

RYSZARD WÓJTOWICZ*

**PODSTAWY MODELOWANIA CFD
MIESZALNIKA WIBRACYJNEGO**

BASICS OF CFD MODELLING FOR A VIBROMIXER**Streszczenie**

W pracy przedstawiono podstawy modelowania procesu mieszania cieczy w mieszalniku wibracyjnym, przeprowadzonego z wykorzystaniem metod *numerycznej mechaniki płynów (CFD)*. Omówiono kolejne etapy tworzenia geometrii modelu, generowania siatki numerycznej oraz zastosowania dostępnej w programie metody ruchomej siatki *Dynamic Mesh* i funkcji *UDF* do symulacji ruchu mieszadła. Ponadto zaprezentowano przykładowe wyniki przeprowadzonych symulacji w formie wykresów konturowych, map wektorów prędkości oraz rozkładów podstawowych parametrów burzliwości cieczy (szybkości dyssypacji energii ε i energii kinetycznej burzliwości k) w poszczególnych obszarach mieszalnika.

Słowa kluczowe: mieszanie, mieszalnik wibracyjny, modelowanie numeryczne, metody CFD

Abstract

In the paper are presented the basics of a vibromixer modeling with the use of *Computational Fluid Dynamics (CFD)* methods. The following stages of modeling: creation of the model geometry, numerical mesh composition and the use of *Dynamic Mesh* method and *UDF* function for agitator movement simulation are described. Moreover the results of simulations are presented in the form of contour and vector graphs of velocity and distributions of turbulence parameters (turbulent dissipation rate and ε and turbulence kinetic energy k) in various vibromixer zones.

Keywords: mixing, vibromixer, computational modeling, CFD methods

* Dr inż. Ryszard Wójtowicz,
Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Mieszalniki wibracyjne z mieszadłami tarczowymi wykonującymi ruchy posuwisto-zwrotne ze względu na ich mało skomplikowaną budowę, prostą zasadę działania i możliwość wykorzystania w różnych technologiach przemysłowych stanowią interesującą alternatywę dla klasycznych mieszalników z mieszadłami wysokoobrotowymi.

Niestety – jak dotychczas – zarówno same mieszalniki wibracyjne, jak i procesy (zjawiska) zachodzące w nich podczas mieszania są stosunkowo słabo poznane i opisane. Nieliczne, prowadzone do tej pory badania laboratoryjne takich aparatów koncentrowano przede wszystkim na sprawdzeniu ich przydatności podczas wytwarzania układów wielofazowych, np. emulsji [1, 2], zawiesin [3-6] (wraz z oszacowaniem zapotrzebowania mocy [7-11]) lub też realizacji procesów wymiany ciepła i masy [12, 13]. Wyniki badań prezentowano zwykle w postaci bezwymiarowych lub wymiarowych zależności korelacyjnych, uzyskanych na drodze modelowania fizycznego i opracowywanych z wykorzystaniem metod statystyki matematycznej.

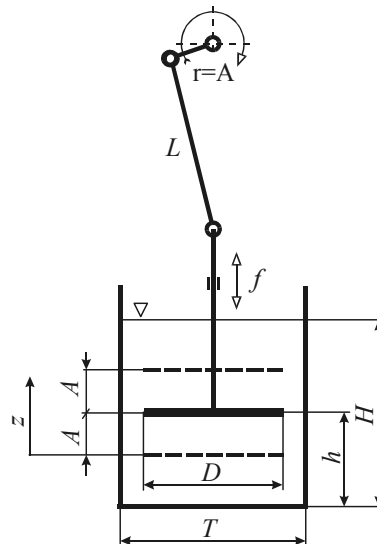
Pomimo dynamicznie rozwijających się w ostatnich latach technik komputerowego modelowania przepływów *Computational Fluid Dynamics (CFD)* i „połączonych z nimi” metod pomiarowych, np. anemometrii laserowej, w literaturze praktycznie nie spotyka się informacji na temat hydrodynamiki przepływu cieczy w mieszalnikach z mieszadłami wibracyjnymi. Brakuje przede wszystkim podstawowych danych na temat ruchu i prędkości cieczy w poszczególnych obszarach aparatu – jej kierunku, wartości lokalnych, rozkładów czy też parametrów burzliwości. Informacji niezbędnych zarówno podczas projektowania, jak i dalszej eksploatacji mieszalników wibracyjnych.

2. Mieszalnik wibracyjny

Geometrię i podstawowe wymiary mieszalnika wibracyjnego, dla którego przeprowadzono symulacje numeryczne przedstawiono na rys. 1.

