# Symulacja przepływu turbulentnego przez rurę o skokowo zmiennej średnicy

# Cel ćwiczenia

Symulacja przepływu turbulentnego przez rurę o zmiennej średnicy przy zastosowaniu modelu turbulencji k- $\epsilon$ , analiza wpływu warunków na wlocie do obszaru obliczeniowego i sposobu modelowania zjawisk przyściennych na wynik obliczeń.

# Streszczenie

Obliczenia przepływu turbulentnego dla liczby Re<br/>D $=200\,\,000$ z zastosowaniem tzw. standardowego modelu turbulencji k-<br/> $\epsilon$  przeprowadzone będą na dwóch siatkach obliczeniowych: baz<br/>owej - rzadkiej<br/>(coarse) i gęstej<br/>(fine). Liczba Reynoldsa bazuje na większej średnicy rury, D $=0.1524 {\rm m}$ i prędkości średniej na wylocie z obszaru obliczeniowego.

Symulacje na siatce bazowej wymagać będą stosowania funkcji ściany (Standard Wall Function) w celu poprawnego obliczenia prędkości średniej, energii kinetycznej turbulencji, k, oraz dyssypacji energii kinetycznej turbulencji,  $\epsilon$ , w pobliżu ściany. Obliczenia na siatce gęstej będą realizowane z wykorzystaniem modelu turbulencji k- $\epsilon$  w połączeniu z modelem jednorównaniowym Wolfsteina w pobliżu ściany. Podejście to nazywa się Enhanced Wall Treatment.

### Czynnikiem roboczym jest woda.

Na wlocie do obszaru obliczeniowego przyjęty zostanie warunek brzegowy typu velocity inlet. Profil prędkości średniej zdefiniowano w oparciu o symulację w pełni rozwiniętego przepływu turbulentnego w rurze. Rozpatrywane będą trzy sposoby definiowania profili energii kinetycznej turbulencji i dyssypacji na wlocie:

- 1. w oparciu o profile uzyskane dla w pełni rozwiniętego przepływu w rurze (plik inlet\_profile\_keps.prof)
- $2.\,$ standardowe ustawienia Fluenta (nie mające znaczenia fizycznego)

3. wielkości zdefiniowane przez użytkownika (w oparciu o pewne oszacowania intensywności turbulencji, Tu [%] i skali długości turbulentnej, lt [m]).

Student ma do dyspozycji przygotowane wcześniej pliki \*.cas zawierające siatkę obliczeniową (bazowa i gęsta). Nie ma więc konieczności przygotowania siatki.

Warunkiem zakończenia ćwiczenia jest przedstawienie prowadzącemu zajęcia otrzymanych wyników obliczeń oraz dokonanie analizy uzyskanych wyników. Całość w formie sprawozdania zawierającego obrazy jak również analizę wyników.

# Przebieg ćwiczenia

## Obliczenia z zastosowaniem funkcji ściany

- 1. Do okna projektu wyciągnij **Fluent** z zakładki **Component systems**. Otwieramy program Fluent przez otwarcie komórki *Setup* (**2D**, **Double precision, serial** (jeden proces) )
- 2. Wczytać plik \*.mesh z bazową siatką obliczeniową File/Import/Mesh.... Plik do ściągnięcia Średnice rury to D = 0.1524m i Dinlet = 0.517D = 0.0788 m.
- 3. Przepływ jest osiowosymteryczny. Zapewne program fluent to zauważy i wypisze odpowiednie ostrzeżenie w konsoli (dzięki odpowiedniemu nazewnictwu warunku brzegowego). Sprawdź ustawienia w **Setup/General** w polu **Solver**.
- 4. Wybieramy odpowiedni model turbulencji w  $\mathbf{Define}/\mathbf{Models}$ i odpowiednią opcję w Near-Wall Treatment.
- 5. Sprawdzamy poprawność zdefiniowania własności płynu. Setup/Materials/Fluid.
- 6. Pobieramy plik z zdefiniowanymi parametrami warunku brzegowego.
- 7. Wczytujemy pobrane profile. Można to zrobić na dwa sposoby:
  - W górnej belce:  $\mathbf{Physics}/\mathbf{Zones}/\mathbf{Profiles.}$ .
  - W drzewie po lewej stronie klikając dwukrotnie na Setup/Boundary Conditions i wciskając guzik Profiles...

