

Jerzy HAPANOWICZ, Violetta STECYK, Leon TRONIEWSKI

e-mail: j.hapanowicz@po.opole.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Korzyści stosowania mieszadeł dyspergujących w procesie wytwarzania zawiesin

Wstęp

Wytwarzanie zawiesin w warunkach przemysłowych realizowane jest często w aparatach zbiornikowych wyposażonych w mieszadło. Dobór odpowiedniego mieszadła nie jest łatwy. Jego praca powinna bowiem zapewnić pożądany efekt technologiczny przy możliwie małym zapotrzebowaniu na energię. Oba te parametry są ściśle związane z cechami mieszanej substancji. W przypadku zawiesin cechy te mogą być bardzo zróżnicowane i trudne do przewidzenia. Literatura przedmiotu nie podaje uniwersalnego kryterium doboru mieszadeł. Jednak dla procesów wytwarzania zawiesin zalecane są zwykle wysokoobrotowe mieszadła turbinowe, śmigłowe lub łapowe [1]. Wywołują one silne prądy konwekcyjne w ciągłej fazie ciekłej, co skutkuje uniesieniem w jej objętości ziaren ciała stałego.

Korzystną alternatywą dla tych mieszadeł wydają się jednak mieszadła dyspergujące, pomimo tego, że z założenia ich głównym zadaniem jest rozdrobnienie ziaren i ujednoczenie ich rozmiarów. Mieszadła takie wytwarzają w zawieszynie bardzo duże naprężenia ścinające, gdyż ich prędkość obrotowa niejednokrotnie przekracza 20000 obr/min. Konstrukcja mieszadeł dyspergujących jest przy tym na tyle specyficzna, że pozwala zapewnić stosunkowo małą moc mieszania. Głównie przeznaczenie mieszadeł dyspergujących nie oznacza przy tym braku celowości korzystania z nich w procesach mieszania układów ciecz – ciało stałe, w których efekt rozdrabniania nie jest wymagany. Co więcej, stosowanie jednego mieszadła dyspergującego pozwala na dwuetapowe prowadzenie procesu w jednym mieszalniku, co niekiedy jest wysoce pożądane. Pierwszy etap to rozdrabnianie (ucieranie) ziaren w niewielkiej ilości cieczy. Po jego zakończeniu i dodaniu fazy ciekłej, można realizować etap drugi, prowadzący do wytworzenia i ujednorodnienia zawiesiny, jako produktu finalnego. Przykładem takiego procesu może być wytwarzanie farb. Wykorzystanie mieszadeł dyspergujących do wytwarzania zawiesin wymaga jednak wiedzy o efektach ich działania w warunkach zdecydowanie innych niż te, które przewidyuje typowy obszar ich pracy. Wyniki badań w tym zakresie opisano poniżej.

Warunki wytwarzania zawiesiny

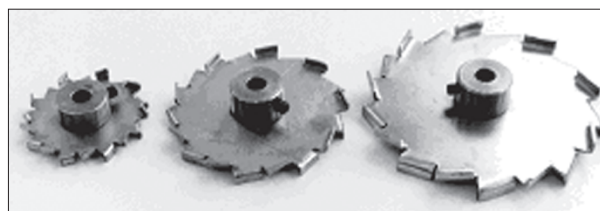
W zbiorniku mieszalnika rozdzielony układ dwufazowy ciecz-ciało stałe przechodzi w zawieszinę w kilku etapach [2], a ich granice wynikają przede wszystkim z prędkości obrotowej mieszadła. W chwili początkowej, przy typowej relacji gęstości faz, ziarna tworzą warstwę zalegającą na dnie zbiornika. Jeżeli mieszadło usytuowane jest powyżej tej warstwy, a częstość jego obrotów jest niewielka, to ziarna pozostają w bezruchu. Po osiągnięciu przez mieszadło krytycznej częstości obrotów $n_{kr,0}$ z powierzchni warstwy zaczynają być porywane pierwsze cząstki. Od tej chwili wzrost częstości obrotów mieszadła skutkuje zmniejszaniem się grubości warstwy nieruchomych cząstek na dnie zbiornika. Przy krytycznej częstości obrotów mieszadła $n_{kr,1}$ wszystkie z nich zostają uniesione z dna, lub przebywają na nim przez stosunkowo krótki czas. W zależności od przyjętego przez obserwatora kryterium, czas ten jest zwykle określany na poziomie 1 lub 2 sekund. Uzyskanie przez mieszadło częstości obrotów $n_{kr,1}$ nie oznacza jednak, że ziarna uniesione z dna rozmieszczone są równomiernie w całej objętości cieczy. Stan taki osiągnięty jest dopiero przy trzeciej częstości krytycznej obrotów mieszadła $n_{kr,2}$. Z punktu widzenia warunków wytwarzania zawiesiny, praca mieszadła z częstością obrotów znacznie przewyższającą wartość $n_{kr,2}$ jest bezcelowa i nieuzasadniona ekonomicznie. Układy ciecz-ciało stałe, tworzące się odpowiednio w kolejnych etapach powstawania zawiesiny, to kolejno: układ ze złożem nieruchomym, zawiesina częściowa, zawiesina całkowita i zawiesina jednorodna.

