

SYLWIA PERYT-STAWIARSKA
IRMINA TOMKIEL

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

Wizualizacja przepływu *Couette'a-Taylor*a dla płynu newtonowskiego – zastosowanie metody CFD

Wprowadzenie

Numeryczna mechanika płynów (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) jest nowoczesnym narzędziem projektowym. Metoda CFD umożliwia szczegółową analizę zagadnień wiążących się z przepływami płynów, takich jak: reakcje chemiczne, ruch masy i ciepła, rozkłady pola ciśnienia oraz pola prędkości [1]. Zastosowanie techniki CFD pozwala na znaczne skrócenie czasu projektowania produktów oraz aparatów i instalacji oraz ogranicza się ilość budowanych prototypów. Wyniki symulacji wybranego procesu pozwalają również na optymalizację już istniejących konstrukcji, ale także testowanie potencjalnych rozwiązań konstrukcyjnych.

W procesach inżynierii chemicznej można spotkać się z występowaniem tak zwanego przepływu *Couette'a-Taylor*a. Przepływ ten jest realizowany w przestrzeni pierścieniowej, która jest ograniczona dwoma współosiowymi cylindrami o różnych średnicach. W układzie tym cylinder wewnętrzny jest ruchomy i pełni rolę rotora, natomiast zewnętrzny jest nieruchomy i pełni rolę statora. W pracy Dumonta i wsp. [2] omówiono wyniki badań eksperymentalnych dla przepływu *Taylor-Couette'a-Poiseuille'a*. Pomiarów wykonano przy zastosowaniu metody elektrochemicznej dla niskich wartości liczby *Reynoldsa* (do $Re = 4$). Prędkość obrotowa rotora zmieniła się w zakresie od 0,314 do 1,047 rad/s. Na podstawie otrzymanych wyników, stwierdzono występowanie regularnych wirów *Taylor*a.

Z kolei Hubacz i wsp. [3] wykonali symulacje numeryczne dla przepływu dwufazowego *Couette'a-Taylor*a w układzie ciecz-ciecz. Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono parametry charakterystyczne dla struktury przepływu dwufazowego typu *Couette'a-Taylor*a, takie jak: długość pary wirów *Taylor*a czy też prędkość przepływu osiowego wirów. Również Hwang i Yang [4] wykonali symulacje CFD dla złożonego przepływu osiowego typu *Couette'a-Taylor*a. W pracy [4] wykazali, że dla danych liczb kryterialnych Re i Ta w przepływie można było wyodrębnić uwarstwiony przepływ *Couette'a-Poiseuille'a* (CP) bez efektów wirowych oraz pięć rodzajów struktur przepływu z efektem wirowaniem. Natomiast Conway i wsp. [5] na podstawie wyników symulacji CFD omówili wpływ wartości liczby *Taylor*a na występowanie charakterystycznych struktur wirowych.

Na podstawie dokonanego przeglądu literatury stwierdzono, że w ostatnich latach zaczęło się pojawiać coraz więcej prac (eksperymentalnych i numerycznych) omawiających hydrodynamikę przepływu *Couette'a-Taylor*a. Prace numeryczne w większości były wykonane dla geometrii dwuwymiarowej. Dlatego też celem niniejszej pracy było wykonanie symulacji numerycznych dla geometrii trójwymiarowej i płynu

newtonowskiego. Otrzymane wyniki pozwoliły na ocenę struktury przepływu pomiędzy dwoma walcami (wewnętrznym – rotorem i zewnętrznym – statorem).

Wyniki, wykonanych w ramach pracy symulacji CFD, pozwalają na przewidywanie występowania struktur wirowych w przepływie pomiędzy dwoma współosiowymi cylindrami. W praktyce wyniki te można zastosować do optymalizacji projektowanych urządzeń, aparatury lub instalacji.

