

Monika Sterczyńska, Marek Jakubowski

Politechnika Koszalińska

Aleksander Poreda

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

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

WPLYW KSZTAŁTU OTWORU WLOTOWEGO KADZI WIROWEJ NA FORMOWANIE SIĘ STOŻKA OSADU ZASTĘPCZEGO

Streszczenie: Podczas procesu klarowania brzezki piwnej w kadzi wirowej dobór odpowiedniej konstrukcji oraz parametrów procesów gwarantuje prawidłowy przebieg oddzielenia osadu gorącego od brzezki. W pracy przedstawiono wyniki analizy wpływu dwóch nowatorskich konstrukcji otworów wlotowych w kadzi wirowej na czasy występowania poszczególnych etapów formowania się stożka osadu zastępczego. W wyniku eksperymentu wykazano, iż użycie zaprojektowanych dysz znacznie skróciło czas zjawiska formowania się stożka osadu. Najbardziej skuteczny w realizacji procesu klarowania okazał się otwór wlotowy o konstrukcji dyszy płaskiej.

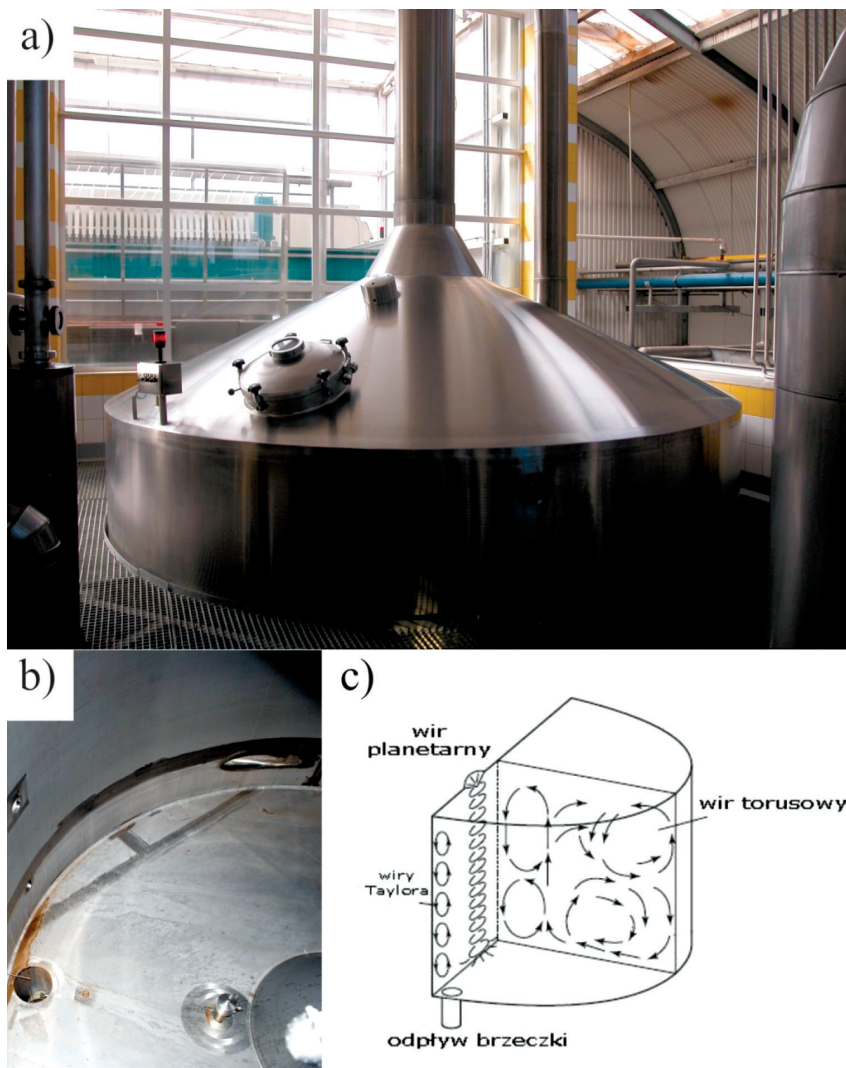
Słowa kluczowe: kadź wirowa, osad zastępczy, klarowanie, brzezka piwna.

