

Magdalena JASIŃSKA¹, Jerzy BAŁDYGA¹, Steven HALL², Andrzej PACEK²

e-mail: m.jasinska@ichip.pw.edu.pl

¹ Zakład Inżynierii i Dynamiki Reaktorów Chemicznych, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa² School of Chemical Engineering, University of Birmingham, Birmingham, B15 2TT, UK

Dyspersja kropeł w mieszalnikach typu rotor-stator

Wstęp

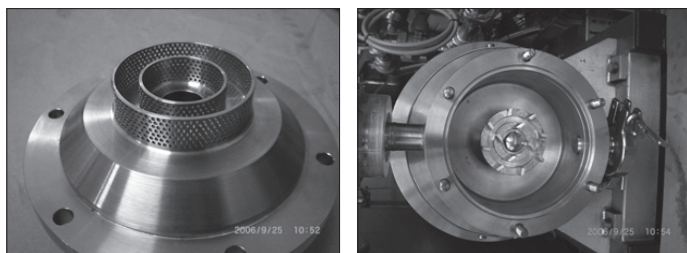
Mieszalniki typu rotor-stator należą do grupy mieszalników generujących wysokie naprężenia. Mieszalniki takie wykorzystywane są w wielu gałęziach przemysłu branży chemicznej, biomedycznej, kosmetycznej, spożywczej i wielu innych w celu homogenizacji cieczy, wytwarzania emulsji i nano-zawiesin, rozdrabniania, rozpuszczania, reakcji chemicznych, dezintegracji komórek oraz koagulacji. Charakteryzują się one wysokimi prędkościami rotora (wirnika) lub rotorów (wimików), które są usytuowane w pobliżu statora lub statorów, co generuje lokalnie wysokie wartości szybkości dyssypacji energii, a z zatem również wysokie naprężenia hydrodynamiczne. Wymaga to jednak dużych wydatków mocy [Atiemo-Obeng i Calabrese, 2004], więc lepsze poznanie wpływu parametrów procesowych na przebieg procesu pozwala na lepszy ich dobór. Niniejsza praca poświęcona jest mieszanii dwu niemieszających się cieczy w celu utworzenia stabilnej emulsji. Tworzenie emulsji to ważna operacja niezbędna do wytwarzania takich produktów jak szampony, dezodoranty, kremy, bitumen i produkty przemysłu farmaceutycznego. Procesy takie można prowadzić przy jednokrotnym bądź wielokrotnym przepuszczaniu materiału przez mieszalnik aż do osiągnięcia pożądaných własności emulsji.

Jednak, pomimo powszechnych zastosowań mieszalników typu rotor-stator, zrozumienie ich działania jest nadal ograniczone. Zazwyczaj, projektowanie i wytwarzanie nowych produktów o strukturze emulsji odbywa się w oparciu o doświadczenia technologa, inżyniera i projektanta, zaś parametry procesowe dobiera się metodą prób i błędów. Koszty takiego projektowania procesów są oczywiście wysokie a czas wdrażania technologii długi. Zrozumienie procesu emulsyfikacji jest podstawą doboru parametrów procesowych, projektowania urządzeń i procedur technologicznych oraz zasad powiększania skali; i właśnie kolejny krok w kierunku zrozumienia tego procesu wyznacza cel niniejszej pracy.

Celem pracy jest porównanie wyników eksperymentalnych z wynikami symulacji uzyskanymi przy użyciu CFD i modelu multifraktałnego burzliwości.

Badania doświadczalne dyspersji kropeł

W części doświadczalnej przeprowadzono badania rozpadu rozproszonych w wodzie kropeł oleju silikonowego. Badania prowadzono w przepływowym mieszalniku typu rotor-stator typu 150/250/MS, zaprezentowanym na rys. 1 i pracującym w sposób ciągły. Mieszalnik zaopatrzony był w dwa wirniki zamontowane koncentrycznie na jednym wale oraz w dwa perforowane ekrany.



