

Lubomira BRONIARZ-PRESS, Jacek RÓŻANSKI, Patrycja KOMOROWSKA

e-mail: lubomira.broniarz-press@put.poznan.pl

Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej, Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska, Poznań

## Przepływ układów ciecz-gaz w mieszalniku statycznym typu KMS

### Wstęp

Mieszalniki statyczne są aparatami, których głównym celem jest osiągnięcie wysokiej jakości homogenizacji płynów przy użyciu prostej konstrukcji (brak ruchomych elementów mechanicznych), co przyczynia się do minimalizacji kosztów eksploatacyjnych i inwestycyjnych. Standardowy mieszalnik statyczny składa się z obudowy, która jest zespolona z rurą oraz z dwoma kołnierzami, co umożliwia umieszczenie go w linii jako część ciągłego procesu. Wewnątrz zamontowane są elementy statyczne, które powodują gwałtowne zmiany kierunku przepływu oraz generują pożądany efekt mieszania. Od rodzaju wkładek i ich ilości zależy intensywność mieszania [Shah i Kale, 1992; Heyouni i in., 2002; Thakur i in., 2003; Hyun-Seob i Sang, 2005; Jasińska i Bałdyga, 2010]. W związku z dużą różnorodnością tych urządzeń istnieje możliwość dobrania odpowiedniego aparatu do konkretnych wymagań w procesie technologicznym [Cybulski i Werner, 1986; Jasińska i Bałdyga, 2010]. Zastosowanie mieszalników statycznych jest szerokie. Mogą spełniać więcej niż jedną funkcję, co umożliwia realizowanie większej liczby zadań w jednym urządzeniu bez dodatkowych aparatów.



Rys. 1. Budowa mieszalnika statycznego typu KMS [Chemineer™]

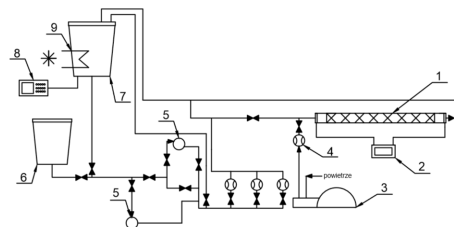
Najbardziej znanym oraz najczęściej stosowanym mieszalnikiem statycznym jest mieszalnik typu KMS (Rys. 1). Jest on szeroko stosowany w różnych gałęziach przemysłu ze względu na swoją uniwersalność. Mieszalniki typu KMS [Chemineer™; Kenics KMS, 2014] charakteryzują się wysoką wydajnością oraz prostą konstrukcją. Znalazły zastosowanie w procesach dla przepływu w zakresie laminarnego, przejściowego oraz turbulentnego. Niezawodne są także w przypadku użycia płynów o różnych lepkościach. Z powodu braku ruchomych elementów są to urządzenia o znikomym stopniu zawadności.

Typowy mieszalnik typu KMS składa się z naprzemiennie ułożonych lewo- i prawoskrętnych elementów zamontowanych w rurze. Wszystkie elementy wkładki statycznej typu KMS obrócone są w taki sposób, aby krawędź każdego elementu tworzyła kąt 90° względem poprzedniej części krawędzi. Część statyczna mieszalnika KMS w wykonaniu standardowym skrócona jest prawo- i lewoskrętnie na przemian, obrócona o kąt 180° (RL-180°). Na rynku spotykane są także podtypy aparatu KMS. Na przykład wkładki obrócone tylko prawoskrętnie (RR-180°) lub skrócone o kąt 120° (RL-120°), przystosowane dla różnych średnic rur oraz wykonanie z różnych rodzajów materiałów. Możliwość szczegółowej konfiguracji mieszalnika statycznego przyczynia się do możliwie efektywnego wykorzystania mieszalnika w procesach mieszania.

Przeprowadzone badania miały na celu określenie wpływu natężeń przepływu wody i powietrza na opory przepływu oraz średnice kropel w mieszalniku wielosekcyjnym typu KMS.

