

Wojciech ORCIUCH¹, Łukasz MAKOWSKI¹, Radosław ADAMEK², Jerzy BAŁDYGA¹

e-mail: wojciech.orciuch@pw.edu.pl

¹ Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa²ICHEMAD-Profarb Sp. z o.o., Gliwice

Nowe konstrukcje efektywnych energetycznie urządzeń mieszających do wytwarzania zawiesin

Wstęp

Urządzenia typu rotor-stator oraz mieszalniki zbiornikowe są powszechnie stosowane w wielu technologiach do homogenizacji, dyspergowania, wytwarzania emulsji, prowadzenia reakcji chemicznych z dużą selektywnością czy niszczenia komórek. Producenci tych aparatów oferują zarówno konstrukcje ogólnego przeznaczenia jak i specjalne rozwiązania dedykowane konkretnym aplikacjom. Jednakże, nawet w przypadku rozwiązań specjalnych, ich działanie można polepszyć pod kątem podniesienia jakości produktu i ograniczenia zużycia energii poprzez modyfikacje geometrii urządzeń i dobór właściwych parametrów pracy. Współcześnie stosuje się z powodzeniem metody CFD do projektowania konstrukcji takich aparatów oraz przewidywania właściwości produktów wytwarzanych w tych aparatach [Bałdyga i in., 2008].

Niniejsza praca dotyczy procesu wytwarzania zawiesin w przepływowym urządzeniu typu rotor-stator i mieszalniku zbiornikowym z mieszadłem. Zawiesina składa się głównie z cząstek węgla wapnia i wody i jest półproduktem w procesie wytwarzania farb wodnych. W ostatnim etapie mieszania dodawane są pozostałe składniki w celu otrzymania gotowej farby.

Pracę rozpoczęto od zbadania przebiegu procesów w istniejących aparatach. Zaobserwowano, że cząstki suchego węgla są dobrze zwilżalne i łatwo dyspergują w wodzie. Nowe konstrukcje aparatów powstały dzięki modelowaniu CFD. Wykorzystano zweryfikowany doświadczalnie model reologii zawiesiny, który uwzględnia obecność cząstek o dwóch różnych rozmiarach. Takie cechy fazy rozproszonej mają wpływ na lepkość pozorną zawiesiny poprzez wzrost stopnia upakowania cząstek. Model reologiczny uwzględnia też koncepcję warstwy podwójnej i pozornego rozmiaru cząstek [Genovese, 2012].

Reologia zawiesiny *Saxolitu*

W badaniach zastosowano węgiel wapnia, minerał o handlowej nazwie *Saxolit* o gęstości ok. 2,7 g/cm³. Jest to krystaliczne ciało stałe o niskiej rozpuszczalności w wodzie. W roztworze wodnym częściowo hydroлізуje, co prowadzi do ustalenia się wartości *pH* na poziomie powyżej 7 (w badanym przypadku pomiędzy 7,24 a 8,03).

Ładunek elektryczny na powierzchni krystalitów jest dodatni w normalnych warunkach, dzięki niewielkiej przewodze jonów wapnia. Wielkość ładunku powierzchniowego zależy od stężenia jonów wapniowych i wartości *pH*. Ładunek spada do zera w punkcie izoelektrycznym, dla wartości *pH* od około 10,6 do 11,0. Powyżej punktu izoelektrycznego ładunek staje się ujemny. Zatem efekty odpychania elektrostatycznego będą występowały poniżej i powyżej *pH* 10 [Genovese, 2012] co zwiększa lepkość zawiesiny [Rubio-Hernández i in., 2004].

W celu określenia wpływu obecności cząstek w zawiesinie na lepkość, rozważania rozpoczęto od klasycznej zależności na lepkość względną

$$\eta = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + 2,5\phi \quad (1)$$

gdzie: μ – lepkość zawiesiny, μ_0 – lepkość fazy ciągłej a ϕ – objętościowy ułamek cząstek w zawiesinie.

Jeśli cząstki odpychają się, to przy stałej lepkości fazy ciągłej, lepkość zawiesiny wzrasta i zależność (1) zmienia się do następującej formy [Genovese, 2012]:

$$\eta = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + 2,5\phi(1 + p) \quad (2)$$

gdzie: p oznacza współczynnik pierwotnego efektu elektrolepkiego.

W przypadku dużych wartości ϕ , tak jak w zawiesinach będących bazą farb, można wykorzystać zależność [Genovese, 2012]

$$\eta = \frac{\mu}{\mu_0} = \left[1 - \frac{\phi}{\phi_m} \left(\frac{a_{eff}}{a} \right)^3 \right]^{-2} \quad (3)$$

gdzie: a – promień cząstki, a_{eff} – efektywny promień cząstki.

