

Lubomira BRONIARZ-PRESS, Waldemar SZAFERSKI, Piotr Tomasz MITKOWSKI, Agata MARECKA

e-mail: waldemar.szaferski@put.poznan.pl

Zakład Inżynierii i Aparatury Chemicznej, Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska, Poznań

## Wykorzystanie układu dyfuzor membranowy-mieszadło HE-3X w procesach napowietrzania cieczy

### Wstęp

W układzie ciecz-gaz obie fazy wykazują tendencję do ciągłej segregacji z powodu ich różnej gęstości. W celu dobrej wymiany masy i ciepła powinna być zapewniona w takich układach możliwie największa powierzchnia kontaktu międzyfazowego [Kamieński, 2004].

W procesach wymiany masy w dwufazowych układach rozproszonych ciecz-gaz główny opór przenikania masy zlokalizowany jest po stronie cieczy. Szybkość transportu z fazy gazowej do cieczy zależy w dużym stopniu od warunków hydrodynamicznych panujących w aparacie. Szczególnie istotną rolę odgrywają tutaj wymiary pęcherzy gazowych, prędkość ruchu oraz czas ich przebywania w cieczy. Mechaniczne mieszanie takiego układu prowadzi do intensyfikacji przebiegających w nim procesów wymiany.

Dyfuzory membranowe talerzowe, wykonane z poliamidu z 30% dodatkiem włókna szklanego lub polipropylenu z 30% dodatkiem włókna szklanego w zależności od modelu są nowoczesnymi konstrukcjami dystrybutorów gazu.

Dyfuzory membranowe wykorzystane w badaniach eksperymentalnych mają szerokie zastosowanie w napowietrzaniu ścieków (w komorach uśredniających i osadu czynnego w oczyszczalniach małych, przydomowych oraz zbiorczych o różnej przepustowości), stabilizacji osadu, nityfikacji i denityfikacji, utrzymaniu mieszaniny w ruchu, eliminowaniu sedymentacji, eliminacji kożucha na powierzchni, uzdatnianiu wody powietrzem i czystym tlenem (posiadają atest HK/W/0249/01/99 Państwowego Zakładu Higieny na napowietrzanie wody pitnej), neutralizacji tlenku węgla, ozonowaniu, odżelazianiu, odmanganianiu, w produkcji biogazu i fermentacji [AKWATECH, 2014].

Celem przeprowadzonych badań było wyznaczenie ilości gazu zatrzymanego w mieszaninie dwufazowej dla zmodyfikowanego mieszadła HE-3X oraz systemu napowietrzania w postaci dyfuzora membranowego. Otrzymane wyniki porównano z mieszadłem *Chemineer HE-3* [Chemineer, 2013] i mieszadłem turbinowym *Rushtona*. Wprowadzenie nowego mieszadła ma na celu optymalizację procesów wytwarzania układów dwu- i wielofazowych przez zmniejszenie zapotrzebowania na energię przy maksymalnej wydajności systemu mieszająco-napowietrzającego.

### Badania doświadczalne

#### Stanowisko pomiarowe

Badania eksperymentalne przeprowadzono na stanowisku pomiarowym, którego schemat oraz szczegółowe parametry techniczne przedstawiono w pracy [Broniarz-Press i Szaferski, 2008]. Głównym jego elementem był płaskodenny mieszalnik o średnicy 0,300 m wykonany z polimetakrylanu metylu z czterema standardowymi przegrodami płaskimi, zaopatrzony w drobnopęcherzykowy, dyfuzor membranowy HD 270. Wielkość pęcherzyków gazu wynosi od 1,8 do 3 mm. Mogą one pracować w temperaturach od 5 do 80°C.

Mieszalnik zaopatrzone w zmodyfikowane mieszadło szybkoobrotowe własnej konstrukcji HE-3X, którego szczegóły konstrukcyjne oraz sposób modyfikacji przedstawiono w pracy [Szaferski i in., 2013]. Ze względu na testowy charakter badań wyniki porównywano z rezultatami otrzymanymi dla mieszadła szybkoobrotowego HE-3 oraz turbiny *Rushtona* (TR). Wytwarzanie układu dwufazowego gaz-ciecz przeprowadzono rozpraszając za pomocą dyfuzora membranowego powietrze atmosferyczne. Jako fazę ciekłą zastosowano wodę destylowaną oraz wodne roztwory poliakryloamidu (*Rokrysol WFI*) o zawartości substancji suchej 5÷7%) o masie molowej  $M = 4,4 \cdot 10^6$  kg/kmol.

