

Marek JAKUBOWSKI, Monika STERCZYŃSKA

e-mail: marek.jakubowski@tu.koszalin.pl

Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Wydział Mechaniczny, Politechnika Koszalińska, Koszalin

## Analiza pomiarów PIV prędkości przepływu cieczy przy dnie zbiornika kadzi wirowej napełnianej dwustronnie

### Wstęp

Postęp technologiczny w zakresie browarnictwa pozwolił na wypracowanie standardów technik przetwórczych. W konsekwencji tego, w procesie produkcji brzezki piwnej, do usuwania tzw. osadu gorącego zaczęto powszechnie stosować kadź wirową (zwaną whirlpoolem). Rozdział w tym aparacie stanowi w chwili obecnej najtańszą i najbardziej skuteczną metodę do usuwania tego osadu białkowego. Z drugiej strony współczesne wyzwania ekonomiczne nakładają na browary konieczność poszukiwania rozwiązań technologicznych redukujących koszty poprzez np. wprowadzenie do receptur pewnego udziału surowców niesłodowanych. Powstają więc problemy poprawnej realizacji procesu technologicznego, w tym przypadku właściwego wytworzenia i oddzielenia osadu podczas gotowania [Kunze, 2010].

Kadź wirowa jako separator do oddzielania osadu gorącego w procesie produkcji brzezki piwnej stanowi rozwiązanie proste i skuteczne. Jest to zamknięty cylindryczny zbiornik pozbawiony wewnętrznej zabudowy. Jest on napełniany przez otwór wlotowy umiejscowiony styczniście. W wyniku takiego sposobu napełniania wewnątrz zbiornika powstaje ruch wirowy klarowanej brzezki. Sedymentacja cząstek separowanego osadu gorącego w zbiorniku następuje w sposób naturalny (grawitacyjny), przy czym jest ona wspomagana ruchem wirowym mieszaniny. W wyniku tego wewnątrz separatora powstaje silnie oddziaływujący przepływ wtórny umiejscowiony w tzw. warstwie granicznej Ekmana. Zjawisko formowania się stożka osadu występuje samoistnie. Po raz pierwszy zostało opisane przez Alberta Einsteina w 1926 roku i nazwane przez niego *cup-of-tea-effect* [Einstein, 1926].

Prace badawcze w zakresie warunków napełniania i wirowania cieczy w zbiorniku whirlpoola wykazały występowanie sytuacji, w której separator jest niesymetrycznie napełniany, a czego konsekwencją jest opóźnienie występowania zjawiska przepływu wtórnego, namywającego stożek osadu. Stwierdzono, że przepływ pierwotny w zbiorniku kadzi wirowej dąży do swoistej symetryzacji, co powoduje, iż część energii wirowania zostaje pochłonięta na ustabilizowanie symetrii przepływu. Zaproponowano zatem rozwiązanie chronione zgłoszeniem patentowym P388831 [Jakubowski, 2009], które zapewnia równoważące dwu- lub wielopunktowe napełnianie kadzi wirowej, prowadzące do symetryzacji przepływu w zbiorniku już w początkowej fazie działania. Uzyskuje się przez to efekt występowania wtórnego przepływu namywającego już na etapie napełniania zbiornika, co ostatecznie powoduje skrócenie czasu wirowania w kadzi oraz poprawia uwarunkowania geometrycznego formowania się stożka osadu.

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu napełniania zwielokrotnionego na poprawę warunków formowania się przepływu odpowiedzialnego za powstawanie stożka osadu gorącego.