Mieszalnik składał się z cylindrycznego zbiornika (średnica wewnętrzna zbiornika $T = 0,286$ m), wewnątrz którego znajdowało się pełne, tarczowe mieszadło o średnicy $D = 0,220$ m i grubości $g = 0,003$ m, wykonujące ruchy posuwisto-zwrotne. Mieszadło napędzано silnikiem elektrycznym prądu stałego, poprzez przekładnię pasową i mimośrodowy układ korbowy. Wysokość napełnienia zbiornika cieczą wynosiła $H = T$, zaś wysokość zawieszenia mieszadła nad dnem – w środkowym jego położeniu – $h = 0,5 \cdot H$. Zbiornik mieszalnika od góry zamknięto dodatkowo pokrywą, na wysokości równej wysokości napełnienia cieczą H .

Przykładowe symulacje przeprowadzono dla częstotliwości wibracji mieszadła $f = 1$ Hz i amplitudy $A = 0,04$ m, jako ciecz modelową wybrano wodę ($\rho = 998$ kg/m³, $\eta = 0,001$ Pa·s).



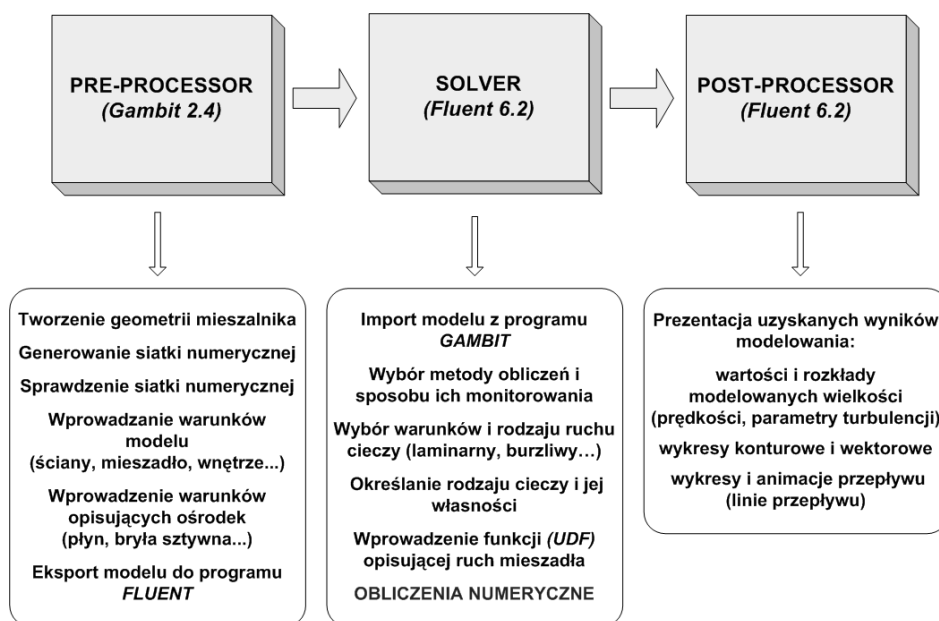
Rys. 1. Geometria i układ napędu mieszalnika wibracyjnego

Fig. 1. Geometry of the vibromixer and drive system

3. Modelowanie numeryczne

Modelowanie mieszalnika wibracyjnego wykonano z wykorzystaniem komercyjnego pakietu obliczeniowego FLUENT 6.2 w wersji 2D i popularnego generatora siatek GAMBIT 2.4, stosowanego jako preprocesor do tworzenia geometrii modelu i generowania siatki numerycznej. Symulacje prowadzono z wykorzystaniem metody siatki ruchomej *Dynamic Mesh*, opisując jednocześnie ruch mieszadła za pomocą kompilowanej w programie funkcji użytkownika (*UDF*).

Pełny cykl numerycznego modelowania pracy mieszalnika wibracyjnego przedstawiono schematycznie na rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy modelowania numerycznego mieszalnika wibracyjnego

Fig. 2. Block diagram for computational modelling of the vibromixer

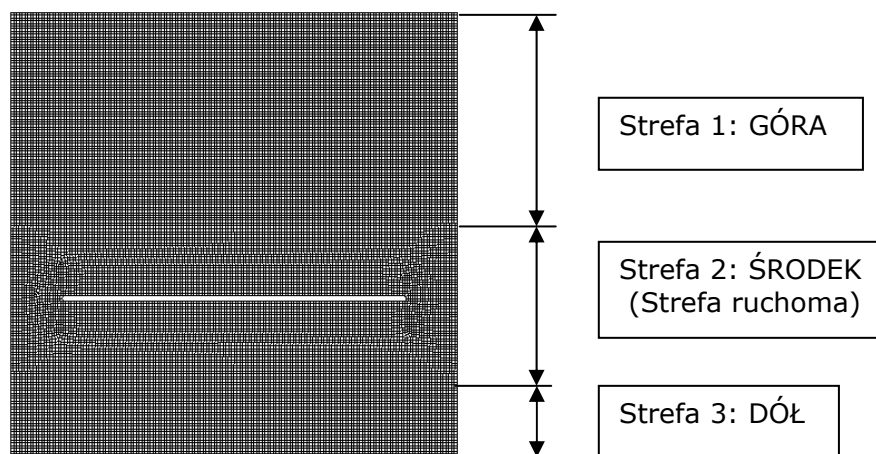
3.1. Tworzenie geometrii modelu i generowanie siatki numerycznej

