



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

# Symulacja numeryczna przepływu turbulentnego w rurze o przekroju kołowym

Modelowanie CFD w Energetyce

**Autor:**  
Szymon Kuczek

# Spis treści

<b>1</b>	<b>Cel i zakres pracy</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Sformułowanie problemu</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Rozwiązanie analityczne</b>	<b>2</b>
3.1	Liczba Reynoldsa . . . . .	2
3.2	Współczynnik tarcia i spadek ciśnienia . . . . .	2
<b>4</b>	<b>Model Numeryczny</b>	<b>3</b>
4.1	Dyskretyzacja (Meshing) . . . . .	3
4.2	Ustawienia Solvera . . . . .	4
<b>5</b>	<b>Wyniki Symulacji</b>	<b>4</b>
5.1	Zbieżność rozwiązania . . . . .	4
5.2	Weryfikacja parametru $y^+$ . . . . .	5
5.3	Pola prędkości i ciśnienia . . . . .	5
<b>6</b>	<b>Wnioski i Walidacja</b>	<b>6</b>

# 1 Cel i zakres pracy

Celem niniejszego sprawozdania jest analiza numeryczna (CFD) przepływu turbulentnego powietrza w prostej rurze o długości  $L = 2$  m i średnicy  $D = 4$  mm. Symulację przeprowadzono w środowisku **Ansys Fluent 2025**, wykorzystując model turbulencji  $k - \omega$  SST. Wyniki numeryczne (spadek ciśnienia) zweryfikowano z rozwiązaniem analitycznym opartym na równaniu Darcy-Weisbacha.

## 2 Sformułowanie problemu

Analizowany jest stacjonarny przepływ czynnika ściśliwego (powietrza) w rurze gładkiej. Parametry geometryczne oraz fizyczne płynu zestawiono w Tabeli 1.

Parametr Geometrii	Wartość	Własność Płynu	Wartość
Długość rury ( $L$ )	2.0 m	Gęstość ( $\rho$ )	1.225 kg/m <sup>3</sup>
Średnica ( $D$ )	0.004 m	Lepkość dyn. ( $\mu$ )	$1.7894 \cdot 10^{-5}$ Pa · s
Prędkość wlotowa ( $v$ )	50 m/s	Ciśnienie wyjściowe	0 Pa

Tabela 1: Dane wejściowe do symulacji

## 3 Rozwiązanie analityczne

W celu weryfikacji poprawności modelu numerycznego przeprowadzono obliczenia teoretyczne.

### 3.1 Liczba Reynoldsa

Charakter przepływu określono na podstawie liczby Reynoldsa:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1.225 \cdot 50 \cdot 0.004}{1.7894 \cdot 10^{-5}} \approx \mathbf{13\,692} \quad (1)$$

Wartość  $Re > 4000$  jednoznacznie wskazuje na przepływ **turbulentny**.

### 3.2 Współczynnik tarcia i spadek ciśnienia

Dla rur gładkich hydraulicznie w zakresie  $4000 < Re < 10^5$  zastosowano wzór Blasiusa:

$$\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}} = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{13\,692}} \approx 0.02927 \quad (2)$$

Oczekiwany spadek ciśnienia obliczono z równania Darcy-Weisbacha:

$$\Delta P_{analit} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} = 0.02927 \cdot \frac{2.0}{0.004} \cdot 1531.25 \approx \mathbf{22\,394.32\,Pa} \quad (3)$$

