

Magdalena JASIŃSKA<sup>1</sup>, Jerzy BAŁDYGA<sup>1</sup>, Michael COOKE<sup>2</sup>, Adam KOWALSKI<sup>3</sup>

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

<sup>1</sup>Zakład Inżynierii i Dynamiki Reaktorów Chemicznych, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa<sup>2</sup>School of Chemical Engineering and Analytical Science, the University of Manchester, Manchester, UK<sup>3</sup>Unilever Research & Development, Port Sunlight, UK

## Badanie mikromieszania płynów w mieszalniku typu rotor-stator z wykorzystaniem złożonych reakcji testowych

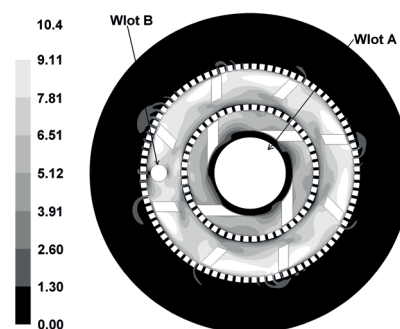
### Wstęp

Układy złożonych, testowych, homogenicznych reakcji chemicznych wykorzystywane są często do identyfikacji stanu wymieszania płynów w różnego typu mieszalnikach i reaktorach. Reakcje złożone stosuje się dlatego, że selektywność ich przebiegu zależy od historii procesu mieszania. Układ testowy powinien składać się z co najmniej 2 konkurujących ze sobą reakcji [1]. Warunkiem czułości na mieszanie jest, aby jedna z reakcji była niemal nieskończenie szybka, natomiast druga winna charakteryzować się wartością stałej czasowej porównywalną do poszukiwanej stałej czasowej mieszania. W obecnej pracy do identyfikacji mikromieszania w mieszalniku typu rotor-stator zastosowano układ reakcji szeregowo-równoległych zachodzących między 1- i 2-naftolami oraz solą kwasu sulfofenylodizoniowego. Należy podkreślić, że do tej pory wspomniany układ reakcji testowych był z powodzeniem stosowany do badania mieszania w wielu typach urządzeń: począwszy od reaktora zbiornikowego z mieszadłem [2], poprzez mieszalniki statyczne [3], a skończywszy na mikroreaktorze [4] i mieszalniku rotor-stator [5]. Obecne badania stanowią kontynuację prac prowadzonych przez autorów [5]. Rozważana reakcja przebiega wg następującego schematu [1]:  $A + B \xrightarrow{k_{1p}} p-R$ ,  $A + B \xrightarrow{k_{1o}} o-R$ ,  $p-R + B \xrightarrow{k_{2o}} S$ ,  $o-R + B \xrightarrow{k_{2p}} S$ ,  $AA + B \xrightarrow{k_3} Q$  gdzie  $A$  reprezentuje 1-Naftol,  $AA$  2-Naftol,  $B$  oznacza sól diazoniową,  $o-R$  i  $p-R$  to barwniki monoazowe otrzymane z 1-Naftolu,  $S$  to barwnik bis azowy z 1-Naftolu, natomiast  $Q$  to barwnik monoazowy otrzymany z 2-Naftolu. Parametrem informującym o stanie wymieszania jest w tym przypadku selektywność zdefiniowana jako ułamek substratu  $B$  bądź w produkcie  $Q$  bądź  $S$  w stosunku do całkowitej ilości będącego w niedomiarze substratu  $B$ :  $X_Q = c_Q / (c_{or} + c_{pr} + c_Q + 2c_S)$ ,  $X_S = 2c_S / (c_{or} + c_{pr} + c_Q + 2c_S)$ .

### Badania doświadczalne

Mieszalniki typu rotor-stator należą do grupy urządzeń o bardzo wysokich szybkościach ścinania, które uzyskuje się poprzez bardzo wysokie szybkości obrotowe wirnika umieszczonego w niewielkiej odległości od tzw. statora czyli nieruchomego, perforowanego ekranu. Taka geometria i takie wartości szybkości obrotowych wirnika zapewniają lokalnie wysokie wartości burzliwej szybkości dyssypacji energii. Oczywiście należy pamiętać, że tak wysokie szybkości obrotowe wymagają jednocześnie dużych mocy. W artykule przedstawiono badania mieszania wykonane w mieszalniku *Silverson 150/250 MS* przeznaczonym do pracy ciągłej. Mieszalnik taki wyposażony był w dwa wirniki o średnicach zewnętrznych  $3,82 \cdot 10^{-2}$  m i  $6,34 \cdot 10^{-2}$  m. Ekran wewnętrzny składał się z 6 rzędów 50 kulistych otworów każdy o średnicy otworu  $1,59 \cdot 10^{-3}$  m, podczas gdy ekran zewnętrzny to 7 rzędów złożonych z 80 kulistych otworów o średnicy otworu  $1,59 \cdot 10^{-3}$  m. Na rys. 1 zaznaczono miejsca zasilania dwóch reagentów. Średnica rurki wlotowej reagenta  $A$  wynosiła  $d_A = 22,22$  mm, podczas gdy średnica rurki wlotowej reagenta  $B$   $d_B = 5,15$  mm. W przeprowadzonej serii doświadczeń stosowano następujące warunki:

Do określenia stężeń poszczególnych składników w analizowanej próbce wykorzystano metodę spektrofotometryczną, polegającą na pomiarze absorbancji badanej próbki w zakresie VIS widma elektromagnetycznego, natomiast rozdzielenie i przeliczenie całkowitej absorban-



Rys. 1. Profil prędkości,  $v$  [m/s], geometria i wloty reagentów dla  $N = 3000$  obr/min

Tab. 1. Warunki doświadczalne dla reakcji *Bourne'a*

$T$ [°C]	pH	$Q_A$ [kg/h]	$Q_B$ [kg/h]	$\alpha$ ( $Q_A/Q_B$ )	$c_A$ [mol/m <sup>3</sup> ]	$c_{AA}$ [mol/m <sup>3</sup> ]	$c_B$ [mol/m <sup>3</sup> ]
25	9,9	360	24	15	1,2	1,2	15

cji na stężenia analizowanych barwników wykonano z wykorzystaniem standardowej wieloparametrowej regresji liniowej oraz opublikowanych w literaturze współczynników ekstynkcji [2].

Stężenie każdego ze składników (barwników) określano poprzez pomiar całkowitej absorbancji próbki dla kilkunastu wartości długości fali w zakresie między 350 a 700 nm (z 2 nm skokiem). Całkowita absorbancja dana jest zależnością

$$A = \varepsilon_1 c_1 l + \varepsilon_2 c_2 l + \varepsilon_3 c_3 l + \varepsilon_4 c_4 l \quad (1)$$

gdzie  $\varepsilon$  – współczynnik ekstynkcji,  $c_i$  – stężenie każdego ze składników,  $l$  – grubość kuwety pomiarowej.

Jednym ze sposobów weryfikacji błędów doświadczalnych jest sprawdzenie bilansu masowego. Bilans masy opierał się na pozostającym w niedomiarze reagentu  $B$  (sól diazoniowa).

Wyniki uzyskane w doświadczeniach zaprezentowano w tab. 2.

Tab. 2. Wyniki doświadczeń

$N$ [obr./min]	$X_S$ [-]	$X_Q$ [-]	Bilans masy [%]
3000	0,0591	0,1239	97,0
3000	0,0612	0,1327	96,4
5000	0,0471	0,0837	94,2
5000	0,0195	0,0865	93,2
7000	0,0534	0,0713	99,5
7000	0,0530	0,0693	98,1

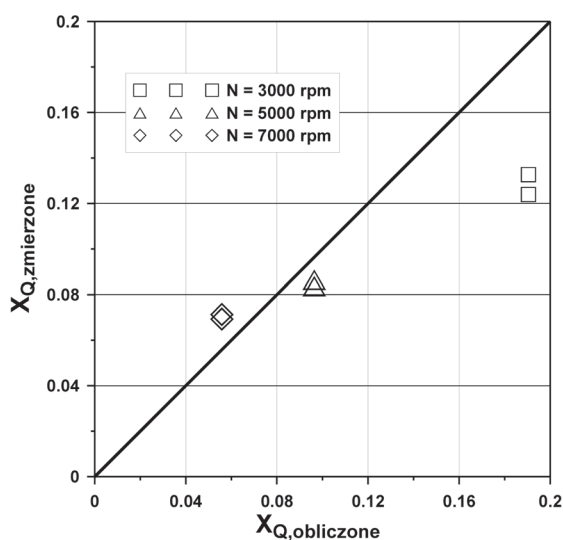
### Wyniki i dyskusja

W pracy podjęto próbę interpretacji wyników doświadczalnych z zastosowaniem modeli mieszania połączonych z obliczeniową mechaniką płynów (CFD). Takie podejście obejmuje określenie pola przepływu oraz stężeń poszczególnych składników dla rozważanego mieszalnika. Hydrodynamikę symulowano w układzie 2-wymiarowym przy wykorzystaniu standardowego modelu  $k$ - $\varepsilon$ , stosując metodę MRF do sy-

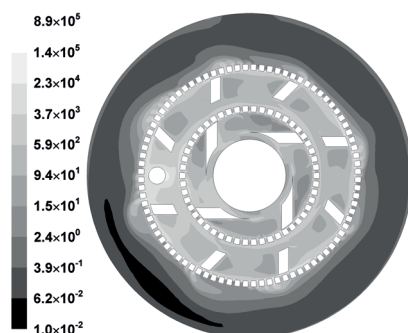
mulacji ruchu wirnika. Siatka niestructuralna zawierała około 200000 komórek.

Rys. 2 prezentuje porównanie wartości selektywności produktu  $Q$  uzyskanych w pomiarach oraz wyników obliczeń dla trzech wartości szybkości obrotowych rotora wewnętrznego i zewnętrznego:  $N = 3000$ , 5000 oraz 7000 obr/min. Przykładowe wyniki obliczeń obejmujące profile prędkości, profile szybkości dyssypacji energii oraz rozkłady stężenia jednego z substratów ( $A$ ) i produktów ( $Q$ ) przedstawiono odpowiednio na rys. 1, 3-7.