Przepływ w układzie cylinder-cylinder

Prosty przepływ *Couette'a* [6] jest wywołany ruchem jednej ze ścian, przy spadku ciśnienia równym zero. Stwierdzono, że dla układu dwóch współosiowych cylindrów przy dużej częstotliwości obrotów jednego z nich, może zostać zakłócony przepływ laminarny w przestrzeni między cylindrami. Zaburzenia te powstają wskutek działającej siły odśrodkowej. Bardzo ważną rolę odgrywa to, który cylinder wykonuje ruch obrotowy, a który pozostaje nieruchomy [7]. Gdy nieruchomy jest cylinder wewnętrzny, wówczas przepływ laminarny jest o wiele bardziej stabilny. Wiry *Taylor*a występują przy przejściu z przepływu laminarnego w burzliwy. *Taylor*, na podstawie przeprowadzonych badań teoretycznych przewidział, że musi występować pewna krytyczna częstota obrotów, powyżej której powstaje w przepływającym płynie seria regularnych wirów, które wypełniają pierścieniową szczelinę między cylindrami.

Wartości liczby *Taylor*a, Ta , wyznaczają rodzaje wirów oraz zakres ich występowania. W literaturze można znaleźć różne sposoby wyrażania liczby *Taylor*a; przykładowo Dumont i wsp. [2] dla cieczy newtonowskich zaproponowali wyrażenie:

$$Ta = \sqrt{\frac{R_s - R_r}{R_r}} \frac{\rho d_h}{2} \frac{\omega_r R_r}{\mu_m} \quad (1)$$

gdzie:

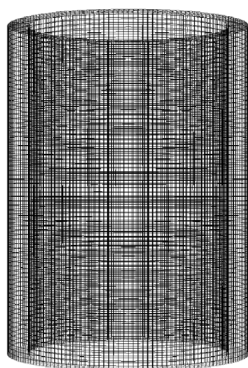
- R_s – średnica cylindra zewnętrznego (statora) [m],
- R_r – średnica cylindra wewnętrznego (rotora) [m],
- ω_r – prędkość kątowna rotora [rad/s].

Metodyka symulacji numerycznych CFD

Symulacje wykonano dla trójwymiarowej geometrii (Rys. 1.) wygenerowanej w programie *Gambit 2.0*. Siatka numeryczna składała się z 45698 komórek obliczeniowych. Średnica cylindra zewnętrznego (statora) wynosiła $d_s = 0,0800$ m, średnica cylindra wewnętrznego (rotora) $d_r = 0,0664$ m, natomiast wysokość cylindrów była równa $H = 0,22$ m. Średnicę obu cylindrów dobrano tak, aby spełniony

został warunek podany przez *Yanga* i *Hwanga* [4], to jest: $R_r/R_s = 0,83$.

Po wprowadzenie warunków brzegowych i granicznych, takich jak gęstość ($\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$) i lepkość ($\mu = 1,003 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$) wody, wykonano symulacje CFD programie *Fluent 6.3*. Założono izotermiczne warunki przepływu ($T = 293 \text{ K}$). Symulacje numeryczne dla przepływu *Couette'a-Taylor'a* zostały wykonane dla prędkości kątowej rotora równej kolejno $\omega = 0,55$; $2,43$; $3,46 \text{ rad/s}$.

