

JOANNA KARCZ  
ŁUKASZ KACPERSKI  
MARCELINA BITENC

Institu Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

# Numeryczne modelowanie pola prędkości mieszanej mechanicznie zawiesiny lekkiej

## Wprowadzenie

Metody numerycznej mechaniki płynów (CFD) stanowią nowoczesne narzędzie wykorzystywane do rozwiązywania równań transportu w płynach [1]. Jego zastosowanie w obliczeniach inżynierskich przekłada się na oszczędności na etapie niezbędnych badań i wdrażania nowych projektów. Dotychczas metody CFD rzadko stosowano [2–6] do modelowania przepływu płynu w mieszanych mechanicznie zawiesinach lekkich czyli takich, w których gęstość rozpraszanych cząstek jest mniejsza niż gęstość fazy ciągłej. Stosując tę technikę do modelowania przepływów turbulentnych w mieszalniku, autorzy [2–5] najczęściej przyjmowali w obliczeniach model burzliwości  $k - \epsilon$ .

W tej pracy przedstawiono wyniki numerycznych symulacji przepływu zawiesiny lekkiej w zbiorniku z przegrodami i mieszadłem turbinowym z łopatkami pochylonymi. Obliczenia wykonano dla modelu burzliwości  $k - \omega$ . W tym modelu bilans różniczkowy kinetycznej energii burzliwości  $k$  opisuje następujące równanie [7]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j k) = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

Natomiast bilans różniczkowy dyssypacji właściwej  $\omega = \epsilon/k$  ma postać [1, 7]

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \omega) = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho k \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega + \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

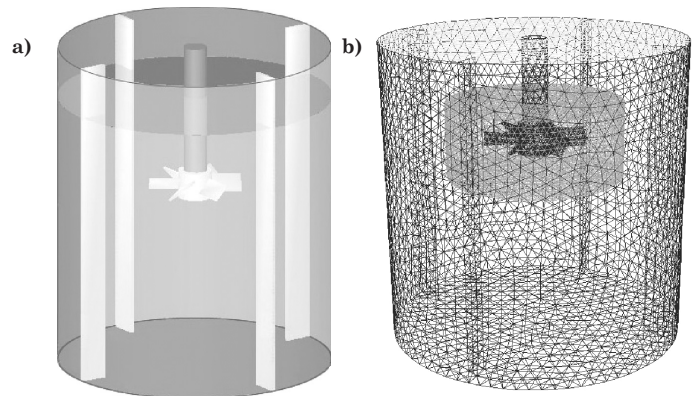
gdzie

$$\epsilon = \beta^* \omega k; \quad \alpha = 5/9; \quad \beta = 3/40; \quad \beta^* = 0,09; \quad \sigma_k = 0,5; \quad \sigma_\omega = 0,5 \quad (3)$$

## Zakres symulacji

Modelowanie przeprowadzono w zakresie burzliwego przepływu płynu w mieszalniku korzystając z komercyjnego pakietu FLUENT 6.2. Siatkę numeryczną z układem wielokrotnego odniesienia (MRF), zawierającą 260 tysięcy komórek obliczeniowych, wygenerowano w preprocesorze *MixSim 2.0* (Rys. 1b). W obliczeniach zastosowano model burzliwości  $k - \omega$  oraz model wielofazowy *mixture*. Model *mixture* należy do grupy modeli EE (*Euler - Euler*), w których zakłada się, że obie rozpatrywane fazy są traktowane jako wzajemnie przenikające kontinua. Model *mixture* jest preferowany wtedy, gdy faza nieciągła jest rozproszona w dużym obszarze w modelowanym układzie.

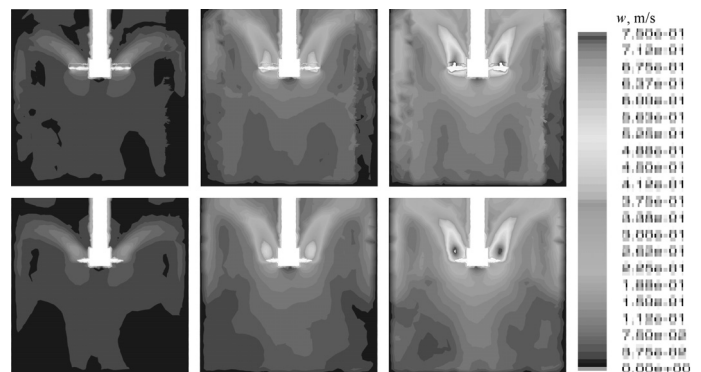
Obliczenia przeprowadzono dla mieszalnika o średnicy  $D = 0,295$  m, wyposażonego w cztery symetrycznie rozmieszczone