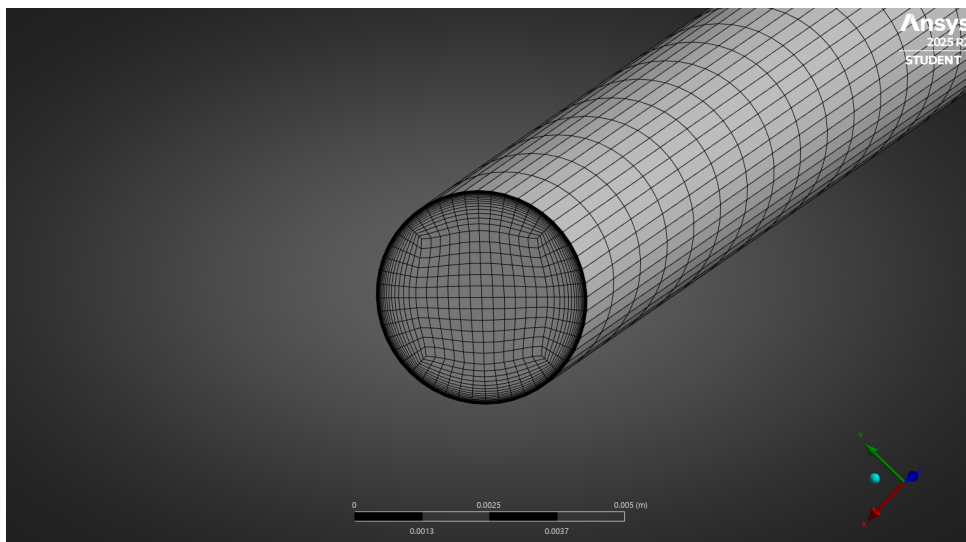
## 4 Model Numeryczny

### 4.1 Dyskretyzacja (Meshing)

Do dyskretyzacji domeny obliczeniowej wykorzystano metodę **MultiZone**, co pozwoliło na uzyskanie wysokiej jakości siatki hybrydowej. Skonfigurowano metodę w trybie *Mapped/Swept Type: Hexa* oraz *Free Mesh Type: Tetra/Pyramid*, co zapewniło dominację elementów heksaedrycznych przy zachowaniu elastyczności siatki.

Aby wiernie odwzorować kołowy przekrój rury, na krawędziach wlotu i wylotu zastosowano operację **Edge Sizing** z podziałem na 50 elementów. Kluczowym elementem było również zastosowanie warstwy przyściennej (*Inflation*), niezbędnej do spełnienia wymogów modelu turbulencji.

**Uwaga:** Proces generowania siatki został zoptymalizowany pod kątem ograniczeń licencji akademickiej (*Ansys Student Version*), która limituje liczbę elementów/węzłów. Dzięki zastosowaniu metody hybrydowej udało się uzyskać wysoką rozdzielczość w strefach kluczowych (ściana) przy zachowaniu całkowitej liczby elementów w dopuszczalnym limicie, nie tracąc na dokładności rozwiązania.



Rysunek 1: Siatka obliczeniowa wygenerowana metodą MultiZone z widoczną warstwą inflacyjną.

Parametry siatki:

- Metoda: MultiZone (Hexa Core / Tetra-Pyramid)
- Pierwsza warstwa przy ścianie:  $2.4 \cdot 10^{-6}$  m (dla  $y^+ \approx 1$ )
- Liczba elementów: **963 792** (Siatka o wysokiej gęstości)

## 4.2 Ustawienia Solvera

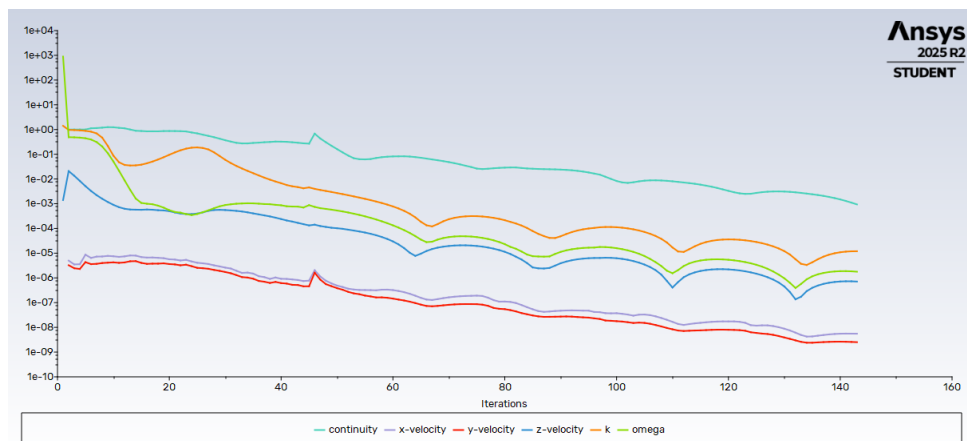
Symulację przeprowadzono przy użyciu solvera *Pressure-Based* w stanie ustalonym.

- **Model Turbulencji:**  $k - \omega$  SST (Shear Stress Transport) – dobrany pod kątem dokładności w strefie przyściennej.
- **Schemat:** Coupled (sprężenie ciśnienie-prędkość).
- **Dyskretyzacja:** Second Order Upwind dla wszystkich zmiennych.

## 5 Wyniki Symulacji

### 5.1 Zbieżność rozwiązania

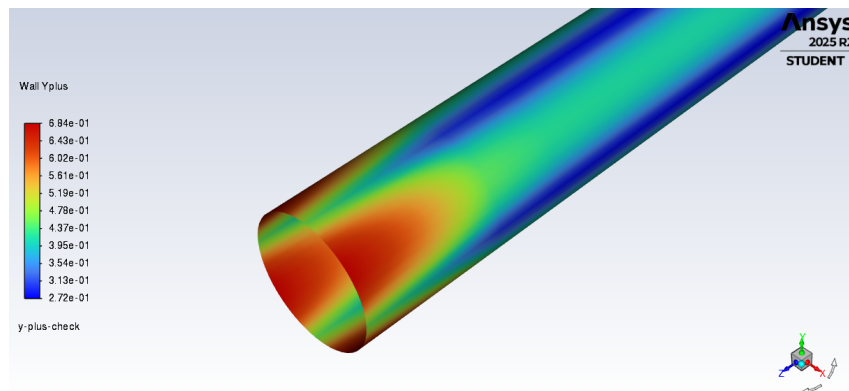
Proces obliczeniowy przebiegał stabilnie. Monitorowane residua, w tym residuum ciągłości (*Continuity*), osiągnęły wartości poniżej  $10^{-3}$ , co świadczy o poprawnym zbilansowaniu równań transportu.



