

RECENZJA

pracy doktorskiej mgra inż. Arkadiusza Antonowicza
pt. „Nieinwazyjne metody pomiaru pola przepływu w fantomach układu krwionośnego
wytworzonych przy użyciu druku 3D”

1. Informacje ogólne

Praca wykonana została na Politechnice Warszawskiej pod kierunkiem promotora prof. dra hab. inż. Łukasza Makowskiego oraz promotora pomocniczego dra inż. Krzysztofa Wojtasa.

Recenzję opracowano w oparciu o pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynierii Chemicznej Politechniki Warszawskiej, prof. dra hab. inż. Tomasza Sosnowskiego z dnia 16 października 2024 w sprawie powołania na recenzenta.

Pracę doktorską przedstawiono na 205 stronach, zawiera ona dziewięć rozdziałów, które poprzedza Podziękowanie, Streszczenie w języku polskim i angielskim, Spis skrótów, Spis treści, kończy natomiast rozdział 9 tzw. Podsumowanie oraz Bibliografia, Spis akronimów, rysunków i tabel. Dysertacja zawiera 115 pozycje rysunków, 7 pozycji tabel oraz wykaz literatury - 128 pozycji oraz 27 linków do stron internetowych (pozycje literaturowe od 129 do 155).

2. Omówienie treści pracy

We *Wprowadzeniu* (rozdział 1) Doktorant wskazuje, że choroby układu krążenia są najczęstszą przyczyną zgonów na świecie, odpowiadając za około 28-32% wszystkich przypadków śmiertelnych rocznie. Wpływ na ich rozwój mają czynniki cywilizacyjne, takie jak dieta, brak aktywności fizycznej i stres. W krajach rozwiniętych liczba zgonów spada, podczas gdy w rozwijających się rośnie. Postęp technologiczny, zwłaszcza druk 3D, umożliwia dokładniejsze odwzorowanie struktur układu i analizę mechaniki płynów, co wspiera diagnostykę i leczenie, choć istnieją wyzwania związane z precyzją.

Celem pracy doktorskiej opisanej w rozdziale 2 pt. *Cel i zakres pracy*, jest opracowanie metodyki wykorzystania druku 3D w badaniach mechaniki płynów przy użyciu nieinwazyjnych technik, takich jak PIV i PLIF. Technologia ta może zastąpić tradycyjne metody tworzenia fantomów układu krwionośnego, poprawiając dokładność i efektywność badań.

W rozdziale 2. *Układ sercowo-naczyniowy*, opisuje układ sercowo-naczyniowy, zwany również krążeniowym, obejmuje układ krwionośny i limfatyczny. Jego główną funkcją jest transport tlenu, składników odżywczych i usuwanie produktów przemiany materii. Serce działa jak pompa, bijąc średnio 60–70 razy na minutę i pompując 5–6 litrów krwi (na minutę). Naczynia dzielą się na tętnice, żyły i naczynia włosowate. Krew odpowiada za transport tlenu i obronę organizmu. Prawidłowe funkcjonowanie układu jest kluczowe, a jego dysfunkcje mogą prowadzić do poważnych chorób. Wczesna diagnostyka i lepsze zrozumienie procesów pomagają w skutecznym leczeniu.

Rozdział kończy (2.1. *Zagadnienie problemów układu krwionośnego*) stwierdzeniem, że miażdżyca, jako główna przyczyna chorób układu krwionośnego, jest kluczowym schorzeniem analizowanym w pracy doktorskiej. Jej powikłania, takie jak zawał serca czy udar mózgu, stanowią istotny problem zdrowotny.

Rozdział 3, pt. *Nieinwazyjne techniki pomiarowe mechaniki płynów w zastosowaniu medycznym*, opisuje nieinwazyjne techniki pomiarowe mechaniki płynów, koncentrując się na anemometrii obrazowej (PIV) w badaniu układu krążenia. Badania dzielą się na in vivo, prowadzone na organizmach, oraz in vitro, realizowane na modelach laboratoryjnych. Techniki in vivo, jak Echo-PIV i MRI, pozwalają na analizę rzeczywistych procesów, lecz są kosztowne. Badania in vitro, z wykorzystaniem modeli silikonowych lub druku 3D, są powszechniejsze i dokładniejsze. Rzadziej stosowany X-ray PIV pozwala badać nieprzezroczyste płyny, choć jest szkodliwy. Rozwój technologii poprawia precyzję metod obrazowych.

Technika PLIF (3.2. *Zastosowanie techniki obrazowej planarnej laserowo indukowanej fluorescencji w badaniach ilościowych i jakościowych układu krwionośnego*) umożliwia analizę ilościową i jakościową układu krwionośnego poprzez śledzenie przepływu płynów, głównie w modelach silikonowych.

Druk 3D (rozdział 3.3) znajduje szerokie zastosowanie w medycynie, umożliwiając tworzenie precyzyjnych replik anatomicznych. Fantomy narządów wspierają badania i przygotowania chirurgiczne. Technologia ta jest wykorzystywana w protetyce oraz produkcji narzędzi chirurgicznych, obniżając koszty i poprawiając precyzję. Biodruk pozwala na tworzenie konstrukcji tkankowych jako alternatywy dla przeszczepów.

