

Szymon WOZIWOZDKI

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

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

Moc mieszania w mieszalniku z dwoma mieszadłami i zmiennym kierunkiem obrotów

Wstęp

Mieszanie jest jedną z najpowszechniejszych operacji w różnych gałęziach przemysłu. Procesy mieszania można scharakteryzować za pomocą kilku podstawowych parametrów takich, jak intensywność lub efektywność mieszania. Jednym z takich parametrów jest także moc mieszania. Znajomość mocy mieszania daje możliwość opisu procesów wymiany zachodzących w mieszalniku, a także pozwala na odpowiedni dobór i zaprojektowanie napędu aparatu.

Moc mieszania w standardowym mieszalniku, zaopatrzonym w mieszadło obracające się ze stałą prędkością i kierunkiem obrotów, jest dobrze poznana i scharakteryzowana w postaci zależności liczby mocy Ne_m od liczby Reynoldsa Re_m [1, 2].

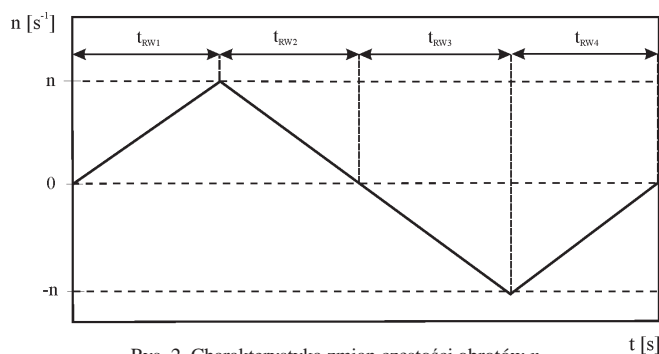
W ostatnich latach obserwuje się rosnące zainteresowanie zagadnieniem mieszania w zmiennych warunkach hydrodynamicznych. Warunki takie można wytworzyć w mieszalniku np. poprzez stosowanie zmiennych w czasie prędkości obrotów mieszadła lub zmiennego w czasie kierunku obrotów mieszadła. Takie prowadzenie procesu mieszania [3-7] pozwala min. na zwiększenie wartości współczynników wymiany w zakresie mieszania burzliwego, zmniejszenie występowania obszarów o słabym stopniu wymieszania dla $Re_m < 100$. Stosowanie tego typu rozwiązań pozwala na poprawienie efektywności mieszania, szczególnie przy małych zapotrzebowaniach na moc mieszania.

Celem niniejszym pracy jest scharakteryzowanie zapotrzebowania na moc mieszania w mieszalniku z dwoma mieszadłami turbinowymi obracającymi się w różnych kierunkach (prawo-lewo) w zakresie mieszania burzliwego.

Część eksperymentalna

Badania przeprowadzono w płaskodennym mieszalniku o średnicy $D = 0,19$ m ($H = 2D$) zaopatrzonym w dwa mieszadła turbinowe (turbina *Rushtona* RT (Rys. 1a) oraz mieszadło turbinowe z pochylonymi łopatkami PBT (Rys. 1b) o średnicy $d = 0,065$ m. Wysokość łopatki mieszadła RT wynosiła $b = 0,2d$, natomiast dla mieszadła PBT $b = 0,125d$.

Mieszadła ustawione były w następującej konfiguracji: RT-RT, PBT-PBT, RT-PBT i PBT-RT. Odległość między mieszadłami wynosiła $\Delta h = D$. Moc mieszania wyznaczano pośrednio metodą tensometryczną mierząc moment obrotowy M na wale mieszadła. Układ pomiarowy momentu obrotowego (momentomierz MT 2Nm oraz miernik *Sensor-AT MW-2006-2*) pozwalał na próbkowanie pomiaru z częstotliwością 10 Hz, a tym samym na śledzenie zmian momentu obrotowego w czasie. Charakterystykę zmian kierunku obrotów mieszadła (Rys. 2) ustawiano poprzez programowanie ramp pracy falownika p-Drive firmy *Schneider Electric*. We wszystkich przypadkach czas jednego pełnego cyklu zmian kierunku obrotu mieszadła (prawo-lewo) wynosił 8 s ($t_{RW1} = t_{RW2} = t_{RW3} = t_{RW4} = 2$ s). Kierunek zmian obrotów mieszadła określany jest poprzez wartości częstości obrotów mieszadła (n – kierunek obrotów przeciwny do ruchu wskazówek zegara, $-n$ – kierunek obrotów