#### Materiały

Ze względu na złożone właściwości reologiczne roztworów przeprowadzono odpowiednie badania wykorzystując reometr rotacyjny *Physica MCR-501* firmy *Anton Paar* [Kembłowski i in., 1985]. W takich urządzeniach ścinanie badanych płynów następuje w wyniku obrotów elementu rotacyjnego. Prowadzi się pomiary ścinania występującego między dwiema powierzchniami, z których jedna wykonuje ruch obrotowy, a druga jest nieruchoma.

Badane układy okazały się płynami potęgowymi, ponieważ ich techniczne krzywe płynięcia opisywało równanie o postaci ogólnej:

$$\tau_w = K \dot{\gamma}_w^m \quad (1)$$

gdzie:

$\tau_w$  – napężenie [Pa],

$\dot{\gamma}_w$  – szybkość ścinania [1/s],

$K$  – techniczny współczynnik konsystencji [Pa·s<sup>m</sup>].

Wyniki badań reologicznych przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Właściwości fizykochemiczne badanych roztworów

Stężenie wodnych roztworów <i>Rokrysolu WFI</i>	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Współczynniki równania (1)	
		$m$	$K$ [Pa·s <sup>m</sup> ]
1000 ppm	997	0,6494	0,0906
2000 ppm	998	0,5936	0,1637
3000 ppm	999	0,5491	0,3216

Wodne roztwory *Rokrysolu WFI* można zakwalifikować do cieczy rozrzedzanych ścinaniem, w związku z czym zastosowano liczbę *Reynoldsa* o postaci zaproponowanej w pracy [Gluz i Pavlushenko, 1967]:

$$Re_m = (4\pi)^{1-m} \frac{n^{2-m} d^2 \rho}{K} \quad (2)$$

gdzie:

$d$  – średnica mieszadła [m],

$n$  – częstość obrotowa mieszadła [1/s],

$Re_m$  – liczba *Reynoldsa* dla procesu mieszania [-],

$\rho$  – gęstość mieszaniny [kg/m<sup>3</sup>].

#### Zakres badań

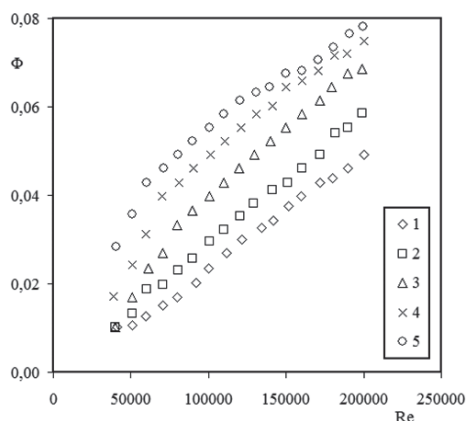
Przeanalizowano zależność współczynnika zatrzymania gazu od liczby *Reynoldsa* dla stałego natężenia przepływu gazu w zakresie od 0,278 do 0,833 dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> oraz zmiennej częstości obrotów mieszadła w zakresie od 2 do 20 s<sup>-1</sup>.

### Wyniki badań

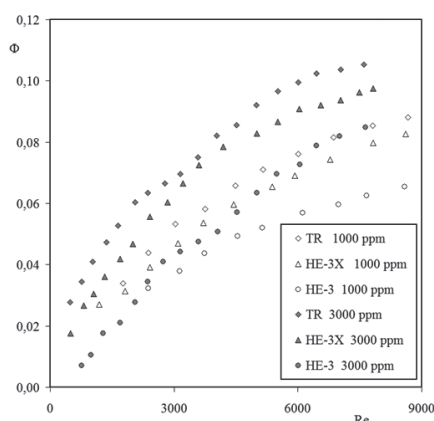
Przy stałym natężeniu przepływu gazu wraz ze wzrostem częstości obrotów mieszadła, a tym samym liczby *Reynoldsa*, wzrastał współczynnik zatrzymywania gazu ( $\Phi$ ) w mieszaninie dwufazowej dla mieszadła HE-3X (Rys. 1). Zaobserwowano również, że wraz ze wzrostem objętościowego natężenia przepływu gazu wzrastał współczynnik zatrzymywania gazu w mieszaninie (Rys. 1).