1. Wstęp

Proces produkcji piwa można podzielić na dwa etapy. Pierwszym z nich jest produkcja brzezki piwnej, a następnym jej fermentacja. Sporządzanie klarownej brzezki (w dziale warzelni browaru) jest warunkiem koniecznym, niezbędnym do realizacji dalszych etapów przetwórczych prowadzących do powstania gotowego wyrobu. W celu sklarowania tzw. brzezki wybitej wykorzystywana jest kadź wirowa, zwana potocznie *whirlpoolem*, stanowiąca część linii technologicznej warzelni [Kunze 2010]. Ten cylindryczny zbiornik (rys. 1a), pozbawiony wewnętrznej zabudowy, pełni funkcję separatora. Przez umiejscowiony stycznie do płaszcza zbiornika otwór wlotowy (rys. 1b) wprowadzana jest klarowana brzezka. Oddzielenie konglomeratów białkowych osadu gorącego następuje naturalnie (grawitacyjnie), przy czym sedymentacja jest wspomagana ruchem wirowym mieszaniny [Kunze 2010; Dürholt 1988].

Podczas ruchu mieszaniny w zbiorniku występuje tzw. efekt filiżanki herbaty (*tea leaf effect*), którego oddziaływanie objawia się gromadzeniem osadu gorącego

w formie stożka umiejscowionego w centralnej strefie dennicy zbiornika. Za występowanie tego zjawiska odpowiedzialne są przepływy o charakterze wtórnym (rys. 1c), powstające jako konsekwencja rotacji brzeźki w zbiorniku *whirlpoola*. Ten specyficzny rodzaj ruchu jest uzależniony od umiejscowienia i ukształtowania otworu, przez który brzeźka jest wpompowywana do wnętrza separatora [Jakubowski, Diakun 2007; Einstein 1926].



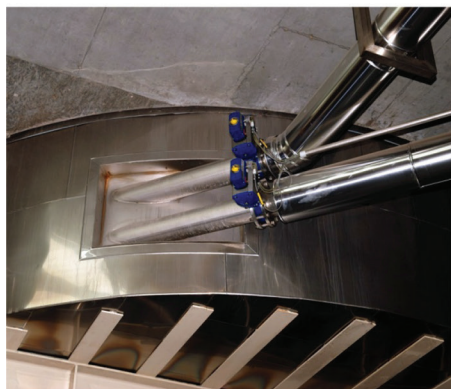
Rys. 1. Kadź wirowa: a) widok ogólny aparatu (Browar BROK w Koszalinie), b) wewnątrz z widocznym otworem wlotowym, c) szkic przepływów wtórnych

Źródło: a, b – zdjęcia własne; c – [Briggs i in. 2004].

2. Kształty otworów wlotowych kadzi wirowych

Kształt otworów wlotowych w kadziach wirowych jest zasadniczo jednolity. Powszechnie występuje rozwiązanie zbiornika wyposażone w otwór wlotowy o kształcie wynikającym z kształtu cylindrycznego (rurowego) przewodu doprowadzającego brzeczkę, profilowanego krzywizną pobocznicą cylindra płaszcza zbiornika (jak na rys. 1b). W przypadku zbiorników *whirlpoola* o największej pojemności (w Polsce są to separatory pracujące w browarze w Żywcu i Warce) wykorzystywane jest rozwiązanie konstrukcyjne, w którym występują dwa otwory wlotowe, umiejscowione równoległe (rys. 2a). Takie rozwiązanie pozwala zabezpieczyć odpowiednio wysoką wartość natężenia przepływu przy jednoczesnym zachowaniu właściwych średnic nominalnych przewodów zasilających (w tym przypadku jest to 2 razy DN 300). Pozwala to zachować warunki niezbędne do uzyskania stożka osadu (rys. 2b) w zbiorniku o pojemności nominalnej 1050 hl i średnicy 7600 mm.

a)



b)