Zależność (3) została wykorzystana do określenia lepkości zawiesin *Saxolitu*. W pierwszym kroku do wody dodawany był *Saxolit-2* o średnim rozmiarze cząstek $d_{43} = 4,3 \mu\text{m}$. Wartość ułamka objętościowego cząstek przy maksymalnym upakowaniu można w tym przypadku przyjąć na poziomie $\phi_m = 0,63$ co dało następującą zależność na lepkość wodnej zawiesiny *Saxolitu 2*:

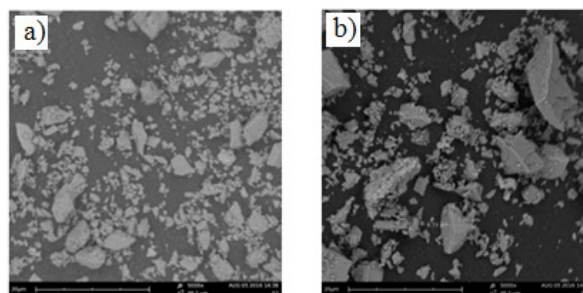
$$\eta = \frac{\mu}{\mu_0} = \left[1 - \frac{\phi}{0,63} \cdot 3 \right]^{-2} = \left[1 - \frac{\phi}{0,21} \right]^{-2} \quad (4)$$

W drugim kroku do zawiesiny *Saxolitu-2* dodano *Saxolit-10*, w którym średni rozmiar kryształów wynosi 10,4 μm . Ponieważ teraz między dużymi cząstkami mieszczą się małe, maksymalne upakowanie cząstek daje wartość $\phi_m = 0,745$ i w przypadku złożonej zawiesiny jej lepkość względna wynosi

$$\eta = \frac{\mu}{\mu_0} = \left[1 - \frac{3\phi_1 + 1,6\phi_2}{0,745} \right]^{-2} \quad (5)$$

gdzie: ϕ_1 i ϕ_2 – objętościowe udziały w zawiesinie odpowiednio *Saxolitu-2* i *Saxolitu-10*.

Zdjęcia mikroskopowe cząstek *Saxolitu-2* i *Saxolitu-10* przedstawiono na rys. 1.

Rys. 1. Zdjęcia SEM cząstek: a) *Saxolitu-2*, b) *Saxolitu-10*

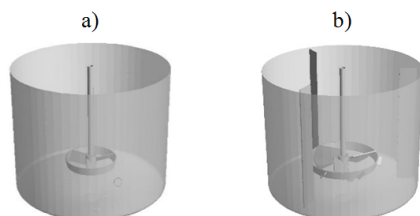
Modelowanie mieszalnika zbiornikowego do wytwarzania zawiesiny

W obliczeniach rozważano dwa mieszalniki: istniejący oraz prototyp. Średnica mieszadła w pierwszym, istniejącym mieszalniku (referencyjnym) wynosiła 0,50 m, zaś w drugim (prototypowym) była równa 0,74 m. Obliczenia przeprowadzono dla liczb *Reynoldsa* w zakresie $Re = 70 \div 100$. Obliczenia pola przepływu wykonano

z wykorzystaniem pakietu obliczeniowej mechaniki płynów *Fluent 18*.

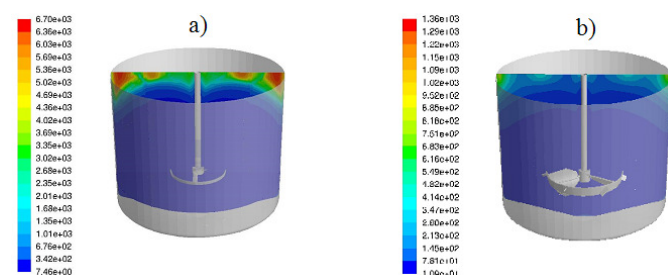
Do odwzorowania geometrii układu zastosowana została siatka niestrukturalna, silnie zagęszczona wokół mieszadła, czyli w obszarze w którym spodziewane są największe wartości gradientów prędkości. Siatki numeryczne wykorzystane w obliczeniach zawierały około 3 000 000 tetraedralnych węzłów obliczeniowych.

Na rys. 2 przedstawiono geometrię rozważanych układów, natomiast na rys. 3 rozkłady konturowe lepkości dynamicznej.



Rys. 2. Geometria mieszalników: a) mieszalnik referencyjny, b) prototyp

Na podstawie symulacji obliczono moc mieszania i czas mieszania w rozważanych aparatach. Dodatkowo przeprowadzono symulację numeryczną dla prototypu nie wyposażonego w przegrody.



