



Politechnika Łódzka

Dr hab. inż. Maciej Jaskulski, profesor uczelni
Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska
Politechnika Łódzka

Łódź, 01.02.2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krystiana Jędrzejczaka pt.:
"Diagnostics of Hemolysis Risk in Atherosclerosis – Numerical Analysis and Experimental Studies"

zrealizowanej na

Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej
pod kierunkiem profesora dr hab. inż. Łukasza Makowskiego
oraz promotora pomocniczego dr inż. Wojciecha Orciucha

Podstawa opracowania recenzji

Podstawę formalną sporządzenia recenzji rozprawy doktorskiej autorstwa Pana mgr inż. Krystiana Jędrzejczaka stanowi pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Chemiczna Politechniki Warszawskiej Pana prof. dr hab. inż. Tomasza Sosnowskiego z dnia 16.12.2024r. oraz uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Chemiczna PW z dnia 10.12.2024r.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została zrealizowana na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem promotora Pana profesora dr hab. inż. Łukasza Makowskiego oraz promotora pomocniczego Pana dr inż. Wojciecha Orciucha. Nadanie stopnia przewiduje się w Dziedzinie Nauk Inżynieryjno-Technicznych w dyscyplinie Inżynieria Chemiczna.

Aktualność tematyki i cel pracy

W ostatnich latach coraz większą uwagę zwraca się na złożone interakcje między procesami hemolizy a rozwojem miażdżycy. Hemoliza, definiowana jako niszczenie czerwonych krwinek, może prowadzić do poważnych konsekwencji zdrowotnych, w tym do zwiększonego ryzyka chorób sercowo-naczyniowych. Zrozumienie mechanizmów i czynników ryzyka związanych z hemolizą

w kontekście miażdżycy staje się kluczowe dla opracowywania skutecznych strategii diagnostycznych i terapeutycznych.

Współczesna medycyna stawia coraz większy nacisk na wieloaspektowe analizy zjawisk związanych z układem krążenia, w tym na zrozumienie dynamiki przepływu krwi w kontekście miażdżycy i hemolizy. Modelowanie numeryczne, w szczególności techniki Computational Fluid Dynamics (CFD), stają się nieocenionym narzędziem w badaniach nad przepływem krwi oraz jego interakcjami z elementami ścian naczyń krwionośnych. Praca doktorska pt. "Diagnostics of Hemolysis Risk in Atherosclerosis – Numerical Analysis and Experimental Studies" ma na celu dostarczenie nowatorskich rozwiązań w zakresie modelowania CFD, które mogą pomóc w lepszym zrozumieniu mechanizmów hemolizy w kontekście miażdżycy. Kluczowym osiągnięciem tego badania jest opracowanie reologicznego modelu krwi, opartego na modelach populacji, który został zaimplementowany w środowisku Ansys Fluent. Symulacje przeprowadzone w tym programie zostały zweryfikowane poprzez eksperymenty, polegające na druku 3D fragmentów żył oraz pomiarze rozkładów prędkości przepływu metodą PIV (Particle Image Velocimetry). Uzyskane wyniki wykazały doskonałą zgodność między modelowaniem a danymi eksperymentalnymi, co podkreśla wysoką dokładność i wiarygodność zastosowanych metod. Analiza ta nie tylko znacznie przyczynia się do zrozumienia mechanizmów hemolizy w kontekście miażdżycy, ale także otwiera nowe możliwości dla zastosowań klinicznych w diagnostyce i leczeniu pacjentów. Wybrana zatem przez Pana mgr inż. Krystiana Jędrzejczaka tematyka badań jest niezwykle ciekawa, interdyscyplinarna, a jej wybór jest jak najbardziej uzasadniony.

Ocena struktury pracy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska autorstwa Pana mgr inż. Krystiana Jędrzejczaka liczy 67 stron, stanowiących monografię do wybranych sześciu publikacji będących podstawą rozprawy doktorskiej, które to publikacje zostały zamieszczone na końcu pracy. Na wstępie autor przedstawia swój profil oraz dorobek naukowy, po którym znajduje się obszerna nomenklatura symboli i skrótów wykorzystywanych w dalszej części pracy.