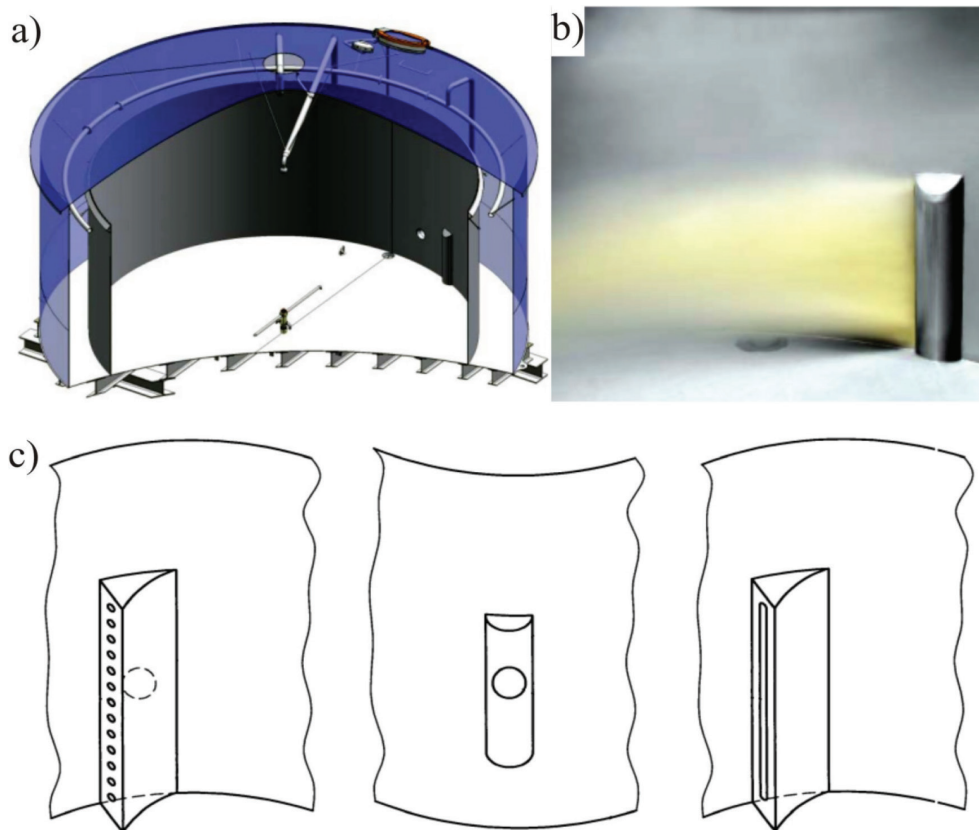


Rys. 2. Kadź wirowa z podwójnym wlotem: a) widok przewodów zasilających od strony zewnętrznej płaszcza zbiornika (browar Warka), b) stożek osadu w opisywanym zbiorniku (w górnym lewym rogu fotografii widoczne otwory wlotowe)

Źródło: zdjęcia własne.

Najnowszym rozwiązaniem w zakresie usuwania osadu gorącego w separatorze z zawirowaniem jest opatentowany i wdrożony przez koncern Steinecker *whirlpool* o nazwie Calypso (rys. 3a). Ponieważ łączy on dwie operacje w jednym zbiorniku, został opisany nazwą *whirlship*. Separator ten jest wyposażony w unikatowe rozwiązanie w postaci wlotu o kształcie szczeliny (rys. 3b). Rozwiązanie to jest chronione patentem, w którym koncepcyjnie zaproponowano szczególnie interesujące rozwiązania o profilowanym kształcie obudowy szczeliny otworu wlotowego (rozwiązania prezentowane na rys. 3c, pierwszy i ostatni wariant). Celem takiego rozwiązania jest

dotatkowa intensyfikacja wirowania brzezki, co może skutkować polepszeniem warunków formowania się stożka osadu gorącego. Szczelina profilowana nie została jednak wykorzystana w rozwiązaniach zbiorników testowanych w warunkach przemysłowych. W chwili obecnej brak jest także informacji dotyczących poprawności działania tego typu rozwiązań [Steinecker 2013; Diakun, Jakubowski 2009; Wasmuht i in. 2007].



