

Waldemar SZAFERSKI¹, Piotr Tomasz MITKOWSKI¹, Agata MARECKA¹, Kinga SŁOWIŃSKA¹,
Marlena SZUSTER², Ewelina MATELSKA¹

e-mail: waldemar.szaferski@put.poznan.pl

¹ Zakład Inżynierii i Aparatury Chemicznej, Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska

² GlaxoSmithKline Pharmaceuticals S.A., Dział: Zarządzanie Zmianą Opakowań, Poznań

Właściwości pompujące zmodyfikowanego mieszadła HE-3X

Wstęp

W układach ciec-z ciało stałe składniki zwykle różnią się między sobą gęstością, co wpływa na typ powstającej zawiesiny. Najczęściej gęstość fazy rozpraszanej jest większa od gęstości fazy rozpraszającej, a więc cząstki w takim układzie dążą do gromadzenia się na dnie aparatu. Celem procesu mieszania jest więc podenerwanie ich z dna i rozproszenie w cieczy. Występują jednak i takie, w których gęstość fazy rozpraszanej jest mniejsza niż gęstość cieczy, w takim przypadku obserwuje się zawieszenie cząstek ciała stałego na powierzchni cieczy, co ma związek z działającą na nie siłą wyporu. W takich przypadkach, zmieszanie polegać będzie na *wchłonięciu* cząstek ciała stałego do wnętrza cieczy. W związku z powyższym rozróżnia się dwa podstawowe typy zawiesin: zawiesiny konwencjonalne i niekonwencjonalne.

W przypadku wytwarzania zawiesin niekonwencjonalnych cząstki ciała stałego unoszą się ku powierzchni. Takie zawiesiny określane są mianem *lekkich* [Karcz i in., 2006; 2007; Wójtowicz i in., 2009; Wójtowicz, 2014]. Do tego typu układów idealnie nadają się mieszadła, które wytwarzają osiowy lub promieniowo-osiowy strumień cieczy. Zasada powstawania zawiesin *lekkich* polega na wciąganiu cząstek ciała stałego do wnętrza cieczy oraz na równomiernym rozproszeniu ich w całej jej objętości za pomocą mieszadła.

Do wytworzenia zawiesiny konieczne jest osiągnięcie odpowiednich prędkości przepływu cieczy w mieszalniku. W tym celu należy znaleźć optymalną częstość obrotów mieszadła. W zależności od zastosowań technologicznych produkowanej zawiesiny występują różne wymagania, co do stopnia rozproszenia w niej cząstek stałych. W zawiesinach konwencjonalnych [Dyląg i in., 1995] występują dwa charakterystyczne stany graniczne rozproszenia fazy cząstek stałych. Pierwszym z nich jest stan, w którym cała faza stała zawieszona jest w cieczy i wprawiona jest w ruch, nie tworząc przy tym zalegającego na dnie mieszalnika nieruchomego osadu. Z kolei drugim stanem granicznym określa się zawiesinę, której cząstki stałe równomiernie rozproszone są w całej objętości zbiornika.

Konieczne jest wprowadzenie pewnego kryterium określającego, kiedy w danym mieszalniku występują opisane powyżej etapy zmieszania układu. Dzięki niemu możliwe będzie również doświadczalne wyznaczenie krytycznych częstości obrotów mieszadła pozwalające na wytworzenie zawiesiny. Istotne znaczenie ma określenie, kiedy osiągany jest stan zawiesiny całkowitej, którą charakteryzuje zawieszanie wszystkich cząstek ciała stałego w cieczy. Jest to bardzo skomplikowane, ponieważ różni autorzy zwracają uwagę na takie aspekty, jak określenie mocy mieszania przeliczonej na jednostkę objętości mieszanej cieczy lub określenie wartości minimalnej liczby *Reynoldsa* czy też określenie minimalnej częstości obrotów mieszadła. Najczęściej wykorzystywanym kryterium oceny jest kryterium wizualne zaproponowane przez *Zwieteringa* [1958]. Polega ono na tym, że cząstki fazy rozpraszanej pozostawać mogą w bezruchu maksymalnie przez jedną sekundę, po czym muszą być powtórnie wprawione w ruch. Liczbę obrotów mieszadła, przy której taki efekt jest osiągany nazywa się minimalną częstością obrotów mieszadła n_0 . Jest to zatem minimalna częstość obrotów mieszadła, przy której wytwarzana jest pełna zawiesina.