Popularność tej technologii potwierdza jej wdrożenie na Gdańskim Uniwersytecie Medycznym.

Doktorant zamyka ten rozdział (3.4. *Symulacje obliczeniowej mechaniki płynów w zastosowaniu medycznym*) stwierdzeniem, że symulacje CFD umożliwiają analizę zachowania płynów, oferując efektywne narzędzie, które wymaga walidacji eksperymentalnej dla zapewnienia dokładności.

W rozdziale 4, pt. *Bezinwazyjna technika pomiarowa badania rozkładu prędkości elementów płynu – laserowa anemometria obrazowa*, Doktorant stwierdza, że laserowa anemometria obrazowa (PIV) to bezinwazyjna technika analizy rozkładu prędkości płynów, rozwijana na bazie wielowiekowych osiągnięć mechaniki płynów. Współczesne technologie pozwalają na pomiary o wysokiej rozdzielczości, znajdujące zastosowanie w biofizyce, angiologii i hematologii. Rozdział 4.2 opisuje mechanizm ruchu cząstek w płynie.

Planarna anemometria obrazowa (2D2C PIV) (rozdział 4.3. *Zasady działania planarnej laserowej anemometrii obrazowej*) to optyczna metoda, określająca przestrzenny rozkład prędkości płynów przez analizę ruchu cząstek znacznikowych oświetlanych laserem i rejestrowanych kamerą. Aparatura składa się z kamery, lasera impulsowego, optyki oraz jednostki sterującej. Podstawą działania jest analiza przemieszczenia cząstek, umożliwiająca obliczenie wektorów prędkości i tworzenie map przepływu. Technika PIV pozwala na pomiary w czasie rzeczywistym oraz analizę zarówno małych, jak i dużych obszarów. Przeprowadzenie pomiaru wymaga transparentności badanego płynu oraz dostępu optycznego. Proces obejmuje analizę zjawiska, dobór rodzaju PIV i aparatury, ustawienie lasera, konfigurację kamery i kalibrację systemu. Po zakończeniu pomiarów następuje analiza obrazów i interpretacja wyników.

System PIV (rozdział 4.3.2. *Komponenty systemu laserowej anemometrii obrazowej*) składa się z lasera impulsowego, kamery detekcyjnej, cząstek posiewu i oprogramowania. W zależności od konfiguracji, mogą być dodane elementy synchronizujące. Najczęściej stosowane lasery Nd:YAG i Nd:YLF charakteryzują się wysoką energią impulsów i krótkim czasem trwania.

Kamery PIV, wykorzystujące matryce CCD i CMOS, umożliwiają wykonywanie zdjęć z bardzo krótkim odstępem czasu. Ich kluczowe parametry to rozdzielczość, rozmiar piksela, głębia obrazu i częstotliwość pomiarowa. Skuteczność kamer zależy od jakości sensora i metod redukcji szumów.

Optyka kamer, odpowiednio dobrane obiektywy, wpływa na jakość rejestrowanego obrazu. Parametry, takie jak ogniskowa i apertura, kontrolują kąt widzenia, jasność oraz

głębie ostrości. Wady optyczne, takie jak dystorsja czy aberracje, mogą wpływać na jakość obrazu i wymagają korekcji.

Techniki optyczne, takie jak PIV, wymagają cząstek znacznikowych (posiewu), które umożliwiają śledzenie ruchu płynu. Dobór cząstek powinien uwzględniać ich wpływ na przepływ, odpowiedni rozmiar, trwałość oraz właściwości optyczne. PIV opiera się na rozpraszaniu światła, którego skuteczność zależy od wielkości cząstek, energii światła i przejrzystości środowiska. Najczęściej występuje rozproszenie Mie, gdy rozmiar cząstek odpowiada długości fali lasera. Do badań używa się mikrokulek lub baniek mydlanych, dostosowanych do badanego środowiska. Fluorescencyjne cząstki, wykorzystywane w μ PIV, emitują światło na innej długości fali, co eliminuje zakłócenia optyczne. Jednak ich sygnał jest słabszy, co wymaga dostosowania mocy światła i czułości kamery.

Układ akwizycji i synchronizacji zarządza pracą elementów systemu, takich jak laser i kamery, przy użyciu precyzyjnych sygnałów napięciowych. Jego podstawą jest synchronizator, osiągający rozdzielczość ≤ 10 ns i niepewność rzędu na poziomie $\leq 0,1$ ns. Dokładna synchronizacja minimalizuje niepewność pomiarową, a zaawansowane systemy wykorzystują fotodiody do precyzyjnych pomiarów czasowych, szczególnie przy wysokich prędkościach przepływu i w mikroskali, gdzie czasy między impulsami spadają poniżej 10 μ s.

Konfiguracja systemu PIV (4.3.3. *Konfiguracja systemu PIV*) obejmuje ustawienie lasera, kamery i optyki dla optymalnych warunków pomiarowych. Proces rozpoczyna się od określenia obszaru badawczego i ustawienia wiązki laserowej za pomocą zwierciadeł lub światłowodów. Kamera musi być precyzyjnie ustawiona i skalibrowana pod odpowiednim kątem. Po kalibracji przeprowadzane są pomiary i analiza danych.