Rys. 3. *Whirlship Calypso*: a) widok ogólny zbiornika, b) szczelinowa dysza wlotowa, c) warianty kształtu szczeliny wlotowej

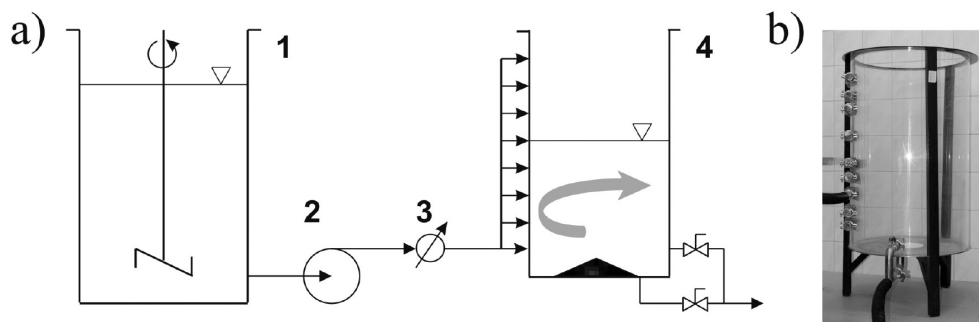
Źródło: a, b – [Steinecker 2013]; c – [Wasmuht i in. 2007].

3. Cel pracy

Celem pracy była analiza wpływu kształtu otworów wlotowych w laboratoryjnym zbiorniku kadzi wirowej na występowanie i intensyfikację zjawiska powstawania stożka osadu zastępczego.

4. Stanowisko badawcze

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem stanowiska badawczego (rys. 4a), wyposażonego w zbiornik laboratoryjnej kadzi wirowej, wykonanej z PMMA (polimetakrylan metylu), materiału posiadającego przezroczystość na poziomie ok. 92%, która jest niezbędna do obserwacji zjawiska formowania się stożka osadu. Średnica zbiornika wynosiła 640 mm, maksymalna wysokość napełniania 960 mm, co pozwala osiągnąć pojemność maksymalną na poziomie 3 hl. Kadź w wykonaniu podstawowym miała zestaw dziewięciu otworów wlotowych umiejscowionych stycznie do ściany zbiornika (rys. 4b). W prezentowanym eksperymencie wykorzystano otwór wlotowy o średnicy DN 50 (o przekroju kołowym) umiejscowiony w najmniejszej odległości od dna zbiornika, na wysokości 160 mm, co stanowi wysokość odpowiadającą 0,25 średnicy zbiornika D .



Rys. 4. Stanowisko badawcze: a) schemat: 1) zbiornik do preparacji mieszaniny, 2) pompa, 3) przepływomierz PM 390, 4) laboratoryjna kadź wirowa *whirlpool*; b) widok ogólny zbiornika (po lewej stronie widoczne końcówki otworów wlotowych)

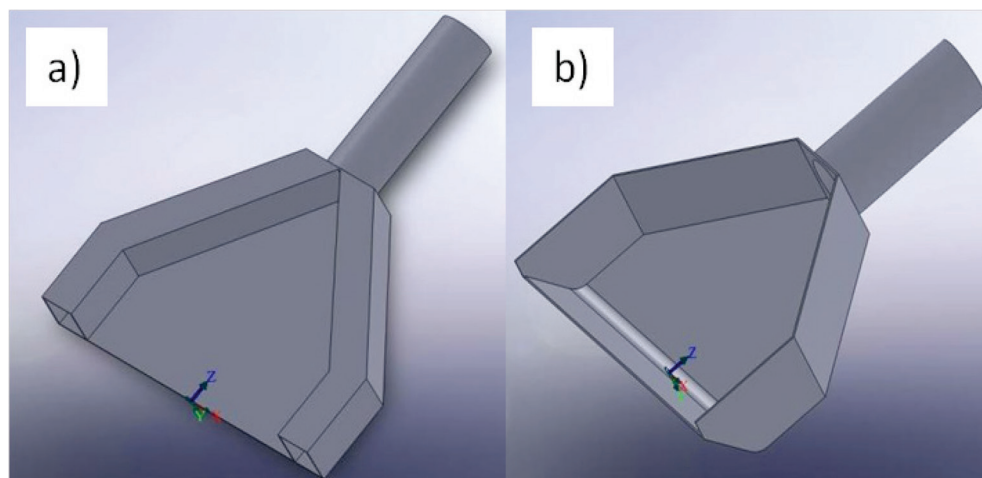
Źródło: a – [Jakubowski 2008]; b – fotografia własna.

Podczas prowadzenia badań kadź napełniano do wysokości równej wartości średnicy zbiornika ($H:D=1$). Do wizualizacji formowania się stożka wykorzystano osad zastępczy w postaci granulatu PA (poliamidu) z domieszką czerwonego barwnika. Koncentracja osadu została ustalona na poziomie 1% w odniesieniu do objętości podstawowej napełnienia zbiornika kadzi.