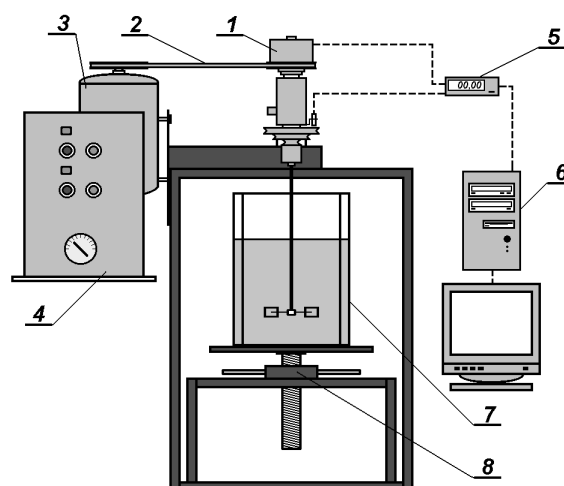
Stosowanie zbyt dużej częstości obrotowej mieszadła dla mieszania takich układów nie ma uzasadnienia ekonomicznego, bowiem szybki wzrost mocy mieszania, który jest niewspółmierny z zachodzącą jednocześnie wymianą masy powoduje jedynie wzrost zapotrzebowania

energii, a zatem wzrost kosztów eksploatacyjnych procesu.

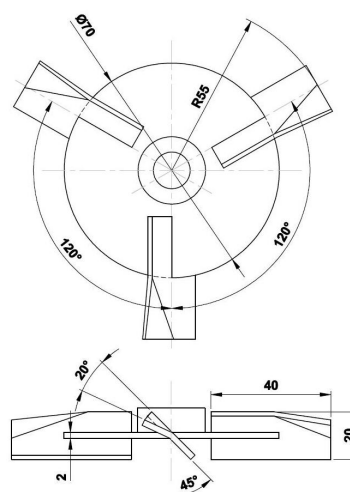
Celem przeprowadzonych badań doświadczalnych była analiza możliwości pompujących zmodyfikowanego mieszadła szybkoobrotowego HE-3X, na podstawie określenia minimalnych częstości obrotowych mieszadła potrzebnych do wytworzenia mieszaniny dwufazowej ciec-z ciało stałe.

Badania doświadczalne

Aparatura. Elementami stanowiska pomiarowego (Rys. 1) był płaskodenny mieszalnik o średnicy wewnętrznej 0,290 m z czterema standardowymi przegrodami płaskimi, napęd, układ regulacyjno-pomiarowy, podnośnik ułatwiający zmianę położenia mieszadła w aparacie oraz układ doprowadzający powietrze do mieszalnika [Szaferski i in., 2011].



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe: 1 – tensometryczny momentomierz, 2 – przekładnia pasowa, 3 – silnik, 4 – układ regulacji prędkości obrotowej n , 5 – miernik prędkości obrotowej z automatyczną obróbką wyników, 6 – komputer, 7 – układ zbiornik-mieszadło, 8 – podnośnik śrubowy.



Rys. 2. Schemat stosowanego w badaniach mieszadła HE-3X

Mieszadło. Badania doświadczalne przeprowadzono w mieszalniku zaopatrzonego w zmodyfikowane mieszadło szybkoobrotowe własnej konstrukcji HE-3X, przedstawione na rys. 2. Modyfikacja polegała na wprowadzeniu do mieszadła szybkoobrotowego *Chemineer HE-3* [Chemineer, 2013] dysku znanego z mieszadła turbinoowego *Rushtona*. Ze względu na testowy charakter badań wyniki porównywano z rezultatami otrzymanymi dla mieszadła szybkoobrotowego HE-3. Mieszadła umieszczano na wysokości 1/3, 1/2 oraz 2/3 średnicy zbiornika licząc względem jego dna. Zbiornik napelniony był do wysokości równej średnicy aparatu.

