

Grzegorz STORY, Maciej KONOPACKI, Marian KORDAS, Rafał RAKOCZY

e-mail: rrakoczy@zut.edu.pl

Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

## Porównanie kinetyki rozpuszczania ciała stałego w różnego typu urządzeniach mieszających

### Wstęp

Rozpuszczanie ciała stałego w cieczy w klasycznych mieszalnikach stanowi jedną z najprostszych metod realizacji procesu wymiany masy od ciała stałego do cieczy. W takim przypadku kinetyka rozpuszczania ciała stałego jest zależna od hydrodynamiki panującej w mieszalniku. Znaczny wpływ na hydrodynamikę wywiera konfiguracja geometryczna urządzenia mieszającego. Rozpuszczanie, czyli heterogeniczna reakcja przebiegająca z towarzyszącym przejściem fazy stałej do roztworu, występuje powszechnie w przemyśle chemicznym, spożywczym oraz metalurgii.

W praktyce przemysłowej istnieje wiele rozwiązań konstrukcyjnych aparatów przeznaczonych do rozpuszczania ciała stałego, w których zastosowano różne sposoby intensyfikacji tego procesu. Powszechnie wykorzystuje się pulsację cieczy, wyładowania elektryczne i inne fizyczne sposoby oddziaływania [Tai i in. 2008]. Stosowane są również aparaty z mieszadłami elektromagnetycznymi, w których, oprócz przekształcenia energii elektrycznej w energię kinetyczną pulsacji cieczy, ciecz jest ogrzewana przez występujące prądy wirowe, co znacznie przyspiesza proces rozpuszczania [Aksielrud i Molczanow, 1981].

Proces rozpuszczania realizowany jest najczęściej w mieszalnikach wyposażonych w mieszadło mechaniczne. Oprócz tradycyjnych mieszadeł wykonujących ruch obrotowy powszechnie stosuje się mieszadła wykonujące ruch posuwisto-zwrotny [Masiuk, 2001; Masiuk i Rakoczy, 2007] lub jednoczesny ruch posuwisto-zwrotny i obrotowy [Kordas i in. 2012].

Proces wymiany masy w mieszalnikach różnego typu jest zagadnieniem aktualnym oraz powszechnie spotykanym, dlatego też w ostatnich latach można zaobserwować trend w pracach badawczych polegający na poszukiwaniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych lub innych metod poprawiających efektywność procesu.

Przykładem alternatywnego sposobu wpływania na kinetykę procesu rozpuszczania ciała stałego jest zastosowanie wirującego pola magnetycznego [Rakoczy i Masiuk, 2010; Rakoczy, 2012]. Zastosowanie wirującego pola magnetycznego należy do względnie nowego sposobu intensyfikacji procesu rozpuszczania ciała stałego. Sposób ten jest jeszcze niedostatecznie poznany, dlatego zdecydowano się przeanalizować wpływ tego typu oddziaływania na proces ukierunkowując rozważania na przydatność praktyczną.

### Część doświadczalna

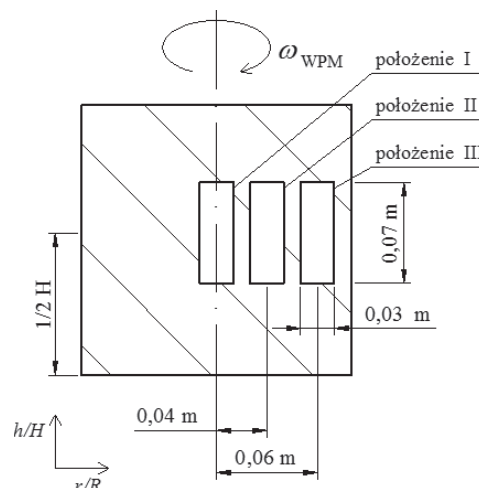
Zrealizowano badania eksperymentalne polegające na rozpuszczaniu cylindrycznych próbek ciała stałego. Próbki te wykonano z soli kamiennej o zawartości NaCl > 98%. Pozostałość stanowiły śladowe ilości KCl, CaCl<sub>2</sub> i MgCl<sub>2</sub> oraz nierozpuszczalne zanieczyszczenia mineralne.