Zaawansowana analiza obrazów (4.3.4. *Zaawansowana analiza obrazów i map wektorowych*) to najbardziej czasochłonny etap, podczas którego mogą wystąpić trudne do wykrycia błędy. Maskowanie pozwala wykluczyć z analizy obszary statyczne i dynamiczne, poprawiając dokładność wyników. Kontrast między obiektem a tłem jest kluczowy dla skuteczności maskowania, szczególnie w μ PIV.

Redukcja poziomu tła (4.3.4.2. *Redukcja poziomu tła – zwiększanie kontrastu sygnału*) zwiększa kontrast sygnału poprzez eliminację statycznych elementów. Stosuje się techniki odjęcia uśrednionego tła lub filtry, takie jak Low-pass i Gaussian. Proces ten wymaga dużej liczby zdjęć i wysokiego stosunku sygnału do szumu (SNR), aby uniknąć utraty danych.

Filtrowanie map wektorowych (4.3.4.4. *Filtrowanie map wektorowych*) w analizie PIV eliminuje błędne wektory mimo zaawansowanych algorytmów, takich jak AdaptivePIV.

Proces obejmuje korekcję i walidację, usuwanie nieprawidłowych danych oraz interpolację wartości na podstawie sąsiednich wektorów. Przykłady map pokazują odrzucone wektory i wyniki po filtracji. Filtracja umożliwia dalszą analizę przepływu, np. uśrednianie map czy analizę wirowości.

Stereoskopowa anemometria obrazowa (StereoPIV) (4.4. *Zasada działania stereoskopowej laserowej anemometrii obrazowej*) mierzy trójwymiarowy wektor prędkości cząstek za pomocą dwóch kamer ustawionych pod kątem. Poprawę ostrości obrazu zapewnia konfiguracja Scheimpfluga. System zawiera kamery, moduły korekcji oraz płytę kalibracyjną. W mikroskali stosuje się mikroskop stereoskopowy.

Konfiguracja StereoPIV (4.4.3 *Konfiguracja i kalibracja stereoskopowej laserowej anemometrii obrazowej*) zależy od rozmieszczenia kamer, optymalnie w symetrycznym układzie 90° , ale dopuszcza się kąty 30° – 120° . Kalibracja konwertuje piksele na jednostki metryczne i kompensuje wpływ położenia obrazu, wykorzystując płytę kalibracyjną lub mikrometryczny przesuw. W mikroskali uwzględnia się współczynnik załamania światła. Planarna laserowo indukowana fluorescencja (PLIF) (5. *Bezinwazyjna technika pomiarowa badania rozkładu stężenia elementów płynu – laserowo indukowana fluorescencja*) mierzy stężenie lub temperaturę płynu, wykorzystując fluorescencję wzbudzaną laserem. Intensywność emisji zależy od stężenia substancji fluorescencyjnej. Stosuje się barwniki, np. rodaminy, oraz filtry optyczne eliminujące światło wzbudzające. Kalibracja przelicza intensywność sygnału na wartości rzeczywiste i kompensuje zmienność lasera.

Technika PLIF opiera się na równaniu fluorescencji uwzględniającym energię wzbudzenia, absorpcję i wydajność kwantową. Pomiar w gazach wymaga zamkniętych komór i odpowiednich substancji. Wyzwaniem jest stabilność barwników i precyzyjna konfiguracja optyki.

Kalibracja PLIF (5.2 *Kalibracja planarnej laserowo indukowanej fluorescencji*) obejmuje zdjęcia przy rosnącym stężeniu lub temperaturze, z zachowaniem zasad liniowości i identycznych warunków optycznych. W mikroskali procedura różni się objętością próbkowania. PLIF stosuje się w analizie mieszania i wymiany ciepła, a w połączeniu z PIV daje informacje o efektywności procesów, np. w badaniach medycznych.

Technologie druku 3D (6. *Opracowanie procedury wytwarzania geometrii układu krwionośnego do pomiarów laserowych przy wykorzystaniu druku 3D*) do geometrii układu krwionośnego obejmują materiały jak silikon i żywice transparentne. Druk SLA i

LFS zapewnia wysoką precyzję i jakość powierzchni, co jest kluczowe dla pomiarów PIV i PLIF. Nowoczesne żywice oferują biokompatybilność i elastyczność.

Stereolitografia (SLA) utwardza żywicę laserem, a LFS poprawia jakość powierzchni. Transparentne wydruki mogą być polerowane, by zapewnić odpowiednią przejrzystość do pomiarów optycznych. Wybór materiału zależy od przejrzystości, twardości i elastyczności.

Współczynnik załamania światła (RI) (6.5 *Współczynnik załamania światła*) jest kluczowy w pomiarach PIV w układach naczyniowych. Prawo Snelliusa opisuje zmianę kierunku światła między ośrodkami. W pomiarach dokładność wymaga dopasowania RI materiałów i cieczy.