### Opis badań

#### Zasada pomiaru

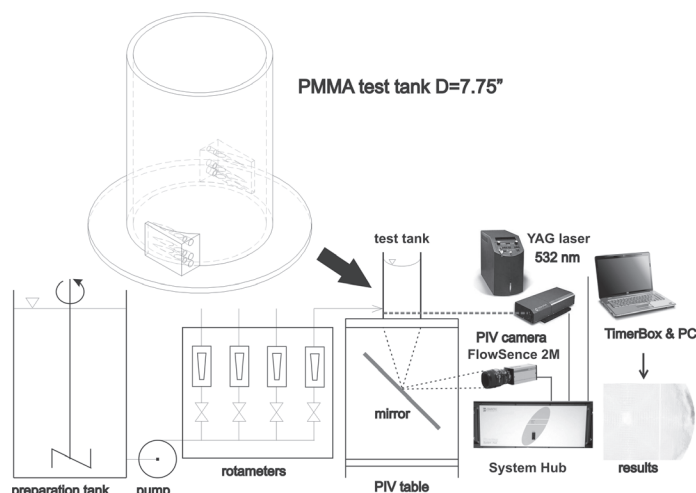
W pracy przedstawiono wyniki pomiarów metodą PIV (*Particle Image Velocimetry*). Polega ona na analizie przepływu z wykorzystaniem cząstek wskaźnikowych (tzw. posiewu), które wprowadza się do badanego ośrodka. Posiadają one wymiary od 1÷2 do kilkudziesięciu mikrometrów. W przypadku badań przepływu cieczy są to cząstki stałe, np. poliamid (PA) o wielkości 10÷50 µm. Są one unoszone wraz z przepływem i zasadniczo nie zakłócają jego ruchu. Posiew jest oświetlany światłem laserowym, które jest na nim rozpraszane, co sprawia, że jest on dobrze widoczny. Pomiar PIV jest szczególnie przydatny w analizie pola prędkości przepływów, dla których nie ma możliwości wprowadzenia

czujnika pomiarowego. Przemieszczenie cząstek wskaźnikowych jest rejestrowane kamerą i zapisywane w postaci klatki obrazu zawierającej dwie ramki (osobne obrazy tej samej ekspozycji uzyskane w odstępie krótkiego czasu) stanowiące bazę do analizy korelacyjnej. Na tej podstawie określa się przemieszczenia cząstek i możliwe jest wyznaczenie wektora prędkości przepływu. [Raffel i in., 2007; Adrian i Westerweel, 2010].

#### Stanowisko badawcze

Do badań wykorzystano zbiornik modelowy kadzi wirowej wykonany z PMMA o średnicy 7,75" (ok. 192 mm) wyposażony w zestawy otworów wlotowych umożliwiających napełnianie dwustronne. Pomiar dotyczył obszaru przy dnie zbiornika, w którym zidentyfikowano występowanie przepływu wtórnego.

Badania wykonano na stanowisku pomiarowym zbudowanym w laboratorium działu *Research and Development* firmy *Philadelphia Mixing Solutions*, Palmyra, PA, USA. Do pomiarów wykorzystano kamerę *PIV FlowSense2M*, *HUB DantecDynamics* oraz laser dwuimpulsowy *NewWave Solo 120 TX* wyposażony w sterownik z układem chłodzenia wodą. Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Szkic stanowiska do pomiarów PIV

Ze względu na charakter przepływu, specyfikę napełniania i jego wygasanie pomiary wymagały specyficznego podejścia w zakresie pierwszych sekund pomiaru i zmiennej wartości interwału czasowego pomiędzy pojedynczymi impulsami lasera zsynchronizowanymi z czasem ekspozycji kamery. Wobec braku możliwości dynamicznej zmiany (podczas trwania pomiaru) przedziału czasowego pomiędzy impulsami lasera wykonano trzy serie pomiarowe dla każdego z rozpatrywanych przypadków zwiększając czas pomiędzy pojedynczymi jego impulsami. Arkusz światła laserowego umiejscowiony był możliwie najbliżej dna zbiornika.

Do badań wykorzystano posiew w postaci cząstek poliamidu (PA) o średnicy cząstek 20 µm.

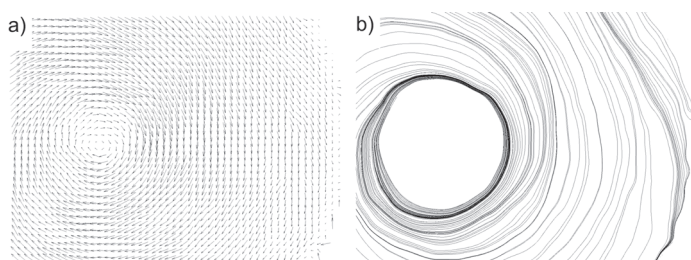
W celu porównania wyników pomiarów uzyskanych dla napełniania dwustronnego przedstawiono także wyniki pomiarów dla napełniania jednostronnego. Napełnianie prowadzono z wykorzystaniem pompy laboratoryjnej (*VANTON FLEX-I-LINER* – 110V) poprzez układ pomiarowy wyposażony w zawory i rotametry. Dla napełniania jednostronnego ustalono natężenie przepływu wynoszące 1,8 GPM (ok. 0,00011 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)