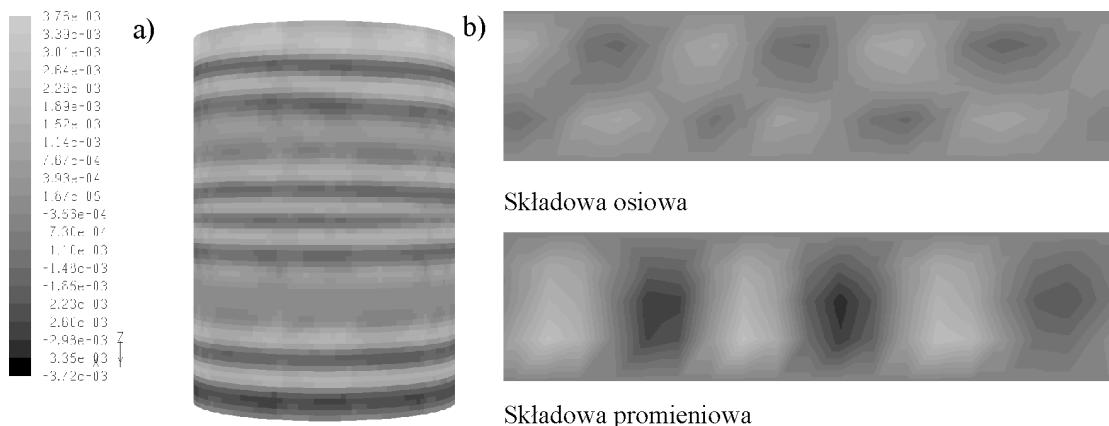


Rys. 1. Siatka numeryczna

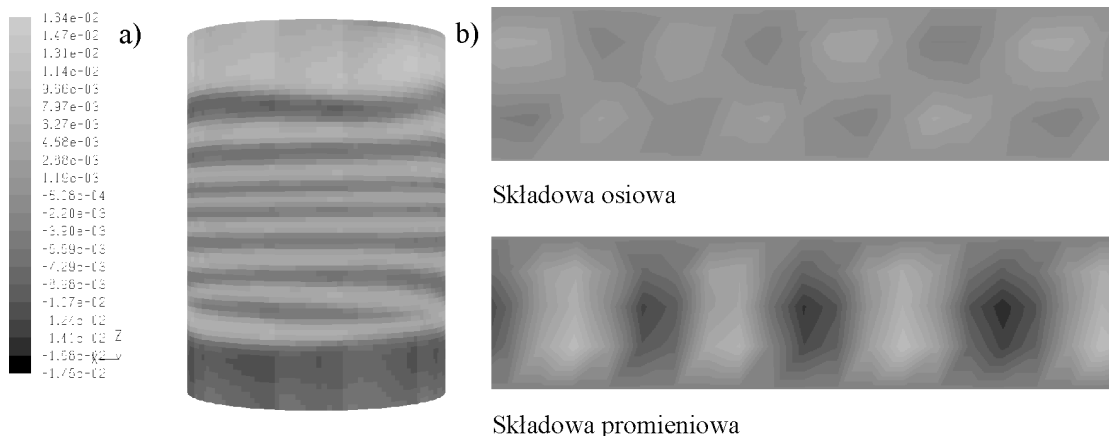
Dyskusja wyników

Mapy prędkości; $\omega = 0,55 \text{ rad/s}$

Dla prędkości kątowej $\omega = 0,55 \text{ rad/s}$ stwierdzono występowanie cyrkulacji i zawirowań. Dla przepływu *Couette'a-Taylor'a* charakterystyczne jest występowanie pierścieni, które stwierdzono zarówno dla składowej osiowej jak i promieniowej prędkości (Rys. 2a). Pierścienie te miały szerokość około $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$. Wiry *Taylor'a* były wyraźnie widoczne szczególnie dla składowej promieniowej prędkości (Rys. 2b).



Rys. 2. Mapy prędkości, częstość obrotów rotora $\omega = 0,55 \text{ rad/s}$: a) składowa osiowa – widok z przodu na modelowaną geometrię; b) składowa osiowa i promieniowa – powiększony fragment obszaru między statorem a rotorem (przestrzeń pomiędzy walcami)



Rys. 3. Mapy prędkości, częstość obrotów rotora $\omega = 2,43 \text{ rad/s}$: a) składowa osiowa – widok z przodu na modelowaną geometrię; b) składowa osiowa i promieniowa – powiększony fragment obszaru między statorem a rotorem (przestrzeń pomiędzy walcami)

Na podstawie wyników obliczeń numerycznych CFD stwierdzono, że dla $\omega = 0,55 \text{ rad/s}$ maksymalna prędkość osiowa była równa około $0,0027 \text{ m/s}$, a minimalna prędkość była równa około $-0,0025 \text{ m/s}$. Z kolei dla składowej promieniowej prędkości maksymalna wynosiła około $0,0035 \text{ m/s}$, a prędkość minimalna dla tej składowej była równa około $-0,0025 \text{ m/s}$.

