

Łukasz KACPERSKI, Joanna KARCZ

e-mail: lkacperski@zut.edu.pl

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

Modelowanie rozkładu energii kinetycznej burzliwości i jej szybkości dyssypacji podczas wytwarzania zawiesiny lekkiej

Wprowadzenie

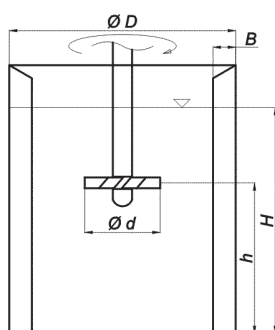
Wielkość energii kinetycznej burzliwości oraz szybkość jej dyssypacji są istotnym wyznacznikiem intensywności mieszania. Większe jej wartości są pożądane ze względu na intensyfikację ruchu masy i ciepła, zarówno w skali makro- jak i mikroskopowej. Większe wartości energii kinetycznej sprzyjają uzyskaniu bardziej jednorodnych układów wielofazowych (np. rozbijanie aglomeratów cząstek ciała stałego), przyspieszają wymianę ciepła, szybkość reakcji [Kamiński, 2004; Stręk, 1981]. Ilościowe wyznaczenie dyssypacji energii kinetycznej w mieszalniku jest trudne do zrealizowania [Kresta i Wood, 1993; Stelmach i in., 2005]. W takim przypadku wartościowe mogą okazać się metody numerycznej mechaniki płynów.

Istniejące dwurównaniowe modele burzliwości wykorzystujące koncepcję uśrednień Reynoldsa równań Naviera-Stokesa (RANS), dają możliwość znalezienia przybliżonego rozwiązania numerycznego przepływu burzliwego i dają stosunkowo dobre wyniki modelowania [Joshi i in., 2011], w porównaniu z wymagającymi obliczeniowo metodami symulacji bezpośrednich (DNS), czy też symulacji wielkowirowych (LES).

Symulacje numeryczne przedstawione w tej pracy miały na celu określenie rozkładów energii kinetycznej burzliwości oraz szybkości jej dyssypacji w zawieszinie lekkiej mieszanej mechanicznie (w takiej zawieszinie gęstość cząstek ciała stałego jest mniejsza niż gęstość cieczy). Omówione zostały dane otrzymane z obliczeń numerycznych przy zastosowaniu trzech wybranych, półempirycznych, dwurównaniowych modeli burzliwości $k-\varepsilon$, $k-\omega$, lub SST (Shear Stress Transport).

Zakres pracy

Symulacje numeryczne operacji mieszania zawiesiny lekkiej przeprowadzono w cylindrycznym, płaskodennym zbiorniku o średnicy wewnętrznej $D = 0,295$ m (Rys. 1).



Rys. 1. Podstawowe wymiary geometryczne mieszalnika

Zbiornik napełniony był do wysokości $H = D$ zawiesziną, na którą składała się ciecz o gęstości $\rho_l = 997$ kg/m³ i o lepkości $\mu_l = 0,001$ Pa·s oraz granulki polietylenu o gęstości $\rho_s = 952$ kg/m³ i średniej średnicy cząstek $d_s = 3,82$ mm. Zbiornik wyposażony był w cztery symetrycznie rozmieszczone standardowe przegrody ($B = 0,1D$). Energię do układu dostarczało mieszadło turbinowe o sześciu łopatkach pochylonych pod kątem 45° (PBT6) o średnicy $d = 0,33D$, pompujące płyn ku powierzchni swobodnej. Mieszadło zawieszono było na wysokości $h = 0,67H$. Częstota obrotów mieszadła wynosiła $n = 2,47$ 1/s, a udział cząstek ciała stałego w zawieszinie $X_s = 0,01$.

