

František RIEGER¹, Pavel SEICHTER², Czesław KUNCEWICZ³, Dorin CERES¹

Frantisek.Rieger@fs.cvut.cz

¹ Politechnika Czeska w Pradze, Wydział Mechaniczny² Techmix sp. z.o.o., Brno³ Politechnika Łódzka, Katedra Aparatury Procesowej

Dobór mieszadeł do bioreaktorów

Wstęp

Celem mieszania w reaktorach wytwarzających biogaz jest ujednolicenie stężenia biomasy w całym reaktorze, jak również zapobieżenie sedymentacji frakcji ciężkiej oraz tworzenie kożucha z substancji lżejszych od wody na powierzchni swobodnej. Dodatkowym warunkiem, który należy brać pod uwagę przy projektowaniu układów mieszających w bioreaktorach jest unikanie możliwości niszczenia kultury bakteryjnej na skutek dużych naprężeń ścinających generowanych przez obracające się mieszadło. Ze względu na duże średnice bioreaktorów (rzędu kilkunastu metrów) zaprojektowane mieszadło powinno również wykazywać małe zapotrzebowanie mocy do jego napędu.

Celem pracy było zaprojektowanie oraz przebadanie mieszadła, które mogłoby być bardziej efektywne od standardowego sześciolopatkowego mieszadła turbinowego o łopatkach pochylonych (rys. 1a). Do badań wybrano mieszadło TX535 (rys. 1b) o bardziej optymalnych kształtach niż mieszadło standardowe. Oba typy mieszadeł wytwarzają w reaktorze osiowe strumienie cieczy zapobiegające w dużym stopniu zaleganiu zawiesiny ciała stałego na dnie reaktora. O końcowej efektywności pracy obu mieszadeł będą decydowały zarówno ich wydajności pompowania, jak również wartości mocy mieszania.



Rys. 1. Sześciolopatkowe mieszadło turbinowe (a) oraz mieszadło TX535 (b)

Badania dotyczące warunków wytwarzania suspensji w mieszalniku, jak również pomiary mocy mieszania dla mieszadła podobnego do mieszadła TX535, czyli mieszadła TX335, przedstawione były w naszej poprzedniej pracy [Rieger i wsp., 2011], w której krytyczne częstotliwości obrotowe n_c mieszadła określano z wykorzystaniem kryterium Zwieteringa [Zwietering, 1958]. Kryterium to mówi, że wtedy układ dwufazowy ciecz-ciało stałe uważamy za trwały, jeśli żadna z cząstek nie kontaktuje się z dnem dłużej niż 1s. W prezentowanej obecnie pracy przedstawiamy podobne badania z wykorzystaniem metody konduktometrycznej do określania czasów homogenizacji τ oraz metody Zwieteringa do określania częstotliwości krytycznych n_c [Zwietering, 1958]. Na zakończenie pracy prezentujemy wyniki dotyczące porównaniu efektywności pracy obu typów mieszadeł oraz aplikacje mieszadła TX535 w rozwiązaniu przemysłowym.

Podstawy teoretyczne

Aby właściwie zaprojektować układ mieszający do wytwarzania zawiesiny należy określić warunki, jakie muszą być spełnione, aby z technologicznego punktu widzenia wytworzony układ wewnątrz mieszalnika można było uznać za trwałą zawiesinę. Częstość obrotową, przy której warunek ten jest spełniony, określane jest krytyczną częstością obrotową mieszadła n_c .

Na podstawie analizy inspekcyjnej równań Naviera-Stokesa, równania ciągłości oraz równania określającego równowagę sił działających na zawieszoną cząstkę w płynie Rieger i Dittl, 1994 zaproponowali równanie (1) do obliczania zmodyfikowanej liczby Frouda Fr' zawierającej wartość n_c i uzależniając jednocześnie jej wartość od stosunku d_p/D oraz stężenia objętościowego fazy stałej c_v .

$$Fr' = \frac{n_c^2 d_p}{g \Delta \rho} = f\left(\frac{d_p}{D}, c_v\right) \quad (1)$$

gdzie ρ oznacza gęstość cieczy, natomiast $\Delta \rho$ oznacza różnicę gęstości ciała stałego i cieczy.

