

Częstochowa, 05 Grudzień 2024

dr hab. inż. Adam Cwudziński, prof. PCz
Katedra Metalurgii i Technologii Metali,
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów
Politechnika Częstochowska
Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa
tel. 343250779
adam.cwudzinski@pcz.pl

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Arkadiusza Antonowicza pt.

„Nieinwazyjne metody pomiaru pola przepływu w fantomach układu krwionośnego wytworzonych przy użyciu metod druku 3D”

wykonana na podstawie zlecenia Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Chemiczna Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Sosnowskiego, z dnia 16 października 2024 r.

1. Wstęp

Bezkontaktowa laserowa metoda pomiaru zachowania się płynów obok metod numerycznych pozwala precyzyjnie i wiarygodnie pozyskiwać dane o mechanizmach limitujących kinetykę procesów, w których interakcja płyn – ciało stałe, płyn - płyn, lub ciało stałe – ciało stałe stanowi istotę sprawności układu. Możliwości aplikacyjne laserowej anemometrii obrazowej limitowane są jedynie zakresem wyobraźni uczonych. Odmianami laserowej anemometrii obrazowej są: metoda PIV (Particle Image Velocimetry) i metoda PLIF (Planar Laser-Induced Fluorescence). Analizując zawartość tylko jednego z najważniejszych periodyków naukowych na świecie traktującego o mechanice płynów (Journal of Fluid Mechanics) to w okresie ostatniego miesiąca, metoda laserowej anemometrii była zastosowana do badań ponad 30-krotnie przez różne ośrodki naukowe. Metody PIV/PLIF idealnie nadają się do obrazowania ewolucji struktur hydrodynamicznych formujących się w różnego rodzaju przestrzeniach badawczych od tuneli aerodynamicznych, reaktorów przepływowych i wsadowych do fantomów ludzkiego ciała. Spełniając kryteria

podobieństwa można z powodzeniem obserwować ewolucję struktur hydrodynamicznych, ich wirowość, falowanie, stabilność, propagacje, homogeniczność czy asymetryczność. Niezwykle cenne jest zastosowanie obu technik w układach w których mamy do czynienia ze zmianą stanu skupienia ośrodka ciągłego, lub współistnieniem w ośrodku ciągłym obszarów o różnym źródle turbulencji. Ponadto, w wielu układach o zmiennej geometrii, gdzie występuje transformacja przepływu uwarstwionego do przepływu turbulentnego, laserowa anemometria obrazowa jest stosowana do opisu strefy przejściowej. W tym zakresie fantomy układu krwionośnego człowieka stanowią wyzwanie nie tylko do badań w ramach fizycznych eksperymentów laboratoryjnych, ale również w kontekście modelowania numerycznego. Podjęta przez Autora dysertacji problematyka badawcza jest istotna dla rozwoju nie tylko kardiochirurgii, ale stanowi bezcenne źródło danych dla innych obszarów nauki wszędzie tam, gdzie pomiary μ PIV/ μ PLIF mają szanse być zaimplementowane (przezroczystość płynów i układów modelowych).

2. Ocena formalna pracy i wiedzy teoretycznej

Praca zawiera 115 rysunków i 7 tablic. Rozdział Bibliografia obejmuje 128 pozycji literaturowych i 27 przypisów do stron internetowych odnoszących się do zagadnień związanych z tematyką rozprawy doktorskiej. Wśród przytoczonych pozycji literaturowych są opracowania naukowe Autora dysertacji, świadczące o jego aktywności nie tylko badawczej, ale również publikacyjnej. Praca jest napisana nienagannym językiem. Niezwykle sporadycznie pojawiają się błędy językowe, znaczeniowe lub składniowe, których ilość jest tak niewielka, że w zasadzie, aż niezauważalna. W trakcie lektury pracy doktorskiej zdiagnozowano następujące błędy, których w przyszłości należy unikać przy realizowaniu opracowań w formie sprawozdań, artykułów lub monografii naukowych.