W pierwszym etapie modelowania tworzono geometrię mieszalnika. Ze względu na wykorzystanie w dalszej części modelowania metody z siatką ruchomą, mieszalnik podzielono na trzy strefy (rys. 3):

- Strefę 1 – obejmującą górną część mieszalnika,
- Strefę 2 – strefę ruchomą, obejmującą środkową część mieszalnika wraz z mieszadłem,
- Strefę 3 – obejmującą dolną część mieszalnika.

Ścianom mieszalnika i krawędziom mieszadła przypisano typ *WALL* (*Boundary Types* → *Wall*), zaś wewnętrznym powierzchniom odpowiednich stref typ *FLUID* (*Continuum Types* → *Fluid*).

Ponieważ kształt modelu nie był skomplikowany, w każdej ze stref wygenerowano podobną siatkę numeryczną składającą się z czworokątnych, w większości równobocznych elementów; w strefie 1 i 3 (Góra, Dół) – typu *Quad-Map*, zaś w strefie 2 (Środek) – *Quad-Pave*. Łącznie siatkę modelu tworzyło 26 137 elementów. Ponadto, w każdej ze stref siatkę dodatkowo „wygładzano” – wykorzystując dostępną w programie funkcję *Smooth Face Meshes* – w celu poprawienia jej jakości.

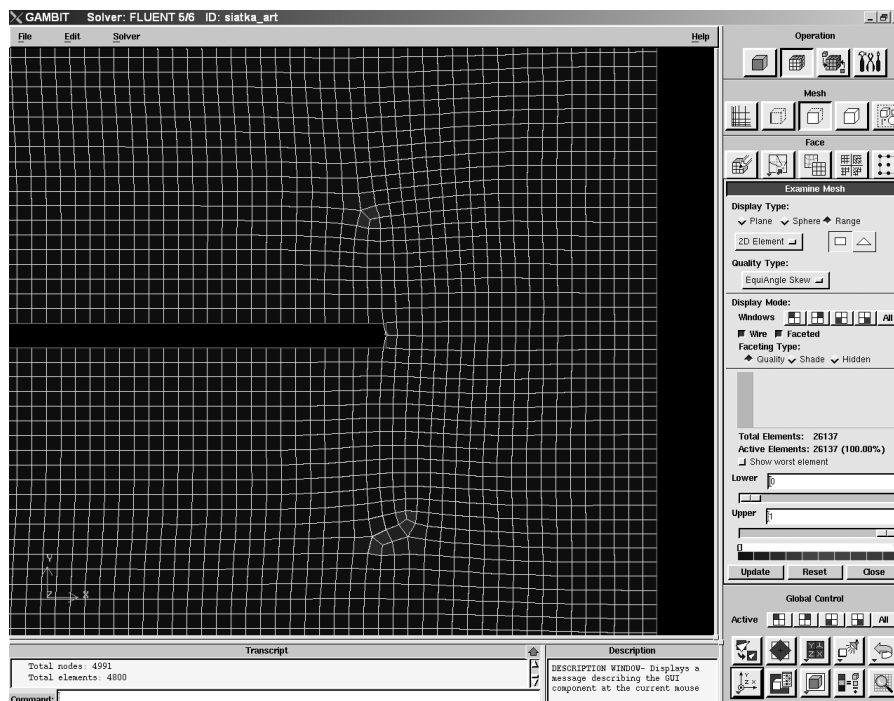


Rys. 3. Geometria, siatka numeryczna i podział na strefy modelowanego mieszalnika wibracyjnego

Fig. 3. Geometry, mesh and zoning of the vibromixer

We wszystkich obszarach modelu sprawdzano również regularność (stopień zdegenerowania) komórek obliczeniowych, mający dalej istotny wpływ na czas i przebieg obliczeń numerycznych oraz dokładność uzyskanych wyników. Na rys. 4 pokazano przykładowe elementy siatki w obszarze mieszadła. Oprócz elementów o dobrej jakości (kwadraty), widoczne są również (A) nieliczne komórki częściowo zdegenerowane. Pełną informację na temat jakości komórek obliczeniowych siatki przedstawia histogram ich rozkładu, tworzony na podstawie rozmaicie definiowanych kryteriów. Przykładowo – na rys. 4 (B) – pokazano rozkład komórek stworzony wg znormalizowanego kryterium skośności *EquiAngle Skew* – odstępstwa rzeczywistych kątów między krawędziami komórek od kąta modelowego, wynoszącego w przypadku elementów czworokątnych $\theta_{eq} = 90^\circ$.