W praktyce inżynierskiej szczególne znaczenie ma ustalenie częstości $n_{kr,1}$ i $n_{kr,2}$. Na ich wartość wpływa wiele parametrów, związanych z właściwościami faz i stężeniem ciała stałego jak też typem mieszadła i geometrią samego mieszalnika. Z powyższych względów, postać równań wyrażających $n_{kr,1}$ i $n_{kr,2}$ jest ustalana na drodze eksperymentu.

Podobnie eksperymentalny charakter mają równania dotyczące mocy mieszania. Przy ocenie warunków wytwarzania zawiesiny moc ta ma szczególne znaczenie, gdyż decyduje o kosztach uzyskania założonych efektów technologicznych. Równania empiryczne obowiązują jednak w warunkach odpowiadających zakresowi przeprowadzonych badań, a ich ekstrapolacja nie zawsze jest możliwa, zwłaszcza wtedy, gdy potencjalny obszar wykorzystania danego mieszadła różni się znacznie od jego pierwotnego przeznaczenia. Przypadek ten dotyczy szczególnie próby wykorzystania mieszadeł dyspergujących w procesie wytwarzania zawiesin.

Opis badań własnych

W badaniach wykorzystano, pokazane na rys. 1, tarczowe mieszadła dyspergujące o trzech średnicach d .



Rys. 1. Mieszadła dyspergujące wykorzystane w badaniach własnych

Na krawędzi mieszadeł znajdowały się skierowane w obie strony zęby o szerokości a i stosunkowo niewielkiej wysokości. Kąt ich skręcenia był dodatni (α_+) lub ujemny (α_-), w zależności od sposobu montażu mieszadła na wale elektronicznie sterowanego układu napędowego. Kąt skręcenia zębów wymuszał kierunek promieniowej cyrkulacji cieczy w zbiorniku z dnem płaskim, którego średnica wynosiła $D = 147$ mm i który wyposażono w cztery standardowe przegrody, zapobiegające tworzeniu się leja. Relacja d/D dla kolejnych mieszadeł była bliska 1/3, 1/2 i 2/3, a umieszczone one były w różnych odległościach h od dna.

Jako fazy ciekłe wykorzystano glicerynę oraz wodny roztwór polimeru o właściwościach nieniuetonowskich. Ciecze te wykazywały właściwości podobne do właściwości farb i lakierów, przy czym roztwór polimeru, o cechach płynu rozrzedzanego ścinaniem, symulował rzeczywiste właściwości tych produktów. Rozpraszane w cieczach cząstki stałe stanowiły kulki szklane o gęstości $\rho_s = 2470$ kg/m³, przy czym badania prowadzono oddzielnie dla cząstek o średnicach $d_s = 300, 500$ i 700 μ m. W kolejnych seriach pomiarowych zmieniano udział masowy ciała stałego w mieszanym układzie c_s , ustalano krytyczne częstości obrotów mieszadeł oraz mierzono odpowiadającą im moc mieszania. Szczegółowy opis zakresu i metodyki prowadzenia badań zawiera praca [3].

Ocena wyników badań

Pełną analizę wyników badań dla wszystkich mieszadeł, pracujących w różnych warunkach, podano w pracy [3]. Informacje przedstawione poniżej dotyczą jedynie warunków uzyskania w mieszalniku zawiesiny całkowitej, czyli częstości obrotów $n_{kr,1}$ i odpowiadającej jej mocy $P_{kr,1}$. Warto zauważyć, że wytworzenie zawiesiny całkowitej jest zwykle praktycznie wystarczające dla osiągnięcia określonego efektu, np. intensyfikacji ruchu masy.

Z obserwacji poczynionych w trakcie prowadzenia badań wynika, że najniższe wartości $n_{kr,1}$ uzyskiwano przy możliwie małej odległości mieszadeł od dna zbiornika, czyli równocześnie od powierzchni warstwy ziaren. W warunkach badań własnych odległość ta odpowiadała relacji $h/D = 0,17$. Aczkolwiek efekt ten wydaje się oczywisty, to jednak jest bardzo istotny dla dwuetapowego procesu prowadzonego mieszadłem dyspergującym. W trakcie rozdrabniania ciała stałego w zbiorniku znajduje się bowiem niewielka objętość substancji, a zatem mieszadło musi być umieszczone blisko dna. Związek średnicy mieszadeł z krytyczną częstotliwością ich obrotów, dla układów o różnym stężeniu ciała stałego, pokazano na rys. 2.