Materiały. Jako fazę rozpraszającą zastosowano wodę destylowaną oraz wodne roztwory poliakryloamidu *Rokrysol WF1* o stężeniu od 2000 do 4000 ppm, natomiast fazą rozpraszaną był granulaty polipropylenu (PP-RR) w kształcie walca oraz polietylen (PE-LD) w kształcie pastylek (Tab. 1). Ze względu na złożone właściwości polimerów oraz mieszanin ich roztworów przeprowadzono badania reologiczne wodnych roztworów *Rokrysolu WF1* o stężeniach od 2000 ppm do 4000 ppm (Tab. 2). Badania te były konieczne do określenia charakteru badanych zawiesin. Przeprowadzone zostały przy użyciu reometru rotacyjnego *Physica MCR-501* [Kembłowski i in., 1985]. W omawianym przypadku badania wykonano w układzie dwóch współosiowych cylindrów *DG-26,7/T200*.

Tab. 1. Parametry stosowanych granulatów

Parametr	Rodzaj granulatu	
	PE-LD	PP-RR
Masa pojedynczej cząsteczki, m [g]	0,0275	0,0847
Gęstość usypowa, ρ_u [kg/m ³]	587,6	565,6
Gęstość pomiarowa, ρ_s [kg/m ³]	921,3	905,6
Porowatość, ε [kg ³ /kg ³]	0,343	0,369
Średnica zastępcza, d_e [m]	0,00385	0,00563
Długość, h_s [mm]	3,48	7,23
Średnica, d_s [mm]	3,50	4,43
Barwa substancji	bezbarwna	czerwona

Metodyka. Średnicę zastępczą badanych granulatów d_e wyliczono w oparciu o rekomendowaną klasyczną zależność [Strek, 1981]:

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi\rho}} \quad (1)$$

Granulaty dodawano w równych porcjach w zakresie udziału masyowego ciała stałego (X_m) w mieszaninie od 0,005 do 0,035. W momencie wytworzenia zawiesiny kompletnej odczytywano wartość minimalnej częstotliwości obrotów mieszadła. Do oceny zawiesiny stosowano zmodyfikowane kryterium wizualne *Zwieteringa*. W przypadku zawiesin, w których gęstość ciała stałego jest mniejsza od gęstości cieczy, na powierzchni mieszaniny tworzy się charakterystyczna rozeta. Wraz ze wzrostem częstotliwości obrotowej mieszadła rozeta zanika. Częstotliwość obrotową mieszadła, przy której cząstki ciała stałego znikają z okolic przegród i nie pojawiają się na powierzchni mieszaniny dłużej niż przez jedną sekundę, uznawano jako charakterystyczną dla wytworzenia zawiesiny.

Wartość liczby *Reynoldsa* dla badanych płynów wyznaczano dla płynów nienewtonowskich korzystając z zależności [Gluz i Pavlushenko, 1967]:

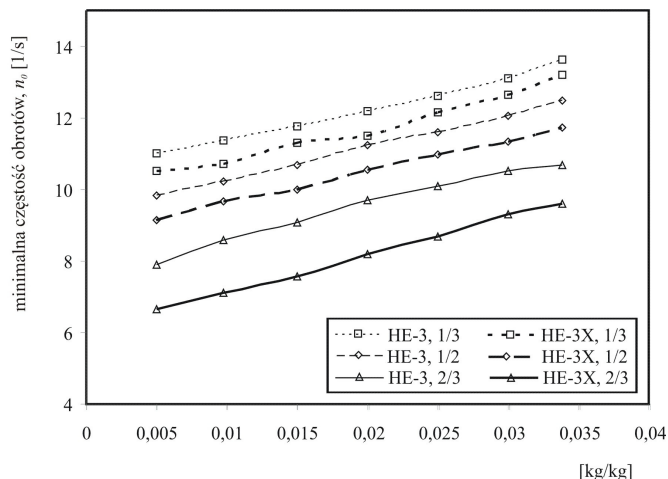
$$Re_m = (4\pi)^{1-m} \frac{n^{2-m} d^2 \rho}{K} \quad (2)$$

