

Henryk FIDOS, Marek DZIUBIŃSKI, Anna KAPTUR

e-mail: fidos@p.lodz.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka

Parametry struktury przepływu rzutowego dwufazowych mieszanin ciecz – ciecz w minikanalach

Wstęp

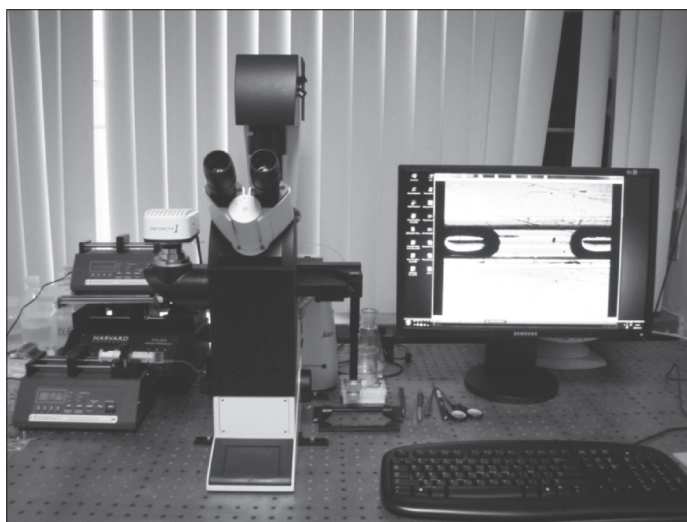
W ostatnich latach obserwuje się znaczne zintensyfikowanie badań dotyczących hydrodynamiki przepływu mieszanin dwufazowych ciecz-ciecz oraz metod charakteryzowania osobliwych właściwości takich układów. Mimo to zagadnienie przepływu mieszanin dwufazowych ciecz – ciecz jest najslabiej opracowane w literaturze przedmiotu w porównaniu z innymi rodzajami przepływów dwufazowych. Wynika to zapewne ze złożoności przepływu mieszanin dwufazowych ciecz – ciecz oraz wielu specyficznych i trudnych do opisanie właściwości takich układów.

Jednym z najnowszych kierunków badań przepływów dwufazowych ciecz – ciecz jest opis zjawisk zachodzących podczas takich przepływów w mini i mikrokanalach. Wynika to z potrzeb dynamicznie rozwijających się badań w zakresie nanotechnologii, badań wymiany masy w mikroreaktorach w układzie ciecz – ciecz, opracowywania nowych metod otrzymywania emulsji oraz badań mikroprzepływów występujących w bioinżynierii i biotechnologii.

Celem prezentowanej pracy było podjęcie próby scharakteryzowania wybranych parametrów przepływu rzutowego ciecz – ciecz w minikanale.

Stanowisko badawcze

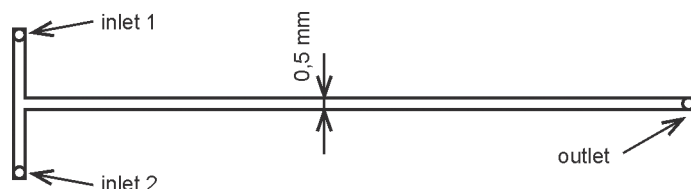
Badania przeprowadzono wykorzystując do tego celu stanowisko badawcze (Rys. 1) będące własnością Katedry Inżynierii Chemicznej Wydziału Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej.



Rys. 1. Stanowisko doświadczalne

Badany minikanal o przekroju kwadratowym wykonany był w płytce z polimetakrylanu metylu (pleksiglas) metodą frezowania na minifrezarce numerycznej, a powierzchnia jego ścianek była polerowana. Jedną ze ścianek, która domykała przekrój kanału, wykonana była z folii z podobnego materiału. Zastosowany mikrokanal miał wlot w kształcie litery T (Rys. 2).

Przepływ obu cieczy był wymuszany za pomocą pomp strzykawkowych PHD 2000 (*Harvard Apparatus*) oraz NE300 (*New Era Pumps*),



Rys. 2. Konstrukcja minikanalu

które wyposażono w jednorazowe strzykawki *B/Braun (Injekt Luer Solo, Niemcy)*. Obraz z immersyjnego mikroskopu *Leica DMI 3000B* rejestrowany był za pomocą kamery *Lumenera Infinity 1* i przesyłany do komputera PC.

Konstrukcja stanowiska doświadczalnego pozwalała na obserwację tworzących się struktur bezpośrednio w polu widzenia mikroskopu. W zakresie stosowanej zmienności parametrów obserwowano wyłącznie przepływ rzutowy. Woda występuje wówczas w postaci kulistych lub elipsoidalnych kropelek o różnych rozmiarach, przepływających w oleju tworzącym fazę ciągłą.

