

Marek OCHOWIAK, Sylwia WŁODARCZAK, Andżelika KRUPIŃSKA, Małgorzata MARKOWSKA
Politechnika Poznańska
Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej

CYFROWA ANEMOMETRIA OBRAZOWA (PIV) – BUDOWA I TESTY STANOWISKA POMIAROWEGO

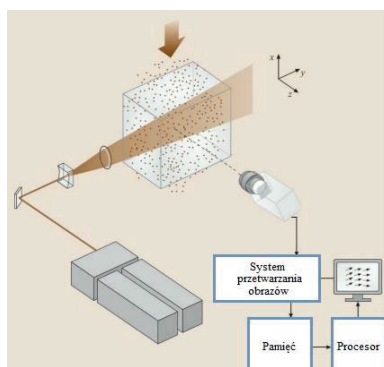
W artykule przedstawiono podstawy metody pomiarowej Particle Image Velocimetry (PIV), nieinwazyjnej techniki wyznaczania pól prędkości płynów oraz zaprojektowane i wykonane uniwersalne stanowisko cyfrowej anemometrii obrazowej PIV oraz możliwości jego zastosowania. Może być ona szeroko wykorzystywana, zarówno w przemyśle, jak i w naukowych badaniach laboratoryjnych. Metoda PIV wykorzystywana jest w wielu dziedzinach np. w przepływach gazów i cieczy, w badaniach spalania, w procesach obróbki skrawania i wielu innych. PIV może być z powodzeniem stosowane do opisu procesu rozpylania cieczy, suszenia rozpyłowego, granulacji i rozdrabniania, mieszania i separacji, wymiany ciepła i masy.

DIGITAL IMAGE ANEMOMETRY (PIV) – CONSTRUCTION AND TESTING OF THE MEASURING SET-UP

The article presents the basics of measuring method Particle Image Velocimetry (PIV), a non-intrusive technique for determining fluid velocity fields and the designed and constructed universal PIV digital anemometry set-up and its applicability. It can be widely used, both in industry and in scientific laboratory research. The PIV method is used in many fields, e.g. gas and liquid flows, combustion tests, machining processes and many others. The PIV can be successfully used to describe the process of spraying liquids, spray drying, granulation and comminution, mixing and separation, heat and mass exchange.

1. WPROWADZENIE

Nieinwazyjna technika wyznaczania pól prędkości płynów, czyli cyfrowa anemometria obrazowa lub Particle Image Velocimetry (PIV), wykorzystywana jest szeroko, zarówno w przemyśle, jak i w naukowych badaniach laboratoryjnych. Metoda PIV wykorzystywana jest w wielu dziedzinach np. w przepływach gazów i cieczy [1], w badaniach spalania [2,3], w procesach obróbki skrawania [4] i wielu innych. Analiza obrazu może być z powodzeniem stosowana do opisu procesu rozpylania cieczy i suszenia rozpyłowego, granulacji i rozdrabniania, mieszania i separacji, wymiany ciepła i masy [5-7]. Laserowa metodę pomiaru PIV można zastosować do obserwacji i diagnostyki przepływu płynu w skali makro [8].



Rys. 1. Schemat stanowiska PIV.

Fig. 1. The scheme of PIV set-up.

Powiązanie zestawu rejestrującego serię obrazów z odpowiednim oświetleniem, techniki komputerowej oraz odpowiedniego oprogramowania (rysunek 1) pozwala na rejestrowanie pól

prędkości [9]. W większości zastosowań omawianej metody konieczny jest dodatek cząstek znacznikowych (posiewu) do płynu tj. MgO, TiO₂, Al₂O₃, ZrO₂, PAA. Celem niniejszej pracy było zaprojektowane i wykonane uniwersalnego stanowiska nieinwazyjnej techniki wyznaczania pól prędkości płynów PIV oraz wstępne jego testy w pomiarach naukowych.

2. STANOWISKO PIV

2.1. PROJEKT I WYDRUK 3D

Instalację pomiarową PIV wraz z wykonanymi elementami pokazano na rysunku 2. Wszystkie elementy składowe zaprojektowano w programie AutoCad 2019 firmy AutoDesk, które przekonwertowywano do postaci plików STL. Sporządzone projekty zrealizowano w oparciu o system szybkiego wytwarzania modeli tzw. wydruk 3D. Wykorzystana w tym procesie technologia FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*) polega na stopniowym nakładaniu kolejnych warstw stopionego polimeru w taki sposób, aby powstał pożądaný obiekt. Otrzymane wydruki bardzo dokładnie odwziewierają przestrzenny model komputerowy. Materiałem, z którego zostały wykonane regulatory jest wzmacniany kopolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy ABS, który sprawia, że produkty są wytrzymałe na wysoką temperaturę i odporne na uszkodzenia mechaniczne [10].

