

Kraków, 02.03.2025

Dr hab. inż. Artur Cebula, prof. PK
Politechnika Krakowska
Katedra Energetyki
Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków
acebula@pk.edu.pl
tel. 12 6283578,

Recenzja

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Aleksandra Nowakowska pt.:

Modelowanie przepływu nienewtonowskiego w zakresie minimalizacji strat energii

1) Podstawa opracowania

Podstawę do opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Aleksandry Nowakowskiej stanowi uchwała Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska Energetyki i Górnictwa Politechniki Poznańskiej z dnia 19 listopada 2024 roku.

2) Przedmiot rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa dotyczy modelowania przepływu płynów nienewtonowskich w zakresie minimalizacji strat energii. Przedstawiona praca ma charakter obliczeniowo-eksperymentalny. Cel pracy, jaki postawiła przed sobą Doktorantka, to uzyskanie zmniejszenia strat ciśnienia podczas przepływu wybranego płynu nienewtonowskiego, jakim jest polipropylen, poprzez zmianę geometrii dysz stosowanych w procesach przetwarzania polimerów. Przeprowadzone badania miały potwierdzić założenie, że modyfikacja kształtu dyszy bazowej poprzez jej wydłużenie i opisanie geometrii wielomianem trzeciego stopnia pozwoli na ograniczenie strat ciśnienia, a tym samym na redukcję strat energii w procesach przepływu płynów nienewtonowskich. Doktorantka podjęła badania ukierunkowane na analizę wpływu geometrii kanałów przepływowych na parametry hydrodynamiczne przepływu, w tym ciśnienie, prędkość oraz naprężenia ścinające, przy użyciu symulacji numerycznych w środowisku CFD oraz eksperymentów z zastosowaniem reometru kapilarnego i stanowiska do wizualizacji przepływu.

3) Zakres rozprawy

Rozprawa zawarta jest na 109 stronach. Składa się z ośmiu rozdziałów, poprzedzonych spisem streszczeniem w języku polskim i angielskim, spisem treści, wykazem oznaczeń i wstępem. Praca zakończona jest zakończeniem, spisem literatury, spisem rysunków i tabel. Rozprawa powstała pod kierunkiem Prof. dr hab. inż. Andrzeja Frąckowiaka.

Praca zaczyna się wstępem, w którym przedstawiono motywację do podjęcia badań nad minimalizacją strat ciśnienia podczas przepływu płynów nienewtonowskich oraz znaczenie tego zagadnienia w kontekście optymalizacji procesów przemysłowych. We wstępie Doktorantka przedstawiła ogólną charakterystykę płynów nienewtonowskich oraz ich zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, ze szczególnym uwzględnieniem przetwórstwa

polimerów. Wskazano również, że odpowiedni dobór geometrii kanału przepływowego ma kluczowe znaczenie dla redukcji strat ciśnienia oraz poprawy efektywności energetycznej procesów technologicznych.

Rozdział pierwszy to „Terminologia zagadnień opisujących ruch płynów”. W rozdziale tym zdefiniowano podstawowe pojęcia związane z mechaniką płynów, w tym różnice między płynami newtonowskimi a nienewtonowskimi. Opisano właściwości reologiczne płynów nienewtonowskich oraz omówiono najczęściej stosowane modele reologiczne, takie jak modele Newtona, Binghama, Carreau czy Herschela-Bulkleya. Dodatkowo przedstawiono wybrane metody badania płynów, obejmujące zarówno techniki eksperymentalne, jak i symulacyjne.

Rozdział drugi dotyczy przeglądu literatury oraz analizy dotychczasowych postępów w badaniach związanych z przepływem płynów nienewtonowskich i ich wpływem na energochłonność procesów przemysłowych. W tym rozdziale szczególną uwagę poświęcono zastosowaniom reologii w badaniach nad polimerami i innymi płynami nienewtonowskimi, w tym krwią oraz wodą morską o wysokim zasoleniu. Opisano również mechanizmy degradacji polimerów pod wpływem naprężeń mechanicznych i termicznych w procesach przetwarzania, takich jak wytłaczanie czy wtryskiwanie. W przeglądzie literatury wskazano, że na rynku istnieje wiele metod minimalizacji strat ciśnienia w systemach przepływowych płynów nienewtonowskich, jednak najskuteczniejszą strategią okazuje się optymalizacja geometrii kanałów przepływowych. Analiza literatury wykazała, że odpowiedni dobór kształtu dyszy może znacząco wpłynąć na poprawę parametrów przepływu, zmniejszając naprężenia mechaniczne w materiale i ograniczając jego degradację. Wskazano również, że w przemyśle przetwórstwa polimerów istotne znaczenie ma równomierność przepływu oraz minimalizacja zastojów płynu w kanałach, co wpływa na efektywność energetyczną całego procesu.

