

MAREK JAKUBOWSKI
IWONA WOJTASIK

Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Politechnika Koszalińska, Koszalin

Analiza symulacyjna wpływu prędkości początkowej na stan przepływów wtórnych występujących w kadzi wirowo-osadowej

Wstęp

Kadz wirowo-osadowa (zwana także kadzią wirową lub w praktyce produkcyjnej tzw. *whirlpoolem*) jest urządzeniem stosowanym w browarnictwie do wydzielania osadu gorącego w operacji klarowania brzeczki piwnej po jej gotowaniu. Podstawowym etapem pracy kadzi jest jej napełnianie. Etap ten decyduje o warunkach przepływu, jakie ustalą się po jego zakończeniu. Prędkość napełniania zależna jest od objętości zbiornika kadzi, natężenia przepływu brzeczki wpompowywanej do kadzi oraz od jej objętości przewidzianej do klarowania. Prędkość ta jest na tyle zróżnicowana, iż zasadniczo nie istnieje żaden standard w tym zakresie. Dostępne źródła literaturowe (bazujące głównie na doświadczeniu wynikającym z praktyki produkcyjnej) rekomendują zasilane kadzi z prędkością od 1,5 do 3,5 m/s [1], podawany jest także przedział od 2 do 5 m/s [2], a w skrajnych przypadkach realizacji operacji do 10–14 m/s [3].

Po napełnieniu następuje etap wirowania, dla którego początkowa prędkość maksymalna przepływu napędowego (w obszarze zbliżonym do ściany zbiornika) wynosi około 0,8 wartości prędkości napełniania [4, 5]. Na tym etapie formuje się system przepływów wtórnych. Warunki jakie ustalają się po realizacji napełniania w połączeniu z warunkami geometrycznymi zbiornika determinują poprawność działania kadzi.

Zakres analiz

Przeprowadzono serię analiz symulacyjnych wirowania płynu, dla modelu geometrycznego zbiornika kadzi wirowo-osadowej. Wymiary obiektu symulacji były zgodne z wymiarami posiadanej laboratoryjnej kadzi wirowej o średnicy $D = 0,64$ m. Przy napełnieniu zbiornika do wysokości równoważnej średnicy ($H:D = 1$) objętość wirującego płynu wynosi $V = 0,205$ m³. Zagadnienie modelowane było w cylindrycznym układzie współrzędnych (r – promień, φ – kąt po obwodzie, z – wysokość), jako płaskie, osiowoosymetryczne z wirowaniem (przepływ *swirl*) [6]. Jako warunki początkowe modeli przyjęto zróżnicowane wartości prędkości maksymalnej przepływu głównego, które wynosiły: 0,25; 0,5; 1,5; 3 i 6 m/s. Za wartość bazową (odniesienia) przyjęto początkową wartość prędkości właściwą dla obiektu symulacji i wynoszącą $u_{max} = 1,5$ m/s. Odzworowaniem swobodnej powierzchni w zerowym kroku symulacji było jej pochylenie o kąt właściwy dla deklarowanej prędkości początkowej.

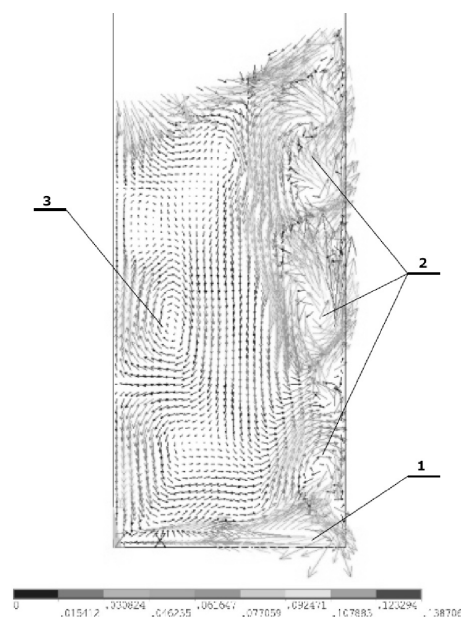
Symulację przeprowadzono z wykorzystaniem pakietu ANSYS FLOTRAN, który pozwala na uzyskanie rozwiązania

numerycznego układu równań opisującego ruch płynu. Zagadnienie modelowano jako turbulентne stosując model turbulencji *GIR (Model of Girimaji)*. Wygenerowano pięć modeli, a następnie przeprowadzono ich dyskretyzację za pomocą elementu siatki o nazwie *Fluid 141*. Na podstawie wcześniejszych analiz oraz badań eksperymentalnych ustalono przedział czasowy symulacji od 0 do 300 s wirowania, a maksymalną ilość iteracji kroku czasowego na 1000.