Obliczenia numeryczne wykonano za pomocą oprogramowania ANSYS CFX 13.0. Równania transportu rozwiązywano metodą objętości

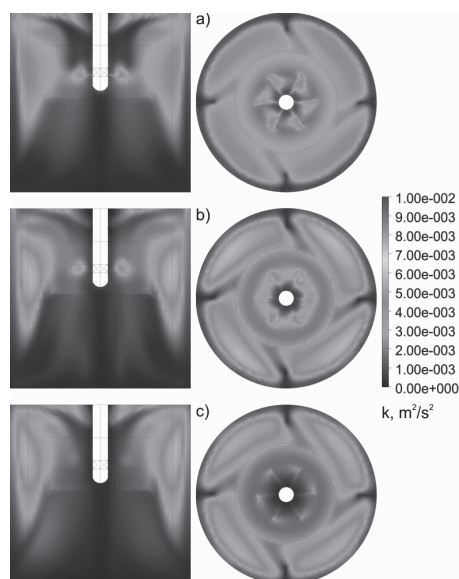
skończonych. Dyskretyzację przestrzenną obszaru obliczeniowego wykonano za pomocą niestrukturalnej siatki numerycznej złożonej z ok. 659 tys. elementów czworosiennych. Dyskretyzację równań transportu przeprowadzono za pomocą schematu wysokiej rozdzielczości. W obliczeniach numerycznych przepływu burzliwego płynu ($Re = 26760$) w mieszalniku zastosowano modele burzliwości $k-\varepsilon$, $k-\omega$, lub SST , a do opisy układu dwufazowego – wielofazowy *Particle Model*, w którym rozkład stężenia modelowany jest we współrzędnych eulerowskich i który uwzględnia prędkość poślizgu międzyfazowego. Ruch mieszadła modelowano metodą *Multiple Reference Frame* zakładając, że przepływ w zbiorniku odbywa się w sposób ustalony.

Wyniki symulacji

Wyniki obliczeń przedstawiono graficznie w postaci konturów energii kinetycznej burzliwości k i szybkości jej dyssypacji ε w przekrojach osiowych i promieniowych mieszalnika. Opracowano także osiowe profile tych wielkości (k , ε) dla wybranych współrzędnych promieniowych.

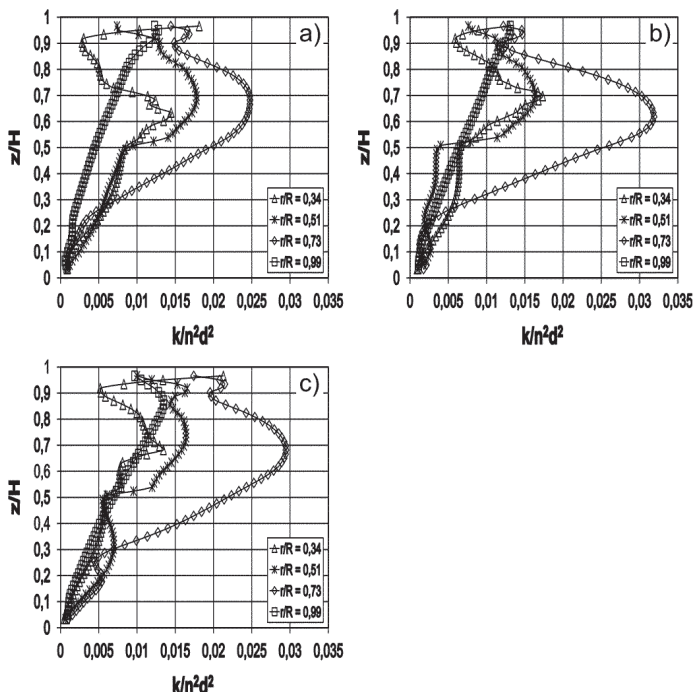
Analizowano różnice, jakie występują w rozkładach kinetycznej energii burzliwości i jej dyssypacji, w zależności od zastosowanego modelu burzliwości.

Jak wynika z rys. 2 przedstawiającego kontury energii kinetycznej burzliwości, największe wartości energii obserwuje się na wysokości zawieszania mieszadła ($h = 0,67H$). Nieco mniejsze jej wartości występują na powierzchni swobodnej płynu, skąd porywane są cząstki lekkiego ciała stałego, wciągane następnie pod powierzchnię cieczy. W bezpośredniej bliskości mieszadła, największa energia burzliwości występuje w strumieniu przed łopatkami mieszadła (model $k-\varepsilon$), natomiast w przypadku modelu $k-\omega$ – w całym obszarze zakreślonym przez mieszadło. Najmniejsze wartości k uzyskano dla modelu SST . Ponadto, zwraca uwagę obszar o słabo rozwiniętej burzliwości bezpośrednio nad mieszadłem dla modelu $k-\varepsilon$.