Równanie (1) jest słuszne dla układów geometrycznie podobnych, dla zakresu mieszania burzliwego. Funkcja f po prawej stronie równania (1) przedstawia się klasycznie w postaci funkcji potęgowej (2), gdzie stałe C oraz γ są uzależnione od stężenia c_v .

$$Fr' = C \left(\frac{d_p}{D}\right)^\gamma \quad (2)$$

Postać zależności $C, \gamma = f(c_v)$ podał w swoich pracach [Rieger, 2000; 2002]. Na podstawie badań doświadczalnych zaproponował on zależności (3) i (4), gdzie wszystkie wielkości występujące w tych równaniach są wielkościami bezwymiarowymi.

$$C = A \cdot \exp(Bc_v) \quad (3)$$

$$\gamma = \alpha + \beta c_v \quad (4)$$

Aby utrzymać cząstki ciała stałego w postaci zawiesiny do mieszalnika należy dostarczać energię w postaci mocy mieszania. Bezwymiarowym kryterium określającym tę wartość jest kryterium π_s zawierające w sobie dwie inne liczby bezwymiarowe, tzn. liczbę mocy Po oraz zmodyfikowaną liczbę Frouda Fr' [Rieger, 1993]

$$\pi_s = Po \sqrt{Fr'^3 (d/D)^7} \quad (5)$$

Im mniejsza wartość modułu π_s , tym bardziej efektywnie pracuje mieszadło.

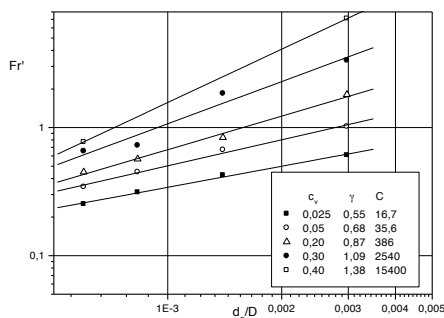
Część doświadczalna

Pomiary przeprowadzono w mieszalniku z dnem wyoblonym o średnicy $D = 300$ mm wypełnionym cieczą do wysokości $H = D$ i zaopatrzonym w 4 standardowe przegrody o szerokości $b = 0,1D$. Do mieszania używano mieszadeł przedstawionych na rys. 1 o średnicy $d/D = 1/3$. Wysokość zawieszenia mieszadeł nad dnem dla mieszadła turbinowego wynosiła $H_2 = 0,5 \cdot d$, natomiast dla mieszadła TX535 wartość $H_2 = 0,75 \cdot d$. Więcej szczegółów dotyczących aparatury można znaleźć w pracy [Rieger i wsp., 2011].

Jako zawiesinę stosowano izometryczne cząstki szklane o średnicach zastępczych z zakresu $d_p = 0,18 \div 0,9$ mm i stężeniach objętościowych $c_v = 0,025 \div 0,4$. Do określania czasów zmieszania stosowano metodę konduktometryczną, natomiast krytyczne częstotliwości obrotowe n_c mieszadła określano metodą Zwieteringa.

Wytwarzanie suspensji

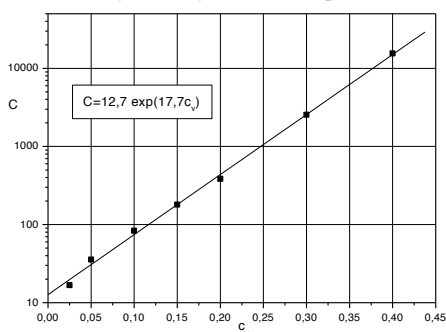
Zmierzone pierwotne wartości krytycznych obrotów mieszadła n_c przeliczane były na wielkości bezwymiarowych, zmodyfikowanych liczb Frouda Fr' . Zależność wielkości Fr' dla mieszadła TX535 od wielkości cząstek d_p/D , dla pięciu wybranych stężeń c_v , przedstawiono na rys. 2.

