

## Ryszard WÓJTOWICZ

e-mail: rwojtowi@pk.edu.pl

Katedra Aparatury Przemysłowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, Kraków

## Pomiary prędkości przepływu cieczy w mieszalniku wibracyjnym metodą anemometrii obrazowej Stereo PIV

### Wstęp

Mieszalniki wibracyjne z tarczowymi mieszadłami wykonującymi ruch posuwisto-zwrotny są interesującą alternatywą dla klasycznych aparatów z mieszadłami obrotowymi, stosowanych w procesach wytwarzania układów wielofazowych. Mimo ich wielu istotnych zalet, takich jak np. prosta konstrukcja czy uniwersalność stosowania są – jak dotychczas – stosunkowo słabo poznane i nieczęsto badane. Opisane w literaturze nieliczne prace badawcze z tego zakresu koncentrowano przede wszystkim na ocenie przydatności mieszalników wibracyjnych w procesach dyspergowania cieczy wzajemnie nierozpuszczalnych [Lo i in., 1998; Kamiński i Wójtowicz, 2003], wytwarzania zawiesin klasycznych [Kamiński i in., 2006] i lekkich [Wójtowicz i Kamiński, 2007], rozpadu fokuł [Shamlou i in., 1996] oraz wymiany ciepła i masy [Masiuk i Rakoczy, 2007]. Analizowano również zapotrzebowanie mocy dla tego typu aparatów [Gierczycki, 1998; Lo i in., 1998; Komoda i in., 2000; Kamiński i in., 2005; Masiuk i Rakoczy, 2007].

W literaturze brakuje natomiast podstawowych informacji na temat modelu przepływu cieczy w mieszalniku wibracyjnym, przede wszystkim zaś danych dotyczących jej cyrkulacji oraz rozkładów prędkości i parametrów burzliwości w strumieniu przepływu generowanym przez mieszadło. Wstępne, nieliczne jeszcze informacje w tym zakresie, uzyskane głównie drogą modelowania numerycznego CFD [Komoda i in., 2001; Wójtowicz, 2008; Wójtowicz, 2011] wymagają szczegółowej walidacji i weryfikacji eksperymentalnej, zwłaszcza dla przyjętych podczas symulacji modeli numerycznych i założeń upraszczających.

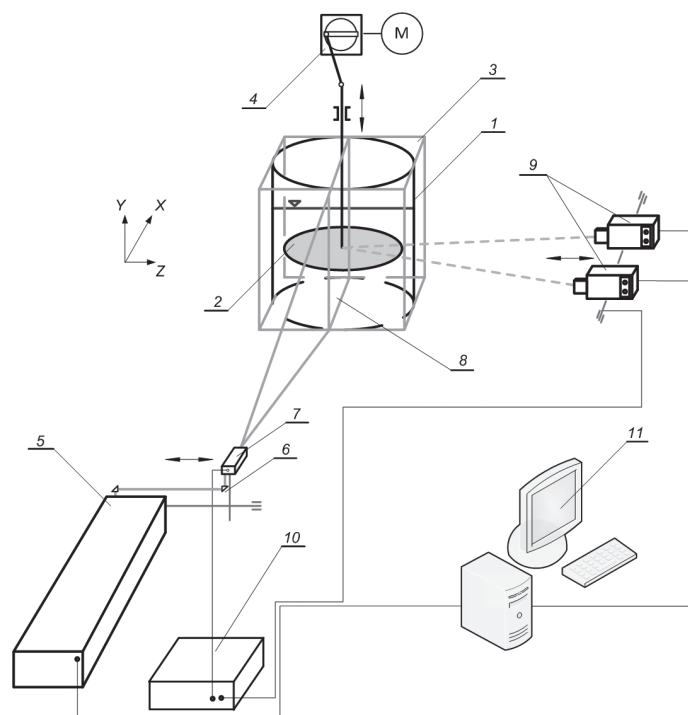
Celem pracy było przeprowadzenie identyfikacji przepływu cieczy w mieszalniku wibracyjnym, z wykorzystaniem metody laserowej anemometrii obrazowej Stereo PIV. Jej wyniki mogą być w przyszłości praktycznie wykorzystane do wyjaśnienia zjawisk i procesów zachodzących podczas mieszania cieczy w tego typu aparatach, dać podstawy ich opisów teoretycznych oraz ułatwić projektowanie i optymalizację konstrukcji mieszalników z mieszadłami wykonującymi ruch posuwisto-zwrotny.

