

Anna KIELBUS-RAPAŁA, Joanna KARCZ

e-mail: joanna.karcz@zut.edu.pl

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

Wpływ typu górnego mieszadła na wymianę masy między gazem a cieczą w układach wielofazowych

Wstęp

Aparaty z mieszadłem są szeroko stosowane do prowadzenia procesów w układach wielofazowych w wielu gałęziach przemysłu. Ze względu na specyfikę działania umożliwiają one wytworzenie dużej powierzchni kontaktu gazu z cieczą, zwiększając tym samym efektywność prowadzonych procesów, np. fermentacji, utleniania czy oczyszczania ścieków. Zwiększenie intensywności mieszania układów wielofazowych oraz wydajności procesu wymiany masy w mieszalnikach uzyskuje się stosując w mieszalniku więcej niż jedno mieszadło na wspólnym wale. Dlatego aparaty z kilkoma mieszadłami stosowane są coraz powszechniej do mieszania układów dwu- jak i trójfazowych.

Poprawne zaprojektowanie takiego mieszalnika (wybór odpowiedniej konfiguracji mieszadeł) do prowadzenia danego procesu wymaga uwzględnienia wielu wielkości: zapotrzebowania energii (mocy mieszania), udziału gazu zatrzymanego w cieczy, intensywności dyspergowania gazu, czy cząstek w układzie z ciałem stałym oraz objętościowego współczynnika wnikania masy [1]. To, która z tych wielkości będzie najważniejsza przy dokonywaniu wyboru, zależy od procesu, jaki ma być realizowany w układzie. Dla procesów z mniejszym zapotrzebowaniem tlenu, przy projektowaniu aparatu uwaga skupiona jest bardziej na intensywności mieszania niż na współczynniku $k_L a$. W przypadku, gdy osiągnięcie dużej wydajności wymiany masy jest czynnikiem najważniejszym, np. w wielu bioprocessach, projektowanie aparatu należy przeprowadzić tak, aby zastosowana konfiguracja mieszadeł pozwalała uzyskać zarówno dużą intensywność mieszania, jak i wysokie wartości współczynnika $k_L a$.

Wybór typu zestawu zastosowanych mieszadeł wymaga określenia charakterystyk transportu masy między gazem a cieczą. Wielu autorów [1–6] zajmowało się określeniem wartości współczynnika wnikania masy w układzie ciecz – gaz w aparacie z kilkoma mieszadłami. Zdania na temat wpływu typu konfiguracji na wartość tego współczynnika są podzielone. Bardzo nieliczne natomiast są w tym zakresie informacje dotyczące układów trójfazowych [7, 8].

Celem prezentowanej pracy była analiza eksperymentalna wpływu typu górnego mieszadła na proces wymiany masy między gazem a cieczą, w mieszanych za pomocą zestawu dwóch mieszadeł na jednym wale układach ciecz – gaz oraz ciecz – gaz – ciało stałe. Analizę tę przeprowadzono w oparciu o badania objętościowego współczynnika wnikania masy $k_L a$.

Część doświadczalna

Pomiary zostały wykonane w przezroczystym mieszalniku o średnicy wewnętrznej $D = 0,288$ m. Zbiornik z płaskim dnem i czterema standardowymi przegrodami wypełniony był cieczą do wysokości $H = D$ (objętość robocza płynu w zbiorniku $V_L = 0,02$ m³). W badaniach zastosowano trzy typy mieszadeł szybkoobrotowych: mieszadło turbinowe *Rushtona* (TR), A 315 oraz HE 3. Wszystkie mieszadła miały średnicę $d = 0,33D$. W obu konfiguracjach, jako dolne mieszadło montowano mieszadło turbinowe *Rushtona*, natomiast w pozycji górnej mieszadła: A 315 lub HE 3, generujące różne profile przepływu płynu w zbiorniku. Mieszadło A 315 wytwarza promieniowo-osiową cyrkulację cieczy, natomiast mieszadło HE 3 – osiową. Oba mieszadła charakteryzują się niską wartością mocy mieszania. Gaz doprowadzany był do mieszalni-

ka za pomocą dystrybutora w kształcie pierścienia o średnicy $d_d = 0,7d$, umieszczonego w odległości $e = 0,5d$ od dna zbiornika.