- Legendy odnoszące się do prezentowanych wyników powinny być zawsze opisane jednostkami dla analizowanych wielkości na danym rysunku np. rys. 7.8, str. 126.
- Wyniki prezentowane na rysunku w postaci map konturowych powinny być opatrzone legendą lub liniami konturowymi definiującymi określoną wartość eksponowanej wielkości np. rys. 7.9, str. 127.
- W opracowaniach w języku polskim, opisy wewnętrzne na rysunkach powinny być prezentowane w języku polskim np. rys. 7.4, str. 123.
- Dane początkowe, czy brzegowe powinny całkowicie umożliwiać reprodukcję badań przez inne zespoły badawcze. W dysertacji pojawia się np. brak informacji o odstępach

czasowym pomiędzy zdjęciami w parze dla wariantu badawczego z modelu nr 1, stałe parametry pomiarowe, str. 125.

- Rys. 7.46 w bibliografii ma błędnie opisany podpis, str. 204.

Praca doktorska Pana mgr inż. Arkadiusza Antonowicza podzielona została na 9 rozdziałów. Rozdział 1 wprowadza czytelnika w tematykę przedłożonej rozprawy doktorskiej. W rozdziale 2 Autor formuje cel pracy i precyzuje założenia które będą przedmiotem weryfikacji w toku badań eksperymentalnych. Ponadto definiuje obszar poszukiwań i uzasadnia ważność podjętego problemu w kontekście potencjału opracowanej metodyki do jej pełnej komercjalizacji. Sprawność układu naczyniowo-sercowego jest fundamentalna dla funkcjonowania człowieka, dlatego podejście inżynierskie do poszukiwania rozwiązań techniczno-technologicznych w oparciu o laserową anemometrię obrazową i fantomy ludzkiego układu krążenia wykonane technologią druku 3D jest w pełni uzasadnione. Rozdziały od 3 do 5 obejmują aktualny stan wiedzy dotyczący nieinwazyjnych technik pomiarowych stosowanych w medycynie, laserowej anemometrii obrazowej i laserowo indukowanej fluorescencji. Mgr inż. Arkadiusz Antonowicz rozpoczyna część teoretyczną od podstawowego równania Naviera-Stokesa, zasadnie, biorąc pod uwagę fakt, że praca głównie koncentruje się na diagnostyce hydrodynamiki przepływu w wybranych odcinkach układu naczyniowo-sercowego. Autor rozprawy doktorskiej podaje również równanie płynu uwzględniające cząstki w układzie, co w kontekście stosowania posiewów w modelowych ośrodkach ciągłych przy pomiarach μ PIV pozwala, czytelnikowi dostrzec złożoność techniki pomiarowej zastosowanej w dysertacji. Proces pomiaru z użyciem techniki laserowej anemometrii obrazowej jest idealnie zobrazowany na rysunku 4.3 i choć sprawia wrażenie bazowego, to pod każdym z tych etapów kryje się żmudna i długa a czasem kręta ścieżka na końcu której znajduje się założony do osiągnięcia cel. Autor skrupulatnie opisuje szczegóły dotyczące samego źródła światła jakim w zdecydowanej większości są lasery neodymowe typu Nd:YAG lub Nd:YLF. Opisuje parametry lasera od długości fali, energii impulsu, gęstości energii, częstotliwości pracy do jakości propagacji wiązki laserowej. W kolejnych podrozdziałach Autor dysertacji opisuje optykę niezbędną do wygenerowania obszaru świetlnego w polu którego będzie prowadzony pomiar również przy użyciu ramienia optycznego jak i kamery, które będą zdolne do rejestracji zjawisk w świetle wygenerowanym przez optykę lasera. W obszarze kamer stosowanych do pomiarów PIV równie ważna jest optyka korelująca z matrycą kamery, w której to dwa parametry ogniskowa i apertura są kluczowe dla powodzenia skutecznej rejestracji zjawisk w planowanym eksperymencie. Oczywiście w zdecydowanej większości pomiarów z użyciem techniki PIV/PLIF niezbędny

