

Marek DOMAŃSKI, Marcelina BITENC, Joanna KARCZ

e-mail: joanna.karcz@zut.edu.pl

Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

Zastosowanie metod numerycznej mechaniki płynów do modelowania hydrodynamiki w zbiorniku z niecentrycznie zabudowanym mieszadłem śmigłowym

Wstęp

Pomimo długiej tradycji stosowania w przemyśle mieszalników z niecentrycznie zabudowanym mieszadłem nadal niekompletny jest opis badań doświadczalnych dla tego typu urządzeń. W literaturze przedmiotu dostępnych jest również niewiele publikacji dotyczących badań numerycznych z wykorzystaniem metod CFD tego typu rozwiązań aparaturowych.

Mieszalniki z mieszadłem umieszczonym w pozycji niecentrycznej uznawane są za rozwiązanie alternatywne w stosunku do mieszalników z centrycznie zabudowanym mieszadłem [Stręk, 1981; Cudak, 2004]. Charakteryzują się przy tym szeregiem zalet takich jak łatwość w utrzymaniu w czystości, brak elementów mogących uszkodzić wzrastające kryształy w procesie krystalizacji, czy niższe naprężenia ścinające preferowane przy prowadzeniu bioprocessów [Galletti i Brunazzi, 2008]. Znajdują one również zastosowanie przy prowadzeniu procesów, w przypadku których mieszanie odbywa się w zakresie laminarnym, gdzie niecentryczne zbudowanie mieszadła zapobiega powstawaniu charakterystycznych, toroidalnych, martwych obszarów nad i pod mieszadłem [Cervantes i in., 2006].

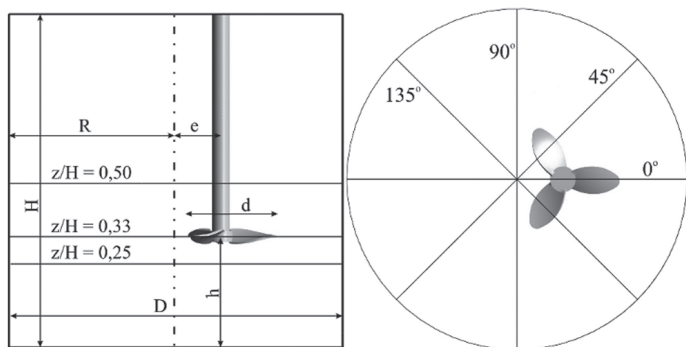
W celu uniknięcia powstawania martwych obszarów za przegrodami, oraz uniknięcia powstawania leja centralnego w wyniku braku zastosowania przegród, rozwiązanie z niecentrycznie zainstalowanym mieszadłem jest również zalecane w procesach związanych z mieszaniem substancji o wysokiej lepkości, takich jak produkcja farb [Karcz i in., 2005].

Metody numerycznej mechaniki płynów w badaniach nad mieszalnikami z niecentrycznie zabudowanym mieszadłem wykorzystali tacy badacze, jak: Montante i in. [2006], Rivera i in. [2004] oraz Yang i in. [2012], Karcz i in. [2012].

Celem tej pracy jest analiza hydrodynamiki w mieszalniku z niecentrycznie zabudowanym mieszadłem śmigłowym przy wykorzystaniu metod numerycznej mechaniki płynów.

Badania numeryczne

Geometria mieszalnika została stworzona za pomocą oprogramowania *ANSYS DesignModeler*. W mieszalniku cylindrycznym (Rys. 1) o średnicy wewnętrznej $D = 2R = 0,3$ m umieszczono mieszadło śmigłowe w pozycji niecentrycznej $e = 0,27R$. Mieszalnik wypełniony był cieczą newtonowską (o właściwościach fizycznych wody) do wysokości $H = D$. Mieszadło o średnicy $d = 0,33D$ znajdowało się na wysokości $h = 0,33H$ od dna zbiornika.



Rys. 1. Geometria układu

Wykorzystując oprogramowanie *ANSYS Mesh* na objętość płynu została nałożona tetrahedralna siatka numeryczna licząca ponad 740 000 elementów. Siatka została nałożona w taki sposób, że jest gęstsza w strefie mieszadła oraz w pobliżu ścian aparatu, niż w pozostałej objętości zbiornika.

