

ANDRZEJ GIERCZYCKI
MARCIN LEMANOWICZ

Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Śląska, Gliwice

Badania wpływu mieszania na rozmiary agregatów ciała stałego zawieszonych w cieczy

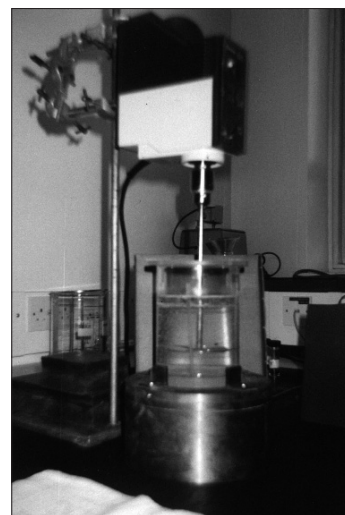
Wprowadzenie

Zawiesiny ciała stałe – ciecz są powszechnie spotykane w przyrodzie i technice [1–4]. W zależności od fizykochemicznych właściwości obu faz, jak również parametrów hydrodynamicznych otaczającej cieczy, cząstki ciała stałego mogą łączyć się tworząc agregaty, które z kolei przejawiają większą lub mniejszą tendencję do rozpadu [5–7]. Rozkład ziarnowy i rozmiary agregatów w zawiesinie są niezwykle istotne z praktycznego punktu widzenia w wielu gałęziach przemysłu chemicznego, spożywczego, farmaceutycznego, kosmetycznego, w przeróbce kopaliny, oczyszczaniu ścieków czy też inżynierii materiałowej [8–10]. Opisane badania są próbą ujęcia wpływu stopnia burzliwości oraz sposobu mieszania na rozmiary i ewolucję populacji agregatów ciała stałego w zawiesinach.

Część doświadczalna

Badania prowadzono dla zawiesiny monodispersyjnych kulek lateksu o rozmiarach $d_p = 10,2$ i $3,3 \mu\text{m}$ (producent *Duke Scientific Corp.*) w wodzie destylowanej i zdejonizowanej w obecności wielkocząsteczkowego, poliakryloamidowego, kationowego flokulanta o nazwie handlowej *Zetag 63* (producent *Allied Colloids Ltd.*), stosowanego w procesach oczyszczania ścieków. Stężenie ciała stałego w wodzie dla obu rodzajów kulek lateksu było jednakowe i wynosiło $0,5 \text{ kg/m}^3$, a flokulanta – $0,12 \cdot 10^{-3} \text{ kg/kg}$ (w odniesieniu do ciała stałego). W badaniach wykorzystano instalację laboratoryjną składającą się z dwóch mieszalników zbiornikowych wyposażonych w mieszadło obrotowe w postaci otwartej turbiny o sześciu łopatkach oraz drugie mieszadło w postaci pełnego krążka, osadzo-

ne w specjalnej klatce z cienkich prętów stalowych i wykonujące ruch posuwisto-zwrotny. Na rys. 1 przedstawiono fotografię mieszalnika z mieszadłem obrotowym w czasie pracy. Badania procesów agregacji prowadzono od momentu dodania flokulanta do zawiesiny kulek lateksu w wodzie, a kończono po 30 min uzyskując stan dynamicznej równowagi, w którym brak było widocznych zmian rozmiarów agregatów. W określonych interwałach czasowych (0; 1; 5; 10; 30 min), pobierano próbki zawiesiny, które analizowano pod kątem rozkładu ziarnowego i średniego rozmiaru *Sautera* (d_{32}). Testy te wykonywano w helowo-neonowym, laserowym analizatorze cząstek typu *Malvern 3600Ec* (producent *Malvern Instruments Ltd.*). Ocenę intensywności mieszania zawiesiny w mieszalniku oparto na wartości jednostkowej mocy mieszania. Parametr ten dla mieszadła obrotowego obliczano z zależności:



Rys. 1. Widok mieszalnika z mieszadłem obrotowym w czasie pracy

$$\langle \varepsilon \rangle_{sr} = \frac{Ne_o n^3 d_{m,o}^5}{V_o} \quad (1)$$

a dla mieszadła o ruchu posuwisto-zwrotnym elementu mieszającego:

$$\langle \epsilon \rangle_{sr} = \frac{Ne_w (2\pi A f)^3 d_{m,w}^2}{V_w} \quad (2)$$

przy czym liczby mocy (Ne_o i Ne_w) dla zakresu burzliwego wyznaczono z charakterystyk mocy mieszadeł, otrzymanych we wcześniejszych badaniach [11,12]. W tabelicy 1 ujęto ważniejsze parametry geometryczne i procesowe instalacji doświadczalnej.

