

LUBOMIRA BRONIARZ-PRESS
WALDEMAR SZAFERSKI

Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska, Poznań

Moc mieszania układu ciało stałe-ciecz-gaz w mieszalniku z dwoma mieszadłami na wspólnym wale

Wprowadzenie

Jednoczesne rozpraszanie cząstek ciała stałego i gazu w układzie ciało stałe-ciecz-gaz prowadzi się najczęściej w przypadku reakcji między gazem a cieczą z udziałem ciała stałego jako katalizatora, rzadziej między gazem a ciałem stałym po jego rozproszeniu w cieczy. W układach takich korzystniej rozkładają się temperatury faz, co pozwala na efektywniejsze wykorzystanie katalizatora. Wytwarzanie układu ciało stałe-ciecz-gaz znajduje szerokie zastosowanie przede wszystkim w realizacji procesów przebiegających okresowo, w niedużych objętościach i takich, którym towarzyszą reakcje egzotermiczne. Typowymi przykładami są reakcje utleniania i uwodornienia związków organicznych (nienasycone tłuszcze, oleje jadalne, kwasy tłuszczowe) lub tlenków azotu do hydroksyloaminy, procesy fermentacyjne, absorpcja połączona z reakcją chemiczną, niskociśnieniowa polimeryzacja etylenu, procesy biochemiczne z udziałem powietrza lub tlenu oraz natlenianie ścieków [1–7].

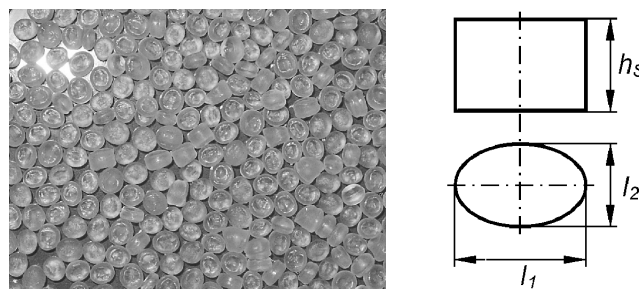
Stanowisko pomiarowe i analiza wyników badań

W pracy badania doświadczalne przeprowadzono w temperaturze 20°C w przezroczystym płaskodennym zbiorniku o średnicy 0,300 m wykonanym z polimetakrylanu metylu. Aparat zaopatrzony był w cztery płaskie przegrody o szerokości 0,026 m, oddalone od ścianek zbiornika o 0,004 m. Zastosowano cztery zestawy dwóch mieszadeł na wspólnym wale: standardowe mieszadła turbinowe *Rushtona*, mieszadła turbinowe z łopatkami pochylonymi pod kątami 45° i 135° oraz mieszadła turbinowe-tarczowe *Smitha*. Wykorzystano mieszadła o średnicy 0,1 m oddalone względem siebie o 0,1 m. Układ napowietrzający zbudowany był z wentylatora, płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła, który regulował temperaturę podawanego powietrza, zbiornika wyrównującego ciśnienie podawanego powietrza, rotametu regulującego natężenie przepływu gazu oraz barbotera w postaci dyfuzora membranowego 240 PD o średnicy 240 mm i wysokości 20 mm o wydajności od 0 do 4 [Nm³/h]. Dyfuzor 240 PD wytwarzał drobne pęcherzyki o średnicy około 2 mm. Fazą rozpraszającą, stanowiącą ośrodek ciągły, we wszystkich seriach pomiarowych były wodne roztwory wysokocząsteczkowego poliakryloamidu (*Rokrysol WF1*), o średniej masie molowej 4,4 · 10⁶ [kg/kmol] i stężeniach od 500 do 1500 ppm, które spełniały prawo potęgowe *Ostwalda* i *de Waele'a*:

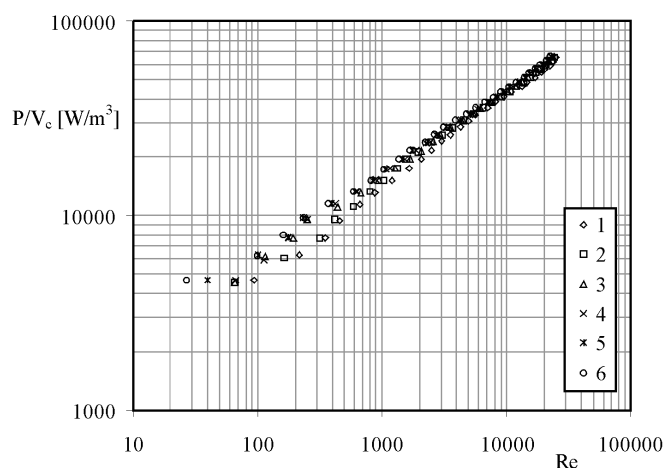
$$\tau_w = K' \dot{\gamma}_w^m \quad (1)$$

Badania przeprowadzono w zakresie zmienności charakterystycznych parametrów reologicznych płynów potęgowych: $m \in (0,686; 0,730)$ i $K' \in (0,00519; 0,0548)$ [Pa · s^m].

