

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, Szczecin

## Numeryczna analiza rozkładu stężenia cząstek lekkich w zawieszinie mieszanej mechanicznie

### Wstęp

Wytworzenie zawiesziny cząstek ciała stałego w cieczy w mieszalniku wymaga nadania płynowi odpowiedniej prędkości osiowej płynu [Strępek, 1981; Kamieński, 2004], poniżej której cząstki nie opadną na dno lub nie pozostaną na powierzchni swobodnej cieczy w zbiorniku. Zastosowanie metod CFD może w znacznym stopniu ułatwić modelowanie rozkładu stężenia cząstek lekkich w zawieszinie mieszanej w zbiorniku z mieszadłem obrotowym. Uzyskane dane umożliwiają opracowanie interesujących sposobów oceny powstałej zawiesziny.

Analizę numeryczną rozkładu stężenia w układzie ciecz-ciało stałe przeprowadzili między innymi Murthy i in. [2007] oraz Tamburini i in. [2011]. Na podstawie zmierzonych wartości krytycznych częstości obrotów mieszadła, autorzy ci określili wpływ częstości obrotów mieszadła na efektywność uzyskiwania zawieszin oraz wyznaczyli krytyczne częstości obrotów mieszadła na podstawie obliczeń przeprowadzonych metodami CFD.

Obliczenia numeryczne przedstawione w tej pracy miały na celu wyznaczenie rozkładów stężenia cząstek ciała stałego w zawieszinie lekkiej metodami CFD dla zmiennych częstości obrotów mieszadła oraz ilościową ocenę jakości wytworzonej zawiesziny.

### Zakres symulacji

Symulacje numeryczne rozkładu stężenia cząstek lekkich w zawieszinie przeprowadzono w cylindrycznym zbiorniku o średnicy  $D = 0,295$  m. Zbiornik napełniony był do wysokości  $H = D$  zawiesziną, na którą składała się ciecz o gęstości  $\rho_l = 997 \text{ kg/m}^3$  i o lepkości  $\mu_l = 0,001$  Pa·s oraz granulki polietylenu o gęstości  $\rho_s = 952 \text{ kg/m}^3$  i średnicy cząstek  $d_s = 3,82$  mm. Zbiornik wyposażony był w cztery symetrycznie rozmieszczone standardowe przegrody. Energię do układu dostarczało mieszadło turbinowe z sześcioma łopatkami pochyłymi pod kątem  $45^\circ$ . Mieszadło o średnicy  $d = 0,33D$  pompowało płyn ku powierzchni swobodnej cieczy i zawieszono było na wysokości  $h = 0,67H$  licząc od płaskiego dna zbiornika. Częstości obrotów mieszadła obejmowały zakres  $n$  [1/s]  $\in \langle 1,6; 6,42 \rangle$ , a średnie stężenie masowe cząstek ciała stałego w cieczy wynosiło  $X_{ms} = 10\%$  mas. ( $x_{ms} = 10,42\%$  obj.). Zmierzono krytyczne częstości obrotów mieszadła [Mackiewicz, 2008] dla

opisanego układu wynoszą  $n_{kr} = 4,01$  1/s, natomiast obliczenia w tej pracy wykonano także dla częstości obrotów  $n = \pm 5, 10, 15, 30, 60\%$  wartości krytycznej częstości obrotów odniesienia ( $n_{kr} = 4,01$  1/s).