Jak wynika z analizy histogramu większość komórek wygenerowanej siatki to elementy dobrej jakości (wyrażna prawostronna asymetria rozkładu), dla których wartości znormalizowanego kryterium skośności Q_{EAS} nie przekraczają 0,1. Jedynie nieliczne komórki (0,1% wszystkich elementów) cechuje nieznaczna degeneracja, jednak nawet i w ich przypadku $Q_{EAS} < 0,4$, co pozwala zakwalifikować całą siatkę numeryczną jako siatkę dobrej jakości [15].

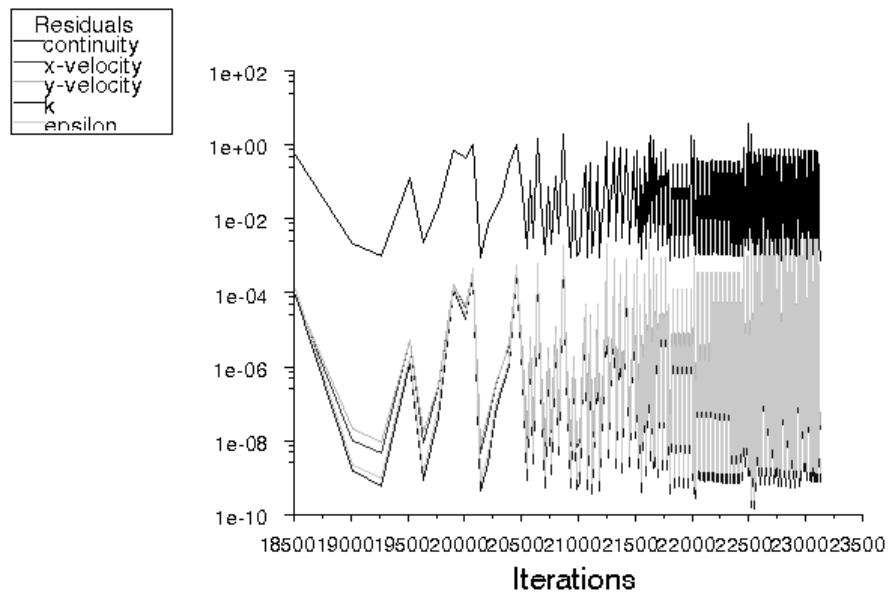


Rys. 4. Komórki siatki numerycznej w obszarze mieszadła: (A) komórki częściowo zdegenerowane, (B) histogram rozkładu jakości komórek (*EquiAngle Skew*)

Fig. 4. Mesh elements for the agitator zone: (A) elements partly degenerated, (B) the distribution of mesh elements quality (*EquiAngle Skew*)

3.2. Wprowadzenie parametrów procesu i obliczenia numeryczne

Symulacje numeryczne wykonano z wykorzystaniem solwera pakietu FLUENT 6.2 dla modelu dwuwymiarowego (2D), procesu nieustalonego, wykorzystując metodę z siatką ruchomą *Dynamic Mesh* i dwurównaniowy model burzliwości $k-\varepsilon$ ze standardowymi funkcjami przyściennymi [16]. Własności fizykochemiczne mieszanej cieczy wprowadzono bezpośrednio z dostępnej w programie bazy mediów *Fluent Database*. Tok obliczeń monitorowano na podstawie obserwacji zmian reszt dla wyznaczanych wielkości (ciągłość, składowe prędkości, parametry burzliwości) podczas kolejnych iteracji. Przykładowy charakter takich zmian pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Skalowane wartości reszt podczas kolejnych iteracji

Fig. 5. Scaled residuals for the following iterations

```
#include <udf.h>

DEFINE_CG_MOTION(mixer, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
{
    real f = RP_Get_Real("motion-par/freq_s");
    real a = RP_Get_Real("motion-par/amplitude");

    real omega;
    real vel;
    /*real amplitude = .20; /* in inches */
    /* real conv = 0.0254;*/

    omega= 2.0*M_PI*f;
    /* vel = amplitude*conv*omega*sin(omega*time);*/
    vel = a*omega*sin(omega*time);

    cg_vel[0] = 0.0; /* x-velocity*/
    cg_vel[1] = vel;
    cg_vel[2] = 0.0;

    NV_S (cg_omega, =, 0.0); /* no angular motion */
}
```

W kolejnym etapie modelowania do programu wprowadzano równania i parametry ruchu strefy środkowej (strefa ruchoma) i mieszadła. W tym celu wykorzystano jedną z funkcji zdefiniowanych (*UDF*), makro: **DEFINE_CG_MOTION** opisujące ruch harmoniczny prosty.