Rozprawę przedstawiono jako autoreferat oparty o sześć monotematycznych publikacji, w których doktorant jest pierwszym autorem. Treści artykułów są ze sobą powiązane tematycznie i stanowią logiczne rozwinięcie tematu badań. Przedstawione publikacje ukazały się w anglojęzycznych czasopismach naukowych punktowanych przez MNiSW: Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation (w 2023 IF: 3.9 Punkty MNiSW: 100), International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering (w 2023 IF: 2.41 Punkty MNiSW: 100), Chemical Engineering Research and Design (w 2023 IF: 3.9 Punkty MNiSW: 140), Biomedicines (w 2024 IF: 4.7 Punkty MNiSW: 100), i dwa artykuły w Journal of Clinical Medicine (w 2024 IF: 3.0 Punkty MNiSW: 140). Dodatkowo

Doktorant wygłosił 12 prezentacji na konferencjach krajowych i zagranicznych, brał udział w trzech projektach badawczych oraz odbył 3-miesięczny staż naukowy na uniwersytecie w Leeds (UK). Świadczy to o dużym doświadczeniu i wiedzy Doktoranta, co potwierdzają również uzyskane wyróżnienia nadane przez JM Rektora PW.

Na zasadniczą część opracowania składa się: syntetyczny wstęp (rozdz. 1) nakreślający problematykę występowania chorób miażdżycy, jej przyczyn oraz aktualnych metod jej diagnozowania; rozdział 2 przedstawia cel i zakres opracowania oraz przedstawia pięć tez badawczych postawionych w pracy. Dalsza część monografii stanowi przewodnik po publikacjach naukowych, w którego skład wchodzi opis modelu populacji i jego zastosowania w symulacji właściwości reologicznych krwi, metoda implementacji modelu do środowiska CFD, opis prac eksperymentalnych obejmujących wydruk 3D fragmentów żył w oparciu o dane medyczne, badania rozkładów prędkości przepływu mieszanin reprezentujących właściwości krwi z zastosowaniem laserowych metod PIV oraz wytyczne w zastosowaniu modelowania CFD w dalszych badaniach i diagnostyce chorób układu krwionośnego. Na końcu monografii możemy znaleźć spis grafik i tabel, wykorzystaną bibliografię oraz załączone publikacje stanowiące podstawę wniosku.

Rozprawa doktorska napisana jest w języku angielskim, co stanowi jej dodatkowy atut. Praca napisana jest poprawnie językowo i stylistycznie, ma estetyczną szatę graficzną. Pod względem technicznym praca napisana jest bardzo dobrze. Przejrzysty układ stron i jasne odwołania do tabel i zdjęć powodują, że pracę czyta się szybko i przyjemnie. Wyniki badań są dobrze opracowane i przedstawione w formie dobrze sformatowanych i przejrzystych wykresów oraz tabel.

Oceniając pracę pod względem technicznym recenzent ma dwie uwagi:

1. w przedstawionej nomenklaturze zabrakło jednostek stosowanych wielkości;
2. w pracy pojawiają się błędy językowe, np. błędne zastosowanie przedimków *a*, *an* i *the* oraz zmiany czasu lub formy pisania np. zmiana z czasu przeszłego prostego na stronę bierną. W kilku miejscach zauważono zastosowanie form językowych niestosowanych w formalnych opracowaniach naukowych, jak na przykład zwrot „ (...) allows you to (...)”.

Ocena merytoryczna rozprawy

Prezentowanie wyników pracy przez Doktoranta ma logiczny układ przyczynowo skutkowy. Na początku przedstawiono metody modelowania właściwości reologicznych krwi dostępne w literaturze, a następnie zaproponowano własny model, oparty o wykorzystanie modeli bilansu populacji. Zaprezentowano metodę zaimplementowania zaproponowanego modelu reologicznego do

oprogramowania CFD. Symulacje przepływu krwi wykonano na trójwymiarowych modelach żył odtworzonych na podstawie zdjęć z tomografii komputerowej. W celu potwierdzenia poprawności wykonanych obliczeń symulacyjnych wydrukowano trójwymiarowe modele tętnic z wykorzystaniem metody stereolitografia 3D z wykorzystaniem transparentnych żywic. Wykorzystanie metody PIV pozwoliło na porównanie rozkładów prędkości przepływającej krwi otrzymanych z symulacji CFD z danymi eksperymentalnymi, uzyskując bardzo dobre wyniki i dokładność w obliczeniach hydrodynamicznych.