Do pomiaru współczynnika załamania światła stosuje się refraktometr np. Abbego, oparty na metodzie Wollanstone-Kohlrauscha i prawie Snelliusa. Pomiar polega na wyznaczeniu kąta granicznego, w którym światło załamuje się na granicy dwóch ośrodków. W przypadku materiałów elastycznych, jak druk 3D, stosuje się metody pośrednie, wykorzystując ciecze o różnych współczynnikach RI, co pozwala na dopasowanie RI materiału i cieczy.

Wprowadzenie żywicy BioMed Elastic (6.6.3 *Ciecz immersyjna*) zapoczątkowało nową metodykę PIV, wykorzystującą ciecz immersyjną do eliminacji matowości powierzchni modeli. Zastosowanie zbiorniczka z cieczą o dopasowanym RI pozwoliło usunąć nierówności powierzchni. Opisano również nowy projekt obudowy do precyzyjnych pomiarów PIV oraz dobór cieczy krwiopodobnej, wraz z jej składem i właściwościami reologicznymi.

W dysertacji przedstawiono wyniki badań PIV i PLIF (7. *Rezultaty*) w modelach układów krwionośnych z druku 3D, bazujących na danych z tomografii pacjenta z miażdżycą. Pomiarzy PIV przeprowadzono przy użyciu kamery o wysokiej rozdzielczości i lasera impulsowego, kalibrując je specjalnym elementem. Wyniki umożliwiły dokładną analizę przepływu, uwzględniając wpływ liczby Reynoldsa.

Porównanie wyników PIV z CFD wykazało dobrą zgodność, zwłaszcza przy niskich liczbach Reynoldsa. Różnice pojawiły się przy ścianach naczynia z powodu niedopasowania współczynnika RI. Wyniki potwierdziły skuteczność metodyki i przydatność druku 3D w badaniach układów krwionośnych.

Model nr 2 (7.1.2. *Model nr 2 – samodzielne przygotowanie modelu z druku 3D*) dotyczy samodzielnego przygotowania modelu tętnicy z druku 3D, wykorzystanego do badań przepływu cieczy. Określono parametry wydruku i sposób przygotowania do pomiarów. Model zawiera przewężenie symulujące zmiany miażdżycowe, a ciecz badawcza ma RI

zgodny z materiałem druku. Wyniki badań wykazały dobrą zgodność z obliczeniami CFD.

Model nr 3 (7.1.3. *Model nr 3 – model tętnicy szyjnej ze zmianą miażdżycową w wydruku 3D z zastosowaniem cieczy immersyjnej*) analizuje przepływ przez tętnicę szyjną z miażdżycą, wykonaną w druku 3D z cieczą immersyjną dla poprawy jakości powierzchni. Użycie cieczy o zgodnym RI pozwoliło na uzyskanie gładkiej powierzchni, eliminując matowość i zarysowania.

Model tętnicy z miażdżycą był używany do pomiarów PIV przy przepływie 4 ml/s. Analiza obejmowała obszar ekspozycji, rozdzielczość kamery i czas między impulsami lasera, a wyniki porównano z symulacjami CFD, wykazując podobne wzorce przepływu. Zastosowanie cieczy immersyjnej i szkiełka mikroskopowego poprawiło jakość obrazu. Model nr 4 (7.1.4. *Model nr 4 – wariant bifurkacji ze zmianą miażdżycową*) dotyczył analizy przepływu przez tętnicę wieńcową z bifurkacją i miażdżycą. Zbadano podział strumienia, ciśnienie na wlocie i spadek ciśnienia w trzech wariantach geometrii. Wyniki eksperymentalne porównano z CFD, uzyskując dokładne obrazy przepływu.

Modele nr 5 i 6 (7.1.5. *Modele nr 5 i 6 – model tętnicy szyjnej zdrowej i ze zmianą miażdżycową w wydruku 3D*) obejmowały zdrową i zmienioną miażdżycowo tętnicę szyjną, drukowane z żywicy elastycznej. Pomiary PIV przeprowadzono w zbiorniku z cieczą immersyjną, analizując wpływ elastyczności na wyniki. Porównania wykazały różnice w prędkości przepływu, szczególnie w przewężeniach.

Analiza wirowości ujawniła, że największe wartości pojawiały się w miejscach zwężeń. W tętnicy chorej wartości te były dziesięciokrotnie wyższe niż w zdrowej. Obliczenia Q-kryterium i tensora szybkości ścinania pozwoliły zidentyfikować obszary o wysokim ryzyku hemolizy.

Profil prędkości użyto do oceny poprawności wyników. W modelu tętnicy z miażdżycą wykazano szybkie zmiany w przewężeniu i obecność silnych wirów stabilizujących strumień.

Badania 2D3C PIV (7.2. *Wyniki badań stereoskopowej laserowej anemometrii obrazowej w mikro-skali*) w mikro-skali potwierdziły przydatność metody w modelach 3D. Początkowe trudności z jakością powierzchni rozwiązano dzięki cieczy immersyjnej. Kalibracja mikroskopu uwzględniła różnice w załamaniu światła. Pomiary wykazały precyzję w analizie przepływów trójwymiarowych.