Podstawowym wymogiem dotyczącym prowadzenia procesu rozpuszczania ciała stałego jest wytworzenie możliwie jednorodnych warunków transportu masy na całej powierzchni międzyfazowej, jaką jest powierzchnia ciała stałego, stanowiąca pobocznice walca. Wytoczone walce, wykonane z bloku NaCl o średnicy 0,03 m i wysokości 0,07 m, nie nadawały się bezpośrednio do prowadzenia badań, ponieważ ich struktura była niejednorodna. Rozpuszczanie takiej próbki zachodziłoby nierównomiernie, co powodowałoby pojawienie się dużych wżerów na powierzchni rozpuszczanych próbek oraz uniemożliwiłoby wykonanie pomiaru z należytą dokładnością. Konieczne było więc poddawanie próbek procesowi hartowania, polegającym na zanurzeniu ich na około 15 minut w nasyconym wodnym roztworze NaCl oraz suszeniu ich w temperaturze pokojowej. Proces ten powtarzano czterokrotnie,

a następnie, w celu usunięcia chropowatości powierzchni, próbki ponownie poddawano obróbce skrawaniem. Przygotowanie próbki do analizy kończyło dodatkowe wygładzenie bocznej powierzchni drobnopiętnym papierem ściernym oraz pokrycie powierzchni górnej i dolnej próbki żywicą epoksydową w celu uniemożliwienia ubytków ciała stałego z tych powierzchni.

Czas trwania rozpuszczania próbki ciała stałego został tak dobrany, aby można było dokonać z dostateczną dokładnością pomiar ubytku masy za pomocą wagi. Zmniejszenie wymiarów liniowych próbki poddanej rozpuszczaniu było względnie małe (~0,5 mm). W celu uzyskania dokładnych pomiarów zdecydowano się próbkę poddawać jednokrotnemu rozpuszczeniu przez 30 sekund.

Dokładny opis aparatury badawczej przedstawiono w pracy [Rakoczy i Masiuk, 2010]. Na rys. 1 przedstawiono schemat umiejscowienia próbki ciała stałego w objętości roboczej poddawanej oddziaływaniom wirującego pola magnetycznego.



Rys. 1. Graficzne przedstawienie lokalizacji próbki ciała stałego w objętości roboczej poddawanej oddziaływaniom wirującego pola magnetycznego

Po ułożeniu próbki włączano wirujące pole magnetyczne o określonej częstotliwości oraz uruchamiano pomiar czasu. W trakcie trwania pomiaru rejestrowano zmiany przewodności elektrycznej za pomocą sond konduktometrycznych. Po zakończeniu pomiaru wyłączano pole magnetyczne, ważono próbkę i określano masę rozpuszczonego ciała stałego. Krótki czas oddziaływania wirującego pola magnetycznego nie powodował znacznego podgrzania roztworu. Jego temperatura podczas pomiarów wahała się w zakresie 20÷25°C, co uwzględniono w obliczeniu parametrów fizykochemicznych cieczy i równowagowego ułamka masowego składnika *i*.

Stężenie ciała rozpuszczonego w cieczy, *c<sub>i</sub>*, wyznaczano w oparciu o pomiar przewodności elektrycznej roztworu uzyskanej w formie krzywej zmian przewodności elektrycznej dla czterech punktów pomiarowych znajdujących się w pobliżu powierzchni swobodnej cieczy i dna pojemnika. Uzyskane wartości konduktancji przeliczano na stężenie NaCl w roztworze za pomocą krzywej kalibracyjnej podanej w pracy [Rakoczy i Masiuk, 2010]. Równowagowy ułamek masowy składnika *i* (*c<sub>i</sub>*) zależy od właściwości substancji rozpuszczanej, rozpuszczalnika i temperatury procesu [Aksielrud i Molczanow, 1981]. W przypadku procesu rozpuszczania w obecności wirującego pola magnetycznego siłą napędową procesu stanowi różnica między stężeniem równowagowym i stężeniem ciała rozpuszczonego w cieczy.