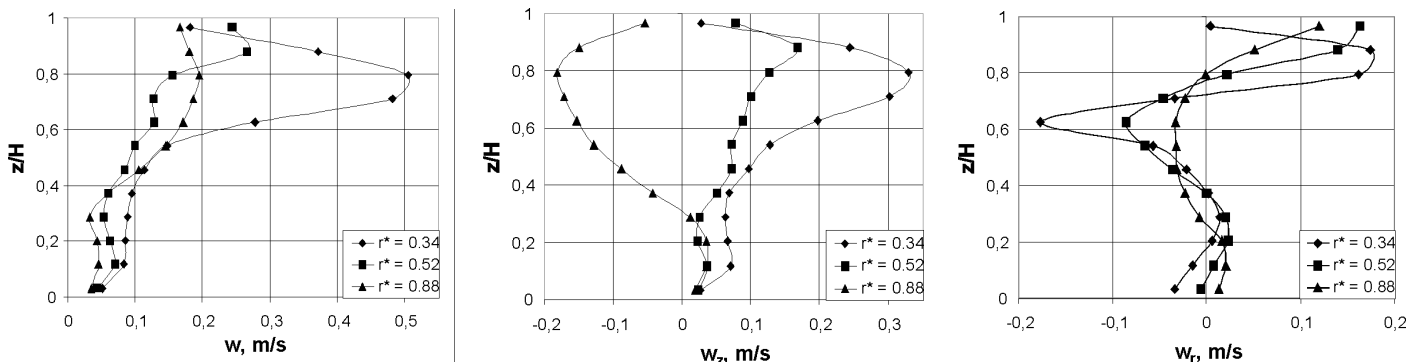
Rys. 1. a) Geometria mieszalnika z przegrodami i mieszadłem turbinowym z łopatkami pochylonymi; b) Widok siatki numerycznej z układem wielokrotnego odniesienia (MRF), 260 tysięcy komórek obliczeniowych

przegrody o szerokości  $B = 0,1D$ . Zbiornik był wypełniony płynem do wysokości  $H = D$ . Sześciolopatkowe mieszadło turbinowe (PBT) o średnicy  $d = 0,33D$  było umieszczone na wysokości  $h = 0,67H$  od płaskiego dna zbiornika (Rys. 1a). Kąt pochylecia łopatki mieszadła był równy  $45^\circ$ . Mieszadło pompywało płyn w kierunku powierzchni swobodnej. Badania przeprowadzone przez *Mackiewicz* [6], wykazały, że niestandardowa wysokość zawieszenia mieszadła turbinowego łopatkowego ( $h = 0,67H$ ) w mieszalniku, w przypadku wytwarzania zawiesiny lekkich cząstek w cieczy jest bardziej korzystna niż jego standardowe położenie na wale ( $h = 0,33H$ ).

Mieszana cieczą była woda destylowana, natomiast fazę stałą (lekkie cząstki, lżejsze niż ciecz) stanowiły granulki polietylenu o średniej średnicy  $d_p = 3,8$  mm, gęstości  $\rho = 952$



Rys. 2. Kontury prędkości przepływu zawiesiny w przekroju osiowym mieszalnika obróconym o: górny rząd)  $\pm 4^\circ$  oraz dolny rząd)  $45^\circ$  względem płaszczyzny przegród dla stężenia  $x_m = 1\%$  i częstości obrotów a)  $n = 0,83$  1/s, b)  $n = 2,5$  1/s oraz c)  $n = 4,17$  1/s



Rys. 3. Profile prędkości a) wartości wektora  $w = f(z/H)$  dla mieszaniny; b) składowej osiowej  $w_z = f(z/H)$ ; c) składowej promieniowej  $w_r = f(z/H)$  w płaszczyźnie obróconej o kąt  $45^\circ$  względem przegród, dla trzech bezwymiarowych odległości promieniowych  $r^* = r/R = 0,34; 0,52; 0,88$  oraz częstości obrotów  $n = 4,17$  1/s;  $x_m = 1$  % obj.

$\text{kg/m}^3$  oraz średnim stężeniu  $x_m$ , zmieniającym się od 1 do 10% objętościowych.

### Wyniki

Wyniki obliczeń numerycznych opracowano w postaci rozkładu wektorów prędkości oraz konturów rozkładu prędkości mieszaniny w zbiorniku. Analizowano również rozkłady osiowej i promieniowej składowej wektora prędkości, a także rozkłady energii kinetycznej burzliwości i szybkości dyssypacji energii w mieszalniku. Przykładowe wyniki są zamieszczone na rys. 2 oraz 3 dla układu, w którym średnie stężenie lekkich cząstek wynosiło 1 % obj.