Cel pracy został przedstawiony w rozdziale „3. Cel i zakres pracy”. W tym rozdziale zdefiniowano główne założenia badawcze, które obejmują optymalizację geometrii dysz stosowanych w procesach przepływu płynów nienewtonowskich w celu redukcji strat ciśnienia. Doktorantka postawiła tezę, że modyfikacja kształtu kanału poprzez zastosowanie krzywej opisanej wielomianem trzeciego stopnia pozwoli na bardziej płynny przepływ medium i ograniczenie strat energetycznych. Wskazano również zakres badań, obejmujących wizualizację przepływu, symulacje numeryczne w środowisku CFD oraz eksperymenty przeprowadzone przy użyciu reometru kapilarnego.

W rozdziale 4 zatytułowanym „Wizualizacja przepływu płynu newtonowskiego i nienewtonowskiego” opisano eksperymentalne oraz obliczeniowe metody badania przepływu płynów w kanałach o różnych geometriach, w celu oceny strat ciśnienia oraz identyfikacji stref zastojów i wirów.

W rozdziale tym użyto metody eksperymentalnej i obliczeniowej, łącząc badania wizualizacyjne na stanowisku laboratoryjnym z symulacjami numerycznymi w środowisku CFD. Eksperymenty przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym stanowisku, które umożliwia analizę przepływu przy użyciu opiłków proszku aluminiowego dodawanego do medium, co pozwoliło na obserwację trajektorii przepływu. Badania te umożliwiły ocenę wpływu geometrii kanału na charakter przepływu, identyfikację stref recyrkulacji oraz określenie, które kształty dysz minimalizują straty ciśnienia.

Dodatkowo, wyniki eksperymentów porównano z symulacjami numerycznymi przeprowadzonymi dla płynów newtonowskich (woda) i nienewtonowskich (wodny roztwór karboksymetylocelulozy), co pozwoliło na bardziej precyzyjną analizę pola prędkości oraz rozkładu ciśnienia. W wyniku przeprowadzonych badań potwierdzono, że wydłużenie sekcji zmiany średnicy kanału oraz zastosowanie geometrii opisanej wielomianem trzeciego stopnia może prowadzić do redukcji strat energii poprzez bardziej równomierny przepływ medium.

Rozdział piąty zatytułowany „Symulacje numeryczne przy użyciu CFD” zawiera wyniki symulacji komputerowych przeprowadzonych w środowisku ANSYS Fluent w celu analizy przepływu płynu nienewtonowskiego przez kanały o różnych geometriach.

W rozdziale tym przedstawiono metodologię modelowania numerycznego, opis geometrii badanych kanałów oraz parametry zastosowane w obliczeniach. Omówiono proces tworzenia siatki elementów skończonych oraz kryteria jakości siatki, takie jak jakość elementu, współczynnik kształtu, skośność i ortogonalność.

W symulacjach zastosowano model lepkości Ostwalda-de Waele’a, który opisuje właściwości reologiczne badanej cieczy. Przyjęto odpowiednie warunki brzegowe, w tym prędkość wlotową obliczoną na podstawie pomiarów reologicznych oraz ciśnienie na wylocie kanału.

Wyniki symulacji obejmują rozkłady ciśnienia i prędkości dla sześciu różnych geometrii kanałów: trzech kanałów zbieżnych o różnej długości sekcji przejściowej oraz trzech kanałów opisanych wielomianem trzeciego stopnia. Na podstawie uzyskanych wyników dokonano porównania efektywności poszczególnych kształtów w zakresie redukcji strat ciśnienia oraz poprawy warunków przepływu.

Analiza wyników wykazała, że kanały o wydłużonej sekcji zmiany średnicy oraz opisane wielomianem trzeciego stopnia charakteryzują się korzystniejszym rozkładem prędkości i mniejszymi stratami ciśnienia w porównaniu do klasycznych kanałów zbieżnych. Wyniki te stanowią podstawę do dalszej weryfikacji eksperymentalnej, przeprowadzonej w kolejnym rozdziale.