Współczynnik wnikania masy dla procesu rozpuszczania ciała stałego wyznaczono z zależności

$$[\beta_i]_{sr} = \frac{1}{[F_m]_{sr} [\bar{c}_i]_{sr}} \frac{-\Delta m_i}{\Delta \tau} \quad (1)$$

gdzie:

- $c_i$  – chwilowa wartość siły napędowej procesu, [kg<sub>i</sub>·kg<sup>-1</sup>];
- $F_m$  – średnia powierzchnia wymiany masy, [m<sup>2</sup>];
- $m_i$  – masa rozpuszczonego ciała stałego (składnika i), [kg<sub>i</sub>];
- $\tau$  – czas, [s].

### Analiza i dyskusja wyników

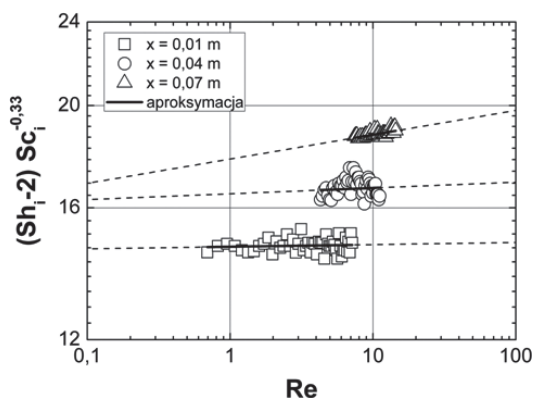
Uzyskane wyniki opracowano w formie klasycznej zależności służącej do analizy procesów wymiany masy wiążąc liczbę *Sherwooda*, *Reynoldsa* i *Schmidta* [Rakoczy i Masiuk, 2011]

$$Sh_i = f(Re, Sc_i) \quad (2)$$

Wykorzystano następujące równanie:

$$Sh_i = 2 + aRe^b (Sc_i)^c \quad (3)$$

Graniczna wartość liczby *Sherwooda*  $Sh = 2$  wynika z rozwiązania problemu ustalonej jednokierunkowej dyfuzji z powierzchni bocznej walca przez nieruchomą warstwę płynu. Wpływ wirującego pola magnetycznego na proces rozpuszczania ciała stałego dla różnych lokalizacji próbek ciała stałego ( $x$ ) przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Graficzne przedstawienie wpływu wirującego pola magnetycznego oraz położenia próbki na proces rozpuszczania ciała stałego

Uzyskane wyniki zdecydowano się przedstawić w formie zależności między  $(Sh_i - 2)Sc_i^{-0,33}$  i  $Re^b$ . Nie badano wpływu liczby *Schmidta* na proces wymiany masy i dlatego przyjęto wykładnik  $c$  równy 0,33, powszechnie spotykany w rozważaniach teoretycznych i praktycznych.

Linie ciągłe aproksymujące otrzymane wyniki opisane są następującymi zależnościami:

$$\text{dla } x = 0,01 \text{ [m]} \Rightarrow (Sh_i - 2)Sc_i^{-0,33} = 14,7 Re^{0,002} \quad (4a)$$

$$\text{dla } x = 0,04 \text{ [m]} \Rightarrow (Sh_i - 2)Sc_i^{-0,33} = 16,5 Re^{0,002} \quad (4b)$$

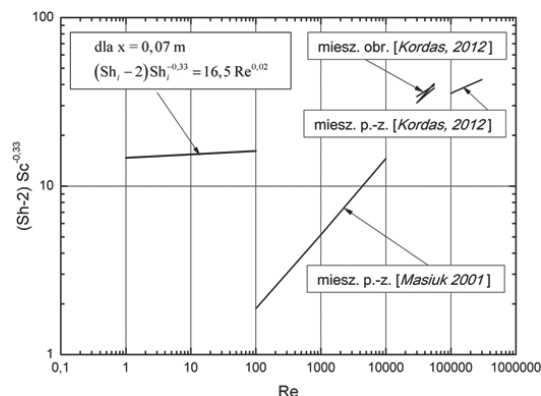
$$\text{dla } x = 0,07 \text{ [m]} \Rightarrow (Sh_i - 2)Sc_i^{-0,33} = 16,5 Re^{0,02} \quad (4c)$$

Uzyskane wyniki wskazują na wzrost liczby *Sherwooda* wraz z liczbą *Reynoldsa*. W oparciu o proponowany opis analityczny można stwierdzić, że wartości współczynnika wnikania masy w przypadku ulokowania próbki ciała stałego najbliżej ścianki są o około 27% większe odpowiednio dla lokalizacji w osi zlewki.