Rysunek 2: Historia zbieżności residuów.

## 5.2 Weryfikacja parametru $y^+$

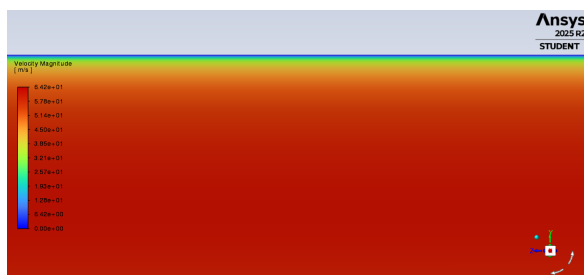
Poprawność konstrukcji warstwy przyściennej zweryfikowano poprzez analizę bezwymiarowej odległości od ściany ( $y^+$ ). Uzyskano wartość maksymalną na poziomie 0.68, co spełnia rygorystyczne kryterium  $y^+ < 1$  dla modelu SST i gwarantuje poprawne obliczenie tarcia lepkiego.



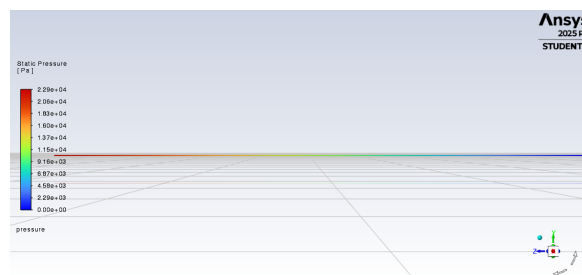
Rysunek 3: Kontur parametru  $y^+$  na ścianie rury.

## 5.3 Pola prędkości i ciśnienia

Uzyskane pola przepływu wykazują cechy charakterystyczne dla rozwiniętej turbulencji. Profil prędkości jest spłaszczony w osi rury, z występowaniem wysokich gradientów przy ściankach.

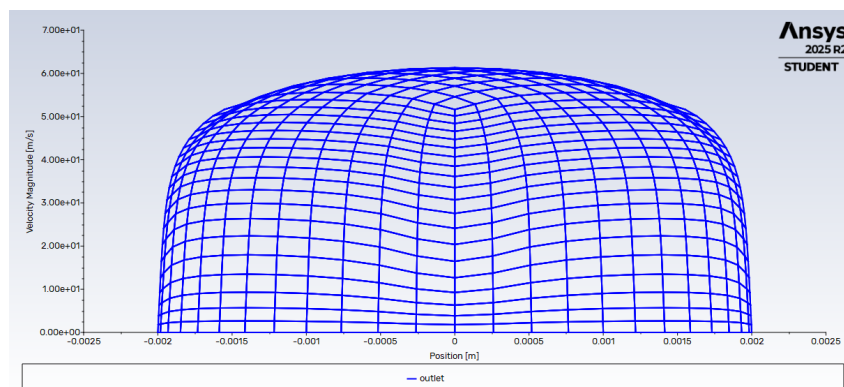


(a) Prędkość [m/s]



(b) Ciśnienie [Pa]

Rysunek 4: Rozkłady pól wewnątrz rury (płaszczyzna symetrii).



Rysunek 5: Profil prędkości na wylocie z rury.

## 6 Wnioski i Walidacja

Całkowity spadek ciśnienia w symulacji CFD wyznaczono jako różnicę średnich ważonych ciśnienia statycznego na wlocie i wylocie.

Metoda	Spadek ciśnienia $\Delta P$ [Pa]	Błąd względny
Analityczna	22 394.32	-
Numeryczna (CFD)	22 891.83	<b>2.22%</b>

Tabela 2: Porównanie wyników analitycznych i numerycznych

### Podsumowanie:

1. Model numeryczny wykazał bardzo wysoką zgodność z teorią (błąd rzędu 2%).
2. Wyższy wynik symulacji numerycznej (22 891 Pa) względem analitycznego (22 394 Pa) wynika z uwzględnienia w CFD **odcinka dolotowy** (hydrodynamic entrance region). W tej strefie formujący się profil prędkości generuje wyższe lokalne naprężenia ścinające, czego uproszczony wzór Darcy-Weisbacha nie uwzględnia.
3. Zastosowanie gęstej siatki (blisko 1 mln elementów) oraz precyzyjne sterowanie parametrami dyskretyzacji (Inflation, Edge Sizing) pozwoliło na wyeliminowanie błędów numerycznych związanych z "szorstkością" siatki.