

# Nowoczesne narzędzia obliczeniowe do projektowania i optymalizacji kotłów

**Mateusz Szubel, Mariusz Filipowicz**

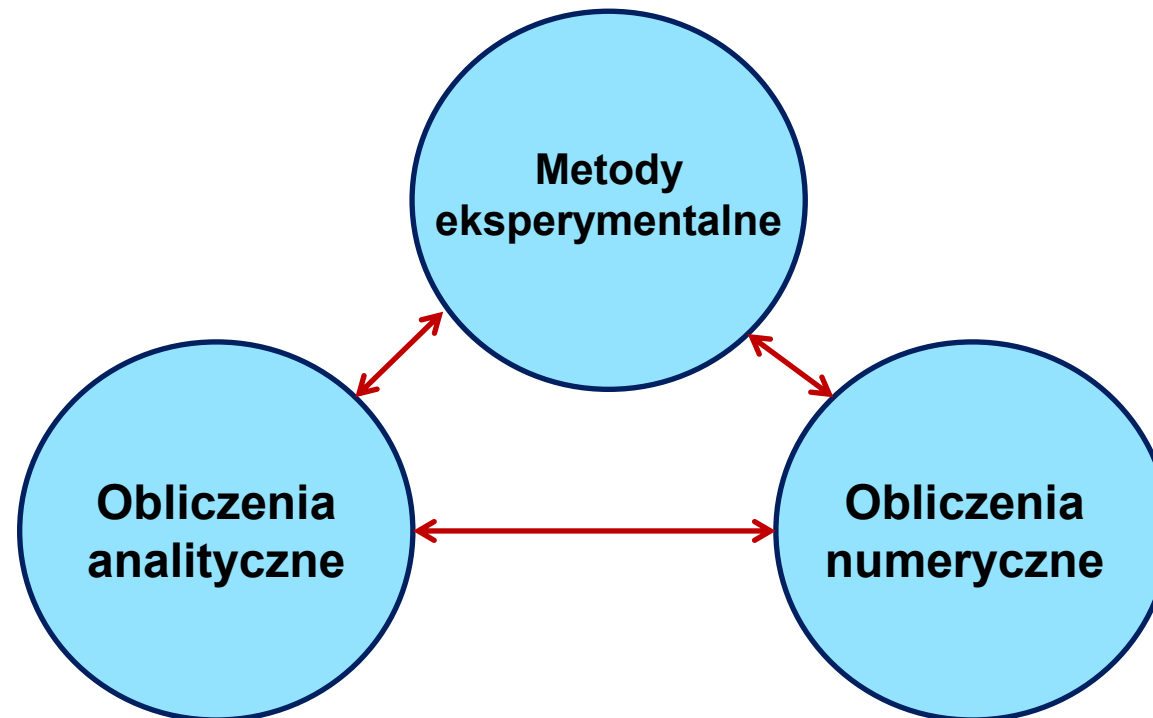
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
AGH University of Science and Technology