Media doświadczalne

Badania dotyczyły przepływów mieszanin dwufazowych ciecz-ciecz, przy czym fazą ciągłą był olej roślinny, natomiast fazą rozproszoną stanowiła woda. Do badań dobrano takie oleje, które charakteryzowały się dużą odpornością na emulsyfikację z wodą, co pozwoliło uniknąć tworzenia się układów emulsyjnych.

Jako mediów doświadczalnych użyto wody demineralizowanej (faza hydrofilowa) oraz oleju roślinnego (spożywczy *Olej kujawski*) – faza hydrofobowa. Zakres zmian natężeń przepływu oleju wynosił $Q_c = 0,18 \div 2,1$ ml/h, zaś wody $Q_d = 0,01 \div 1,74$ ml/h.

Właściwości mediów w temperaturze 20°C, w której przeprowadzono pomiary podano w tab. 1.

Tab. 1. Właściwości stosowanych mediów

Parametr / Medium	Woda	Olej roślinny
Gęstość [kg/m ³]	1000	911
Lepkość [mPa·s]	1	63
Napięcie powierzchniowe [kg/s ²]	0,0728	0,048

Wyniki badań i ich opracowanie

Dane wejściowe umożliwiające ocenę wartości charakterystycznych parametrów przepływu w minikanale szacowano na podstawie obrazów przepływu uzyskanych podczas filmowania. Z filmów zapisanych w postaci odrębnych plików z rozszerzeniem *avi* należało każdorazowo uzyskać obrazy poszczególnych klatek, a następnie dokonać ich analizy. Niezbędne było wydzielenie klatek w taki sposób, aby na kolejnych wybranych do analizy klatkach znajdowały się naprzemiennie kolejne krople fazy rozproszonej i rzuty fazy ciągłej. Każdy z takich elementów mierzono określając liczbę pikseli odpowiadającą początkowi i końcowi obrazu elementu przepływu rzutowego – w tym celu otwierano obraz każdej z wybranych klatek w aplikacji *MS Paint*. W ten sposób uzyskiwano podstawowe dane wejściowe, czyli długości kropelek i oddzielających je rzutów fazy ciągłej. Przeliczenia długości zmierzonej liczbą pikseli na długość wyrażoną w milimetrach dokonywano w oparciu o porównanie jej ze zmierzoną na analizowanym obrazie liczbą pikseli,

odpowiadającą znanemu wymiarowi szerokości minikanalu wyrażonemu w milimetrach.

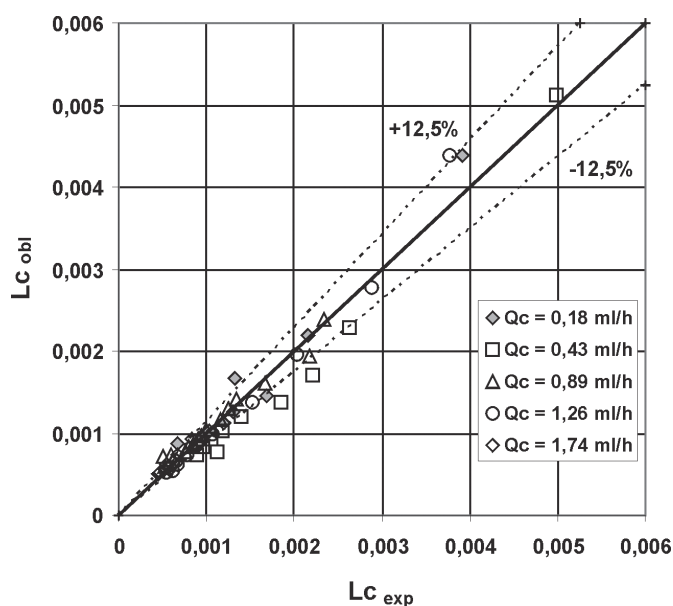
Dane o prędkości liniowej przepływu kropeł uzyskiwano w oparciu o znaną częstotliwość klatek (30 klatek na sekundę), która wynikała z cech zastosowanej cyfrowej kamery filmowej.

Stwierdzono, że otrzymane długości rzutów fazy ciągłej L_c można skorelować w funkcji wlotowych strumieni objętościowych fazy ciągłej Q_c i fazy rozproszonej Q_d w postaci

$$L_c = A Q_c^b Q_d^c \quad (1)$$

Dla przebadanego zakresu zmienności parametrów uzyskano następujące wartości współczynników: $A = 1,192$; $b = 0,176$; $c = -0,5$.

Pozwoliło to przybliżyć wartości długości rzutów fazy ciągłej z błędem nie przekraczającym $\pm 12,5\%$ (Rys. 3).



