

# XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2022

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

### Badania eksperymentalne parametrów przepływu krwi w uproszczonych odcinkach naczyń mózgowych

Lukasz Mazurkiewicz<sup>1</sup>, Michał Tomaszewski<sup>1</sup>, Michał Kucewicz<sup>1</sup>, Radosław Rzepliński<sup>2</sup>, Mikołaj Sługocki<sup>2</sup>, Jerzy Małachowski<sup>1</sup>, Bogdan Ciszek<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, Wojskowa Akademia Techniczna

<sup>2</sup>Zakład Anatomii Prawidłowej i Klinicznej, Warszawski Uniwersytet Medyczny

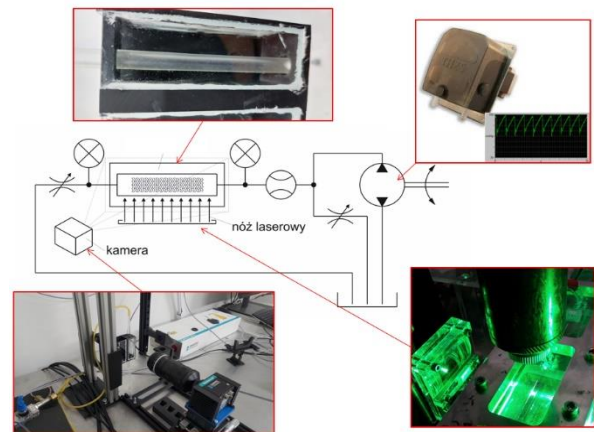
email: lukasz.mazurkiewicz@wat.edu.pl, michal.kucewicz@wat.edu.pl, michal.tomaszewski@wat.edu.pl, jerzy.malachowski@wat.edu.pl, radoslaw.rzeplinski@wum.edu.pl, bogdan.ciszek@wum.edu.pl, mikołaj.sługocki@wum.edu.pl

**STRESZCZENIE:** W niniejszej pracy przedstawiona została metodyka badań parametrów przepływu krwi przez drukowane sztuczne naczynia krwionośne o dużej transparentności. Badania eksperymentalne wykorzystują metodę PIV (ang. Particle Image Velocimetry), polegającą na pomiarze prędkości cząstek zawieszonych w przepływającej cieczy na skutek ich oświetlenia za pomocą światła wiązki lasera. Pozwala to na obserwację lokalnych turbulencji i zawirowań w płynie. W pracy przedstawiono trudności związane z uzyskaniem zadowalających wyników pomiarów poprzez uzyskanie jak największej przejrzystości drukowanych naczyń, dopasowanie optymalnych ustawień parametrów lasera oraz kamery, a także zbadano wpływ orientacji i metody wydruku na uzyskiwane pomiary. Badania wykazały, że metoda PIV pozwala na wiarygodne określenie hemodynamiki przepływu, ale tylko po uprzednim poprawnym przygotowaniu modeli. Wyniki eksperymentalne posłużyły do walidacji modeli numerycznych dla dwóch przypadków przepływu: prostego oraz bifurkacji. Tak uwiarygodnione modele posłużą do numerycznego modelowania przepływu w złożonych układach naczyń mózgowych bez i z obecnością stenta.

**SŁOWA KLUCZOWE:** tętniak, udar, analiza przepływu, komputerowa mechanika płynów, tętnica podstawna, warunki brzegowe

#### 1. Wstęp

Udary mózgu o charakterze niedokrwiennym są jedną z najczęstszych przyczyn śmierci na świecie [1]. Zapobieganie ich powstaniu jest zatem przedmiotem zainteresowania naukowców na całym świecie. Metody zapobiegania tej chorobie wymagają pełnego zrozumienia mechanizmów, które prowadzą do udaru. Obecnie w celu zwiększenia wiedzy o wpływie zablokowania przepływu krwi w mózgu coraz częściej wykorzystuje się skomplikowane modelowanie komputerowe CFD oraz złożone badania eksperymentalne przepływu przez naczynia krwionośne o różnych średnicach [2-4]. Do najczęściej stosowanych metod badawczych zaliczyć można technikę PIV (ang. Particle Image Velocimetry), która pozwala na dokładne określenie profilu prędkości płynu w różnego rodzaju naczyniach, co stanowi podstawę walidacji złożonych modeli numerycznych [3, 5, 6]. Widok stanowiska PIV wykorzystanego w tej pracy przedstawiono na rys. 1. Publikacja ta traktuje o eksperymentalnych badaniach przepływu przez uproszczone naczynia wykonane w technologii druku 3D, przy czym zwrócono szczególną uwagę na proces wytwarzania modeli naczyń a także metody prowadzenia pomiarów i ich post-processingu na uzyskiwane wyniki.



