

Joanna LECHOWSKA, Marian KORDAS, Rafał RAKOCZY

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

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

Charakterystyka wpływu wirującego pola magnetycznego na współczynnik k_La w reaktorze airlift z zewnętrzną cyrkulacją cieczy

Wstęp

Reaktory *airlift*, należące do grupy kolumnowych reaktorów bartażowych, stanowią alternatywę do klasycznych reaktorów zbiornikowych wyposażonych w mieszadło mechaniczne [Chisti, 1989]. Początki zastosowania tego typu aparatów w inżynierii procesowej sięgają 1958 roku, kiedy to po raz pierwszy wprowadzono rurę z wewnętrznym napowietrzaniem do zbiornika, w którym prowadzono proces flotacji rudy złota [Grzywacz, 2012].

Reaktory *airlift* umożliwiają równomierne napowietrzenie objętości reakcyjnej oraz cechują się brakiem występowania obszarów o wysokich naprężeniach ścinających. Aparaty tego typu nie posiadają również części mechanicznych, co umożliwia ich łatwiejszą sterylizację oraz cechują się dużą wydajnością prowadzonych w nich procesów biologicznych, co osiągnąć jest przez niższą energochłonność tego typu reaktora [Kawalec-Pietrenko, 2003].

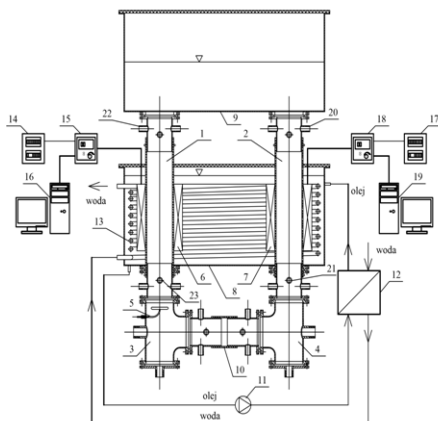
Obecnie wiodącym trendem w prowadzonych pracach badawczych jest poszukiwanie nowych sposobów zwiększania efektywności procesów. Niezwykle interesującym zagadnieniem jest zastosowanie zewnętrznych pól siłowych (m.in. elektrycznych i magnetycznych) do intensyfikacji procesów biologicznych i chemicznych [Rakoczy, 2011]. Przekłada się to na poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych aparatów wykorzystujących tego typu oddziaływania.

Głównym celem tej pracy jest omówienie wyników związanych z zastosowaniem nowego typu reaktora (magnetycznie wspomaganego reaktor *airlift* z zewnętrzną cyrkulacją cieczy). W ramach prac badawczych wykonano analizę wpływu wirującego pola magnetycznego (WPM) na udział gazu zatrzymanego w cieczy (*hold-up*) oraz objętościowy współczynnik wnikania masy k_La w reaktorze *airlift* z zewnętrzną cyrkulacją cieczy.

Badania doświadczalne

Aparatura badawcza

Wspomagany magnetycznie reaktor *airlift* (Rys. 1) z zewnętrzną cyrkulacją cieczy wyposażony został w dwa generatory WPM (stojany klatkowych silników indukcyjnych). Generatory umieszczono na zewnątrz przewodów stanowiących odpowiednio strefę wznoszącą oraz opadającą reaktora.



Rys. 1. Schemat aparatury badawczej; 1 – strefa wznoszenia, 2 – strefa opadania, 3, 4 – trójniki, 5 – dystrybutor gazu, 6, 7 – stojan WPM, 8 – komora, 9 – strefa separacji, 10 – łącznik dolny, 11 – pompa, 12 – wymiennik ciepła, 13 – węzownica, 14, 17 – skrzynka elektryczna, 15, 18 – przemiennik częstotliwości, 16, 19 – komputer, 20-23 – króćce pomiarowe

Dodatkowo instalacja badawcza posiadała elementy umożliwiające odbiór ciepła powstającego w wyniku pracy stojanów. Intensywność generowanego pola magnetycznego regulowano za pomocą przeмиenników częstotliwości podłączonych do komputerów wyposażonych w oprogramowanie.

