

Anna Kielbus-Rapala

e-mail: anna.kielbus-rapala@zut.edu.pl

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

Warunki wytwarzania napowietrzanej zawiesiny lekkiej w mieszalniku

Wstęp

W układach rozproszonych zawierających cząstki stałe niezbędne jest wymuszenie jak największego kontaktu między cząstkami a cieczą. Najbardziej rozpowszechnione są tzw. zawiesiny konwencjonalne, gdzie cząstki ciała stałego mają większą gęstość, niż gęstość cieczy, w której mają być zawieszone. Innym, również coraz częściej spotykanym rodzajem układu jest ten, gdzie cząstki stałe charakteryzują się mniejszą gęstością, w porównaniu z gęstością cieczy.

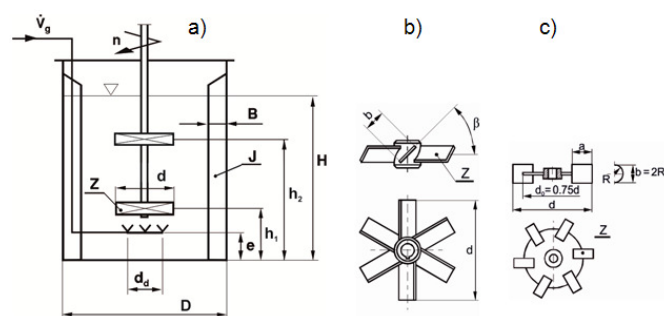
Mieszanie układów gaz-ciecz-cząstki lekkie jest często spotykane w wielu gałęziach przemysłu, m.in.: w petrochemicznym, spożywczym, w procesach polimeryzacji, czy fermentacji. W takich układach, w odróżnieniu od zawiesiny konwencjonalnej, w której należy poderwać cząstki z dna aparatu, wytworzenie suspensji polega na wciągnięciu swobodnie pływających cząstek pod powierzchnię cieczy oraz rozprowadzeniu ich w jej objętości. Na warunki wytworzenia zawiesiny wpływają: typ i średnica mieszadła, rozmiar cząstek, ich kształt i udział w mieszaninie [Kamieński, 2004]. Ważne są również parametry geometryczne aparatu, zwłaszcza konfiguracja przegród [Karcz i Mackiewicz 2009; Atibeni i in., 2013]. Ze względu na to, że cząstki lekkie znajdują się na łatwo deformującej się powierzchni płynu, wzajemne oddziaływanie elementów tej powierzchni, strumieni płynu generowanych przez mieszadło i cząstek stałych, jest bardziej skomplikowane w porównaniu z oddziaływaniem w zawieszynie konwencjonalnej, gdzie cząstki, które należy poderwać, leżą na sztywnym dnie mieszalnika. Inny mechanizm wytwarzania zawiesin lekkich, powoduje, że wyniki dla zawiesin konwencjonalnych nie mogą być przenoszone na układy z cząstkami lekkimi.

Obecność fazy gazowej w układzie stanowi dodatkowy czynnik wpływający na częstość obrotów mieszadła, przy której następuje wciągnięcie cząstek w głąb cieczy. W porównaniu do układów ciecz-cząstki lekkie, niewiele prac dotyczy układów trójfazowych z takimi cząstkami [Xu i in., 2001; Bao i in., 2005].

Celem prezentowanej pracy była analiza eksperymentalna warunków wytwarzania układu gaz-ciecz-cząstki lekkie w mieszalniku.

Badania doświadczalne

Aparatura. Pomiaru wykonano w przezroczystym mieszalniku z płaskim dnem i czterema płaskimi przegradami pełnej długości ($B = 0,1D$). Zbiornik o średnicy wewnętrznej $D = 0,288$ m, wypełniony był cieczą do wysokości $H = D$ (objętość robocza aparatu $V_L = 0,02$ m³). Podstawowe parametry mieszalnika i zastosowanych mieszadeł przedstawiono na rys. 1. Ze względu na to, że inne mieszadła polecane są do dyspergowania gazu (generujące przepływ promieniowy),