Rys. 2. Charakterystyka zmian częstości obrotów n

zgodny z kierunkiem ruchu wskazówek). Zbieranie pomiarów przerywano po uzyskaniu 10 pełnych cykli zmian, tj. po uzyskaniu około 800 punktów pomiarowych. Na podstawie uzyskanej charakterystyki zmian momentu obrotowego M w funkcji czasu wyznaczano średnią częstość obrotów n_{FR} mieszadła ze wzoru (1) oraz średni moment obrotowy M_{FR} ze wzoru (2).

$$n_{FR} = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} |n_i|}{n_p} \quad (1)$$

$$M_{FR} = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} |M_i|}{n_p} \quad (2)$$

gdzie n_p jest liczbą pomiarów. Moc mieszania oraz liczbę mocy mieszania wyznaczano odpowiednio ze wzoru (3) i (4)

$$P_{FR} = 2\pi n_{FR} M_{FR} \quad (3)$$

$$Ne_{FR} = \frac{P_{FR}}{n_{FR}^3 d^5 \rho} \quad (4)$$

$$Re_{FR} = \frac{n_{FR} d^2 \rho}{\eta} \quad (5)$$

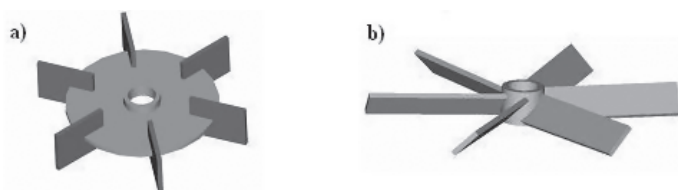
Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono zależność liczby mocy Ne_{FR} od liczby Reynoldsa Re_{FR} w zbiorniku zaopatrzonym w cztery standardowe przegrody oraz w zbiorniku bez przegród.

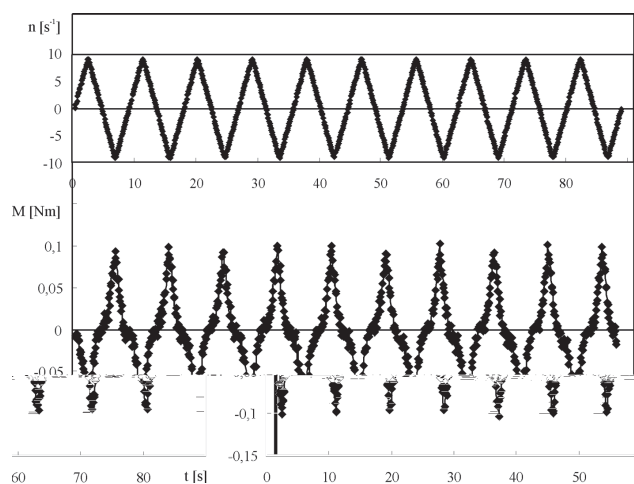
Wyniki badań

Przykładowy przebieg zależności zmian momentu obrotowego M w czasie przedstawiono na rys. 3. Charakter zmian wykazuje duże podobieństwo do wyników uzyskanych dla pojedynczego mieszadła turbinowego [8]. Przebieg zmian częstości obrotów mieszadła jest liniowy, natomiast przebieg zmian momentu obrotowego odbiega od liniowego. W pobliżu punktu, w którym następuje zmiana kierunku obrotu mieszadła następuje odchylenie od liniowości. Przebieg zmian momentu obrotowego od $n = 0$ s⁻¹ do maksymalnej częstości obrotów n_{max} ma typowy charakter potęgowy.

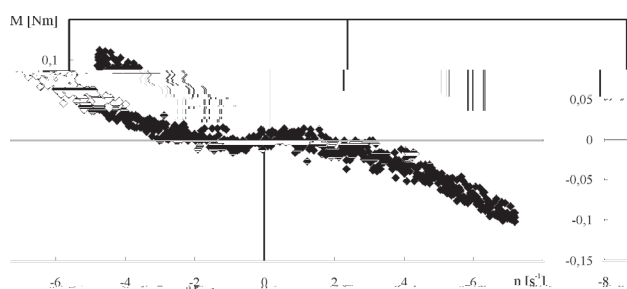
Na rys. 4 przedstawiono przebieg zmian momentu obrotowego w funkcji częstości obrotów mieszadła. Zmiany wartości momentu obrotowego są zmianami typowo cyklicznymi, poruszającymi się po krzywej przypominającej spłaszczoną literę S, co odpowiada zależności $M = f(-\sinh(n))$.