Stanowisko składa się ze zbiornika o wymiarach 80×40×30 cm (pokryte warstwą czarnej gumy z dwóch stron), lampy LED z soczewką, pompy ze sterownikiem, dyszy z wewnętrzną kratką, kamery i komputera PC z oprogramowaniem. Lampę CHIIHIROS LED Seria C C361 wyposażono w osłonę ze szczeliną oraz soczewkę cylindryczną z plexiglasu. Dysza (konfuzor) zaopatrzona w kratkę. Zastosowanie konfuzora powoduje zwiększenie prędkości strugi przepływającego płynu. Kratka przyczynia się do rozbitcia strugi na mniejsze – równoległe strumienie cieczy. W układzie zastosowano pompę AQUA NOVA N-RMC-3000 o maksymalnym natężeniu przepływu cieczy równym 3200 l/h wyposażoną w kontroler przepływu.



Rys. 2. Instalacja pomiarowa:

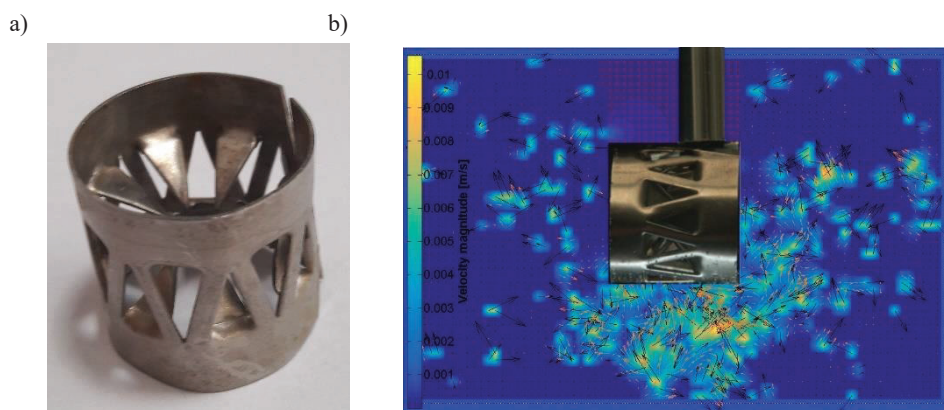
a) kompletne stanowisko PIV, b) lampa z soczewką, c) dysza z kratką, d) pompa z zamontowaną dyszą.
Fig. 2. Measuring system: a) PIV set-up, b) lamp with lens, c) nozzle with grate, d) pump with nozzle.

2.2. WIZUALIZACJA I OPROGRAMOWANIE

Drobne cząstki ciała stałego, w tym przypadku wybrano cząstki poliakryloamidu PAA, oświetlano w badanej płaszczyźnie przepływu. Do oświetlenia użyto szczelinowane i zogniskowane światło z zestawu LED. Światło odbite od aktywnych cząstek PAA rejestrowano przy użyciu aparatu Casio Exilim EX-F1 z matrycą CMOS umożliwiającym rejestrację filmów z prędkością do 1200 kl/s. W przypadku skali makro można by zastosować układ z odwróconym obiektywem opisany szczegółowo w pracy [11]. W kolejnym etapie określano przesunięcie cząstek (pomiędzy kolejnymi klatkami filmu). Do analizy użyto oprogramowanie Matlab będące interaktywnym środowiskiem do wykonywania obliczeń naukowych i inżynierskich, oraz do tworzenia symulacji komputerowych zaopatrzone w darmową nakładkę PIVlab 2.31 [9]. W pomiarach dynamicznych posłużono się zestawem badawczym umożliwiającym regulację natężenia przepływu wody destylowanej zawierającej cząstki aktywne oraz rejestrację i obróbkę filmów.

3. TESTY STANOWISKA

Testy przeprowadzono w układzie woda destylowana z cząstkami aktywnymi poliakryloamidu otrzymanymi z analizy sitowej. Cząstki te są unoszone wraz z przepływem i zasadniczo nie zakłócają jego ruchu. Głównym kryterium doboru cząstek jest konieczność spełnienia warunku, że ruch cząstek musi być tożsamy z ruchem unoszącego je płynu. Szczegółowo zasady doboru cząstek opisano w pracy [12]. Omawiana metoda badań jest szczególnie przydatna przy wyznaczaniu pól prędkości płynów, dla których nie ma możliwości wprowadzenia czujnika pomiarowego. Ruch cząstek aktywnych jest rejestrowany przez kamerę w postaci kolejnych obrazów uzyskanych w odstępie krótkiego czasu. Obrazy te stanowią podstawę dalszych obliczeń i korelacji bazujących na przemieszczeniu cząstek. Analiza taka przeprowadzona przy użyciu specjalistycznego oprogramowania komputerowego umożliwia wyznaczenie wektorów prędkości przepływu.



