

Anna KIELBUS-RAPAŁA

e-mail: kielbus@zut.edu.pl

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

Charakterystyki transportu masy w układzie ciecz – gaz w wielkolaboratoryjnym aparacie z mieszadłem

Wstęp

Poprawne i efektywne prowadzenie procesu wymiany masy w układzie ciecz-gaz w mieszalniku wymaga odpowiedniego doboru parametrów operacyjnych, geometrycznych zbiornika oraz mieszadła. Trudności związane z przeniesieniem skali aparatu sprawiają, że wyniki otrzymane w mieszalnikach o niewielkiej objętości, mogą być niewystarczające do poprawnego zaprojektowania aparatu dla danego procesu. W literaturze dostępnych jest wiele informacji dotyczących procesu wymiany masy w układach ciecz – gaz [Kamieński, 2004], niestety ograniczona liczba prac [Bujalski i in., 1990; Moilanen i in., 2008] prezentuje wyniki otrzymane w mieszalnikach większej skali.

Celem pracy jest analiza eksperymentalna procesu wymiany masy między gazem a cieczą w mieszalniku skali wielkolaboratoryjnej. Objmuje ona określenie wpływu wybranych parametrów operacyjnych oraz typu zastosowanego mieszadła szybkoobrotowego na wartość objętościowego współczynnika wnikania masy, a tym samym na przebieg procesu wymiany masy.

Część doświadczalna

Pomiary wykonano w mieszalniku o średnicy wewnętrznej $D = 0,634$ m, napełnionym cieczą do wysokości $H = D$. Objętość robocza aparatu wynosiła $V_L = 0,2$ m³. Przezroczysty zbiornik zaopatrzony był w cztery standardowe przegrody oraz mieszadło, zawieszona na wysokości $h = 0,33H$. Do mieszania układu ciecz-gaz wybrano trzy typy mieszadeł szybkoobrotowych o średnicy $d = 0,33D$: mieszadło turbinowe Rushtona (RT), turbinowe Smitha (CD 6) oraz A 315. Analiza hydrodynamiki układu [Karcz, 2002; Kielbus-Rapala, 2006] wykazała, że wszystkie trzy mieszadła pozwalają uzyskać dobre rozproszenie gazu w cieczy. Gaz doprowadzono do aparatu za pomocą pierścieniowego dystrybutora o średnicy $d_d = 0,7d$, umieszczonego pod mieszadłem w odległości $e = 0,5d$ od dna zbiornika.

Badano układy różniące się zdolnością do koalescencji pęcherzy gazu w cieczy. Fazą ciągłą były: woda destylowana oraz wodny roztwór chlorku sodu o stężeniu $0,4$ kmol/m³ – elektrolit. Fazę gazową stanowiło powietrze. Układ woda – powietrze to układ wykazujący zdolność do koalescencji, natomiast elektrolit – powietrze to układ o obniżonej zdolności do koalescencji. Do usuwania tlenu z cieczy zastosowano azot techniczny.

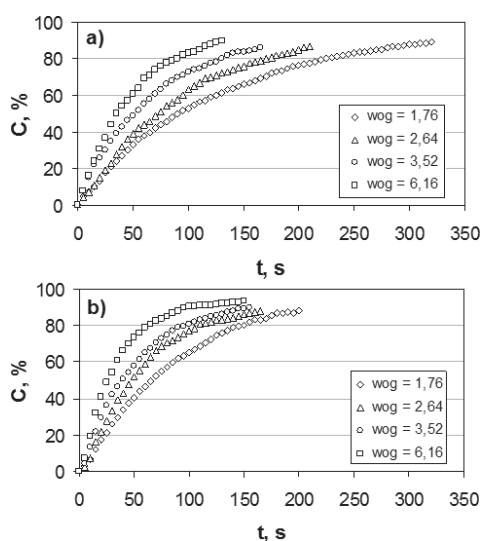
Pomiary wykonano przy dobrym rozproszeniu pęcherzyków gazu w objętości cieczy (pęcherzyki gazu są rozprowadzane w całej objętości cieczy i recyrkulują pod płaszczyznę mieszadła), w zakresie częstości obrotów mieszadła $n \in \langle 3,33; 6,67$ 1/s \rangle . Badania przeprowadzono przy sześciu różnych wartościach objętościowego natężenia przepływu gazu z zakresu $V_g \in \langle 0,56; 1,94 \cdot 10^{-3}$ m³/s \rangle (co odpowiada umownej liniowej prędkości gazu w zakresie $w_{og} = 4V_g/(\pi D^2) \in \langle 1,76; 6,16 \cdot 10^{-3}$ m/s \rangle).

