

Marian KORDAS, Rafał RAKOCZY, Przemysław GRĄDZIK, Grzegorz STORY

e-mail: mkordas@zut.edu.pl

Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

## Rozpuszczanie ciała stałego w mieszalniku z mieszadłem wykonującym ruch obrotowy i posuwisto-zwrotny

### 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. Rozpuszczanie, czyli heterogeniczna reakcja przebiegająca z towarzyszącym przejściem fazy stałej do roztworu, występuje powszechnie w przemyśle chemicznym, spożywczym oraz biotechnologicznym.

Substancja dyfundująca napotyka na opór warstewki granicznej, limitującej szybkość procesu rozpuszczania ciała stałego. Opór występujący w warstwie granicznej można zmniejszyć poprzez wywołanie burzliwości układu w efekcie, czego proces wymiany masy można przyspieszyć [Aksielrud i Molczanow, 1981]. Konwekcję wymuszoną zazwyczaj realizuje się poprzez zastosowanie mieszadeł mechanicznych. Najpopularniejszym typem mieszadeł mechanicznych są mieszadła obrotowe [Kamiński, 2004]. Mieszadła tego typu charakteryzują się prostą budową oraz szerokim zastosowaniem procesowym. Wysokie obroty mieszadeł mechanicznych wiążą się z wywołaniem w mieszanym medium duże naprężenia ścinające, niekorzystnie wpływające na żywe kultury (mikroorganizmy, grzyby) oraz powodując małą wydajność hodowli [Viesturs i Smitte, 1992].

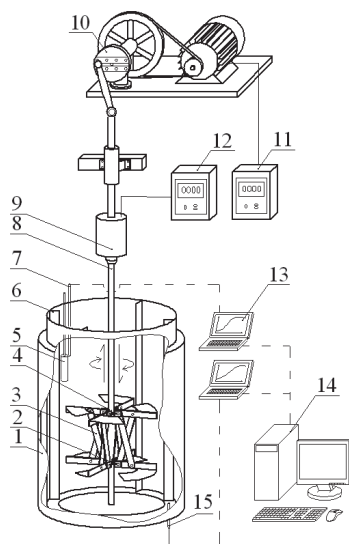
Mieszalniki z mieszadłami o ruchu posuwisto-zwrotnym (wibracyjne) w porównaniu z mieszadłami obrotowymi charakteryzują się mniejszą energochłonnością, oraz wytwarzają mniejsze naprężenia ścinające [Masiuk i Kawecka-Typek, 2004].

Obecnie nie istnieje uniwersalna konstrukcja mieszalnika nadającego się do wszechstronnego zastosowania. Powstają wciąż nowe rozwiązania umożliwiające realizację procesu rozpuszczania ciała stałego w cieczy. W aparatach do intensyfikacji procesów proponowane jest np. zastosowanie pulsacji cieczy, wyładowań elektrycznych, wirującego pola magnetycznego [Rakoczy, 2010].

Głównym celem prezentowanej pracy jest analiza przydatności do procesu rozpuszczania ciała stałego w cieczy mieszalnika wyposażonego w mieszadło wykonującym ruch obrotowy i posuwisto-zwrotny.

### Aparatura doświadczalna i procedura pomiarów

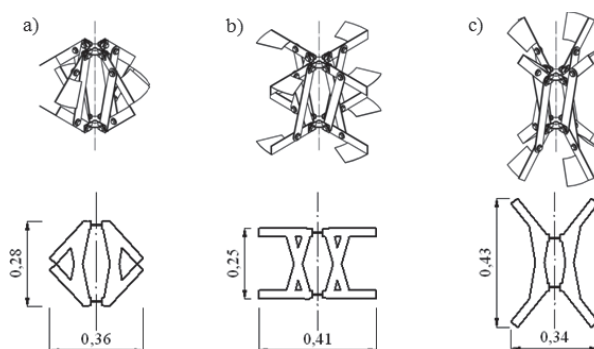
Mieszalnik oraz aparaturę badawczą przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Aparatura doświadczalna: 1 – zbiornik, 2 – piasta dolna, 3 – mieszadło, 4 – piasta górna, 5 – cylindryczna próbka NaCl, 6 – przegroda, 7 – czujnik konduktometryczny, 8 – wał, 9 – napęd ruchu obrotowego, 10 – przekładnia, 11 – regulacja ruchu posuwisto-zwrotnego, 12 – regulacja ruchu obrotowego, 13 – wielofunkcyjne urządzenie pomiarowe, 14 – komputer, 15 – sonda konduktometryczna

Mieszalnik zaopatrzone w płaskodenny zbiornik o wysokości 0,8 m i średnicy 0,55 m (wysokość słupa cieczy 0,65 m). Zakres pracy mieszadła: częstość obrotów  $0,3 \pm 0,52 \text{ s}^{-1}$ , częstości ruchu posuwisto-zwrotnego  $0,4 \pm 1,26 \text{ s}^{-1}$ .

