

Przemysław GRĄDZIK, Marian KORDAS, Stanisław MASIUK, Rafał RAKOCZY

e-mail: rrakoczy@zut.edu.pl

Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny, Szczecin

Analiza krzywych stężeniowych procesów przejściowych w mieszalniku strumieniowym nowej konstrukcji

Wstęp

Intensywność mieszania ma znaczący wpływ na wydajność i przebieg wielu procesów w inżynierii chemicznej. Mieszanie jest procesem mogącym wpływać na właściwości otrzymanej mieszaniny. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem technicznym w instalacjach przemysłowych, przeznaczonym do prowadzenia procesów związanych z mieszaniem są mieszalniki zbiornikowe. Proces mieszania w tego typu aparacie zazwyczaj realizowany jest za pomocą mieszadła osadzonego na wale napędzanym silnikiem elektrycznym [Harnby i in., 2001]. Jest to proste, tanie i uniwersalne rozwiązanie konstrukcyjne, pozwalające dobrać optymalny rodzaj mieszadła w zależności od parametrów mieszanego medium.

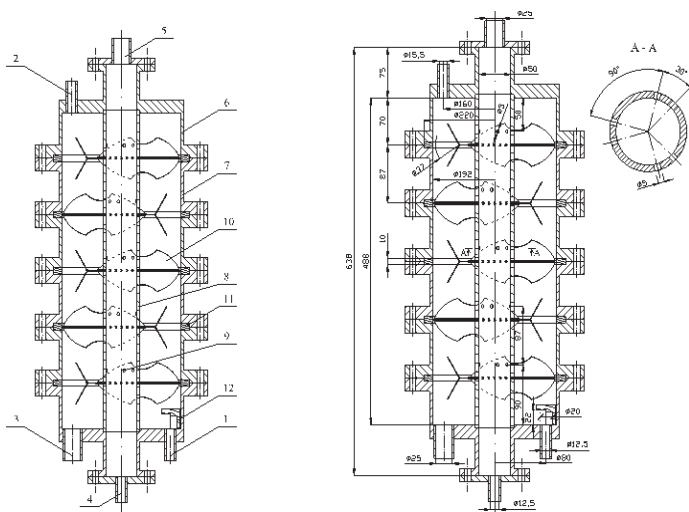
Mieszalniki strumieniowe znane są i stosowane w przemyśle jako alternatywa dla tradycyjnych mieszalników mechanicznych. Istnieją dwa rodzaje mieszalników strumieniowych: mieszalniki strumieniowe rurowe oraz mieszalniki strumieniowe zbiornikowe. Zasada działania obu rozwiązań jest podobna i polega na wprowadzeniu strumienia płynu do zbiornika lub drugiego strumienia [Harnby i in., 2001].

Głównym celem prezentowanej pracy jest analiza mieszalnika strumieniowego nowej konstrukcji. W celu poznania struktury przepływu w analizowanym aparacie zdecydowano się wykonać pomiary rozkładu czasu przebywania [Harris i in., 2002; Nauman, 2008]. W oparciu o zarejestrowane krzywe procesów przejściowych zdecydowano się określić współczynnik wariancji CoV [Adeosun i Lawal, 2009] oraz uzależnić go od panujących w mieszalniku warunków hydrodynamicznych.

Część doświadczalna

Opis aparatury badawczej

Konstrukcję mieszalnika strumieniowego przedstawiono na rys. 1. Pełny opis budowy i działania urządzenia zawarto w zgłoszeniu patentowym [Rakoczy i in., 2012].