01.12.2017



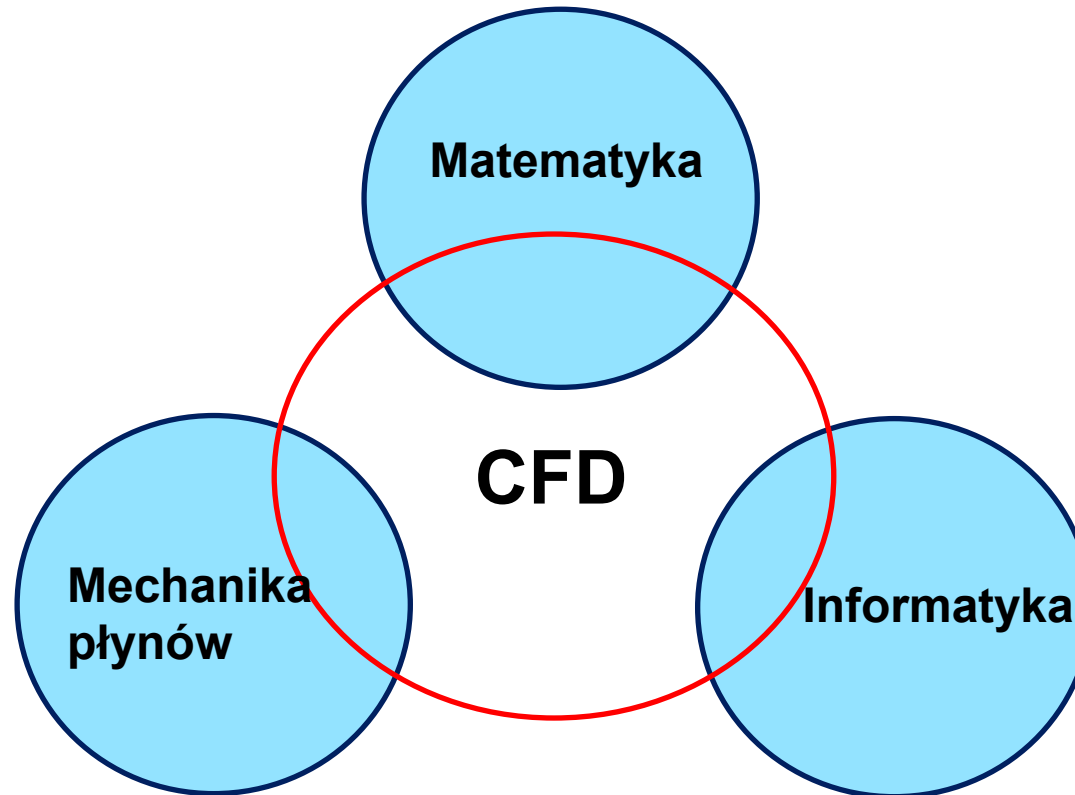
# Podstawowe metody inżynierskie w zagadnieniach przepływowych i termicznych

- » Tradycyjne metody (eksperymentalne i analityczne) dla prostych problemów
- » Obliczenia numeryczne dla złożonych zadań



# Obliczeniowa mechanika płynów

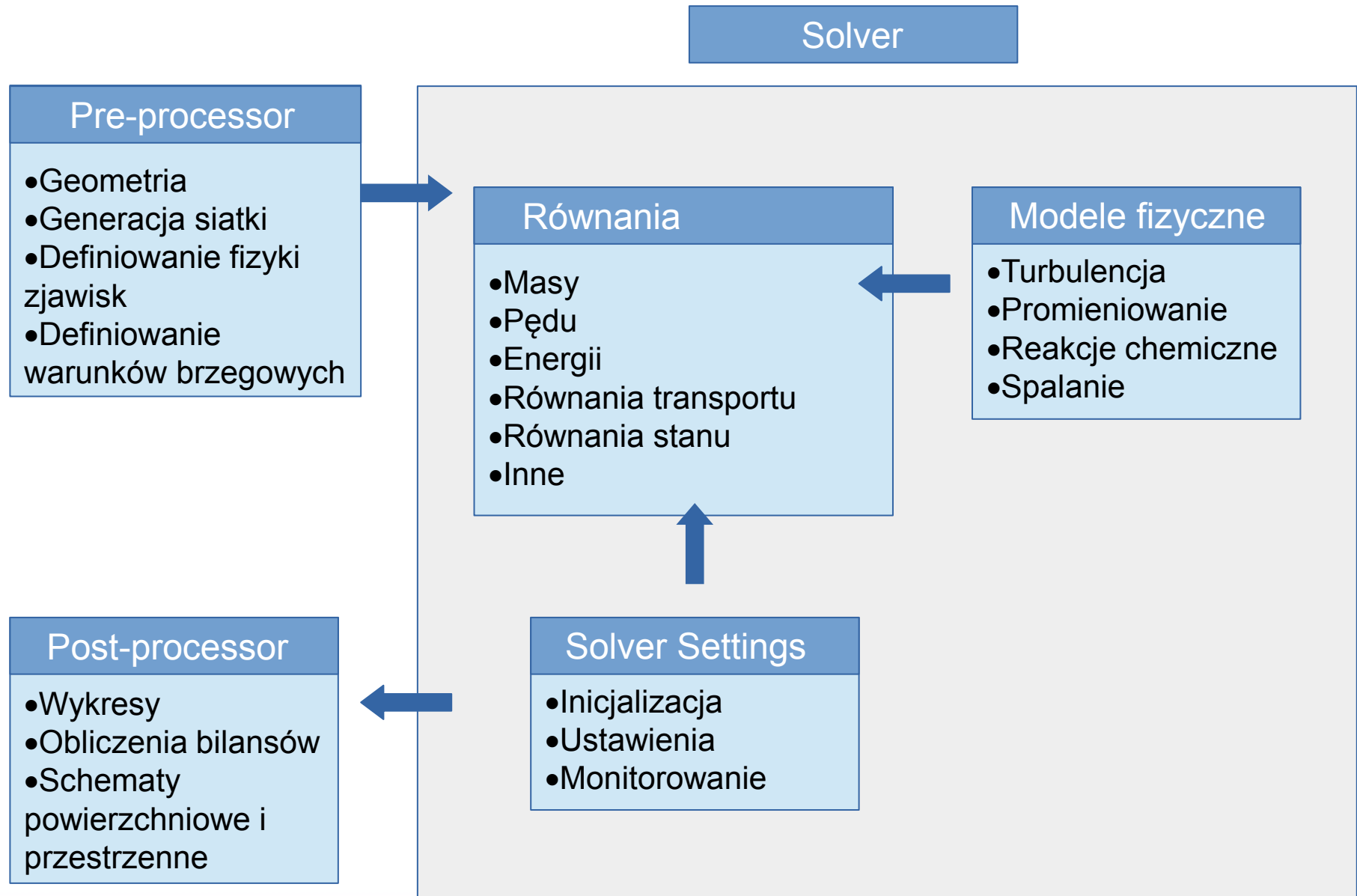
- » CFD (Computational Fluid Dynamics) – interdyscyplinarna dziedzina łącząca mechanikę płynów, matematykę oraz informatykę.



