

Sylvia PERYT-STAWIARSKA, Zdzisław JAWORSKI

e-mail: peryt@zut.edu.pl

Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej,  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

## Przepływ płynu nienewtonowskiego pomiędzy dwoma współosiowymi walcami – analiza pola prędkości na podstawie wyników LDA

### Wstęp

Przepływ *Taylor-Couette'a* jest realizowany w przestrzeni pierścieniowej, która jest ograniczona dwoma współosiowymi cylindrami o różnych średnicach. W układzie tym cylinder wewnętrzny może być ruchomy – pełni wówczas rolę rotora, natomiast cylinder zewnętrzny jest nieruchomy i pełni rolę statora. Przepływ *Taylor-Couette'a-Poiseuille'a* polega na uwzględnieniu dodatkowo przepływu osiowego.

Badania eksperymentalne dla przepływu *Taylor-Couette'a* zostały wykonane między innymi przez: *Wanga i in.* [1, 2], *Conwaya i in.* [3], *Racina i Kinda* [4], *Mosera i in.* [5] czy też *Sathera i in.* [6]. Przykładowo *Racina i Kind* [4] badali przepływ *Taylor-Couette'a* przy zastosowaniu metody PIV. Technika tę zastosował również *Sather i in.* [6]. Autorzy pracy [6] wykonali pomiary dla przepływu jedno- i dwukierunkowego. Otrzymane wyniki pozwoliły na analizę rozkładów prędkości w obszarze pomiędzy cylindrami. Rezultaty te były również wykorzystane do weryfikacji wyników symulacji numerycznych CFD. Z kolei *Moser i in.* [5] przeprowadzili badania eksperymentalne techniką rezonansu magnetycznego. Otrzymane w ten sposób wyniki również pozwoliły na wizualizację przepływu *Taylor-Couette'a*.

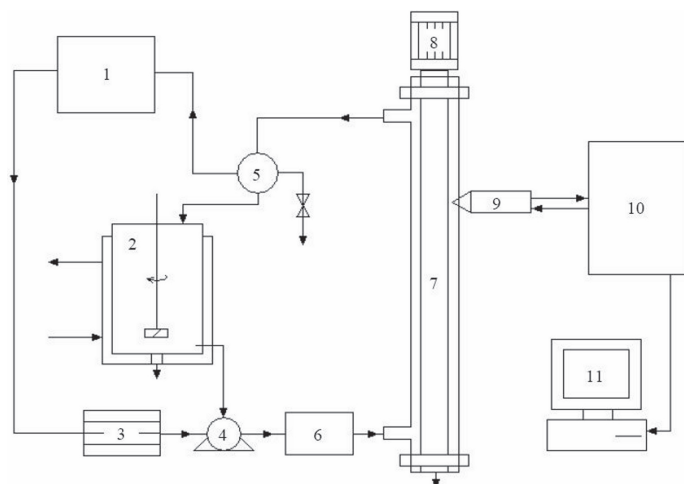
*Dumont i in.* w pracy [7] przedstawili wyniki badań eksperymentalnych dla przepływu *Taylor-Couette'a-Poiseuille'a*. Pomiary wykonano dla wodnego roztworu CMC i zakresu stężeń od 0,5 do 1,1%. Częstość obrotów rotora mieściła się w zakresie od 3 do 10 obr/min, natomiast zakres liczby *Reynoldsa* obejmował wartości od  $Re = 0,01$  do  $Re = 4,0$ . *Dumont i in.* [7] stwierdzili występowanie w przepływie regularnych wirów *Taylora*. Ponadto zaobserwowali, że wzrost częstości obrotów cylindra wewnętrznego powodował niewielki spadek średniej wartości energii spektralnej.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury stwierdzono, że zarówno przepływ jedno- jak i dwukierunkowy był przedmiotem badań. W większości prace badawcze były wykonywane dla przepływu płynu newtonowskiego. W nielicznych pracach są prezentowane wyniki dla płynów nienewtonowskich [7]. Dlatego też celem niniejszej pracy jest analiza wyników uzyskanych z pomiarów LDA dla przepływu jedno- i dwukierunkowego płynu nienewtonowskiego – wodnego roztworu karboksymetylocelulozy.