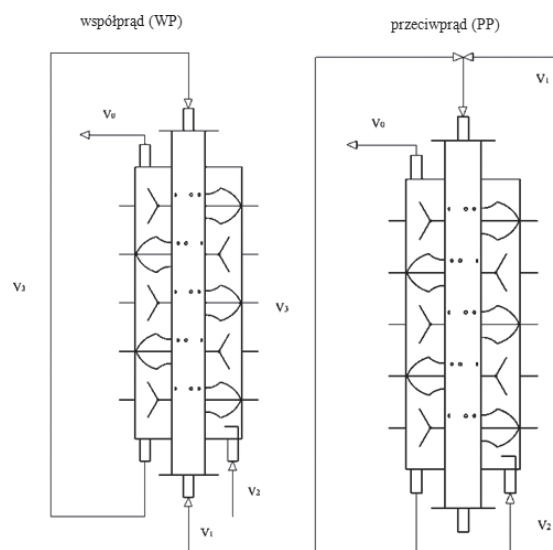


Rys. 1. Przekrój mieszalnika strumieniowego nowej konstrukcji oraz jego wymiary charakterystyczne: 1 – wlot do przestrzeni międzyrurowej, 2 – wylot z mieszalnika, 3 – wylot z przestrzeni międzyrurowej (recykl), 4, 5 – wlot do rury wewnętrznej, 6 – pokrywa, 7 – moduł zbiornika, 8 – rura wewnętrzna, 9 – otwór w rurze wewnętrznej, 10 – mieszadło, 11 – pierścień montażowy mieszadła, 12 – kierownica strumienia

Urządzenie składa się z dwóch pionowych współosiowych rur o różnych średnicach. Rura wewnętrzna posiada otwory w ścianie bocznej. W przestrzeni międzyrurowej umieszczono moduły mieszające. W skład jednego modułu wchodzi trzy mieszadła osadzone na pierścieniu montażowym o średnicy wewnętrznej równej średnicy wewnętrznej obudowy. Osie obrotu mieszadeł tworzą trójkąt równoboczny. Moduły mieszające umieszczone są jeden nad drugim, a kolejny moduł obrócony jest w osi aparatu względem poprzedniego o kąt 60° . Otwory w ścianie bocznej rury wewnętrznej ukierunkowane są na łopatki mieszadeł. W badanym urządzeniu zamontowano pięć modułów mieszających.

Opis badań

Do aparatu kierowano strumienie zasilające zarówno do rury wewnętrznej (RW), jak i do przestrzeni międzyrurowej (PM). Jednocześnie część płynu pompowano z dolnej części aparatu (PM) do górnego wlotu rury wewnętrznej (RW) tworząc recykl. Strumień (RW) jest dostarczany od dołu lub od góry aparatu (w zależności od wariantu przepływu). Oba warianty doprowadzenia strumieni do aparatu przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat zasilania aparatu mieszającego w wariantach dla współprądu (WP) oraz przeciwpłądu (PP)

Znacznik dozowano na wlocie do aparatu w postaci określonej objętości nasyconego roztworu NaCl (objętość dozowanego znacznika – 20 ml, czas dozowania – 5 sekund). Objętość robocza aparatu wynosi 15 dm^3 . Przebadano również wpływ miejsca wprowadzenia znacznika na otrzymywane krzywe procesu przejściowego. W pierwszym przypadku znacznik dozowano do strumienia przepływającego przez (RW) i mierzono zmianę jego stężenia na wylocie aparatu. W drugim dla tych samych strumieni objętościowych przepływających przez aparat wykonywano pomiary dla dozowania znacznika do strumienia przepływającego przez (PM). W przypadku prowadzonych badań strumienie objętościowe zmieniały się w następującym zakresie: $V_1 = 1,3 \cdot 10^{-4} \div 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $V_2 = 2,7 \cdot 10^{-4} \div 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $V_3 = 2,7 \cdot 10^{-5} \div 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Do opisu hydrodynamiki w mieszalniku zdecydowano się zastosować liczbę *Reynoldsa*, której definicję oparto na prędkości przepływu przez

przestrzeń międzyrurową ($Re_{PM} = 89 \div 984$) oraz prędkości wyznaczonej dla strumienia wypływającego z otworu znajdującego się na powierzchni bocznej rury wewnętrznej ($Re_o = 932 \div 5440$; założono, że prędkości są identyczne dla każdego otworu). W pracy wykonano również pomiary dla obu sposobów zasilania, zaprezentowanych na rys. 2, w obecności mieszadeł. Mieszadła w analizowanym aparacie mieszającym były napędzane strumieniami wypływającymi z otworów znajdujących się na powierzchni bocznej rury wewnętrznej oraz strumieniem przepływającym przez przestrzeń międzyrurową. Ruch obrotowy mieszadeł jest wynikiem przepływających strumieni, dlatego też zdecydowano się nie wprowadzać dodatkowej liczby *Reynoldsa*, określającej hydrodynamikę wywołaną obecnością mieszadeł. Uwzględnienie dodatkowej liczby *Reynoldsa* skomplikowałoby znacznie analizę uzyskanych wartości współczynnika wariancji CoV .