Rys. 1. Mieszalnik rotor-stator typu Silverson: po lewej statory (ekrany), po prawej rotory (wirniki)

Rotor wewnątrz charakteryzuje się wewnętrzną średnicą równą $2,624 \cdot 10^{-2}$ m i średnicą zewnętrzną równą $3,82 \cdot 10^{-2}$ m. Zewnętrzny

rotor charakteryzują z kolei średnice równe odpowiednio $4,99 \cdot 10^{-2}$ m i $6,34 \cdot 10^{-2}$ m. Wewnętrzny ekran statora posiada 6 rzędów po 50 okrągłych otworów o $1,59 \cdot 10^{-3}$ m każdy. Zewnętrzny ekran posiada 7 rzędów po 80 okrągłych otworów każdy, o średnicy $1,59 \cdot 10^{-3}$ m.

Wysokie wartości szybkości ścinania uzyskiwano dzięki zastosowaniu w mieszalniku bardzo wąskiej (< 1 mm) szczeliny między łopatkami wirnika, a ekranem statora. Przepływ płynu przez otworki statora był również ważnym mechanizmem odpowiedzialnym za rozpad kropeł w mieszalniku.

Badania doświadczalne dotyczyły dyspersji kropeł oleju silikonowego o stężeniu 1% obj. zawieszonych w wodzie. W pracy określano wpływ takich parametrów procesowych jak częstość obrotów rotora, wartość przepływu objętościowego oraz lepkość kropeł oleju na rozkład rozmiarów kropeł oraz na parametry rozkładu takie jak np. średnica Sautera. Prowadzono dwa rodzaje eksperymentów: w pierwszym przypadku badano pojedynczy przepływ dyspersji przez mieszalnik natomiast w drugim dyspersja była kilkukrotnie zawracana do mieszalnika co umożliwiło zbadanie efektu liczby przejść przez mieszalnik.

Rozkład rozmiarów kropeł oraz jego parametry określano korzystając z urządzenia Malvern MasterSizer 2000. Krople na wlocie do mieszalnika miały średni rozmiar ok. 40 μ m, podczas gdy po rozbiciu, na wylocie w większości przypadków otrzymywano krople o średnich rozmiarach poniżej 10 μ m. W niektórych przypadkach, dla bardzo dużych wartości częstości obrotowych mieszadła (11000 1/min), uzyskiwano krople o rozmiarach poniżej 1 μ m. Wybrane wyniki doświadczalne pokazano razem z wynikami modelowania w kolejnej części pracy.

Wyniki modelowania i dyskusja

Do interpretacji wyników doświadczalnych w pracy zastosowano model rozpadu kropeł oparty na multifraktałnym opisie burzliwości. Model ten pozwala na opis burzliwości z uwzględnieniem zjawiska intermitencji, czyli silnych fluktuacji lokalnych wartości szybkości dyssypacji energii i lokalnych naprężeń, odpowiedzialnych za rozpad kropeł. Rzeń rozpadu opisuje w takim przypadku zależność

$$g(d) = C_g \sqrt{\ln(L/d)} \langle \epsilon \rangle^{1/3} d^{-2/3} \int_{0,12}^{\alpha_x} \left(\frac{d}{L} \right)^{\frac{\alpha+2-3f(\alpha)}{3}} d\alpha \quad (1)$$