### Zakres i metodyka badań

Schemat stanowiska badawczego pokazano na rys.1. Jego integralną częścią był mieszalnik wibracyjny składający się z cylindrycznego zbiornika – 1 o średnicy  $D = 2R = 0,286$  [m], wewnątrz którego znajdowało się pełne mieszadło tarczowe – 2, wykonujące ruch posuwisto-zwrotny. Średnicę mieszadła  $d$  dobrano tak, by  $D/d = 1,3$ . Amplituda wibracji mieszadła wynosiła  $A = 0,04$  [m], częstotliwość  $f = 1$  [Hz], a odległość od dna zbiornika w środkowym położeniu jego ruchu  $h = 0,5H$ . Cieczą wypełniającą zbiornik do wysokości  $H = D$  była woda destylowana ( $\rho = 998$  kg/m<sup>3</sup>,  $\eta = 0,001$  Pa·s), jako traser używano cząstek poliamidowych (PSP-50) o średnicy 50 [μm].

System pomiarowy składał się z dwuimpulsowego lasera *Dantec DualPower 50-200 - 5* (energia impulsu >50 [mJ], częstotliwość powtarzania par impulsów 200 [Hz]), układów optycznych: wiązki – 6 i płaszczyzny świetlnej – 7 oraz dwóch ultraszybkich kamer *Dantec Speed Sense 9040 - 9* o częstotliwości rejestracji obrazu 1016 FPS. Zastosowanie dwóch kamer w układzie stereo 3D pozwalało na jednoczesne wyznaczanie wszystkich trzech składowych prędkości przepływu cieczy. Kamery – 9 i system optyczny płaszczyzny świetlnej – 7, umieszczono na ruchomych profilach układu trawersującego, co umożliwiała ich zsynchronizowany ruch zarówno podczas procesu kalibracji jak i pomiarów. Obrazy zarejestrowane przez kamery analizowano za pomocą oprogra-

mowania *Dynamic Studio 3.20*, wyznaczając wartości prędkości cieczy w trzech, wzajemnie prostopadłych kierunkach (Rys. 1).



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – mieszadło, 2 – cylindryczny zbiornik mieszalnika, 3 – płaszczyzna prostopadłościenna, 4 – system napędu mieszadła, 5 – laser, 6 – układ optyczny wiązki, 7 – układ optyczny płaszczyzny świetlnej, 8 – płaszczyzna świetlna (light-sheet), 9 – ultraszybkie kamery, 10 – sterownik systemu trawersującego, 11 – komputer ze specjalistycznym oprogramowaniem

### Wyniki badań i wnioski

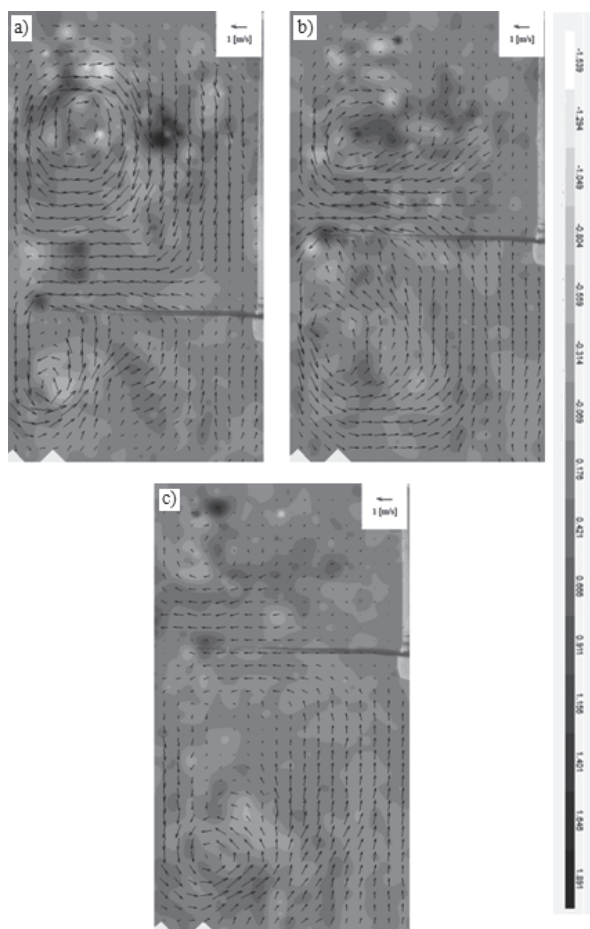
Na rys. 2 pokazano przykładowe mapy 3D, obrazujące przepływ cieczy podczas pełnego ruchu mieszadła w górę. Wektory ilustrują wypadkową składowych promieniowej  $u_r$  i osiowej  $u_z$ , kontury wartości składowej obwodowej  $u_\theta$ . Przykładowe pomiary wykonano w płaszczyźnie obejmującej połowę osiowego przekroju mieszalnika.