na stronę, a samą operację prowadzono w czasie przybliżonym do czasu napełniania jednostronnego. Po przeliczeniu ustalono, iż zbiornik testowy napełniany był jednostronnie przez otwór wlotowy o średnicy 0,2” (ok. 5 mm) ze średnią prędkością 2,85 m·s<sup>-1</sup>. Aby zachować przybliżone warunki napełnianie dwustronne było realizowane z prędkością o połowę mniejszą. Napełnianie prowadzono z wykorzystaniem wlotów znajdujących się na wysokości ½” (12,7 mm) mierzonej od dna zbiornika.

### Analiza wyników pomiarów

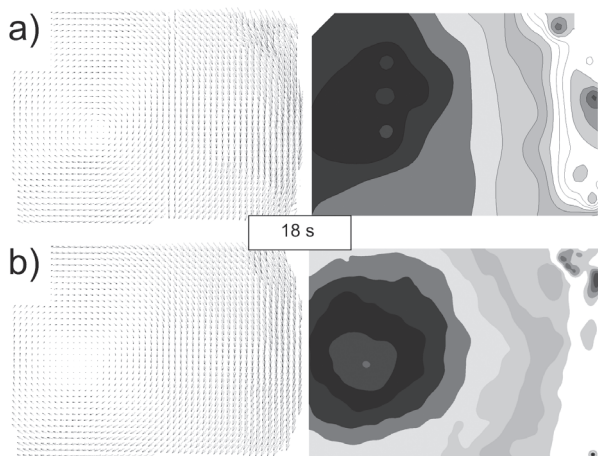
Analiza wyników badań doświadczalnych pozwala na porównanie napełniania klasycznego i dwustronnego. Dlatego też przyjęto kryteria oceny wyników pomiarów zgodne z założeniami zastrzeżenia patentowego, którego myślą przewodnią jest symetryzacja przepływu już na etapie napełniania.

Podstawową kwestią była ocena, czy istotnie w warstwie przy dnie zbiornika występuje przepływ wtórny ukierunkowany do środka centralnego obszaru dna zbiornika. Przepływ taki miałby postać zbliżoną do tzw. spirali *Ekmana*. Jednak nie można określić tego wyłącznie na podstawie analizy wektorowej mapy pola prędkości (Rys. 2a). Dlatego też oprócz standardowych map pola prędkości przepływu w postaci wektorów zaproponowano w pierwszym przybliżeniu obraz linii prądu przepływu (*streamlines*) pokazany na rys. 2b. Już ich pobieżna analiza wskazuje na występowanie spiralnie ułożonych linii prądu, a więc widać w tym przypadku przepływ ukierunkowany do centralnej strefy dna zbiornika.



Rys. 2. Wyniki pomiarów PIV dla początku napełniania zbiornika napełnianego dwustronnie: a) mapa pola prędkości, b) linie prądu przepływu [Jakubowski, 2013]

Kolejnym krokiem było porównanie stanu przepływu na etapie napełniania. Ze względu na ograniczenia związane z odbiciem wiązki światła laserowego od powierzchni zwierciadła swobodnego cieczy podczas napełniania, pierwszym (wspólnym) możliwym do porównania czasem była 18. sekunda od początku napełniania. Wyniki dla tego czasu przedstawiono na rys. 3.