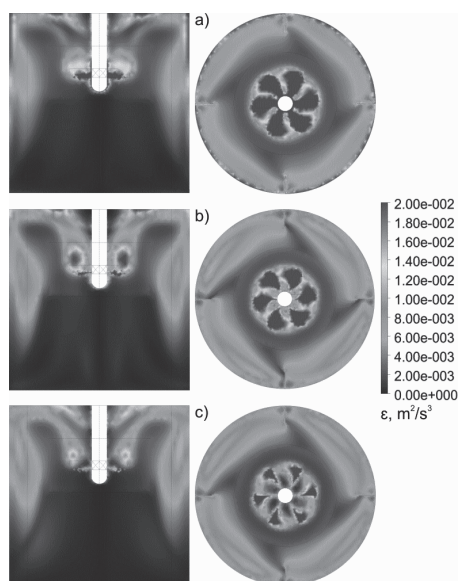
Rys. 2. Kontury energii kinetycznej burzliwości k w przekroju osiowym mieszalnika odchylonym o kąt 45° względem przegród (lewa kolumna) oraz w przekroju promieniowym zbiornika dla wysokości zawieszania mieszadła $h = 0,67H$ (prawa kolumna) i modeli burzliwości: a) $k-\varepsilon$; b) $k-\omega$; c) SST

Bezwymiarowe profile energii kinetycznej burzliwości (Rys. 3) wykazują podobieństwo jakościowe w pobliżu ścian zbiornika, gdzie wartości k otrzymane dla różnych modeli burzliwości rosną praktycznie liniowo licząc od dna zbiornika do powierzchni swobodnej. Dla wszystkich rozpatrywanych modeli burzliwości, największe wartości energii kinetycznej obserwuje się dla bezwymiarowej współrzędnej promieniowej $r/R = 0,73$.



Rys. 3. Osiove profile bezwymiarowej energii kinetycznej burzliwości dla różnych bezwymiarowych współrzędnych promieniowych r/R i dla różnych modeli burzliwości: a) $k-\epsilon$; b) $k-\omega$; c) SST

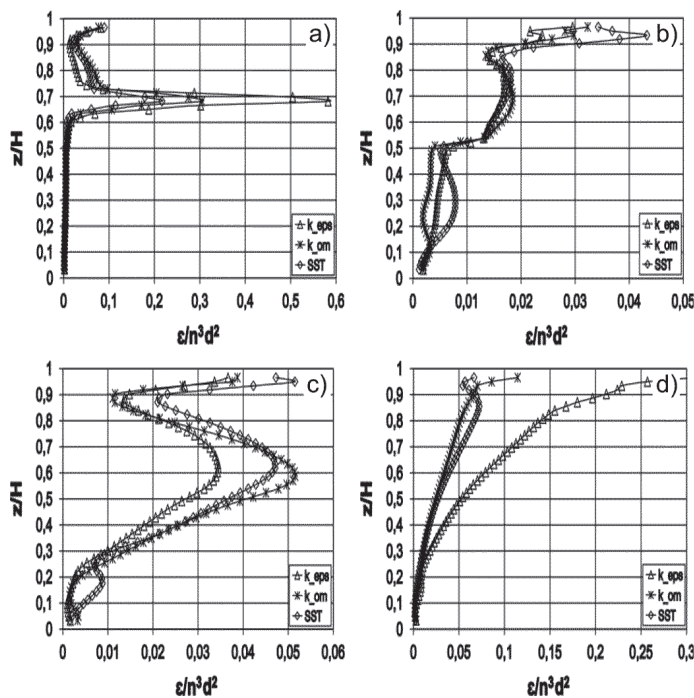
Kontury dyssypacji energii kinetycznej burzliwości, przedstawione na rys. 4, świadczą o bardzo szybkim rozpraszaniu energii burzliwej w pobliżu łopatek mieszadła. Najszybciej energia dyssypowana jest w obszarze określanym przez mieszadło (model $k-\epsilon$), natomiast dla modeli $k-\omega$ i SST maksymalne rozpraszanie występuje w wirach zanikających nad końcami łopatek mieszadła. Na powierzchni swobodnej płynu energia jest z największą intensywnością rozpraszana w podobnym obszarze,



