

RYSZARD WÓJTOWICZ
JERZY KAMIŃSKI

Institut Aparatury Przemysłowej i Energetyki, Politechnika Krakowska, Kraków

Minimalna częstość obrotów mieszadła podczas wytwarzania zawiesin lekkich w mieszalniku mechanicznym

Wstęp

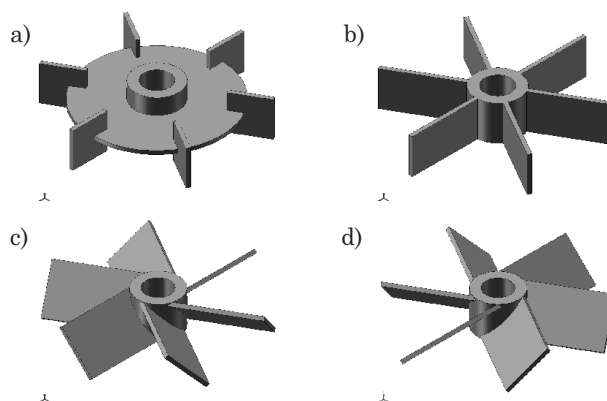
Zawiesiny lekkie to układy dwufazowe, w których faza stała ma mniejszą gęstość niż ciecz ($\rho_s < \rho_c$). W początkowym etapie ich wytwarzania cząstki stałe tworzą zatem jednolitą warstwę na powierzchni cieczy, następnie – w wyniku intensywnego mieszania – „wciągane” są do jej wnętrza i rozpraszane w całej jej objętości. W warunkach przemysłowych zawiesiny lekkie – podobnie jak zawiesiny klasyczne ($\rho_s > \rho_c$) – wytwarzane są zwykle w mieszalnikach mechanicznych, z wykorzystaniem różnego typu mieszadeł turbinowych. Podstawowymi parametrami decydującymi o doborze odpowiedniego typu mieszadła jest minimalna (graniczna) częstość jego obrotów (n_{min}), przy której wszystkie cząstki ciała stałego zostaną równomiernie rozproszone w cieczy tworząc jednolitą zawiesinę.

Jakkolwiek w literaturze dotyczącej mieszalników mechanicznych dużo miejsca poświęcono warunkom granicznym podczas wytwarzania klasycznych zawiesin, to informacji na ten temat w odniesieniu do zawiesin lekkich jest stosunkowo niewiele. Pośród publikacji z tego zakresu przeważającą część stanowią ogólne opisy modelu fizycznego samego procesu, a tylko w nielicznych [1–6] zamieszczono równania i zależności korelacyjne opisujące wpływ poszczególnych parametrów procesowych na przebieg powstawania zawiesiny lekkiej, zależności uniwersalne i przede wszystkim mające praktyczne zastosowanie.

Zakres badań

Badania nad wytwarzaniem zawiesin lekkich przeprowadzono w mieszalniku mechanicznym składającym się z cylindrycznego zbiornika o średnicy $D = 0,286$ m, wewnątrz którego znajdowały się cztery płaskie, pełnej długości przegrody o standardowej szerokości $B = D/10$, rozmieszczone symetrycznie. Zbiornik mieszalnika napełniano cieczą do stałej wysokości $H = D$. Stosowano cztery różne wysokoobrotowe mieszadła turbinowe (Rys. 1) – dwa wytwarzające promieniową cyrkulację cieczy: tarczowe Rushtona (RT) i o łopatkach prostych (BT) – dwa cyrkulację mieszaną: o łopatkach pochylonych pod kątem $\alpha = 45^\circ$ tłoczące ciecz w dół (PBT-D) i pod kątem $\alpha = 135^\circ$ tłoczące ciecz w górę (PBT-U). Każde z mieszadeł miało standardową średnicę równą $d = D/3$.

Podczas badań na wale umieszczano zawsze jedno mieszadło, wysokość jego zawieszenia nad dnem zbiornika zmieniano w zakresie $h = (1+2)d$. Fazę ciekłą stanowiła woda destylowana ($\rho_c = 998$ kg/m³, $\eta_c = 0,001$ Pa·s), zaś fazę stałą cząstki granulatu polietylenu Malen FGNX (oznaczony dalej