Rys. 1. Parametry geometryczne mieszalnika i mieszadeł; a) mieszalnik; mieszadła: b) turbinowe z łopatkami pochyłymi $\beta = 45^\circ$ (PBT), c) turbinowe Smitha (CD 6)

a inne do rozpraszania cząstek stałych (przepływ osiowy), wybór mieszadła do równoczesnego rozproszenia obu faz wymaga pewnego kompromisu. W celu wytworzenia układu trójfazowego w badaniach zastosowano układ dwóch mieszadeł szybkoobrotowych, umieszczonych na jednym wale. Jako dolne, mające za zadanie rozbicie i rozproszenie pęcherzy gazu wypływających z dystrybutora, wybrano mieszadło turbinowe Smitha (CD 6), wytwarzające promieniowy strumień cyrkulacyjny w mieszalniku. Górnym mieszadłem, którego głównym zadaniem było wciągnięcie cząstek lekkich pod powierzchnię płynu do jego wnętrza, było mieszadło turbinowe z łopatkami pochyłymi pod kątem $\beta = 45^\circ$, wymuszające przepływ mieszany: promieniowo osiowy z przeważającą składową osiową, pompujące płyn w kierunku powierzchni swobodnej (PBT \uparrow). Odległości mieszadeł od dna mieszalnika wynosiły odpowiednio: $h_1 = 0,33D$ dla dolnego mieszadła oraz $h_2 = 0,67D$ dla górnego. Oba miały jednakową średnicę $d = 0,33D$.

Wybrane do badań układy trójfazowe różniły się zdolnością do koalescencji pęcherzy gazu w cieczy. W układzie wykazującym taką zdolność fazą ciągłą była woda destylowana, natomiast w układzie o obniżonej zdolności, fazą ciągłą był elektrolit – wodny roztwór chlorku sodu, o dwóch różnych stężeniach: $0,4$ kmol/m³ oraz $0,8$ kmol/m³ NaCl. Fazą gazową było powietrze.

Materiały. Fazą stałą były cząstki polietylenu o gęstości $\rho_p = 955$ kg/m³ oraz średniej średnicy $d_p = 3,025$ mm. Cząstki były odpowiednio przygotowane do pomiaru. Najpierw cząstki były przesiewane, w celu uzyskania frakcji o jednakowej średniej średnicy d_p , a następnie myte i suszone. Aby uzyskać masę cząstek, odpowiadającą danemu udziałowi X w układzie, przed każdą serią pomiarową cząstki były ważone, a następnie wprowadzane do cieczy przy wyłączonym mieszadle.

Zakres badań. Badania wykonano dla pięciu różnych wartości udziałów cząstek stałych X (0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 5 % mas.) oraz sześciu strumieni objętościowych gazu V_G z przedziału $<(1,11 \div 3,89) \cdot 10^{-4}$ m³/s.

Metodyka. Minimalne częstości obrotów mieszadła, przy których występowały charakterystyczne struktury przepływu mieszaniny trójfazowej, określano wizualnie, obserwując dla każdego udziału X cząstek oraz każdego strumienia gazu V_G zachowanie faz rozpraszanych w układzie. Dodatkowo, dla częstości obrotów mieszadła, przy których następowało równocześnie rozpraszanie gazu i zawieszenie cząstek (powstawał układ trójfazowy), określano wartość udziału gazu zatrzymanego w cieczy ϕ , odczytując dziesięciokrotnie wartość wychylenia słupa cieczy h_g w mieszalniku, w stosunku do układu bez gazu.