Ze względu na specjalizację recenzenta, w poniższym opracowaniu skupiono się na ocenie pracy pod względem procesowym oraz merytorycznym. Część pracy odnosząca się do zagadnień medycznych, w której określano np. wpływ szybkości ścinania krwi na możliwość występowania schorzeń, oceniona została pod względem otrzymanych wyników i ich przedstawienia, a nie medycznej interpretacji ich znaczenia. W tej materii recenzent nie ma wystarczających kompetencji do wyrażania opinii. Przedstawiona do recenzji praca ma w opinii recenzenta wysoki poziom merytoryczny i jest dobrym przykładem interdyscyplinarnego połączenia modelowania matematycznego, badań eksperymentalnych i wiedzy medycznej, jednak podczas jej lektury nasunęły się następujące uwagi i pytania:

1. Ogólna budowa pracy - monografia opisana jest niezwykle zwięźle. Recenzent wielokrotnie musiał wczytywać się w przedstawione publikacje Doktoranta w celu poszukiwania dokładniejszych opisów, jak przygotowano modele CFD lub wykonanie wydruków 3D. Tematyka pracy jest bardzo interesująca, ale jej przedstawienie jest oszczędne w szczegóły, które rodzą następne pytania.
2. W Publikacji P2, na zdjęciach 13 i 16 przedstawiających pole wektorowe rozkładu prędkości krwi, widać wygenerowaną warstwę przyścienną. W opisie recenzent znalazł tylko krótki opis, że jest ona dziesięciowarstwowa z równomiernym skokiem wzrostu grubości poszczególnych warstw. Czy grubość pierwszej warstwy była wyliczana np. z wykorzystaniem założenia, że wartość współczynnika y^+ jest równa 1?
3. We wszystkich symulacjach wykonano test niezależności wyniku od gęstości siatki. Czy badano także wpływ kształtu elementu na wyniki końcowe? Czy porównywano otrzymane wyniki testu z jakimiś wartościami mierzonymi eksperymentalnie (np. spadek ciśnienia)?
4. Druk 3D - wykorzystanie druku 3D z zastosowaniem transparentnych żywic światłoutwardzalnych jest bardzo ciekawym aspektem pracy. Technologia druku 3D jest ciągle udoskonalana, co pozwala na uzyskiwanie coraz to dokładniejszych modeli tworzonych na podstawie rysunków CAD. Modele te wykorzystano w badaniach PIV i tu rodzi się pytanie: czy ciecz stosowana do pomiaru była zawieszoną w celu ustalenia rozkładu prędkości? Wydruk 3D nie jest w pełni

transparentny. Jak ta niedoskonałość była uwzględniana w pomiarach PIV?

5. Czy wyniki badań i symulacji miały potwierdzenie w badaniach medycznych?

Przedstawiona do recenzji praca doktorska jest opracowaniem nierównym. Z jednej strony prezentuje dużą wiedzę i umiejętności Doktoranta, przejawiające się w bogatym dorobku naukowym. Jest bardzo interesująca tematycznie. Z drugiej strony zwięzłe przedstawienie opracowanych metod i modeli w monografii zmusiły recenzenta do poszukiwania informacji w załączonych artykułach. Nie umniejsza to jakości rozprawy a jedynie utrudniało zrozumienie myśli przewodniej opracowania.

Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Krystiana Jędrzejaka nie budzi zastrzeżeń, zarówno pod względem formalnym, jak i merytorycznym. Rozprawa została sformułowana poprawnie i wnosi wiele elementów nowości naukowej. Rozprawa napisana jest bardzo dobrym językiem angielskim. Opracowanie edytorskie i forma graficzna pracy są poprawne. Przedstawione wyniki poszerzają wiedzę na temat sposobów modelowania właściwości reologicznych krwi z zastosowaniem Modelu Bilansów Populacji w celu przewidywania zachodzenia zjawiska hemolizy krwi. Przedstawione opracowania stanowią oryginalny i samodzielny dorobek naukowy autora.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Krystiana Jędrzejczaka spełnia wymagania formalne w odniesieniu do pracy doktorskiej oraz spełnia wymogi ustawy - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku. W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Chemicznej Politechniki Warszawskiej o przyjęcie pracy i dopuszczenie mgr inż. Krystiana Jędrzejczaka do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Biorąc pod uwagę bardzo wysoki poziom merytoryczny recenzowanej pracy i istotny wkład w stan wiedzy naukowej, wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Dr hab. inż. Maciej Jaskulski, profesor PŁ

.....