

Dr inż. Marek JAKUBOWSKI

Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Politechnika Koszalińska

MODEL SYMULACYJNY PRZEPŁYWU W KADZI WIROWEJ O ZWIELOKROTNIONYM ZASILANIU®

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

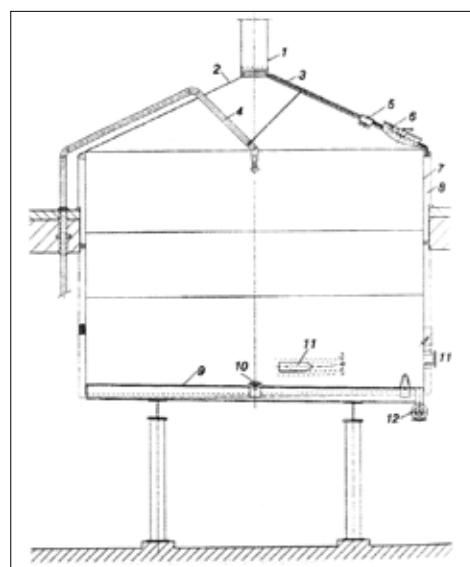
Artykuł prezentuje wyniki obliczeń opracowanego modelu symulacyjnego CFD (Computational Fluid Dynamics) dla przepływu płynu w zbiorniku kadzi wirowej typu Whirlpool. Przedmiotem analizy było porównanie przepływu dla dwóch wariantów zasilania kadzi wirowej – jednostronnego (klasycznego) i podwójnego, zwielokrotnionego po obwodzie. Celem analizy było określenie wpływu zastosowania zwielokrotnionego zasilania na stan i charakter przepływów wtórnych występujących podczas wirowania płynu w zbiorniku kadzi wirowej.

Słowa kluczowe: symulacja, kadź wirowa, przepływ wtórny, zwielokrotnione zasilanie.

WPROWADZENIE

Kadź wirowa zwana potocznie whirlpoolem to zbiornik do separacji osadów gorących po procesie gotowania brzezki piwnej. Wykorzystywany jest w niej efekt koncentracji sedimentującego osadu w postaci stożka w centralnej strefie dennicy zbiornika [2]. Ta specyficzna forma geometryczna koncentracji osadu jest konsekwencją ruchu wirowego brzezki uzyskiwanego poprzez napełnianie kadzi po stycznej [3, 5]. Kadź wirowa jest aparatem stosowanym powszechnie. Klasyczna jej konstrukcja (rys. 1), to cylindryczny zbiornik z płaskim dnem pozbawiony wewnętrznej zabudowy, która zakłócałaby wirowanie brzezki. Podstawowe zasady konstrukcyjne i eksploatacyjne w odniesieniu do tego separatora nie uległy zasadniczo większym zmianom od czasu wprowadzenia tego typu rozwiązania, czyli od drugiej połowy XX wieku. Sama idea pracy tego typu zbiornika jest jednak znacznie starsza. Już w latach trzydziestych XX wieku niemiecka firma GEIGER opatentowała konstrukcję i sposób wykorzystania piaskownika (stosowanego w oczyszczaniu ścieków), który pracował w bardzo podobny sposób do whirlpoola [4]. Pomimo powszechności stosowania kadzi wirowej w procesie technologicznym wytwarzania brzezki piwnej część kadzi wirowych działa w sposób niedostatecznie zadowalający. Uwydatnia się to zwłaszcza (podczas opróżniania sklarowanej brzezki) w postaci rozmywającego się, niesymetrycznie uformowanego stożka osadu. Istnieje potrzeba poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych w zakresie poprawy uwarunkowań tworzenia się stożka osadu o zwartej konsystencji zebranego w centralnej strefie dna zbiornika.