W ruchu obrotowym mieszadło pracuje przy stałej zadanej konfiguracji geometrycznej przedstawionej odpowiednio na rys. 2a, b oraz c. W przypadku ruchu posuwisto-zwrotnego konfiguracja geometryczna mieszadła ulega cyklicznym zmianom poprzez konfiguracje przedstawione odpowiednio na rys. 2a-2b-2c-2b-2a.



Rys. 2. Konfiguracje geometryczne mieszadła wykonującego ruch obrotowy i posuwisto-zwrotny

Pełen opis budowy i zasady działania mieszadła i mieszalnika zamieszczono w pracy [Kordas, 2010] oraz zgłoszeniach patentowych [Kordas i in., 2010a; 2010b].

Proces wymiany masy w mieszalniku realizowano poprzez wprowadzenie cylindrycznej próbki ciała stałego (soli kamiennej >98% NaCl) do wypełnionego wodą zbiornika mieszalnika. Użyte w pracach badawczych próbki soli kamiennej wykonano zgodnie z wytycznymi podanymi w pracy [Rakoczy, 2011]. Cylindryczne próbki ciała stałego umieszczano w okolicy powierzchni swobodnej cieczy i ściany zbiornika. Lokalizacja próbek w zbiorniku wynika ze specyficznej konstrukcji mieszadła, które ma dużą strefę bezpośredniej penetracji mieszanego wsadu.

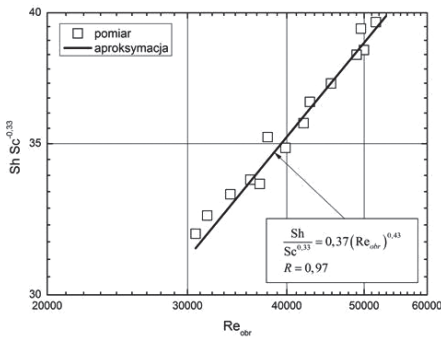
Przed wprowadzeniem próbki uruchamiano mieszadło oraz włączano rejestratory zmian przewodności elektrycznej (CX-701). Próbkę z cieczy usuwano po 60 s oraz wykonywano pomiar jej masy, objętości, średnicy i wysokości. Następnie zmieniano parametry procesowe oraz realizowano proces rozpuszczania ciała stałego dla nowej próbki NaCl, powtarzając powyższą procedurę pomiarową. Pomiar rozpuszczalności ciała stałego zrealizowano dla ruchu: obrotowego (konfiguracje geometryczne mieszadła przedstawione są na rys. 2a, 2b i 2c), ruchu posuwisto-zwrotnego oraz jednocześnie obrotowego i posuwisto-zwrotnego.

### Opracowanie i omówienie uzyskanych wyników

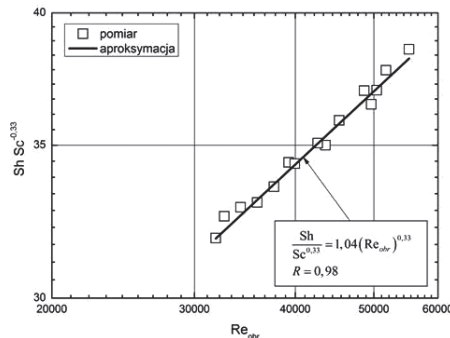
Uzyskane wyniki opracowano w formie klasycznej zależności dla analizy procesów wymiany masy wiążąc liczby *Sherwooda*, *Reynoldsa* i *Schmidta*. Postacie liczb *Sherwooda* i *Schmidta* zastosowane do opracowania wyników zostały zdefiniowane w tab. 1.

Liczby *Reynoldsa* dla mieszadła pracującego w ruchu obrotowym i posuwisto-zwrotnym podano w tab. 2.