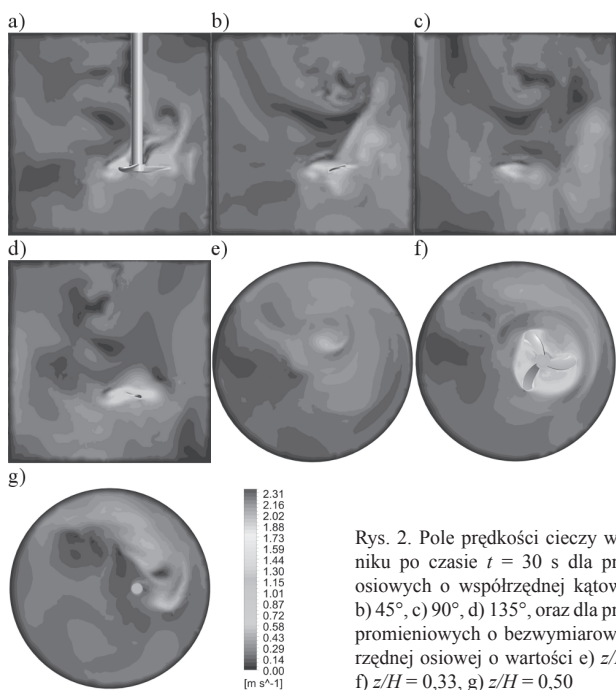
W kolejnym etapie za pomocą preprocesora *ANSYS CFX-Pre* zdefiniowano model matematyczny procesu oraz zadano odpowiednie warunki brzegowe i początkowe. Ruch mieszadła symulowano z wykorzystaniem metodyki *Sliding Mesh* (SM) poprzez utworzenie obracającej się z prędkością $n = 7,5 \text{ s}^{-1}$ strefy mieszadła. Z taką samą prędkością i w zgodnym kierunku obraca się ściana odpowiadająca wałowi mieszadła. Pozostała część zbiornika została zdefiniowana jako nieruchoma. Liczba *Reynoldsa* dla takiego układu wynosi $Re = 65000$. W celu oddania burzliwego charakteru przepływu zastosowano metodykę *Scale Adaptive Simulation – Shear Stress Transport* (SAS-SST) [Menter i Egorov, 2010]. W metodzie tej obszar przepływu jest dzielony na dwie strefy: obszar przepływu stabilnego, który symulowany jest z wykorzystaniem modelu burzliwości SST opartego o metodę *Reynoldsa* uśredniania równań *Naviera-Stockesa* (RANS) oraz obszar przepływu niestabilnego, który symulowany jest z wykorzystaniem skali długości *von Karmana* w sposób podobny do wykorzystywanego w symulacjach wielkowirowych (LES). Podziału tego dokonuje się poprzez dodanie dodatkowego członu źródłowego Q_{SAS} do równania opisującego transport częstotliwości burzliwej ω [Ansys Inc., 2011]. Całkowity czas trwania symulacji wynosił 30 s, z krokiem czasowym $\Delta t = 0,001$ s, co odpowiada obrotowi mieszadła o $2,7^\circ$. Do rozwiązania tak opisanego modelu matematycznego posłużono się oprogramowaniem *ANSYS® Academic Research, Release 14.0, CFX-Solver*.

Wyniki

Dane uzyskane w wyniku symulacji CFD zostały przeanalizowane dla trzech płaszczyzn promieniowych znajdujących się odpowiednio: pod mieszadłem ($z/H = 0,25$), na wysokości mieszadła ($z/H = 0,33$) oraz nad mieszadłem ($z/H = 0,5$) (Rys. 1 a)), jak również dla czterech płaszczyzn osiowych o czterech różnych wartościach współrzędnej katowej $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ (Rys. 1 b)). Analiza składowych wektora prędkości oraz energii kinetycznej burzliwości oraz szybkości jej dyssypacji przeprowadzona została wzdłuż 12 linii wyznaczonych przez punkty przecięcia się tych płaszczyzn.

Kontury pola prędkości w wybranych przekrojach osiowych i promieniowych mieszalnika po czasie $t = 30$ s zostały przedstawione na Rys. 2. W celu analizy przepływu wektor prędkości został rozłożony na trzy składowe: styczną, promieniową i osiową. Odnosząc wartości poszczególnych składowych wektora prędkości do prędkości końca łopatki mieszadła otrzymano prędkości bezwymiarowe, które posłużyły do sporządzenia profilu prędkości w wybranych przekrojach aparatu. Zastosowanie wartości bezwymiarowych składowych wektora prędkości w bezwymiarowym układzie odniesienia pozwala na łatwe porównanie przepływu płynu w różnych płaszczyznach mieszalnika.