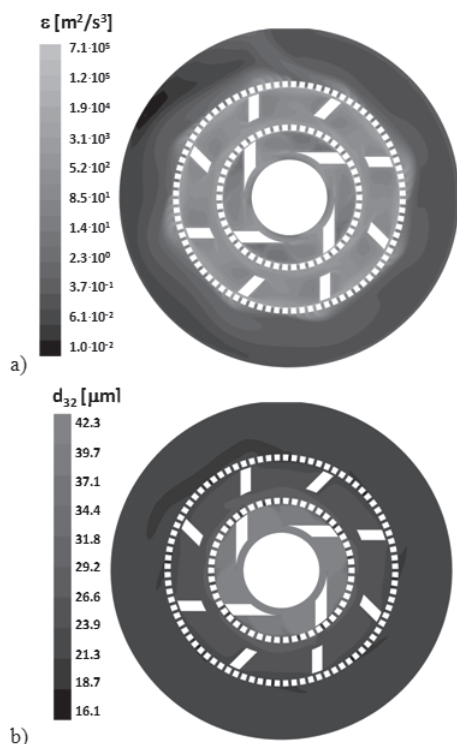
gdzie L to skala całkowita, odpowiadająca dużym wirom, d to średnica kropeł, α to wykładnik multifraktałny, a $f(\alpha)$ to widmo multifraktałne. Z widma multifraktałnego wybrano tylko te wiry charakteryzowane przez α , które są na tyle silne, że zdolne do rozrywania kropeł, a zawarte pomiędzy 0,12 charakteryzującym wiry najsilniejsze, a wartością α_x charakteryzującą najsłabsze wiry, które są zdolne do rozrywania kropeł o średnicy d .

$$\alpha_x = \frac{\frac{5}{2} \log \left[\frac{L \langle \epsilon \rangle^{0,4} \rho_c^{0,6}}{C_x \sigma^{0,6}} \right]}{\log \left(\frac{L}{d} \right)} - 1,5 \quad (2)$$

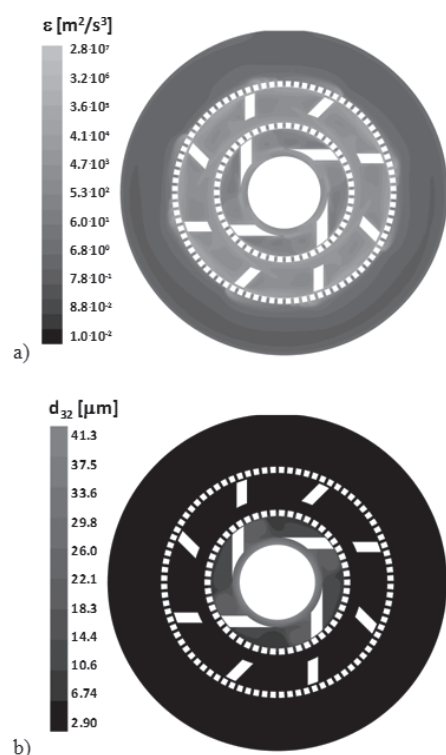
gdzie: ρ_c to gęstość fazy ciągłej. C_g i C_x to stałe modelu, dobrane w pracach [Bałdyga i Bourne, 1999; Bałdyga i Podgórska, 1998] $C_g = 0,0035$ i $C_x = 0,23$, przy założeniu izotropowości burzliwości.

Jako, że istotną rolę w procesie rozpadu w badanym mieszalniku odgrywa struktura przepływu płynu, proces rozpadu interpretowano przy wykorzystaniu zaawansowanej techniki CFD, umożliwiającej połącze-

nie modeli opisujących pole przepływu (w tym przypadku stosowano model $k-\epsilon$) z modelem rozpadu kropeł. Do symulacji części ruchomych mieszalnika (wirików), wykorzystano model MRFR (*Multi Reference Frame of Reference*). Ze względu na złożoność opisu zjawiska obliczenia wykonywano z wykorzystaniem uproszczonego podejścia 2D oraz modelu zakładającego pseudo-homogeniczność dyspersji i stan stacjonarny. Następnie przedstawiono porównanie wyników eksperymentalnych z wynikami symulacji.