Tab. 1 Wyniki pomiarów reologicznych

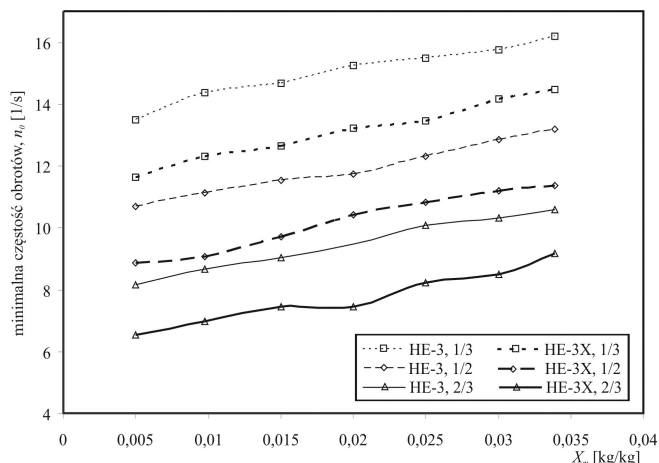
Roztwór wodny <i>Rokrysolu WF1</i> , [ppm]	m	K , [Pa·s ^m]
2000	0,753	0,039
3000	0,722	0,059
4000	0,694	0,085

Wyniki i dyskusja

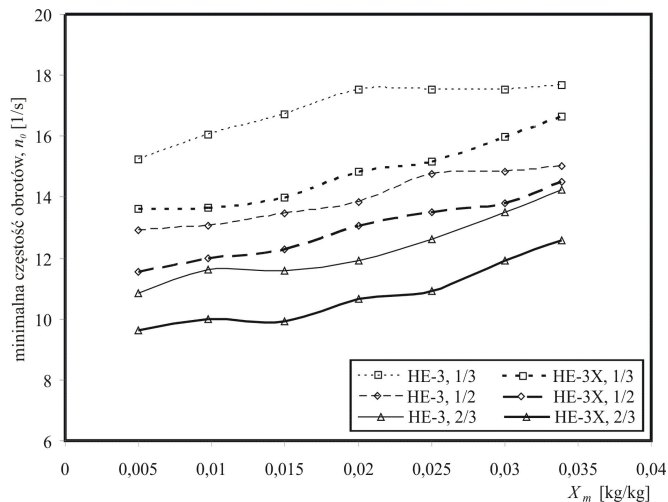
Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych wykazano, iż wytworzenie zawiesiny przez zmodyfikowane mieszadło HE-3X następuje przy niższych wartościach minimalnej częstotliwości obrotów mieszadła n_0 w porównaniu z mieszadłem HE-3 (Rys. 3-5).



Rys. 3. Minimalne częstotliwości obrotów mieszadeł podczas wytwarzania zawiesiny (PP-RR) w wodzie destylowanej



Rys. 4. Minimalne częstotliwości obrotów mieszadeł podczas wytwarzania zawiesiny (PP-RR) w wodnym roztworze poliakryloamidu *Rokrysol WF1* o stężeniu 2000 ppm



Rys. 5. Minimalne częstotliwości obrotów mieszadeł podczas wytwarzania zawiesiny (PP-RR) w wodnym roztworze poliakryloamidu *Rokrysol WF1* o stężeniu 4000 ppm

Zwiększenie stężenia poliakrylamidu *Rokrysol WF1* wywołuje zwiększenie obrotów mieszadła w celu osiągnięcia mieszaniny jednorodnej. Przykładowe wykresy dla granulatu polipropylenu obrazujące te zależności przedstawiono na rys. 3-5. Dla zawiesin polietylenu otrzymano zbliżony przebieg zależności. Dla badanych mieszadeł nie stwierdzono wpływu wielkości cząstek na minimalną częstość obrotów mieszadła potrzebną do wytworzenia badanych zawiesin w badanym zakresie stężeń poliakrylamidu.