Badania objętościowego współczynnika wnikania masy $k_L a$ prowadzono metodą dynamiczną, szczegółowo opisaną we wcześniejszej pracy [Kielbus-Rapala i Karcz, 2009]. Jest to metoda preferowana [Ozkani in., 2000; Moilanen i in., 2008], spośród wielu metod pozwalających wyznaczyć współczynnik $k_L a$, gdyż jest szybka, stosunkowo prosta i można ją stosować w różnych układach. Zmiany stężenia tlenu rozpuszczonego w cieczy mierzono przy użyciu tlenomierza wyposa-żonego w sondę, zanurzoną w badanej cieczy. Wartość współczynnika wnikania masy wyznaczano z nachełnienia zależności $\ln[(C^* - C_0)/(C^* - C)] = f(t)$, w której t oznacza czas, natomiast C^* , C_0 , C to stężenia tlenu rozpuszczonego w cieczy odpowiednio: równowagowe, stężenie w czasie $t = 0$ oraz w czasie t .

Obliczenia wykonano metodą najmniejszych kwadratów.

Wyniki badań

Podstawowymi parametrami operacyjnymi wpływającymi w mieszalniku na przebieg procesu transportu masy składnika między gazem a cieczą są: częstość obrotów mieszadła n (określająca intensywność mieszania) oraz umowna liniowa prędkość gazu w_{og} (charakteryzująca ilość fazy gazowej wprowadzanej do układu). Na rys. 1 przedstawiono wpływ liniowej prędkości gazu na szybkość rozpuszczania tlenu w badanej cieczy.

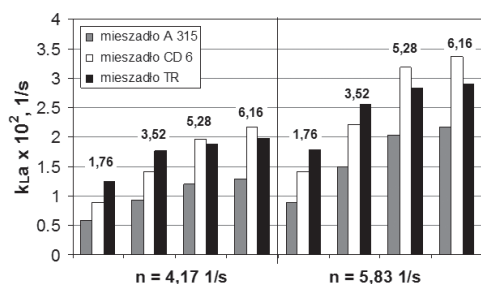


Rys. 1. Przebieg zmian stężenia tlenu rozpuszczonego w cieczy w zależności od czasu $C = f(t)$; mieszadło A 315; $n = 4,17$ 1/s; różne wartości $w_{og} \cdot 10^{-3}$ m/s; układ: a) woda destylowana-powietrze, b) wodny roztwór NaCl – powietrze

W całym zakresie przeprowadzonych pomiarów zakładając stałą wartość n , zwiększenie ilości gazu dostarczanego do zbiornika powodowało skrócenie czasu nasycania cieczy tlenem. Większy wpływ wartości w_{og} na szybkość rozpuszczenia tlenu w cieczy zaobserwowano w układzie wykazującym zdolność do koalescencji (Rys. 1a). W tym układzie, dla danego czasu t stwierdzono również większe różnice w wartościach stężenia tlenu rozpuszczonego w wodzie C między wartościami, uzyskanymi przy różnych wartościach w_{og} .

Do ilościowego opisu procesu wymiany masy stosowany jest zwykle objętościowy współczynnik wnikania masy $k_L a$, wyznaczany doświadczalnie w oparciu o wyniki pomiarów zmian stężenia tlenu rozpuszczonego w cieczy w czasie. Wartość tego współczynnika pozwala ocenić, czy przy danych parametrach procesowy transport masy przebiega efektywnie, natomiast zależności $k_L a$ w funkcji różnych parametrów pozwalają scharakteryzować wpływ tych parametrów na analizowany proces.

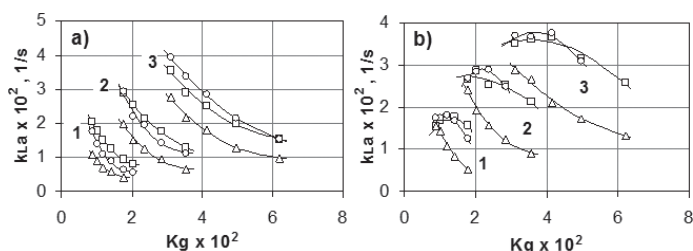
Wpływ parametrów operacyjnych n oraz w_{og} na wartość współczynnika $k_L a$ w mieszalniku wielkolaboratoryjnym w układzie modelowym, wykazującym zdolność do koalescencji pokazano na rys. 2. Wzrost wartości obu parametrów powodował zwiększenie wartości współczynnika $k_L a$ dla wszystkich stosowanych w pomiarach mieszadeł. Należy jednak zauważyć, że przy wysokich wartościach w_{og} , wartość $k_L a$ zmieniła się nieznacznie, a w przypadku mieszadła TR i dużych częstości obrotów mieszadła zwiększanie ilości gazu doprowadzanego do układu nie zmieniło wartości współczynnika $k_L a$. Dane zamieszczone na rys. 2 ilustrują również wpływ typu mieszadła na efektywność prowadzonego procesu. Zdecydowanie wyższe wartości współczynnika wnikania masy uzyskano stosując mieszadła turbinowe (TR oraz CD 6), w porównaniu z mieszadłem A 315.