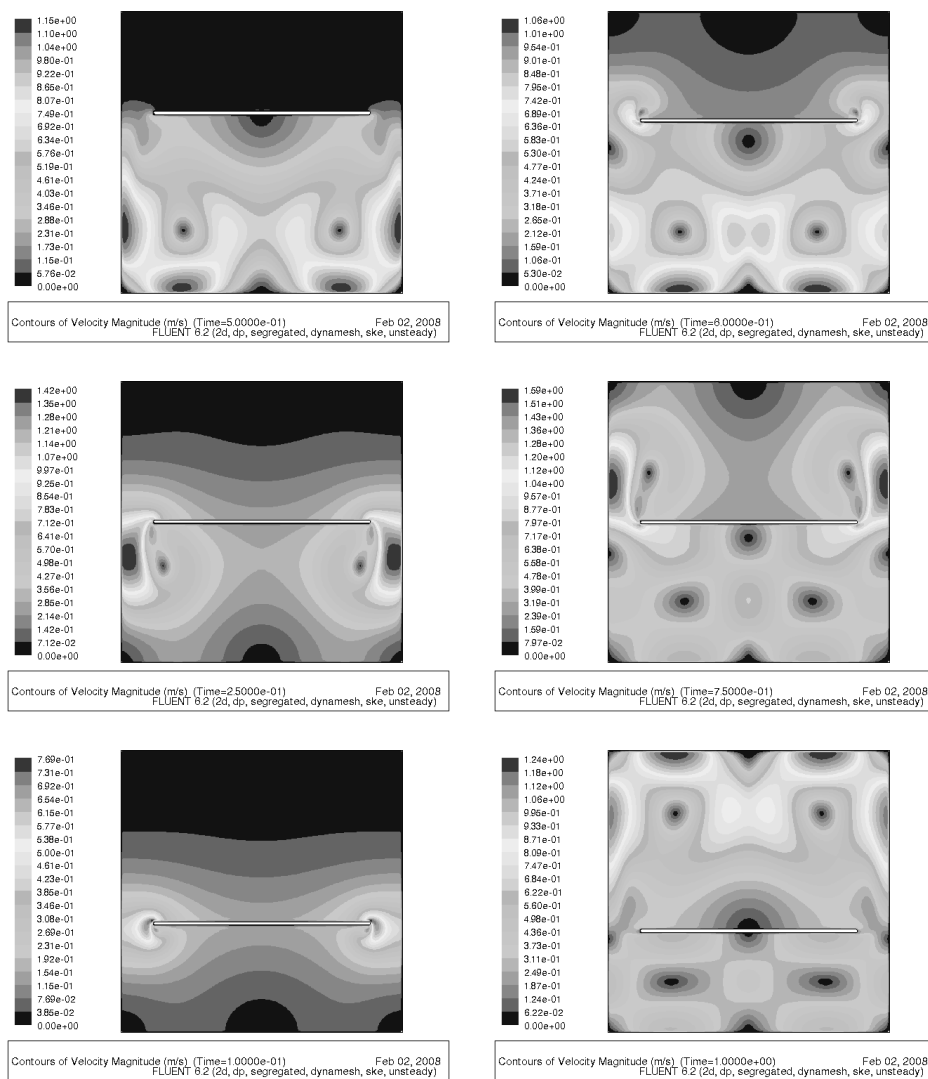
Przed wprowadzeniem funkcji do programu konieczna jest jej kompilacja za pomocą VISUAL STUDIO C++ i wcześniejsze uruchomienie solvera z okna komend tego właśnie programu.

3.3. Wyniki modelowania

Etap postprocessingu obejmuje prezentację wyników modelowania. Zwykle, tworzone są mapy i wykresy przedstawiające zmiany obliczanych wielkości zarówno w modelowanym obszarze jak i – w przypadku procesów nieustalonych – w czasie. Na rys. 6 pokazano konturowe wykresy zmian prędkości cieczy w modelowanym mieszalniku, zarówno podczas ruchu mieszadła w górę (początek ruchu), jak i dalszego ruchu mieszadła w dół. Na każdej z map naniesiono dodatkowo wartości kroków czasowych odpowiadających poszczególnym jego położeniom. Bez względu na to czy mieszadło poruszało się w górę czy w dół – w momencie, gdy przyjmowało swoje środkowe położenie najwyższe prędkości przepływu cieczy występowały w szczelinie pomiędzy ścianką zbiornika a mieszadłem, zaś w dolnej i górnej części aparatu – w centrum i okolicach dna – ruch cieczy był słabszy. Inny rozkład prędkości widoczny jest natomiast, gdy mieszadło znajduje się w swoim skrajnym położeniu – górnym lub dolnym. Teraz najwyższe prędkości przepływu widoczne są w przestrzeni nad lub pod mieszadłem, w bezpośrednim sąsiedztwie ścianek i dna, natomiast w samej szczelinie przepływ sukcesywnie zanika.