Zostanie wczytanych 5 pól, z czego 3 są naszymi zmiennymi - profil prędkości, energii kinetycznej turbulencji i dyssypacji energii kinetycznej turbulencji.

- 8. Ustawiamy schemat dyskretyzacji I rzędu dla członów konwekcyjnych w równaniach pędu (upwind) oraz SIMPLE jako schemat sprzężenia prędkość-ciśnienie w **Solution/Methods**.
- 9. Ustawiamy poziom zbieżności rozwiązania, Solution/Monitors/Residual, 1e-5.
- 10. **Inicjalizuj** obliczenia z wlotu i przeliczyć. Zbieżność rozwiązania monitorować.

Sprawdź jak wyglądają włotowe profile prędkości średniej, energii kinetycznej turbulencji i dyssypacji w **Results/Plots/Profile Data**. Otworzyć w notatniku plik, z którego zostały wczytane i zobaczyć w jaki sposób zostały zdefiniowane.

W sprawozdaniu podaj przykłady przypadków dla których można zastosow

11. Po uzyskaniu zbieżnego rozwiązania dla I rzędu, przełączyć na II rząd i kontynuować obliczenia (bez inicjalizacji). W niektórych przypadkach nie da się uzyskać zbieżności startując od razu od równań II rzędu.

Wykres zbieżności przedstaw w raporcie.

12. Wykonaj wizualizacje: konturów ciśnienia, prędkości, energii kinetycznej turbulencji i dyssypacji, wektorów prędkości i linii prądu korzystając z opcji pod zakładką **Results/Graphics/Contours**.

Przedstaw w raporcie.

13. Sprawdzić liczbę Reynoldsa w oparciu o prędkość średnią na wylocie z rury o średnicy D=0.1524m, Results/Report/Surface Integrals, Report Type: Area-Weighted Average.

Sprawdzić ile wynosi prędkość średnia i maksymalna w osi rury na wlocie. Prędkość średnią i prędkość maksymalną można policzyć w **Re-sults/Report/Surface Integrals** 

- Report Type: Area-Weighted Average (dla prędkości średniej)
- Report Type: Vertex Maximum (dla prędkości maksymalnej).

Zanotować prędkość średnią,  $\mathbf{U}\mathbf{\acute{sr}}$ , i maksymalną prędkość ,  $\mathbf{Uxmax}.$  Informacje te będą potrzebne do normalizacji składowej osiowej prędkości średniej i energii kinetycznej turbulencji, celem porównania z danymi eksperymentalnymi.

- 14. Zdefiniować znormalizowane funkcje w górnej belce programu Userdefined/Field Functions/Custom:
  - składowa osiowa prędkości znormalizowana maksymalną prędkością w osi rury na wlocie do obszaru obliczeniowego,  ${\bf Ux}~/~{\bf Uxmax}$

(z menu rozwijanego **Field Functions** wybrać Velocity oraz Axial Velocity, potwierdzić wybór klikając na Select, następnie wybrać znak dzielenia i wpisać zanotowaną wcześniej wartość maksymalnej prędkości na wlocie, po wpisaniu nazwy zatwierdzić Define)

• energia kinetyczna turbulencji znormalizowana kwadratem średniej prędkości na wlocie do obszaru obliczeniowego,  ${\bf k}/({\bf U}{\bf \hat{s}r}){\bf 2}$ 

(z menu rozwijanego **Field Functions** wybrać Turbulence oraz Turbulent Kinetic Energy (k) i podzielić przez kwadrat odpowiedniej stałej)

- 15. Sprawdzić y+ na ścianach wall, wall\_d i wall\_inlet. Results/Plots/XY Plot:
  - Y axis function: Turbulence
    - Wall YPlus

Efektywne wykorzystanie funkcji ściany wymaga aby bezwymiarowa odległość y+ centroid komórek obliczeniowych znajdujących się przy ścianie była w zakresie y+=30-300.

