

Łukasz KACPERSKI, Joanna KAR CZ

e-mail: lkacperski@zut.edu.pl

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

## Badania numeryczne wpływu wysokości zawieszenia mieszadła PBT na jakość wytwarzanej zawiesiny lekkiej

### Wstęp

Zawiesiny lekkie, czyli takie, w których rozpraszane cząstki ciała stałego są lżejsze niż faza ciepla [Özcan-Taşkin i McGrath, 2001; Kamieński, 2004], mają szerokie zastosowanie w przemysłowym wytwarzaniu pigmentów, produktów spożywczych i farmaceutycznych. Wyniki badań doświadczalnych na temat wytwarzania zawiesin lekkich dostępne w literaturze przedmiotu [Karcz i Mackiewicz, 2009] wskazują, że w porównaniu z wysokością standardową  $h = 0,33H$ , zawieszenie mieszadła turbinowego (pompującego płyn do powierzchni swobodnej) na wysokości  $h = 0,67H$  powoduje bardziej efektywne zatapianie cząstek ciała stałego unoszącego się na powierzchni swobodnej płynu, zmniejsza się również energochłonność mieszania. Istnieją jednak przesłanki wskazujące, że dalsze zmniejszanie odległości między mieszadłem a powierzchnią płynu może jeszcze bardziej korzystnie wpłynąć na jakościowe parametry takiej zawiesiny.

### Cel i zakres pracy

Niniejsza praca miała na celu numeryczną analizę wpływu wysokości zawieszenia mieszadła PBT na jakość wytwarzanej zawiesiny lekkiej w zbiorniku z przegrodami.

Obliczenia numeryczne przepływu zawiesiny lekkiej przeprowadzono dla zbiornika cylindrycznego z płaskim dnem, wyposażonego w cztery standardowe przegrody oraz mieszadło turbinowe (PBT) z sześcioma łopatkami nachylonymi pod kątem  $45^\circ$ . Mieszalnik o średnicy wewnętrznej  $D = 0,295$  m był napełniony płynem do wysokości  $H = D$ . Mieszadło PBT generowało przepływ w kierunku powierzchni swobodnej płynu. Wysokość  $h$  zawieszenia mieszadła zmieniano w przedziale  $h/H \in <0,67 \div 0,89>$  przy założeniu stałej częstości obrotów mieszadła wynoszącej  $n = 4,01$  1/s. Wartość ta jest wyznaczoną doświadczalnie krytyczną częstością obrotów dla modelowanego układu i wysokości zawieszenia mieszadła  $h/H = 0,67$  [Mackiewicz, 2008]. Obliczenia trójwymiarowego pola przepływu wykonano dla cieczy Newtonowskiej (faza ciągła) o gęstości  $\rho_c = 997$  kg/m<sup>3</sup> i lepkości  $\eta_c = 8,899 \cdot 10^{-4}$  Pa·s oraz cząstek polietylenu o gęstości  $\rho_s = 952$  kg/m<sup>3</sup> (rozmiar cząstek  $d_s = 3,82 \cdot 10^{-3}$  m; średni udział masowy  $X_m = 0,1$ ).

Obliczenia numeryczne wykonano w oprogramowaniu ANSYS CFX 16.1 (metoda objętości skończonych bazująca na wierzchołkach elementów siatki). Każdą z siatek obliczeniowych wykonano z zastosowaniem metody *Patch Independent* (triangulacja *Octree*), uzyskano trzy siatki niestrukturalne z elementami czworobocznymi odpowiednio dla geometrii z zawieszeniem mieszadła  $h/H = 0,67$  (104 663 węzłów);  $h/H = 0,78$  (105 510 węzłów) oraz  $h/H = 0,89$  (107 559 węzłów). Parametry geometrycznej jakości uzyskanych elementów siatki są zadowalające i zgodne z zaleceniami producenta zastosowanego oprogramowania [ANSYS CFX-Solver Modeling Guide, 2015].

Przepływ fazy ciągłej o rozwiniętej burzliwości obliczano za pomocą modelu SST z automatycznymi funkcjami przyściennymi, natomiast fazę rozproszoną opisano modelem zero-równaniowym. Rozproszenie cząstek polietylenu obliczano stosując model *Particle*, uwzględniając opór międzyfazowy zgodnie z korelacją *Gidaspowa* oraz oddziaływania wyporu zgodnie z modelem *Saffmana i Mei*. Przenoszenie burzliwości między fazami modelowano na podstawie zmodyfikowanej korelacji *Sato*, opartej na wymianie pędu wg koncepcji lepkości wirowej. Wymienne modele domykające pozwoliły na uwzględnienie sił masowych oraz prędkości poślizgu między fazami [ANSYS CFX-Solver Theory Guide, 2015].