Na mapach przedstawionych na rys. 2 widoczne są wiry dużej skali powstające w obszarach nad i pod mieszadłem, podział strumienia cieczy oraz jej przepływ osiowy, wzdłuż ścianek aparatu. Intensywny ruch cieczy generowany jest przede wszystkim w strefie oddziaływania wirów oraz w wąskiej szczelinie między mieszadłem a ścianką zbiornika.

Gdy mieszadło znajduje się w skrajnym, dolnym położeniu (Rys. 2a) intensywny ruch cieczy w dolnej części zbiornika i bliskość dna aparatu powodują stopniową deformację wirów pod mieszadłem i odchylenie jej przepływu w kierunku osi mieszalnika.

Dla środkowego położenia mieszadła (Rys. 2b) tworzące się wiry mają większą skalę, zaś gdy mieszadło znajduje się najwyżej (Rys. 2c) silne wirowanie cieczy występuje przede wszystkim pod nim, w dolnej części zbiornika, bliżej ścianki i dna.

W porównaniu z aparatami klasycznymi (z mieszadłami obrotowymi) w mieszalniku wibracyjnym słabszy jest obwodowy (okrężny) ruch cieczy. Wartości prędkości obwodowej  $u_\theta$  dla przeważającej części płaszczyzny pomiarowej nie przekraczają zwykle 0,25 m/s. Uwagę zwraca



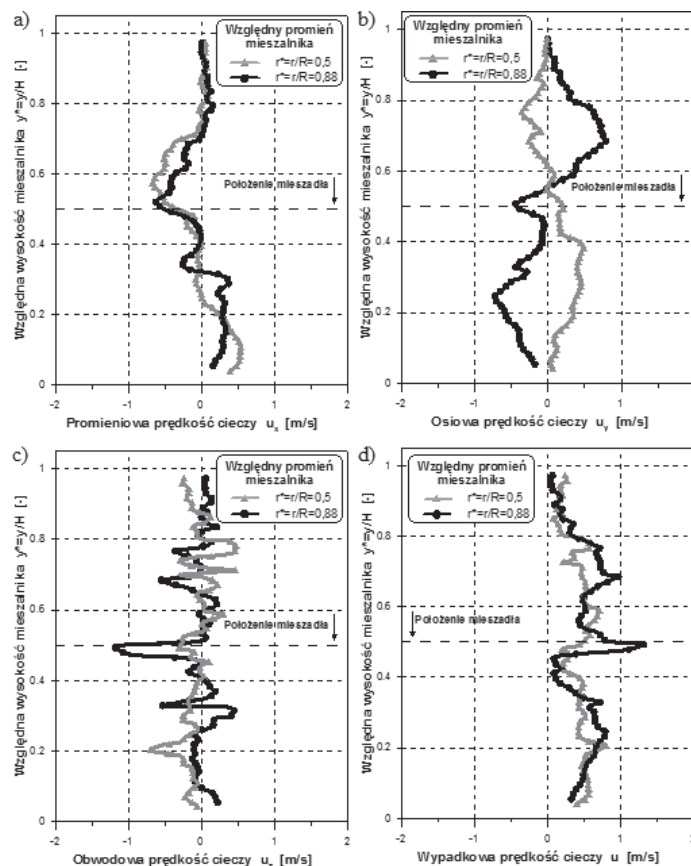
Rys. 2. Mapy 3D (wektorowo-konturowe) prędkości przepływu cieczy w mieszalniku wibracyjnym przy różnych położeniach mieszadła: a) skrajne dolne położenie, b) położenie środkowe, c) skrajne górne położenie

natomiast fakt występowania (Rys. 2) nielicznych i nierównomiernie usytuowanych kołowych stref o małej średnicy i wysokich prędkościach obwodowych ( $u_z > 1,2$  m/s), co może świadczyć o niestabilnym przepływie cieczy w tym kierunku.

Dodatkowo, dla ułatwienia oceny ilościowej przepływu, sporządzono wykresy przedstawiające zmiany składowych prędkości cieczy w mieszalniku (Rys. 3). Krzywe ilustrują zmiany prędkości dla dwóch wybranych, względnych promieni aparatu:  $r^* = r/R = 0,5$  (połowa promienia zbiornika) oraz  $r^* = r/R = 0,88$  (środek szczeliny między ścianką zbiornika a mieszadłem), przy środkowym położeniu mieszadła. Pokazane przebiegi potwierdzają ilościowo opisany wcześniej model przepływu. Na rys.3a widać duże podobieństwo (zarówno pod względem kształtu jak i wartości) rozkładów prędkości promieniowych oraz stosunkowo wysokie – zwłaszcza w pobliżu ścianki zbiornika ( $r^* = 0,88$ ) – prędkości osiowe (Rys. 3b).