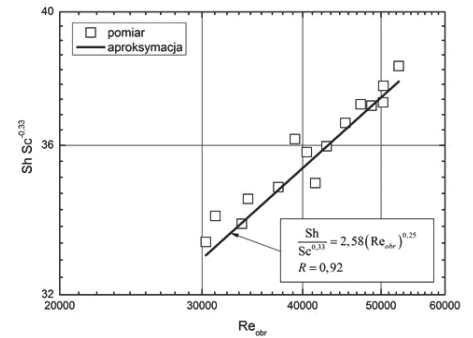
Parametry fizykochemiczne cieczy określono dla średniej temperatury oraz średniego stężenia solanki na początku i końcu procesu rozpuszczania.



Rys. 3. Prezentacja graficzna otrzymanych wyników z ich aproksymacją dla mieszadła pracującego w ruchu obrotowym (konfiguracja – wg rys. 2a)



Rys. 4. Prezentacja graficzna otrzymanych wyników z ich aproksymacją dla mieszadła pracującego w ruchu obrotowym (konfiguracja – wg rys. 2b)



Rys. 5. Prezentacja graficzna otrzymanych wyników z ich aproksymacją dla mieszadła pracującego w ruchu obrotowym (konfiguracja – wg rys. 2c)

Tab. 1. Definicje liczb kryterialnych

Liczba	Definicja	
Sherwooda	$Sh = (\beta_{NaCl})_V d_{pr}^2 / \rho D_{NaCl}$ gdzie: $\beta_{NaCl} = \Delta m / F_{pr} \Delta c \Delta t$	(1)
Schmidta	$Sc = \eta / \rho D_{NaCl}$	(2)

gdzie:  $(\beta_{NaCl})_V$  – objętościowy współczynnik wnikania masy,  $[kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}]$ ;  $d_{pr}$  – średnica próbki,  $[m]$ ;  $D_{NaCl}$  – współczynnik dyfuzji molekularnej,  $[m^2 \cdot s^{-1}]$ ;  $\Delta m$  – masa rozpuszczonego ciała stałego,  $[kg]$ ;  $F_{pr}$  – powierzchnia próbki,  $[m^2]$ ;  $\Delta c$  – siła napędowa procesu,  $[kg_{NaCl} \cdot kg^{-1}]$ ;  $t$  – czas,  $[s]$ ;  $\eta$  – lepkość,  $[kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$ ;  $\rho$  – gęstość,  $[kg \cdot m^{-3}]$

Parametry fizykochemiczne cieczy określono dla średniej temperatury oraz średniego stężenia solanki na początku i końcu procesu rozpuszczania. Uzyskane wyniki zaprezentowano rys. 3–6 w formie zależności:

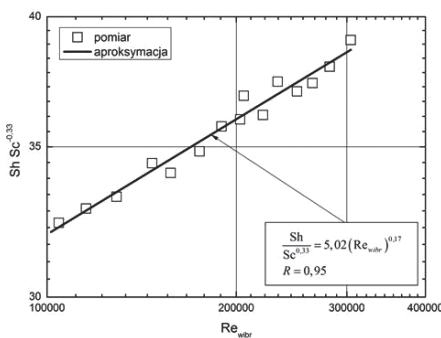
$$(Sh Sc^{-0,33}) = f(Re_{obr}), \quad (Sh Sc^{-0,33}) = f(Re_{wibr})$$

$$(Sh Sc^{-0,33}) = f(Re_{obr}, Re_{wibr})$$

Tab. 2. Definicje liczb Reynoldsa w zależności od wykonywanego ruchu przez mieszadło

Ruch mieszadła	Definicja	
obrotowy	$Re_{obr} = n d_{obr}^2 \rho / \eta$ gdzie: $d_{obr} = \sqrt{16 F_{obr} / \pi}$	(3)
posuwisto-zwrotny (wibracyjny)	$Re_{wibr} = w_{wibr} d_{wibr} \rho / \eta$ gdzie: $w_{wibr} = 2 \pi A f$ ; $d_{wibr} = \sqrt{32 F_{wibr} / \pi}$	(4)

gdzie:  $n$  – częstość obrotów mieszadła,  $[s^{-1}]$ ;  $d_{obr}$  – średnica zastępcza mieszadła w ruchu obrotowym,  $[m]$ ;  $F_{obr}$  – powierzchnia pionowych łopatek mieszadła,  $[m^2]$ ;  $A$  – amplituda,  $[m]$ ;  $f$  – częstotliwość,  $[s^{-1}]$ ;  $d_{wibr}$  – średnica zastępcza mieszadła w ruchu posuwisto-zwrotnym,  $[m]$ ;  $F_{wibr}$  – powierzchnia poziomych łopatek mieszadła,  $[m^2]$ ;  $\eta$  – lepkość,  $[kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$ ;  $\rho$  – gęstość,  $[kg \cdot m^{-3}]$