W celu rejestracji napełniania i wirowania w *whirlpoolu* stanowisko badawcze wyposażone było w kamerę Full HD i aparat fotograficzny. Rejestracja pozwoliła na zidentyfikowanie czasu występowania stanów charakterystycznych występujących podczas formowania się stożka osadu. Rejestrację i pomiar prowadzono od momentu wpływania separowanej mieszaniny do kadzi wirowej.

Do przeprowadzenia badań wykorzystano 3 rodzaje dysz (standardową, płaską oraz podwójną o przekroju prostokątnym). Dysze o zmodyfikowanej konstrukcji zo-

stały zaprojektowane w programie SolidWorks, a ich prototypy wykonane zostały ze stali nierdzewnej [Czajkowski 2011]. Oba warianty posiadały szerokość 180 mm. Ze względu na zróżnicowane rozmieszczenie i kształt końcowych otworów wlotowych różniły się długością. W przypadku dyszy podwójnej (rys. 5a) wynosiła ona 240 mm, natomiast dla dyszy płaskiej (rys. 5b) długość wynosiła 210 mm.



Rys. 5. Modele dysz wykorzystywanych do badań: a) podwójna, b) płaska

Źródło: [Czajkowski 2011].

W dyszy podwójnej jeden okrągły kanał wylotowy został zastąpiony dwoma czworokątnymi (szerokość otworów 20 mm, wysokość 31 mm), które dzieliły go na dwie połówki, powodując równomierny przepływ cieczy w dwóch strumieniach. Dysza płaska wyposażona została w płaską szczelinę (na wysokości 10 mm), która umożliwiała wprowadzanie cieczy w postaci jednego wąskiego strumienia.

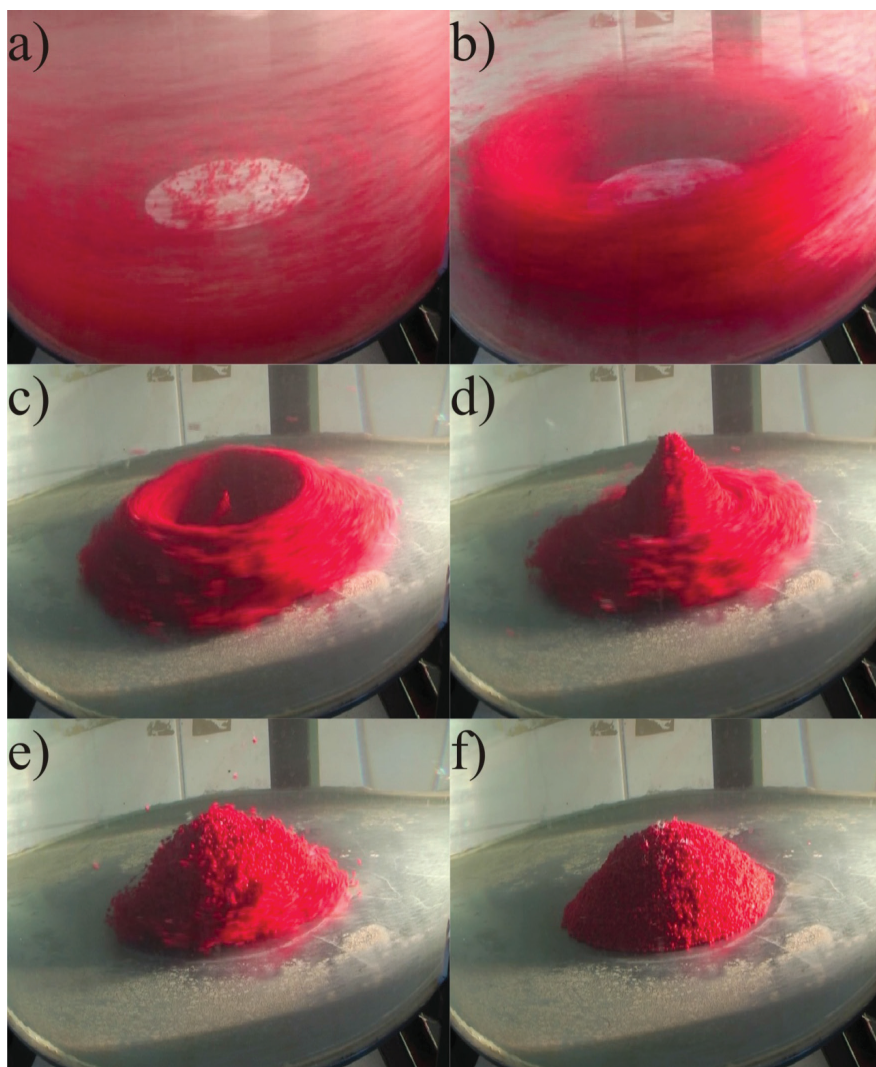
Napełnianie zbiornika laboratoryjnego *whirlpoola* (dla rozpatrywanych wariantów) prowadzono przy średniej wartości prędkości napełniania 3,15 i 3,95 m/s.