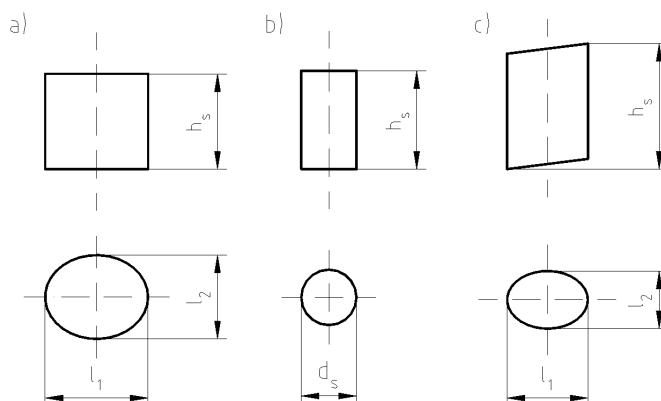
Rys. 1. Badane mieszadła: a) turbinowe tarczowe Rushtona (RT), b) turbinowe o łopatkach prostych (BT), c) turbinowe o łopatkach pochylonych $\alpha = 45^\circ$ (PBT-D), d) turbinowe o łopatkach pochylonych $\alpha = 135^\circ$ (PBT-U)

jako granulatu) oraz – różniące się kształtem i własnościami (Tabl. 1, Rys. 2) – cząstki regranulatów tworzyw sztucznych (regranulat 1, regranulat 2). Udział masowy fazy stałej wyno-

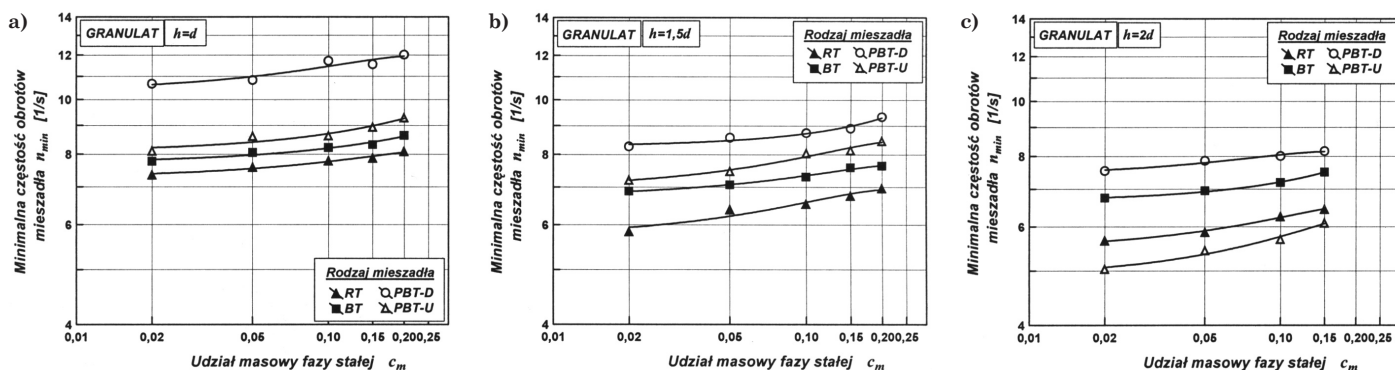
Tablica 1

Charakterystyka badanych cząstek

Nazwa	h_s [mm]	d_s [mm]		d_z [mm]	m_s [g]	ρ_s [kg/m ³]
		l_1 [mm]	l_2 [mm]			
granulat	4	4,35	3,52	4,11	0,0412	916,7
regranulat 1	4,13	2,33		3,46	0,0197	883,3
regranulat 2	5,27	3,41	2,42	4,67	0,0484	906,4



Rys. 2. Kształt i wymiary cząstek fazy stałej: a) granulatu, b) regranulatu 1, c) regranulatu 2



Rys. 3. Zmiany minimalnej (granicznej) częstości obrotów mieszadła n_{min} dla różnych mieszadeł i różnych wysokości ich zawieszenia nad dnem a) $h = d$, b) $h = 1,5d$, c) $h = 2d$

sił: $c_m = 0,02-0,2$. Średnicę zastępczą cząstek d_z wyznaczano na podstawie klasycznej zależności:

$$d_z = \sqrt[3]{\frac{6m_s}{\pi\rho_s}} \quad (1)$$

gdzie m_s – masa cząstki fazy stałej.

Wyniki badań i wnioski

Podczas badań moment wytworzenia *zawiesiny lekkiej* określano jako stan odpowiadający takiej minimalnej częstości obrotów mieszadła n_{min} , przy której wszystkie cząstki z powierzchni swobodnej cieczy zostaną wciągnięte do jej wnętrza i rozproszone w całej objętości mieszalnika. Analizę procesu przeprowadzono w oparciu o wyniki modelowania fizycznego opracowane metodami statystyki matematycznej, wykorzystując w opisie dodatkowo kryterialną liczbę *Froude'a* ujmującą oddziaływanie istotnych dla przebiegu procesów rozpraszania sił bezwładności i ciężkości: $Fr_{min} = n_{min}^2 d/g$.