Należy przyjąć, iż zmiany parametrów konstrukcyjnych kadzi wirowych są podporządkowane potrzebie usuwania osadu z dążeniem do minimalizacji strat brzezki piwnej oraz zintensyfikowaniu zjawiska powstawania przepływu odpowiedzialnego za namywanie stożka osadu gorącego przy jednoczesnej potrzebie maksymalnego skrócenia czasu realizacji operacji. W praktyce przemysłowej parametry konstrukcyjne i procesowe są często determinowane także przez warunki zabudowy warzelni, liczbę i pojemność dostępnych naczyń, posiadane uzbrojenie i dostępne pomocnicze urządzenia technologiczne oraz cykl pracy samej warzelni [7].



Rys. 1. Szkic klasycznej konstrukcji kadzi wirowej, gdzie: 1 – komin wyciągu; 2 – kopuła; 3 – odpływ wody kondensacyjnej; 4 – dysza górna CIP; 5 – oświetlenie; 6 – otwór rewizyjny; 7 – płaszcz izolacyjny; 8 – izolacja; 9 – dno zbiornika z 1% pochyleniem w kierunku wylotu; 10 – dysza dolna CIP; 11 – dysza zasilająca; 12 – przewód odbierający.

Źródło: Kunze W., 2010.

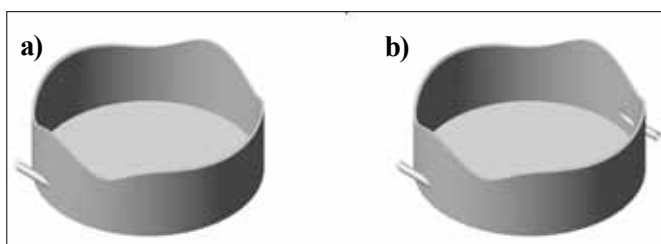
Celem artykułu jest przedstawienie wyników obliczeń opracowanego modelu symulacyjnego CFD (Computational Fluid Dynamics) dla dwóch wariantów zasilania zbiornika kadzi wirowej typu Whirlpool – stosowanego w procesie produkcji brzezki piwnej.

KONCEPCJA MODYFIKACJI KONSTRUKCJI

Badania własne dotyczące struktury przepływów występujących w kadzi wirowej ujawniły, iż powstający podczas napełniania zbiornika przepływ pierwotny (będący konsekwencją specyficznego sposobu napełniania) dąży do swoistej symetryzacji. Celem sprawdzenia powyższej obserwacji przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych z wykorzystaniem osadu zastępczego. Wykazały one, iż początkowa faza występowania przepływu namywającego (objawiająca się formowaniem osadu w kształcie zbliżonym do torusa)

przypada na czas właściwy dla symetryzowania się przepływu napędowego, który występuje pod koniec czasu napełniania. Powstała więc koncepcja jego symetryzacji już na etapie napełniania. Zaproponowano wprowadzenie modyfikacji konstrukcji jednostronnego zasilania kadzi (rys. 2a). Istotą nowego rozwiązania jest założenie, iż wprowadzenie tzw. brzechki piwnej do kadzi odbywać się będzie z wykorzystaniem co najmniej dwóch, symetrycznie rozmieszczonych otworów wlotowych (rys. 2b), które umiejscowione będą w jednakowych odległościach na obwodzie ściany zbiornika. Rozwiązanie takie zapewni równoważące dwu- lub wielopunktowe napełnianie kadzi wirowej, prowadzące do symetryzacji przepływu w zbiorniku już na etapie napełniania [8].

Opisana powyżej koncepcja modyfikacji konstrukcji zasilania kadzi wirowej jest przedmiotem zgłoszenia zastrzeżenia patentowego nr P388831.



Rys. 2. Porównanie rozwiązań zasilania kadzi wirowej: a) w konstrukcji klasycznej (z pojedynczym wlotem); b) z podwojonym wlotem [11].

Źródło: Polczyński P., 2010.

W dalszej części pracy ograniczono rozważania do najprostszej postaci proponowanej modyfikacji konstrukcji klasycznej, a więc do dwóch symetrycznie rozmieszczonych otworów wlotowych umiejscowionych na jednakowej wysokości.

