

## Wojciech LUDWIG, Wojciech SAWIŃSKI

e-mail: wojciech.ludwig@pwr.wroc.pl

Zakład Inżynierii Chemicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław

## Modelowanie CFD mieszalnika strumienicowego

## Wstęp

Metody CFD (*Computational Fluid Dynamics*) pozwalają na numeryczne rozwiązanie układów równań różniczkowych, które tworzą model matematyczny procesów transportu w płynach i w ciałach stałych. Procedury te nie zastępują podejścia teoretycznego i eksperymentalnego w mechanice płynów, ale świetnie je uzupełniają [Anderson, 1995; Chung, 2002].

Symulacje przepływów stały się częścią procesu projektowego wielu firm. Dały one możliwość optymalizacji już istniejących konstrukcji, wpływu zmian na charakterystykę produktu, a także testowania nowatorskich rozwiązań. Możliwość przewidywania wydajności i specyfikacji produktu, umożliwiła znaczne skrócenie czasu projektowania oraz ograniczyła liczbę budowanych prototypów. Stosowanie takich technik projektowych przełożyło się bezpośrednio na mierzalne korzyści finansowe takie jak jakość i cena końcowa produktu. Znacznie poprawiło to konkurencyjność firm, które zainwestowały w tego typu metody analiz.

Analizy różnorodnych procesów za pomocą narzędzi CFD charakteryzują się zaletami, które zachęcają do ich coraz szerszego stosowania. Można do nich zaliczyć [Jaworski, 2005]:

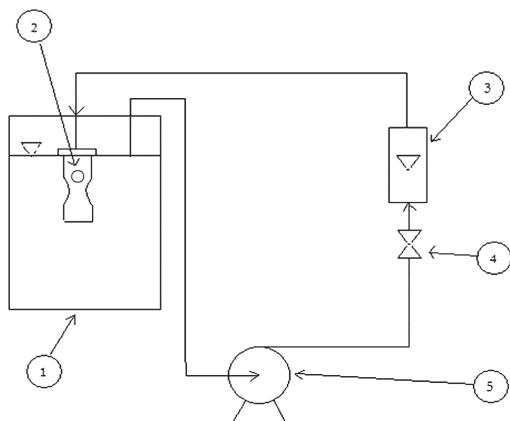
- niezależność jakości prognoz od skali procesu (przy powiększaniu do skali technicznej jak i przy pomniejszaniu do mikroskali),
- większą efektywność nakładów finansowych (symulacje numeryczne w miejsce eksperymentów),
- skrócenie czasu potrzebnego w pracach badawczo-rozwojowych,
- łatwy i szeroki dostęp do informacji technicznej,
- możliwość symulowania warunków niemożliwych lub trudnych do uzyskania w eksperymencie.

Metody CFD zostały także z powodzeniem zastosowane do opisu zjawisk zachodzących w mieszalnikach strumieniowych i strumienicowych [Patwardhan, 2002; Furman i Stegowski, 2011].

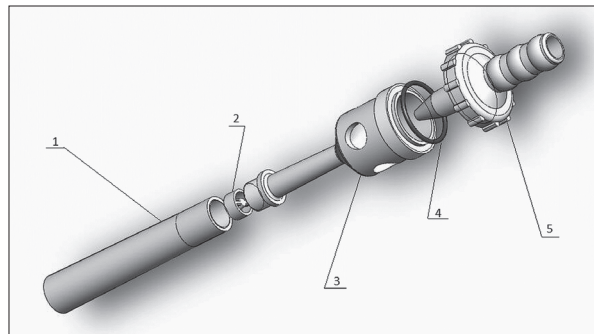
Celem pracy było opracowanie modelu matematycznego opisującego mieszalnik strumienicowy własnej konstrukcji, a następnie jego rozwiązanie metodami CFD oraz weryfikacja na podstawie przeprowadzonych wcześniej badań eksperymentalnych.