Jako fazę rozpraszaną w poszczególnych seriach pomiarowych stosowano granulaty polipropylenu (Rys. 1) o gęstości 888,5 [kg/m³] i parametrach geometrycznych: $h_s = 3,2$ mm, $l_1 = 4,63$ mm i $l_2 = 4,07$ mm oraz średnicy zastępczej $d_e = 0,00409$ m. Masa naważki we wszystkich seriach wynosiła 50 g.



Rys. 1. Charakterystyczne wymiary cząstek polipropylenu zastosowanych w badaniach

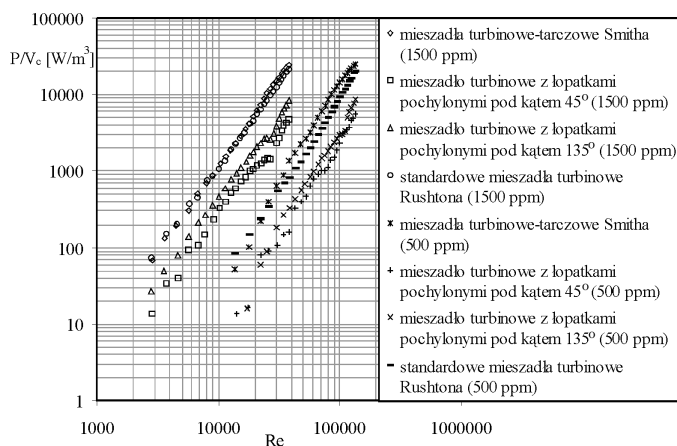


Rys. 2. Przykładowy obraz wpływu liczby *Reynoldsa* i objętościowego natężenia przepływu gazu dla dwóch mieszadeł turbinowych *Smitha* i wodnego roztworu poliakryloamidu o stężeniu 1000 ppm:

1 - $\dot{V}_g = 0,139$ [dm³s⁻¹], 2 - $\dot{V}_g = 0,278$ [dm³s⁻¹], 3 - $\dot{V}_g = 0,417$ [dm³s⁻¹],
4 - $\dot{V}_g = 0,556$ [dm³s⁻¹], 5 - $\dot{V}_g = 0,694$ [dm³s⁻¹], 6 - $\dot{V}_g = 0,833$ [dm³s⁻¹]

Średnicę zastępczą cząstek wyznaczono w oparciu o rekomendowaną w pracy [8] klasyczną zależność:

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{6m_s}{\pi\rho_s}} \quad (2)$$



Rys. 3. Przykładowy obraz wpływu stężenia polimeru oraz wpływu rodzaju zastosowanego zestawu mieszadeł na jednostkowe zużycie energii

Analiza danych pomiarowych uzyskanych podczas wytwarzania układów trójfazowych ciało stałe – ciecz – gaz wykazała (Rys. 2), że wartość jednostkowego zużycia energii P/V_c zależy od objętościowego natężenia przepływu powietrza oraz od liczby *Reynoldsa* w ujęciu *Gluz* i *Pauluszenko* [7] dla płynów potęgowych:

$$Re = (4\pi)^{1-m} \frac{n^{2-m} d^2 \rho}{K} \quad (3)$$

Stwierdzono również istotny wpływ stężenia poliakrylamidu (*Rokrysol WF1*) w roztworze wodnym oraz rodzaju zastosowanych mieszadeł na wspólnym wale, na jednostkowe zapotrzebowanie energii.

