównania trochę więcej szczegółów dotyczących zachowania się tworzywa przy dozowaniu regulowanym, tym bardziej, że dotyczy to też po części wtryskiwania, w którym tworzywo pobierane jest wprawdzie grawitacyjnie lecz wpada do pustego kanału o długości równej wielkości skoku przy wtrysku. Można też było podać trochę szczegółów dotyczących charakterystyki reologicznej i fizykochemicznej kompozytów drzewnych (poza wzmianką o istnieniu granicy płynięcia i poślizgu przyściennego). Ponadto ciekawa informacja na str. 12 o innym niż klasyczny (Tadmora) mechanizmie uplastyczniania wysoko napełnionych kompozytów drzewnych w obecności poślizgu przyściennego nie posiada odnośników, stąd nie wiadomo, czy pochodzi z literatury, czy jest własną obserwacją doktorantki. Nie wiadomo też czy intensywnie ścinane tworzywo przepływające przez szczelinę nie zawiera większej ilości polimeru. Jak wiadomo tworzywa napełniane wykazują tendencję do separacji w przepływie ścinającym, tzn. napełniacz zwykle migruje do stref o mniejszym ścinaniu (w przepływie przez kanał okrągły wędruje do centrum), co może mieć wpływ na „odwrotny” mechanizm uplastyczniania jeśli w szczelinie następuje separacja. Niezależnie jednak od powyższych uwag mających częściowo charakter redakcyjny (niektóre problemy poruszone jeszcze będą później) omówienie literatury jako całość jest rzetelne i nie budzi kontrowersji potwierdzając bardzo solidne przygotowanie teoretyczne autorki.

Przedstawiony w następnym punkcie problem badawczy obejmujący tezy, cele oraz metodykę pracy jest jasno i klarownie sformułowany. Wyeksponowane przez doktorantkę zagadnienia są bezdyskusyjne i jak wskazuje dalsza lektura pracy konsekwentnie realizowane.

Badania doświadczalne wykonane przez autorkę można podzielić zasadniczo na dwie grupy. Pierwszą z nich stanowią badania procesu wyłaczania, które koncentrują się głównie na pomiarach charakterystyk (profil ciśnienia i temperatury wzdłuż drogi płynięcia oraz natężenie przepływu) jako funkcji prędkości obrotowej ślimaka dla dwóch komercyjnych kompozytów PP/mączka drzewna o składzie 25/75, 50/50, 75/25 – kompozyt Lignocel oraz 30/70, 40/60, 50,50, 60/40, 70/30 – kompozyt Beologic., przy czym niektóre składy przygotowano we własnym zakresie przy użyciu wyłaczarki jednoślindakowej. Stąd rodzi się

kilka pytań a mianowicie: Co wpłynęło na wybór tych dwóch kompozytów, np. inna charakterystyka składników lub środków pomocniczych? Jaka jest gwarancja, że wyłaczarka jednoślimakowa umożliwi uzyskanie tworzywa o dużej jednorodności materiałowej przy mieszanii składników o bardzo różnych lepkościach? W związku z tym czy nie lepiej było użyć bardziej efektywnego mieszalnika, jak np. wyłaczarka dwuślimakowa współbieżna lub kneter? W ramach badań wyłaczania doktorantka wykonała też bardzo praco- i czasochłonne pomiary profilu złoża w kanale ślimaka, o czym będzie jeszcze mowa nieco dalej. Drugą grupą badań były pomiary reologiczne, zwłaszcza reometria kapilarna oraz reometria on-line, które umożliwiły ocenę charakterystyki lepkościowej kompozytów w różnych temperaturach z poprawkami Rabinowitscha i Mooney'a. Poprawki Bagley'a nie wykonywano z uwagi na użycie kapilar o bardzo dużej długości względnej  $L/D$ , co jest oczywiste.