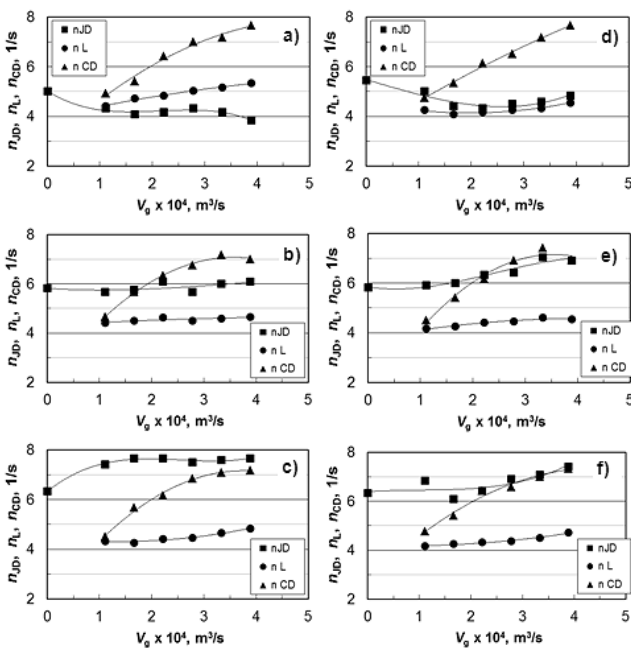
Wyniki i dyskusja

W oparciu o przeprowadzone badania wyznaczono wartości częstości obrotów mieszadła, przy których obserwowano trzy charakterystyczne struktury przepływu mieszaniny gaz-ciecz-cząstki lekkie w mieszalniku: (1) n_{JD} – minimalna częstość obrotów mieszadła, przy której wszystkie cząstki lekkie były wciągnięte (zanurzone w cieczy), analogiczna do krytycznej częstości obrotów mieszadła n_{JS} dla zawiesiny konwencjonalnej (zgodnie z kryterium *Zwierieringa*); (2) n_L – częstość obrotów mieszadła, przy której obserwowano rozproszenie pęcherzy gazu w obszarze od powierzchni płynu do płaszczyzny dolnego mieszadła, obszar poniżej tego mieszadła był pozbawiony gazu; (3) n_{CD} – częstość obrotów mieszadła, przy której następowała całkowita dyspersja gazu, rozpraszanie pęcherzy w całej objętości cieczy. Wybrane wartości n zostały przedstawione na rys. 2a, b, c dla układu z wodą destylowaną oraz na rys. 2d, e, f dla układu z elektrolitem o mniejszym stężeniu.

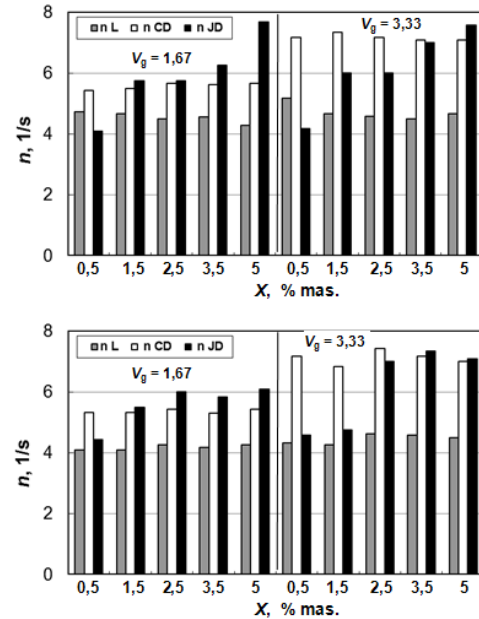
Obszar poniżej częstości n_L (na rysunku poniżej linii łączącej punkty koła), to obszar zachłystywania się mieszaną gazem, gdzie zdolność pompowania mieszaną jest zbyt mała, by rozproszyć pęcherze gazowe, gaz przepływa osiowo w kierunku lustra cieczy. Obszar pomiędzy n_L a n_{CD} (punkty trójkąty) to obszar rozpraszania bez recyrkulacji pęcherzy gazu. Natomiast obszar, w którym obserwowano jednoczesne wciągnięcie cząstek lekkich do wnętrza cieczy i dobre rozproszenie gazu (wytworzenie układu trójfazowego), znajdował się powyżej linii większej wartości z dwóch: n_{CD} (punkty trójkąty) oraz n_{JD} (punkty kwadraty).

W układzie wykazującym zdolność do koalescencji, przy niskim udziale fazy stałej ($X = 0,5\%$ mas.), wciągnięcie cząstek z powierzchni płynu wymagało niższych częstości obrotów n_{JD} (punkty kwadraty), niż rozproszenie równomierne pęcherzy gazu n_{CD} (punkty trójkąty). Widać wyraźny wpływ udziału cząstek w układzie na minimalne częstości o obrotów mieszaną, niezbędne do wciągnięcia cząstek lekkich n_{JD} , które zwiększają się ze zwiększaniem X , a przy $X = 5\%$ mas. są wyższe niż n_{CD} , w całym zakresie strumienia gazu V_g , co świadczy o tym, że przy większym udziale cząstek łatwiej zdyspergować fazę gazową niż rozproszyć fazę stałą. W układzie z elektrolitem o małym udziale cząstek, zawieszenie cząstek stałych wymagało nieznacznie większych wartości n_{JD} , w porównaniu do układu wykazującego zdolność do koalescencji. Tendencja zmian n_{JD} ze zwiększaniem X była podobna, jednak różnice w wartościach n_{JD} dla różnych X były mniejsze. Należy zauważyć, że przy większym udziale cząstek, dla większych strumieni gazu ($V_g > 2,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$) wartości n_{JD} i n_{CD} są praktycznie jednakowe.