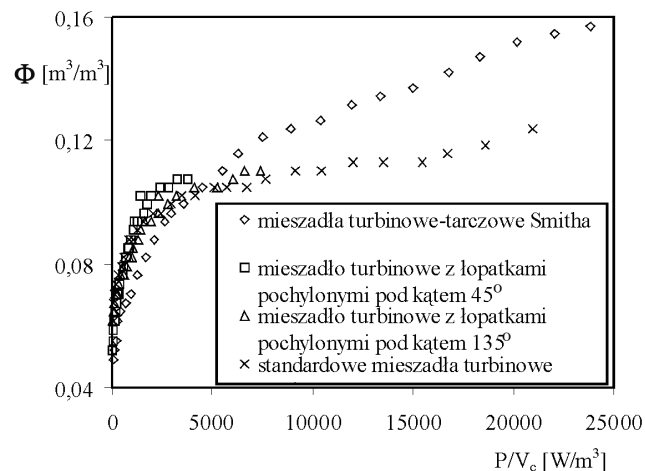
W praktyce przemysłowej dla projektowania aparatów zaopatrzonych w dystrybutory gazu istotne jest, by zapewniały one jak największą powierzchnię kontaktu międzyfazowego i jak największą wartość współczynnika zatrzymywania gazu w cieczy przy jednocześnie jak najniższym zużyciu energii. Na rys. 4 przedstawiono przykładowe zależności współczynnika gas hold-up Φ od jednostkowej mocy mieszania:

$$\Phi = f\left(\frac{P}{V_c}\right) \quad (4)$$

Dla wszystkich badanych zestawów mieszadeł wraz ze wzrostem częstości obrotów mieszadła oraz jednostkowego zużycia energii wzrasta ilość gazu zatrzymywanego w układzie trójfazowym dla poszczególnych natężeń przepływu powietrza. W wyniku przeprowadzonej aproksymacji danych pomiarowych metodą najmniejszych kwadratów wykazano, że można je opisać równaniem korelacyjnym o postaci:

$$\Phi = A \dot{V}_g C_p \left(\frac{P}{V_c}\right)^{B \dot{V}_g} \quad (5)$$

którego współczynniki A i B zależą od rodzaju zastosowanego zestawu mieszadeł. Dodatkowo współczynnik A zależy od stę-



Rys. 4. Przykładowy obraz wpływu rodzaju zastosowanego zestawu mieszadeł na ilość gazu zatrzymywanego w roztworze dla wodnego roztworu poliakrylamidu o stężeniu 1000 ppm i objętościowego natężenia przepływu gazu 0,417 [dm³/s]

żenia wodnego roztworu polimeru w zakresie jego zmienności $C_p \in (500; 1500)$ ppm oraz od objętościowego natężenia przepływu gazu w zakresie od 0,139 do 0,833 [dm³/s].

Wnioski

W pracy wykazano, że jednostkowa moc mieszania gazu w roztworach polimerów z dodatkiem ciała stałego wzrasta ze wzrostem częstości obrotów mieszadła oraz stężenia polimeru, co wiąże się bezpośrednio ze wzrostem nienewtonowskiego charakteru roztworu. Najwyższe zużycie energii wykazywały zestawy dwóch mieszadeł turbinowych tarczowych *Smitha* oraz standardowych mieszadeł turbinowych *Rushtona*. Analizując proces pod kątem efektywności zastosowanych układów, mieszadła turbinowe z łopatkami pochylonymi pod kątami 45° i 135° wykazywały niższe wartości stopnia zatrzymywania gazu w cieczy dla znacząco mniejszych wartości jednostkowego zapotrzebowania energii. Stopień zatrzymywania gazu dla wszystkich układów wzrasta ze wzrostem objętościowego natężenia przepływu gazu i szybkości obrotowej mieszadła i maleje ze wzrostem stężenia polimeru. Zapotrzebowanie energii, dla badanych układów z wykorzystaniem granulatu, jest istotne podczas projektowania reaktorów, w których podczas reakcji katalizator może być osadzony na powierzchni granulatu.

LITERATURA

1. V. Kamiński J.: Mieszanie układów wielofazowych, Warszawa, WNT, 2004.
2. A. W. Nienow: Appl. Mech. Rev. **51**, 3-22 (1998).
3. J. Karcz, A. Kielbus: Inż. Ap. Chem. **42**, 5s, 84 (2003).
4. R. Pohorecki.: Inż. Ap. Chem. **41**, nr 3s, 118 (2002).
5. R. Pawelczyk: Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, nr 992, Chemia z. 120, 1 (1989).
6. F. Stręk: Mieszanie i mieszalniki, Warszawa, WNT, 1981.
7. M.D. Gluz, I.S. Pauluszenko: Żurn. Prikl. Chimii **40**, 2475 (1967).