Wyniki uzyskane w zakresie badań wyłaczania kompozytów Lignocel potwierdzają znane z literatury fakty spadku wydajności, wzrostu ciśnienia oraz zmniejszenia sprężystości (efektu Barusa) ze wzrostem udziału napełniacza drzewnego. Szczególnie interesujące są jednak badania przepływu tworzywa w kanale ślimaka, o czym już wspominałem a teraz chcę do tego nawiązać. Autorka stosowała tu znaną od bardzo dawna lecz żmudną i pracochłonną technikę wyciągania ślimaka z wyłaczarki (screw pulling-out technique) i ocenę wyglądu złoża w poszczególnych zwojach. Bardzo szeroki zakres badań z pomysłowym użyciem pigmentu oraz nowe i konsekwentnie stosowane elementy interpretacyjne (np. wspomniane połączenie zdjęć z nałożonymi na nie wykresami zmian szerokości złoża uplastycznionego) stworzyły jednak nową jakość, którą oceniam niezwykle wysoko podziwiając autorkę za mrówczą pracę a przy tym umiejętność przejrzystego, konsekwentnego i przekonującego prezentowania wyników. Nawiązując do wspomnianej już uwagi ze str. 12 warto by wykonać jeszcze jeden eksperyment, a mianowicie pobrać próbki tworzywa od strony aktywnej i pasywnej części zwoju, a następnie oznaczyć w nich zawartość składników, tj. PP i mączki. Można np. wykorzystać ekstrakcję PP gorącym ksylenem, którą kiedyś sam stosowałem. Istotne różnice w składzie mogą wskazywać na zjawisko separacji w przepływie. Biorąc też pod uwagę wspomnianą wcześniej efektywność homogenizacji mógłbym polecić znaleziony w czasie pisania recenzji bardzo świeży i ciekawy artykuł (S. Wiedl, et al., Comparison of Melting Processes for WPC and the Resulting Differences in Thermal Damage, Emissions and Mechanics, *Materials* 2022, **15**, 3393. <https://doi.org/10.3390/ma15093393>). Podane wyżej wartościowe badania doktorantki pozwoliły na zaproponowanie fizycznego modelu uplastyczniania i przepływu WPC w kanale ślimaka, który opiera się na jednym empirycznym założeniu, a mianowicie WPC zawierające do 50% wag. napełniacza uplastyczniają się

według dwuwymiarowego klasycznego mechanizmu Tadmora, natomiast powyżej 50% wag. według mechanizmu jednowymiarowego zbliżonego do zachowania typowych termoplastów w strefie przejściowej podczas wytłaczania. Założenie to, które wymagałoby dodatkowego komentarza ze strony doktorantki, legło u podstaw stworzonego modelu symulacyjnego. Trzeba jednak zdawać sobie sprawę, że w przyszłych pracach wykraczających poza rozprawę należałoby poszukać bardziej obiektywnych, reologicznie uzasadnionych kryteriów zmiany mechanizmu uplastyczniania związanych np. z granicą płynięcia lub poślizgu przyściennego. Logiczne jest bowiem stwierdzenie, że krytyczne naprężenia powodujące poślizg przyścienny mogą być nadal zbyt niskie aby wywołać plastyczną deformację (np. cyrkulację) złoża WPC o bardzo dużej lepkości. Wymienione efekty oceniała autorka w badaniach reologicznych. Badania te podobnie jak poprzednie są także obszerne oraz jasno przedstawione i omówione. Tak więc w oparciu o reometrię kapilarną doktorantka zmierzyła krzywe lepkości jako funkcję szybkości ścinania dla obu rodzajów kompozytów w zależności od ich składu oraz temperatury potwierdzając ogólnie znane w układach napełnianych zachowanie, tj. wzrost lepkości i pseudoplastyczności ze wzrostem udziału napełniacza i tendencję przeciwną przy wzroście temperatury. Warto wspomnieć, że podobny przeciwny efekt wywiera ciśnienie i obecność fazy gazowej. Można to dobrze opisać za pomocą teorii objętości swobodnej. Widać ponadto kilka ciekawych efektów, o których autorka nie wspomina. W badanym zakresie szybkości ścinania brak jest tendencji wskazujących na istnienie granicy płynięcia, tzn. coraz szybszego wzrostu lepkości ze spadkiem szybkości ścinania. Wręcz przeciwnie, kompozycje typu Lignocel na wykresie podwójnie logarytmicznym są prostymi (spełniają równanie potęgowe), podczas gdy kompozycje Beologic tworzą niemal dolny zakres newtonowski (stałej lepkości), tzn. coś zupełnie przeciwnego niż przy granicy płynięcia. Interesujące byłoby wyjaśnienie tego faktu gdyż obie kompozycje są dość podobne. Może ma to coś wspólnego z poślizgiem przyściennym, który doktorantka mierzyła w odrębnej serii badań realizowanych pod kątem oceny parametrów równań lepkości (potęgowego i Kleina) użytych dalej do modelowania. Szkoda, że badania zrealizowane zostały tylko dla jednego modelowego układu Beologic 50/50 (a nie np. 30/70, 50/50, 70/30), chociaż zdaję sobie sprawę, że i w tej formie są bardzo obszerne i bez zastrzeżeń od strony merytorycznej. Z uwagi na łatwość porównań korzystne byłoby też przedstawienie wybranych krzywych lepkości w funkcji naprężenia ścinającego, a nie jak zwykle się robi dla szybkości ścinania. Tym niemniej powody przyjęcia układu Beologic 50/50 jako modelowego wymagałyby krótkiego komentarza ze strony autorki.

