

Monika STERCZYŃSKA, Marek JAKUBOWSKI

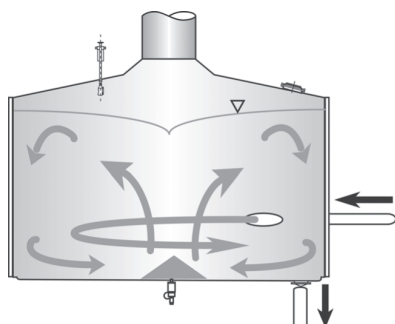
e-mail: monika.sterczynska@tu.koszalin.pl

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

Pomiary PIV w zbiorniku kadzi wirowej napełnianej jednostronnie z przegrodą płaską umiejscowioną symetrycznie do wlotu

Wstęp

Przemysł browarniczy, wraz ze wzrostem konkurencji na rynku, wciąż wprowadza udoskonalenia nie tylko jakości piwa, ale także na poszczególnych etapach procesów technologicznych. Każdą wirową, zwana potocznie *whirlpoolem* (Rys.1), jest cylindrycznym zbiornikiem wykorzystywanym do klarowania brzezki piwnej przed procesem fermentacji alkoholowej. Po raz pierwszy znalazła ona swoje zastosowanie na początku lat 60. XX w. w *Moosehead Brewery*, Nowy Brunswick, Kanada. Od tego czasu nie wprowadzono znaczących zmian w stosunku do podstawowych zasad konstrukcyjnych i eksploatacyjnych tego separatora. Każdą wirową wykorzystywaną jest do usuwania niepożądanego mieszaniny chmielin i osadów białkowych (gorącego osadu) po ugotowaniu brzezki [Briggs *in. in.*, 2004; Kunze, 2010; Jakubowski, 2011].



Rys. 1. Kadź wirowa (whirlpool) – widok ogólny

Cechą charakterystyczną konstrukcji tego zbiornika jest brak elementów zabudowy wewnętrznej. Napełnianie separatora jest realizowane przez otwór umiejscowiony stycznie do płaszcza zbiornika. W wyniku tego w kadzi powstaje ruch wirowy oczyszczanej brzezki. Podczas wirowania mieszaniny powstaje przepływ wtórny odpowiedzialny za formowanie się osadu gorącego w postaci stożka. Sedymentacja cząstek, wspomagana zawirowaniem, następuje w sposób naturalny (grawitacyjny) [Bamforth, 2009; Oliver 2012].

Cel badań

Wcześniejsze prace eksperymentalne i analizy symulacyjne dotyczące przepływu w whirlpoolu wykazały występowanie sytuacji w której separator (poprzez niesymetrycznie napełnianie jednostronne) może pracować niedostatecznie wydajnie. Przepływ pierwotny, którego występowanie jest konsekwencją specyficznego sposobu napełniania dąży do swoistej symetryzacji, co powoduje, iż część energii zostaje pochłonięta na ustabilizowanie i jego symetryzacje.

Zaproponowano rozwiązanie zakładające wykorzystanie napełniania zwiokrotnionego z wykorzystaniem co najmniej dwóch otworów zasilających rozmieszczonych równomiernie w jednakowych odległościach [Jakubowski, 2008]. Takie rozwiązanie, choć skuteczne, jest dość skomplikowane, gdyż wymaga daleko idącej ingerencji w konstrukcję samego zbiornika i układu zasilającego. W przypadku istniejących rozwiązań taka modyfikacja wydaje się być praktycznie niemożliwa do wprowadzenia. Dlatego też podjęto próbę poszukiwań innego sposobu intensyfikacji zjawiska. Powstał pomysł wykorzystania rozwiązań znanych z konstrukcji zbiorników mieszalników w postaci wprowadzenia przegrody (*baffle*), ale o znacznie zredukowanej wysokości. Właściwie należy raczej mówić o swego rodzaju *przeszkodzie* zlokalizowanej przy samym dnie zbiornika.