Analiza i dyskusja wyników

Na podstawie uzyskanych krzywych stężeniowych procesów przejściowych (zależność mierzonej konduktancji przeliczonej na stężenie $c(t)$ w funkcji czasu t), wyznaczono krzywe rozkładu czasu przebywania $E(t)$ dla znacznika wprowadzanego odpowiednio do strumieni zasilających rurę wewnętrzną (RW) oraz przestrzeń międzyrurową (PM) [Levenspiel, 1999]

$$E(t) = c(t) \left\{ \int_0^\infty c(t) dt \right\}^{-1} \quad (1)$$

Otrzymane rozkłady czasu przebywania posłużyły do obliczenia globalnego rozkładu według zależności podane w pracy [Buffham i Kropholler, 1981]

$$E_g(t) = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^2 Q_i E_i(t) \quad (2)$$

gdzie:

Q – sumaryczne natężenie przepływu przez aparat, $m^3 \cdot s^{-1}$;

Q_i – natężenie przepływu dla danego wlotu, $m^3 \cdot s^{-1}$;

$E_i(t)$ – rozkład czasu przebywania znacznika dozowanego do strumienia i , s^{-1} .

W oparciu o wykonane pomiary wyznaczono współczynnik CoV z następującej zależności

$$CoV = \sqrt{\sigma^2} (t_m)^{-1} \quad (3)$$

gdzie:

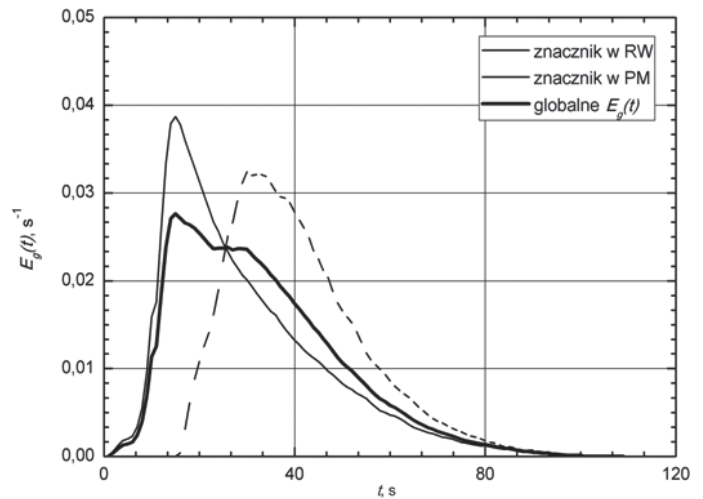
$$t_m = \int_0^\infty t E_g(t) dt \quad (4a)$$

$$\sigma^2 = \int_0^\infty (t - t_m)^2 E_g(t) dt \quad (4b)$$

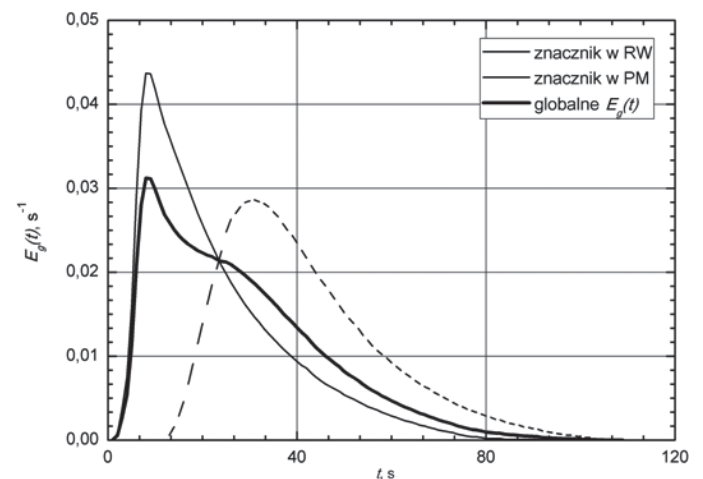
Stosując zależność (2) uzyskano tzw. globalne krzywe rozkładu czasu przebywania, będące superpozycją krzywych wyznaczonych dla znaczników wprowadzanych odpowiednio do RW i PM. Przykładowe krzywe pokazano na rys. 3 i 4.