Ruch mieszadła z wyodrębnioną, cylindryczną strefą mieszadła obliczano stosując model *Frozen Rotor*, jak dla przepływu pseudoustalonego. Połączenie strefy mieszadła ze strefą stacjonarną obszaru obliczeniowego, pozwoliło na swobodne modelowanie przenoszenia masy

i pędu między tymi strefami. Wszystkie fizyczne powierzchnie geometrii badanych układów zdefiniowane zostały zakładając warunek brzegowy typu ściana (*no slip wall* dla fazy ciągłej, *free slip wall* dla fazy rozproszonej). Wyjątkowo dla górnej granicy obszaru obliczeniowego (powierzchnia swobodna), dla obu faz zaimplementowano warunek brzegowy ściana z zerowymi naprężeniami ścinającymi dla obu faz. Ostatnie założenie jest upraszczające i umożliwiło modelowanie przepływu jak na płaskiej powierzchni swobodnej, bez uwzględnienia jej okształceń wynikających z przepływu generowanego przez mieszadło.

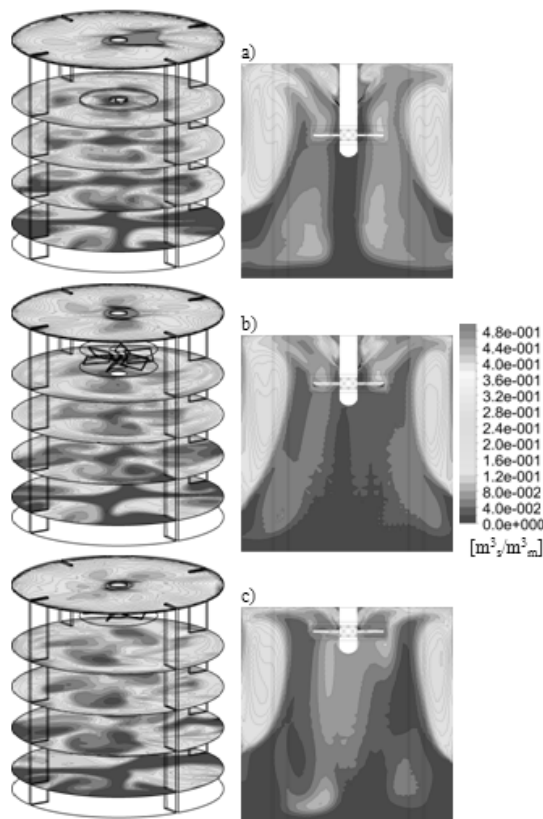
W zależności od położenia mieszadła, oceniono rozproszenie cząstek w wytwarzanej zawieszynie na podstawie analizy statystycznej oraz obliczeń mocy mieszania.

### Wyniki obliczeń numerycznych

Kontury udziałów objętościowych  $x$  lekkich cząstek polietylenu w zawieszynie (Rys. 1) wskazują, że zmniejszenie dystansu mieszadła PBT do powierzchni swobodnej płynu przy zachowaniu takich samych parametrów operacyjnych skutkuje zmniejszeniem maksymalnych wartości lokalnego stężenia cząstek na powierzchni swobodnej płynu.

W przypadku modelowanej konfiguracji  $h/H = 0,67$  cząstki mają tendencję do gromadzenia się wokół wału mieszadła oraz przy ścianie zbiornika, co potwierdzają także obserwacje doświadczalne.

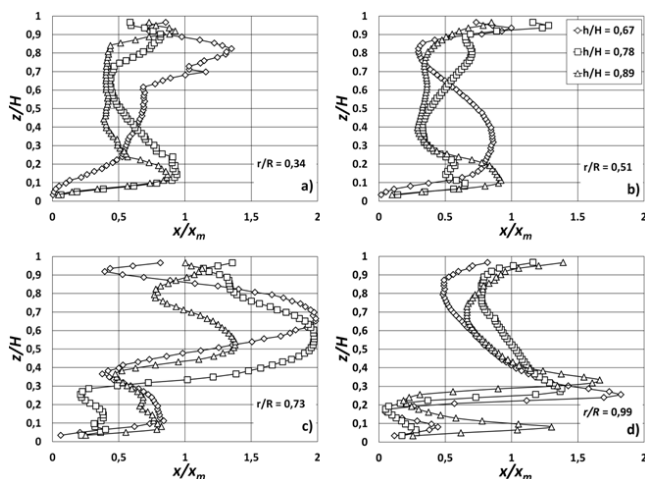
Opracowane kontury osiowe rozkładów udziału objętościowego cząstek ciała stałego (Rys. 1) wskazują, że dla wszystkich konfiguracji mieszadła chmura cząstek osiąga praktycznie dno zbiornika, jednak