W celu pełnej identyfikacji ruchu cieczy w mieszalniku konieczne jest nie tylko wyznaczenie prędkości jej przepływu, lecz również kierunku i zwrotu wektorów prędkości, obrazujących tworzenie, wielkość i kierunek przemieszczania się wirów dyssypujących energię.

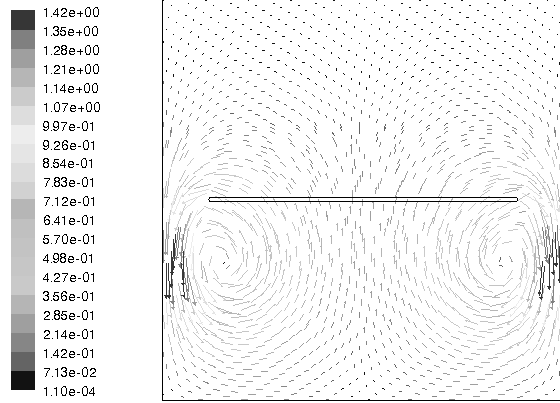
Przykładowe wektorowe wykresy prędkości, otrzymane przy skrajnych – górnym i dolnym – położeniach mieszadła oraz w jego położeniu środkowym pokazano na rys. 7.



Rys. 6. Przykładowe kontury prędkości przepływu cieczy w mieszalniku wibracyjnym, otrzymane przy różnych położeniach mieszadła:
lewa kolumna – ruch mieszadła w górę; prawa – ruch mieszadła w dół

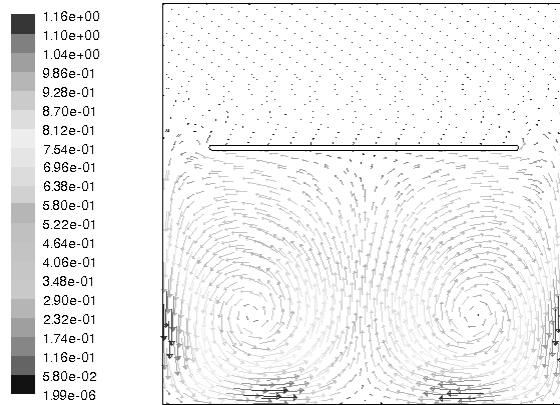
Fig. 6. Contours of flow velocity magnitude in the vibromixer, obtained for various disc positions:
left column – upward disc movement, right column - downward disc movement

a)