Tablica 1

Parametry geometryczne i procesowe instalacji doświadczalnej

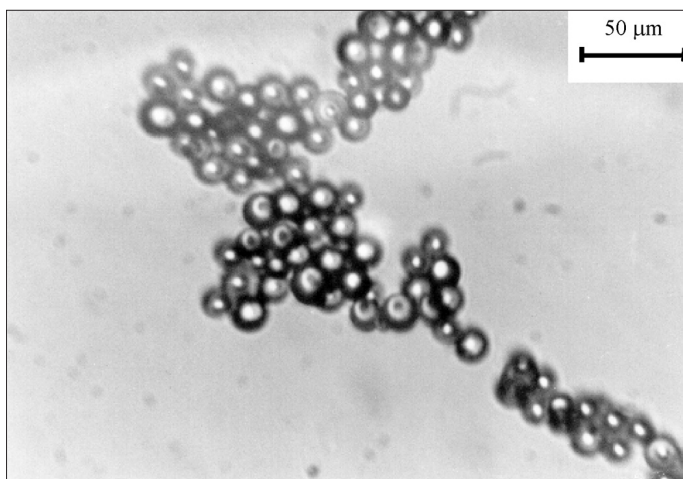
Zbiornik z mieszadłem obrotowym	
zbiornik cylindryczny z 4 przegrodami	$D = 0,05 \text{ m}$; $H/D = 1$; $V_o = 0,785 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$; $h/D = 1/3$
mieszadło: otwarta metalowa turbina o 6 pochylonych łopatkach	$d_{m,o} = 0,05 \text{ m}$; $Ne_o = 1,72$; $n = 5,0-13,5 \text{ 1/s}$; $\langle \epsilon \rangle_{sr} \cong 0,013-0,499 \text{ m}^2/\text{s}^3$
Zbiornik z mieszadłem wykonującym ruch posuwisto-zwrotny	
zbiornik cylindryczny bez przegród	$D = 0,05 \text{ m}$; $H/D = 1$; $V_w = 1,100 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
pełny krążek metalowy	$d_{m,w} = 0,089 \text{ m}$; $b \cong 0,003 \text{ m}$; $A = 0,015; 0,025; 0,035 \text{ m}$; $Ne_w = 7,68$; $f = 0,67-6,67 \text{ 1/s}$; $\langle \epsilon \rangle_{sr} \cong 0,013-0,499 \text{ m}^2/\text{s}^3$

Wyniki doświadczeń i ich omówienie

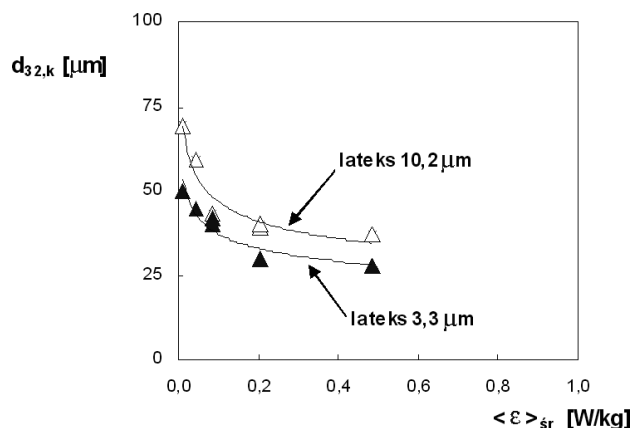
W wyniku przeprowadzonych doświadczeń otrzymano łącznie 24 serie pomiarowe, po 12 dla kulek lateksu określonego rozmiaru, z których każda obejmowała 5 pobranych próbek. Na rys. 2 pokazano fotografię mikroskopową agregatów z kulek lateksu wykonaną pod mikroskopem typu *Vickers*.