W praktyce wyniki niniejszej pracy mogą zostać wykorzystane do weryfikacji wyników symulacji numerycznych Obliczeniowej Mechaniki Płynów (CFD). Metoda CFD pozwala na analizę numeryczną zjawisk przepływowych, w tym również przepływów typu *Taylor-Couette'a*, czy *Couette'a-Poiseuille'a*. Otrzymane wyniki mogą być praktycznie wykorzystane w procesie projektowania aparatury chemicznej.

### Metodyka badań

Badania eksperymentalne LDA wykonano dla przepływu jednokierunkowego (*Taylor-Couette'a*) oraz dwukierunkowego (*Couette'a-Poiseuille'a*). Badanym roztworem był płyn nienewtonowski – wodny roztwór soli sodowej karboksymetylocelulozy (CMC) *Blanose typ 9H4* firmy *Herkules* o stężeniu równym 0,3%, wskaźnik płynięcia  $n \approx 0,59$ ; współczynnik konsystencji  $k \approx 0,19 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ . Pomiary LDA wykonano w ramach pracy [8] dla układu przedstawionego na rys. 1. Integralnym elementem układu jest układ dwóch współosiowych cylindrów – 7. Cylinder zewnętrzny, który jest statorem, został wykonany z plexi, co pozwalało na przejście promieniowania laserowego i wykonanie pomiaru. Cylinder wewnętrzny, rotor, był połączony z silnikiem – 8, który



Rys. 1. Schemat aparatury doświadczalnej:

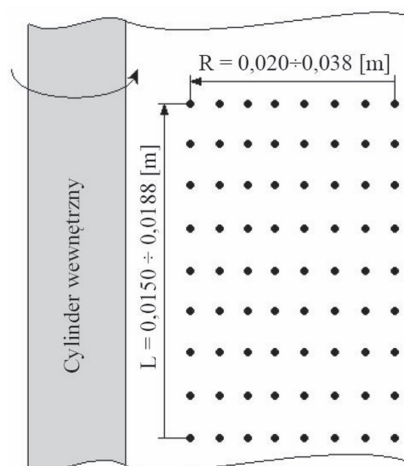
1 – układ sterujący; 2 – mieszalnik; 3 – silnik elektryczny pompy; 4 – pompa śrubowa; 5 – elektromagnetyczny miernik przepływu; 6 – tłumik pulsacji przepływu; 7 – układ dwóch współosiowych cylindrów; 8 – silnik elektryczny obracający cylinder wewnętrznym; 9 – sonda pomiarowa; 10 – układ LDA; 11 – komputer, na dysku którego były rejestrowane dane pomiarowe

wprawiał go w ruch obrotowy. Średnica statora wynosiła  $d_s = 0,080 \text{ m}$ , natomiast średnica rotora wynosiła  $d_r = 0,040 \text{ m}$ .

Pomiary dla przepływu jednokierunkowego (*Taylor-Couette'a*) wykonano w dziesięciu punktach  $R$  na różnych wysokościach, od  $L = 0,015 \text{ m}$  do  $L = 0,0188 \text{ m}$ , przedstawionych schematycznie na rys. 2. Częstość obrotów rotora mieściła się w zakresie od 10 do 160 obr/min.

Dla przepływu dwukierunkowego (*Couette'a-Poiseuille'a*) dane zbierano na jednej wysokości,  $L = 0,017 \text{ m}$ . Dla przepływu dwukierunkowego częstość obrotów rotora wynosiła kolejno  $n = 10; 20; 30 \text{ obr/min}$ , natomiast przepływ osiowy był opisany liczbą *Reynoldsa* z zakresu od  $Re = 10$  do  $Re = 90$ .

Pomiary LDA wykonano dla składowej osiowej prędkości.