Na rys. 5 i 6 przedstawiono wpływ warunków hydrodynamicznych panujących w urządzeniu mieszającym na uzyskiwane współczynniki CoV dla aparatu pracującego w przeciwnie z lub bez mieszadeł.

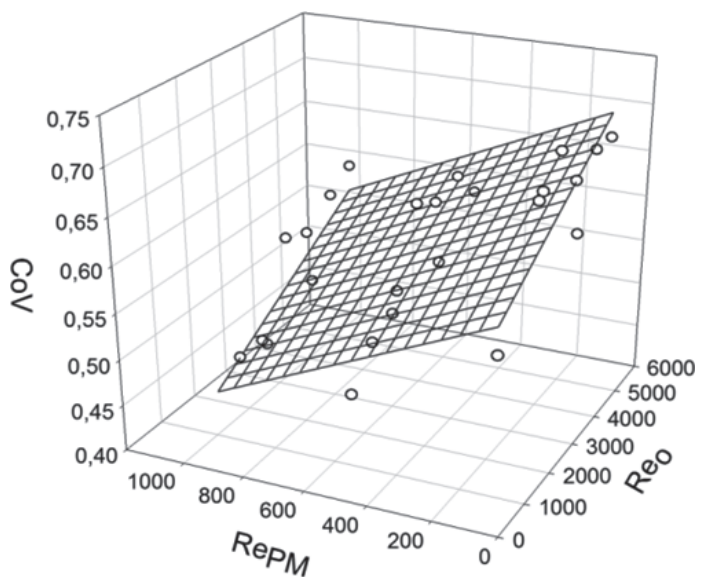
Porównując uzyskane wyniki zaprezentowane na rys. 5 i 6 można zauważyć, że w przypadku mieszalnika pracującego w przeciwnie osiągnęte są większe wartości współczynnika wariancji CoV dla przypadku zastosowania mieszadeł niż w przypadku bez mieszadeł. W pierwszym przypadku (Rys. 5) można zauważyć wyraźny wpływ liczby Re_o , określającej hydrodynamikę wytwarzaną przez strumienie wypływające z otworów znajdujących się na powierzchni bocznej rury wewnętrznej. Wraz ze wzrostem liczby Re_{PM} , charakteryzującej przepływ w przestrzeni międzyrurowej, obserwuje się wyraźny spadek wartości współczynnika CoV . Spadek ten jest wyraźniejszy w przypadku mieszalnika wyposażonego w mieszadła oraz pracującego w przeciwnie.



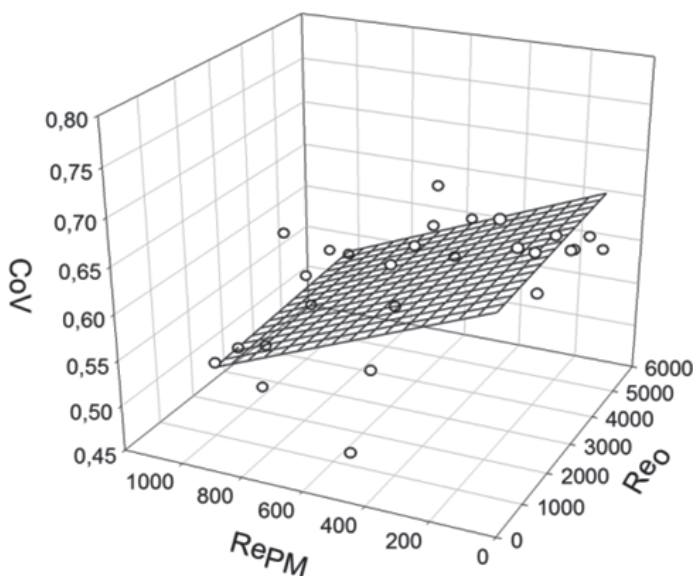
Rys. 4. Przykładowa globalna krzywa $E(t)$ uzyskana dla $V_1 = 4,17 \cdot 10^{-4} m^3 \cdot s^{-1}$, $V_2 = 1,67 \cdot 10^{-4} m^3 \cdot s^{-1}$, $V_3 = 1,53 \cdot 10^{-4} m^3 \cdot s^{-1}$ (dane uzyskane dla WP bez obecności mieszadeł)