Zakres badań

Badania prowadzono w układzie woda wodociągowa-powietrze. Natężenie przepływu strumienia gazu podawanego do reaktora wynosiło 2, 8 oraz 14 dm³min⁻¹. Wysokość poziomu cieczy w komorze strefy separacji wynosiła 5 cm. W ramach prezentowanych badań przeanalizowano wpływ częstotliwości WPM oraz miejsca ekspozycji wirującego pola magnetycznego na udział gazu zatrzymanego w cieczy (*hold-up*) oraz objętościowy współczynnik wnikania masy k_La . WPM było generowane w strefie wznoszącej lub strefie opadającej, natomiast częstotliwość stosowanego pola wynosiła 10 oraz 50 s⁻¹.

Metodyka pomiarowa

Stopień zatrzymania gazu w cieczy wyznaczono metodą odwróconego manometru typu U-rurka. W badaniach zastosowano dwa manometry umożliwiające wyznaczenie wartości *hold-up* odpowiednio w strefie wznoszącej i opadającej reaktora. Manometry – 22, 23 (Rys.1) zamontowano w króćcach pomiarowych w strefie wznoszącej oraz strefie opadającej – 20, 21. Odległość między króćcami w obu strefach wynosiła 0,63 m. Na podstawie różnicy poziomów cieczy w rurkach manometru oraz znając gęstość cieczy i gazu w temperaturze pomiaru (24°C ± 2) wyznaczono stopień zatrzymania gazu w cieczy (odrębnie dla strefy wznoszącej i opadającej) z następującego równania [Karcz i in., 2010]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta z} \frac{\rho_c}{\rho_c - \rho_g} \quad (1)$$

gdzie: Δh – różnica w poziomie cieczy w rurkach manometru [m]; Δz – odległość między króćcami, w których zamontowano manometry [m]; ρ_c – gęstość cieczy [kg·m⁻³]; ρ_g – gęstość gazu [kg·m⁻³].

Objętościowy współczynnik wnikania masy k_La wyznaczono stosując metodę dynamiczną [Garcia-Ochoa i Gomez, 2009]. Przed przystąpieniem do pomiaru stężenia tlenu w cieczy, tlen desorbowano poprzez wprowadzenie strumienia azotu do reaktora. Następnie wprowadzano strumień powietrza do reaktora poprzez zamontowaną w strefie wznoszącej bełkotkę – 5 i rejestrowano stężenie tlenu za pomocą czterech sond tlenowych (COG-1t, Elmetron) połączonych z miernikami wielofunkcyjnymi (CX-701 Elmetron) umieszczonych w króćcach pomiarowych – 20, 23 aż do osiągnięcia stanu nasycenia. Na podstawie zarejestrowanych krzywych zmian stężenia tlenu w cieczy w funkcji czasu, wyznaczono współczynnik k_La korzystając z następującego równania [Garcia-Ochoa i Gomez, 2009]:

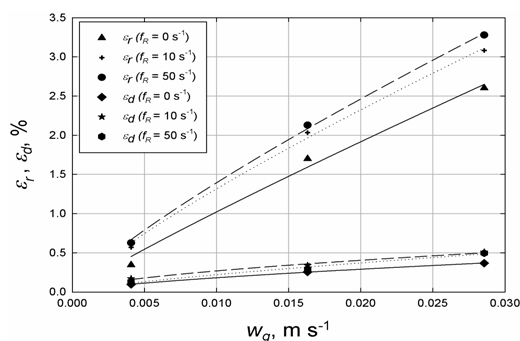
$$k_La = \frac{1}{t - t_0} \ln \left(\frac{c^* - c}{c^* - c_0} \right) \quad (2)$$

gdzie: t – czas, [s]; t_0 – czas początkowy, [s]; c^* – stężenie tlenu w wodzie w stanie nasycenia, [kg·m⁻³]; c – stężenie chwilowe, [kg·m⁻³]; c_0 – stężenie początkowe, [kg·m⁻³].