W celu porównania wpływu rodzaju cząstek i sposobu mieszania sporządzono zbiorcze wykresy zależności końcowego rozmiaru *Sautera* $d_{32,k}$ od jednostkowej mocy mieszania $\langle \epsilon \rangle_{sr}$ dla wszystkich serii pomiarowych, a więc po czasie 30 min (Rys. 3 i 4).

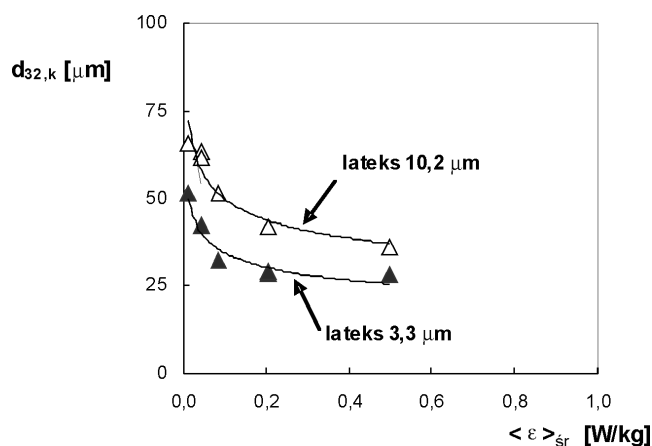
Z rysunków tych widać, że większe agregaty otrzymywano dla kulek lateksu o większych średnicach początkowych, przy czym różnice między rozmiarami końcowymi były mniejsze niż między kulkami na początku agregacji. Można to wytłumaczyć większym wpływem występującego równocześnie



Rys. 2. Agregat z kulek lateksu o średnicy początkowej 10,2 μm utworzony w mieszalniku obrotowym



Rys. 3. Zmiany końcowego rozmiaru *Sautera* agregatów z lateksu i doświadczeń z mieszadłem o posuwisto-zwrotnym ruchu elementu mieszającego



Rys. 4. Zmiany końcowego rozmiaru *Sautera* agregatów z lateksu i doświadczeń z mieszadłem obrotowym

z agregacją procesu rozpadu dla agregatów o większych rozmiarach. Nie zaobserwowano natomiast zróżnicowania końcowych rozmiarów *Sautera* agregatów wywołanych innym sposobem mieszania. Zjawisko to można z kolei tłumaczyć silnym wpływem flokulanta w mechanizmie mostkującym dla kulek lateksu oraz wysoką wytrzymałością mechaniczną połączeń pomiędzy cząstkami tworzącymi agregat.

Pokazane na rys. 3 i 4 krzywe regresji mają postać:

$$d_{32,k} = A(\langle \epsilon \rangle_{sr})^B \quad (3)$$

W tabelicy 2 zebrano wartości współczynnika A , wykładnika B oraz współczynnika korelacji R^2 dla krzywych pokazanych na rys. 3 i 4.

Tablica 2

Wartości stałej, wykładnika i współczynnika korelacji R^2 dla równań opisujących zależność końcowego rozmiaru *Sautera* od jednostkowej mocy mieszania

Średnica początkowa kulek lateksu [μm]	Mieszadło o ruchu obrotowym			Mieszadło o ruchu posuwisto-zwrotnym		
	A	A	R^2	A	A	R^2
10,2	32,6	-0,18	0,92	30,2	-0,19	0,93
3,3	22,5	-0,18	0,91	24,8	-0,18	0,91

Przyjmując, że zależność $d_{32,k}$ od $\langle \epsilon \rangle_{sr}$ ma podobny charakter jak w przypadku rozmiaru maksymalnego agregatów można stwierdzić, że wartości wykładnika B mieszczą się w zakre-

sach podawanych przez różnych autorów dla agregacji ortokinetycznej zachodzącej w lepkościowym podzakresie dyssypacji energii kinetycznej turbulencji, np. wg *Mühle'go* [13] zakres ten wynosi od (-0,15) do (-0,75), a wg *Baldygi* i *Bourne'a* [5] od (-0,14) do (-0,50).

