

Szymon WOZIWODZKI, Lubomira BRONIARZ-PRESS, Łukasz JĘDRZEJCZAK, Katarzyna ZAWORSKA

e-mail: szymon.woziwodzki@put.poznan.pl

Zakład Inżynierii i Aparatury Chemicznej, Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska, Poznań

Porównanie sposobów zwiększenia efektywności mieszania płynów lepkich w mieszalniku z dwoma mieszadłami

Wstęp

Mieszanie mechaniczne płynów lepkich prowadzi się w zakresie laminarnym i częściowo przejściowym. Duża lepkość płynów powoduje zmniejszenie efektywności mieszania, ponieważ w otoczeniu mieszadła wytwarzają się obszary o słabym stopniu wymieszania, które zwyczajowo nazywa się obszarami IMR (*Isolated Mixing Regions*). Jest to szczególnie ważne w przemyśle spożywczym, biotechnologii oraz przetwórstwie tworzyw sztucznych, gdyż może prowadzić do obniżenia jakości produktu końcowego, w wyniku obecności gradientów stężenia czy temperatury. Obszary IMR zwykle przyjmują kształt toroidalny, a ich obecność nie jest uzależniona od obecności przegród, ani od liczby mieszadeł na wspólnym wale [Lamberto i in., 1999].

Mechanizm mieszania w zakresie laminarnym oparty jest na przepływie chaotycznym, który można opisywać modelem przepływu sinusoidalnego [Alvarez i in., 1998], dlatego w celu skrócenia czasu mieszania, a tym samym zwiększenia efektywności mieszania, stosuje się metody, które pozwalają na wygenerowanie przepływu o charakterze chaotycznym. Do takich metod zaliczyć można: niecentryczne umiejscowienie mieszadeł, zastosowanie mieszania typu *forward-reverse* lub zaprojektowanie asymetrycznych mieszadeł [Cabaret i in., 2008]. Wcześniejsze badania wskazują, że stosowanie niecentrycznego umiejscowienia mieszadeł w mieszaniu płynów lepkich usprawnia mieszanie osiowe [Woziwodzki i Jędrzejczak, 2011], co przekłada się na skrócenie czasu mieszania w porównaniu do mieszania standardowego. Z tego powodu preferowane są mieszadła generujące przepływ osiowy.

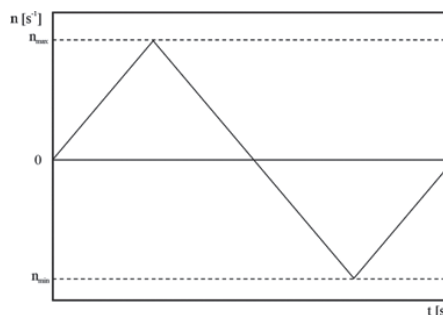
Mieszanie typu *forward-reverse* w zakresie przepływu burzliwego powoduje zwiększenie czasu mieszania i mocy mieszania [Woziwodzki, 2011, 2013], jednakże podczas mieszania płynów lepkich obserwuje się zwiększenie efektywności w wyniku zmiennych w czasie częstości i kierunku obrotów mieszadła [Lamberto i in., 1996], jak również zwiększenia częstotliwości oscylacji [Yoshida i in., 2009]. Poprawę efektywności mieszania obserwuje się zarówno dla mieszadeł promieniowych, jak i osiowych [Dieulot i in., 2005], co tłumaczy się generowaniem w całej objętości mieszalnika przepływu chaotycznego [Nomura i in., 1997].

W pracy podjęto próbę porównania efektywności mieszania płynów lepkich w mieszalniku z dwoma mieszadłami turbinowymi umieszczonymi niecentrycznie oraz w mieszalniku z mieszadłami wykonywującymi ruch oscylacyjny (*forward-reverse*).

Opis badań doświadczalnych

Aparatura badawcza

Badania prowadzono w płaskodennym zbiorniku o średnicy $D = 0,19$ m, wykonanym z przezroczystego polimetakrylanu metylu i zaopatrzonym w niecentrycznie umiejscowione mieszadła (mieszalnik M1) oraz w mieszalniku z mieszadłami wykonującymi ruch oscylacyjny typu *forward-reverse* (mieszalnik M2). Zastosowano układ dwóch mieszadeł turbinowych, wykorzystując turbinę *Rushtona* (RT) i mieszadło z sześcioma łopatkami pochylonymi pod kątem 45° (PBT), zamontowane w następujących konfiguracjach: RT-RT, PBT-PBT i RT-PBT (mieszadło górne: RT, mieszadło dolne: PBT). W mieszalniku M1 stopień niecentryczności wynosił $E/R = 0,53$, natomiast w mieszalniku M2 zastosowano następujące częstotliwości oscylacji mieszadła: $f = 0,23$; $0,46$ i $0,92$ Hz. Zmiana częstości obrotów mieszadła w funkcji czasu miała charakter fali trójkątnej (1), dla której wartość maksymalna n_{\max} i bezwzględna wartość minimalnej częstości obrotów n_{\min} były takie same (Rys. 1):