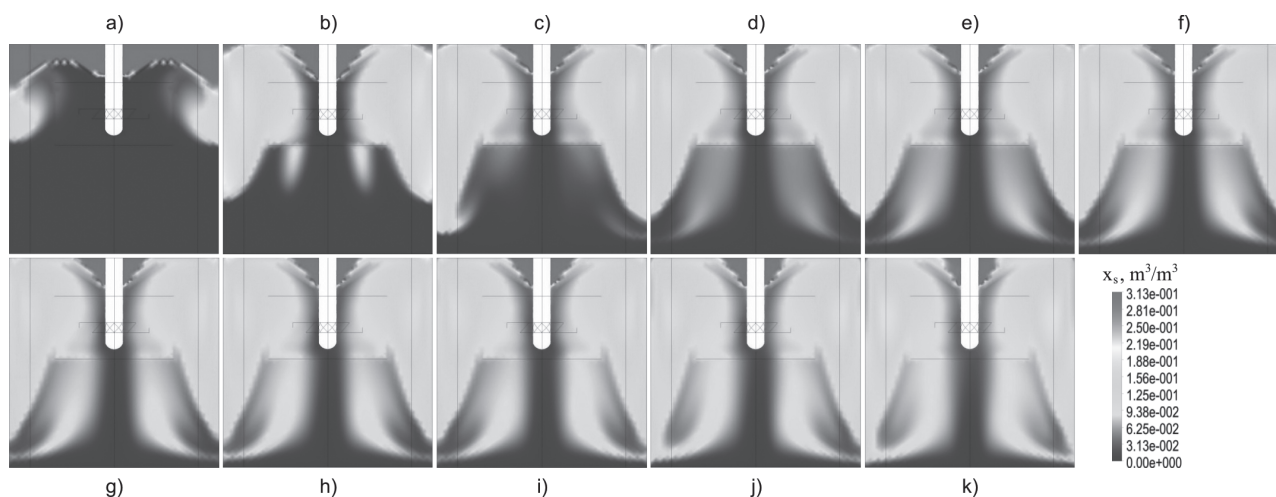
Symulacje wykonano dla siatki obliczeniowej o gęstości ok. 659 tys. elementów czworokątnych [Karcz i Kacperski, 2012]. Przepływ burzliwy płynu w mieszalniku modelowano przy użyciu modelu SST (*Shear Stress Transport*), przy czym w obliczeniach uwzględniono: siły związane z wyporem i oporem międzyfazowym, uśrednione siły oporu rozpraszania burzliwego oraz funkcję wymiany pędu burzliwego, bazującą na zmodyfikowanej definicji lepkości burzliwej. Do opisu przepływu dwufazowego zastosowano model wielofazowy *Particle*, natomiast ruch mieszadła modelowano metodą *Multiple Reference Frame*.

### Wyniki

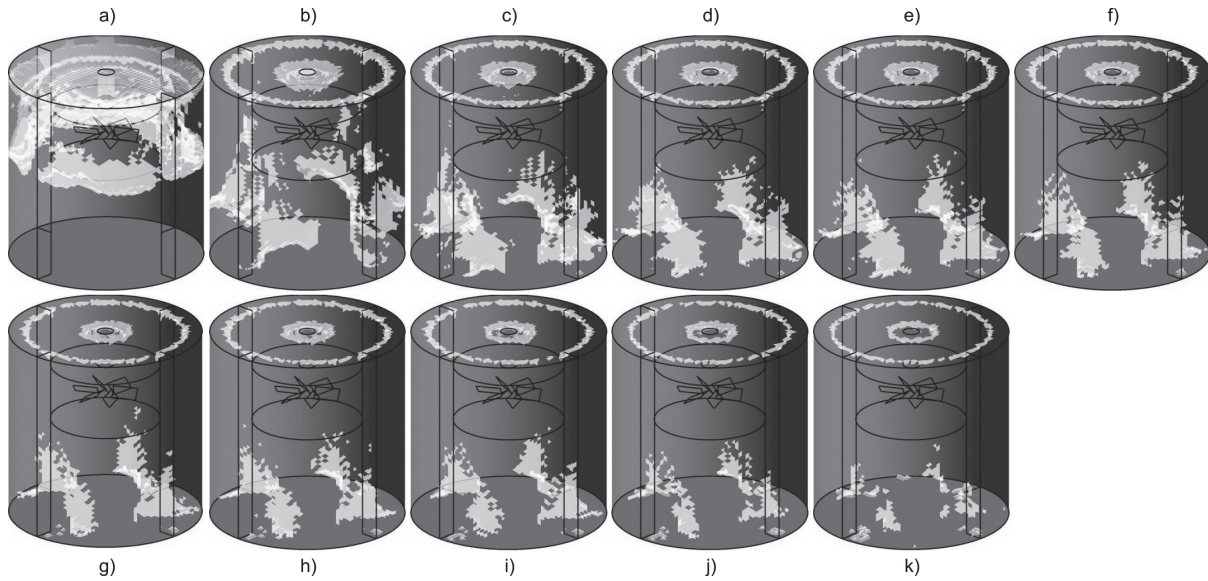
Obliczone numerycznie rozkłady stężenia cząstek w cieczy przedstawiono graficznie w postaci konturów udziałów objętościowych cząstek ciała stałego. Opracowano także profile opisujące rozkład stężenia lokalnego tych cząstek oraz intensywność ruchu cząstek, a także określono wpływ częstości obrotów mieszadła na zdolność do rozpraszania cząstek ciała stałego.