Rys. 2. Zależność $k_{L,a} = f(n)$ dla różnych mieszadeł; różne wartości $w_{og} \cdot 10^{-3}$ m/s; układ: woda destylowana – powietrze

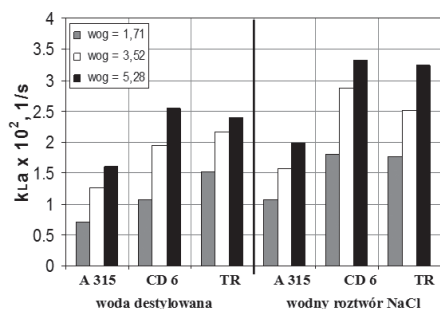
W układzie woda – powietrze, w zakresie niższych wartości w_{og} najwyższe wartości współczynnika $k_{L,a}$ charakteryzowały zbiornik z mieszadłem TR. Ze wzrostem w_{og} różnice w wartościach $k_{L,a}$ dla mieszadeł TR oraz CD 6 zmniejszały się. Przy wyższych wartościach umownej liniowej prędkości gazu, najwyższe wartości $k_{L,a}$ otrzymano w mieszalniku z mieszadłem CD 6.

Na rys. 3 porównano wartości $k_{L,a}$ w funkcji liczby przepływu gazu $Kg = V_g/(nd^3)$ otrzymane dla różnych mieszadeł. Przebieg tych zależności istotnie zależy od rodzaju fazy ciekłej oraz właściwości układu ciecz – gaz. W układzie wykazującym zdolność do koalescencji (Rys. 3a) wartość współczynnika $k_{L,a}$ maleje ze wzrostem wartości liczby Kg dla wszystkich stosowanych mieszadeł. W układzie o słabej zdolności do koalescencji (Rys. 3b) w przypadku mieszadeł turbinowych TR i CD 6 początkowo wartość współczynnika $k_{L,a}$ nieznacznie wzrasta ze wzrostem Kg , a następnie gwałtownie maleje.



Rys. 3. Porównanie zależności $k_{L,a} = f(Kg)$ dla różnych mieszadeł; (Δ) A 315, (□) TR, (○) CD 6; różne wartości $w_{og} \cdot 10^{-3}$ m/s: 1 – 1,76; 2 – 3,52; 3 – 6,16; układ: a) woda destylowana – powietrze, b) wodny roztwór NaCl – powietrze

Porównując wartości współczynnika wnikania masy uzyskane w układach o różnej zdolności do koalescencji (Rys. 4) stwierdzono, że wyższe wartości, uzyskano w układzie, w którym fazą ciągłą był wodny roztwór NaCl niezależnie od typu zastosowanego mieszadła. Największe różnice (nawet do 66%) charakteryzowały układ z mieszadłem CD 6.



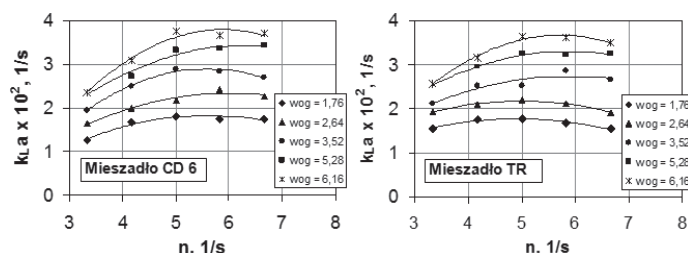
Rys. 4. Porównanie wartości $k_{L,a}$ otrzymanych dla różnych mieszadeł i wybranych wartości $w_{og} \cdot 10^{-3}$ m/s; $n = 5$ 1/s; układ: a) woda destylowana – powietrze, b) wodny roztwór NaCl – powietrze

W układzie o obniżonej zdolności do koalescencji wartości współczynnika $k_{L,a}$ otrzymane w układach z mieszadłami turbinowymi TR oraz CD 6, ze wzrostem częstości obrotów mieszadła nie zmieniają się liniowo, jak to ma miejsce w układzie woda – powietrze. Zależności przedstawiające przebieg tych zmian pokazano na rys. 5.