Wynika z niego, że wartość $n_{kr,1}$ rośnie wraz ze wzrostem c_s , przy czym szczególnie wysokie wartości częstotliwości krytycznej dotyczą mieszadeł o najmniejszej średnicy. Różnice w wartościach $n_{kr,1}$ dla mieszadeł o relacji $d/D = 1/2$ i $2/3$ nie są duże. Jeżeli jednak mieć na uwadze fakt, że moc mieszania rośnie w stopniu istotnym wraz ze wzrostem średnicy mieszadła, to dla zastosowań praktycznych można polecać mieszadło o $d/D = 1/2$. Warto zauważyć, że jest to wartość odbiegająca od typowej dla mieszalnika standardowego wartości $1/3$. Wpływ kąta skrzywienia zębów nie jest bardzo istotny, aczkolwiek ich skrzywienie ujemne, wywołujące promieniową cyrkulację cieczy w kierunku ścian zbiornika, jest bardziej korzystne.

Ocenę przydatności i efektywności pracy mieszadła dyspergującego o $d/D = 1/2$ prowadzono w dodatkowych seriach pomiarowych, w których równolegle stosowano tarczowe mieszadło turbinowe z sześcioma standardowymi łopatkami prostymi i identycznej, jak mieszadło dyspergujące, średnicy. Z rys. 3. wynika, że mieszadło turbinowe szybciej wytwarzało zawiesinę całkowitą, chociaż różnice pomiędzy $n_{kr,1}$ mieszadła turbinowego i dyspergującego nie były bardzo istotne; zwłaszcza przy ujemnym kącie skrzywienia zębów.

Na korzyść mieszadła dyspergującego przemawia jednak moc mieszania, którą mierzono równoległe z pomiarem $n_{kr,1}$. Zmierzone wartości mocy przedstawiono na rys. 4. Jak z niego wynika, moc mieszania mieszadła turbinowego jest od dwu- do trzykrotnie większa niż mieszadła dyspergującego, chociaż to drugie wytwarza zawiesinę całkowitą przy nieco większej częstotliwości obrotów. Tak radykalne obniżenie zapotrzebowania na energię do wytworzenia zawiesiny przez mieszadło dyspergujące, stanowi jego podstawową zaletę. Identyczne korzyści obserwowano prowadząc badania z wykorzystaniem gliceryny oraz cząstek stałych o innym rozmiarze.

Na podstawie danych pomiarowych uzyskanych dla wszystkich trzech badanych mieszadeł, umieszczonych w różnych odległościach od dna, mieszających glicerynę i roztwór polimeru z cząstkami stałymi o trzech różnych rozmiarach, opracowano dwa równania niezbędne do obliczeń projektowych. Pierwsze z nich pozwala ustalić wartość $n_{kr,1}$ i ma bezwymiarową postać

$$Re_{kr,1} = 25,0 Ar^{0,38} c_s^{0,25} \left(\frac{d_s}{d}\right)^{-0,85} \left(\frac{h}{d}\right)^{0,41} \left(\frac{D}{d}\right)^{0,20} \left(1 + \frac{a}{d} \sin\alpha\right)^{0,87} \quad (1)$$

Na podstawie równania drugiego obliczyć można moc mieszania w warunkach odpowiadających wytworzeniu zawiesiny całkowitej

$$Eu_{kr,1} = 1,24 Re_{kr,1}^{-0,02} c_s^{0,03} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)^{-1,72} \left(\frac{d_s}{d}\right)^{0,04} \left(\frac{h}{d}\right)^{0,04} \left(\frac{D}{d}\right)^{1,07} \left(1 + \frac{a}{d} \sin\alpha\right)^{-0,39} \quad (2)$$

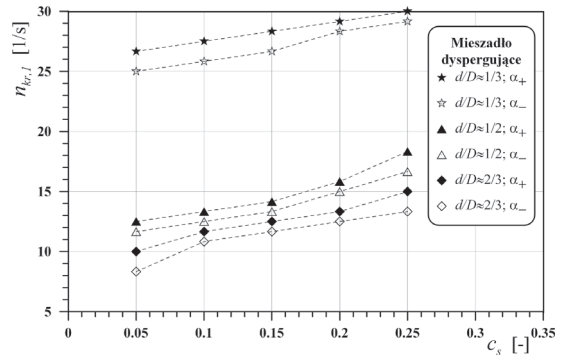
Liczby kryterialne w (1) i (2) zostały zdefiniowane jako

$$Re_{kr,1} = \frac{n_{kr,1}^2 d^2 \rho}{k}; \quad Ar = \frac{d_s^3 (\rho_s - \rho) \left(\frac{g^{2-m} \rho^2}{k^2}\right)^{\frac{3}{2+m}}}{\rho}; \quad Eu_{kr,1} = \frac{P_{kr,1}}{n_{kr,1}^3 d^5 \rho} \quad (3)$$