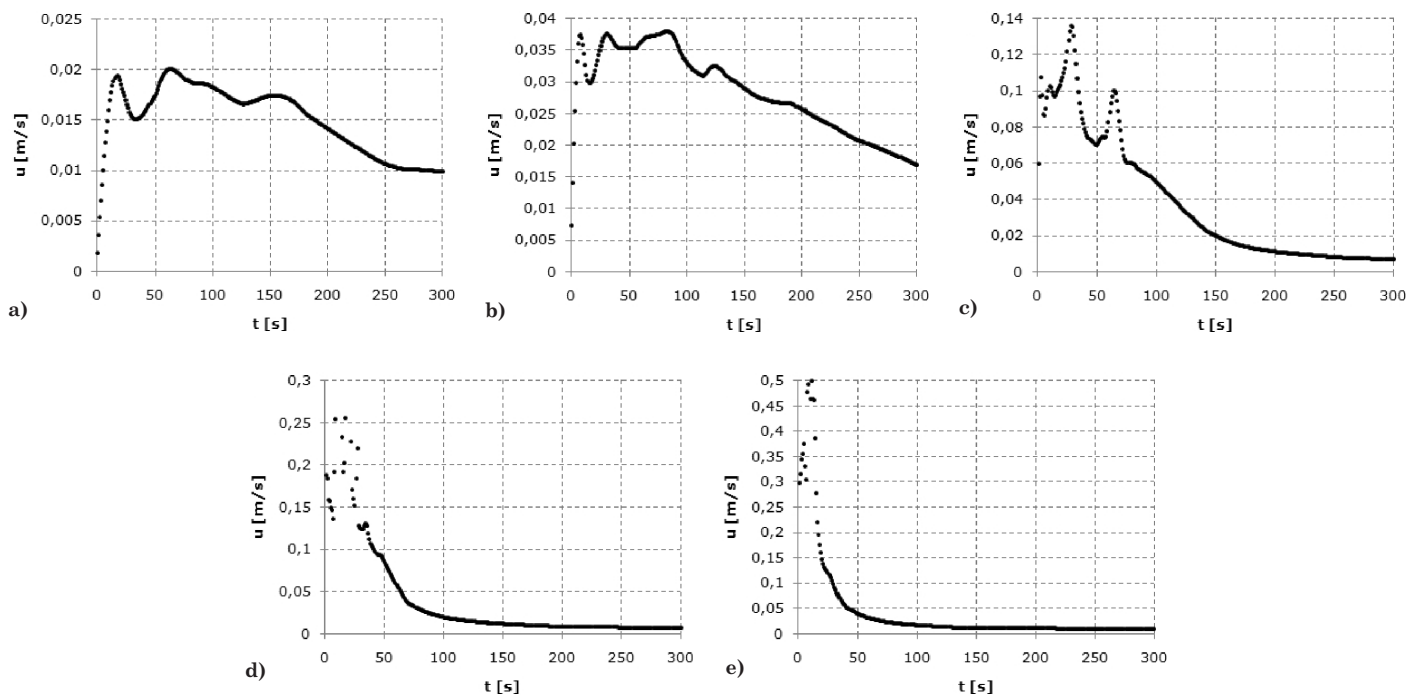
Wyniki symulacji przedstawiają czysto hydrodynamiczny aspekt wirowania cieczy, nie uwzględniają oddziaływań między cząstkami osadu separowanego w stożku. Ocenie podlegał wpływ wartości prędkości początkowej na stanu i kinetykę przepływów wtórnych występujących podczas klarowania w kadzi wirowej.

Analiza wyników symulacji

W wyniku przeprowadzonej analizy uzyskano wektorowe mapy rozkładu prędkości przepływu napędowego (pierwotnego) oraz przepływów wtórnych. Na rys. 1. Przedstawiono przykładową mapę prędkości z wyszczególnieniem przepływów wtórnych występujących podczas przepływu w kadzi wirowej. Analiza wektorowych map prędkości przepływu dostarczyła informacji na temat struktury przepływów wtórnych oraz ich wzajemnego oddziaływania na siebie.