Przeprowadzone pomiary pokazały, że w procesie wytwarzania *zawiesin lekkich* decydującą rolę odgrywa rodzaj mieszadła i wysokość jego zawieszenia nad dnem mieszalnika. Nieco mniejszy jest natomiast wpływ wielkości cząstek tworzących zawiesinę, ich własności fizycznych i udziału masy fazy stałej. Spośród badanych mieszadeł – w zakresie ich odległości od dna $h \leq 1,5d$ – najniższe częstości obrotów niezbędne do wytworzenia zawiesiny (Rys. 3a,b) wyznaczono dla mieszadła turbinowego tarczowego *Rushtona* (RT), nieznacznie wyższe zaś dla turbinowego o łopatkach prostych bez tarczy (BT); obydwa to mieszadła generują promieniową cyrkulację cieczy w aparacie. Natomiast częstościami najwyższymi – w całym zakresie zmian jego odległości od dna – charakteryzowało się wytwarzające cyrkulację mieszaną mieszadło o łopatkach pochylonych, tłoczące ciecz w dół (PBT-D).

Dla drugiego mieszadła o łopatkach pochylonych, ale tłoczącego ciecz w górę (PBT-U) wyniki były już nieco inne. Przy jego odległościach od dna $h \leq 1,5d$ wyznaczone graniczne częstości obrotów nieznacznie przewyższały te wymagane dla mieszadeł wytwarzających cyrkulację promieniową (Rys. 3 a i b). Natomiast, gdy mieszadło znajdowało się wyżej – bliżej powierzchni rozdziału faz – strumienie cieczy skierowane do góry wyraźnie wzmacniały cyrkulację w górnej części mieszalnika co skutkowało szybszym wciąganiem cząstek z powierzchni do wnętrza cieczy. Dla takiej konfiguracji mieszadła zawiesina powstawała szybciej, a graniczne częstości

obrotów były najniższe w porównaniu z wszystkimi pozostałymi badanymi mieszadłami (Rys. 3c).

Ilościowo wpływ poszczególnych parametrów prowadzenia procesu na warunki graniczne – gwarantujące wytworzenie *zawiesiny lekkiej* w mieszalniku – opisano za pomocą bezwymiarowej zależności:

$$\sqrt{Fr_{min}} = C \left(\frac{h}{d}\right)^a \left(\frac{d_s}{d}\right)^b \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_c}\right)^c c_m^d \quad (2)$$

Wartości stałej C i wykładników dla poszczególnych typów mieszadeł (Tabl. 2) wyznaczono metodą regresji nieliniowej, wykorzystując algorytm *quasi-Newtona*. Zależność ta obowiązuje dla następującego zakresu zmienności parametrów: $Fr_{min} = 0,26-1,73$; $h/d = 1-2$; $d_z/d = 0,0364-0,0491$; $\Delta\rho/\rho_c = 0,082-0,115$ ($\Delta\rho = \rho_c - \rho_s$); $c_m = 0,02-0,2$.

Tablica 2

Wartości stałej i wykładników w zal. (2)

Rodzaj mieszadła	C [-]	a [-]	b [-]	c [-]	d [-]	Średnia wartość błędów wzgl. Δ [%]
Turbinowe tarczowe (RT)	0,704	-0,283	-0,166	0,149	0,042	2,8
Turbinowe o łopatkach prostych (BT)	0,867	-0,205	-0,084	0,104	0,030	3,1
Turbinowe o łopatkach pochylonych $\alpha = 45^\circ$ (PBT-D)	0,517	-0,462	-0,338	0,082	0,045	5,2
Turbinowe o łopatkach pochylonych $\alpha = 135^\circ$ (PBT-U)	0,482	-0,571	-0,312	0,065	0,061	10,4

LITERATURA

- G.E.H. Jooste, J.G.M. Smith, A.M. Broere: Trans. Inst. Chem. Eng. **55**, 220 (1977).
- K. Takahash, S. Sasak: J. Chem. Eng. Jap. **32**, 40 (1999).
- N. Kuzmani, B. Ljubicić: Chem. Eng. J. **84**, 325 (2001).
- P. Wesolowski, W. Szaferki: Inż. Ap. Chem. **41**, nr 4s, 145 (2002).
- J. Karcz, B. Mackiewicz: Chem. and Proc. Eng. **27**, 1517 (2006).
- R. Wójtcowicz, J. Kamiński: XIX Ogólnopolska Konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej, mat. konf. s.509, Rzeszów, 2007.