Rys. 2. Zależność zmodyfikowanej liczby Frouda Fr' od stosunku d_p/D

W układzie podwójnie logarytmicznym uzyskano linie proste o różnym nachyleniu w zależności od wartości c_v . Linie proste na rys. 2 świadczą o właściwym doborze funkcji (2) jako funkcji aproksymującej wyniki doświadczalne. Łatwo zauważyć, że bezwymiarowe liczby Frouda (częstości krytyczne n_c) bardzo mocno zależą od stężenia i wielkości cząstek, co jest zgodne z równaniami (3) i (4). W granicznym przypadku (rys. 2) dla tego samego stosunku d_p/D wartości Fr różniły się ponad dziesięciokrotnie, co oznacza, że krytyczne wartości obrotowe n_c różniły się ponad trzykrotnie. W tabeli na rys. 2 zamieszczono uzyskane wartości stałych C i γ odpowiadające poszczególnym stężeniom c_v . O ile stała γ (nachylenie prostej) zmieniała się w niezbyt szerokich granicach i jej wartość można było opisać prostym równaniem liniowym

$$\gamma = 2,04c_v + 0,513 \quad (6)$$

o tyle wartość stałej C zmieniała się nawet o trzy rzędy wielkości. Niemniej na rys. 3 w układzie półlogarytmicznym $C = f(c_v)$ uzyskano linię prostą, co świadczy o dobrym dobraniu postaci równania (3).

Rys. 3. Zależność stałej C w równaniu (3) od stężenia cząstek fazy stałej c_v

Ostatecznie, ustalona na podstawie pomiarów szczegółowa postać równania (2) dla mieszadła TX535, wyraziła się równaniem (7).

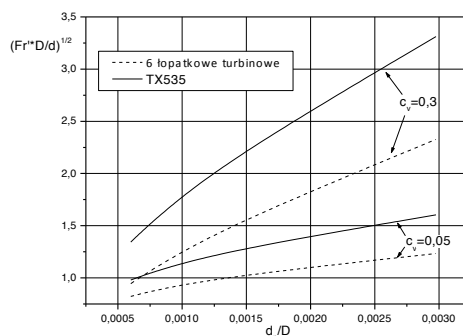
$$Fr' = \frac{n_c^2 d \rho}{g \Delta \rho} = 12,7 \cdot \exp(17,7c_v) \cdot \left(\frac{d_p}{D} \right)^{(2,04c_v + 0,513)} \quad (7)$$

Podobną zależność dla standardowego mieszadła sześciolopatkowego podana jest w naszej poprzedniej pracy [Rieger i wsp., 2011].

Wykorzystując otrzymane w ten sposób równania można było obliczyć wartości bezwymiarowych liczb Frouda Fr' , które należy osiągnąć, aby zapewnić utrzymanie trwałej zawiesiny dla obu typów porównywanych mieszadeł. Na rys. 4 przedstawiono wykresy funkcji $(Fr' \cdot D/d)^{1/2}$ dla obu mieszadeł, dla różnych wielkości zawiesiny (d_p/D) i dwóch wybranych stężeń ciała stałego $c_v = 0,05$ oraz $c_v = 0,3$.