### Badania doświadczalne

**Stanowisko badawcze.** Do wyznaczenia strat ciśnienia oraz oceny efektywności mieszania układu ciecz-gaz wykorzystano stanowisko pomiarowe (Rys. 2), którego głównym elementem była rura z poli(metakrylanu) metylu o średnicy  $D = 0,026$  m, wyposażona we wkładkę statyczną typu KMS (RL-180°) o średnicy 0,0254 m i dłu-



Rys. 2. Schemat stanowiska eksperymentalnego: 1 – mieszalnik statyczny, 2 – miernik, 3 – sprężarka, 4 – rotametr, 5 – pompa, 6 – zbiornik, 7 – zbiornik naporowy, 8 – rejestrator temperatury, 9 – wężownice chłodzące

gości  $L = 0,916$  m. Wkładka statyczna zbudowana była z 24 elementów o grubości materiału 0,003 m.

**Metodyka.** Przed przystąpieniem do pomiarów wodę ze zbiornika dolnego przetłaczano przez pompę do zbiornika naporowego. Zbiornik ten podczas pomiarów pełnił funkcję zasobnika wody zasilającej mieszalnik. W celu uzyskania powtarzalnych wyników woda w zbiorniku górnym utrzymywana była w stałej temperaturze równej 20 °C, co zapewniała specjalna wężownica chłodząca. Temperatura w zbiorniku mierzona była za pomocą rezystancyjnego czujnika temperatury połączonego z wielokanałowym rejestratorem (Cobra-bid). Regulację oraz odczyt natężeń przepływu umożliwiały zawory z bezpośrednio zabudowanymi rotametrami. Rotametr gazowy pozwalał na płynną regulację przepływu w zakresie 0,1–0,34 m<sup>3</sup>/h. W przypadku cieczy zakres ten wynosił 0,±1,6 m<sup>3</sup>/h.

Gazem wykorzystywanym w pomiarach było sprężone powietrze ze sprężarki. Pomiar spadku ciśnienia przeprowadzany był za pomocą specjalnego miernika różnicowego (Digicomb 1901, zakres pomiarowy: od 0 do 3 bar, dokładność: 0,25%) z dwiema sondami pomiarowymi. Odłączając jedną z sond możliwy był pomiar ciśnienia panującego wewnątrz mieszalnika. Sondy umieszczone były przed i za mieszalnikiem statycznym w odległości 0,008 m od wkładki. Poza pomiarem spadku ciśnienia w mieszalniku badano także ciśnienie panujące na wlocie do mieszalnika. Ciśnienie to odczytywano z tego samego miernika po uprzednim odłączeniu sondy końcowej. Pomiary powtarzano 3-krotnie.

Zdjęcia przedstawiające przepływ układu ciecz-gaz wykonywano aparatem fotograficznym firmy CASIO, który umieszczony był na statywie oddalonym od urządzenia w odległości 0,01 m.

Zdjęcia zostały wykonane w 5 różnych sekcjach mieszalnika, oddalonych kolejno od początku wkładki o 0; 0,114; 0,228; 0,688 oraz 0,802 m. Fotografie wykonano dla trzech natężeń przepływu cieczy: 0,5; 1,0 i 1,4 m<sup>3</sup>/h oraz dwóch natężeń przepływu gazu: 0,1 i 0,3 m<sup>3</sup>/h.

### Wyniki i dyskusja

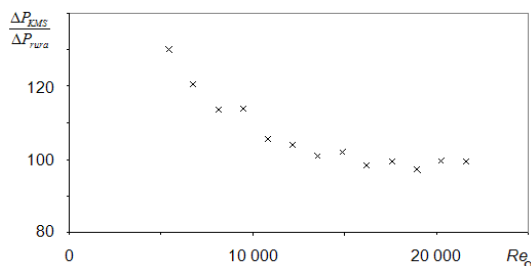
Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyznaczono zależność spadku ciśnienia (Rys. 3) od masowego natężenia przepływu jednofazowego cieczy  $G_c$  i liczby Reynoldsa  $Re_o$  dla cieczy liczonej na pustym aparacie

$$Re_o = \frac{4G_c}{\pi D \eta_c} = \frac{4V_c \rho_c}{\pi D \eta_c} \quad (1)$$

oraz od stosunku objętościowych natężeń przepływu gazu i cieczy:

$$GRL = \frac{V_g}{V_c} \quad (2)$$

w przepływie dwufazowym (Rys. 4).