Celem badań jest określenie wpływu zredukowanej przegrody płaskiej umiejscowionej przy dnie pod kątem 45° na przepływ występu-

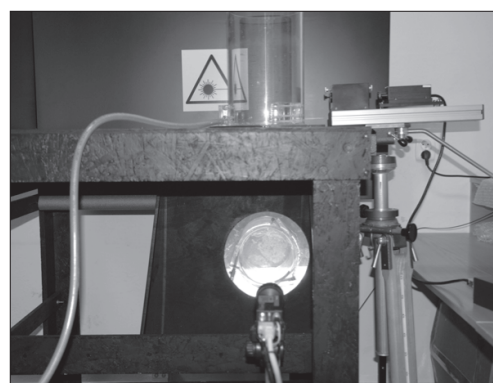
jący przy dnie zbiornika kadzi wirowej [Kamieński, 2004; Jakubowski i Diakun 2007; Sterczyńska i Jakubowski, 2012].

Zasada pomiaru PIV

w badaniach wykorzystano metodę anemometrii obrazowej PIV (*Particle Image Velocimetry*). Jest to technika pomiaru pola prędkości przepływu płynów stosowana w tych przypadkach, gdy niemożliwe jest użycie czujnika pomiarowego. Wykorzystywane jest rozpraszane światła laserowego na cząsteczkach wskaźnikowych o wielkości 10÷50 μm dodanych do przepływającego płynu. Kamera rejestruje światło lasera rozproszone na cząstkach. Obrazy w krótkim odstępie czasu zapisywane są w postaci klatki zawierającej dwie ramki, które wykorzystywane są do analizy korelacyjnej i wyznaczenia wektorów prędkości poszczególnych cząstek [Raffel *in. in.*, 2007; Cavazzini G. 2012].

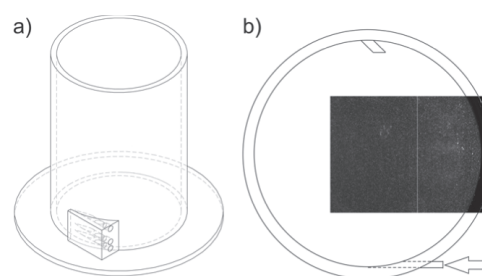
Stanowisko badawcze

W laboratorium *Katedry Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego* powstało stanowisko badawcze (Rys. 2). Zbudowano stół pomiarowy z otworem umożliwiającym wykonywanie pomiarów w płaszczyźnie poziomej. Do przeprowadzenia pomiarów posłużono się kamerą *PIV FlowSense2M* i laserem *DPSS 532 nm* o mocy 1000 mW wyposażonym w układ optyczny do projekcji tzw. noża świetlnego. Do synchronizacji lasera i kamery wykorzystano *Timer Box*, a do przechwytywania i analizy obrazów zastosowano oprogramowanie *DynamicStudio 3.31*.



Rys. 2. Stanowisko badawcze (model zbiornika kadzi wirowej, kamera, laser)

Zbiornik testowy o średnicy wewnętrznej 292 mm wykonany był z PMMA (Rys. 3a). Zbiornik posiadał zestaw stycznie umiejscowionych otworów wlotowych o średnicy 12,5 mm.



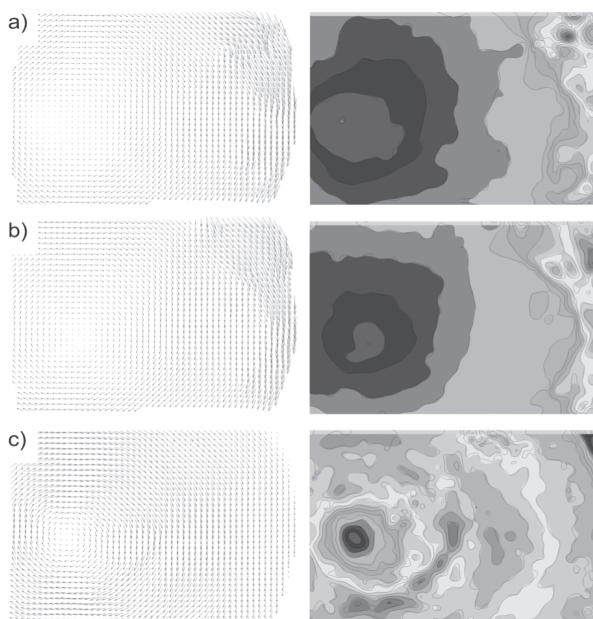
Rys. 3. Szkic zbiornika, w którym prowadzono pomiary met. PIV: a) widok ogólny; b) umiejscowienie wlotu i przegrody (przeszkody). Zaznaczono także obszar ekspozycji