MODELOWANIE PRZEPLÝWU

W warunkach codziennej praktyki produkcyjnej brak jest możliwości optymalizacyjnych w zakresie zmian parametrów konstrukcyjnych i procesowych. Możliwe do realizacji są jedynie badania na etapie tworzenia prototypu nowego rozwiązania. Najlepszym podejściem do zagadnienia w przypadku aparatów przepływowych jest budowa modeli laboratoryjnych, przeprowadzenie badań a następnie skalowanie zjawisk zachodzących w przepływie z wykorzystaniem teorii podobieństwa. Wymaga to jednak wykonania wielu wariantów konstrukcyjnych modeli rzeczywistych samego zbiornika. Takie analizy są z oczywistych względów bardzo kosztowne, a jednocześnie posiadają pewne ograniczenia w zakresie pomiarów intensywności samego zjawiska przepływu. Dlatego też coraz powszechniej stosuje się metody numeryczne. Jedną z nich jest CFD (Computational Fluid Dynamic), która pozwala prowadzić analizę przepływu dla zbiorników posiadających modyfikacje konstrukcyjne, w oparciu o siatki wygenerowane na bazie geometrycznego odwzorowania obiektu rzeczywistego. Modelowanie CFD, jak każda dostępna dziś metoda modelowania, jest tylko pewnym przybliżeniem rzeczywistości. Na podstawie wyników takich analiz można jednak z powodzeniem wnioskować o charakterze symulowanego zjawiska, a także uzyskać dane dotyczące parametrów przepływu.

Zagadnienie przepływu płynu w kadzi wirowej zamodelowano w oparciu o sporządzony opis formalny w cylindrycznym układzie współrzędnych. Szczegółowy opis zaprezentowano w opublikowanej pracy [6]. Analiza uwzględniała napełnianie pustego zbiornika oraz wirowanie płynu. Wymiary geometryczne obiektu symulacji przyjęto tak, aby był on porównywalny z posiadanym modelem rzeczywistym laboratoryjnej kadzi wirowej.

Symulację przeprowadzono korzystając z pakietu ANSYS CFX 12.1, który jako narzędzie CFD pozwala na uzyskanie rozwiązania numerycznego układu równań opisującego ruch płynu w obszarze dyskretnym modelu. Ze względu na charakter zjawiska ruchu płynu w kadzi wirowej zagadnienie modelowano jako turbulентne [1, 4, 5].

Model geometryczny przygotowany do analizy posiadał odwzorowanie zasilania dwustronnego, przy czym wykonano dwa cykle obliczeniowe dla napełniania jedno i dwustronnego. Jako warunek początkowy zadeklarowano prędkość napełniania wynoszącą 2,5 [m/s]. Wartość ta odpowiada prędkości zasilania laboratoryjnej kadzi wirowej. Przy zasilaniu dwustronnym prędkość po każdej ze stron stanowiła 50% prędkości zasilania dla modelu napełnianego jednostronnie.