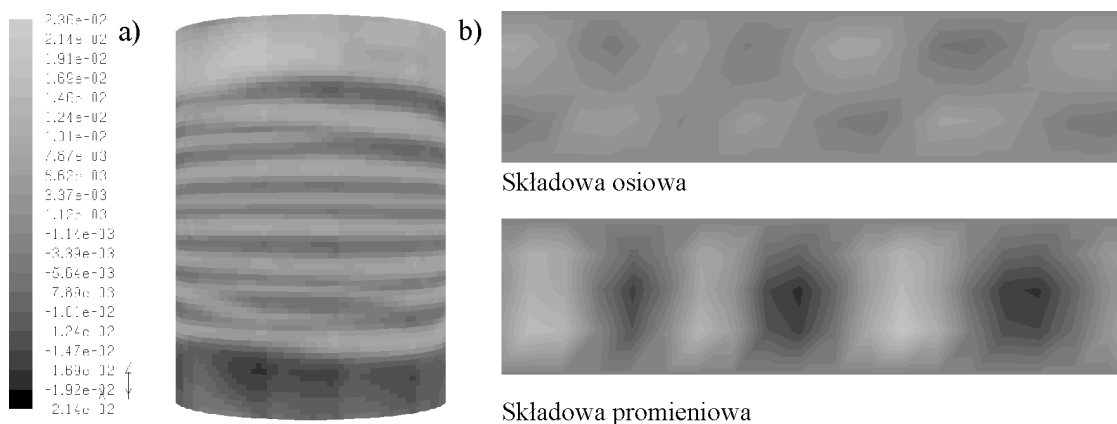
Mapy prędkości; $\omega = 2,43 \text{ rad/s}$

Dla $\omega = 2,43 \text{ rad/s}$ również stwierdzono występowanie charakterystycznych cyrkulacji i zawirowań. Pierścienie nie pojawiły się jednak wzdłuż całej wysokości obiektu (tak jak dla $\omega = 0,55 \text{ rad/s}$) – nie stwierdzono ich występowania na odcinku około $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ liczonych od wlotu i wylotu płynu do układu (Rys. 3a). Szerokość pierścieni była taka sama, jak dla poprzednio rozważanego przypadku i wynosiła około $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$. W przepływie stwierdzono występowanie wirów *Taylor'a* (Rys. 3b).

Maksymalna prędkość osiowa wynosiła około $0,012 \text{ m/s}$, a minimalna prędkość osiowa była równa około $-0,012 \text{ m/s}$. Dla składowej promieniowej prędkości maksymalna wynosiła około $0,011 \text{ m/s}$, a prędkość minimalna dla tej składowej była równa około $-0,0079 \text{ m/s}$.

Mapy prędkości; $\omega = 3,46 \text{ rad/s}$

Dla prędkości kątowej $\omega = 3,46 \text{ rad/s}$ otrzymane wyniki symulacji numerycznych były jakościowo zbliżone do wyników dla $\omega = 2,43 \text{ rad/s}$. W przepływie obserwowano występowanie charakterystycznych pierścieni, które pojawiły się około $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ od wlotu i zanikały około $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ przed wylotem (Rys. 4a). Szerokość pierścieni wynosiła około $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$,



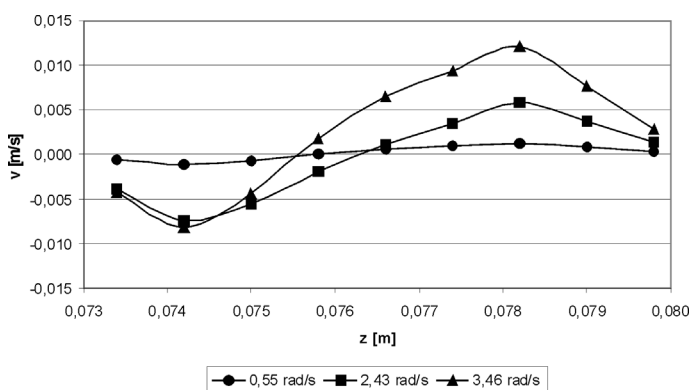
Rys. 4. Mapy prędkości, częstość obrotów rotora $\omega = 3,46$ rad/s: a) składowa osiowa – widok z przodu na modelowaną geometrię; b) składowa osiowa i promieniowa – powiększony fragment obszaru między statorem a rotorem (przestrzeń pomiędzy walcami)

była więc taka sama, jak w dwóch wyżej analizowanych przypadkach. W przepływie stwierdzono występowanie wirów *Taylora* (Rys. 4b).