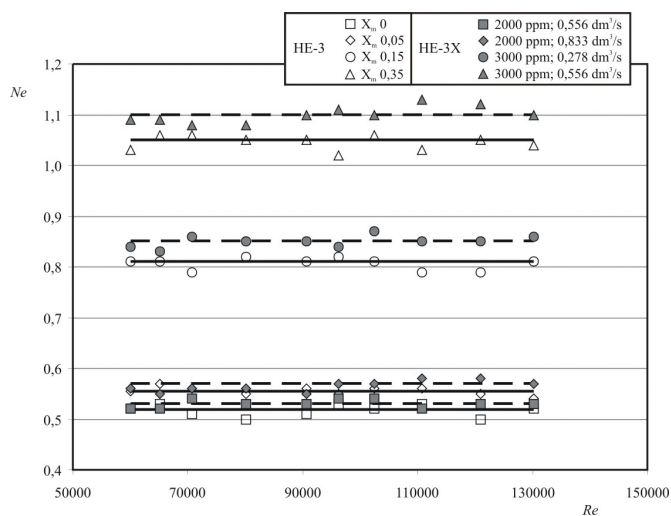
Podobnie, jak w przypadku wytwarzania zawiesin innymi mieszadłami, także badane mieszadła ujawniały wpływ udziału granulatu w mieszaninie na możliwości pompowania mieszadła, czego obrazem był wzrost częstości obrotów mieszadła potrzebnych do uzyskania mieszaniny kompletnej.

Na podstawie zależności liczby *Newtona*

$$Ne = \frac{P}{n^3 d^5 \rho} \quad (3)$$

od liczby *Reynoldsa* wyznaczono charakterystyki mieszadła HE-3X, które zestawiono w celach porównawczych z mieszadłem HE-3. Przykładowy wykres dla wybranych udziałów masowych przedstawiony na rys. 6 obrazuje, jak wprowadzona modyfikacja obniża liczbę mocy dla badanych zawiesin.

W pracy [Szaferski i in., 2013] przedstawiono podobne badania z użyciem wodnych roztworów gumy arabskiej wykazując identyczny charakter otrzymanych zależności liczby mocy od liczby *Reynoldsa* dla wodnych roztworów poliakrylamidu. Analiza aktualnych badań dla zawiesiny obu granulatów w wodzie destylowanej wykazała, że wpływ wielkości granulatu na liczbę mocy jest niewidoczny.



Rys. 6. Liczby mocy mieszania dla wytwarzanej zawiesiny polipropylenu (PP-RR) w wodnym roztworze poliakrylamidu o stężeniu 2000 ppm

W mieszaninie dwufazowej, której fazą ciągłą była woda destylowana, zaobserwowano wpływ udziału granulatu na liczbę mocy. Dla mieszadła HE-3X wartość liczby mocy mieściła się w zakresie $0,60 \div 0,90$ dla badanego zakresu udziału masowego wynoszącego $0,005 \div 0,35$. W przypadku roztworów poliakrylamidu wartości zmieniały się w zakresie $0,69 \div 1,22$. Wartości najwyższe uzyskano dla roztworu o stężeniu 4000 ppm. Analiza nie dała jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, czy wielkość granulatu ma wpływ na liczbę mocy mieszania dla badanych wodnych roztworów polimeru.

Porównując zastosowane w badaniach mieszadło HE-3X i HE-3, zauważyć można zmniejszenie minimalnej częstości obrotów potrzebnej do wytworzenia mieszaniny.

Zmiana konstrukcyjna (mieszadło HE-3X ma dodatkowy dysk) powoduje co prawda wzrost liczby *Newtona* (mieszadło HE-3X ma

dodatkowy dysk), ale jednocześnie uzyskuje się zawiesinę przy niższych częstościach obrotów mieszadła.