Badania mikro-skalowe (7.3. *Wyniki badań planarnej laserowo indukowanej fluorescencji w mikro-skali*) planarnej laserowo indukowanej fluorescencji (PLIF) wykorzystywały aparaturę PIV firmy Dantec Dynamics, obejmującą oprogramowanie

Dynamic Studio, kamerę wysokiej rozdzielczości, laser dwu-impulsowy i układ optyczny. Modele tętnic wykonane w technologii druku 3D badano z roztworem rodaminy 6G jako barwnika fluorescencyjnego.

Pomiary na modelu z przewężeniem dwustronnym umożliwiły analizę rozkładu stężenia płynu w czasie. Kalibracja pikselowa zapewniła precyzję wyników, a różne strumienie przepływu pozwoliły określić czas przebywania płynu i wpływ warunków eksperymentalnych. Stwierdzono różnice w charakterystyce przepływu oraz możliwość zawyżenia wartości stężenia.

Badania modelu tętnicy szyjnej wykazały liniową zależność czasu pojawienia się sygnału od natężenia przepływu. Kalibracja pozwoliła określić czas transportu i osiągnięcia docelowego stężenia, co jest istotne w analizach medycznych.

Zastosowanie druku 3D, jak to opisał Doktorant w rozdziale 8. *Dyskusja*, w badaniach układu krwionośnego umożliwia tworzenie precyzyjnych modeli o odpowiednich właściwościach optycznych i mechanicznych. Kluczowe etapy obejmują przygotowanie modeli, kalibrację układu optycznego oraz pomiary. Dopasowanie współczynnika załamania światła i właściwa konfiguracja aparatury są kluczowe dla dokładności wyników.

Przeprowadzone badania (8.2. *Rozbudowa systemu pomiarowego oraz system idealny do pomiarów laserowej anemometrii obrazowej w modelach fragmentów układu krwionośnego*) były ograniczone przez częstotliwość pomiarową. Idealny system PIV powinien osiągać 20 kHz, jednak komercyjne kamery są kosztowne. Laserowe systemy PIV mogą osiągać 40 kHz, lecz prowadzi to do spadku energii impulsu. Trójwymiarowe obrazowanie przepływu wymaga zaawansowanej aparatury, a pompa powinna zapewniać pulsacyjny przepływ zbliżony do pracy serca.

Doktorant definiuje idealny system PIV który powinien zawierać:

- 2 kamery 20 kHz, 1 Mpix,
- optykę do pomiarów makro i mikro,
- laser 2x20 mJ,
- urządzenie synchronizujące,
- stół optyczny,
- stoliki XYZ,
- czujniki ciśnienia, temperatury i przepływu,
- pompę membranową lub tłokową,
- drukarkę SLA do modeli.

System ten precyzyjnie odwzorowałby warunki układu krwionośnego i zwiększył dokładność pomiarów.

Dysertację zamyka podsumowanie, w której Doktorant stwierdza, że praca dotyczyła badań schorzeń układu krwionośnego przy użyciu metod eksperymentalnej mechaniki płynów i druku 3D. Opracowano metodykę pomiarów PIV i PLIF w modelach o złożonych geometriach. Dostosowano współczynnik załamania światła, stosując roztwory soli jodku sodu.

Następnie przeprowadzono modyfikacje procedur przygotowania modeli, co poprawiło jakość obrazów i zmniejszyło błędy. Użycie cieczy immersyjnej i szkiełka mikroskopowego zwiększyło precyzję pomiarów stereoskopowych PIV.

Wykorzystano elastyczne wydruki 3D, imitujące tętnice, co zaowocowało interdyscyplinarną publikacją. Opracowano uniwersalny opis procedury PIV dla modeli 3D, wspierający dalszy rozwój diagnostyki chorób układu krwionośnego.

3. Ocena pracy

3.1. Wybór tematu rozprawy

Jak to zostało wspomniane we wstępie dysertacji, choroby układu krążenia są główną przyczyną zgonów na świecie w XXI wieku, stanowiąc poważne wyzwanie dla współczesnej medycyny i inżynierii biomedycznej. Rosnąca liczba przypadków oraz ich konsekwencje zdrowotne i ekonomiczne podkreślają konieczność prowadzenia badań nad tym zagadnieniem. Pomimo postępów w diagnostyce i leczeniu, choroby układu sercowo-naczyniowego nadal stanowią istotny problem zdrowia publicznego, szczególnie w krajach rozwijających się. Dysertacja poruszająca temat zastosowania nowoczesnych technologii, takich jak druk 3D, w badaniach nad układem krążenia jest zatem uzasadniona i wpisuje się w globalne trendy naukowe i technologiczne.

Zastosowanie technologii druku 3D otwiera nowe możliwości dla badań nad układem krążenia, umożliwiając precyzyjne odwzorowanie skomplikowanych struktur naczyń krwionośnych oraz testowanie różnych scenariuszy przepływowych. Dzięki tej technologii możliwe jest tworzenie realistycznych modeli, które pozwalają na lepsze zrozumienie procesów biomechanicznych i fizjologicznych zachodzących w organizmie człowieka. Inżynieryjne podejście do badań pozwala na analizę czynników mechanicznych, takich jak naprężenia czy odkształcenia naczyń, które mają kluczowe znaczenie w patogenezie chorób układu krążenia.