5. Analiza wyników

Testowe wirowania pozwoliły na porównanie czasów występowania stanów charakterystycznych formowania się stożka osadu zastępczego. Wyróżniono pięć postaci charakterystycznych. Przeprowadzono analizę wpływu zróżnicowania kształtu otworów wlotowych w laboratoryjnej kadzi wirowej na formowanie się stożka osadu zastępczego przez porównanie czasów występowania jego stanów charakterystycznych.

Na rysunku 6 przedstawiono fotografie obrazujące postacie geometryczne formującego się stożka dla czasów występowania stanów charakterystycznych. Są

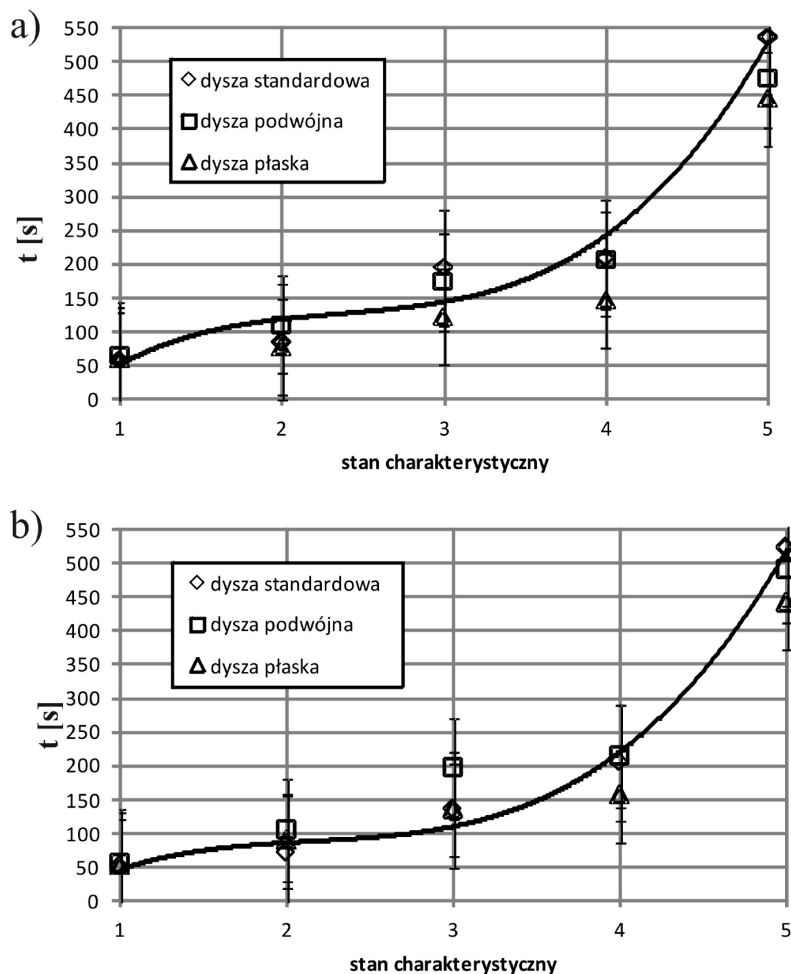
to: stan początkowego formowania się torusa (rys. 6a), jego pełne uformowanie (rys. 6b), minimalizacja średnicy wewnętrznej i zamknięcie się w postaci początkowej (rys. 6c), obrót uformowanego stożka osadu (rys. 6d i 6e) oraz postać spoczynkowa i całkowite zatrzymanie się uformowanej końcowej postaci geometrycznej stożka osadu (rys. 6f).