Rys. 1. Zmiany częstości obrotów n w funkcji czasu t w mieszalniku M2

$$n = \frac{8}{\pi^2} n_{\max} \left[\sin(2\pi ft) - \frac{1}{9} \sin(6\pi ft) + \frac{1}{25} \sin(10\pi ft) \right] \quad (1)$$

Materiały

Zastosowanym płynem lepkiem był wodny roztwór gliceryny 98% (gęstość $\rho = 1100$ kg/m³, lepkość $\eta = 1,11$ Pa·s), co pozwalało na analizę czasu mieszania dla następujących wartości liczb *Reynoldsa* $Re_{FR} = Re = 8, 29, 40$.

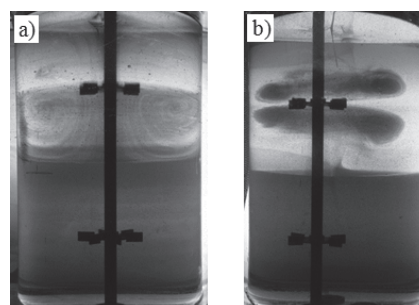
Efektywność mieszania

Efektywność mieszania określano poprzez pomiar czasu mieszania oraz stopnia segregacji w poszczególnych mieszalnikach. Stopień segregacji wyznaczano metodą opartą na reakcji zobojętniania kwas-zasada (1M NaOH-1M HCl) w obecności znacznika *pH* (błękit bromotymolowy). Metoda została opisana we wcześniejszej publikacji [Woziwodzki i Jędrzejczak, 2011].

Zdjęcia wykonane aparatem *Canon EOS 1D Mark III* poddawano analizie w programie *Image Pro* firmy *MediaCybernetics*. Na podstawie zdjęć wyznaczano objętość obszarów IMR oraz stopień wymieszania w poszczególnych częściach mieszalnika (na podstawie analizy zmian barw składowych zdjęć). Dla mieszania typu *forward-reverse* wyznaczano średnią wartość częstości obrotów z dziesięciu cykli pomiarów n_{FR} oraz średnią wartość liczby *Reynoldsa* Re_{FR} . Badania w mieszalniku M1 i M2 prowadzono, nie dłużej niż 6000 s (100 min).

Wyniki badań i ich analiza

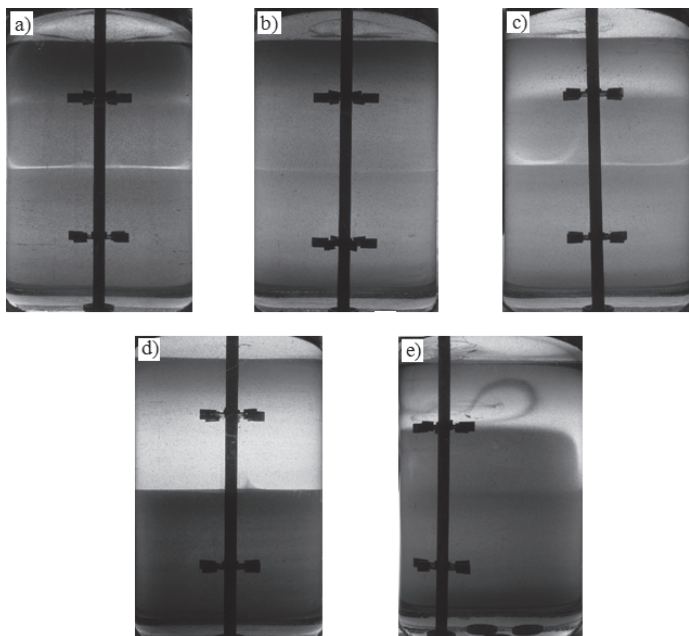
Dla obu mieszalników potwierdzono, iż obszary IMR formują się w otoczeniu mieszadeł (Rys. 2). Należy jednak zaznaczyć, że toroidalne obszary IMR formują się dla układów niecentrycznych, natomiast dla mieszania typu *forward-reverse* struktury te wykazują bardziej skomplikowaną strukturę typu włóknowego. Są one wynikiem formowania przepływu chaotycznego, w którym analizowany płyn przepływa w postaci cienkich strumieni (*liquid filament*). W rezultacie takiego prze-