Rys. 1. Widok stanowiska PIV

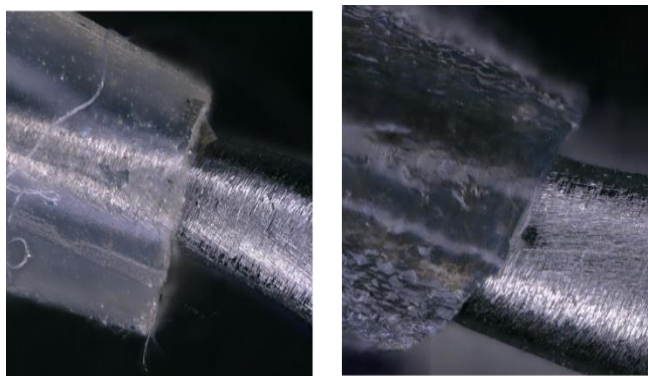
#### 2. Opis przedmiotu badań

Przedmiotem badań jest analiza przepływu cieczy symulującej krew przez uproszczone naczynia krwionośne wykonane z żywicy foto utwardzalnych typu „Clear” cechujących się znaczną przezroczystością. Badaniom poddano dwa typy naczyń: proste oraz z bifurkacją. Pierwsze z nich pozwoli na walidację parametrów płynu odwzorowującego krew (tj. lepkość, gęstość itp.), drugi zaś pozwoli na weryfikację parametrów układu pomiarowego składającego się z pompy perystaltycznej symulującej pracę serca, przepływomierzy oraz czujników ciśnienia a także podatnych przewodów symulujących naczynia krwionośne.

Badania przeprowadzone zostały w warunkach ciśnienia krwi normalnego (120/80 mmHg) oraz podwyższonego (160/90 mmHg). Wyniki rejestrowano jako profile prędkości w poszczególnych naczyniach oraz jako zmianę ciśnienia i natężenia przepływu rejestrowanego przez czujniki pomiarowe przed i za badanym wycinkiem układu.

### 3. Analiza parametrów wydruku

Ponieważ modele wykonane w technologii druku 3D cechują się dość dużą chropowatością wynikającą ze spiekania ze sobą kolejnych warstw materiału, konieczne jest ich wstępne przygotowanie do badań za sprawą polerowania mechanicznego i chemicznego. Aby znaleźć optymalną metodę obróbki druków przetestowane zostały różne odczynniki wpływające na jakość powierzchni wewnętrznych i zewnętrznych, uwzględniające alkohol izopropylowy, chloroform czy wodę ze ścierniwem. Ponadto modele przygotowane zostały tak, aby sprawdzić jak grubość ścianki, przez którą przenika wiązka lasera wpływa na dokładność uzyskiwanych wyników. Brak pełnej przezroczystości wydruku sprawia, że cząsteczki odbijające światło lasera rejestrowane przez kamerę są rozmyte, co znacznie zmniejsza dokładność pomiarową techniki PIV. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy widok przezroczystości różnych materiałów.



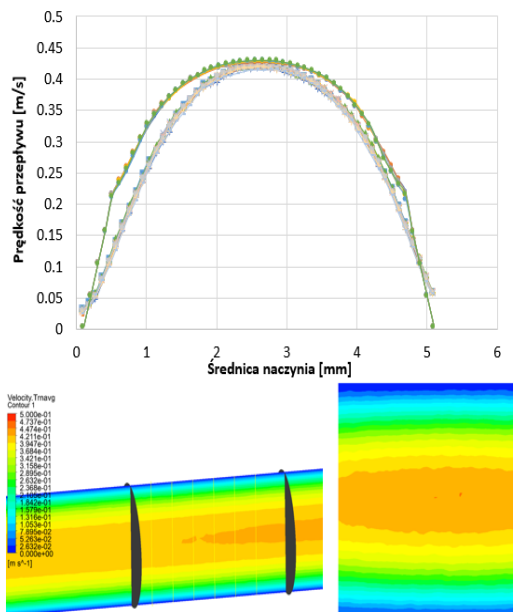
Rys. 2. Przezroczystość modeli odwzorowujących naczynia