jest dobór posiewu, czy roztworu na bazie którego otrzymany przez matrycę sygnał będzie mógł być efektywnie przetworzony na wartość prędkości, czy stężenia badanego medium. W laserowych technikach obrazowania sam czas pomiaru jest stosunkowo krótki w porównaniu do etapów przygotowania całego eksperymentu czy etapu obróbki uzyskanych danych. Często właśnie etap analizy danych jest tym najbardziej czasochłonnym, gdzie dobór i efekt odpowiednich narzędzi korygujących, weryfikujących i filtrujących otrzymane wyniki jest nie tylko wypadkową doświadczenia operatora, ale również wydajności jednostki synchronizująco-rejestrującej (częstotliwość procesora i pamięć operacyjna). Autor w części teoretycznej pracy zwraca uwagę czytelnika na dwa ważne zagadnienia dodatkowo wpływające na koncept metodyki pomiaru. Pierwszym zagadnieniem jest technika stereo PIV, umożliwiającą uzyskanie informacji o trzeciej składowej prędkości. Natomiast drugim zagadnieniem jest pomiar w skali mikro. Rozważania teoretyczne wieńczy rozdział traktujący o technice PLIF i jej szczególnych wymaganiach, co do procesu obrazowania zjawisk związanych z transportem masy, pędu i energii. Rozdział 6 pracy doktorskiej jest łącznikiem pomiędzy częścią teoretyczną i praktyczną. Pierwsza część rozdziału zawiera podstawowe informacje teoretyczne w zakresie stereolitografii. Natomiast w części drugiej Autor dysertacji prezentuje proces doboru odpowiedniego materiału do procesu druku 3D i etap kalibracji, w tym niezwykle ważny etap wyznaczania współczynnika załamania światła. Autor słusznie uświadamia czytelnika jak istotna jest następnie procedura dostosowania modelu do planowanych pomiarów (lakierowanie i polerowanie powierzchni). Autor prezentuje również alternatywę dla modeli co do których obróbka mechaniczna nie jest możliwa w postaci zastosowania cieczy immersyjnej. W opinii Recenzenta, w tym miejscu rozdział ten mógłby być zamknięty, a w kolejnym można byłoby zaprezentować układ przepływowy, jako warunki brzegowe i początkowe eksperymentu na które również składa się dobór cieczy modelowej i posiewu. Zawartość merytoryczna rozdziałów 3-6 w pełni potwierdza wiedzę teoretyczną mgr inż. Arkadiusza Antonowicza w zakresie laserowej anemometrii obrazowej i technik druku 3D elementów fantomów ludzkiego układu naczyniowo-sercowego.

3. Ocena oryginalnego rozwiązania problemu naukowego, potencjału aplikacyjnego wyników w sferze gospodarczej i umiejętności samodzielnego realizowania badań naukowych

W części tzw. doświadczalnej dysertacji, którą inicjuje druga część rozdziału 6 i rozdziały 7-9 pracy doktorskiej Autor weryfikuje efektywność proponowanej metodyki w zakresie użycia fantomów z druku 3D i laserowej anemometrii obrazowej do obserwacji