Podsumowanie

Przeprowadzono badania procesu agregacji testowej wywołanej dodatkiem flokulanta zawiesiny monodispersyjnych kulek lateksu w wodzie destylowanej. Agregacja zachodziła podczas mieszania burzliwego w mieszalnikach laboratoryjnych o odmiennej hydrodynamicie (stosowano mieszadła wykonujące ruch obrotowy lub posuwisto-zwrotny). Mierzono średni rozmiar *Sautera* agregatów ciała stałego w próbkach zawiesiny i stwierdzono, że zmniejsza się on wraz ze wzrostem jednostkowej mocy mieszania. Nie stwierdzono natomiast wpływu zastosowanej techniki mieszania na wielkość rozmiaru *Sautera* powstających agregatów. Może to świadczyć o braku wpływu nierównomierności rozkładu sił hydrodynamicznych występujących w mieszalniku na wielkość agregatów dla układu kulki lateksu – woda destylowana. Wynik ten odbiega od zachowania się zawiesin cząstek innych ciał stałych, np. kredy w wodzie [10], gdzie wpływ ten był wyraźnie widoczny. W przypadku agregatów z lateksu można przypuszczać, że decydującą rolę odgrywają siły wiążące, występujące w mostkach polimerowych utworzonych z flokulanta i łączących kulki lateksu w agregacie. Otrzymany rezultat skłania do wniosku, że różne układy zawiesin zachowują się odmiennie i wymagają odrębnych badań.

Oznaczenia

A – amplituda drgań, [m]
 b – grubość tarczy mieszadła wykonującego ruch posuwisto-zwrotny, [m]
 $d_{m,o}$, $d_{m,w}$ – średnice mieszadeł, [m]
 d_p – średnica kulek lateksu, [μm]

d_{32} , $d_{32,k}$ – średni i końcowy rozmiar *Sautera* dla agregatów, [μm]

D – średnica mieszalnika, [m]

f – częstość drgań mieszadła wykonującego ruch posuwisto-zwrotny, [1/s]

H – wysokość cieczy w mieszalniku, [m]

n – częstość obrotów mieszadła turbinowego, [1/s]

N – moc mieszania, [W]

V_o , V_w – objętość cieczy w mieszalnikach, [m^3]

$\langle \epsilon \rangle_{sr}$ – jednostkowa moc mieszania, [W/kg , m^2/s^3]

ρ – gęstość cieczy, [kg/m^3]

$Ne_o = \frac{N}{\rho n^3 d_{m,o}^5}$ – liczba mocy dla mieszalnika z mieszadłem turbinowym

$Ne_w = \frac{N}{\rho (2\pi A f)^3 d_{m,w}^5}$ – liczba mocy dla mieszalnika z mieszadłem wykonującym ruch posuwisto-zwrotny

LITERATURA

1. *H. Sonntag*: Koloidy, PWN, Warszawa 1982.
2. *R.J. Hunter*: Introduction to Modern Colloid Science, Oxford Univ. Press, Oxford 1993.
3. *P. Ayazi Shamlou P. (red.)*: Processing of Solid-Liquid Suspensions, Butterworth-Heinemann, Oxford 1993.
4. *L. Svarovsky*: Solid-Liquid Separation, Butterworth, London 1990.
5. *J. Baldyga and J.R. Bourne*: Turbulent Mixing and Chemical Reactions, John Wiley & Sons, Chichester 1999.
6. *J. Gregory*: Fundamentals of flocculation, Critical Reviews in Environmental Control, **19**, 185 (1989).
7. *E.T. Dutkiewicz*: Fizykochemia powierzchni, WNT, Warszawa 1998.
8. *A.M. Anielak*: Chemiczne i fizykochemiczne oczyszczanie ścieków, PWN, Warszawa 2000.
9. *A.D. Randolph, M.A. Larson*: Theory of Particulate Processes, Academic Press, Inc., New York 1988.
10. *A. Gierczycki*: Powstawanie i rozpad agregatów ciała stałego zawieszonych w cieczy, ZN Pol. Śl., nr 1663, Gliwice 2005.
11. *P. Ayazi Shamlou, A.T. Gierczycki, N.J. Titchener-Hooker*: Chem. Eng J., **62**, 23 (1996).
12. *A.T. Gierczycki*: Chem. Biochem. Eng. Q., **12**, 97 (1998).
13. *B. Dobiáš*: Coagulation and Flocculation: Theory and Application, Surfactant Science Series, vol. 47, Marcel Dekker, New York 1993.