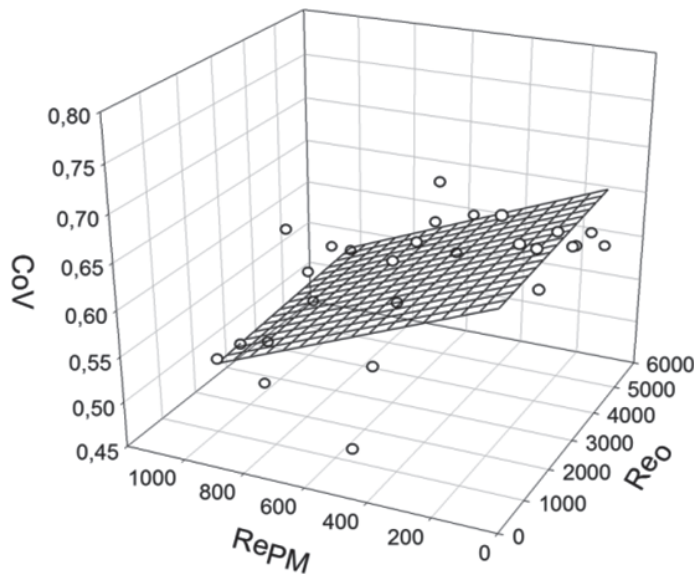
Rys. 3. Przykładowa globalna krzywa $E(t)$ uzyskana dla $V_1 = 4,17 \cdot 10^{-4} m^3 \cdot s^{-1}$, $V_2 = 1,67 \cdot 10^{-4} m^3 \cdot s^{-1}$, $V_3 = 1,53 \cdot 10^{-4} m^3 \cdot s^{-1}$ (dane uzyskane dla PP z obecnością mieszadeł)



Rys. 5. Wpływ warunków hydrodynamicznych na współczynnik CoV dla aparatu pracującego w przeciwnie (PP) z mieszadłami



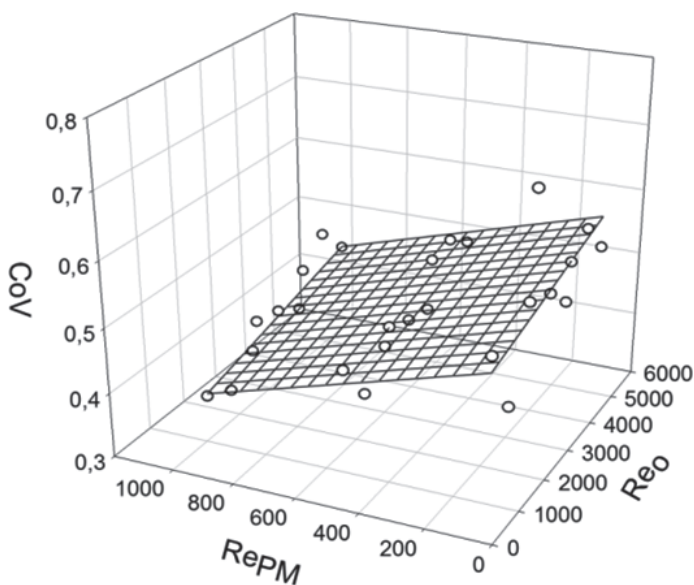
Rys. 6. Wpływ warunków hydrodynamicznych na współczynnik CoV dla aparatu pracującego w przeciwprądzie (PP) bez mieszadeł



Rys. 8. Wpływ warunków hydrodynamicznych na współczynnik CoV dla aparatu pracującego we współprądzie (WP) bez mieszadeł

Na rys. 7 i 8 przedstawiono wpływ warunków hydrodynamicznych panujących w urządzeniu mieszającym na uzyskiwane współczynniki CoV dla aparatu pracującego we współprądzie z lub bez mieszadeł.