hydrodynamiki w wybranych odcinkach układu naczyniowo-sercowego. Autor dysertacji poddał testom 7 modeli odzwierciedlających wybrane odcinki układu naczyniowo-sercowego. Zdaniem Recenzenta poszczególne rozdziały powinny mieć tytuły odnoszące się do wariantów badawczych (techniki pomiarowej, typu materiału, preparacji fantomu itd.). Nazewnictwo model, będzie zdecydowanie różnie interpretowane w zależności od subiektywnego postrzegania czytelnika pracy. W efekcie występuje niedogodność w prawidłowej ocenie zakresu badań, przykładem jest model 10, który jest modelem 6, ale został poddany innemu testowi. Autor dysertacji z powodzeniem wyznacza w drodze eksperymentu pola prędkości medium w fantomie tętnicy i porównuje je z wynikami otrzymanymi na podstawie symulacji numerycznych. Równie efektywnie realizuje eksperyment, w którym tętnicę cechuje zmiana miażdżycowa uzyskując wysoką zgodność profili prędkości w różnych przekrojach modelu. W ramach wykonanych eksperymentów laboratoryjnych, Autor potwierdza słuszność użycia cieczy immersyjnej wyznaczając tzw. linie prądu, opisujące dystrybucję cieczy modelowej wewnątrz fantomu. Również skomplikowanie geometrii modelu w kontekście bifurkacji i zmian miażdżycowych nie stanowi problemu do wyznaczenia pola przepływu wewnątrz fantomu. Także zmiana materiału na żywicę elastyczną po odpowiedniej korekcji metodyki pomiarowej pozwala nie tylko wyznaczyć pole prędkości, ale również wszystkie pochodne jak np. wirowość, czy tensor szybkości ścinania. Ostatecznie w zakresie techniki μ PIV Autor przeprowadza eksperymenty umożliwiające pomiar trzeciej składowej dla płynu modelowego. Wreszcie wieńczy cykl badań laboratoryjnych pomiarami techniką μ PLIF, ostatecznie uzyskując rozkład stężenia w badanych objętościach między innymi modelu tętnicy szyjnej.

Podsumowując część doświadczalną pracy doktorskiej, stwierdzam, że jest to solidne opracowanie naukowe, w którym Autor dysertacji samodzielnie opracował metodykę efektywnego zastosowania druku 3D w mikro laserowej anemometrii obrazowej, wykonując badania naukowe, przez co wniósł oryginalny wkład do obszaru inżynierii chemicznej, łącząc ze sobą zagadnienia mechaniki płynów, inżynierii materiałowej i fizyki technicznej. Uzyskane wyniki dają podstawę do stwierdzenia, że mogą być z powodzeniem zastosowane w sferze gospodarczej w szeroko rozumianej inżynierii biomedycznej. Jednakże, w toku analizy zaprezentowanych przez Pana mgr inż. Arkadiusza Antonowicza wyników badań zasadnym będzie udzielenie dodatkowych wyjaśnień związanych z metodyką realizowanych pomiarów oraz analizą otrzymanych wyników. Odpowiedzi proszę udzielić podczas publicznej obrony pracy doktorskiej.

- Struktura wirowości pola przepływu ewoluuje w funkcji czasu. Czy powtarzano i jeśli tak to ilokrotnie, procedurę obrazowania dla całej grupy kolejnych ekspozycji? Jakie było ewentualne odchylenie standardowe dla wartości prędkości płynów modelowych? Jaki był odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi 20 sekundowymi pomiarami dla kolejnych ekspozycji? Jaki model lepkości zastosowano w symulacjach numerycznych dla zaprezentowanych w pracy wyników, będących podstawą walidacji wyników μ PIV? Czy weryfikowano modelem numerycznym, pola rozkładu stężenia w wybranym modelu układu naczyniowo-sercowego?
- Jaką zależność matematyczną i jakie dane zastosowano do obliczenia liczby Reynoldsa w tablicy 7.1, w kontekście prezentowanych wartości? Czy zdaniem Autora stany patologiczne układu naczyniowego w postaci przewężeń będą wpływać na ewolucję przepływu krwi i transformacje przepływu z ruchu laminarnego do turbulentnego?

4. Wniosek końcowy

Na podstawie przedstawionej do oceny pracy doktorskiej Pana mgr inż. Arkadiusza Antonowicza, stwierdzam, że dysertacja spełnia wymogi ustawy, a uzyskane wyniki w zakresie opracowania metodyki efektywnego zastosowania technologii druku 3D do obrazowania układu hydrodynamicznego metodami PIV/PLIF stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i potwierdzają ogólną wiedzę teoretyczną Pana mgr inż. Arkadiusza Antonowicza w dyscyplinie naukowej Inżynieria Chemiczna oraz umiejętność Pana mgr inż. Arkadiusza Antonowicza do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Mając na uwadze wytyczne przedstawione w ustawie z dnia 20 lipca 2018 *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr inż. Arkadiusza Antonowicza do publicznej obrony pracy doktorskiej.

Cwikliński Adam