### 4. Podsumowanie

Uzyskane wyniki eksperymentalne zostały odwzorowane w sposób numeryczny w środowisku ANSYS Fluent, a zastosowane w eksperymencie warunki przepływu posłużyły jako warunki brzegowe symulacji. Porównanie profili prędkości dla symulacji i badań rzeczywistych dla naczynia prostego przedstawiono na rys. 3. Finalnie, na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można stwierdzić, że:

1. Opracowano stanowisko do badań eksperymentalnych z wykorzystaniem techniki PIV.
2. Przeprowadzono badania przepływu dla dwóch ciśnień 120/80 oraz 160/90 mmHg z użyciem mieszaniny wody z gliceryną dla dwóch modeli naczynia.
3. Przeprowadzono wstępne analizy przepływu w rurce wydrukowanej z transparentnego materiału polimerowego (żywica clear), a stwierdzono, że polerowanie mechaniczne zewnętrznych części i minimalizacja grubości prześwietlanej przez laser ścianki naczynia dają najlepsze efekty w postaci dobrej jakości map przepływu.

4. Symulacje CFD prostej rurki pozwoliły na uzyskanie dobrej zgodności prędkości maksymalnej oraz profilu prędkości z wynikami eksperymentalnymi z błędem nie przekraczającym 10% w przypadku rurki prostej.



Rys. 3. Profil prędkości oraz porównanie wyników eksperymentalnych i numerycznych dla naczynia prostego

*Praca została zrealizowana w ramach projektu OPUS finansowanego przez NCN: Modelowanie hemodynamiki przepływu przez tętnice krążenia mózgowego o małej średnicy w warunkach fizjologicznych i po stentowaniu. Kierownik prac: prof. dr hab. Inż. Jerzy Małachowski.*

*Michał Tomaszewski jest stypendystą korzystającym ze wsparcia finansowego Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (FNP).*

### Literatura

- [1] J.S. Coogan, J.D. Humphrey, C.A. Figueroa, Computational simulations of hemodynamic changes within thoracic, coronary, and cerebral arteries following early wall remodeling in response to distal aortic coarctation, *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*. 12 (2013) 79-93. doi:10.1007/s10237-012-0383-x.
- [2] J.R. Cebral, S. Hendrickson, C.M. Putman, Hemodynamics in a lethal basilar artery aneurysm just before its rupture, *American Journal of Neuroradiology*. 30 (2009) 95-98. doi:10.3174/ajnr.A1312.
- [3] P. Berg, S. Saalfeld, S. Voß, O. Beuing, G. Janiga, A review on the reliability of hemodynamic modeling in intracranial aneurysms: Why computational fluid dynamics alone cannot solve the equation, *Neurosurgical Focus*. 47 (2019) 1-9. doi:10.3171/2019.4.FOCUS19181.
- [4] R. Rzepliński, M. Tomaszewski, M. Sługocki, K. Karczewski, P. Krajewski, T. Skadorwa, J. Małachowski, B. Ciszek, Method of creating 3D models of small caliber cerebral arteries basing on anatomical specimens, *Journal of Biomechanics*. 125 (2021) 0-4. doi:10.1016/j.jbiomech.2021.110590.
- [5] Ł. Mazurkiewicz, J. Buwała, J. Małachowski, M. Tomaszewski, P.P. Buszman, BVS stent optimisation based on a parametric model with a multistage validation process, *Materials and Design*. 198 (2021). doi:10.1016/j.matdes.2020.109363.
- [6] R. Rzepliński, M. Sługocki, M. Kwiatkowska, S. Tarka, M. Tomaszewski, M. Kuciewicz, K. Karczewski, P. Krajewski, J. Małachowski, B. Ciszek, Standard clinical computed tomography fails to precisely visualise presence, course and branching points of deep cerebral perforators, *Folia Morphologica*. (2021). doi:10.5603/fm.a2021.0133.