Wyniki pomiarów z wykorzystaniem reometru kapilarnego przedstawione w rozdziale 6. Rozdział dotyczy eksperymentalnej analizy przepływu polipropylenu przez dysze o różnych geometriach oraz oceny strat ciśnienia w zależności od kształtu kanału.

W rozdziale tym opisano specyfikację aparatury laboratoryjnej, w tym parametry techniczne reometru kapilarnego, oraz charakterystykę badanego materiału – polipropylenu. Szczególną uwagę poświęcono autorskim dyszom, które zostały opracowane na podstawie wyników symulacji numerycznych i testowane w eksperymencie w celu porównania ich efektywności w minimalizacji strat ciśnienia.

Przeprowadzone pomiary wykazały, że kanały o geometrii opisanej wielomianem trzeciego stopnia wykazują mniejsze straty ciśnienia w porównaniu do standardowych dysz zbieżnych. Zmniejszenie strat ciśnienia oznacza bardziej efektywny przepływ medium oraz potencjalne oszczędności energetyczne w procesach przemysłowych.

Porównanie wyników eksperymentalnych z wynikami symulacji numerycznych potwierdziło ich zgodność, co wskazuje na wysoką wiarygodność przeprowadzonych analiz.

Rozdział 7 dotyczy wpływu geometrii kanału przepływowego na degradację materiału podczas wytłaczania. Przeanalizowano dwa główne mechanizmy degradacji: termiczną, wynikającą z długotrwałego narażenia polimeru na wysoką temperaturę, oraz mechaniczną, spowodowaną nadmiernymi naprężeniami ścinającymi w płynącym materiale. Badania wykazały, że dysze o klasycznej geometrii zbieżnej generują wyższe naprężenia i większe spadki ciśnienia, co może prowadzić do uszkodzenia struktury polimeru. Natomiast dysze o geometrii opisanej wielomianem trzeciego stopnia umożliwiają bardziej równomierny przepływ, co ogranicza degradację materiału. Wyniki eksperymentalne wykazały również, że właściwy dobór geometrii kanału może znacząco poprawić jakość końcowego produktu poprzez zmniejszenie degradacji polimeru i zachowanie jego właściwości fizycznych. Przeprowadzone analizy potwierdziły, że wydłużenie sekcji przejściowej w kanale redukuje gwałtowne zmiany naprężeń, co pozytywnie wpływa na stabilność przetwarzanego materiału.

Rozdział 8 podsumowuje wyniki badań nad wpływem geometrii kanałów przepływowych na straty ciśnienia i efektywność przepływu płynu nienewtonowskiego. Najlepsze rezultaty uzyskano dla dyszy wielomianowej „C”, która zmniejszyła straty ciśnienia o 20% w symulacji i o 19,3% w eksperymencie w porównaniu do dyszy zbieżnej „A”.

Wydłużenie sekcji zmiany średnicy w większości przypadków prowadziło do redukcji strat ciśnienia, szczególnie dla dużych strumieni objętości. Badania eksperymentalne potwierdziły tendencje zaobserwowane w symulacjach numerycznych, co świadczy o wysokiej zgodności obu metod badawczych. Ostatecznie, rozdział wskazuje, że odpowiednia optymalizacja kształtu dyszy może prowadzić do istotnych oszczędności energetycznych w procesach przetwórstwa polimerów.

Rozprawa kończy się rozdziałem "Zakończenie". Rozdział ten podsumowuje wyniki badań nad optymalizacją geometrii dyszy w przetwórstwie polimerów. Wykazano, że zastosowanie kształtu opisanego wielomianem trzeciego stopnia pozwala na redukcję strat ciśnienia i poprawę warunków przepływu. Przeprowadzone symulacje numeryczne oraz badania eksperymentalne potwierdziły skuteczność tej modyfikacji. Zmiana geometrii dyszy może przynieść korzyści energetyczne i znaleźć zastosowanie w urządzeniach współpracujących z płynami nienewtonowskimi.