## Układ modelowany

Rys. 1 przedstawia instalację badawczą wraz z modelowanym mieszalnikiem strumienicowym. Woda zasysana była z górnej części zbiornika szklanego – 1 o wymiarach: wysokość 0,64 m, długość 0,286 m, szerokość 0,286 m, a następnie tłoczona pompą – 5 przez zawór regulacyjny – 4 i rotametr – 3 do dyszy strumienicy – 2 (Rys. 2), która umiesz-



Rys. 1. Mieszalnik strumienicowy wraz z instalacją badawczą: 1 – mieszalnik strumienicowy, 2 – strumienica, 3 – rotametr, 4 – zawór regulacyjny, 5 – pompa



Rys. 2. Strumienica zastosowana w modelowanym mieszalniku: 1 – dyfuzor, 2 – wkładka mieszająca, 3 – komora ssawna wraz z otworami zasysającymi, 4 – o-ring uszczelniający komorę ssawną, 5 – dysza

czona była centralnie w maksymalnej odległości od dna aparatu. Strumienicę wykonano poprzez modyfikację laboratoryjnej pompki wodnej, w jej komorze ssawnej wywiercono boczne otwory, umożliwiające zasysanie cieczy ze zbiornika. Pod wpływem podciśnienia wytwarzanego w komorze strumienicy następował transport cieczy ze zbiornika.

## Model CFD i jego rozwiązanie

Model CFD mieszalnika strumienicowego opiera się na uniwersalnych równaniach zachowania pędu

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \vec{u} \nabla \vec{u} + \nabla P - \mu \nabla^2 \vec{u} - \nabla \vec{\tau}_{xy} - \vec{S}_w = 0 \quad (1)$$

i masy

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

przy założeniu przepływu burzliwego cieczy newtonowskiej, nieściśliwej. Do opisu przepływu turbulентnego zastosowano podejście *Reynoldsa*, jako jedyne nadające się do obliczeń inżynierskich. Równanie *Naviera-Stokesa* przyjmuje wtedy postać równ. *Reynoldsa* (1).

## Model turbulencji

Tensor naprężeń turbulентnych sprawia, że równanie *Reynoldsa* stanowi układ otwarty, ponieważ wprowadza sześć dodatkowych niewiadomych. W związku z tym stosuje się tzw. modele turbulencji. Na podstawie wcześniejszych badań postanowiono zastosować klasyczny model półempiryczny typu *k-ε* z modyfikacją *Realizable* [Lauder i Spalding, 1972; Chung, 2002; Ludwig i in., 2010].

Ponieważ analityczne rozwiązanie przedstawionego powyżej układu równań jest niemożliwe, konieczny jest wybór narzędzia pozwalającego otrzymać rozwiązanie metodami numerycznymi. Do obliczeń zastosowano najpopularniejszy program tego typu – pakiet *Fluent 6.3.2*, wielokrotnie testowany dla różnych przypadków przepływu, a przez to charakteryzujący się dużą pewnością zastosowanego w nim kodu. Ze względu na czas obliczeń i niewielki wpływ na wyniki (test dla dwóch skrajnych punktów pomiarowych) zrezygnowano z pełnego modelu trójwymiarowego stosując uproszczony model dwuwymiarowy, osiowo-symetryczny.

## Siatka numeryczna i parametry solvera

W związku z zastosowanymi w programie *Fluent* metodami numerycznymi (metoda objętości kontrolnej) pierwszym etapem rozwiązania modelu przepływu jest wygenerowanie siatki numerycznej o optymalnych parametrach oraz sprawdzenie niewrażliwości wyników na zmianę jej gęstości. Obliczenia wykonano dla 6 siatek trójkątnych wyge-

nerowanych w całym aparacie o różnej liczbie komórek (Tab. 1) przy stałym natężeniu przepływu cieczy (0,073 kg/s). Następnie porównano ich parametry jakościowe (*cell equiangle skew*, *cell volume change*). Parametr *cell equiangle skew* jest definiowany jako różnica pomiędzy kształtem komórki a kształtem komórki o jednakowych kątach (trójkąta równobocznego, prostokąta). *Cell volume change* jest to parametr określający maksymalną zmianę objętości (powierzchni) bieżącej komórki i jej sąsiadów. Najlepiej, gdy jest on zbliżony do jedności. Ważnym parametrem opisującym zmiany przepływu jest całka objętościowa prędkości. Jej wartości były porównywane w celu określenia globalnej zmiany prędkości w całym aparacie.