Wewnątrz zbiornika umieszczono przegrodę płaską, umiejscowioną symetrycznie do wlotu, przesuniętą o kąt 45° . Przegroda wykonana została z tworzywa polimerowego w kolorze czarnym. Wysokość przegrody wynosiła 20 mm. Taki kształt przegrody stanowił pierwsze (wstępne) podejście do zagadnienia doboru przeszkody w celu orientacji przepływu przy dnie. Pomiary zostały wykonane dla średniej prędkości napełniania wynoszącej 1,5 m/s.

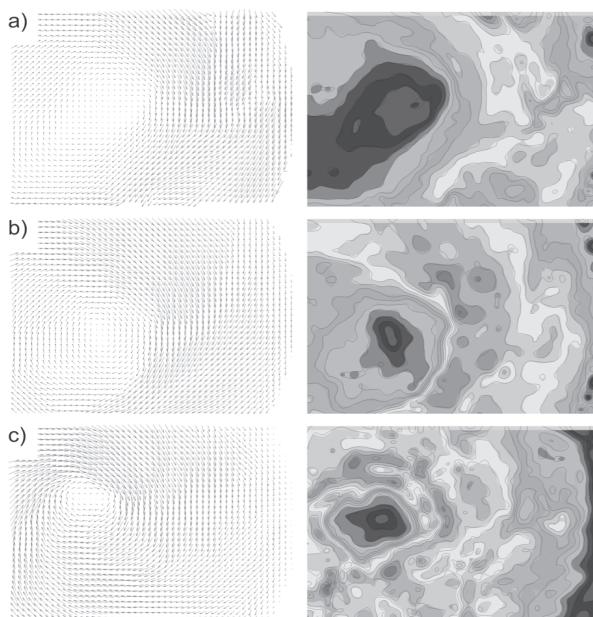
Aby uzyskać możliwie najdokładniejsze obrazowanie z wykorzystaniem posiadanej kamery o rozdzielczości 1600×1200 pixeli, pole eksplozji zostało ograniczone do obszaru wskazanego na rys. 3b.

Wyniki pomiarów

Do analizy otrzymanych obrazów wykorzystano pojedyncze klatki, a do ich obróbki zastosowano korelację adaptacyjną o rozmiarze celi pomiarowej 64×64 pixele. Na rys. 4 przedstawiono wyniki dla wariantu wirowania cieczy w zbiorniku bez przegrody, a na rys. 5 wyniki dla wariantu z przegrodą.



Rys. 4. Pole prędkości przepływu cieczy przy dnie zbiornika (bez przegrody) w czasie: a) 37 s; b) 60 s; c) 99 s (po lewej wektory prędkości, po prawej mapa konturowa)



Rys. 5. Pole prędkości przepływu cieczy przy dnie zbiornika (wyposażonego w przegrodę) w czasie: a) 37 s; b) 60 s; c) 99 s (po lewej wektory prędkości, po prawej mapa konturowa)

Analiza wektorowych map pola prędkości wskazuje jednoznacznie wyłącznie obszary w którym występuje struga przepływu pierwotnego (napełnianie). Wobec powyższego koniecznym było opracowanie map konturowych z zaznaczonymi izopowierzchniami o zbliżonej wartości prędkości. Będą one przedmiotem dalszych rozważań.