Na rys. 1 można prześledzić, w jaki sposób ewoluuje rozkład stężenia cząstek w przekroju osiowym zbiornika wraz ze wzrostem częstości obrotów mieszadła. Dla częstości  $n = 1,60$  1/s (Rys. 1a) występuje mało intensywny i silnie rozwarstwiony przepływ, lecz ze wzrostem częstości obrotów mieszadła, cząstki stopniowo osiągają dno zbiornika. Mimo że cząstki zbliżają się do dna zbiornika (Rys. 1a-e), to ich rozpraszanie nie zachodzi jeszcze w sposób równomierny. Dalszy wzrost częstości obrotów skutkuje lepszym rozpraszaniem cząstek także w rdzeniu płynu poniżej wysokości zawieszania mieszadła, jednak mimo znacznego zwiększenia częstości obrotów (Rys. 1k), wzdłuż osi wału nadal pozostaje obszar o stosunkowo niewielkich stężeniach cząstek (poniżej 3%). Praktycznie dla całego zakresu stosowanych częstości obrotów mieszadła  $n$ , na powierzchni swobodnej płynu obserwuje się występowanie charakterystycznego stożka wokół wału mieszadła, w którym stężenie cząstek przekracza trzykrotność średniego stężenia w zbiorniku.

Wyniki obliczeń przedstawione na rys. 2 obrazują jedynie te wycinki objętości w mieszalniku, które są zajęte przez cząstki polietylenu poru-



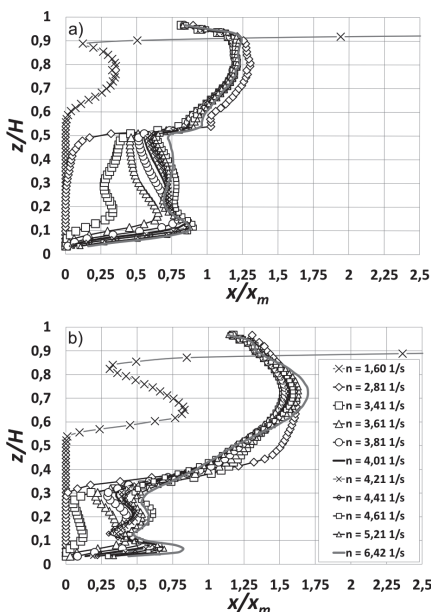
Rys. 1. Kontury lokalnego stężenia cząstek w przekroju osiowym zbiornika dla średniego stężenia objętościowego  $x_{ms} = 10,42\%$  i częstości obrotów mieszadła  $n$ : a) 1,60; b) 2,81; c) 3,41; d) 3,61; e) 3,81; f) 4,01; g) 4,21; h) 4,41; i) 4,61; j) 5,21; k) 6,42 1/s



Rys. 2. Obszary stagnacji, w których cząstki osiągają prędkości osiowe  $w_z$  [m/s]  $\in <0; 1,15 \cdot 10^{-2}>$  dla średniego stężenia objętościowego  $x_{ms} = 10,42\%$  i częstości obrotów mieszadła  $n$ : a) 1,60; b) 2,81; c) 3,41; d) 3,61; e) 3,81; f) 4,01; g) 4,21; h) 4,41; i) 4,61; j) 5,21; k) 6,42 1/s

szające się z małą prędkością osiową  $w_z$  [m/s]  $\in (0; 1,15 \cdot 10^{-2})$ . Prędkość ta została dobrana umownie, na podstawie przyjętego założenia, że droga w kierunku osiowym  $z = 3d_s$  powinna zostać pokonana przez cząstkę w czasie  $t = 1$  s. Założenie to może stanowić podstawę do określania jakości wytworzonej zawiesiny cząstek ciała stałego (zgodnie z kryterium ( $z = 3d_s$ )/( $t = 1$ s)). Na rys. 2a widoczny jest duży obszar, w którym prędkości osiowe cząstek na powierzchni płynu są zbliżone do zera (jasne pola na rysunku). Jak wynika z rys. 1a, w tych obszarach występuje gruba warstwa cząstek o dużym stężeniu. Dla częstości obrotów mieszadła  $n = 1,60$  1/s, obszary stagnacji cząstek obejmują około połowy wysokości zbiornika, licząc od powierzchni swobodnej płynu (Rys. 2a, Rys. 3a,b). Zwiększanie częstości obrotów mieszadła powoduje istotne zmniejszenie obszarów stagnacji z jednoczesnym przesunięciem ich w kierunku dna zbiornika (Rys. 2b-k). Obszar zajmowany przez cząstki o niewielkich prędkościach osiowych, zlokalizowany na powierzchni swobodnej cieczy, zmniejsza się wolniej niż obszary stagnacji cząstek ciała stałego w rdzeniu płynu w mieszalniku.