Rys. 2. Przykłady struktur obszarów IMR: a) mieszalnik M2, b) mieszalnik M1

plywu wytwarzają się skomplikowana struktury 3D zamiast typowego obszaru o kształcie toroidalnym. Dla mieszania typu *forward-reverse* (mieszalnik M2) toroidalne IMR zaobserwowano tylko dla układu RT-RT oraz $Re = 9$. Z kolei dla układów niecentrycznych stwierdzono występowanie odchylenia płaszczyzny toroidów od płaszczyzny mieszadła, co jest wynikiem odchylenia pętli cyrkulacyjnych [Montante *et al.*, 2006; Woźniowski *et al.*, 2011].

Przykładowe zdjęcia obrazujące stopień segregacji w poszczególnych mieszalnikach przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Przykładowe zdjęcia stopnia segregacji S w mieszalniku dla układu RT-RT, $Re = 9$, $t = 1200$ s. a) mieszalnik standardowy, b) mieszalnik M2, $f = 0,23$ Hz, c) mieszalnik M2, $f = 0,46$ Hz, d) mieszalnik M2, $f = 0,92$ Hz, e) mieszalnik M1, $E/R = 0,53$

W tab. 1 zestawiono wyniki czasu mieszania dla poszczególnych mieszalników.

Tab. 1. Czas mieszania t_m w mieszalniku M1 i M2

Układ	Re	M2			M1 $E/R = 0,53$
		$f = 0,23$ Hz	$f = 0,46$ Hz	$f = 0,92$ Hz	
RT-RT	9	> 6000 s	> 6000 s	4800 s	5700 s
RT-PBT		> 6000 s	5400 s	4800 s	4800 s
PBT-PBT		> 6000 s	> 6000 s	6000 s	4200 s
RT-RT	29	3600 s	1200 s	900 s	1320 s
RT-PBT		1200 s	900 s	780 s	1200 s
PBT-PBT		> 6000 s	1380 s	780 s	1080 s
RT-RT	40	1020 s	900 s	600 s	600 s
RT-PBT		600 s	300 s	300 s	600 s
PBT-PBT		600 s	840 s	600 s	60 s

Analiza danych doświadczalnych wskazuje, że w mieszalniku M2 z mieszadłami wykonującymi ruch oscylacyjny czas mieszania płynów lepkich jest uzależniony od częstości oscylacji f . Wraz ze wzrostem f maleje czas mieszania. Zaobserwowano skrócenie czasu mieszania o około połowę dla $f = 0,92$ Hz w stosunku do $f = 0,23$ Hz. Ponadto zaobserwowano wpływ układu mieszadeł na czas mieszania w mieszalniku M2. Najkrótsze czasy mieszania odnotowano dla układu mieszadeł RT-PBT, następnie dla RT-RT. Najdłuższy czas mieszania wystąpił dla układu PBT-PBT. Otrzymane wyniki wskazują, że układ mieszadeł RT-PBT generuje silniejszy przepływ chaotyczny, co przekłada się na skrócenie czasu mieszania.

W mieszalniku M1 z niecentrycznie zamontowanymi mieszadłami wpływ konfiguracji mieszadeł na czas mieszania przedstawiał się inaczej. Najkrótszy czas mieszania, we wszystkich przypadkach, zaob-

serwowano dla układu PBT-PBT, następnie dla RT-PBT, a najdłuższy dla RT-RT. Taka zależność wskazuje, że niecentryczne umiejscowienie mieszadeł promuje mieszadła wytwarzające przepływ osiowy. Potwierdzają to wcześniejsze badania [Galetti *et al.*, 2008; Woźniowski *et al.*, 2011]. Czas mieszania t_m dla mieszadeł PBT-PBT był o około 20% krótszy w stosunku do RT-RT ($Re = 9$), o 18 % dla $Re = 29$ i około 90% dla $Re = 40$.

Bezpośrednie porównanie czasu mieszania w mieszalniku M1 i M2 wskazuje, iż dla $Re = 9$ i $Re = 29$ najkrótsze czasy mieszania uzyskano w mieszalniku M2 z mieszadłami oscylującymi dla $f = 0,92$ Hz. W mieszalniku M2 czas mieszania był o około 25% krótszy niż w mieszalniku M1. Dla $Re = 40$ czasy mieszania w mieszalniku M1 i M2 były porównywalne. Analiza uzyskanych wyników pokazuje, że dla mieszania w zakresie liczb Reynoldsa $Re < 40$ sugerowane jest stosowanie mieszania typu *forward-reverse*, natomiast mieszanie niecentryczne rekomenduje się stosować dla $Re > 40$.