Badania teoretyczne omówione w obszernym rozdziale 4 poświęcone są stworzeniu globalnego (całościowego) modelu komputerowego symulującego realny przepływ WPC w wylączarce jednoślismakowej począwszy od leja zasypowego aż do wyjścia z głowicy. Model taki powinien ilościowo określać różne charakterystyki przepływu, co zostało skonfrontowane z danymi doświadczalnymi uzyskanymi przez doktorantkę. Wykorzystuje on bardzo szeroko różne procedury iteracyjne, które łączą matematyczne modele działania poszczególnych stref roboczych wylączarki w jedną spójną całość. Takie podejście jest całkowicie uzasadnione. Do stworzenia modeli działania poszczególnych stref doktorantka wykorzystowała zarówno koncepcje już istniejące, w tym oparte na pracach zespołu kierowanego przez promotora rozprawy (także z jej udziałem) jak i rozwiązania własne. Opis działania stref przepływu tworzywa stałego, uplastyczniania wstępnego, uplastyczniania 2-D (dla WPC poniżej 50% mączki) oraz przepływu tworzywa stopionego jest raczej oparty na rozwiązaniach znanych z literatury, do których autorka mogła wprowadzić również własne modyfikacje. Oryginalnym rozwiązaniem doktorantki jest prawdopodobnie model uplastyczniania 1-D (dla WPC powyżej 50% mączki). Trudno mi to jednoznacznie ocenić bez głębokiego wnikania w literaturę, stąd kilka słów komentarza na ten temat byłoby konieczne. Niezależnie od tego widać jednak wyraźnie, że doktorantka jest nie tylko bardzo dobrą eksperymentatorką lecz również niezwykle sprawnie obraca się w sferze teorii przepływów oraz modelowania komputerowego. Praca teoretyczna jest bardzo rzadkim zjawiskiem wśród i tak nielicznych kobiet zajmujących się podstawami przetwórstwa tworzyw polimerowych.

Kilka uwag problemowych chciałbym poświęcić wprowadzonemu przez autorkę modelowi uplastyczniania 1-D, który od strony analitycznej jest bez zarzutu. Po pierwsze wydaje mi się, że analizując proces uplastyczniania z użyciem tego modelu nie ma sensu wyodrębnianie strefy uplastyczniania wstępnego (Tadmora), która w swej istocie jest także uplastycznianiem 1-D. Stąd model 1-D można konsekwentnie stosować od końca strefy transportu tworzywa stałego. Po drugie dla zapewnienia ciągłości zmian naprężenia na styku stref transportu tworzywa stałego i uplastyczniania należałoby tarcie w strefie uplastyczniania związane z rosnącą warstwą stopu na granicy cylinder-złoże stałe zdefiniować jako tarcie sucho-lepkie. W tym celu we wzorze 4.21 wielkość  $\tau$  wynikającą z tarcia lepkiego należałoby zastąpić średnią ważoną tarcia lepkiego i suchego (jak dla strefy tworzywa stałego) przyjmując np. że tarcie suche zanika, gdy warstwa stopu osiąga grubość szczeliny między zwojem a cylindrem. Takie podejście należałoby też stosować używając modelu uplastyczniania 2-D ze strefą przejściową. Warto by przy tym rozważyć czy nie zrezygnować z mniej precyzyjnego modelu Tadmora dla strefy przejściowej na korzyść własnego i chyba lepszego modelu 1-D.