Rys. 1. Mapa prędkości ruchu płynu w kadzi wirowej ilustrująca przepływy wtórne: 1) przepływ namywający; 2) zawirowania przyścienne; 3) przepływ centralny



Rys. 2. Rozkład prędkości przepływu namywającego w kadzi wirowej dla początkowej prędkości wirowania: a) 0,25 m/s; b) 0,5 m/s; c) 1,5 m/s; d) 3 m/s; e) 6 m/s

W przypadku modeli o prędkości początkowej $u_{max} = 0,25$ m/s i $u_{max} = 0,5$ m/s zaobserwowano ograniczone występowanie zawirowań przyściennych (występujących w tzw. warstwie *Stewardsona*) oraz ich wcześniejsze zanikanie, co skutkuje brakiem korzystnego oddziaływania w postaci włączania się tych zawirowań do przepływu namywającego. Dla modeli o prędkości początkowej $u_{max} = 3$ m/s i $u_{max} = 6$ m/s zawirowana przyścienne powodowały fluktuacje swobodnej powierzchni oraz niekorzystne zaburzenia w obszarze występowania przepływu namywającego, co skutkowało jego niestabilnością. Dla modeli o prędkości początkowej $u_{max} = 3$ m/s i $u_{max} = 6$ m/s zaobserwowano dodatkowo zaburzenia w występowaniu przepływu centralnego, który także powodował fluktuacje swobodnej powierzchni, a także niekorzystne ograniczanie oddziaływania przepływu namywającego.

Kolejnym elementem analizy modeli o zróżnicowanej prędkości początkowej było określenie zmiany kinetyki przepływu wtórnego odpowiedzialnego za namywanie stożka osadu. Na rys. 2 przedstawiono rozkłady prędkości tego przepływu właściwe dla analizowanych modeli, dla deklarowanego przedziału czasu wirowania.

Analiza kinetyki zmian prędkości przepływu namywającego ujawnia występowanie stabilnej jego charakterystyki dla modeli o prędkości początkowej $u_{max} = 0,25$ m/s i $u_{max} = 0,5$ m/s (Rys. 2a i 2b). W modelu o prędkości początkowej $u_{max} = 0,5$ m/s występuje korzystnie najwyższa wartość prędkości przepływu namywającego dla końca rozpatrywanego przedziału czasu wirowania (Rys. 2b). Nie wykazano natomiast wzrostu wartości prędkości przepływu namywającego związanego z silnym oddziaływaniem zawirowań przyściennych (tak jak ma to miejsce w przypadku modelu o $u_{max} = 1,5$ m/s, dla przedziału czasu wirowania od 50 do 70 s wirowania – Rys. 2c). W przypadku modeli o prędkościach

początkowych wirowania $u_{max} = 3$ m/s i $u_{max} = 6$ m/s (Rys. 2d i 2e) występują silne niestabilności przepływu namywającego, co wskazuje na występowanie straty energii wirowania niezbędnej do ustabilizowania przepływu namywającego. Dodatkowo przedział czasowy o niestabilnym charakterze formowania się przepływu nie pozwala w pełni wykorzystać oddziaływania zawirowań przyściennych.

Podsumowanie

Wyniki analizy przepływów w laboratoryjnej kadzi wirowej wskazują, iż zalecane są mniejsze (nie przekraczające 2 m/s) wartości prędkości zasilania, co związane jest z występowaniem dla wartości 3 i 6 m/s niestabilności przepływu odpowiedzialnego za formowanie się stożka osadu.

Prędkości napełniania kadzi wirowej powinny być dobierane indywidualnie dla każdej proporcji wymiarowej (smukłości napełnienia kadzi) i objętości wirowanej brzezki. Może w tym być pomocny opracowany model, który pozwalałby na dokonanie wyboru przedziału prędkości napełniania w oparciu o charakterystykę układu przepływów odpowiedzialnych za formowanie się stożka osadu w kadzi wirowej.

LITERATURA

1. W. Kunze: Technologie Brauer und Mälzer, Berlin, VLB, 1998.
2. W. Hardwick: Handbook of Brewing, CRC Press, 1994.
3. F. Hlaváček, A. Lhotský: Piwowarstwo, Warszawa, WNT, 1969.
4. A. Dürholt: Experimentelle Untersuchung der instationären Drehströmung im Absetzbehälter "Whirlpool", Düsseldorf, VDI, 1988.
5. R. Michel: Grundlegende Mechanismen der Heißtrubabscheidung im Whirlpool, TUM, 1989.
6. M. Jakubowski: Wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych na proces zawirowań w kadzi wirowo-osadowej podczas klarowania zawiesin, Politechnika Koszalińska, 2008.