4. Uwagi krytyczne oraz dyskusyjne do pracy

- 1) Autorka we Wstępie pisze, że przeprowadzenie eksperymentu na stanowisku wymaga podgrzania materiału. Następnie pada zdanie: „Jest to możliwe do zrealizowania dzięki podjętej z Politechniką Bydgoską współpracy.” Dlaczego do podgrzania materiału wymagana jest współpraca z inną uczelnią? Należy rozwinąć myśli z tego zdania?
- 2) W rozdziale 4 opisane jest stanowisko do wizualizacji przepływów. W opisie wymieniona jest pompa perystaltyczna. Na stronie 43 Autorka pisze „Do najpoważniejszych wad pomp perystaltycznych należy niewielki czas pomiędzy wymianami przewodu roboczego”. To zdanie jest niejasne i wymaga wyjaśnień. Niewielki czas na wymianę przewodu zdaje się być cechą pozytywną, chyba że Autorka ma coś inne na myśli?
- 3) Na stronie 43 Autorka używa skrótów FFF, FDM. Skróty te powinny być wyjaśnione.
- 4) W rozdziale 4 przedstawiono 5 kanałów o różnej geometrii, dla których przeprowadzano badania wizualizacyjne przepływu, są one pokazane na fotografii na rys.21. Natomiast nigdzie nie podano wymiarów tych kanałów, nie ma ani jednego rysunku technicznego z zaznaczonymi głównymi wymiarami zarówno dla fizycznych modeli jak i dla geometrii modeli numerycznych. Co jest przyczyną ukrycia wymiarów badanych kanałów?
- 5) W rozdziale 4 oprócz zdjęć z wizualizacji przepływu z użyciem proszku aluminiowego przedstawiono wyniki symulacji. Na rysunkach 24,26,29,31,33 pokazano rozkłady prędkości dla płynu nienewtonowskiego i wody w celu porównania otrzymanych wyników obliczeń. Rozkłady prędkości są zestawione obok siebie przyczyn dla każdego jest inna skala. Jest to błąd. Porównanie wyników, szczególnie rozkładów musi być w tej samej skali. Czy wnioski w rozdziale 4 dotyczące wyników z symulacji będą takie same jeżeli rysunki zostaną zestawione poprawnie(w tej samej skali)?
- 6) Na stronie 54 Autorka podaje, że dane techniczne przykładowej kapilary przedstawiono na rys. 30. Na rys.30 znajduje się zdjęcie z badań wizualizacyjnych modelu nr 4. Czy jest to błąd i chodziło o rys. 35? Jeżeli tak to nadal nie wiadomo jak jest średnica wewnętrzna kapilary, na rysunku 35 jest wprowadzone oznaczenie „D”. Ile zatem wynosi średnica kapilary?
- 7) W rozdziale 5.3 przedstawiono geometrię oraz siatki o określonych ilościach elementów oraz rysunki z parametrami jakościowymi tych siatek. Natomiast nie ma w pracy obliczeń wpływu ilości elementów siatki na wyniki. Ilość elementów siatki ustala się po

- przeprowadzeniu takich obliczeniach (tzw Mesh dependency). Czy prezentowane siatki obliczeniowe są wynikiem obliczeń wpływu ilości elementów siatki na wynik?
- 8) Rozdział 5.5 zawiera wyniki CFD dla różnych geometrii przy tych samych warunkach brzegowych. W tym rozdziale Autorka popełnia ten sam błąd jak w rozdziale 4, różne skale, w których wykonano rozkłady ciśnienia (rys.57-62) i prędkości (rys.63-68). Takie przedstawienie otrzymanych rozkładów uniemożliwiają porównanie wyników. Jeżeli rysunki zostaną zestawione prawidłowo, czy przyczyni się to do innych wniosków lub spostrzeżeń z rezultatów obliczeń CFD?
 - 9) Rezultatem prac eksperymentalnych z użyciem reometru kapilarnego są otrzymane wartości ciśnienia przy wyciskaniu polipropylenu przez kapilary o różnym kształcie dysz. W rozdziale 3 Cel i zakres pracy Autorka pisze: "Dzięki obserwacjom wizualizacji przepływu płynu możliwe będzie określenie, który z utworzonych kształtów kanału pozwala na korzystniejszy, pod kątem minimalizacji strat ciśnienia oraz energii, przepływ medium.". Nasuwa się pytanie czy na podstawie otrzymanych wyników można, wnioskować o zużyciu energii przy produkcji/wytłaczaniu przy zastosowaniu zaproponowanej dyszy? Chodzi o parametr mierzalny np. ilość zużytej energii na kilogram wytłoczonej masy polipropylenu, kJ/kg lub inny.