Podsumowanie i wnioski

Wykazano, iż wytworzenie zawiesiny przez zmodyfikowane mieszadło HE-3X, w stosunku do mieszadła HE-3, następuje przy niższych wartościach minimalnej częstości obrotów mieszadła, a na ich zwiększenie wpływa wzrost stężenia roztworu zastosowanego polimeru, w badanym przedziale stężeń od 1000 do 4000 ppm.

W badanym zakresie średnic zastępczych nie wykazano wpływu średnicy granulatu na możliwości pompujące mieszadeł. Stosując badane mieszadła nie zaobserwowano zatem wpływu wielkości cząstek na minimalną częstość obrotów mieszadła dla użytych granulatów.

Analizowano również wpływ wysokości zawieszenia mieszadła na właściwości pompujące mieszadła HE-3X. Dla mieszadła umieszczonego na 2/3 wysokości cieczy w aparacie (licząc od dna) najszybciej otrzymywano zawiesinę kompletną.

Przeprowadzona analiza wartości liczby mocy mieszania wykazała jej wzrost przy zwiększaniu udziału granulatów w mieszaninie oraz zwiększaniu stężenia polimeru w badanych roztworach.

W przedstawionych badaniach zawiesina wytwarzana z granulatu o gęstości mniejszej od gęstości cieczy miała reprezentować mieszaninę modelową odpowiadającą zawiesinie, jaka może trafiać do oczyszczalni ścieków.

Mieszadło HE-3X może stanowić alternatywę dla innych mieszadeł, a wprowadzona modyfikacja pozwala na jego zastosowanie podczas dyspergowaniu gazu w cieczy. Przy niskim zapotrzebowaniu energii, w porównaniu do często stosowanego mieszadła turbinowego *Rushtona*, może znacznie obniżyć koszty procesowe.

LITERATURA

- Chemineer, 2013. *HE-3 High-Efficiency Impeller*, Bulletin 713. (10.2013): http://www.chemineer.com/literature/item/download/400_61aeddd1d68dcf9bf48e0d8c2fe5bb14.html
- Dyląg M., Talaga J., 1995. Modelowanie przepływu wielofazowego w mieszalniku. *Inż. Chem. Proc.*, 3, 407-420
- Gluz M.D., Pavlushenko I.S., (1967). Experimental study of heat transfer while stirring of non-Newtonian fluids (in Russian). *J. App. Chem. USSR*, 40, 2475-2483
- Karcz J., Mackiewicz B., (2006). Wpływ skali zbiornika na warunki wytwarzania zawiesiny lekkiej w obecności fazy gazowej. *Inż. Ap. Chem.*, 45(6s), 108-109
- Karcz J., Mackiewicz B., (2007). Wpływ oprzegrodzenia mieszalnika na warunki wytwarzania suspensji lekkich cząstek o różnej zwilżalności. *Inż. Ap. Chem.* 4-5, 74-79
- Kembłowski Z., (1985). *Reometria płynów nienewtonowskich*. WNT, Warszawa
- Stręk F., (1981). *Mieszanie i mieszalniki*. WNT, Warszawa
- Szaferski W., Broniarz-Press L., Dulka D., (2011). Wytwarzanie zawiesiny flotującej w mieszalniku o niestandardowej geometrii. *Przem. Chem.*, 90, 1686-1688
- Szaferski W., Mitkowski P.T., Kondras A., (2013). Wytwarzanie zawiesin zmodyfikowanym mieszadłem HE-3X. *Inż. Ap. Chem.*, 52(6), 566-567
- Wójtowicz R., Kamiński J., (2009). Minimalna częstość obrotów mieszadła podczas wytwarzania zawiesin lekkich w mieszalniku mechanicznym. *Inż. Ap. Chem.* 48(1), 126-127
- Wójtowicz R., (2014). Choice of an optimal agitated vessel for the drawdown of floating solids. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53, 13989-14001. DOI: 10.1021/ie500604q
- Zwietering T.N., (1958). Suspending of solid particles in liquid by agitators. *Chem. Eng. Sci.*, 8(3/4), 244-253. DOI: 10.1016/0009-2509(58)85031-9

Praca była finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego jako grant 03/32/DSPB/0602.