Na rys. 5 przedstawiono wykres charakterystyki mocy przebadanych układów mieszadeł. Na podstawie uzyskanych danych jednoznacznie można stwierdzić, że na wartość liczby mocy mieszania ze zmiennym

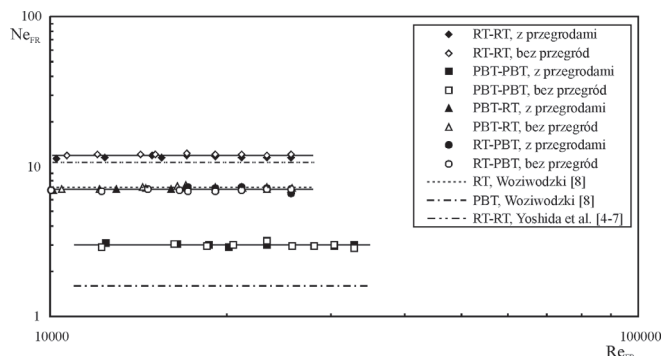
Rys. 1. Stosowane mieszadła: a) turbina *Rushtona* RT, b) mieszadło turbinowe z sześcioma łopatkami pochylonymi pod kątem 45° PBT



Rys. 3. Wykres zmian momentu obrotowego M oraz częstości obrotów n w czasie t dla układu mieszadeł PBT-RT, $n_{FR} = 5,02\text{ s}^{-1}$, $M_{FR} = 0,034\text{ Nm}$



Rys. 4. Wykres zmian momentu obrotowego M w funkcji częstości obrotów mieszadła n dla RT-RT, $n_{FR} = 4,03\text{ s}^{-1}$, $M_{FR} = 0,037\text{ Nm}$



Rys. 5. Zależność liczby mocy mieszania Ne_{FR} od liczby Reynoldsa Re_{FR}

kierunkiem obrotów Ne_{FR} nie wpływa obecność przegród w mieszalniku. Podobny efekt zaobserwowano dla mieszalnika z pojedynczym mieszadłem [8]. Przyczynę tego stanu należy tłumaczyć faktem, iż w mieszalniku bez przegród z mieszadłami ze zmiennym kierunkiem obrotów nie wytwarza się dostatecznie silna cyrkulacja pierwotna. W tych układach dominuje cyrkulacja wtórna.

Zapotrzebowanie mocy w układach ze zmiennym kierunkiem obrotów jest większe aniżeli w mieszalnikach z przegradami oraz z mieszadłami ze stałym kierunkiem obrotów. Dla układu RT-RT wzrost wartości liczby mocy w stosunku do układu standardowego wynosił około 20%, dla układu PBT-PBT oraz PBT-RT i RT-PBT odpowiednio 36 i 17%. Duży wzrost dla układu PBT-PBT należy tłumaczyć przeorientowaniem się cyrkulacji. Kierunek pompowania cieczy przez mieszadło zmienia z „w stronę zwierciadła cieczy” na „w stronę dna”, i na odwrot.

Nie stwierdzono różnicy w wartościach liczby mocy dla układu mieszadeł RT-PBT i PBT-RT, co sugeruje niezależność hydrodynamiczną w tych układach.

W tab. 1 przedstawiono wartości liczby mocy Ne_{FR} dla analizowanych układów mieszadeł oraz wyliczone wartości liczby mocy $(Ne_{FR})_{cal}$ (na podstawie wcześniejszych badań [8]) przy założeniu niezależności hydrodynamicznej poszczególnych mieszadeł [9].