Jak wynika z przedstawionych wykresów, aby wytworzyć zawiesinę w mieszalniku należało stosować wyższe częstotliwości krytyczne n_c (wyższe wartości zmodyfikowanych liczb $(Fr' \cdot D/d)^{1/2}$) wraz ze zwiększaniem się stężenia fazy stałej oraz zwiększaniem się wielkości zawieszonych cząstek. Jednocześnie do wytworzenia zawiesiny w mieszalniku przy użyciu mieszadła TX535 należało zawsze stosować większe częstotliwości obrotowe niż w przypadku

sześciolopatkowego mieszadła turbinowego. Wynika to niewątpliwie z większego strumienia cieczy wyrzucanego z obszaru mieszadła w dół mieszalnika w przypadku mieszadła turbinowego [Fořt i wsp., 2010].

Rys. 4. Warunki wytwarzania zawiesiny w zależności od wielkości ziaren d_p/D

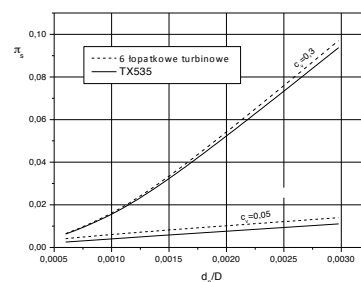
Efektywność mieszania

Konieczność stosowania większych częstotliwości obrotowych celem uzyskania trwałej zawiesiny w mieszalniku w przypadku mieszadła TX535 nie musi oznaczać jednocześnie większych mocy mieszania. Wielkość energii, którą należy dostarczyć do układu, aby podtrzymać odpowiednio intensywny przepływ zawiesiny wewnątrz mieszalnika, zależy również od oporów samego mieszadła, czyli od wielkości mocy mieszania P . Wartość P przedstawia się zazwyczaj w postaci bezwymiarowej liczby mocy Po . Jak wynika z tabeli 1 zmierzona wartość liczby mocy w ruchu burzliwym dla mieszadła TX535 była prawie trzykrotnie mniejsza niż dla standardowego mieszadła sześciolopatkowego.

Tab. 1. Porównanie standardowego mieszadła sześciolopatkowego oraz mieszadła TX535

Mieszadło	Po	$n\pi$	$Po(n\pi)^3(d/D)^5$
sześciolopatkowe	1,8	53	660
TX535	0,625	52	235

Jak już wspomniano, w pracy [Rieger, 1993] podano kryterium, które ujmuje w sobie tak zmodyfikowaną liczbę Frouda Fr' , jak również moc mieszania P . Jest to kryterium π_s i wartość tego kryterium dla poszczególnych typów mieszadeł decyduje o ich efektywności mieszania z punktu widzenia uzyskania trwałej zawiesiny w mieszalniku. Na rys. 5 przedstawiono wartości π_s dla obu porównywanych mieszadeł. Jak wynika z analizy tego rysunku mieszadło TX535 pomimo konieczności stosowania większych częstotliwości krytycznych n_c okazało się mieszadłem bardziej efektywnym. W każdym przypadku wartości π_s dla tego mieszadła były nieco mniejsze od podobnych wartości dla mieszadła turbinowego. Wynika to niewątpliwie z mniejszej mocy mieszania mieszadła TX535 (bardziej wyprofilowane łopatki mieszadła) w porównaniu z mieszadłem turbinowym. Należy zauważyć, że zgodnie z równaniem definicyjnym (5) wartości π_s są proporcjonalne do liczby mocy, zatem i moce mieszania P będą mniejsze w takim samym stosunku, jak wynika to z rys. 5. Wartość modułu π_s rośnie oczywiście ze wzrostem stężenia zawiesiny c_v .



Rys. 5. Porównanie efektywności mieszania mieszadła turbinowego oraz mieszadła TX535

Homogenizacja

W bioreaktorach o dużych objętościach oprócz konieczności zapewnienia warunków do uzyskania trwałej zawiesiny istnieje również konieczność zapewnienia homogenizacji całej zawartości bioreaktora. W ruchu burzliwym wyniki dotyczące czasów homogenizacji (czasów zmieszania) przedstawia się w postaci iloczynu $n\tau$, gdzie τ oznacza czas homogenizacji. W ruchu burzliwym iloczyn ten dla poszczególnych mieszadeł posiada wartość stałą.