# Zalety obliczeniowej mechaniki płynów

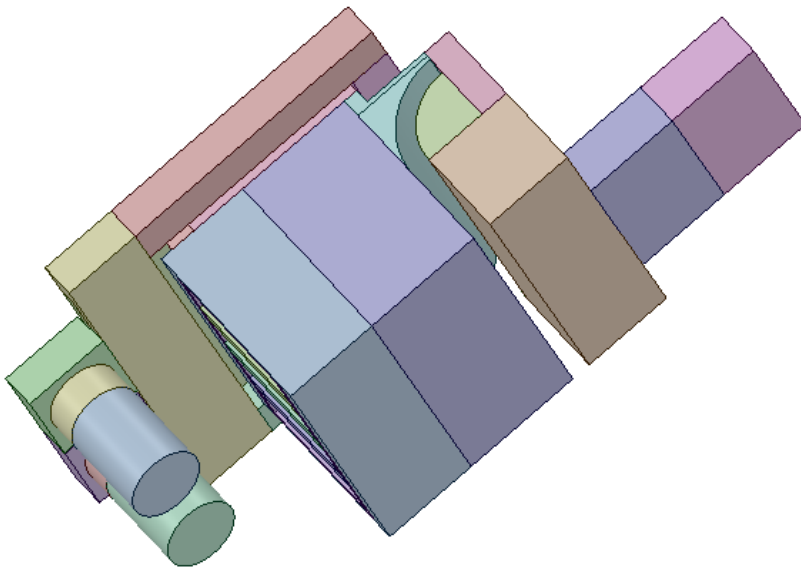
- » Możliwość badania szczególnych przypadków i warunków równań rządzących w bardziej szczegółowy sposób
- » Redukcja czasu oraz kosztów procesu projektowego
- » Możliwość rozwiązania szerokiego zakresu złożonych zagadnień przepływowych
- » Możliwość symulacji przepływów, niewykonalnych w ramach badań eksperymentalnych
- » Otrzymanie szczegółowych wyników, wizualizacji oraz obszernych informacji