Na rys. 3 porównano osiowe profile bezwymiarowego stężenia  $x/x_m$  cząstek ciała stałego w cieczy, przy założeniu stałych wartości bezwymiarowej współrzędnej  $r/R$  oraz danej wartości częstości obrotów mieszadła  $n$ . Za wyjątkiem najmniejszych częstości obrotów mieszadła, stężenie względne  $x/x_m$  jest większe od jedności w górnej części



Rys. 3. Profile lokalnych wartości stężenia cząstek dla średniego stężenia objętościowego  $x_{ms} = 10,42\%$  oraz częstości obrotów z zakresu  $n \in <1,60; 6,42>$  1/s, wzdłuż linii położonych równoległe do osi zbiornika i oddalonych od niej o znormalizowany promień  $r/R$ : a) 0,51; b) 0,73

mieszalnika ( $z/H \in (0,4; 0,9)$ ), a mniejsze od jedności w jej pozostałej części dla obu wartości bezwymiarowej współrzędnej  $r/R$ .

Na podstawie danych z rys. 3 obliczono odchylenia standardowe  $\sigma$  dla każdego profilu stężenia, zebrane w tab. 1. Ich wartości mieszczą się w zakresie  $0,2 < \sigma < 0,8$  świadczą o wystarczającym rozproszeniu cząstek ciała stałego w cieczy zgodnie z kryterium proponowanym przez Cekińskiego i in. [2010].

lp.	$r/R$	$n$ , 1/s (% wzgl. częstości obrotów odniesienia)										
		1,60 (-60)	2,81 (-30)	3,41 (-15)	3,61 (-10)	3,81 (-5)	4,01 (0)	4,21 (+5)	4,41 (+10)	4,61 (+15)	5,21 (+30)	6,42 (+60)
		$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{N=1}^i \left( \frac{x_{is} - x_{ms}}{x_{ms}} \right)^2}$										
1	0,34	2,05	0,55	0,58	0,49	0,42	0,38	0,35	0,34	0,31	0,31	0,29
2	0,51	1,64	0,71	0,54	0,42	0,35	0,31	0,30	0,29	0,25	0,27	0,25
3	0,73	1,82	0,70	0,60	0,52	0,48	0,47	0,46	0,46	0,43	0,45	0,44
4	0,99	1,80	0,87	0,54	0,50	0,44	0,40	0,36	0,33	0,31	0,26	0,20

### Podsumowanie

Analiza numeryczna rozkładu stężenia cząstek lekkich w zawieszynie wytwarzanej przy użyciu mieszadła, przeprowadzona metodami CFD, dostarcza wielu istotnych, przydatnych w praktyce informacji o strefach stagnacji cząstek (niskich prędkości osiowych) w objętości zawiesiny.

### LITERATURA

Cekinski E., Giulietti M., Seckler M.M., 2010. A new approach to characterize suspensions in stirred vessel based on computational fluid dynamics. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, **27**, nr 2, 265-273. DOI: 10.1590/S0104-66322010000200005

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

Mackiewicz B., 2008. *Badania warunków wytwarzania zawiesiny lekkiej w zbiorniku z mieszadłem obrotowym*. Rozprawa doktorska, Politechnika Szczecińska, Szczecin

Karcz J., Kacperski Ł., 2012. *An effect of grid quality on the results of numerical simulations of the fluid flow in an agitated vessel*. 14<sup>th</sup> European Conference on Mixing. Warsaw, Poland, 10-13 September 2012, 205-210

Murthy B.N., Ghadge R.S., Joshi J.B., 2007. CFD simulations of gas-liquid-solid stirred reactor: Prediction of critical impeller speed for solid suspension. *Chem. Eng. Sci.*, **62**, 7184-7195. DOI: 10.1016/j.ces.2007.07.005

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

Tamburini A., Cipollina A., Micale G., 2011. CFD simulation of solid liquid suspension in baffled stirred tanks below complete suspension speed. *Chem. Eng. Trans.*, **24**, 1435-1440. DOI: 10.3303/CET1124240