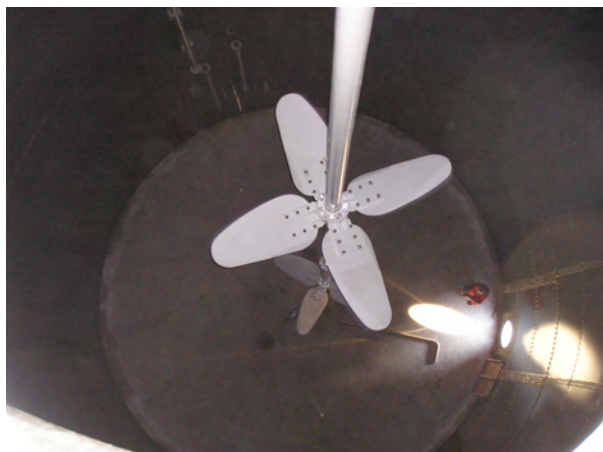
W tabeli 1 zamieszczono zmierzone w tej pracy iloczyny $n\tau$ dla obu porównywanych mieszadeł uzyskanych w skali ćwierć technicznej ($D = 300$ mm). Pomimo mniejszych oporów mieszania mieszadła TX535 uzyskana wartość iloczynu $n\tau$ była nawet nieznacznie mniejsza od podobnej wartości dla standardowego mieszadła turbinowego. Aby porównać efektywność mieszania obu mieszadeł z punktu widzenia ilości energii, którą należy dostarczyć do układu, aby osiągnąć całkowite wymieszanie cieczy, należy rozpatrzyć wartość kryterium (8)

$$\frac{Pr^3}{\rho D^5} = Po(n\tau)^3 \left(\frac{d}{D}\right)^5 \quad (8)$$

Im mniejsza wartość tego kryterium tym bardziej efektywnie pracuje dane mieszadło. Jak wynika z analizy tabeli 1 wartość tego kryterium dla mieszadła TX535 była prawie 2,5 razy mniejsza niż dla standardowego mieszadła turbinowego. Podobnie jak w przypadku wytwarzania suspensji, powodem tego była mała moc mieszania mieszadła TX535.

Zastosowanie przemysłowe

Biorąc pod uwagę przedstawione wyniki można stwierdzić, że mieszadło TX535 jest bardziej efektywne od standardowego mieszadła turbinowego (rys. 1a), tak z punktu widzenia wytwarzania suspensji, jak również z punktu widzenia energii homogenizacji. Dlatego w zaprojektowanym i zbudowanym reaktorze biogazowni o pojemności 2245 m³ (średnica reaktora 12,9 m, wysokość 17,3 m) zdecydowano się umieścić dwa mieszadła typu TX535 o średnicach $d = 3250$ mm (górne) oraz $d = 2800$ mm (dolne) zamontowane na wspólnym wale. Do napędu użyto silnik o mocy 7,5 kW. Widok reaktora przedstawiono na rys. 6. Pomiary mocy mieszania takiego układu dla obrotów mieszadła $N = 17$ obr/min przy zawartości ciała stałego w zawieszynie 7 ÷ 9% wykazały pobór mocy na poziomie 7 kW, co oznacza, że jednostkowy pobór mocy wynosił ok. 3,2 W/m³. Silnik mieszadła zamontowany był na powierzchni pokrywy, a uszczelnienie wału w pokrywie zapewniono przy użyciu zamknięcia wodnego. W dnie reaktora zamontowane było dodatkowe łożysko wału. Reaktor z takim układem mieszającym pracuje już ponad 6 lat.