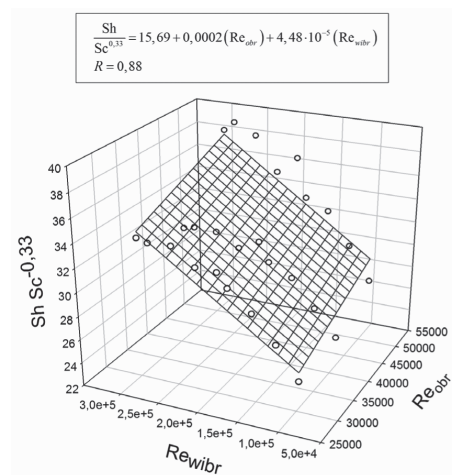


Rys. 6. Prezentacja graficzna otrzymanych wyników z ich aproksymacją dla mieszadła pracującego w ruchu posuwisto-zwrotnym

### Wnioski

Na podstawie wykonanych prac eksperymentalnych oraz uzyskanych rezultatów można sformułować następujące wnioski:

- nowa konstrukcja mieszalnika może być z powodzeniem zastosowana do procesu intensyfikacji wymiany masy;



Rys. 7. Prezentacja graficzna otrzymanych wyników z ich aproksymacją dla mieszadła pracującego w jednoczesnym ruchu obrotowym i posuwisto-zwrotnym

- porównując, zaprezentowane na rys. 3–5, wartości  $(Sh Sc^{-0,33})$  można stwierdzić, że zmiana konfiguracji geometrycznej mieszadła nie wpływa na proces rozpuszczania;
- porównując wartości zaprezentowane na rys. 3–5 oraz rys. 6 można uznać, że uzyskano podobne wartości  $(Sh Sc^{-0,33})$  przy większej wartości i zakresie liczby  $Re_{wibr}$  względem  $Re_{obr}$ ;
- wpływ połączenia ruchu obrotowego i posuwisto-zwrotnego na rozpuszczanie ciała stałego przedstawiono na rys. 7.

### LITERATURA

Aksieliud G.A., Molczanow A.D., 1981. *Rozpuszczanie ciał stałych*. WNT, Warszawa. ISBN 83-204-0310-3

Kamiński J., 2004. *Mieszanie układów wielofazowych*. WNT, Warszawa. ISBN 83-204-3007-0

Kordas M., 2010. Konstrukcja i charakterystyka mieszalnika z mieszadłem wirowo-obrotowym. *Inż. Ap. Chem.*, 49, 3, 55-56

Kordas M., Masiuk S., Rakoczy R., Murdzia E., 2010a. *Mieszadło do płynów*, zgłoszenie patentowe P-387752, BUP nr 21 (960)

Kordas M., Masiuk S., Rakoczy R., Murdzia E., 2010b. *Mieszalnik do mieszania płynów*, zgłoszenie patentowe P-387753, BUP nr 21 (960)

Masiuk S., Kawecka-Typek J., 2004. Mixing energy measurements in liquid vessel with pendulum agitators. *Chem. Eng. Process.*, 43, nr 2, 91-99. DOI: 10.1016/S0255-2701(03)00072-2

Rakoczy R., 2010. Intensyfikacja procesu wymiany masy w wirującym polu magnetycznym. *Inż. Ap. Chem.*, 49, nr 3, 99-100

Rakoczy R., 2011. *Analiza teoretyczno-doświadczalna wpływu wirującego pola magnetycznego na wybrane operacje i procesy inżynierii chemicznej*. Wyd. ZUT, Szczecin. ISBN 978-83-7663-074-8

Viesturs U.E., Szmite I.A., 1992. *Biotechnologia. Substancje biologiczne czynne, technologia, aparatura*. WNT, Warszawa. ISBN 83-204-1459-8

**Badania finansowane z grantu MNiSW w ramach projektu Inventus Plus nr 0448/IP2/2011/71**