5. Uwagi redakcyjne

Rozprawa Pani mgr inż. Aleksandry Nowakowskiej jest napisana starannie i czytelnie. Do większych uwag w kwestii redakcyjnej/językowej zalicza się słaba jakość rysunków w rozdziale 2. Wskazane byłoby poprawić jakość wstawionych skanów rysunków rys.14-16. Należałoby rysunki te obrobić graficznie lub przerysować tak aby jakość pasowała do standardu pracy doktorskiej.

W tekście zauważono drobne błędy do których należą:

- 1) błędny skrót rysunku zastosowany na stronach 66, 68, 79 zamiast „rys.” użyto „ryss.”,
- 2) błędny skrót rysunku zastosowany na stronie 68 na zamiast „rys.” użyto „ryss.”,
- 3) wymiary kapilar na rys. 74 są niewidoczne.

6. Ocena rozprawy

Moim zdaniem tematyka pracy jest aktualna, poruszony jest temat minimalizacji strat przepływu w procesach przetwarzania polimerów poprzez zmianę geometrii kanałów przepływowych, co ma istotne znaczenie dla przemysłu w kontekście efektywności energetycznej i ograniczania kosztów produkcji.

Rozprawa zawiera wyniki badań eksperymentalnych i analizy tychże wyników. Ponadto praca zawiera obliczenia numeryczne przepływu cieczy nienewtonowskiej przez zaproponowane dysze. Za główne osiągnięcia Autorki recenzowanej pracy uważam:

- 1) Opracowanie geometrii dyszy w celu redukcji strat ciśnienia – Autorka wykazała, że zastosowanie kształtu opisanego wielomianem pozwala na zmniejszenie strat ciśnienia nawet o 20%,
- 2) Połączenie metod eksperymentalnych i numerycznych – Przeprowadzenie kompleksowych badania obejmujących eksperyment wizualizacyjny, symulacje numeryczne CFD oraz pomiary z użyciem reometru kapilarnego, które wzajemnie się

potwierdziły i dostarczyły wiarygodnych wyników dotyczących przepływu płynów nienewtonowskich.

Pod względem formalnym praca nie nasuwa wątpliwości. Praca napisana jest starannie z poprawnie dobranym materiałem ilustracyjnym. Praca zawiera dobrze wykonany przegląd literatury, który zawiera przegląd aktualnych wyników badań. Przegląd jest dobrym wprowadzeniem czytelnika do problemu, autorka opisała występowanie płynów nienewtonowskich w technice oraz zjawiska i problemy z zastosowaniem tych płynów występujące.

7. Wnioski końcowe

W podsumowaniu stwierdzam, że podniesione przeze mnie uwagi krytyczne do rozprawy mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości naukowej pracy, którą oceniam pozytywnie. Oceniana rozprawa stanowi rozwiązanie postawionego problemu naukowego, jakim było poprawa kształtu dyszy w celu zmniejszenia strat ciśnienia dla przepływającego płynu. Cele naukowe pracy zostały osiągnięte poprzez przeprowadzenie prac obliczeniowych oraz badań empirycznych, teza pracy została potwierdzona.

Na podstawie przedstawionej do oceny pracy stwierdzam, że Doktorantka wykazała się opanowaniem podstaw teoretycznych dotyczących analizowanych w pracy zjawisk przepływowych, znajomością aktualnego stanu osiągnięć w zakresie płynów nienewtonowskich. Doktorantka przeprowadziła szereg badań eksperymentalnych na wykonanym stanowisku w celu wizualizacji przepływu jak i docelowe pomiary z użyciem reometru. Pomiary uzupełniono obliczeniowymi symulacjami przepływu.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Aleksandry Nowakowskiej pt. „Modelowanie przepływu płynów nienewtonowskich w zakresie minimalizacji strat energii” spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w Art. 187 Ustawy - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018, Poz. 1668 z późniejszymi zmianami). Biorąc powyższe pod uwagę, stawiam wniosek do Rady Naukowej o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Aleksandry Nowakowskiej do publicznej obrony.



Elektronicznie podpisany przez:

Artur Tadeusz Cebula

Data:
2025-3-2 22:13:27