Rys. 6. Reaktor biogazowni o pojemności 2245 m³

Wnioski

- wykonane w pracy badania doświadczalne potwierdziły słuszność propozycji dotyczących form równań (2), (3) i (4),
- do wytworzenia zawiesiny dla tych samych stężeń i tych samych wielkości cząstek mieszadło TX335 wymagało zawsze większych częstotliwości obrotowych n_c ,
- ze względu na mniejszą moc mieszania mieszadło TX535 okazało się mieszadłem bardziej efektywnym od standardowego mieszadła turbinowego sześciopłatkowego, tak w przypadku wytwarzania układu dwufazowego ciało stałe-ciecz, jak również podczas homogenizacji układu jednofazowego,
- mieszadła TX535 można z powodzeniem stosować do mieszania mieszaniny reakcyjnej w reaktorach o wymiarach przemysłowych (pojemność reaktora rzędu 2000 m³).

Praca została wykonana w ramach projektu MSM6840770035 Ministerstwa Edukacji Czeskiej Republiki¹⁾, Grantu FR-TI/005 finansowanego przez Ministerstwo Przemysłu i Handlu Czeskiej Republiki²⁾ oraz w ramach działalności statutowej W-10/1/2012/Dz.St. Wydziału Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej³⁾.

Spis ważniejszych oznaczeń

- A, B – stałe w równaniu (3),
- C – stała proporcjonalności określona równaniami (2) i (3),
- c_v – stężenie objętościowe ciała stałego,
- D – średnica mieszalnika, m
- d – średnica mieszadła, m
- d_p – średnia średnica cząstek ciała stałego, m
- g – przyspieszenie ziemskie, m/s²
- M – moment obrotowy, Nm
- n – częstość obrotowa mieszadła, obr/s
- n_c – krytyczna częstość obrotowa mieszadła przy wytwarzaniu zawiesiny w mieszalniku, obr/s
- P – moc mieszania $-2\pi nM$, W
- τ – czas homogenizacji, s
- α, β – stałe w równaniu (4),
- γ – wykładnik potęgi w równaniu (2) określony równaniem (4),
- ρ – gęstość cieczy, kg/m³
- $\Delta\rho$ – różnica gęstości ciała stałego i cieczy, kg/m³
- η – lepkość cieczy, Pas

Liczby kryterialne

$$Re = \frac{nd^2\rho}{\eta} \text{ liczba Reynoldsa,} \quad Fr' = \frac{n_c^2 d \rho}{g \Delta\rho} \text{ liczba Frouda,}$$

$$Po = \frac{P}{n^3 d^5 \rho} \text{ liczba mocy,} \quad \pi_s = Po \sqrt{Fr'^3 (d/D)^7} \text{ kryterium mocy.}$$

LITERATURA

1. Fort I., Kysela B., Jirout T., 2010. Flow characteristics of axial high speed impellers. *Inż. Chem. Proc.*, **31**, (4), 661-679
2. Rieger F., 1993. Efficiency of agitators while mixing of suspensions. *Mat. VI. Polish Seminar on Mixing*, Krakow, 79
3. Rieger F., 2000. Effect of particle content on agitator speed for off-bottom suspension. *Chem. Eng. Journal*, **79**, 171-175
4. Rieger F., 2002. Effect of particle content on agitator speed for off-bottom suspension. *Chem. Eng. Proces.*, **41**, 381-384
5. Rieger F., Ditzl P., 1994. Suspension of solid particles. *Chem. Eng. Sci.*, **49**, 2219 - 2227
6. Rieger F., Jirout T., Ceres D., Pešl L., 2012. Homogenization and suspension efficiency of hydrofoil impeller TX 535. *Congress CHISA, Praga*
7. Rieger F., Kunciewicz C., Seichter P., 2011. Porównanie warunków wytwarzania suspensji przy użyciu standardowego mieszadła sześciopłatkowego oraz mieszadła TX335. *Przemysł Chemiczny*, 90, nr 12, 2179 - 2182

8. Zwietering T. N., 1958. Suspending of solid particles in liquid by agitators.
Chem. Eng. Sci., **8**, 244