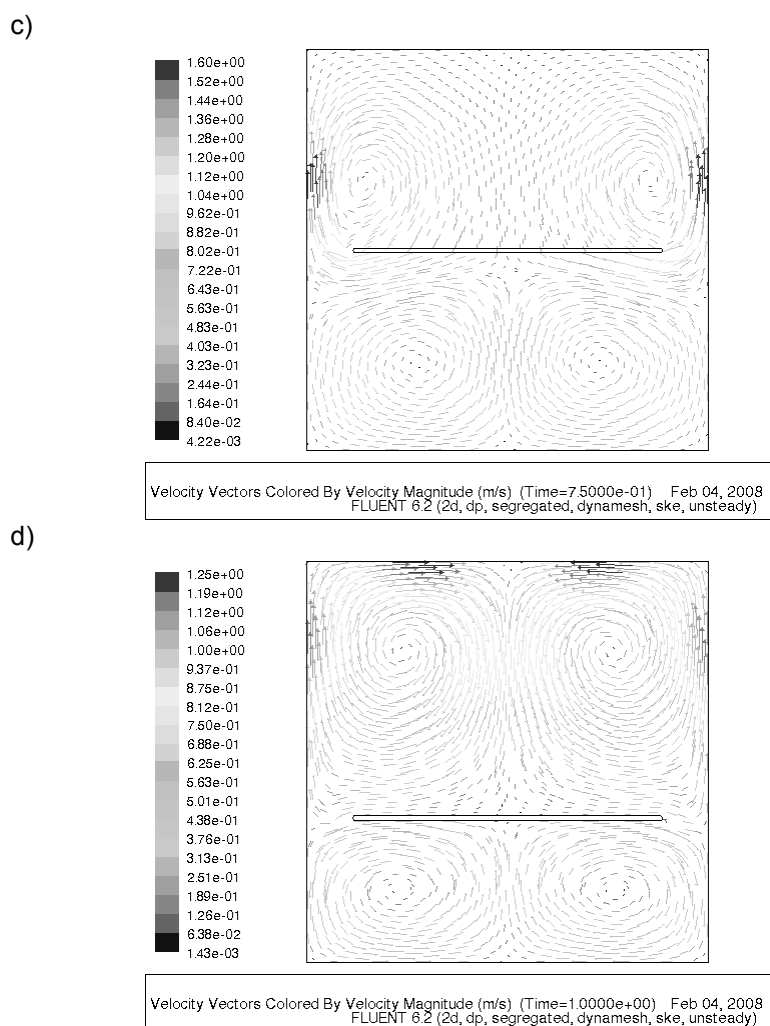


Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s) (Time=2.5000e-01) Feb 04, 2008
FLUENT 6.2 (2d, dp, segregated, dynamesh, ske, unsteady)

b)



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s) (Time=5.0000e-01) Feb 04, 2008
FLUENT 6.2 (2d, dp, segregated, dynamesh, ske, unsteady)

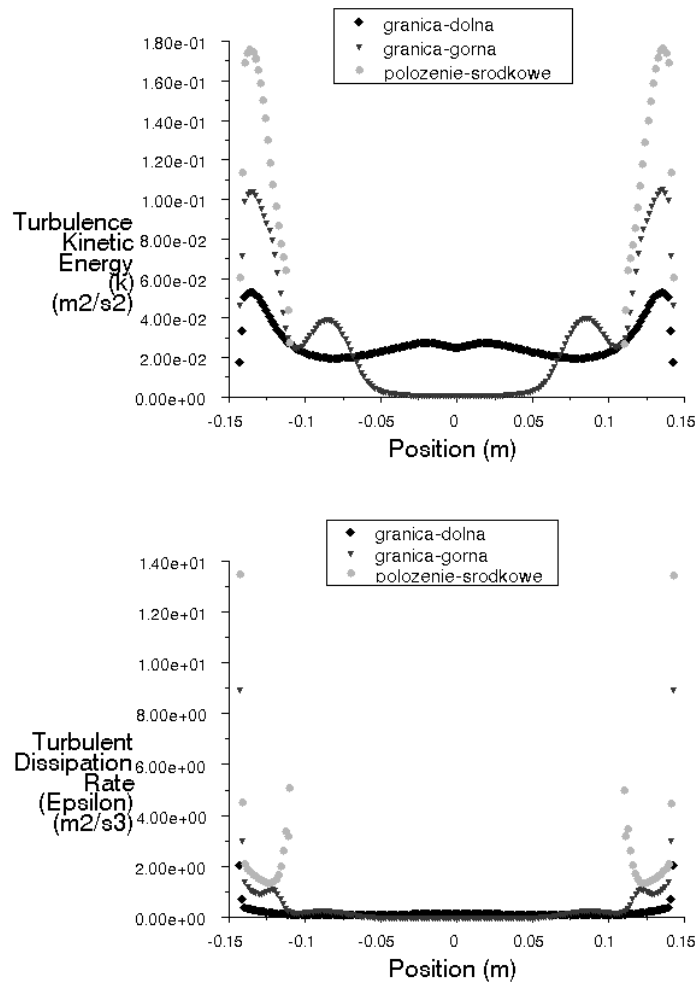


Rys. 7. Przykładowe wykresy wektorowe prędkości cieczy w mieszalniku wibracyjnym:
a) środkowe położenie mieszadła (ruch w górę), b) skrajne górne położenie mieszadła,
c) środkowe położenie mieszadła (ruch w dół), d) skrajne dolne położenie mieszadła

Fig. 7. Velocity vectors obtained for the vibromixer:
a) middle disc position (upward disc movement), b) the highest disc position,
c) middle disc position (downward disc movement), d) the lowest disc position

Podobne mapy ruchu cieczy w mieszalniku wibracyjnym otrzymano również w wyniku wizualizacji procesu mieszania wykonanej metodą fotografii śladowej [17].

Uzupełnieniem prezentacji wyników modelowania są pokazane na rys. 8 zmiany parametrów burzliwości (energii kinetycznej burzliwości k i szybkości dyssypacji energii ϵ) w funkcji odległości od osi aparatu.