### Przedstaw w raporcie.

16. Porównać wyniki symulacji z danymi eksperymentalnymi w przekrojach poprzecznym x = -0.0381 i wzdłużnym r = 0.07271.

**Results/Plots/XY Plot, Load File** aby wczytać dane eksperymentalne. Podobnie jak w **poprzedniej instrukcji**, najpierw wyświetlić wykres dla danych eksperymentalnych, a następnie zastanowić się jaka funkcja powinna znajdować się na osiach X i Y. Zdefiniuj przekroje x=-0.0381 i r=0.07271. Należy pamiętać, że nie porównujemy **bezpośrednio** prędkości i energii kinetycznej turbulencji, a **znormalizowane** przez nas funkcje, które można znaleźć pod zakładką Custom Field Functions. Zwrócić uwagę na położenie pierwszego punktu w pobliżu ściany w przekroju poprzecznym.

Czy wyniki symulacji numerycznej dobrze oddają charakter zmian prędkości średniej wzdłuż x dla przekroju wzdłużnego? Zauważ, że w eksperymencie obserwuje się dwa obszary recyrkulacji. Mniejszy na wysokości uskoku.



17. Zapisz wykres dla przekroju wzdłużnego w pliku tekstowym, Results/Plots/XY Plot opcja Write to File.

Przedstaw w raporcie.

18. Wyłącz program Fluent, w środowisu Workbench zapisz projekt.

### Analiza wpływu warunków na wlocie do obszaru obliczeniowego

#### Standardowe ustawienia programu fluent

- 1. **Zduplikuj** blok z obliczeniami, odpowiednio nazwij, otwórz Fluent z nowopowstałego bloku klikając komórkę **Setup**
- 2. Zmień warunki brzegowe dla energii kinetycznej turbulencji i dyssypacji z profili UDF na standardowe warunki Fluenta const=1. Setup/Boundary Conditions/Inlet/Velocity\_inlet
- 3. Zainicjalizuj rozwiązanie z wlotu. Przelicz przypadek.
- 4. Porównaj uzyskane profile prędkości dla przekroju wzdłużnego z danymi eksperymentalnymi i z poprzednio uzyskanymi wynikami symulacji.

Czy wyniki symulacji znacząco odbiegają od danych eksperymentalnych? Zapisać uzyskany profil prędkości w pobliżu ściany Display/Plot/Xyplot, Write to File

Przedstaw w raporcie.

5. Wyłącz program Fluent, w środowisu Workbench zapisz projekt.

#### Warunki wynikające z teorii

- 1. **Zduplikuj** blok z obliczeniami, odpowiednio nazwij, otwórz Fluent z nowopowstałego bloku klikając komórkę **Setup**
- 2. Zmień warunki brzegowe dla turbulencji na wlocie, Setup/Boundary Conditions/Inlet/Velocity\_inlet w polu Turbulence zmień metode na Intensity and Hydraulic diameter.

Relacja pomiędzy energią kinetyczną turbulencji, k, intensywnością turbulencji, Tu, i prędkością średnią, Uśr:

 $k=1.5(Tu \ U \acute{sr}) U 2.$ 

Dla w pełni rozwiniętego przepływu w rurze można przyjąć Tu=4\% w osi rury.

W przepływach wewnętrznych skala długości turbulentnej lt nie może być większa od fizycznego rozmiaru obiektu L. Dla analizowanego przepływu w rurze L=Dinlet. Przyjmuje się, że skala długości turbulentnej:

lt. Przy czym  $\epsilon = k3/2 / lt$ .

Podaj warunki brzegowe: Tu=4% i L=Dinlet. Zainicjalizuj obliczenia i przelicz.

Porównaj wyniki obliczeń dla przekroju wzdłużnego z danymi eksperymentalnymi i z poprzednio uzyskanymi wynikami.

Które wyniki symulacji są najbliższe danym eksperymentalnym i dlaczego? Czy stosowanie standardowych warunków Fluenta ma sens?