Fazę ciągłą w badanych układach wielofazowych stanowiła woda destylowana. Źródłem tlenu przenoszonym z gazu do cieczy było powietrze. W układzie trójfazowym fazę stałą stanowiły cząstki piasku o średniej średnicy $d_p = 335$ μm i gęstości $\rho_p = 2600$ kg/m³. Pomiary przeprowadzono przy różnych wartościach częstości obrotów mieszadła $n \in \langle 6,67; 17,5$ 1/s \rangle , w układach ciecz – gaz – ciało stałe wyższych od krytycznej częstości obrotów mieszadła n_{krG} dla każdego z badanych układów. Badania wykonano dla czterech różnych wartości objętościowego natężenia przepływu gazu zmienianego w zakresie $V_g \in \langle 1,11 \cdot 10^{-4}; 4,44 \cdot 10^{-4}$ m³/s \rangle (co odpowiada umownej liniowej prędkości gazu w zakresie $w_{og} \in \langle 1,71 \cdot 10^{-3}; 6,82 \cdot 10^{-3}$ m/s \rangle). Stężenie cząstek ciała stałego zmieniano w zakresie $X < 0; 2,5\%$ mas. \rangle .

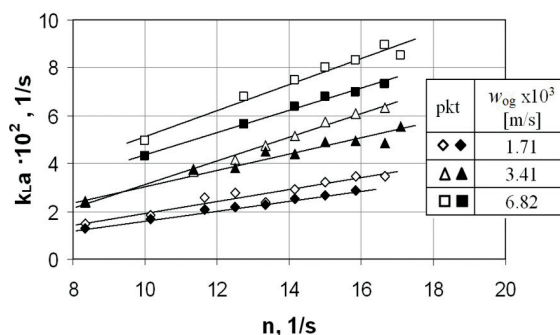
Pomiary objętościowego współczynnika wnikania masy $k_L a$ prowadzono metodą dynamiczną przy użyciu tlenomierza wyposażonego w sondę zanurzoną w badanej cieczy.

Wyniki badań

Na podstawie otrzymanych wyników badań możliwe było określenie wpływu typu i geometrii zastosowanego jako górne mieszadła (wytwarzanego przez mieszadło profilu przepływu płynu), na warunki prowadzenia procesu wymiany masy oraz wartość współczynnika $k_L a$ w układzie ciecz – gaz oraz ciecz – gaz – ciało stałe. Z analizy danych eksperymentalnych wynika, że w zakresie przeprowadzonych pomiarów typ górnego mieszadła istotnie wpływa na wielkość transportu tlenu z gazu do cieczy zarówno w układzie dwu- jak i trójfazowym.

Układ ciecz – gaz

W układzie woda destylowana – powietrze znacznie wyższe wartości objętościowego współczynnika wnikania masy uzyskano stosując zestaw mieszadeł z górnym mieszadłem A 315. Porównanie wartości współczynnika $k_L a$ otrzymanych przy trzech wybranych wartościach umownej liniowej prędkości gazu w_{og} z zastosowaniem obu testowanych konfiguracji mieszadeł przedstawiono na rys. 1. Mieszadło wytwarzające promieniowo-osiowy przepływ płynu pozwoliło zapewnić korzystniejsze warunki do prowadzenia procesu wymiany masy, od mieszadła HE 3 generującego typowo osiowy przepływ. Dla stałych



Rys. 1. Porównanie wartości współczynnika $k_L a = f(n)$ dla dwóch konfiguracji mieszadeł; punkty pełne: zestaw TR – HE 3, punkty puste: zestaw TR – A 315; różne wartości w_{og} ; układ ciecz – gaz

wartości częstości obrotów mieszadła, różnice w wartościach współczynnika k_{La} , rosły ze zwiększaniem ilości gazu doprowadzanego do układu. Przy $w_{og} = 6,82 \cdot 10^{-3}$ m/s, wartości tego współczynnika w układzie mieszanym zestawem TR – A 315 były ponad 20% większe od analogicznych wartości otrzymanych dla zestawu TR – HE 3.