Rys. 8. Zmiany energii kinetycznej burzliwości k i szybkości dyssypacji energii ϵ w funkcji odległości od osi mieszalnika dla trzech różnych poziomów wysokości w mieszalniku (środkowe położenie mieszadła – ruch w dół)

Fig. 8. Turbulence kinetic energy k and turbulent dissipation rate ϵ as a function of a distance from the vessel center axis for three different heights in the vessel (middle disc position – downward disc movement)

Wykresy przedstawiają rozkłady parametrów burzliwości na trzech różnych poziomach wysokości mieszalnika: granicy stref dolnej i środkowej (granica-dolna), środkowej i górnej (granica-górna) oraz na poziomie mieszadła (położenie-środkowe) w momencie, gdy znajduje się ono w swoim środkowym położeniu. Przy tym chwilowym położeniu mieszadła, niezależnie od poziomu wysokości w mieszalniku najsilniejszą burzliwością cechuje się przepływ cieczy w pobliżu ścianki aparatu ($r = 0,1 - 0,15$ m), przy czym najwyższe wartości szybkości dyssypacji energii i energii kinetycznej burzliwości występują na poziomie mieszadła. Bliżej osi aparatu – w zakresie promieni $r = 0 - 0,1$ m – burzliwość przepływu jest znacznie słabsza.

4. Wnioski

Celem pracy było przedstawienie metodyki (głównych zasad, toku postępowania) podczas numerycznego modelowania procesów mieszania cieczy w mieszalnikach wibracyjnych. Modelowanie takie przeprowadzone w szerokim zakresie zmiennych procesowych może być istotnym uzupełnieniem często złożonych i pracochłonnych badań laboratoryjnych. Uzyskane zaś tą drogą wyniki – walidowane dalej za pomocą nowoczesnych metod pomiarowych – pozwolą stworzyć dokładny i szczegółowy opis procesów i zjawisk hydrodynamicznych zachodzących podczas pracy mieszalnika wibracyjnego – zarówno lokalnie, jak i w całym aparacie, niezależnie od jego skali.

Oznaczenia

A	– amplituda wibracji mieszadła	[m]
D	– średnica mieszadła	[m]
f	– częstotliwość wibracji mieszadła	[Hz]
g	– grubość mieszadła	[m]
h	– wysokość zawieszenia mieszadła nad dnem zbiornika (środkowe położenie)	[m]
H	– wysokość napełnienia zbiornika cieczą	[m]
k	– energia kinetyczna burzliwości	[m ² /s ²]
r	– promień zbiornika mieszalnika	[m]
Q_{EAS}	– wartość znormalizowanego kryterium skośności	
T	– średnica zbiornika mieszalnika	[m]
θ_{eq}	– modelowy kąt między krawędziami komórek	[°]
ε	– szybkość dyssypacji energii	[m ² /s ³]

Literatura

- [1] Lo M.Y.A., Gierczycki A.T., Titchener–Hooker N., Shamlou P.A.: *Can. J. Chem. Eng.*, **42**, 1998, 471-478.
- [2] Kamieński J., Wójtowicz R.: *Chem. Eng. Proc.*, **42**, 2003, 1007-1017.
- [3] Tojo K., Miyunami K., Yano T.: *Powder Techn.*, **12**, 1975, 239-245.
- [4] Gierczycki A., Thullie J.: *Inż. i Ap. Chem.*, **4**, 2001, 24-26.
- [5] Kamieński J., Wójtowicz R., Spytkowski S.: *Inż. i Ap. Chem.*, **6s**, 2006, 106-107.
- [6] Wójtowicz R., Kamieński J.: „XIX Ogólnopolska Konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej”, Rzeszów 2007, mater. konf. **T.I.**, 509-512.
- [7] Hafez M. M., Baird M. H. I.: *Tans IChemE*, **56**, 1978, 229-238.
- [8] Gierczycki A. T.: *Chem. Biochem. Eng. Q.*, **12**, 1998, 97-100.
- [9] Masiuk S.: *Chem. Eng. J.*, **75**, 1999, 161-165.
- [10] Komoda Y., Inoue Y., Hirata Y.: *J. Chem. Eng. Jap.*, **33**, 2000, 879-885.
- [11] Kamieński J., Wójtowicz R.: *Inż. Chem. Proc.*, **22**, 2001, 603-608.
- [12] Masiuk S.: *Chem. Eng. J.*, **61**, 1996, 107-112.
- [13] Masiuk S.: *Chem. Eng. J.*, **83**, 2001, 139-144.
- [14] Jaworski Z.: *Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005.
- [15] *Gambit 2.4 - Documentation*, Fluent Inc. 2006.
- [16] *Fluent 6.2 - Documentation*, Fluent Inc. 2006.
- [17] Wójtowicz R.: *Analiza pracy tarczowych mieszadeł wibracyjnych w układach cieczy wzajemnie nierozpuszczalnych*, praca doktorska, Kraków 2000.
- [18] Kamieński J., Talaga J., Wójtowicz R., Duda A.: *Inż. Chem. Proc.*, **28**, 2007, 783-793.