W dalszym ciągu rozprawy doktorantka jasno i przystępnie omówiła szczegółowe problemy związane z metodyką obliczeń numerycznych oraz globalny model komputerowy procesu. Nie wchodząc w szczegóły mogę jednak powiedzieć bez wątpliwości, że jest ona doskonale zorientowana i biegła w tej problematyce. Potwierdzają to prezentowane dalej obszerne wyniki badań symulacyjnych i porównawczych, które zostały też przystępnie omówione. Powstają tu dwa pytania czy parametry materiałowe (z wyjątkiem lepkościowych) zaczerpnięte z literatury dość wiernie odzwierciedlają właściwości kompozytu modelowego Beologic 50/50, czy też mają charakter szacunkowy oraz po co poprawka Bagley'a skoro stosowano bardzo długie kapilary, o czym była mowa wcześniej? W pierwszym etapie symulacji doktorantka porównała charakterystyki procesu wytłaczania uzyskane dla różnych modeli uplastyczniania, różnych prędkości ślimaka i różnych modeli reologicznych stopu. Pokazała, że model 2-D zapewnia generalnie większą szybkość stapiania, przy podobieństwie innych charakterystyk. W dalszym etapie dokonała weryfikacji wartości symulacyjnych z pomiarowymi dla kompozytu modelowego Beologic 50/50 stwierdzając, że uplastycznianie według modelu 2-D zapewnia generalnie lepszą zgodność danych, co potwierdza słuszność przyjętego kryterium stosowalności obu modeli stapiania (2-D do 50% a 1-D powyżej 50% udziału napełniacza). Całkowitą pewnością dałoby użycie dodatkowych kompozycji o udziale mączki wyraźnie powyżej lub poniżej granicy 50%, o czym wspominałem.

Ostatni fragment rozprawy stanowi zakończenie będące rodzajem podsumowania dokonań. Ostatnie kilka zdań poświęciła autorka swoim zamierzeniom wybiegającym w przyszłość. Jest to o tyle ważne, że kilka z nich, np. poślizg przyścienny i granica płynięcia, jest zbieżnych z pytaniami, które postawiłem w recenzji. Świadczy to o dojrzałości doktorantki, która zdaje sobie sprawę z istotnych dokonań ale również z potrzeby uzupełnień wiedzy w zakresie problematyki tej naprawdę wartościowej rozprawy.

Biorąc pod uwagę przedstawione powyżej fakty w podsumowaniu muszę stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Kamili Buziak pt. „Modelowanie procesu wytłaczania jednoślindakowego polimerowych kompozytów drzewnych” prezentuje wysoki poziom naukowy, przy czym jest jasno napisana oraz starannie zredagowana. Nie ulega wątpliwości, że doktorantka ma dużą i dobrze ugruntowaną wiedzę dotyczącą podstaw przetwórstwa materiałów polimerowych, która obejmuje przykładowo mechanikę przepływów, reologię oraz zjawiska transportu. Nie bez znaczenia jest także widoczna umiejętność korzystania z nowoczesnych metod obliczeniowych oraz szeregu urządzeń pomiarowych i przetwórczych. Ważna jest też zdolność właściwego planowania zadań badawczych oraz krytycznej analizy uzyskanych wyników tak w sferze teorii jak i eksperymentu. Te pozytywne cechy mgr inż.

Kamili Buziak jako naukowiec-badaczka wsparte są niewątpliwie jej dużą pracowitością oraz umiejętnością jasnego i przekonującego prezentowania wyników pracy. Z tego też względu spośród pytań, które stawiam doktorantce w swojej recenzji trudno doszukać się takich, które dotyczyłyby istotnych zastrzeżeń merytorycznych. Większość z nich dotyczy czasami niezbyt jasno wyeksponowanych szczegółów, bądź ma charakter dyskusyjny lub informacyjny. O naukowej dojrzałości doktorantki korzystnie świadczy też fakt, że doskonale zdaje ona sobie sprawę jakie elementy badań omówionych w rozprawie należałoby kontynuować w przyszłości. Nie bez znaczenia jest także widoczny publikacyjny dorobek autorki.

Ponieważ recenzowana rozprawa bez wątpienia spełnia wymagania art. 13 ust. 1 ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r (Dz. U. z dnia 21.06.2016 r., poz. 882) wnioskuję o skierowanie jej do dalszych etapów przewodu.

Ponadto biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy rozprawy, duży dorobek, aktywność oraz doświadczenie i umiejętności doktorantki zwracam się też z wnioskiem o wyróżnienie pracy.

Andrzej Góral