Maksymalna prędkość osiowa wynosiła około 0,017 m/s, a minimalna prędkość osiowa była równa około -0,015 m/s. Z kolei maksymalna prędkość składowej promieniowej wynosiła około 0,013 m/s, a prędkość minimalna była równa około -0,0098 m/s.

Profile prędkości osiowej

Na podstawie otrzymanych wyników symulacji CFD sporządzono rozkłady prędkości osiowej w przestrzeni pomiędzy pierścieniami od $z_r = 0,0732$ m do $z_s = 0,0800$ m (gdzie z – to kolejne punkty pomiarowe położone pomiędzy rotorem z_r i statorem z_s) dla różnych wartości prędkości kątowej ω . Wyniki zebrano i zestawiono na rys. 5. Potwierdzono istotny wpływ prędkości rotora na rozkłady prędkości osiowej. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem prędkości kątowej rotora ω , prędkość składowej osiowej również wzrastała.



Rys. 5. Profile prędkości osiowej dla różnej prędkości kątowej rotora ω

Stwierdzono, że w przestrzeni pomiędzy pierścieniami prędkość osiowa przyjmowała zarówno wartości dodatnie, jak i ujemne, co świadczy o występowaniu wirów w przepływie.

Dla $\omega = 3,46$ rad/s obserwowano największe ekstrema pomiędzy maksymalną i minimalną wartością prędkości.

Otrzymane profile prędkości składowej osiowej porównano z wynikami badań eksperymentalnymi LDA dla układu dwóch współosiowych walców. Badania eksperymentalne wykonano dla przepływu wodnego roztworu soli sodowej karboksymetylocelulozy o niskim stężeniu, równym 0,3% wagowych. Jakościowy przebieg profili otrzymanych z CFD był bardzo zbliżony do profili otrzymanych eksperymentalnie, przy tej samej prędkości kątowej ω . Ilościowe porównanie wymaga jednak wykonania pomiarów LDA dla przepływu wody przez analizowany układ.

Podsumowanie

Wykonano symulacje CFD dla geometrii trójwymiarowej i przepływu *Couette'a-Taylor*a (płyn newtonowski) oraz trzech wartości prędkości kątowej ω równej kolejno 0,55; 2,43; 3,46 rad/s. Na podstawie wyników symulacji opracowanych w postaci map i profili prędkości, stwierdzono występowanie w przepływie wirów *Taylor*a. Struktury wirowe były wyraźnie widoczne szczególnie dla map prędkości składowej stycznej. Ponadto obserwowano występowanie charakterystycznych pierścieni co około $1,5 \cdot 10^{-2}$ m.

LITERATURA

1. Z. Jaworski: Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005.
2. E. Dumont, F. Fayolle, V. Sobolik, J. Legrand: Int. J. Heat Mass Transfer, **45**, 679, (2002).
3. R. Hubacz, M. Kaczorowska, L.G. Provencio, S. Wroński: Chem. Proc. Eng., **28**, 639, (2007).
4. Hwang Jong-Yeon, Yang Kyung-Soo, Comp.&Fluids, **33**, 97, (2004).
5. S.L. Conway, T. Shinbrot, B.J. Glasser: Nature, **431**, 433, (2004).
6. Z. Orzechowski, J. Prywer, R. Zarzycki: Mechanika płynów w inżynierii środowiska, WNT, Warszawa 1997.
7. Z. Kęmbłowski: Reometria płynów nienewtonowskich, WNT, Warszawa 1973.