Rys. 6. Etapy formowania się stożka osadu: a) ruch cząstek osadu w przestrzeni zewnętrznej zbiornika, b) początek formowania się osadu w kształcie torusa, c) zamknięcie się torusa – początek formowania się stożka osadu, d) stożek ruchomy w postaci sprzyjającej do występowania rurki wirowej, e) ruchomy stożek osadu, f) całkowicie uformowany stożek osadu – koniec wirowania

Źródło: [Wiedro-Stempińska 2012].

Na rysunku 7 przedstawiono wykresy prezentujące czas dla stanów charakterystycznych występujących podczas formowania się stożka osadu w kadzi wirowej wyposażonej w rozpatrywane konstrukcje dysz napełniających zbiornik separatora. W analizie stanów charakterystycznych formowania się stożka osadu zastępczego nie uwzględniono czasu występowania postaci stożka z charakterystyczną niestabilnością w postaci rurki wirowej, ponieważ nie występowała ona dla wszystkich analizowanych wariantów napełniania *whirlpoola*.



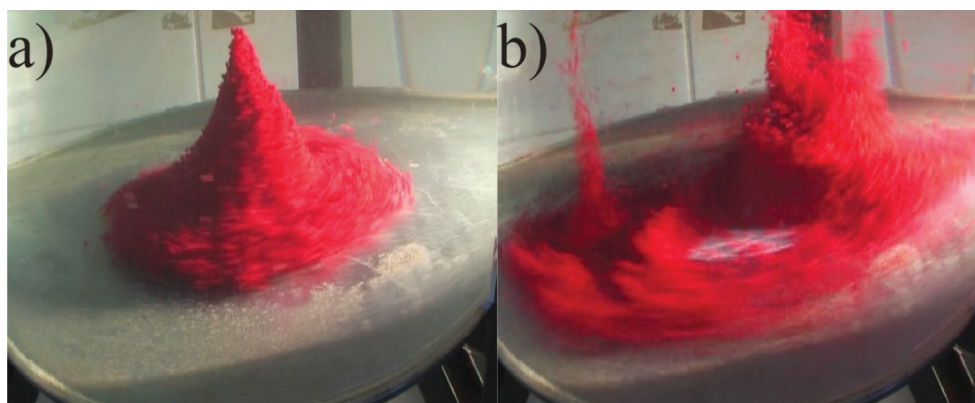
Rys. 7. Czasy występowania stanów charakterystycznych podczas formowania się stożka osadu w kadzi wirowej przy zastosowaniu różnych konstrukcji dysz przy prędkości napełniania a) 3,15 m/s; b) 3,95 m/s (na osi odciętych: 1 – początek formowania się torusa; 2 – zamknięcie się torusa; 3 – obracający się stożek; 4 – stożek nieruchomy; 5 – całkowite zatrzymanie i uformowanie się stożka)

Źródło: opracowanie własne.

Porównanie czasów występowania poszczególnych stanów charakterystycznych pozwoliło stwierdzić, iż zwiększenie prędkości napełniania o 0,80 m/s skróciło czas formowania się stożka osadu zastępczego w przypadku dysz z pojedynczym wlotem. Analizowane rodzaje dysz dla prędkości napełniania będących wartościami zadanymi w eksperymentach różnicowały przede wszystkim czasy występowania stanów od zamknięcia torusa do końca wirowania. Czasy początku formowania się stożka w kształcie torusa we wszystkich analizowanych przypadkach były zbliżone do siebie. Największe rozbieżności wystąpiły dla czasów właściwych dla stanu zidentyfikowanego jako obracający się torus.

W zależności od kształtu szczelin wlotowych, przy tych samych warunkach realizacji napełniania, najwcześniej stany końcowe (3 i 4) stwierdzono przy napełnianiu z wykorzystaniem dyszy płaskiej. W przypadku dyszy o przekroju kołowym (standardowej), niezależnie od prędkości napełniania, całkowite uformowanie się stożka następowało po najdłuższym zmierzonym czasie wirowania, wynoszącym ponad 520 s.

Kształt wlotu w analizowanych dyszach nie pozostał bez wpływu na występowanie niestabilności w postaci rurek wirowych, które występują okresowo, unosząc szczyt formującego się stożka osadu. Na rysunku 8 przedstawiono różnicowanie występowania rurki wirowej podczas napełniania z wykorzystaniem dyszy podwójnej (rys. 8a) i płaskiej (rys. 8b).