Wyniki pomiarów objętościowego współczynnika wnikania masy k_{La} w układzie ciecz – gaz opisano matematycznie stosując zależność (1)

$$k_{La} = A \left(\frac{P_{G-L}}{V_L} \right)^B w_{og}^C \quad (1)$$

Współczynnik A oraz wykładniki w tym równaniu dla obu konfiguracji mieszadeł zebrano w tabeli 1. Równanie (1) obowiązuje w następującym zakresie zmiennych $Re \in <7,9 \cdot 10^4; 16,3 \cdot 10^4>$; $P_{G-L}/V_L \in <630; 4500 \text{ W/m}^3>$; $w_{og} \in <1,71 \cdot 10^{-3}; 6,82 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}>$.

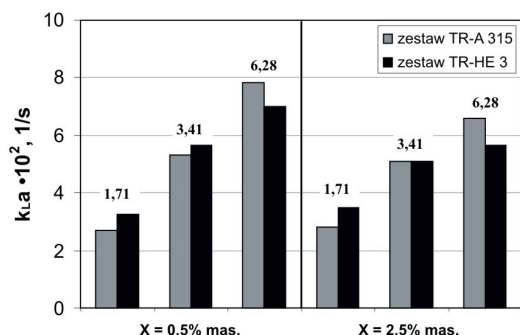
Tab. 1. Wartości współczynnika A oraz wykładników B, C w równaniu (1)

Lp.	Konfiguracja mieszadeł		A	B	C	±Δ
	dolne	górne				
1	turbinowe Rushtona	A 315	0,0983	0,404	0,689	7
2	turbinowe Rushtona	HE 3	0,081	0,374	0,636	6,5

Układ ciecz – gaz – ciało stałe

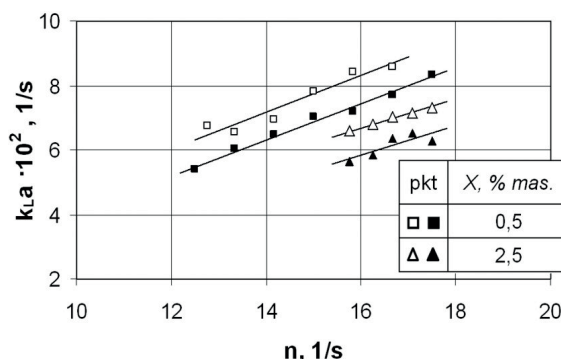
W układzie trójfazowym decydujący wpływ, jeśli chodzi o rozproszenie gazu i poderwanie cząstek ciała stałego z dna zbiornika ma dolne mieszadło. Ze względu na to, że w obu przypadkach jako dolne zastosowano mieszadło turbinowe Rushtona, krytyczna częstość obrotów mieszadła była jednaka dla obu konfiguracji. Przeprowadzenie badań przy takich samych parametrach operacyjnych, umożliwiło lepszą analizę dotyczącą zastosowania testowanych zestawów mieszadeł do prowadzenia procesu wymiany masy w mieszalniku.

Wpływ typu górnego mieszadła na wartość objętościowego współczynnika wnikania masy w układzie ciecz – gaz – ciało stałe przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zależność $k_{La} = f(X)$ dla dwóch konfiguracji mieszadeł; różne wartości umownej liniowej prędkości gazu $w_{og} \cdot 10^{-3}$ [m/s]; różne stężenie X cząstek; $n = 15$ [1/s]

W układzie trójfazowym to, które mieszadło zapewnia lepsze warunki do prowadzenia procesu wymiany składnika gazowego między gazem a cieczą, zależy w dużym stopniu od ilości gazu doprowadzonego do mieszalnika. Przy niskiej wartości umownej liniowej prędkości gazu (równiej $1,71 \cdot 10^{-3}$ m/s), zarówno w układzie o stężeniu $X = 0,5\%$ mas. jak i $X = 2,5\%$ mas. cząstek fazy stałej, wyższe o ok. 20% wartości objętościowego współczynnika k_{La} otrzymano dla układu z mieszadłem HE 3. Ze wzrostem w_{og} , różnice w wartościach tego współczynnika uzyskanych dla obu zestawów mieszadeł, znacznie się zmniejszyły. Co więcej, w układzie z mniejszym udziałem cząstek, przy $w_{og} = 3,41 \cdot 10^{-3}$ m/s, w całym zakresie częstości obrotów mieszadła, wartości k_{La} były sobie równe. Natomiast przy znacznie większej ilości gazu w układzie, zarówno z udziałem 0,5 jak i 2,5% mas. cząstek ciała stałego, korzystniejsze okazało się zastosowanie konfiguracji TR – A 315, uzyskano wówczas wyższe o ok. 20% wartości objętościowego współczynnika