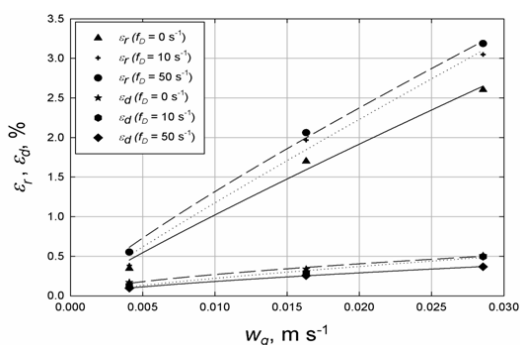
Wyniki i dyskusja

Wartości stopnia zatrzymania gazu w cieczy zostały wyznaczone odrębnie dla strefy wznoszącej oraz strefy opadającej testowanego

reaktora *airlift*. W ramach prowadzonych badań przeanalizowano wpływ zarówno częstotliwości WPM, jak również miejsca jego ekspozycji. Poniżej przedstawiono wyznaczone eksperymentalnie wartości *hold-up* w strefie wznoszącej (ε_r) i strefie opadającej (ε_d) podczas ekspozycji WPM w strefie wznoszącej (Rys. 2) oraz strefie opadającej (Rys. 3). Na wykresach przedstawiono zależność uzyskanych wartości *hold-up* od prędkości liniowej gazu w_g dla wybranych częstotliwości WPM (0, 10 i 50 s⁻¹).



Rys. 2. Wartości stopnia zatrzymania gazu w cieczy w strefie wznoszącej i opadającej w funkcji prędkości liniowej gazu w_g podczas ekspozycji WPM w strefie wznoszącej z częstotliwością 0-50 s⁻¹



Rys. 3. Wartości stopnia zatrzymania gazu w cieczy w strefie wznoszącej i opadającej w funkcji prędkości liniowej gazu w_g podczas ekspozycji WPM w strefie opadającej z częstotliwością 0-50 s⁻¹

Analiza danych przedstawionych na rys. 3 i 4 wskazuje na wyraźny wzrost stopnia zatrzymania gazu w cieczy wraz ze wzrostem natężenia przepływu dostarczanego strumienia powietrza (wyrażonego przez prędkość liniową strumienia gazu w strefie wznoszącej). Zaobserwowano również, że wraz ze wzrostem częstotliwości generowanego pola magnetycznego rosną wartości *hold-up*, zarówno w strefie wznoszącej, jak i opadającej.

Podobnie jak w przypadku *hold-up*, wartości objętościowego współczynnika wnikania masy $k_L a$ wyznaczono dla przypadku ekspozycji WPM w strefie wznoszącej i opadającej, przy zadanej częstotliwości wirowania pola magnetycznego wynoszącej odpowiednio 0 s⁻¹, 10 s⁻¹ oraz 50 s⁻¹. Uzyskane wyniki opisano funkcją potęgową w następującej postaci:

$$k_L a = p_1 w_g^{p_2} \quad (3)$$

gdzie: p_1, p_2 – parametry; w_g – liniowa prędkość strumienia gazu, [m·s⁻¹]. Natomiast efektywność oddziaływania WPM określono ilościowo za pomocą współczynnika E , który zdefiniowano jako

$$E = \frac{k_L a|_{WPM} - k_L a|_{WPM=0}}{k_L a|_{WPM=0}} \cdot 100\% \quad (4)$$

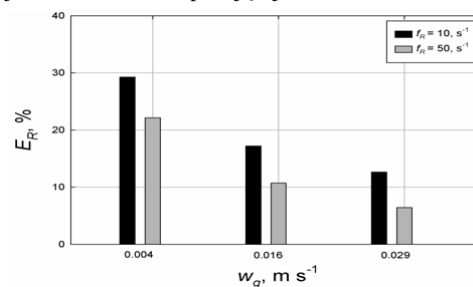
gdzie:

$k_L a|_{WPM}$ – współczynnik $k_L a$ pod wpływem WPM,

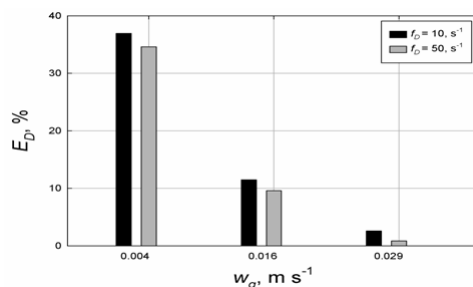
$k_L a|_{WPM=0}$ – współczynnik $k_L a$ bez wpływu WPM.

Uzyskane wartości współczynnika E w funkcji zmiennej prędkości liniowej strumienia gazu w_g , w przypadku ekspozycji WPM

w strefie wznoszącej przedstawiono na rys. 4. Natomiast na rys. 5 przedstawiono wartości współczynnika efektywności E w przypadku ekspozycji WPM w strefie opadającej.



Rys. 4. Wartości współczynnika efektywności w funkcji prędkości liniowej gazu podczas ekspozycji WPM w strefie wznoszącej



Rys. 5. Wartości współczynnika efektywności w funkcji prędkości liniowej gazu podczas ekspozycji WPM w strefie opadającej

Na podstawie rys. 4 i 5 stwierdzono, że zastosowanie WPM powoduje wzrost wartości współczynnika $k_L a$. Stwierdzono, że wzrost prędkości liniowej strumienia gazu w_g oraz częstotliwości WPM powoduje spadek intensywności oddziaływania pola magnetycznego. Porównując dane przedstawione na rys. 4 i 5 można stwierdzić, że ekspozycja WPM w strefie wznoszącej powoduje uzyskanie niższych wartości współczynnika E dla $w_g = 0,004 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ niż podczas ekspozycji WPM w strefie opadającej. Jednakże ze wzrostem w_g wpływ WPM w strefie opadającej gwałtownie spada, osiągając niższe wartości niż w przypadku ekspozycji WPM w strefie wznoszącej dla $w_g = 0,016$ oraz $0,029 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Wnioski

Wyniki badań uzyskane w pracy wskazują, że WPM istotnie wpływa na wartości *hold-up* i objętościowego współczynnika wnikania masy $k_L a$ w reaktorze *airlift* nowej konstrukcji.

Zastosowanie WPM pozytywnie wpływa na intensyfikację procesu wymiany masy w reaktorze *airlift*. Wpływ ten może wynikać z paramagnetycznego charakteru tlenu, co wykazano w pracy [Rakoczy i in., 2017].

LITERATURA

- Chisti M.Y., (1989). *Airlift Bioreactors*. Elsevier, London and New York
- Garcia-Ochoa F., Gomez E., (2009). Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview. *Biotechnol Adv.* 27, 153-76. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2008.10.006
- Grzywacz R., (2012). *Właściwości stacjonarne bioreaktorów barbotażowych typu air-lift*. Wyd. Pol. Krakowskiej, Kraków
- Karcz J., Bitenc M., Kacperski Ł., (2010). Badania hydrodynamiki w kolumnie air-lift z zewnętrzną cyrkulacją cieczy. *Inż. Ap. Chem.*, 49(1), 57-58
- Kawalec-Pietrenko, B., (2003). Nowe obszary zastosowań reaktorów typu airlift. *Przem. Chem.*, 1201-1202
- Rakoczy R., (2011). *Analiza teoretyczno-doświadczalna wpływu wirującego pola magnetycznego na wybrane operacje i procesy inżynierii chemicznej*. Wyd. Zachodniopom. Uniw. Technol., Szczecin
- Rakoczy R., Lechowska J., Kordas M., Konopacki M., Fijałkowski K., Drozd R., (2017). Effects of a rotating magnetic field on gas-liquid mass transfer coefficient. *Chem. Eng. J.* 327, 608-617. DOI: 10.1016/j.cej.2017.06.132