Inny charakter zmian widoczny jest natomiast w przypadku prędkości obwodowych (Rys. 3c). Dla obydwu promieni aparatu przepływ cieczy w tym kierunku jest niestabilny a składowe obwodowe wykazują duże fluktuacje wzdłuż wysokości mieszalnika. Zmienia się zarówno ich znak (kierunek przepływu cieczy) jak i wartości. Najwyższe obwodowe prędkości cieczy wyznaczono w szczelinie między mieszadłem a ścianką zbiornika, blisko końca dysku.

Wstępne porównanie wyników pomiarów z wynikami symulacji numerycznych wykazało ich dobrą zgodność, zarówno jakościową jak i ilościową. Stosunkowo małe różnice między wartościami zmierzonymi i symulowanymi wyznaczono w przypadku prędkości promieniowych i osiowych, większe dla składowej obwodowej. Należy jednak zaznaczyć, iż pełna walidacja modelowania numerycznego oraz weryfikacja zastosowanych modeli obliczeniowych będzie możliwa dopiero po przeprowadzeniu pomiarów w szerszym zakresie zmienności parametrów procesowych, dla różnych średnic i położeniach mieszadła oraz różnych częstotliwości i amplitud jego wibracji.



Rys. 3. Zmiany prędkości przepływu cieczy w funkcji względnego promienia  $r^*$  mieszalnika: a) składowa promieniowa, b) składowa osiowa, c) składowa obwodowa, d) wypadkowa (środkowe położenie mieszadła)

LITERATURA

Gierczycki A.T., 1998. Power curves for vibrating mixers. *Chem. Biochem. Eng. Q.*, **12**, 97-100

Kamiński J., Wójtowicz R., 2003. Dispersion of liquid-liquid systems in a mixer with a reciprocating agitator. *Chem. Eng. Proc.*, **42**, 1007-1017. DOI: 10.1016/S0255-2701(02)00214-3

Kamiński J., Wójtowicz R., Spytkowski S., 2005. Charakterystyki mocy pełnych i perforowanych mieszadeł tarczowych. *Inż. Ap. Chem.*, **44**, 5s, 28-31

Kamiński J., Wójtowicz R., Spytkowski S., 2006. Warunki wytwarzania zawiesin w mieszalniku z mieszadłem tarczowym. *Inż. Ap. Chem.*, **45**, 6s, 106-107

Komoda Y., Inoue Y., Hirata Y., 2000. Mixing performance by reciprocating a disk in a cylindrical vessel. *J. Chem. Eng. Jap.*, **33**, 879-885. DOI: 10.1252/jcej.33.879

Komoda Y., Inoue Y., Hirata Y., 2001. Mixing performance by reciprocating a disk in a cylindrical vessel. *J. Chem. Eng. Jap.*, **34**, 929-935. DOI: 10.1252/jcej.34.929

Lo M.Y.A., Gierczycki A.T., Titchener-Hooker N.J., Ayazi Shamlou P., 1998. Newtonian power curve and drop size distributions for vibromixers. *Can. J. Chem. Eng.*, **76**, 471-478. DOI: 10.1002/cjce.5450760317

Masiuk S., Rakoczy R., 2007. Power consumption, mixing time, heat and mass transfer measurements for a liquid vessel that is mixed using a reciprocating multiplates agitator. *Chem. Eng. Proc.*, **46**, 89-98. DOI: 10.1016/j.ccep.2006.05.002

Shamlou P.A., Gierczycki A.T., Titchener-Hooker N.J., 1996. Breakage of flocs in liquid suspensions agitated by vibrating and rotating mixers. *Chem. Eng. J.*, **62**, 23-34. DOI: 10.1016/0923-0467(95)03054-9

Wójtowicz R., Kamiński J., 2007. *Warunki wytwarzania zawiesin „lekkich” w mieszalniku wibracyjnym*. XIX Ogólnopolska Konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej. Rzeszów, 509-512 (ISBN 978-83-7199-451-7)

Wójtowicz R., 2008. Podstawy modelowania CFD mieszalnika wibracyjnego. *Czas. Tech.*, **2-M**, 371-383

Wójtowicz R., 2011. *The vibromixers – a current state of research and trends of further investigations* [in:] Process Engineering and Chemical Plant Design (G. Wozny, L. Hady, eds.), Universitätsverlag der TU Berlin, 124-134 (ISBN 978-3-7983-2361-2)