# Budowa modelu numerycznego

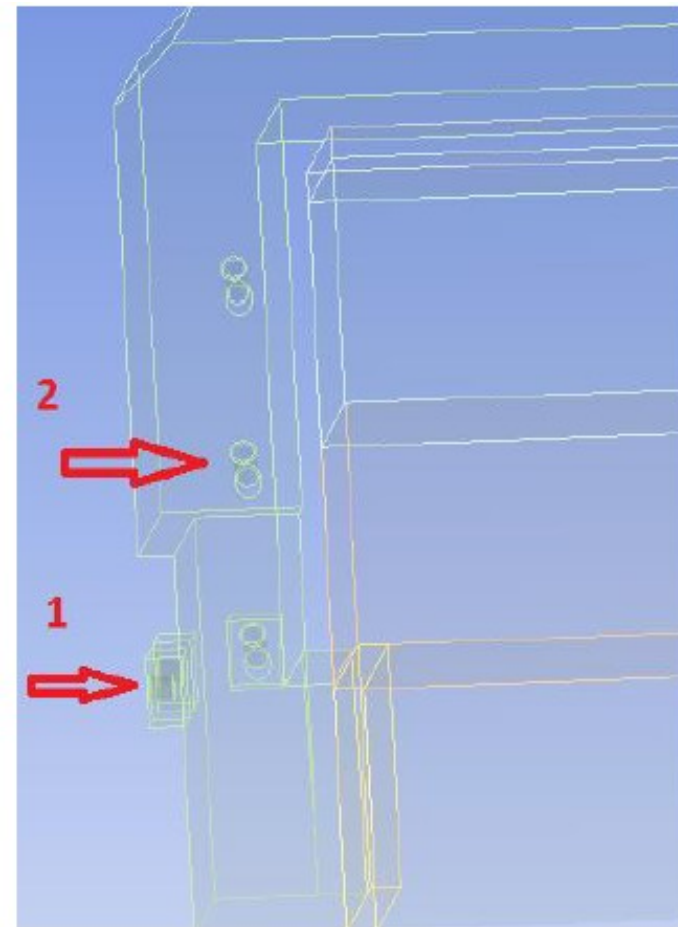


# Przygotowanie geometrii

- » Geometria przestrzenna o odpowiednich parametrach
- » Definiowanie domeny płynu