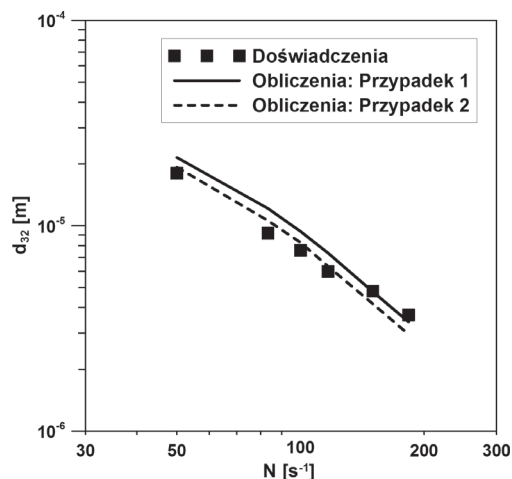
Rys. 2. Wyniki symulacji dla $Q = 600$ kg/h, $N = 3000$ 1/min; a) szybkość dyssypacji energii, b) rozmiar średni kropeł



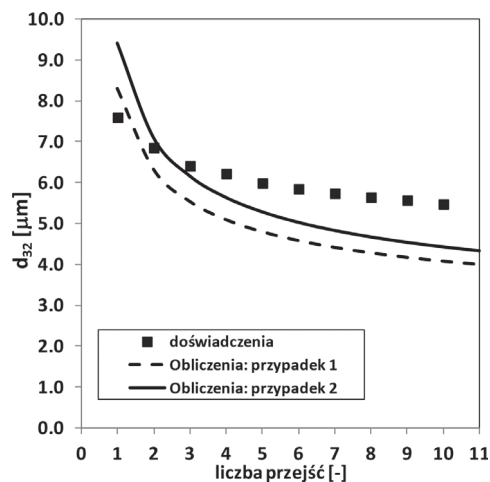
Rys. 3. Wyniki symulacji dla $Q = 600$ kg/h, $N = 11000$ 1/min; a) szybkość dyssypacji energii, b) rozmiar średni kropeł

Jak widać z rys. 2 i 3 wzrost częstości obrotów silnie zwiększa szybkość dyssypacji energii i obniża rozmiar kropeł opuszczających urządzenie. Ten efekt pokazano rys.4.

Rys. 4 pokazuje zgodność trendów uzyskanych z obliczeń i eksperymentu dla wpływu częstości obrotów wirnika na rozmiar kropeł. Dla silnie nieizotropowej burzliwości niezbędne było jednak powiększenie stałych C_x i C_g , co ilustruje również rys. 4. Aby zmniejszyć rozmiar kropeł, zamiast zwiększania częstości obrotów, można również zwiększyć liczbę przejść płynu przez urządzenie (Rys. 5).



Rys. 4. Wpływ częstości obrotów wirnika na rozmiar kropeł dla $Q = 600$ kg/h, przypadek 1: $8C_x, 20C_g$, przypadek 2: $8C_x, 30C_g$



Rys. 5. Wpływ liczby przejść na d_{32} dla $Q = 600$ kg/h, $N = 6000$ rpm

Wnioski

W pracy przedstawiono porównanie wyników eksperymentalnych z wynikami symulacji uzyskanymi przy użyciu CFD i modelu multifraktalnego burzliwości.

Uzyskana zgodność jest dobra, co po raz kolejny potwierdza bardzo dużą użyteczność modelu multifraktalnego do przewidywania efektów rozpadu kropeł w przepływach burzliwych.

LITERATURA

- Atiemo-Obeng V.A., Calabrese R.V., 2004. *Rotor-stator mixing devices. Handbook of Industrial Mixing, Science and Practice*. Wiley, New Jersey
- Bałdyga J., Bourne J.R., 1999. *Turbulent mixing and chemical reactions*, Wiley, Chichester
- Bałdyga J., Podgórska W., 1998. Drop break-up in intermittent turbulence: maximum stable and transient sizes of drops. *Canad. J. Chem. Eng.*, **76**, nr 3, 456-470. DOI: 10.1002/cjce.5450760316