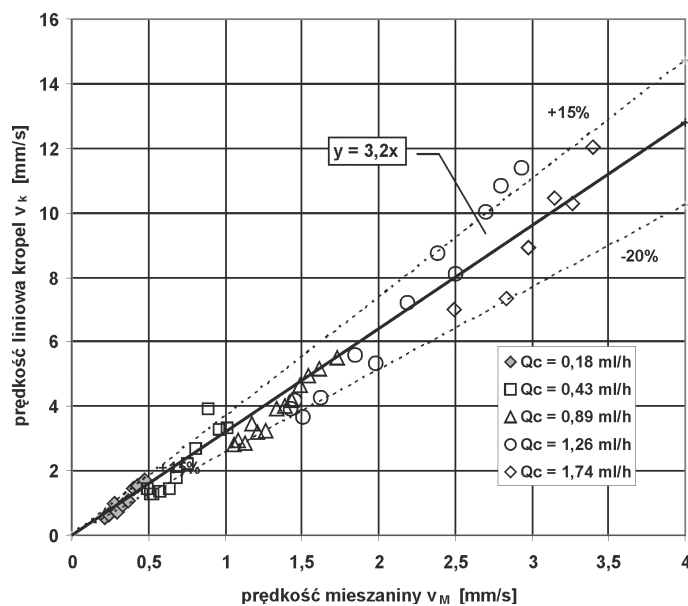
Rys. 3. Porównanie eksperymentalnych wartości długości rzutów fazy ciągłej L_c z wartościami obliczonymi z równania korelacyjnego (1)

Natomiast próby zastosowania dostępnych w literaturze równań korelacyjnych [Xu i in., 2006; Xu i in., 2008] nie przyniosły oczekiwanych rezultatów.

Podjęto także próbę opisu uzyskiwanych wartości prędkości liniowej przepływających struktur fazy rozproszonej za pomocą korelacji stosowanej powszechnie do tego celu [Mishima i in., 1993; Ide i Fukano, 2005; Sowiński i in., 2009] w funkcji prędkości mieszaniny v_M będącej sumą prędkości pozornych obu faz

$$v_k = C_0 v_M v_{dr} \quad (2)$$

Wzięto pod uwagę wartości eksperymentalne z całego zakresu uzyskiwanych prędkości mieszaniny, przy założeniu prędkości dryftu $v_{dr} = 0$ (Rys. 4). Błędy nie przekraczają wartości $\pm 15\%$ i -20% , co w przypadku wyników uzyskiwanych podczas badań przepływów dwufazowych można uznać za w pełni zadowalające.



Rys. 4. Zależność prędkości liniowych struktur fazy rozproszonej v_k od prędkości mieszaniny v_M

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania umożliwiły określenie wartości wybranych parametrów przepływu rzutowego ciecz – ciecz w minikanale o przekroju kwadratowym z wlotem w kształcie litery T.

Na podstawie wyników badań dokonano korelacji parametrów charakterystycznych przepływu dwufazowego czyli długości rzutów fazy ciągłej oraz prędkości liniowych struktur fazy rozproszonej.

Równania korelacyjne w całym zakresie zmienności prędkości mieszaniny (przy założeniu, że prędkość dryftu $v_{dr} \neq 0$) pozwalają przewidywać wartości rozważanych parametrów przepływu z zadowalającą dokładnością.

LITERATURA

- Garstecki P., Fuerstman M.J., Stone H.A., Whitesides G.M., 2006. Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction-scalling and mechanism of break-up. *Lab on a Chip*, 6 437-446. DOI: 10.1039/b510841a
- Ide H., Fukano T., 2005. Experimental research on the correlations of holdup and frictional pressure drop in air-water two-phase flow in capillary rectangular channel. *Experimental Thermal Science*, 29, 833-841. DOI: 10.1016/j.exptthermfluidsci.2005.03.010
- Mishima K., Hibiki T., Nishihara H., 1993. Some characteristics of gas liquid flow in narrow rectangular ducts. *Int. J. Multiphase flow*, 19, 115-124. DOI: 10.1016/0301-9322(93)90027-R
- Sowiński J., Dziubiński M., Fidos H., 2009. Velocity and gas void fraction in two-phase liquid-gas flow in narrow mini-channels. *Arch. Mech.*, 61, 1, 29-40
- Xu J.H., Li S.W., Tan J., Luo G.S., 2008. Correlations of droplet formation in T-junction microfluidic devices: from squeezing to dripping. *Microfluidics and Nanofluidics*, 5, 711-717. DOI: 10.1007/s10404-008-0306-4
- Xu J.H., Li S., Tan J., Chen G.G., Luo G.S., 2006. Formation of monodisperse microbubbles in a microfluidic device. *AIChE J.*, 52, 2254-2259. DOI: 10.1002/aic.10824