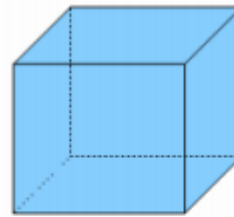


Wkład kominkowy – domena płynu

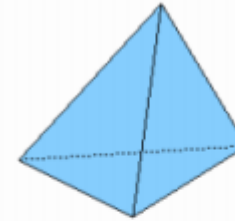


Wycinek geometrii kotła z zaznaczonymi strumieniami powietrza

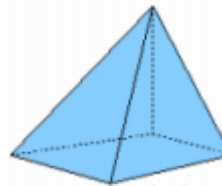
# Dyskretyzacja domeny



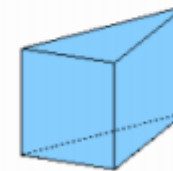
Hexahedral



Tetrahedral

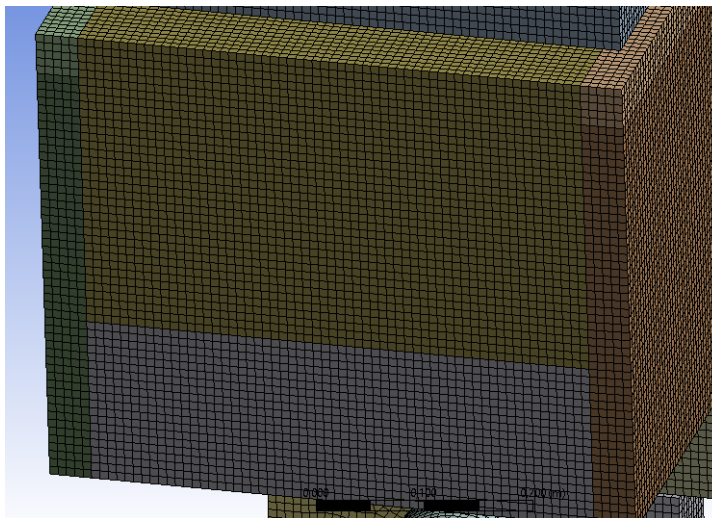


Pyramidal

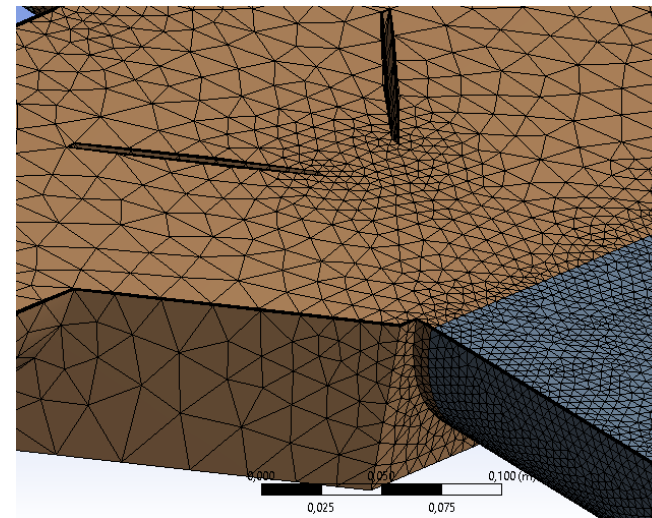


Prismatic

Podstawowe rodzaje elementów siatki



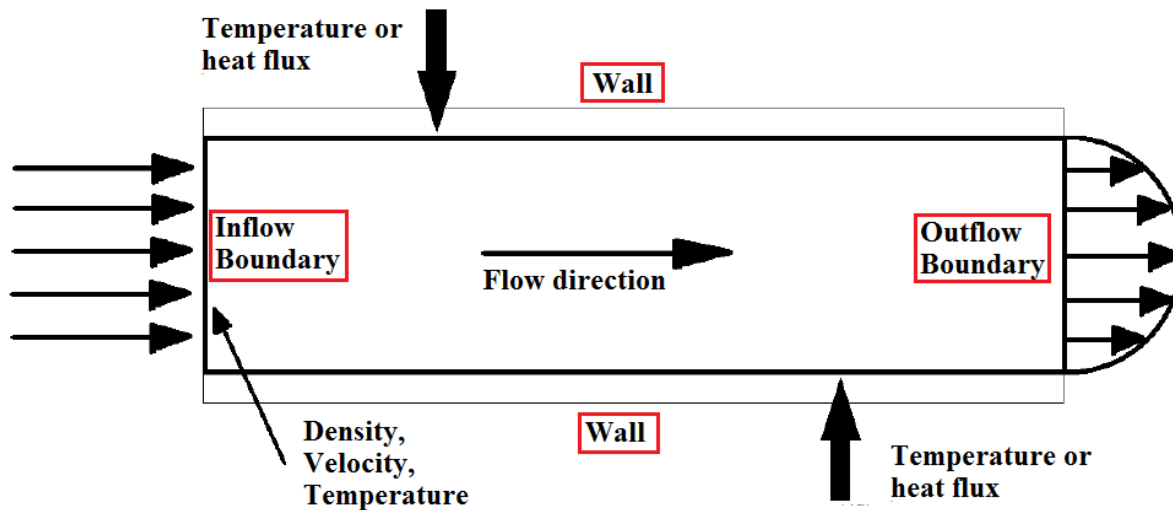
Siatka heksagonalna



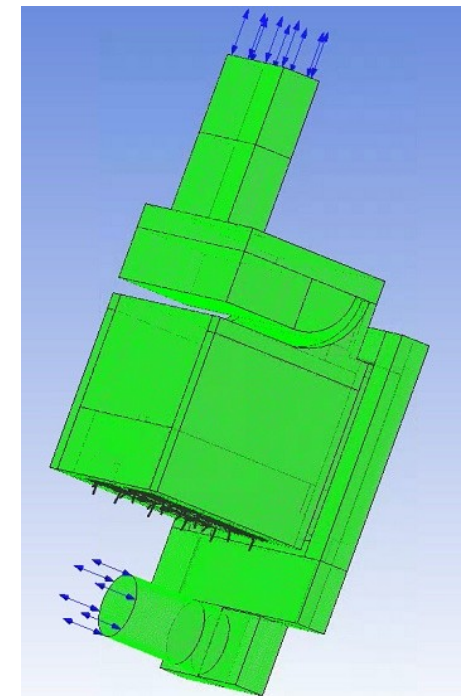
Siatka tetrahedralna

# Definiowanie fizyki przepływu i warunków brzegowych

- » Parametry materiału/materiałów domeny
- » Definiowanie przepływu
- » Definiowanie modeli (Wymiana ciepła, turbulencje, reakcje chemiczne)
- » Definiowanie warunków brzegowych