Konturowe mapy pola prędkości dla wariantu z przegrodą, uzyskane jako prezentacje graficzne, ukazują przesunięcie obszarów o wyższych wartościach prędkości już dla początkowego czasu napełniania. Przemieszczenie to obejmuje obszar przy dnie od płaszcza zbiornika do jego centralnej strefy wraz ze wzrostem wartości czasu napełniania i wysokości napełnienia zbiornika.

W przypadku wariantu bez przegrody dla 37 i 60 sekundy prowadzenia napełniania uwydatnia się występowanie niższych wartości prędkości (ciemniejsze pola na rys 4a i 4b). Dopiero dla czasu końca etapu napełniania uwydatnia się występowanie obszarów o wyższych wartościach prędkości wektorów umiejscowionych znacznie bliżej centralnej strefy dna zbiornika bez przegrody.

Należy zwrócić uwagę, że dla granicznego rozpatrywanego czasu tylko w wariantcie z przegrodą można zaobserwować występowanie tzw. spirali *Ekmana*, czyli spiralnie uformowanej linii prądu przepływu.

Podsumowanie i wnioski

Uzyskane wyniki w postaci wektorowych map pola prędkości i map konturowych pozwoliły stwierdzić, iż występuje różnicowanie w rozkładzie prędkości w zależności od rozpatrywanego wariantu zabudowy w postaci płaskiej przegrody zorientowanej pod kątem 45° i zbiornika niezabudowanego.

Wykazano wstępnie, iż umieszczenie przegrody (o znacząco zredukowanym wymiarze w kierunku pionowym), podczas jednostronnego napełniania zbiornika, korzystnie wpływa na rozkład prędkości przepływu przy dnie zbiornika. Takie zorientowanie przepływu (w postaci przeniesienia głównej strugi przepływu w kierunku centralnej strefy dna zbiornika) wpływa korzystnie na warunki niezbędne do prawidłowego (symetrycznego) formowania się stożka osadu a także pozwala na skrócenie czasu niezbędnego do wystąpienia tego zjawiska.

Należy zatem prowadzić dalsze badania dla innych wariantów konstrukcji przegrody o przekroju pełnym. W przypadku przegrody płaskiej wystąpiło zjawisko lokalnego zawirowania powrotnego, które może gromadzić niewielkie ilości osadu za przegrodą.

LITERATURA

- Bamforth C. 2009. *Beer: Tap into the Art and Science of Brewing*. Oxford University Press
- Briggs D.E., Boulton S.A., Brookes P.A., Stevens R., 2004. *Brewing Science and Practice*. Woohed Publishing Ltd
- Cavazzini G. 2012. *The Particle Image Velocimetry – Characteristics, Limits And Possible Applications*. InTech
- Jakubowski M., 2008. *Wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych na proces zawirowań w kadzi wirowo – osadowej podczas klarowania zawiesin*. Praca doktorska. Politechnika Koszalińska, Koszalin
- Jakubowski M., 2011. Model symulacyjny przepływu w kadzi wirowej o zwielokrotnionym zasilaniu. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, nr 2, 58-61
- Jakubowski M., Diakun J., 2007. Simulation investigations of the effect Whirlpool dimensional ratios on the state of secondary whirls. *Journal of Food Engineering*, **83**, nr 1, 106-110. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.12.025
- Kamieński J., 2004. *Mieszanie układów wielofazowych*. WNT, Warszawa
- Kunze W., 2010. *Technology Brewing and Malting*. VLB, Berlin
- Oliver G. (Ed.), 2012. *The Oxford Companion to Beer*. Oxford University Press
- Raffel M., Willert C. E., Wereley S T., Kompenhans J., 2007. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Springer
- Sterczyńska M., Jakubowski M., 2012. Symulacja przepływu płynu w kadzi wirowej o wielopunktowym napełnianiu. *Inżynieria Rolnicza*, nr 3(138), 227-236

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy nr N N131 429639.