Rys. 4. Kontury dyssypacji e energii kinetycznej burzliwości w przekroju osiowym mieszalnika odchylonym o kąt 45° względem przegród (lewa kolumna) oraz w przekroju promieniowym zbiornika dla wysokości zawieszenia mieszadła $h = 0,67H$ (prawa kolumna) i modeli burzliwości: a) $k-\epsilon$; b) $k-\omega$; c) SST

w którym występują maksima energii kinetycznej. Dlatego lokalizacja ta jest miejscem o najbardziej intensywnych zjawiskach powstawania i zaniku energii wirów. Jest to korzystne zjawisko podczas rozbijania aglomeratów cząstek ciała stałego zalegających na powierzchni swobodnej. Model $k-\epsilon$ ujawnia ponadto dużą szybkość dyssypacji energii tuż przy ścianie zbiornika (Rys. 4a i 5d).

Rys. 5 przedstawia profile dyssypacji energii kinetycznej burzliwości. Maksymalne wartości w pobliżu łopatek mieszadła dla modelu $k-\epsilon$ są o ok. 2 razy większe niż dla modelu $k-\omega$ i ok. 3 razy większe niż dla modelu SST (Rys. 5a).



Rys. 5. Osiove profile bezwymiarowej szybkości dyssypacji energii kinetycznej burzliwości dla danego modelu burzliwości i bezwymiarowej odległości od osi zbiornika: a) $r/R = 0,34$; b) $r/R = 0,51$; c) $r/R = 0,73$; d) $r/R = 0,99$

Dyssypacja energii osiąga największą szybkość w pętli cyrkulacyjnej generowanej przez mieszadło ($r/R = 0,73$), kolejno dla modeli burzliwości: $k-\omega$, SST i $k-\epsilon$ (Rys. 5c).

Podsumowanie

Rozkład energii kinetycznej burzliwości i szybkości jej dyssypacji ma zbliżony charakter jakościowy dla rozpatrywanych modeli burzliwości $k-\epsilon$, $k-\omega$ i SST . Jednak występują różnice w intensywności burzliwości w poszczególnych obszarach zbiornika. Dzięki takim danym można określić strefy o największej zdolności do rozpraszania cząstek ciała stałego. Przeprowadzone symulacje wykazały, że są to: obszar bezpośrednio przy mieszadle, powierzchnia swobodna w pobliżu współrzędnej $r/R = 0,5$ oraz obszar pętli cyrkulacyjnej rozciągający się między przegradami od powierzchni swobodnej do bezwymiarowej współrzędnej osiowej $h/H = 0,4$.

LITERATURA

Joshi J.B., Nere N.K., Rane C.V., Murthy B.N., Mathpati C.S., Patwardhan A.W., Ranade V.V., 2011. CFD simulation of stirred tanks: comparison of turbulence models. Part I: radial flow impellers. *Can. J. Chem. Eng.*, 89, 23–82. DOI: 10.1002/cjce.20446.

Kresta S., Wood P., 1993. The flow field produced by a pitched blade turbine: characterization of the turbulence and estimation of dissipation rate. *Chem. Eng. Sci.*, 48, 10, 1761-1774. DOI: 10.1016/0009-2509(83)80346-R.

Kamiński J., 2004. *Mieszanie układów wielofazowych*. WNT, Warszawa.

Stelmach J., Kurasiński T., Kuncewicz C., 2005. Analiza porównawcza wybranych metod obliczania szybkości dyssypacji energii. *Inż. Chem. Proc.*, 26, 201-215

Strępek F., 1981. *Mieszanie i mieszalniki*. WNT, Warszawa