Rys. 1. Kontury udziałów objętościowych  $x$  cząstek polietylenu w zawieszynie w przekrojach promieniowych dla  $z/H = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,99$  oraz w przekroju osiowym (obrótym względem osi pionowej o  $45^\circ$  od przegród): a)  $h/H = 0,67$ ; b)  $h/H = 0,78$ ; c)  $h/H = 0,89$

występuje pewne zmniejszenie równomierności tych rozkładów wraz ze wzrostem  $h/H$ . W porównaniu z wynikami dla  $h/H = 0,67$ , dla zawiesiny mieszała  $h/H = 0,78$  oraz  $0,89$  analizowane kontury promieniowe stężenia cząstek w zakresie  $z/H = 0,1 \div 0,5$  (Rys. 1), wskazują na bardziej równomierne rozkłady. W tych dwóch przypadkach osiągane są również większe lokalne stężenia cząstek.

Na rys. 2 zostały porównane profile znormalizowanych udziałów objętościowych  $x/x_m$  cząstek zawieszonych w cieczy ( $x_m$  oznacza średnią wartość udziału objętościowego) w funkcji bezwymiarowej wysokości  $z/H$ , przy założeniu stałej wartości bezwymiarowej współrzędnej promieniowej  $r/R$  (gdzie  $R = D/2$ ). Wartość współrzędnej  $r/R = 0,34$  odpowiada krawędzi łopatki mieszała, a  $r/R = 0,99$  opisuje obszar przyścienny. Jak wynika z Rys. 2, osiowe rozkłady stężenia cząstek ciała stałego istotnie zależą od wysokości zawieszenia mieszała w zbiorniku (Rys. 2a, 2b). W porównaniu z rozkładami funkcji  $x/x_m = f(z/H)_{r/R = \text{const}}$  uzyskanymi dla mieszała PBT w położeniu  $h/H = 0,67$ , lokalizacja mieszała w pozycji  $h/H > 0,67$  skutkuje przesunięciem punktu maksimum lokalnego w kierunku dna zbiornika (Rys. 2c,  $r/R = 0,73$ ;  $0,5 < z/H < 0,6$ ) oraz wartościami  $x/x_m$  bliskimi jedności w obszarze  $z/H < 0,2$  i współrzędnej  $r/R = 0,34$  (Rys. 2a).



Rys. 2. Rozkłady znormalizowanych udziałów objętościowych cząstek polietylenu w zawieszynie obliczone z danych próbkowanych wzdłuż linii równoległych do osi obrotu mieszała i oddalonych od niej o bezwymiarowy promień: a)  $r/R = 0,34$ ; b)  $r/R = 0,51$ ; c)  $r/R = 0,73$ ; d)  $r/R = 0,99$

Wyniki ilościowej analizy rozpraszania cząstek lekkich w cieczy opracowane w postaci odchylenia standardowego

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^i \left( \frac{x_{is} - x_{ms}}{x_{ms}} \right)^2} \quad (1)$$

są zamieszczone w tab. 1. Zgodnie z propozycją Cekińskiego i in. [2010], zawiesinę można uznać za jednorodną, jeżeli spełniony jest warunek  $0,2 < \sigma < 0,8$ . W tab. 1 podane są wartości  $\sigma$  dla trzech pozycji mieszała  $h/H$  oraz różnych przekrojów osiowych i promieniowych.

Tab. 1. Odchylenia standardowe udziałów objętościowych  $x$  cząstek polietylenu w zawieszynie obliczone z danych próbkowanych wzdłuż linii równoległych ( $r/R = \text{const}$ ) oraz prostopadłych ( $z/H = \text{const}$ ) do osi obrotu mieszała dla różnych wysokości zawieszenia mieszała  $h/H$ .

$h/H$	$r/R$						
	0,34	0,51	0,73	0,99			
	$\sigma$						
0,67	0,46	0,46	0,57	0,49			
0,78	0,41	0,50	0,67	0,42			
0,89	0,52	0,57	0,30	0,38			
$h/H$	$z/H$						
	0,034	0,18	0,33	0,50	0,67	0,82	0,97
	$\sigma$						
0,67	0,96	0,68	0,57	0,60	0,57	0,47	0,70
0,78	0,88	0,64	0,52	0,66	0,64	0,45	0,78
0,89	0,88	0,35	0,49	0,45	0,45	0,57	0,63

Jak wynika z tych danych, za wyjątkiem obszaru bliskiego dna ( $z/H = 0,034$ ), wszystkie wartości odchylenia standardowego mieszczą się w przedziale  $0,2 < \sigma < 0,8$ . W przypadku rozkładów promieniowych (ostatni wiersz w tab. 1) dla  $h/H = 0,89$  obserwuje się znacznie mniejsze wartości  $\sigma$ , co oznacza, że suspensja jest bardziej jednorodna.