Tab. 1. Wartości liczby mocy Ne_{FR} (eksperyment) oraz $(Ne_{FR})_{cal}$ (wyliczone)

Układ mieszadeł	Ne_{FR}	$(Ne_{FR})_{cal}$ [8]	$Ne_{FR}/(Ne_{FR})_{cal}$
RT-RT	11,79	13,98	0,84
PBT-PBT	2,99	3,14	0,95
RT-PBT/PBT-RT	7,01	8,56	0,82
RT [8]	6,99	–	–
PBT [8]	1,57	–	–

Wartość stosunku $Ne_{FR}/(Ne_{FR})_{cal}$ określa stopień niezależności hydrodynamicznej pracujących mieszadeł. Na podstawie pracy Hudcovej i in. [9] można uznać że uzyskano niezależność hydrodynamiczną mieszadeł przy odległości między nimi równej $\Delta h = D$.

Wnioski

W pracy poddano analizie zapotrzebowanie mocy w mieszalniku z dwoma mieszadłami turbinowymi z zmiennym kierunkiem obrotów. W zakresie przepływu burzliwego moc mieszania była większa niż w analogicznym mieszalniku pracującym ze stałym kierunkiem obrotów mieszadła. Moc mieszania wzrosła średnio o około 24%. Największy wzrost zanotowano dla układu PBT-PBT.

Mieszadła oddalone od siebie o $\Delta h = D$ pracują niezależnie pod względem hydrodynamicznym

Porównanie mieszalnika ze zmiennym kierunkiem obrotów wyposażonego w przegródę oraz bez przegród wskazuje, że zapotrzebowanie mocy w tych układach jest porównywalne a stosowanie przegród nie jest zalecane.

Spis oznaczeń

- D – średnica mieszalnika, [m],
- H – wysokość słupa cieczy, [m],
- M – moment obrotowy, [Nm],
- M_{FR} – średni moment obrotowy przy zmiennym kierunku obrotów mieszadła, [Nm],
- M_i – chwilowy moment obrotowy, [m],
- Ne_{FR} – liczba mocy dla zmiennego kierunku obrotów, $P/(n^3 d^5 \rho)$
- Ne_m – liczba mocy, $P/(n^3 d^5 \rho)$,
- P – moc mieszania, [W],
- P_{FR} – moc mieszania dla zmiennego kierunku obrotów, [W],
- Re_{FR} – liczba Reynoldsa dla zmiennego kierunku obrotów, $n_{FR} d^2 \rho / \eta$,
- Re_m – liczba Reynoldsa, $nd^2 \rho / \eta$,
- b – wysokość łopatki mieszadła, [m],
- d – średnica mieszadła, [m],
- Δh – odległość między mieszadłami, [m],
- n – częstość obrotów mieszadła, [m],
- n_i – częstość obrotów mieszadła, [m],
- n_{max} – maksymalna częstość obrotów mieszadła, [m],
- n_{FR} – średnia częstość obrotów dla zmiennego kierunku obrotów, $[s^{-1}]$,
- n_p – liczba pomiarów,
- t – czas, [s],
- t_{RW} – czas etapów zmian częstości obrotów [s].

LITERATURA

- [1] J. Stręk: Mieszanie i mieszalniki. WNT, Warszawa 1981.
- [2] J. Kamiński: Mieszanie układów wielofazowych. WNT, Warszawa 2004.
- [3] D.J. Lamberto, F.J. Muzzio, P.D. Swanson: Chem. Eng. Sci. **51**, 733 (1996).
- [4] M. Yoshida, A. Ito, K. Yamagiwa, A. Ohkawa, M. Abe, S. Tezura, M. Shimazaki: Lat. Am. Appl. Res **32**, nr 2, 189 (2002).
- [5] M. Yoshida, A. Ito, K. Yamagiwa, A. Ohkawa, M. Abe, S. Tezura, M. Shimazaki: J Chem. Technol. Biotechnol. **76**, 383 (2001).
- [6] M. Yoshida, A. Ito, K. Yamagiwa, A. Ohkawa, M. Abe, S. Tezura, M. Shimazaki: Lat. Am. Appl. Res **34**, 35 (2004).
- [7] M. Yoshida, M. Shigeyama, T. Hiura, K. Yamagiwa, A. Ohkawa, S. Tezura: Asia-Pac. J. Chem. Eng. **2**, 659 (2007).
- [8] S. Wozniowdki: Inż. Ap. Chem. **48**, nr 4, 134 (2009).
- [9] V. Hudcova, V. Machon, A. W. Nienow: Biotechnol. Bioeng. **34**, 617 (1989).