Kolejnym istotnym aspektem celowości dysertacji jest brak wystarczających badań dotyczących zastosowania druku 3D w pomiarach przepływów krwi. Dotychczasowe badania skupiały się głównie na konwencjonalnych metodach obrazowania, takich jak ultrasonografia czy rezonans magnetyczny. Nowatorskie podejście, obejmujące zastosowanie planarnych technik laserowych, takich jak fluorescencja indukowana laserowo, pozwala na uzyskanie nowych danych dotyczących dynamiki przepływów, co może prowadzić do udoskonalenia metod diagnostycznych oraz poprawy skuteczności terapii.

Dysertacja wnosi również wkład w rozwój technologii diagnostycznych, podkreślając potrzebę optymalizacji procesów przygotowania i użycia druku 3D w badaniach medycznych. Problemy związane z jakością powierzchni wydruków, kalibracją przyrządów pomiarowych oraz dokładnością odwzorowania geometrii są istotnymi wyzwaniami, które należy rozwiązać, aby technologia ta mogła być szerzej stosowana w praktyce klinicznej. Rozwiązanie tych problemów pozwoli na uzyskanie bardziej wiarygodnych wyników badań oraz skuteczniejsze wykorzystanie modeli 3D w edukacji medycznej i planowaniu zabiegów chirurgicznych.

Podsumowując, prowadzenie badań w obszarze zastosowania technologii druku 3D w diagnostyce i badaniach nad układem krążenia jest w pełni uzasadnione z perspektywy medycznej, inżynierskiej i społecznej. Wyniki takiej dysertacji mogą przyczynić się do poprawy skuteczności diagnostyki, personalizacji terapii oraz lepszego zrozumienia mechanizmów powstawania chorób układu krążenia. Dzięki temu możliwe będzie opracowanie nowych metod leczenia, a także bardziej efektywne zapobieganie tym chorobom w przyszłości.

Cel i zakres rozprawy został zdefiniowany w rozdziale 2:

Celem niniejszej pracy jest opracowanie metodyki pozwalającej na najefektywniejsze wykorzystanie szybko rozwijającej się technologii druku 3D w badaniach eksperymentalnej mechaniki płynów z zastosowaniem nieinwazyjnych systemów pomiaru pola przepływu laserową anemometrią obrazową (ang. particle image velocimetry, PIV) i rozkładu stężeń obszarową laserowo indukowaną fluorescencją (ang. planar laser-induced fluorescence, PLIF). Druk 3D jest technologią przyszłości i może zastąpić dotychczasowe metody wytwarzania fantomów elementów układu krwionośnego takie jak odlewy silikonowe czy żelowe.

Rozprawa doktorska wyraźnie określa cel, jednak brakuje opisu całościowego zakresu pracy oraz jednoznacznie zdefiniowanej tezy. Moim zdaniem, mimo tych uwag, jak

wspomniałem wcześniej i chciałbym podkreślić, temat pracy doktorskiej jest trafny i istotny z naukowego, technicznego oraz praktycznego punktu widzenia.

3.2. Metodologia prowadzonych badań

Doktorant skoncentrował się przede wszystkim na prowadzeniu badań doświadczalnych. Przeprowadzone badania obejmowały szeroki zakres zagadnień, a sposób ich prezentacji, precyzja analizy oraz szczegółowa interpretacja wyników dowodzą wysokiego poziomu zaangażowania Doktoranta w realizację pracy doktorskiej. Staranność w podejściu do zagadnień badawczych oraz dbałość o szczegóły świadczą o rzetelności oraz głębokim zrozumieniu tematu dysertacji.

3.3. Ocena wyników badań i uwagi krytyczne

Do osiągnięć Doktoranta zaliczam:

1. Jedną z kluczowych zalet pracy doktorskiej jest możliwość dogłębnego i szerokiego poznania całej teorii związanej z zagadnieniem PIV (Particle Image Velocimetry) oraz tematyką badawczą, którą obejmuje rozprawa. Proces ten obejmuje zarówno zdobycie wiedzy teoretycznej, jak i praktycznej, co pozwala na kompleksowe zrozumienie badanej problematyki oraz jej kontekstu w szerszym ujęciu naukowym i poznawczym.
2. Włączenie rezultatów symulacji CFD (Computational Fluid Dynamics) do procesu porównywania wyników pomiarów, takich jak te uzyskiwane za pomocą metody PIV, stanowi istotny krok w celu uzyskania pełniejszego obrazu badanych zjawisk. Dzięki symulacjom CFD możliwe jest stworzenie wirtualnych modeli przepływów płynów, które można porównać z rzeczywistymi danymi eksperymentalnymi, co pozwala na weryfikację oraz dokładniejsze zrozumienie zachowań fizycznych w danym układzie. Tego typu integracja wymaga ścisłej współpracy w zespole, w którym inżynierowie, naukowcy oraz eksperci od analizy danych wspólnie analizują wyniki, identyfikują ewentualne niezgodności i optymalizują zarówno modele, jak i procesy eksperymentalne.
3. Próba podjęcia przeprowadzenia pomiarów w układach stereoskopowych, mająca na celu uzyskanie trójwymiarowych danych o przepływie płynów, zakończyła się sukcesem, co stanowi istotny krok w rozwoju technologii obrazowania. Zastosowanie układów stereoskopowych umożliwia uzyskanie pełnej informacji