W tab. 2 przedstawione są wyniki obliczeń mocy mieszania  $P$ , uzyskane na podstawie obliczeń numerycznych, przy zastosowaniu trzech różnych metod.

Tab. 2. Moc mieszania  $P$  i liczba mocy  $Ne$  dla różnych wysokości zawieszenia mieszała obliczone różnymi metodami (w nawiasach podano błędy procentowe  $\delta\%$  względem wartości wyznaczonych doświadczalnie dla wysokości zawieszenia mieszała  $h/H = 0,67$ ;  $P_{\text{dośw.}} = 0,972W$ ;  $Ne_{\text{dośw.}} = 1,65$ )

Sposób obliczenia mocy mieszania	$h/H$					
	0,67		0,78		0,89	
	$P, W$ ; (bł. %)	$Ne$	$P, W$	$Ne$	$P, W$	$Ne$
Metoda I	0,932 (-4,1 %)	1,58	0,958	1,62	1,005	1,70
Metoda II	0,902 (-7,2 %)	1,53	0,927	1,57	0,936	1,58
Metoda III	0,334 (-65,8 %)	0,56	0,352	0,60	0,361	0,61

Sposób obliczania wartości  $P$  metodami I oraz II opisuje równanie

$$P_{I,II} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_{I,II} \quad (2)$$

Metoda I polegała na odczycie wartości momentów mechanicznych względem osi obrotu mieszała na nieruchomych powierzchniach zbiornika. W metodzie II te momenty odczytywano na powierzchniach obrotowych mieszalnika. Metoda III polegała na całkowaniu dyssypacji energii kinetycznej burzliwości  $\epsilon$  zgodnie z równaniem

$$P_{III} = \int (\rho_m \cdot \epsilon) dV \quad (3)$$

W tab. 3 zamieszczone są również wartości liczby mocy  $Ne$

$$Ne = P / \rho_m \cdot n^3 \cdot d^5 \quad (4)$$

oraz błędy względne  $\delta\%$  dla konfiguracji  $h/H = 0,67$

$$\delta\% = ((P_{\text{num.}} - P_{\text{dośw.}}) / P_{\text{dośw.}}) \cdot 100\% \quad (5)$$

Z danych zamieszczonych w tab. 2 wynika, że wartości mocy mieszania  $P$  i liczby mocy  $Ne$  określone metodą I są najbardziej zgodne z danymi doświadczalnymi. Natomiast metoda III daje wyniki obarczone niedopuszczalnym błędem.

## Wnioski

Wyniki obliczeń rozkładu stężenia cząstek uzyskane metodą CFD wskazują, że zwiększenie wysokości zawieszenia mieszała powyżej  $h/H = 0,67$  powoduje pozytywne efekty w postaci bardziej skutecznego zatapiania lekkich cząstek z powierzchni swobodnej w mieszanym mechanicznie układzie.

Ponadto ich rozpraszanie w takich warunkach zachodzi bardziej równomiernie także w obszarach bliżej dna zbiornika. Jednak istnieje niebezpieczeństwo zasysania gazu z dna powierzchni swobodnej (zwłaszcza dla  $h/H = 0,89$ ), co w rozpatrywanym przypadku nie jest zjawiskiem korzystnym.

O poprawności uzyskanych rezultatów numerycznych świadczy pośrednio dostateczna zgodność między doświadczalnymi oraz obliczonymi numerycznie wartościami liczby mocy.

## LITERATURA

- ANSYS CFX-Solver Modeling Guide, 2015. Release 16.1, ANSYS, Inc., Canonsburg
- ANSYS CFX-Solver Theory Guide, 2015. Release 16.1, ANSYS, Inc., Canonsburg
- Cekiński E., Giulietti M., Seckler M.M., 2010. A new approach to characterize suspensions in stirred vessel based on computational fluid dynamics. *Brazilian J. Chem. Eng.*, **27**, 265-273. DOI: 10.1590/S0104-66322010000200005
- Kamiński J., 2004. *Mieszanie układów wielofazowych*. WNT, Warszawa
- Karcz J., Mackiewicz B., 2009. Effects of vessel baffling on the drawdown of floating solids. *Chem. Pap.* **63**, 164-171. DOI: 10.2478/s11696-009-0011-0
- Mackiewicz B., 2008. *Badania warunków wytwarzania zawiesiny lekkiej w zbiorniku z mieszałem obrotowym*. Praca doktorska, Politechnika Szczecińska, Szczecin
- Özcan-Taşkın G., McGrath G., 2001. Draw down of light particles in stirred tanks. *Chem. Eng. Res. Des.*, **79**, 789-794. DOI:10.1205/026387601753191966