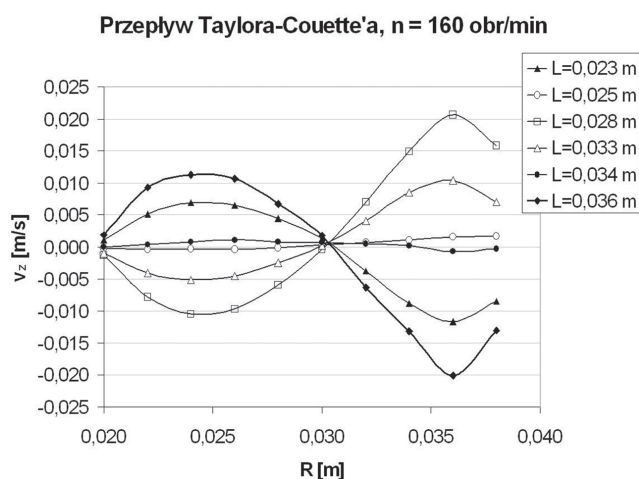
Rys. 2. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych, przepływ jednokierunkowy

## Analiza i omówienie wyników

### Przepływ jednokierunkowy Taylora-Couette'a

W pierwszym etapie badań wykonano pomiary dla przepływu jednokierunkowego. Dla częstości obrotów rotora  $n = 10$  obr/min otrzymane wartości prędkości średniej były rzędu  $10^{-5}$  [m/s] [8]. W związku z tym zawężono zakres częstości obrotów rotora ( $n = 90 \div 160$  obr/min), dla którego wykonano dalsze pomiary LDA.

Stwierdzono, że wzrost częstości obrotów rotora powodował znaczący wzrost wartości prędkości średniej składowej osiowej. Pomiary wykonano zarówno wzdłuż promienia  $R$ , jak i wzdłuż wysokości cylindrów  $L$ . Na rys. 3 przykładowo zaprezentowano rozkłady prędkości średniej dla  $n = 160$  obr/min i  $L$  równego kolejno: 0,023; 0,025; 0,028; 0,033; 0,034 i 0,036 m. Na podstawie otrzymanych profili można było stwierdzić występowanie w przepływie w obszarze pomiędzy cylindrami wirów Taylora. W literaturze przedmiotu [9] podane są korelacje pozwalające na wyznaczenie liczby Taylora dla danego układu i przepływu Couette'a.



Rys. 3. Profile prędkości wzdłuż promienia  $R$  na różnych wysokościach  $L$ , przepływ jednokierunkowy

Charakterystyczne dla przepływu Couette'a z wirami Taylora profile prędkości średniej składowej osiowej odnotowano dla częstości obrotów rotora  $n = 90 \div 160$  obr/min. Dla najwyższej częstości obrotów,  $n = 160$  obr/min, składowa osiowa prędkości,  $v_z$ , przyjmowała wartości od -0,020 do 0,020 m/s.

### Przepływ dwukierunkowy Couette'a-Poiseuille'a

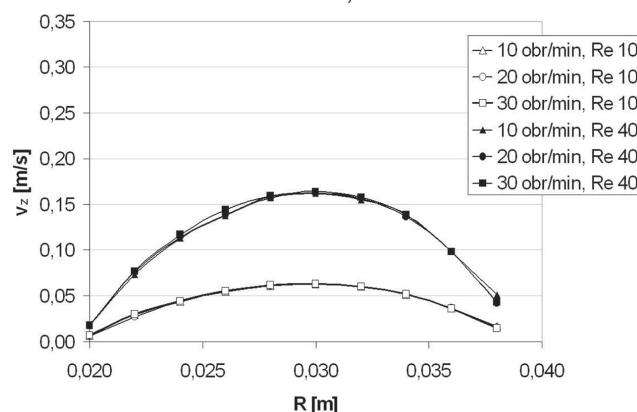
Pomiary LDA dla przepływu dwukierunkowego wykonano dla trzech częstości obrotów  $n = 10; 20; 30$  obr/min. Na rys. 4 i 5 przedstawiono profile prędkości składowej osiowej dla wybranych wartości  $Re = 10; 40; 60; 90$ , co odpowiadało przepływowi laminarnemu.

Stwierdzono, że dla przepływu Couette'a-Poiseuille'a istotny wpływ na profil prędkości miał przepływ osiowy. Otrzymane profile prędkości były charakterystyczne dla przepływu laminarnego.