przestrzennej o analizowanym układzie, w tym precyzyjnych pomiarów prędkości cząsteczek w trzech wymiarach, co jest kluczowe w bardziej skomplikowanych układach przepływów. Dzięki odpowiedniemu doborowi kamer, oprogramowania oraz technik analizy obrazów, udało się uzyskać wysoką jakość wyników, które umożliwiają dokładniejsze odwzorowanie rzeczywistych warunków eksperymentalnych. Sukces ten świadczy o skuteczności przeprowadzonego eksperymentu, potwierdzając, że układ stereoskopowy jest odpowiednią metodą do badania bardziej złożonych zjawisk fluidycznych, a także otwiera drzwi do szerszego wykorzystania tej technologii w przyszłych badaniach i zastosowaniach przemysłowych.

4. Pomiary w układach elastycznych stanowiły interesującą część eksperymentu, jednak szkoda, że nie zastosowano przepływu pulsacyjnego, który mógłby dostarczyć cennych informacji na temat zachowań dynamicznych w takich układach. Przepływ pulsacyjny jest szczególnie przydatny w badaniach, gdzie zmienność przepływu w czasie może wpływać na rozkład ciśnienia i deformację materiałów, co jest kluczowe w układach elastycznych.
5. Podkreślenie w pracy istotności prowadzenia pomiarów z jednoczesnym zachowaniem właściwości reologicznych podobnych do krwi, jak i zapewnieniem zgodności współczynnika załamania światła, jest kluczowe dla uzyskania wiarygodnych i dokładnych wyników eksperymentalnych. W przypadku badań nad przepływami, zwłaszcza tych, które mają odwzorowywać warunki biologiczne, takich jak przepływ krwi w naczyniach, bardzo ważne jest, aby ciecz używana w eksperymencie miała podobne właściwości reologiczne, czyli charakteryzowała się tymi samymi cechami przepływu, lepkości oraz gęstością, co krew. Tylko wtedy można uzyskać wiarygodne dane, które będą odpowiadać rzeczywistym warunkom. Dodatkowo, zgodność współczynnika załamania światła cieczy z wartością charakterystyczną dla krwi jest niezbędna, ponieważ techniki optyczne, takie jak PIV, opierają się na analizie zachowań światła przechodzącego przez medium. Różnice w współczynniku załamania światła mogłyby wprowadzić błędy w pomiarach, wpływając na dokładność i precyzyjność wyników. W związku z tym, uwzględnienie tych dwóch aspektów – reologii i współczynnika załamania światła – ma kluczowe znaczenie dla prawidłowego przeprowadzenia eksperymentów i uzyskania danych, które będą mogły być skutecznie wykorzystane w analizach biomedycznych czy inżynierskich.

Uwagi krytyczne do pracy:

1. Brakuje bardziej szczegółowego omówienia własności reologicznych krwi oraz modeli reologicznych, które są kluczowe dla zrozumienia zachowań krwi w różnych warunkach przepływu. Krew, będąca cieczą nieniutonowską, wykazuje specyficzne właściwości, takie jak zmienność lepkości w zależności od prędkości przepływu, która może się różnić w zależności od warunków fizjologicznych. Modele reologiczne, takie jak model Cassona czy model Bingham, które opisują nieniutonowskie właściwości krwi, stanowią niezbędny element w analizie tego typu płynów. Brak ich szczegółowego omówienia w pracy ogranicza pełne zrozumienie mechanizmów przepływu krwi, a także może wpłynąć na jakość i dokładność uzyskanych wyników, zwłaszcza w badaniach biomedycznych, gdzie precyzyjne odwzorowanie tych właściwości ma kluczowe znaczenie.
2. W pracy brakuje omówienia uproszczenia, jakie zastosowano w postaci przepływu ustalonego, podczas gdy w rzeczywistości przepływ w układzie krwionośnym jest pulsacyjny. Przepływ pulsacyjny, będący wynikiem rytmicznych zmian ciśnienia wywołanych skurczami serca, różni się od przepływu ustalonego, który charakteryzuje się stałą prędkością w czasie. W kontekście analiz reologicznych i hydraulicznych, warto rozważyć, kiedy takie uproszczenie może być uzasadnione, a odpowiedź na to pytanie często zależy od liczby Womersleya, która jest miarą względnego wpływu pulsacji na przepływ. Jeśli liczba Womersleya jest mała, przepływ może być traktowany jako ustalony, jednak w przypadku większych wartości tej liczby pulsacje mają znaczący wpływ na dynamikę przepływu. Omówienie charakteru przepływu pulsacyjnego, w tym jego wpływu na deformację naczyń, rozkład ciśnienia oraz lepkość płynów, jest kluczowe dla dokładniejszego odwzorowania warunków rzeczywistych w badaniach nad układami krwionośnymi i umożliwia lepsze zrozumienie efektów np. zmiany hemodynamiczne w odpowiedzi na różne parametry przepływu.
3. Zbyt dużo czasu poświęcono na teorię, która, jak sam Autor zauważył, nie ma istotnego wpływu na główne zagadnienia związane z metodą PIV. Zamiast koncentrować się na bardziej praktycznych aspektach tej technologii, takich jak zastosowanie w różnych układach przepływowych czy optymalizacja algorytmów analizy obrazów, praca skupia się na teoretycznych rozważaniach, które w mniejszym stopniu wpływają na wyniki pomiarów. Może to prowadzić do zbytniego wydłużenia wprowadzenia, kosztem bardziej bezpośrednich,

eksperymentalnych badań, które miałyby kluczowe znaczenie dla rozwoju i aplikacji metody PIV.