WYNIKI ANALIZY SYMULACYJNEJ

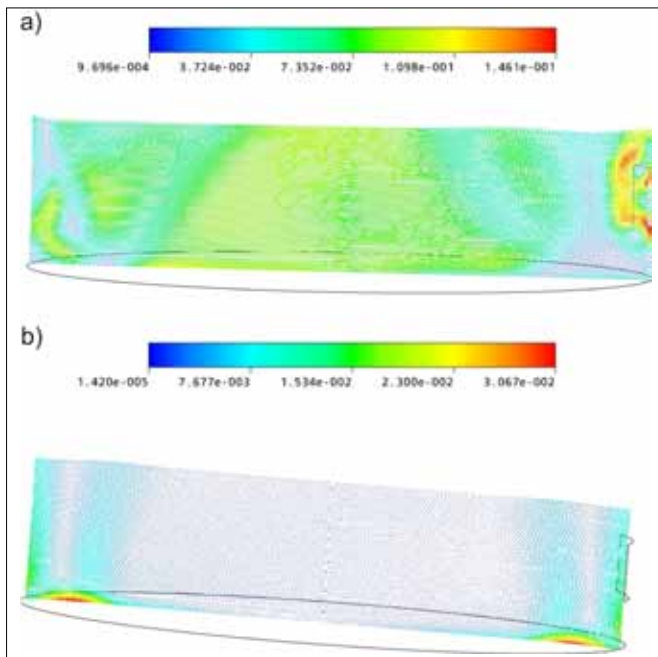
W wyniku zrealizowanych obliczeń symulacyjnych otrzymano pliki wynikowe. Wykonano ich obróbkę, a za podstawowy krok czasowy została przyjęta jedna sekunda napełniania i wirowania płynu. Dane liczbowe z plików wynikowych przetworzono w postprocesorze CFX-a uzyskując wektorowe rozkłady prędkości ruchu płynu. Ze względu na brak możliwości pełnej analizy przestrzeni przepływu sporządzono wektorowe mapy rozkładu prędkości dla przekroju umiejscowionego w pionowej osi symetrii. Analizie poddano pierwsze 300 sekund realizacji operacji wirowania płynu w kadzi.

Pierwszym rozpatrywanym wariantem jest zasilanie jednostronne. Dla tego sposobu napełniania przepływ namywający formuje się w czasie zbliżonym do całkowitego czasu napełniania zbiornika kadzi. Potwierdza to wnioski z badań eksperymentalnych. Prędkość maksymalna u_{max} przepływu namywającego wynosi 0,11 [m/s], co stanowi 0,044 wartości maksymalnej prędkości zasilania.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wektorowe mapy pola prędkości przepływu w kadzi wirowej dla napełniania klasycznego (jednostronnego). Wyniki analiz dla tego modelu zaprezentowano szerzej w [9].

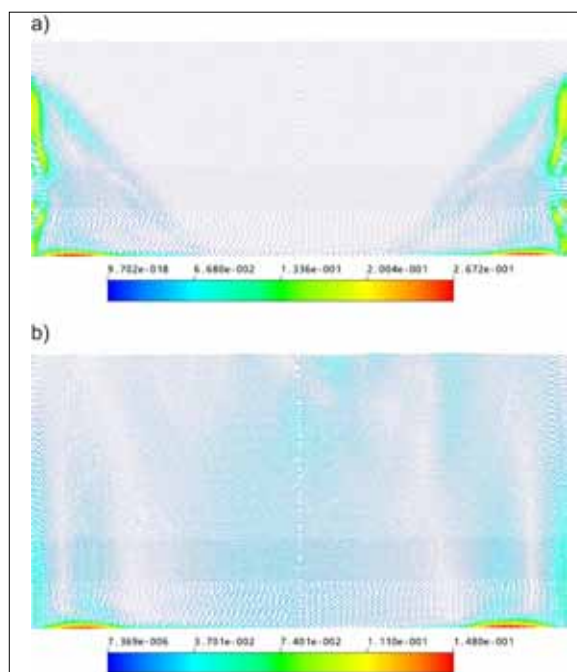
Prezentowane wyniki dotyczą etapu napełniania zbiornika oraz postępu w whirlpoolu i odnoszą się do danych eksperymentalnych właściwych dla zbiornika laboratoryjnej kadzi wirowej. Na rysunku 3b uwidoczniła jest przestrzeń występowania przepływu namywającego stożek osadowy. Przekrój płaszczyzną roboczą ujawnia różnicowanie struktury przepływów wtórnych. Oprócz przepływu namywającego występują inne przepływy o charakterze lokalnym. Szczególnie charakterystyczne są symetrycznie rozmieszczone przepływy przy ścianie zbiornika będące konsekwencją oddziaływania przepływu pierwotnego (napędowego).

Kolejnym analizowanym przypadkiem jest symetrycznie umiejscowione zasilanie dwustronne. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe wektorowe mapy pola prędkości przepływu w kadzi wirowej dla tego wariantu zasilania.