Analizując przedstawione na powyższych rysunkach wyniki można zauważyć, że większe wartości współczynników CoV są uzyskiwane dla aparatu pracującego we współprądzie bez mieszadeł. Dodatkowo w tym przypadku zaobserwowano słabszy wpływ wytwarzanych warunków hydrodynamicznych, opisanych liczbą *Reynoldsa* Re_o , na uzyskiwane rezultaty.



Rys. 7. Wpływ warunków hydrodynamicznych na współczynnik CoV dla aparatu pracującego we współprądzie (WP) z mieszadłami

Przedstawione na rys. 5–8 powierzchnie aproksymujące uzyskane rezultaty opisano następującymi zależnościami:

$$(Rys.5) \quad CoV = 0,57 + 2,55 \cdot 10^{-5} Re_o - 1,45 \cdot 10^{-5} Re_{PM} \quad (5a)$$

$$(Rys.6) \quad CoV = 0,49 + 1,5 \cdot 10^{-5} Re_o - 1,34 \cdot 10^{-4} Re_{PM} \quad (5b)$$

$$(Rys.7) \quad CoV = 0,66 + 3,08 \cdot 10^{-6} Re_o - 1,31 \cdot 10^{-4} Re_{PM} \quad (5c)$$

$$(Rys.8) \quad CoV = 0,56 + 3,49 \cdot 10^{-6} Re_o - 1,26 \cdot 10^{-4} Re_{PM} \quad (5d)$$

Wnioski

Zaprezentowane wyniki badań doświadczalnych dotyczące analizy krzywych stężeniowych procesów przejściowych dla nowego typu mieszalnika strumieniowego prowadzą do następujących wniosków:

- Uzyskane wartości współczynnika CoV określają charakter-przepływu płynu w analizowanym mieszalniku.
- Współczynnik CoV bliski zeru uzyskuje się dla tłokowego przepływu płynu przez mieszalnik (tzn. bez gradientu prędkości w przekrojach poprzecznych). Większe wartości współczynnika CoV dowodzą, że w analizowanym aparacie występuje dyspersja wzdłużna lub mieszanie wywołane za pomocą innego mechanizmu.
- W analizowanym urządzeniu mieszającym wartości współczynnika CoV silnie zależą od wytwarzanych warunków hydrodynamicznych.

LITERATURA

- Adeosun T., Lawal A., 2009. Numerical and experimental studies of mixing characteristics in a T-junction microchannel using residence-time distribution. *Chem. Eng. Sci.* **64**, 2422-2432. DOI:10.1016/j.ces.2009.02.013
- Buffham B.A., Kropholler H.W., 1981. Residence-time distributions for systems having many connections with their environments. *Ind. Eng. Chem. Fund.*, **20**, 102-104. DOI: 10.1021/i100001a022
- Harnby N., Edwards M.F., Nienow A.W., 2001. *Mixing in the Process Industries*, Butterworth-Heinemann, Oxford (ISBN 0-7506-3760-9)
- Harris A.T., Davidson J.F., Thorpe R.B., 2002. A novel method for measuring the residence time distribution in short time scale particulate systems. *Chem. Eng. J.*, **89**, 127-142. DOI:10.1016/S1385-8947(02)00004-9
- Levenspiel O., 1999. *Chemical Reaction Engineering*. John Wiley & Sons, USA.
- Nauman E.B., 2008. Residence time theory. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **47**, 3752-3766. DOI: 10.1021/ie071635a
- Rakoczy R., Grądzik P., Masiuk S., Kordas M., 2012. Pionowy mieszalnik przepływowy. *Biuletyn Urzędu Patentowego* nr 17 z dnia 13.08.2012 (zgłoszenie patentowe P-393850).