### Przedstaw w raporcie.

3. Wyłącz program Fluent, w środowisu Workbench zapisz projekt.

### Siatka gęsta, podejście Enhanced Wall Treatment.

- 1. **Zduplikuj** blok z obliczeniami z akapitu 1, odpowiednio nazwij, otwórz Fluenta z nowopowstałego bloku klikając komórkę **Setup**
- Ściągnij plik z zagęszczoną siatką: Plik do ściągnięcia

6



#### 3. Podmień siatki:

W górnej belce programu, w zakładce **Domain** za pomocą opcji **Replace Mesh...** w polu **Zone**.

Zauważ, że program Fluent wykona szereg operacji, który dostosuje obecne ustawienia do nowej siatki. Bardzo ważne aby nowa siatka miała dokładnie te same nazwy warunków brzegowych.

- 4. Zainicjalizuj i oblicz przypadek.
- 5. Po wykonaniu kilkudziesięciu iteracji, sprawdź y+ na ścianach wall\_inlet i wall\_d, **Results/Plots/XY Plot**, (Turbulence i Wall YPlus)

W celu zastosowania podejścia Enhanced Wall Treatment , y+ musi być mniejsze od 3, aby poprawnie uwzględnić dynamikę przepływu w subwarstwie lepkiej. Jeżeli warunek nie jest spełniony zagęścić siatkę obliczeniową. Powtarzać obliczenia i zagęszczanie siatki do uzyskania y+ bliskiego 5.

- W górnej belce programu wchodzimy w zakładkę **Domain**, później w polu **Adapt** klikamy **Refine**/**Coarsening**
- $\bullet \ {\rm W} \ {\rm nowo} \ {\rm otwartym} \ {\rm oknie} \ {\rm wciskamy} \ {\rm przycisk} \ {\bf Cell} \ {\bf Registers} / {\bf New} / {\bf Boundar}$
- Arbitralnie wpisujemy nazwę adaptowanego pola.
- $\bullet$  Zaznaczmy nasze wall inlet oraz wall d
- W pole Number of cells wpisujemy ilość komórek do adaptacji licząc od ściany 2.
- Save/Display
- Po powrocie do okna Adaptation controls z rozwijanym menu Refinement Criterion wybieramy utworzone pole adaptacji.
- Adapt
- 6. Porównaj wyniki symulacji z danymi eksperymentalnymi w przekroju poprzecznym **Results/Plots/XY Plot**. Porównaj wyniki symulacji na siatce gęstej dla przekroju wzdłużnego z danymi eksperymentalnymi i wynikami symulacji dla siatki bazowej.

Czy zwiększenie rozdzielczości siatki obliczeniowej pozwala uzyskać dużo lepsze wyniki w pobliżu ściany ? Czy koszt obliczeń na siatce gęstej jest znacznie większy od kosztów obliczeń na siatce podstawowej?

Przedstaw w raporcie.

7. Wykonać wizualizacje.



Figure 1: Prędkości osiowe dla przekorów x = -0.0381 oraz r = 0.07271

# Opis danych eksperymentalnych oraz ich interpretacja graficzna

- exper-axial-vel\_x-0\_0381.xy profil składowej osiowej prędkości średniej znormalizowanej maksymalną prędkością w osi rury na włocie do obszaru obliczeniowego w funkcji promienia rury w przekroju x = 0.0381 (tuż przed uskokiem)
- exper-axial-vel\_r0.07271.xy profil składowej osiowej prędkości średniej znormalizowanej maksymalną prędkością w osi rury na włocie do obszaru obliczeniowego w funkcji współrzędnej x w odległości r = 0.07271 od osi rury (blisko ściany w rurze o większej średnicy).
- **exper-k-over-u2\_x-0\_0381.xy** profil energii kinetycznej turbulencji znormalizowany kwadratem prędkości średniej na wlocie do obszaru obliczeniowego w funkcji promienia rury w przekroju x = -0.0381 (tuż przed uskokiem);





Figure 2: Profil energii kinetycznej dla przekroju x = -0.0381