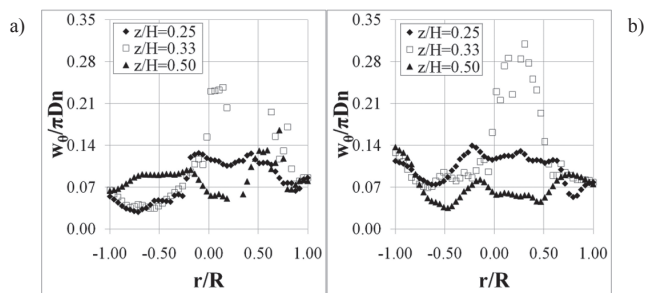
W przypadku, gdy ciecz w zbiorniku porusza się zgodnie z kierunkiem ruchu mieszadła bezwymiarowa styczna składowa wektora prędkości przyjmuje wartości dodatnie, a gdy kierunek jest przeciwny - wartości ujemne. Jak można zaobserwować na profilach przedstawionych na rys. 3, w wybranych przekrojach aparatu ciecz porusza się zgodnie z kierunkiem ruchu mieszadła. Na wysokości zawieszenia mieszadła można zauważyć znaczący wzrost tej składowej prędkości w sąsiedztwie mieszadła. W pozostałych obszarach aparatu składowa ta przyjmuje z reguły bardzo niewielkie wartości.



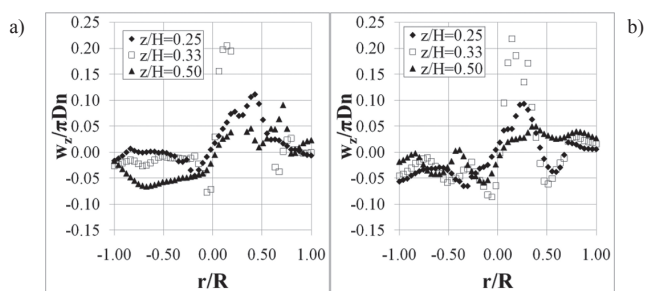
Rys. 2. Pole prędkości cieczy w mieszalniku po czasie $t = 30$ s dla przekrojów osiowych o współrzędnej kątowej a) 0° , b) 45° , c) 90° , d) 135° , oraz dla przekrojów promieniowych o bezwymiarowej współrzędnej osiowej o wartości e) $z/H = 0,25$, f) $z/H = 0,33$, g) $z/H = 0,50$

Wartości bezwymiarowej osiowej składowej wektora prędkości pozwalają uzyskać informację na temat ruchu cieczy w kierunku osiowym mieszalnika. Jej dodatnie wartości świadczą o ruchu mieszanej cieczy w kierunku powierzchni swobodnej, ujemne natomiast o ruchu w kierunku dna mieszalnika. Jak wynika z rozkładu tej składowej prędkości przedstawionego na rys. 4, na wszystkich trzech rozpatrywanych wysokościach występują dominujące wartości dodatnie w sąsiedztwie mieszadła. Jest to zgodne z kierunkiem pompowania przez mieszadło. W obszarach oddalonych od mieszadła bezwymiarowa osiowa składowa wektora prędkości przyjmuje niewielkie wartości, oscylujące wokół zera, co może wskazywać na dominację ruchu okrężnego w tym obszarze.

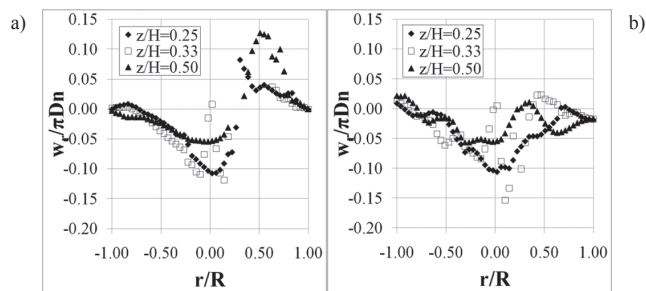
Bezwymiarowa promieniowa składowa wektora prędkości przyjmuje wartości dodatnie, gdy ciecz porusza się w kierunku od mieszadła do ściany mieszalnika, a ujemne, gdy kierunek ten jest odwrotny. Jak



Rys. 3. Profile bezwymiarowej składowej stycznej wektora prędkości w przekrojach osiowych o wartości współrzędnej kątowej a) 0° , b) 135° dla trzech różnych wartości bezwymiarowej współrzędnej osiowej