Wartości badanych parametrów okazały się najbliższe oczekiwanym dla siatki nr 3 o 836 348 komórkach (Tab. 1). Od tej liczby komórek nie obserwowano gwałtownych zmian całek objętościowych prędkości. Ponadto czas potrzebny na wykonanie obliczeń był dużo niższy niż dla siatek 5 i 6. Siatka posiadała największą gęstość w obszarze dużej zmienności prędkości cieczy (strefa wypływającej strugi). Stałe dla wszystkich symulacji ustawienia *solvera* przedstawiono w tab. 2.

Tab. 1. Parametry badanych siatek numerycznych (wartość 0 parametru *cell equiangle skew* wskazuje pełne dostosowanie, wartość 1 – całkowite zdegenerowanie komórki)

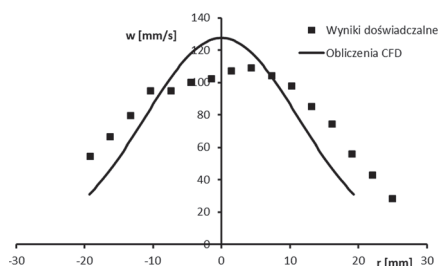
| Lp. | Liczba komórek | Całka objętościowa pola prędkości (m/s)/(m <sup>3</sup> ) | Maksymalna wartość parametru <i>cell equiangle skew</i> | Minimalna wartość parametru <i>cell volume change</i> | Maksymalna wartość parametru <i>cell volume change</i> |
|-----|----------------|---|---|---|--|
| 1   | 83 549         | 8,69·10 <sup>-4</sup>                                     | 0,935   | 0,978   | 13,739   |
| 2   | 334 196        | 7,34·10 <sup>-4</sup>                                     | 0,972   | 1,000   | 7,353  |
| 3   | 836 348        | 4,02·10 <sup>-2</sup>                                     | 0,763   | 0,990   | 2,308  |
| 4   | 1 623 080      | 4,14·10 <sup>-2</sup>                                     | 0,889   | 0,997   | 4,001  |
| 5   | 2 172 878      | 4,14·10 <sup>-2</sup>                                     | 0,889   | 0,997   | 4,071  |
| 6   | 3 345 392      | 4,14·10 <sup>-2</sup>                                     | 0,823   | 1,000   | 2,150  |

Tab. 2. Parametry *solvera* stałe dla wszystkich symulacji

| Parametr <i>solvera</i>           | Wartość  |
|-----------------------------------|--|
| Typ <i>solvera</i>                | Dwuwymiarowy, osiowosymetryczny, rozdzielony, ustalony |
| Współczynniki relaksacji          | Proponowane domyślnie przez program                    |
| Dyskretyzacja                     | Dla wszystkich parametrów: drugiego rzędu pod prąd     |
| Sprzężanie ciśnienia z prędkością | SIMPLE   |

## Wyniki obliczeń

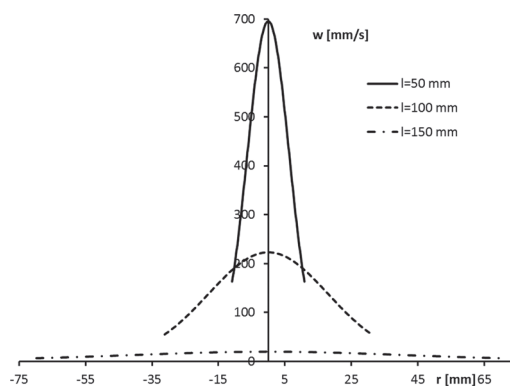
Przedstawione w poprzednim rozdziale optymalne parametry *solvera* i siatki numerycznej zastosowano do rozwiązania modelu przy różnych natężeniach przepływu cieczy zasilającej strumienicę (0,023÷0,073 kg/s) otrzymując wartości ciśnienia i prędkości wewnątrz całego aparatu. Najciekawsze z punktu widzenia badacza profile prędkości wypływającej ze strumienicy strugi porównano z własnymi danymi eksperymentalnymi otrzymanymi metodą DPIV (*Digital Particle Image Velocimetry*) (Rys. 3).