Rys. 2 ilustruje kontury wektorów prędkości mieszaniny dwufazowej w przekroju osiowym zbiornika w dwóch płaszczyznach przesuniętych, odpowiednio, o  $\pm 4^\circ$  (górny rząd na rys. 2) lub o  $45^\circ$  (dolny rząd na rys. 2) względem dwóch przeciwnych przegród. W każdej z tych płaszczyzn przedstawione są kontury prędkości dla zwiększających się częstości obrotów mieszadła  $n$  (kierunek obrotów mieszadła był zgodny z kierunkiem przesuwania się wskazówek zegara). Jak wynika z rys. 2a–c, ze wzrostem częstości obrotów mieszadła zwiększa się intensywność rozpraszania lekkich cząstek w cieczy. Największe prędkości płynu występują w strefie mieszadła, gdzie rozproszenie cząstek jest najbardziej intensywne. Strumień płynu kierowany jest od łopatek mieszadła ku powierzchni swobodnej mieszaniny, a następnie opada w kierunku ścianek mieszalnika. Jak wynika z danych zamieszczonych w górnym rzędzie na rys. 2, występują strefy martwe za przegradami oraz spiętrzenie strumienia mieszaniny przed przegradami. Charakterystyczna jest również stosunkowo niewielka prędkość w bezpośredniej bliskości ścianek mieszalnika, gdzie zwrot wektora prędkości płynu zmienia się na przeciwny (przepływ w kierunku dna zbiornika). Intensywność ruchu płynu zmniejsza się w kierunku dna zbiornika. Porównując wizualizacje przepływu płynu w mieszalniku, przedstawione w górnym i dolnym rzędzie na rys. 2, można stwierdzić, że istnieje wpływ współrzędnej kątowej na rozkłady prędkości płynu w zbiorniku. Kontury prędkości w dolnym rzędzie rys. 2 (dla  $45^\circ$ ) są bardziej symetryczne niż kontury wygenerowane dla kąta  $\pm 4^\circ$ .

Osiowe profile prędkości dla zawiesiny o średnim stężeniu  $x_m = 1$  % obj. wytwarzanej w mieszalniku, w którym częstość obrotów mieszadła  $n = 4,17$  1/s, są przedstawione na rys. 3. Profile te zostały wykreślone w płaszczyźnie pionowej, obró-

conej o kąt  $45^\circ$  względem dwóch przeciwnych przegród, zakładając trzy wartości bezwymiarowej współrzędnej promieniowej  $r^* = r/R = 0,34; 0,52$  oraz  $0,88$  (gdzie  $R = D/2$ ). Wartość  $r^* = 0,34$  odpowiada położeniu najbliższej mieszadła, a wartość  $r^* = 0,88$  opisuje położenie najbliższej ścianki mieszalnika. Na rys. 3a są pokazane wartości prędkości dla mieszaniny, a na rys. 3b oraz c, odpowiednio, profile składowej osiowej  $w_z$  i promieniowej  $w_r$  prędkości. Najsilniejsze osiowe rozkłady tych wielkości występują w położeniu  $r^* = 0,34$ , czyli w obszarze usytuowanym najbliższym mieszadła. Ponadto, dla rozkładu prędkości wygenerowanego przy założeniu stałej wartości bezwymiarowej współrzędnej promieniowej ( $r^* = \text{const}$ ), poszczególne prędkości przyjmują największe wartości w zakresie bezwymiarowej współrzędnej osiowej  $z/H$  odpowiadającej położeniu mieszadła. Ujemne wartości składowej  $w_z$  dla  $r^* = 0,88$  na rys. 3b oznaczają, że nastąpiła zmiana kierunku przepływu płynu na przeciwny, skierowany do dna mieszalnika.

### Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych numerycznych symulacji pola prędkości mieszanej mechanicznie zawiesiny lekkiej w zakresie przepływu burzliwego można stwierdzić, że:

1. Komercyjne oprogramowanie FLUENT 6.2 stanowi bardzo przydatne narzędzie do analizy hydrodynamiki takiego układu,
2. W zakresie przeprowadzonych obliczeń ujawniły się strefy o różnej intensywności wymiany pędu, zależne od cyrkulacji płynu generowanej przez mieszadło. Na podstawie uzyskanych rozkładów prędkości płynu można zlokalizować obszary, w których lekkie cząstki są rozpraszane bardzo skutecznie.

### LITERATURA

1. Z. Jaworski: Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej, Warszawa, EXIT, 2005.
2. G. Ozcan-Taskin, H. Wei: Chem. Eng. Sci., **58**, 2011 (2003).
3. N. Kantarci, K.O. Ulgen., F. Borak: Canadian J. Chem. Eng. **83**, 4, 764 (2005).
4. B.N. Murthy, R.S. Ghadge R.S., J.B. Joshi: Chem. Eng. Sci. **62**, 7184 (2007).
5. B. Mackiewicz, J. Karcz.: Chem. Proc. Eng. **30**, 111 (2009).
6. B. Mackiewicz: Praca doktorska, Politechnika Szczecińska, Szczecin, 2008.
7. Instrukcja FLUENT User's Guide, 2003.