Rys. 3. Przykładowe wyniki symulacji dla whirlpoola zasilanego jednostronnie: a) etap napełniania zbiornika (45 s); b) etap wirowania (140 s).

Źródło: Jakubowski M., 2011.



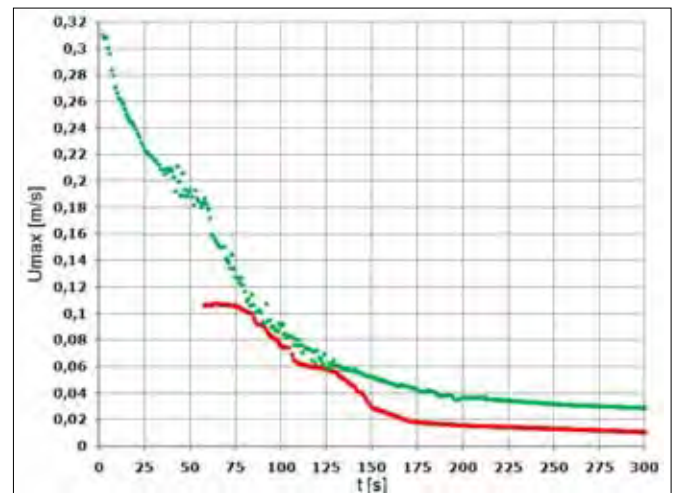
Rys. 4. Przykładowe wyniki symulacji dla whirlpoola zasilanego wielostronnie: a) etap napełniania zbiornika (5 s); b) etap wirowania (50 s).

Źródło: Jakubowski M., 2011.

Dla wariantu dwustronnego zasilania uzyskano znaczne przyspieszenie występowania zjawiska przepływu wtórnego namywającego stożek osadu, który jest identyfikowany już w początkowej fazie napełniania (rys. 4.a). Prędkość maksymalna u_{\max} przepływu namywającego w tym przypadku wynosi 0,31 [m/s], co stanowi 0,062 wartości sumarycznej prędkości zasilania.

Dla analizowanych wariantów zasilania, w oparciu o wyniki modelowania, dokonano zbiorczej analizy czasu powstawania i prędkości przepływu namywającego. Na rysunku 5

przedstawiono wykres zmian wartości maksymalnej prędkości (u_{\max}) dla przepływu namywającego.



Rys. 5. Wykres wartości prędkości u_{\max} przepływu namywającego stożek osadu dla modelu zasilanego jednostronnie (kolor czerwony) i o podwójnym zasilaniu (kolor zielony).

Źródło: Jakubowski M., 2007.

Analiza czasów powstawania i zmian prędkości maksymalnej przepływu namywającego ujawnia znaczne różnicowanie wariantu zasilania jednostronnego i zwiłokrotnionego. Dla wariantu zwiłokrotnionego widoczne jest znaczne skrócenie czasu powstawania przepływu namywającego oraz wyższe prędkości przepływu namywającego.

DALSZE BADANIA

Wyniki symulacji prezentowane powyżej przedstawiają czysto hydrodynamiczny aspekt separacji w whirlpoolu, a więc nie uwzględniają oddziaływań między cząstkami osadu separowanego w stożku. Dlatego też, w chwili obecnej, w zakresie modelowania trwają prace nad modelami przepływu dwufazowej mieszaniny cieczy i zawieszonych cząstek osadu.

W zakresie badań eksperymentalnych trwają obecnie prace nad analizą wyników badań PIV (Particle Image Velocimetry) zrealizowanych w Stanach Zjednoczonych w laboratorium badawczym firmy Philadelphia Mixing Solutions, PA. Wyniki tych prac prezentowane będą w kolejnych publikacjach przygotowywanych do „PTPS”.