Rys. 3. Pomiar: a) pierścień Białeckiego, b) przykładowe wyniki.
Fig. 3. Measurements: a) Białecki's ring, b) exemplary results.

Wykonana przykładowa analiza map rozkładu prędkości dla pierścienia Białeckiego – jako elementu zaburzającego przepływ pozwala ujawnić obszary występowania wartości minimalnych i maksymalnych prędkości oraz miejsc tworzenia się zawirowań. Na rysunku 3a przedstawiono obiekt badań, a na rysunku 3b przykładowy obraz pól prędkości. Analiza przedstawionych wyników pomiarów PIV pozwala na określenie stref, w których nie występuje ruch płynu lub miejsca, w których cząstki poruszają się ze skrajnie niską prędkością. PIV potwierdza obecności silnych struktur wirowych – silne zawirowania prędkości, świadczące o tym, że przepływ ma chaotyczny i burzliwy charakter. Pojawiające się zawirowania ruchu mogą być przyczyną wzrostu oporów hydraulicznych. Przedstawione wyniki pomiarów mają nie tylko wartość poznawczą, ale są bardzo wartościowe jako dane niezbędne do weryfikacji ewentualnych symulacji procesowych tzw. Computational Fluid Dynamics (CFD). Zastosowana w badaniach metoda PIV charakteryzuje się

stosunkowo niskimi kosztami wykonania. Metoda ta wydaje się dobrym wyborem z punktu widzenia uzyskania informacji o przepływie.

4. PODSUMOWANIE

Zaprojektowane, wykonane i przetestowane stanowisko uniwersalne stanowisko cyfrowej anemometrii obrazowej PIV dostarcza informacji o przepływie cieczy tj. strefy, w których nie występuje ruch płynu, strefy silnych struktur wirowych, mapy wektorów prędkości przepływu i miejsca występowania prędkości minimalnych i maksymalnych. Stanowisko badawcze wyposażono w kamerę o prędkości do 1200 kl/s co jest w pełni wystarczające do uzyskania odpowiedniej jakości obrazów. Program Matlab z nakładką PIVlab spełnia swoje zadanie w wyznaczaniu wektorów prędkości przepływu płynu. Metoda PIV może być stosowana zamiennie z innymi technikami pomiarowymi lub je wspomagać np. dając dane do weryfikacji modeli CFD.

Praca wykonana w ramach projektu PUT 0912/SABD/2002 dofinansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

1. Kadambi J.R., Mehta M., Sankovic J., Addie G., Visintainer R.: Velocity measurements of particles in the impeller of a centrifugal slurry pump, 12th International Symposium, The Calouste Gulbenkian Foundation, Lisbon, 2004, 1-11.
2. Nogenmyr K.J., Petersson P., Bai X.S., Nauert A., Brackman C., Seyfried H., Olofsson J., Sedarsky D., Alden M., Linne M.A.: Experiments and large eddy simulation in a low swirl burner, First Baltic Combustion Meeting, Warsaw 2005, 11-14.
3. Gorecki G., Shoshin Y., Fodemski T., Jarosinski J.: Influence of tube diameter on lean limit flame propagating upward in methane/air mixture, 22nd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, (ICDERS 2009), Minsk, 2009.
4. Wójcik R., Górecki G.: Modyfikacje ściernic do szlifowania w środowisku mgły olejowej, Współczesne Problemy Obróbki Ściernej, Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej, 2009, 63-70.
5. Niedostatkiewicz M.: Zastosowanie metody PIV (Particle Image Velocimetry) do opisu procesu opróżniania silosu, Acta Agrophysica, 2010, 16(1), 111-126.
6. Malek K., Skoczowska K., Ulbrich R.: Zastosowanie metody PIV do analizy zachowania się złoża w aparacie bębnowym, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 2017, 56(1), 14-16.
7. Jakubowski M., Sterczyńska M., Dresner J.: Bezkontaktowa technika pomiaru PIV. Analiza przepływów w urządzeniach przemysłu spożywczego, Przemysł Spożywczy, 2013, 67(2), 22-25.
8. Tanski M., Kocik M., Barbucha R., Garasz K., Mizeraczyk J.: Pomiar pól prędkości mikroprzepływów za pomocą metody mikro-PIV, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, 2013, Nr 34, 71-73.
9. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27659-pivlab-particle-image-velocimetry-piv-tool>, z dnia 25.01.2019.
10. <http://centrumdruku3d.pl/technologie-fdm-rozdzial-1-co-to-jest-i-na-czym-polega>, z dnia 04.01.2019.
11. Ochowiak M., Broniarz-Press L., Woziwodzki S.: Application of reverse lens method in chemical engineering measurements, Chemical Engineering and Technology, 2014, 37(3), 505-510.
12. Błoński S.: Analiza przepływu turbulentnego w mikrokanale, Rozprawa doktorska, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Polska Akademia Nauk, Warszawa, 2009.