Charakter krzywych potwierdził wyniki otrzymane we wcześniejszych badaniach dla mieszadła turbinowego *Rushtona*. W celu uzasadnienia sensowności zastosowanych modyfikacji, przeprowadzono również badania porównawcze dla mieszadeł, na podstawie których powstało mieszadło HE-3X.

Uzyskane przykładowe wyniki zależności współczynnika *gas hold-up* od liczby *Reynoldsa* przedstawiano na rys. 2. Stwierdzono, że ilość



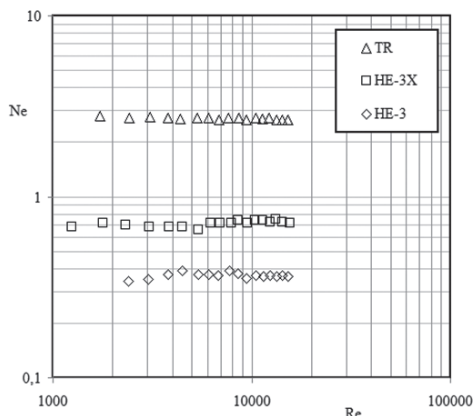
Rys. 1. Przykładowa zależność współczynnika zatrzymania gazu  $\Phi$  od liczby Reynoldsa dla wody destylowanej i mieszadła HE-3X oraz objętościowego natężenia przepływu gazu: 1 – 0,278 [dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>], 2 – 0,417 [dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>], 3 – 0,556 [dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>], 4 – 0,694 [dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>], 5 – 0,833 [dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>]



Rys. 2. Przykładowa zależność współczynnika zatrzymania gazu od liczby Reynoldsa dla trzech badanych mieszadeł w wodnym roztworze poliakrylamidu przy natężeniu przepływu powietrza 0,833 dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>

gazu zatrzymywanego w mieszaninie wzrasta wraz ze wzrostem objętościowego natężenia przepływu gazu, a maleje wraz ze wzrostem stężenia roztworu w badanym zakresie stężeń. Największe wartości uzyskuje się dla mieszadła turbinowego *Rushtona*, a najniższe dla mieszadła HE-3. Zmodyfikowane mieszadło HE-3X rozprasza gaz ustępując nieznacznie turbinie *Rushtona*.

Przeprowadzono również analizę zależności liczby Newtona od liczby Reynoldsa w celu wyznaczenia charakterystyki mieszadła HE-3X w badanych układach dwufazowych (Rys. 3). Moc mieszania obliczano na podstawie pomiaru momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej, który wyznaczono za pośrednictwem momentomierza tensometrycznego, miernika prędkości obrotowej oraz programu z automatyczną obróbką wyników pomiaru.



Rys. 3. Przykładowe charakterystyki mocy mieszania dla trzech badanych mieszadeł w wodnym roztworze poliakrylamidu o stężeniu 1000 ppm i przy natężeniu przepływu powietrza 0,278 dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>

Wyniki pomiarów dla mieszaniny gaz-ciecz potwierdziły obniżenie energii zużywanej przez zmodyfikowane mieszadło HE-3X w stosunku do pozostałych badanych mieszadeł. W przypadku prowadzenia procesu w wodnych roztworach *Rokrysol WF1* w zakresie stężeń od 1000 do 3000 ppm uzyskano liczbę mocy o średniej wartości odpowiednio w zakresie 0,63±0,74 (HE-3X), 0,29±0,51 (HE-3) oraz 2,05±2,8 (turbina *Rushtona*) w badanym zakresie wartości liczby Reynoldsa od 1 000 do 16 000 oraz dla stałego natężenia przepływu gazu w zakresie od 0,278 do 0,833 [dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>] i zmiennej częstotliwości obrotów mieszadła w zakresie od 2 do 20 s<sup>-1</sup>.

Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem ilości gazu podawanego do układu liczba mocy maleje, a wpływ stężenia roztworu jest niewielki. Przyczyny tej sytuacji upatruje się w rozwiązaniu konstrukcyjnym dystrybutora gazu. Powierzchnia czynna dyfuzora jest zbliżona do średnicy wewnętrznej mieszalnika. Pęcherzyki powietrza zmieniają parametry fizyczne roztworu i jednocześnie poruszają się prawie całej objętości aparatu. Mieszadło częściowo wykorzystuje swoje właściwości zasysające, doprowadzając gaz z zewnątrz, a także rozprzodza pęcherzyki powietrza w strefy, gdzie dyfuzor nie jest w stanie doprowadzić gazu.

Podobnie jak we wcześniejszych badaniach [Szaferksi i in., 2013], zaobserwowano, że podczas wytwarzania układów gaz-ciecz zmodyfikowane mieszadło HE-3X pracowało stabilniej i nie występowały dodatkowe drgania, jak to miało miejsce w przypadku pozostałych mieszadeł.

## Wnioski

W przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych dla wody oraz nienewtonowskich roztworów polimeru wykorzystano dyfuzor membranowy drobno-pęcherzykowy współpracujący z mieszadłem szybko-obrotowym własnej konstrukcji HE-3X. Stwierdzono, że modyfikacja mieszadła wpływa na zwiększenie ilości gazu zatrzymywanego w mieszaninie w stosunku do mieszadła HE-3, ustępując nieznacznie mieszadłu turbinowemu *Rushtona*.

Wykazano, iż zmodyfikowana konstrukcja mieszadła wpływa na obniżenie mocy mieszania zachowując skuteczność napowietrzania układu podobną do osiąganą w przypadku innych mieszadeł. Nieznacznie mniejsza wartość współczynnika zatrzymywania gazu przy zdecydowanie mniejszej wartości energii potrzebnej do wytworzenia układu dwufazowego, sprawia że poczynione modyfikacje mogą w przyszłości być zastosowane w przemyśle. Większa wydajność aparatu przy mniejszych nakładach energetycznych ma duże znaczenie w oczyszczalniach ścieków, ale także w innych procesach wykorzystujących mieszanie z jednoczesnym nasycaniem mieszanin gazem.

Zaobserwowano, że zmodyfikowane mieszadło HE-3X doprowadza gaz w obszary tzw. stref martwych w szerszym zakresie niż inne badane mieszadła.

## LITERATURA

- AKWATECH, 2013. Systemy drobno-pęcherzykowego napowietrzania wody i ścieków (09.2013): <http://www.akwatech.pl>
- Broniarz-Press L., Szaferksi W., 2008. Aeration using membrane diffusers in a tank equipped with two impellers on a common shaft. *Chem. Proc. Eng.*, **29**, nr 1, 61-73
- Chemineer, 2013. *HE-3 High-Efficiency Impeller*, Bulletin 713 (10.2013): [http://www.chemineer.com/literature/item/download/400\\_61aedd1d68dcf9bf48e0d8c2fe5bb14.html](http://www.chemineer.com/literature/item/download/400_61aedd1d68dcf9bf48e0d8c2fe5bb14.html)
- Gluz M.D., Pavlushenko I.S., 1967. Experimental study of heat transfer while stirring non-Newtonian fluids (in Russian). *J. App. Chem.*, **40**, 2475-2483
- Kamieński J., 2004. Mieszanie układów wielofazowych. WNT, Warszawa
- Kembłowski Z., Michałowski S., Strumiłło C., Zarzycki R., 1985. Podstawy teoretyczne inżynierii chemicznej i procesowej. WNT, Warszawa
- Szaferksi W., Mitkowski P.T., Kondras A., 2013. Wytwarzanie zawiesin zmodyfikowanym mieszadłem HE-3X. *Inż. Ap. Chem.*, **52**, nr 6, 566-567

**Praca została wykonana w ramach działalności statutowej Politechniki Poznańskiej 03/32/DS-PB/0442**