Rys. 3. Rozkłady konturowe lepkości dynamicznej zawiesiny μ [Pas] dla częstotliwości obrotowej równej 70 rpm: a) mieszalnik referencyjny, b) prototyp

Wyniki przedstawione w tab. 1 jasno wskazują na zalety rozwiązań prototypowych w porównaniu z istniejącym mieszalnikiem referencyjnym. Co prawda moc mieszania rośnie około 3-krotnie jednak jednocześnie czas mieszania jest ponad 10 razy krótszy. Rozwiązania prototypowe z przegrodami i bez przegród mają niemal identyczne czasy i moce mieszania. To potwierdza, że z przegród można zrezygnować bez szkody dla wydajności mieszania tego typu zawiesiny.

Tab. 1. Parametry pracy mieszalników

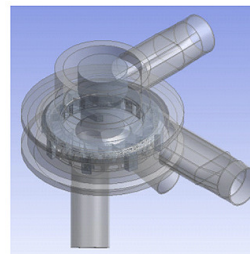
Mieszalnik	Obroty, [rpm]	Moc mieszania, [W]	Czas mieszania, [s]
Referencyjny	70	271,45	3009
Referencyjny	100	524,95	1263
Prototyp z przegrodami	70	788,77	214
Prototyp z przegrodami	100	1711,61	95
Prototyp bez przegród	70	786,59	199
Prototyp bez przegród	100	1 709,63	90

Modelowanie dyspergatora przepływowego

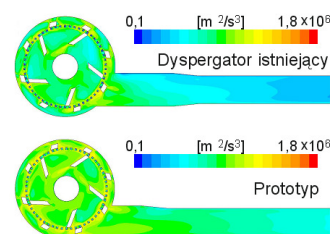
Dyspergator przepływowy jest przeznaczony do prowadzenia procesu dyspergowania produktów sypkich i ciekłych. Medium dyspergowane jest w zamkniętej komorze do której doprowadzane są osobno składniki suche i mokre. Do dyspergowania zastosowano wirujący rotor i nieruchomy stator. Dyspergator istniejący wybrano jako rozwiązanie referencyjne w celu zaproponowania zmian kon-

strukcyjnych przy zachowaniu ogólnego kształtu i rozmiarów aparatu.

Symulacje przeprowadzono przy założeniu stałej temperatury, dla ustalonego w czasie stanu pracy dyspergatora, dla trzech różnych częstotliwości obrotów rotora: 300, 1000 i 3000 rpm. Na rys. 4 przedstawiono trójwymiarowy schemat urządzenia, zaś na rys. 5 rozkłady konturowe szybkości dysypacji energii w obu rozważanych układach.



Rys. 4. Schemat dyspergatora przepływowego



Rys. 5. Rozkłady konturowe szybkości dysypacji energii w dyspergatorze istniejącym (referencyjnym) i prototypowym dla częstotliwości obrotów rotora 1000 rpm, skala logarytmiczna

Analizując wyniki w tab. 2 oraz na wykresach konturowych można zauważyć, że we wszystkich rozważanych wariantach uzyskano intensywne mieszanie w całej komorze dyspergatora, istnienie obszarów zwiększonych naprężeń hydrodynamicznych wokół statora i przy rotorach.

Tab. 2. Wartości mocy mieszania dla dyspergatora przepływowego

Dyspergator	Obroty rotora [rpm]	Moc [W]
Referencyjny	300	79,85
Referencyjny	1000	1 703,45
Referencyjny	3000	39 315,63
Prototyp	1000	1 660,17

Wyniki symulacji wykazały dobre wymieszanie składników na wylocie z komory dyspergatora i pełne ujednorodnienie dyspersji w przewodzie wylotowym. Jednakże, zastosowanie nowego rozwiązania zapewnia zredukowanie oporów przepływu i zwiększone zdolności pompowania.

Wyniki symulacji wykazały, że możliwe jest obniżenie częstotliwości obrotów rotora z 3000 do 1000 rpm, a to oznacza, że zużycie energii może być zredukowane 15-krotnie w stosunku do rozwiązania oryginalnego.

LITERATURA

Bałdyga J., Orciuch W., Makowski Ł., Malik K., Özcan-Taşkın G., Eagles W., Padron G., (2008). Dispersion of nanoparticle clusters in a rotor-stator mixer. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47, 3652-3663. DOI: 10.1021/ie070899u

Genovese D.B., (2012). Shear rheology of hard-sphere, dispersed, and aggregated suspensions and filler-matrix composites. *Adv. Coll. Interface Sci.*, 171-172, 1-16. DOI: 10.1016/j.cis.2011.12.005

Rubio-Hernández, F. J., Carrique F., Ruiz-Reina E., (2004). The primary electroviscous effect in colloidal suspensions. *Adv. Coll. Interface Sci.*, 107, 51-60. DOI: 10.1016/j.cis.2003.09.001