Wyniki pomiarów objętościowego współczynnika wnikania masy $k_{L,a}$ w układzie ciecz – gaz opisano równaniem:

$$k_{L,a} = AKg^B We^C \quad (1)$$

które pozwala pokazać związek współczynnika $k_{L,a}$ ze zmiennymi operacyjnymi n oraz V_G , nie wymagając przy tym znajomości mocy mieszania. Liczba Webera ma postać $We = (n^2 d^3 \rho) / \sigma$.



Rys. 5. Zależność $k_{L,a} = f(n)$ dla układu elektrolit – powietrze; różne $w_{og} \cdot 10^{-3}$ m/s

Wartości współczynnika A oraz wykładników w równ. (1) zamieszczono w tab. 1. Równ. (1) obowiązuje w następującym zakresie zmiennych:

$$Kg \in <0,89; 6,21 \cdot 10^{-2}>; \quad We = [(n^2 d^3 \rho) / \sigma] \in <1420; 5870>$$

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

Układ	Mieszadło	$A \cdot 10^3$	B	C	$\pm \Delta$
Woda destylowana – powietrze	TR	0,17	0,39	0,77	3
	CD 6	0,06	0,69	1,02	5,7
	A 315	0,02	0,72	1,12	3
Wodny roztwór elektrolitu – powietrze	TR	6,12	0,55	0,43	6
	CD 6	2,84	0,54	0,52	6
	A 315	0,08	0,53	0,91	5

Wnioski

W wielokolaboratoryjnym aparacie z mieszadłem, w układzie wykazującym zdolność do koalescencji, wartość współczynnika $k_{L,a}$ zwiększa się ze wzrostem częstości obrotów mieszadła oraz liniowej prędkości gazu i istnieje wzajemna zależność między wpływem tych parametrów na wartość $k_{L,a}$.

Przy niższych wartościach w_{og} , najkorzystniejsze do prowadzenia procesu wymiany masy okazało się mieszadło TR, natomiast przy wyższych – mieszadło CD 6. Mimo znacznie niższego zapotrzebowania energii, najmniej korzystne było mieszadło A 315. Zdecydowanie wyższe wartości współczynnika $k_{L,a}$ uzyskano w układzie o mniejszej zdolności do koalescencji. W przypadku mieszadeł turbinowych w układzie tym wartość współczynnika $k_{L,a}$ zwiększała się ze wzrostem n tylko do pewnej wartości, po osiągnięciu której dalszy wzrost n powodował spadek wartości $k_{L,a}$.

Przedstawione w pracy wyniki mogą mieć zastosowanie praktyczne ze względu na to, że zostały otrzymane w aparacie dużej skali. Zaproponowane równania, opracowane w oparciu o dane doświadczalne odnoszą się nie tylko do układu modelowego woda – powietrze, ale również do układu o obniżonej zdolności do koalescencji, a takie typy układów spotyka się w praktyce przemysłowej.

LITERATURA

Bujalski W., Nienow A.W., Huoxing L., 1990. The use of upward pumping 45° pitched blade turbine impellers in three-phase reactors. *Chem. Eng. Sci.*, **45**, 415-421. DOI: 10.1016/0009-2509(90)87027-P

Kamiński J., 2004. *Mieszanie układów wielofazowych*. WNT, Warszawa

Karcz J., 2002. Mieszanie układu ciecz-gaz w aparatach z mieszadłem szybkoobrotowym, *Inż. i Ap. Chem.*, **41**, nr 1, 3-14

Kielbus-Rapała A., 2006. *Badania procesów przenoszenia w mieszanym mechanicznie układzie trójfazowym ciecz-gaz-ciało stałe*. Praca doktorska, Politechnika Szczecińska, Szczecin

Kielbus-Rapała A., Karcz J., 2009. Influence of suspended solid particles on gas-liquid mass transfer coefficient in a system stirred by double impellers. *Chem. Pap.*, **63**, 188-196. DOI: 10.2478/s11696-009-0013-y

Moilanen P., Laakkonen M., Visuri O., Alopaev V., Aittamaa J., 2008. Modeling mass transfer in an aerated 0.2 m³ vessel agitated by Rushton, and Combi-jet impellers. *Chem. Eng. J.*, **142**, 95-108. DOI: 10.1016/j.cej. 2008.01.033

Ozkan, O., Calimli, A., Berber, R., Oguz, H., 2000. Effect on inert solid particles at low concentrations on gas-liquid mass transfer in mechanically agitated reactors. *Chem. Eng. Sci.*, **55**, 2737-2740. DOI: 10.1016/S0009-2509(99)00532-1