Wpływ strumienia objętościowego gazu na wartości n_L , n_{CD} oraz n_{JD} pokazano, porównując częstości obrotów mieszaną uzyskane dla dwóch różnych wartości V_g w układzie z wodą destylowaną (Rys. 3a) oraz elektrolitem (Rys. 3b). W każdym z badanych układów, przy stałym udziale cząstek X , zwiększanie V_g powodowało największy wzrost wartości n_{CD} . Również częstości n_{JD} zależały od ilości gazu w układzie. Największy wzrost n_{JD} spowodowany zwiększeniem V_g obserwowano w układach z elektrolitem przy większym udziale cząstek X . Na Rys. 3 można również zaobserwować, jak zmieniły się wartości n_L , n_{CD} oraz n_{JD} ze zwiększaniem udziału cząstek X przy stałym strumieniu gazu V_g . Największy wzrost charakteryzował n_{JD} szczególnie w układzie wykazującym zdolność do koalescencji.

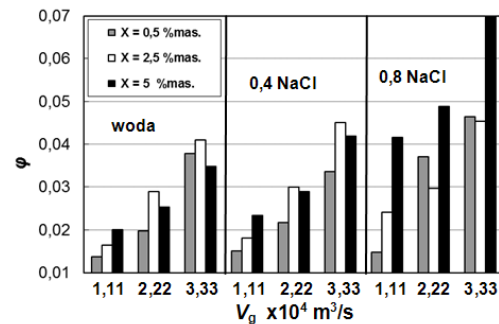


Rys. 2. Porównienie zależności n_{JD} , n_L , $n_{CD} = f(V_g)$ dla układów o różnej zdolności do koalescencji: (a-c) faza ciągła: woda destylowana, (d-f) faza ciągła: 0,4 kmol/m³ roztwór NaCl; różne udziały masowe cząstek X : (a, d) 0,5%, (b, e) 2,5%, (c, f) 5%



Rys. 3. Wpływ udziału cząstek X oraz strumienia gazu V_g na wartości częstości obrotów mieszaną n_{JD} , n_L , n_{CD} ; układ: a) faza ciągła: woda destylowana, b) faza ciągła: 0,4 kmol/m³ roztwór NaCl; dwie wybrane wartości $V_g \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

Na rys. 4 porównano wartości udziału gazu ϕ otrzymane w każdym z badanych układów przy trzech wybranych wartościach V_g .



Rys. 4. Wpływ udziału cząstek X oraz strumienia gazu V_g na udział gazu ϕ zatrzymanego w układzie; wybrane wartości V_g

Wnioski

Na podstawie analizy doświadczalnej wyznaczono wartości częstości obrotów mieszaną n_L , n_{CD} oraz n_{JD} , dzięki którym określono charakterystyczne obszary przepływu napowietrzanej zawiesiny lekkiej w mieszalniku.

Stwierdzono, że wartości n_{JD} zwiększały się zarówno ze zwiększaniem udziału cząstek lekkich X , jak i strumienia gazu V_g , we wszystkich badanych układach.

Udział gazu ϕ zwiększał się ze wzrostem strumienia gazu V_g , a jego wartość zależała od udziału cząstek w układzie X oraz rodzaju fazy ciągłej.

LITERATURA

- Atibeni R., Gao Z., Bao Y., (2013). Effect of baffles on fluid flow field in stirred tank with floating particles by using PIV. *Can. J. Chem. Eng.* 91:570-578. DOI 10.1002/cjce.21652
- Bao Y., Hao Z., Gao Z., Shi L., Smith J.M., (2005). Suspension of buoyant particles in a three phase stirred tank. *Chem. Eng. Sci.*, 60, 2283-2292. DOI: 10.1016/j.ces.2004.10040.
- 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.
- Xu S.A., Ren W.Z., Zhao X.M., (2001). Critical rotational speed for a flaming particle suspension in an aerated vessel. *Chem. Eng. Tech.*, 24, 189-194. DOI:10.1002/1521-4125(200102)24:2.