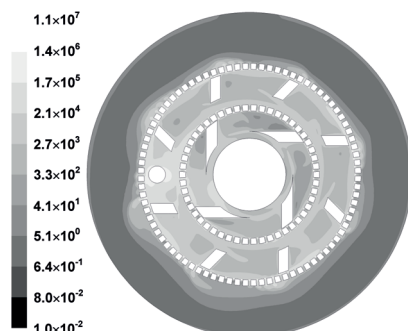
Na rysunkach obserwujemy silny wpływ szybkości obrotowej rotora na pole przepływu, parametry burzliwości oraz stężenia poszczególnych reagentów. Zaprezentowane wyniki pokazują również że model 2-wymiarowy, stanowiący uproszczenie układu 3-wymiarowego, przewiduje zbyt duże wartości selektywności dla niskich szybkości obrotowych rotora. Prowadzi to do wniosku, że wskazane jest modelowanie z wykorzystaniem układu 3-wymiarowego. Jest to jeden z kierunków dalszych prac związanych z omawianym zagadnieniem.



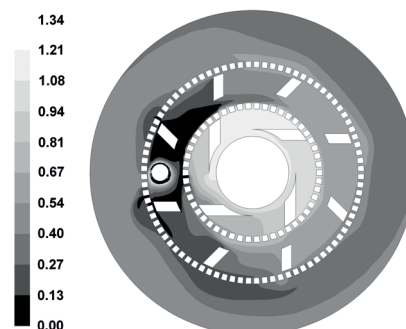
Rys. 2. Selektowność  $X_Q$ . Porównanie wyników doświadczeń z wynikami obliczeń



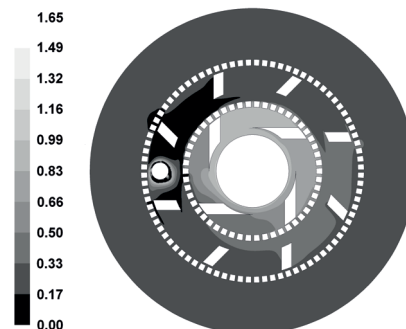
Rys. 3. Profil szybkości dyssypacji energii,  $\epsilon$  [ $m^2/s^3$ ], dla  $N = 3000$  obr/min



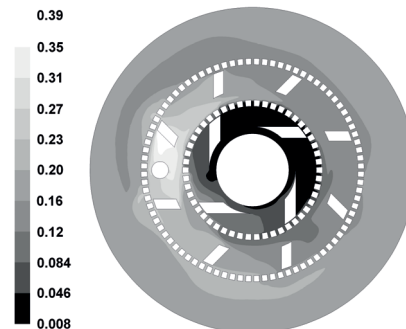
Rys. 4. Profil szybkości dyssypacji energii,  $\epsilon$  [ $m^2/s^3$ ], dla  $N = 7000$  obr/min



Rys. 5. Profil stężenia substratu  $A$ ,  $c_A$  [ $mol/m^3$ ], dla  $N = 3000$  obr/min



Rys. 6. Profil stężenia substratu  $A$ ,  $c_A$  [ $mol/m^3$ ], dla  $N = 7000$  obr/min



Rys. 7. Profil stężenia produktu  $Q$ ,  $c_Q$  [ $mol/m^3$ ], dla  $N = 3000$  obr/min

## Wnioski

1. Przedstawione wyniki pokazują, że zastosowany w pracy układ złożonych reakcji testowych może być z powodzeniem wykorzystany do opisu mieszania na skalę molekularną w mieszalnikach typu rotor-stator.
2. Warunki doświadczalne zostały dobrane prawidłowo. Obie selektywności  $X_Q$  i  $X_S$  pozostają czułe na mieszanie w badanym zakresie szybkości obrotowych wirnika.
3. Zgodnie z oczekiwaniami wartości selektywności  $X_Q$  i  $X_S$  są monotonnymi, malejącymi funkcjami częstości obrotowej wirnika.

## LITERATURA

- [1] J. Baldyga, J.R. Bourne: Turbulent mixing and chemical reactions. Wiley, Chichester 1999.
- [2] J. Lenzner: Der Einsatz rascher, kompetitiver Reaktionen zur Untersuchung von Mischeinrichtungen. Ph.D. Thesis No. 9469, ETH Zürich, 1991.
- [3] J. Baldyga, J.R. Bourne, S.J. Hearn: Chemical Engineering Science **52**, 457 (1997).
- [4] K. Malecha, L. Golonka, J. Baldyga, M. Jasińska, P. Sobieszuk: Sensors and Actuators B: Chemical **143**, 400 (2009).
- [5] J. Baldyga, A. Kowalski, M. Cooke, M. Jasińska: Chemical and Process Engineering **28**, 867 (2007).

*Część pracy sfinansowano w ramach grantu Royal Society.*