Rys. 4. Profile bezwymiarowej składowej osiowej wektora prędkości w przekrojach osiowych o wartości współrzędnej kątowej a) 0° , b) 135° dla trzech różnych wartości bezwymiarowej współrzędnej osiowej



Rys. 5. Profile bezwymiarowej składowej promieniowej wektora prędkości w przekrojach osiowych o wartości współrzędnej kątowej a) 0° , b) 45° , c) 90° , d) 135° dla trzech różnych wartości bezwymiarowej współrzędnej osiowej

wynika z profili przedstawionych na rys. 5 poruszające się mieszadło wyrzuca strumień cieczy na znajdującą się w pobliżu ścianę. Niewielkie wartości tej prędkości po stronie przeciwnej mieszalnika świadczą o tym, że ciecz przepływa najpierw pod mieszadło, a dopiero później jest pompowana do góry, niż bezpośrednio zasysana na wysokości zawieszenia mieszadła.

Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki symulacji CFD mieszalnika z niecentrycznie umieszczonym mieszadłem śmigłowym pompującym ciecz w kierunku powierzchni swobodnej.

Zastosowanie metod numerycznych pozwoliło z jednej strony na uzyskanie szczegółowych danych na temat hydrodynamiki operacji mieszania w takim układzie, a z drugiej – na uniknięcie zmuśnych i kosztownych badań eksperymentalnych. Dane te umożliwiły wyznaczenie pola prędkości cieczy w aparacie.

Profile trzech składowych prędkości pozwoliły na uzyskanie informacji na temat cyrkulacji cieczy w mieszalniku.

LITERATURA

- Ansys Inc., 2011. ANSYS® Academic Research, Release 14.0, Help System, CFX, Theory Guide
- Cervantes M.I.S., Lacombe J., Muzzio F.J., Alvarez M.M., 2006. Novel bioreactor design for the culture of suspended mammalian cells. Part 1: Mixing characterization. *Chem. Eng. Sci.*, **61**, 24, 8075-8084. DOI: 10.1016/j.ces.2006.09.035
- Cudak M., 2004. *Wymiana ciepła i pędu w mieszalniku z niecentrycznie zabudowanym mieszadłem*, Praca doktorska, Politechnika Szczecińska, Szczecin
- Egorov Y., Menter F. R., Lechner R., Cokljat D., 2010. The scale-adaptive simulation method for unsteady turbulent flow predictions. Part 2: Application to complex flows. *Flow Turbul. Combust.*, **85**, 1, 139-165. DOI: 10.1007/s10494-010-9265-4
- Galletti C., Brunazzi E., 2008. On the main flow features and instabilities in an unbaffled vessel agitated with an eccentrically located impeller. *Chem. Eng. Sci.*, **63**, 18, 4494-4505. DOI: 10.1016/j.ces.2008.06.007
- Karcz J., Cudak M., Szoplik J., 2005. Stirring of a liquid in a stirred tank with an eccentrically located impeller. *Chem. Eng. Sci.*, **60**, 8-9, 2369-2380. DOI: 10.1016/j.ces.2004.11.018
- Karcz J., Domański M., Bitenc M., Numerical modelling of the hydrodynamics in an agitated vessel with an eccentrically located HE 3 impeller. *14th European Conference on Mixing*, Warszawa, Polska, 10-13 September 2012, 199-204
- Menter F.R., Egorov Y., 2010. The scale-adaptive simulation method for unsteady turbulent flow predictions. Part 1: theory and model description. *Flow Turbul. Combust.*, **85**, 1, 113-138. DOI: 10.1007/s10494-010-9264-5
- Montante G., Bakker A., Paglianti A., Magelli F., 2006. Effect of the shaft eccentricity on the hydrodynamics of unbaffled stirred tanks. *Chem. Eng. Sci.*, **61**, 9, 2807-2814. DOI: 10.1016/j.ces.2005.09.021
- Rivera C., Heniche M., Ascanio G., Tanguy P., 2004. A virtual finite element model for centered and eccentric mixer configurations. *Comput. Chem. Eng.*, **28**, 12, 2459-2468. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2004.06.012
- Stręk F., 1981. *Mieszanie i mieszalniki*. WNT, Warszawa
- Yang F. L., Zhou S. J., Wang G.C., 2012. Detached eddy simulation of the liquid mixing in stirred tanks. *Comput. Fluids*, **64**, 74-82. DOI: 10.1016/j.compfluid.2012.05.005

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/03/N/ST8/02822.