Dla danej wartości liczby Reynoldsa profile prędkości pokrywały się ze sobą co oznacza, że wpływ częstości obrotów był niewielki. Należy jednak podkreślić, że pomiary wykonano dla niskich wartości częstości obrotów  $n$  (od 10 do 30 obr/min) i w przyszłości pomiary należałoby wykonać dla wyższych częstości  $n$  z przedziału od 90 do 160 obr/min oraz  $Re = 10$ , dla których to częstotliwości można spodziewać się wystąpienia w przepływie wirów Taylora.

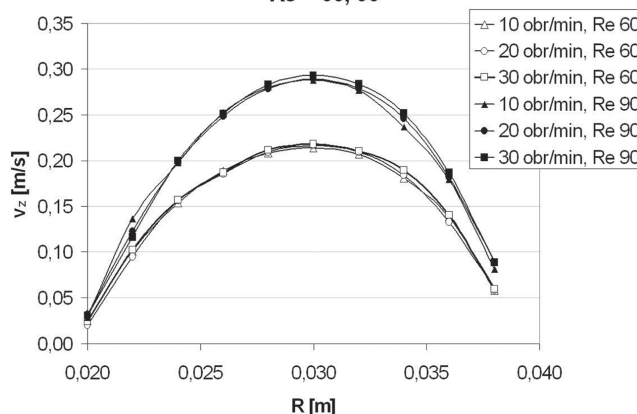
Otrzymane wyniki mogą być zastosowane do weryfikacji wyników symulacji numerycznych CFD.

### Przepływ Couette'a-Poiseuille'a, $Re = 10, 40$



Rys. 4. Profile prędkości wzdłuż promienia  $R$ , przepływ dwukierunkowy  $Re = 10, 40$

### Przepływ Couette'a-Poiseuille'a, $Re = 60, 90$



Rys. 5. Profile prędkości wzdłuż promienia  $R$ , przepływ dwukierunkowy  $Re = 60, 90$

## Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych LDA dla przepływu jedno- i dwukierunkowego. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono występowanie wirów Taylora w przepływie jednokierunkowym dla częstości rotora  $n = 90 \div 160$  obr/min.

Z kolei dla przepływu dwukierunkowego stwierdzono istotny wpływ przepływu osiowego, opisanego liczbą Reynoldsa od 10 do 90, na profile prędkości. Za konieczne uznano uzupełnienie danych o wyniki pomiarów dla wyższych częstości obrotów rotora  $n = 90 \div 160$  obr/min i  $Re = 10$ .

## LITERATURA

- [1] L. Wang, D.L. Marchisio, R.D. Vigil, R.O. Fox: J Colloid&Interface Sci. **380**, 282 (2005).
- [2] L. Wang, R.D. Vigil, R.O. Fox: J Colloid&Interface Sci. **167**, 285 (2005).
- [3] S.L. Conway, T. Shinbrot, B.J. Glasser: Nature, **433**, 431 (2004).
- [4] A. Racina, M. Kind: Experiments in Fluids, **513**, 41 (2006).
- [5] K.W. Moser, L.G. Ragun, A. Harris, H.D. Morris, J. Georgiadis, M. Shannon, M. Philpott: Magnetic Resonance Imaging, **199**, 18 (2000).
- [6] M.J. Sathe, S.S. Deshmukh, J.B. Joshi, S.B. Koganti: Ind. Eng. Chem. Res. **14**, 49 (2010).
- [7] E. Dumont, F. Fayolle, V. Sobolik, J. Legrand: Inter. J. Heat&Mass Trans., **679**, 45 (2002).
- [8] M. Stefaniak: Badania dwukierunkowych przepływów nienewtonowskich, praca magisterska, Szczecin (2004).
- [9] M.C. Kim, C.K. Choi: Chem. Eng. Sci., **599**, 60 (2005).

Autorzy pracy składają serdeczne podziękowania Komitetowi Badań Naukowych za wsparcie finansowe badań oraz panu Ł. Daniełowi za pomoc w opracowaniu wyników badań eksperymentalnych.