PODSUMOWANIE

W przypadku zasilania jednostronnego uwydatnia się strata energii wirowania związana z symetryzacją przepływu pierwotnego. Część energii wirowania zostaje pochłonięta na symetryzowanie się przepływu, a przepływ wtórny odpowiedzialny za namywanie stożka osadu powstaje dopiero po czasie ustabilizowania się wirującego płynu.

Badania symulacyjne CFD (zweryfikowane badaniami eksperymentalnymi na modelu rzeczywistym w skali półtechnicznej dla separacji osadu o parametrach zbliżonych do właściwych dla osadu gorącego) wykazały:

- występowanie przepływu namywającego przy napełnianiu dwustronnym już na etapie napełniania (w przeciwieństwie do zasilania jednostronnego);

– formowanie osadu w postaci stożka o bardziej zwartej postaci geometrycznej i konsystencji.

Korzystne uformowanie stożka pozwoli na lepsze jego osuszanie podczas końcowego etapu opróżniania kadzi (redukując występujące rozmywanie stożka), co w konsekwencji przyczyni się także do redukcji strat brzezki po jej wirowaniu.

WNIOSKI

W wyniku proponowanej modyfikacji konstrukcji polegającej na zwielokrotnieniu (po obwodzie) otworów zasilających oraz modyfikacji realizacji zabiegu napełniania kadzi wirowej polegającej na jednoczesnym napełnianiu należy spodziewać się korzystniejszych (w odniesieniu do dotychczasowych) uwarunkowań formowania się stożka osadu oraz skrócenia czasu napełniania whirlpoola, jak i skrócenia czasu postoju separowanej mieszaniny, a w konsekwencji skrócenia całkowitego czasu realizacji procesu produkcji brzezki piwnej.

LITERATURA

- [1] ANSYS CFX 12.1. 2009. dokumentacja program.
- [2] BAMFORTH C. 2003. Beer: Tap Into the Art and Science of Brewing (Second Edition), Oxford University Press.
- [3] BRIGGS, D.E., BOULTON, C.A., BROOKES P.A., STEVENS, R. 2004. Brewing Science and Practice Wohead Publishing Ltd., CRS Press.
- [4] DÜRHOFT A. 1988. *Experimentelle Untersuchung der instationären Drehströmung im Absatzbehälter „Whirlpool“*. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 14, nr 38. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- [5] GRENNSPAN, H.,P., 1990, Theory of Rotating Fluids, Breuklen Press (reprint).
- [6] JAKUBOWSKI M., DIAKUN J. 2007. *Simulation investigations of the effects whirlpool dimensional ratios on the state of secondary whirls*. Journal of Food Engineering, V.83, nr 1/2007, 106-110.
- [7] JAKUBOWSKI M. 2008. *Wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych na proces zawirowań powstających w kadzi wirowo-osadowej podczas klarowania zawiesin*. Praca doktorska. Politechnika Koszalińska.
- [8] JAKUBOWSKI M. 2009. *Kadź wirowa, wykorzystywana zwłaszcza w browarnictwie oraz sposób jej napełniania*, zgłoszenie patentowe nr P388831.
- [9] JAKUBOWSKI M. 2011. *Model trójwymiarowy przepływu w kadzi wirowej*. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, 1/2011, 24-27.
- [10] KUNZE W. 2010. Technology Brewing and Malting, VLB Berlin.
- [11] POŁCZYŃSKI P. 2010. *Projekt laboratoryjnej kadzi wirowej o zmiennym układzie dysz zasilających*. Praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Koszalińska.

SIMULATION MODEL OF THE FLUID FLOW IN A WHIRLPOOL WITH MULTIPLIED INFLOWS

SUMMARY

The paper presents the results of calculations of the model simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) for fluid flow in the whirlpool tank. The analysis was to compare for inflow in the two variants of the whirlpool inlets constructions – single (classical) and a double, multiplied by perimeter. The purpose of the analysis was to determine the effect of the use multiplied inflows to the state and nature of secondary flows that occur during spinning fluid in the whirlpool tank.

Key words: simulation, whirlpool, secondary flow, the multiplied inflows.