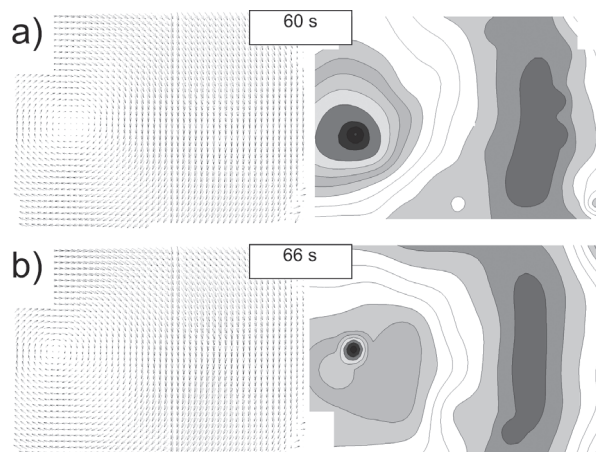


Rys. 3. Wyniki pomiarów PIV dla początku napełniania zbiornika napełnianego: a) jednostronnie, b) dwustronnie (z lewej wektory prędkości przepływu, z prawej mapa konturowa) [Jakubowski, 2013]

– Wektorowe mapy pola prędkości ujawniają występowanie przepływu napełniającego (prawa strona u góry). Jest to przepływ dominujący pod względem wartości prędkości. Analiza położenia i kształtu izoli-

nii dla map konturowych pokazuje występowanie rozkładu o bardziej charakterystycznej postaci dla ruchu obrotowego cieczy. Świadczy to o korzystniejszym *uporządkowaniu* przepływu już na etapie napełniania. Potwierdza to więc założenia o symetryzacji leżące u podstaw wspomnianego wyżej zastrzeżenia patentowego.

Na rys. 4 przedstawiono wyniki pomiarów dla końcowego czasu etapu napełniania prowadzonego do wysokości równej średnicy zbiornika ( $H/D = 1$ ). Dla tego etapu, dla napełniania dwustronnego – rys. 4b, uwydatnia się występowanie obszarów o wyższych wartościach prędkości umiejscowionych bliżej centralnej strefy dna zbiornika (w porównaniu z napełnianiem jednostronnym – rys. 4a). Jest to także sytuacja korzystniejsza z punktu widzenia formowania się stożka osadu.



Rys. 4. Wyniki pomiarów PIV dla końca napełniania zbiornika napełnianego: a) jednostronnie, b) dwustronnie [Jakubowski, 2013]

### Wnioski

Analiza wyników przeprowadzonych pomiarów PIV dostarczyła informacji o rozkładach prędkości przepływu cieczy w obszarze zbliżonym do dna zbiornika.

Uzyskane wyniki pomiarów pozwoliły na zweryfikowanie poprawności założeń dotyczących modyfikacji konstrukcji kadzi wirowej, będącej przedmiotem zgłoszenia patentowego P388831 [Jakubowski, 2009].

Przedstawione badania pozwolą także pośrednio zweryfikować poprawność wyników analiz symulacyjnych CFD dotyczących przepływu w zbiorniku kadzi wirowej [Diakun i Jakubowski, 2010].

W celu wykorzystania wyników przeprowadzonych pomiarów do oceny warunków panujących w zbiornikach przemysłowych konieczne jest przeprowadzenie analizy (skalowania) z wykorzystaniem liczb kryterialnych [Diakun i Jakubowski, 2013].

### LITERATURA

- Diakun J., Jakubowski M., 2010. Analysis of the secondary flow velocities forming a settling cone in a Whirlpool VAT, *Chemical and Process Engineering* 31, 477-488
- Diakun J., Jakubowski M., 2013. Skalowanie czasu i prędkości dla kadzi wirowej na podstawie podobieństwa konstrukcyjnego i procesowego. *Inż. Ap. Chem.*, 52, nr 3, 161-162
- Einstein A., 1926. Die Ursache der Mäanderbildung der Flußläufe und des sogenannten Baer'schen Gesetzes, *Naturwissenschaft*, 14, nr 2, 223-224
- Jakubowski M., 2009. Kadź wirowa, wykorzystywana zwłaszcza w browarnictwie oraz sposób jej napełniania. Zgłoszenie patentowe P388831. Politechnika Koszalińska
- Jakubowski M., 2013. Raport końcowy realizacji projektu badawczego NN313 429639 (w przygotowaniu), Politechnika Koszalińska
- Raffel M., Christian E., Willert C., E., Steven T. Wereley S., T., Kompenhans J., 2007. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*, Springer
- Adrian R., J., Westerweel J. 2010. *Particle Image Velocimetry*, Cambridge University Press
- Kunze W., 2010. *Technology Brewing and Malting*, VLB, Berlin

**Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2012 jako projekt badawczy nr N N313 429639.**