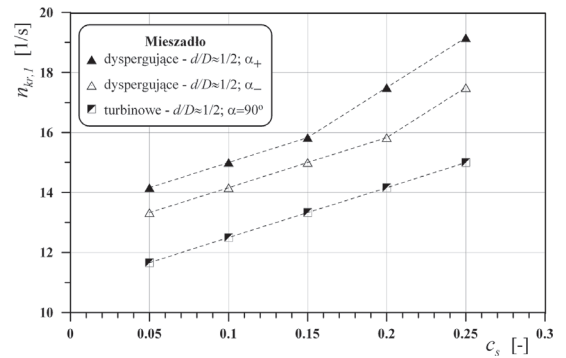
Dla cieczy nieniutonowskiej (roztwór polimeru) m i k to parametry modelu potęgowego płynu $\tau = k^m$, przy czym dla cieczy niuonowskiej (gliceryna) $m = 1$, a k przyjmuje wartość współczynnika dynamicznego

Tab. 1. Zakres stosowalności równań (1) i (2)

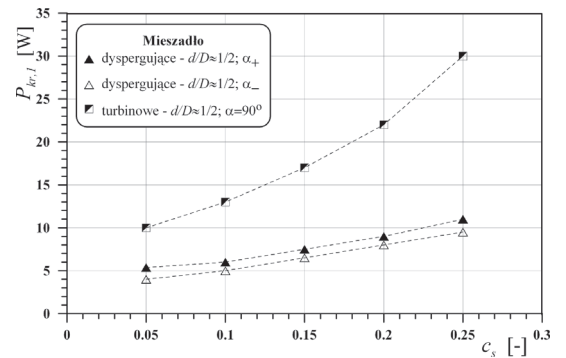
r.	Ar	c_s	$\frac{\rho_s - \rho}{\rho}$	$\frac{d_s}{d}$	$\frac{h}{d}$	$\frac{D}{d}$	$1 + \frac{a}{d} \sin\alpha$
	$Re_{kr,1}$						
(1)	0,0015-2,288	0,05-0,25	-	0,003-0,013	0,25-1,41	1,5-3,0	0,94-1,06
(2)	42-1636		0,96-1,47				



Rys. 2. Wpływ stężenia ciała stałego w roztworze polimeru, średnicy mieszadeł i kąta skrzywienia ich zębów na krytyczną częstotliwość obrotów. $h/D = 0,17$; $d_s = 700 \mu m$



Rys. 3. Porównanie krytycznej częstotliwości obrotów mieszadła dyspergującego i turbinowego przy rozpraszaniu cząstek ciała stałego w roztworze polimeru $h/D = 0,17$; $d_s = 700 \mu m$



Rys. 4. Porównanie mocy mieszania mieszadła dyspergującego i turbinowego w momencie wytworzenia zawiesiny całkowitej w roztworze polimeru $h/D = 0,17$; $d_s = 700 \mu m$

lepkości. Gęstość cieczy oznaczono symbolem ρ , a g to przyspieszenie ziemskie. Zakres stosowalności równań (1) i (2) obejmuje zakres prowadzonych badań, który podano w tab. 1.

Wnioski

- stosowanie mieszadeł dyspergujących w miejsce standardowych mieszadeł turbinowych jest korzystne dla wytworzenia zawiesiny, gdyż przede wszystkim pozwala obniżyć moc mieszania,
- korzystając z mieszadeł dyspergujących można w jednym aparacie realizować kolejno proces rozdrabniania ziaren, a następnie, po obniżeniu częstotliwości obrotów mieszadła i dodaniu fazy ciekłej, proces wytwarzania zawiesiny,
- mieszadła dyspergujące przeznaczone do wytwarzania zawiesiny powinny mieć zęby skrzywane ujemnie, wykazywać relację d/D bliską $1/2$ oraz być usytuowane możliwie blisko dna zbiornika.

LITERATURA

- [1] J. Kamiński: Mieszanie układów wielofazowych. WNT, Warszawa 2004.
- [2] F. Stręk: Mieszanie i mieszalniki. WNT, Warszawa 1981.
- [3] V. Stecyk: Zużycie energii przy wytwarzaniu zawiesin mieszadłami nowej konstrukcji. Praca doktorska, Politechnika Opolska, Opole 2009.