4. Brak wytłumaczenia, dlaczego zastosowano cząstki fluorescencyjne, mimo że możliwe było użycie klasycznych cząsteczek, stanowi niedoprecyzowanie w pracy. Zastosowanie cząsteczek fluorescencyjnych jest często wybierane, gdy zależy nam na uzyskaniu lepszej jakości obrazów, szczególnie w przypadku technik optycznych, takich jak PIV, gdzie sygnał świetlny generowany przez cząstki może być łatwiej rejestrowany w trudnych warunkach oświetleniowych. Jednakże, jeśli pomiary zostały przeprowadzone w układzie, w którym zachowano zgodność współczynnika załamania światła cieczy i elementów optycznych (np. elementów drukowanych), można by rozważyć zastosowanie klasycznych cząsteczek, które są prostsze i tańsze, a jednocześnie wystarczająco skuteczne w uzyskaniu wymaganych danych.
5. Stosowanie nazw angielskich, pomimo istnienia polskich odpowiedników, może wprowadzać niepotrzebne utrudnienia w zrozumieniu treści dysertacji, zwłaszcza dla czytelników, którzy nie są biegli w języku angielskim. Wybór angielskich terminów może być uzasadniony w kontekście powszechnego stosowania tych nazw w literaturze międzynarodowej, jednak w pracy naukowej, szczególnie skierowanej do krajowej społeczności naukowej, warto rozważyć użycie polskich odpowiedników, aby zwiększyć przystępność tekstu. Ponadto, stosowanie polskich terminów, gdzie to możliwe, może przyczynić się do popularyzacji języka naukowego w Polsce oraz ułatwić integrację wyników pracy z krajową literaturą fachową.

4. Podsumowanie

Reasumując przedstawione wyżej opinie dotyczące wyboru tematu rozprawy, sposobu analizowania, zastosowanych metod badawczych i osiągniętych efektów, stwierdzam, że Pan mgr inż. Arkadiusz Antonowicz wykazał, że potrafi formułować i rozwiązywać problemy badawcze oraz wyciągać wnioski z otrzymanych wyników. Jak Autor sam określił, pomiary stereoskopowe w przewodach wydrukowanych technologią 3D najprawdopodobniej są pierwszymi tego typu na świecie, co stanowi niezwykle osiągnięcie i podkreśla trudność przeprowadzenia takiego pomiaru w kontekście nowatorskich technologii. Pomiary w elastycznych modelach, które także zostały przeprowadzone, zasługują na uznanie, ponieważ wymagają precyzyjnego

odzworowania deformacji materiału pod wpływem przepływu, co stanowi wyzwanie metodologiczne i techniczne. Dodatkowo, podjęcie pomiarów stężeniowych LIF, wykraczających poza główny temat rozprawy, pokazuje szerokie spektrum możliwości zastosowania technologii PIV i LIF w różnych dziedzinach badawczych. Ważnym elementem pracy jest także pokazanie i omówienie metodyki pomiarowej PIV w układach drukowanych w technologii 3D, co pozwala innym badaczom, zainteresowanym podobną tematyką, na łatwiejsze zastosowanie tej technologii w swoich własnych eksperymentach, stanowiąc cenną wartość edukacyjną i praktyczną. Stwierdzam także, że posiadana wiedza, doświadczenie oraz umiejętności pozwalają mi na prowadzenie badań w dziedzinie nauk inżynieryjno -technicznych, w dyscyplinie naukowej inżynieria chemiczna, dlatego też spełnia warunki do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych.

Wnoszę, zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571), o dopuszczenie Pana mgra inż. Arkadiusza Antonowicza do obrony pracy i nadanie stopnia doktora nauk technicznych.

Po wnikliwej analizie dysertacji, dokładnym przestudiowaniu zakresu zrealizowanych badań oraz ocenie poziomu przedstawionej rozprawy, jestem przekonany, że badania prowadzone przez Doktoranta reprezentują niezwykle wysoki, światowy poziom. Są one wyjątkowo wymagające zarówno pod względem technicznym, jak i proceduralnym, a ich unikatowy charakter został potwierdzony pięcioma publikacjami zindeksowanymi w bazie Scopus (stan na 25.01.2025). W związku z powyższym uważam, że dysertacja Pana mgra inż. Arkadiusza Antonowicza w pełni zasługuje na **WYRÓŻNIENIE**.



Dr hab. inż. Sławomir PIETROWICZ, prof. uczelni