Rys. 3. Porównanie wartości współczynnika $k_{La} = f(n)$ dla dwóch konfiguracji mieszadeł; punkty pełne: zestaw TR – HE 3, punkty puste: zestaw TR – A 315; $w_{og} = 6,28 \cdot 10^{-3}$ m/s; układ ciecz – gaz – ciało stałe

wnikania masy, w porównaniu z wartościami charakteryzującymi zbiornik z górnym mieszadłem HE 3 (Rys. 3).

Wyniki pomiarów współczynnika k_{La} w układzie trójfazowym opisywane są najczęściej w postaci zależności, wiążącej go z jednostkową mocą mieszania P_{G-L-S}/V_L , umowną liniową prędkością gazu w_{og} oraz udziałem X cząstek fazy stałej w układzie. W oparciu o ok. 150 punktów pomiarowych opracowano następujące równanie

$$k_{La} = A \left(\frac{P_{G-L-S}}{V_L} \right)^B w_{og}^C \frac{1}{1+mX} \quad (2)$$

Otrzymane dla każdej konfiguracji mieszadeł współczynniki w równaniu (2) zamieszczono w tabeli 2.

Tab. 2. Wartości współczynnika A, m oraz wykładników B, C w równaniu (2)

Lp.	Konfiguracja mieszadeł		A	B	C	m	±Δ
	dolne	górne					
1	turbinowe Rushtona	A 315	0,1034	0,4094	0,6949	4,0996	4,8
2	turbinowe Rushtona	HE 3	0,0307	0,4230	0,5103	6,1697	6,4

Zakres stosowalności równania (2) obejmuje: $Re \in <9,7 \cdot 10^4; 16,8 \cdot 10^4>$; $P_{G-L-S}/V_L \in <1100; 4950 \text{ W/m}^3>$; $w_{og} \in <1,71 \cdot 10^{-3}; 6,82 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}>$; $X \in <0,005; 0,025>$.

Wnioski

- Z przeprowadzonej analizy doświadczalnej wynika, że:
- W układzie ciecz – gaz korzystniejszym dla prowadzenia procesu wymiany masy w zbiorniku z dwoma mieszadłami okazał się zestaw TR–A 315.
 - Najwyższe wartości objętościowego współczynnika wnikania masy w układzie trójfazowym z niewielkim udziałem fazy gazowej uzyskano w mieszalniku z górnym mieszadłem HE 3.
 - W układzie ciecz – gaz – ciało stałe, przy dużych wartościach umownej liniowej prędkości gazu korzystniejsze warunki do prowadzenia procesu wymiany masy zapewniała konfiguracja z górnym mieszadłem A 315.

LITERATURA

- [1] T. Moucha, V. Linek, E. Prokopova, Chem. Eng. Sci., 58, 1839 (2003).
- [2] S.J. Arjunwadkar, K. Sarvanan, A.B. Pandit, P.R. Kulkarni: Biochem. Eng. J. 6, 109 (1998).
- [3] S.D. Shewale, A.B. Pandit, Chem. Eng. Sci., 61, 489 (2006).
- [4] D. Garcia-Cortez, C. Xuere, P. Taillandier, U. Jauregui-Haza, J. Bertrand, Chem. Eng. Techn., 27, 998 (2004).
- [5] M.S. Puchli, V.K. Rathod, A.B. Pandit: Biochem. Eng. J. 23, 25 (2005).
- [6] M. Fijasova, V. Linek, T. Moucha: Chem. Eng. Sci. 62, 1650 (2007).
- [7] A. Galaction, D. Cascaval, C. Oniscu, M. Turnea: Proceed., Paper F1.5, 16th Intern. Congres of Chem. and Proc. Eng. CHISA, Prague, Czech Republik, (2004).
- [8] A. Kielbus-Rapala, J. Karcz: Chem. Pap. 63, nr 2, 188 (2009).