Na rys. 3 przedstawiono graficzne porównanie zależności opisującej wpływ wirującego pola magnetycznego na proces rozpuszczania ciała stałego (równ. 4c) z danymi dostępnymi w literaturze przedmiotu.

W oparciu o zaprezentowane dane można stwierdzić, że współczynnik wnikania masy dla procesu aktywowanego jedynie wirującym polem magnetycznym jest niższy niż w przypadku specyficznego mieszadła wykonującego ruch obrotowy i posuwisto-zwrotny [Kordas, 2012]. Zastosowanie pola magnetycznego do procesu rozpuszczania jest jednak korzystniejsze w przypadku porównania uzyskanych rezultatów z wynikami dla specjalnej konstrukcji mieszadła wykonującego ruchy

posuwisto-zwrotne (p.-z.). W tym przypadku lepszą kinetykę analizowanego procesu uzyskuje się przy niższych wartościach liczby *Reynoldsa*. Może to świadczyć o uzyskiwaniu korzystniejszych warunków hydrodynamicznych dzięki zastosowaniu wirującego pola magnetycznego.



Rys. 3. Graficzne przedstawienie wpływu różnego typu urządzeń mieszających na kinetykę procesu rozpuszczania ciała stałego

### Wnioski

Wyniki badań doświadczalnych dotyczących analizy procesu rozpuszczania ciała stałego prowadzą do następujących wniosków:

Kinetyka procesu rozpuszczania ciała stałego zależy od hydrodynamiki panującej w aparacie mieszającym, rodzaju rozpuszczanych substancji, rozpuszczalnika oraz od temperatury.

Wirujące pole magnetyczne może być z powodzeniem zastosowane do intensyfikacji procesu rozpuszczania ciała stałego (procesów wymiany masy).

W porównaniu z klasycznymi aparatami mieszającymi, zastosowanie wirującego pola magnetycznego w procesie rozpuszczania ciała stałego daje zadowalające efekty. Można sądzić, że tego typu oddziaływanie może być pomocne w intensyfikacji procesów wymiany masy prowadzonych w agresywnych chemicznie rozpuszczalnikach oraz przy reżimie temperaturowym znacznie odbiegającym od warunków standardowych.

### LITERATURA

- Aksielrud G.A., Moleczanow A.D., 1981. *Rozpuszczanie ciała stałego*. WNT, Warszawa (ISBN 83-204-0310-3)
- Kordas M., Rakoczy R., Grądzik P., Story G., 2012. Rozpuszczanie ciała stałego w mieszalniku z mieszadłem wykonującym ruch obrotowy i posuwisto-zwrotny. *Inż. Ap. Chem.*, 51, nr 6, 346-347
- Masiuk S., 2001. Dissolution of solid body in a tubular reactor with reciprocating plate agitator. *Chem. Eng. J.* 83, 139-144. DOI: 10.1016/S1385-8947(00)00268-0
- Masiuk S., Rakoczy R. 2007. Power consumption, mixing time, heat and mass transfer measurements for liquid vessels that are mixed using reciprocating multiplates agitators. *Chem. Eng. Proc.*, 46, 89-98. DOI:10.1016/j.cep.2006.05.002
- Rakoczy R., Masiuk S., 2010. Influence of transverse rotating magnetic field on enhancement of solid dissolution process. *AIChE J.*, 56, 1416-1433. DOI:10.1002/aic.12097
- Rakoczy R., Masiuk S., 2011. *Forced convection mass transfer enhancement in mixing systems* [w:] Advanced topics in mass transfer. Chapter 6. InTech, Rijeka, Croatia (ISBN 978-953-307-333-0)
- Rakoczy R., 2012. Study of effect of temperature gradient on solid dissolution process under action of transverse rotating magnetic field. *AIChE J.*, 58, 1030-1039. DOI:10.1002/aic.12656. ISSN: 0001-1541
- Tai C.Y., Chi-Kao W., Chang M.C., 2008. Effects of magnetic fields on the crystallization of CaCO<sub>3</sub> using permanent magnets. *Chem. Eng. Sci.*, 63, 5606-5612. DOI:10.1016/j.ces.2008.08.004

**Badania były finansowane z grantu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu Inventus Plus nr 0448/IP2/2011/71.**