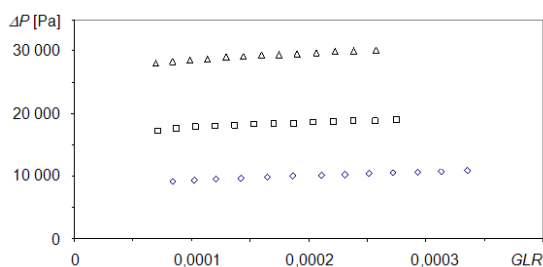


Rys. 3. Porównanie spadku ciśnienia w mieszalniku KMS i w pustej rurze  $\Delta P_{KMS}/\Delta P_{rura}$  w zależności od liczby Reynoldsa liczonej na przekrój wewnętrzny wymiennika dla cieczy

Analizując uzyskany wykres przyrostu spadku ciśnienia w mieszalniku KMS w stosunku do rury pustej (Rys. 3) można stwierdzić, że w zakresie wartości liczby Reynoldsa  $Re_o \in (5400; 14000)$  można go opisać zależnością korelacyjną

$$\frac{\Delta P_{KMS}}{\Delta P_{rura}} = 1315 Re_o^{-0,27} \pm 1,85\% \quad (3)$$

Dla wartości  $Re_o > 14000$  ( $G_c > 0,29$  kg/s) względny spadek ciśnienia w przepływie jednofazowym cieczy w mieszalniku statycznym jest praktycznie niezależny od liczby Reynoldsa i około 100-krotnie większy niż w pustej rurze.



Rys. 4. Przykładowe zależności spadku ciśnienia od  $GLR$  dla przepływu cieczy: ◇ -  $0,7 \text{ m}^3/\text{h}$ ; □ -  $1,1 \text{ m}^3/\text{h}$ ; △ -  $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$

W przypadku przepływu dwufazowego ciecz-gaz w mieszalniku statycznym na straty ciśnienia oprócz natężenia przepływu gazu i cieczy wpływ ma stosunek objętościowy ich strumieni (Rys. 4). Wraz ze wzrostem  $GLR$  spadek ciśnienia w mieszalniku statycznym rośnie, a więc przy stałym natężeniu przepływu cieczy wzrost natężenia przepływu gazu powoduje wzrost różnicy ciśnień. Fakt ten można wytłumaczyć tym, iż wraz ze wzrostem objętości gazu zwiększa się prędkość przepływu medium oraz powstają wiry. Ciecz przepływa szybciej i z większą siłą napiera na elementy statyczne, czego wynikiem jest większy opór przepływu. W przypadku zadanej wartości natężenia przepływu gazu efekt ten można opisać związkiem korelacyjnym o postaci

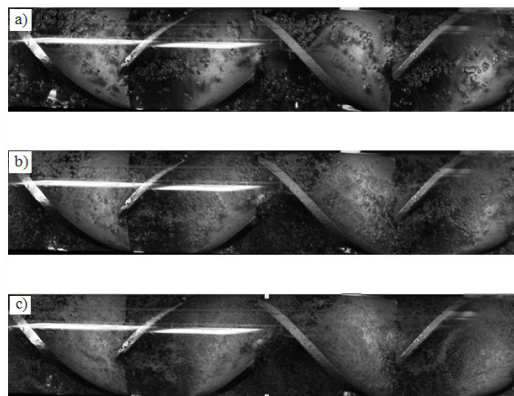
$$\Delta P_{KMS} = C \cdot GLR^A \quad (4)$$

w którym zarówno  $C$ , jak i  $A$  są wielomianami drugiego stopnia:

$$C = C_1 V_c^2 - C_2 V_c + C_3 \quad (5)$$

$$A = A_1 V_c^2 - A_2 V_c + A_3 \quad (6)$$

Analizując otrzymane fotografie (Rys. 5) można zauważyć pozytywny wpływ elementów statycznych na efektywność mieszania. Wraz ze wzrostem odległości od wlotu do mieszalnika pęcherzyki gazu zwiększają swoją liczebność oraz zmniejszają średnicę. Na skutek tego zjawiska następuje zwiększenie powierzchni wymiany masy. Kształt pęcherzyków gazu ulega deformacji osiągając kolejno kształt grzyba, elipsoidy i kulisty [Dziubiński, 2005].



Rys. 5. Przykładowe obrazy pęcherzyków gazu przy stałym natężeniu przepływu gazu  $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$  i różnych natężeniach przepływu cieczy: a)  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , b)  $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ , c)  $1,4 \text{ m}^3/\text{h}$

## Podsumowanie i wnioski

Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, iż:

- wraz ze wzrostem natężenia przepływu cieczy wzrasta spadek ciśnienia w mieszalniku statycznym,
- spadek ciśnienia w mieszalniku statycznym typu KMS jest ponad 100-krotnie większy niż w pustej rurze o tych samych parametrach,
- wzrost natężenia przepływu gazu powoduje wzrost różnicy ciśnień przy stałym natężeniu przepływu cieczy,
- pęcherzyki gazu w kolejnych sekcjach mieszalnika, przy określonych parametrach przepływu medium, są coraz mniejsze, a także zwiększa się ich liczebność,
- im większe natężenie przepływu cieczy przy stałym natężeniu przepływu gazu, tym średnica pęcherzyków w sekcji wylotowej mieszalnika jest mniejsza,
- kształt pęcherzyków gazu na długości wymiennika ulega deformacji osiągając kolejno kształt grzyba i elipsoidy, a ostatecznie kulisty, przy czym kształt kulisty zachowują tylko pęcherzyki o małych wymiarach.

## LITERATURA

- Chemineer™ Products – Kenics static mixers (10.2015.) <http://www.chemineer.com/products/kenics/>
- Cybulski A., Werner K., 1986: Static mixers – criteria for applications and selection. *Int. Chem. Eng.*, **26**(1), 171-180
- Dziubiński M., 2005: *Hydrodynamika przepływu mieszanin dwufazowych ciecz-gaz*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź
- Heyouni A., Roustan M., Do-quang Z., 2002: Hydrodynamics and mass transfer in gas-liquid flow through static mixers. *Chem. Eng. Sci.*, **57**, 3325-3333. DOI: 10.1016/S0009-2509(02)00202-6
- Hyun-Seob S., Sang P., 2005: A general correlation for pressure drop in Kenics static mixer. *Chem. Eng. Sci.*, **60**, 5696-5704. DOI: 10.1016/j.ces.2005.04.084
- Jasińska M., Bałdyga J., 2010: Modelowanie mieszania z reakcją w mieszalniku statycznym typu Kenics. *Inż. Ap. Chem.*, **49**(3), 41-42
- Kenics KM Static Mixer – Quick selection guide. Bulletin 825, 2014. (10.2015) <http://www.alflow.dk/Files/Files/eCom/chemineer/brochure-kenics-en.pdf>
- Paul E., Atiemo-Obeng V., Kresta S., 2004: *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice*, Wiley-Interscience, Hoboken, N.J.
- Shah N., Kale D., 1992: Two-phase, gas-liquid flows in static mixers. *Am. Inst. Chem. Eng.*, **38**, 308-310. DOI: 10.1002/aic.690380218
- Thakur R., Vial Ch., Nigam K., Nauman F., Djelveh G., 2003: Static mixers in the process industries – a review. *Chem. Eng. Res. Des.*, **81**, 787-826. DOI: 10.1205/026387603322302968

Praca została wykonana w ramach działalności statutowej Politechniki Poznańskiej 03/32/DSPB/0502.