Wnioski

Czterokrotne zwiększenie częstotliwości powoduje spadek czasu mieszania w przybliżeniu pięciokrotnie dla $Re = 9$ i około dwukrotnie dla $Re = 40$.

Porównanie czasów mieszania w mieszalnikach M1 i M2 pozwala stwierdzić, iż dla układów RT-RT i RT-PBT najmniejszy czas mieszania uzyskano w mieszalniku M2 (dla $f = 0,92$ Hz), natomiast dla układu PBT-PBT w mieszalniku M1, co potwierdza, że w układach niecentrycznych preferowane są mieszadła generujące przepływ osiowy. Wyższa efektywność mieszania *forward-reverse* zanika dla wartości $Re > 40$.

Wyniki badań wskazują, że zastosowanie mieszania typu *forward-reverse* może przyczynić się do znaczącego zwiększenia efektywności mieszania w różnych gałęziach przemysłu, w których wykorzystuje się płyny o dużych lepkościach.

LITERATURA

- Alvarez M.M., Muzzio F.J., Cerbelli S., Adrover A., Giona M., 1998, Self-similar spatiotemporal structure of intermaterial boundaries in chaotic flows. *Phys. Rev. Lett.*, **81**, 3395–3398. DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.3395.
- Cabaret F., Fradette, L., Tanguy P.A., 2008. New turbine impellers for viscous mixing. *Chem. Eng. Tech.*, **31**, 1806–1815. DOI: 10.1002/ceat.200800385.
- Dieulot J.Y., Petit N., Rouchon P., Delaplace G., 2005. An arrangement of ideal zones with shifting boundaries as a way to model mixing processes in unsteady stirring conditions in agitated vessels. *Chem. Eng. Sci.*, **60**, 5544–5554. DOI: 10.1016/j.ces.2005.03.067.
- Galetti C., Brunazzi E., 2008. On the main flow features and instabilities in an unbaffled vessel agitated with an eccentricity located impeller. *Chem. Eng. Sci.*, **63**, 4494–4505. DOI: 10.1016/j.ces.2008.06.007
- Lamberto D.J., Muzzio F.J., Swanson P.D., Tonkovich A.L., 1996. Using time-dependent rpm to enhance mixing in stirred vessel. *Chem. Eng. Sci.*, **51**, 733–741. DOI: 10.1016/0009-2509(95)00203-0.
- Lamberto D.J., Alvarez M.M., Muzzio M.J., 1999, Experimental and computational investigation of the laminar flow structure in a stirred tank. *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 919–942. DOI: 10.1016/S0009-2509(98)00275-9.
- Montante G., Bakker A., Paglianti A., Magelli F., 2006, Effect of the shaft eccentricity on the hydrodynamics of unbaffled stirred tanks. *Chem. Eng. Sci.*, **61**, 2807–2814. DOI: 10.1016/j.ces.2005.09.021.
- Nomura T., Uchida T., Takahashi K., 1997. Enhancement of mixing by unsteady agitation of an impeller in an agitated vessel. *J. Chem. Eng. Jap.*, **30**, 875–879. DOI: 10.1252/jcej.30.875
- Woźniowski S., 2011. Unsteadily agitation characteristics in vessel with forward-reverse rotating impeller. *Chem. Eng. Tech.*, **34**, 767–774. DOI: 10.1002/ceat.201000455.
- Woźniowski S., 2013. Turbulent forward-reverse mixing characteristics in vessel with multiple-turbine impellers. *J. Chem. Tech. Biotech.*, **88**, 483–490. DOI: DOI 10.1002/jctb.3871.
- Woźniowski S., Jędrzejczak Ł., 2011, Effect of eccentricity on laminar mixing in vessel stirred by double impellers. *Chem. Eng. Res. Des.*, **88**, 2268–2278, DOI: 10.1016/j.cherd.2011.04.004.
- Yoshida M., Nagai Y., Yamagiwa K., Ohkawa A., Tezura, S., 2009. Turbulent and laminar mixings in an unbaffled agitated vessel with an unsteadily angularly oscillating impeller. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **18**, 1665–1672. DOI: 10.1021/ie801502q.

Praca została wykonana w ramach działalności statutowej Politechniki Poznańskiej DS-PB 32/368/13.