Rys. 3. Porównanie wyników prędkości płynu w wypływającej z dyszy strudze otrzymanych z symulacji z danymi eksperymentalnymi (natężenie przepływu cieczy zasilającej 0,0233 kg/s, odległość od wylotu z dyszy 101 mm)

Model w sposób prawidłowy przewidywał kształt profilu prędkości (krzywa *Gausa*) oraz wpływ odległości od wylotu strumienicy na podstawowe parametry strugi. Średnica strugi wraz ze wzrostem odległo-

ści od dyszy rosła, a prędkość maksymalna malała (Rys. 4). Wielkości te ustalano na podstawie parametrów krzywej *Gausa* aproksymującej punkty pomiarowe i obliczone.



Rys. 4. Porównanie wyników profili prędkości płynu w strudze wypływającej z dyszy otrzymanych z symulacji w różnych odległościach od wylotu dyszy (natężenie przepływu cieczy zasilającej 0,073 kg/s)

Średnia wartość błędów względnych prędkości wyznaczonych numerycznie względem danych doświadczalnych wyniosła 22%. Wynik ten mógł być zawyżony poprzez pewne niedoskonałości pomiaru np. przesunięcie osi strugi względem środka aparatu spowodowane niedokładnym wycentrowaniem dyszy (Rys. 3), czego model nie uwzględniał.

## Wnioski

Prezentowany model CFD umożliwia wyznaczenie najważniejszych parametrów hydrodynamicznych w mieszalniku strumienicowym: pól prędkości oraz ciśnienia wewnątrz aparatu.

Dzięki temu możliwe jest badanie wpływu zmiennych konstrukcyjnych i ruchowych na zachodzący w nim proces mieszania. Pozwala to na wyznaczenie tzw. stref martwych (o minimalnej prędkości przepływu cieczy) w aparacie.

Wyznaczone optymalne parametry modelu posłużą w przyszłości do modyfikacji aparatu do odsalania ropy naftowej.

## Oznaczenia

- $l$  – odległość od wylotu strumienicy, [m]
- $P$  – ciśnienie, [Pa]
- $r$  – odległość od osi dyszy, [m]
- $\vec{S}_\psi$  – człon opisujący zewnętrzne siły objętościowe, [N/m<sup>3</sup>]
- $\vec{v}$  – wektor prędkości płynu, [m/s]
- $\vec{u}$  – wektor prędkości średniej płynu, [m/s]
- $W$  – prędkość w wypływającej strudze, [m/s]
- $\tau_{xy}$  – tensor naprężeń *Reynoldsa*, [Pa]
- $\mu$  – współczynnik dynamicznej lepkości płynu, [Pa·s]
- $\rho$  – gęstość płynu, [kg/m<sup>3</sup>]

## LITERATURA

- Anderson J., 1995. *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. McGraw-Hill, New York.
- Chung T. J., 2002. *Computational Fluid Dynamics*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Furman L., Stegowski Z., 2011. CFD models of jet mixing and their validation by tracer experiments. *Chem. Eng. Proc.*, **50**, nr 3, 300-304. DOI: 10.1016/j.ccep.2011.01.007
- Jaworski Z., 2005. *Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej*. AOW EXIT, Warszawa
- Lauder B.E., Spalding D.B., 1972. *Lectures in mathematical models of turbulence*. Academic Press, London
- Ludwig W., Dziak J., Sawiński W., 2010. Optymalizacja pompy strumieniowej za pomocą metod CFD. *Inż. Ap. Chem.*, **49**, nr 1, 67-68
- Patwardhan A.W., 2002. CFD modeling of jet mixed tanks. *Chem. Eng. Sci.*, **57**, 1307-1318. DOI: 10.1016/S0009-2509(02)00049-0

*Autorzy dziękują mgr inż. Aleksandrze Smalewskiej za wykonanie obliczeń.*