Rys. 8. Niestabilność w postaci chwilowo występujących wirów planetarnych tworzących rurki wirowe: a) dysza podwójna, b) dysza płaska (prędkość napełniania dla obu wariantów napełniania wynosiła 3,95 m/s)

Źródło: [Czajkowski 2011].

6. Wnioski

Zwiększenie prędkości napełniania zbiornika, przy zastosowaniu kształtu dyszy, która zapewniała wprowadzanie cieczy w postaci wąskiej i długiej strugi, spowo-

dowało skrócenie czasów formowania się stożka osadu zastępczego. Należy zatem poszukiwać rozwiązań korzystnych, badając relacje grubości szczeliny do jej wysokości. Nie bez znaczenia także wydaje się profil kształtu obudowy szczeliny wlotowej dyszy.

Kształt zastosowanej w *whirlpoolu* dyszy ma znaczący wpływ na końcowy czas formowania się stożka osadu. Najkorzystniejszym rozwiązaniem konstrukcyjnym w przypadku skrócenia całkowitego czasu procesu okazała się dysza wyposażona w płaską szczelinę. Najmniej korzystne jest rozwiązanie klasyczne, przy czym dla występowania stanów charakterystycznych w postaci zamknięcia się stożka w kształt torusa i formującego się stożka w ruchu obrotowym najmniej korzystne jest rozwiązanie wyposażone w podwójny wlot.

Literatura

- Briggs D.E., Boulton C.A., Brookes P.A., Stevens R., *Brewing – Science and practice*, CRC Press, BocaRaton Boston New York Washington, DC 2004.
- Czajkowski K., *Badania eksperymentalne wpływu ukształtowania otworu wlotowego kadzi wirowej na postać geometryczną uformowanego osadu*, Praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Koszalińska, Koszalin 2011.
- Diakun J., Jakubowski M., *Analiza funkcjonalna konstrukcji kadzi wirowo-osadowych Whirlpool*, „Inżynieria i Aparatura Chemiczna” 2009, 48(1), s. 22-23.
- Dürholt A., *Experimentelle Untersuchung der instationären Drehströmung im Absatzbehälter “Whirlpool”*, VDI, Düsseldorf 1988.
- Einstein A., *Die Ursache der Mäanderbildung der Flußläufe und des sogenannten Baer’schen Gesetzes*, “Naturwissenschaft” 1926, 2, s. 223-224.
- Jakubowski M., Diakun J., *Simulation investigations of the effect Whirlpool dimensional ratios on the state of secondary whirls*, “Journal of Food Engineering” 2007, 83(1), s. 106-110.
- Jakubowski M., *Wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych na proces zawirowań powstających w kadzi wirowo-osadowej podczas klarowania zawiesin*, Praca doktorska, Politechnika Koszalińska, Koszalin 2008.
- Kunze W., *Technology Brewing and Malting*, VLB Berlin, 2010.
- Steinecker 2007, materiały informacyjne ze strony internetowej firmy Steinecker, <http://www.bidonequipment.info/pdf%20files/KRONES%20STEINECKER%20Calypso.pdf> [dostęp: maj 2013].
- Wasmuht K., Pritscher R., Kammerloher H., Stippler K., *Whirlpool, patent europejski nr 1820845A1*, 2007.
- Wiedro-Stempińska A., *Badania wpływu warunków napełnienia i stopnia koncentracji zawiesiny na formowanie się stożka osadu w kadzi wirowej*, Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Koszalińska, Koszalin 2012.

THE IMPACT OF THE CYCLING VAT INLET'S SHAPE ON THE PROCESS OF FORMING THE CONE OF SUBSTITUTE SEDIMENT

Summary: Suitable construction and parameters for the process of separating hot trub from wort ensure its proper conduct. The presented work is an analysis of impact of two innovative inlet constructions on the timing of occurrence of consecutive phases of forming the cone of substitute sediment in a cycling vat. As a result of the experiment, it has been proved that using the nozzles of our design has significantly shortened the time it takes to form the break cone. During the execution of the process of separation, the flat nozzle inlet has proved as the most effective.

Keywords: whirlpool, hot trub, separation, beer wort.