Lokalizacja warunków brzegowych



Obszar domeny płynu



# Modelowanie spalania

- » Wiele niewiadomych i zmiennych
- » Modelowanie procesów homogenicznych – w fazie gazowej
- » Modelowanie procesów heterogenicznych – relacje między fazą stałą i gazową
- » Przewidywanie emisji pyłów
- » Modele matematyczne oparte na procesach mieszania i kinetyce reakcji

$$k = A \cdot e^{\left(-\frac{E_a}{RT}\right)}$$

Równanie reakcji	Szybkość reakcji	Stała kinetyczna reakcji
1.1 $H_2 + 0.5 O_2 \rightarrow H_2O$	$r_{H_2} = k_{H_2} C_{H_2} C_{O_2}$	$k_{H_2} = 9,87 * 10^8 * e^{\frac{-3,728}{T_{gas}}}$
1.2 $CO + O_2 \rightarrow CO_2$	$r_{CO} = k_{CO} C_{CO} C_{O_2}^{0,25} C_{H_2O}^{0,5}$	$k_{CO} = 2,239 * 10^{12} * e^{\frac{-20,426}{T_{gas}}}$
1.3 $C_xH_y + \left(\frac{x}{2} + \frac{y}{4}\right) O_2 \rightarrow x CO + \frac{y}{2} H_2O$	$r_{CO} = k_{CO} C_{C_xH_y}^{0,27686} C_{O_2}^{1,36316}$	$k_{C_xH_y} = 1,0729 * 10^{10} * e^{\frac{-15,312}{T_{gas}}}$
1.4 $NH_3 + O_2 \rightarrow NO + H_2O + 0.5 H_2$	$r_{NH_3} = k_{NH_3} C_{NH_3} C_{O_2}^{0,5} C_{H_2}^{0,5}$	$k_{NH_3} = 1,21 * 10^5 * T_{gas}^2 * e^{\frac{-8,000}{T_{gas}}}$
1.5 $NH_3 + NO \rightarrow N_2 + H_2O + 0.5 H_2$	$r_{NH_3} = k_{NH_3} C_{NH_3} C_{NO}$	$k_{NH_3} = 8,73 * 10^{14} * T_{gas}^{-1} * e^{\frac{-8,000}{T_{gas}}}$
1.6 $HCN + NO \rightarrow NO + CO + 0.5 H_2$	$r_{HCN} = k_{HCN} C_{HCN} C_{O_2}$	$k_{HCN} = 1.0 * 10^{10} * e^{\frac{-33,712}{T_{gas}}}$
1.7 $HCN + NO \rightarrow N_2 + CO + 0.5 H_2$	$r_{HCN} = k_{HCN} C_{HCN} C_{NO}$	$k_{HCN} = 3.0 * 10^{12} * e^{\frac{-30,188}{T_{gas}}}$

# Obliczenia

» **Zasada zachowania masy**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

» **Zasada zachowania pędu (Naviera-Stokes'a)**

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x$$

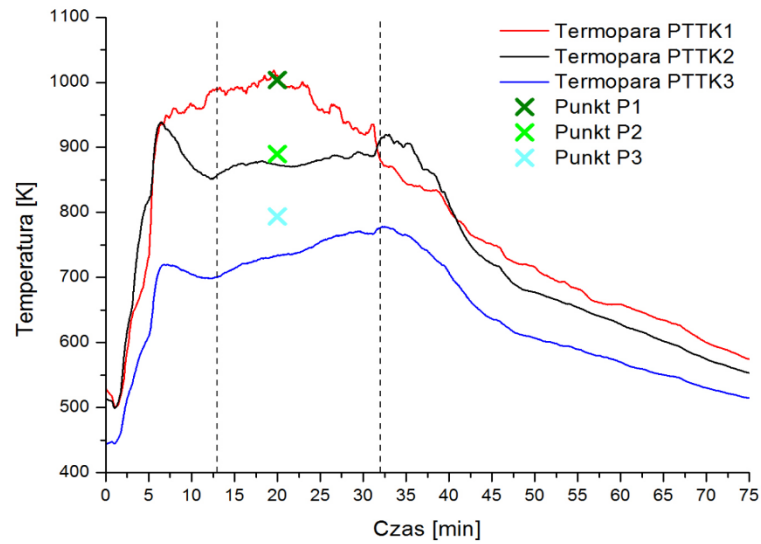
$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z$$

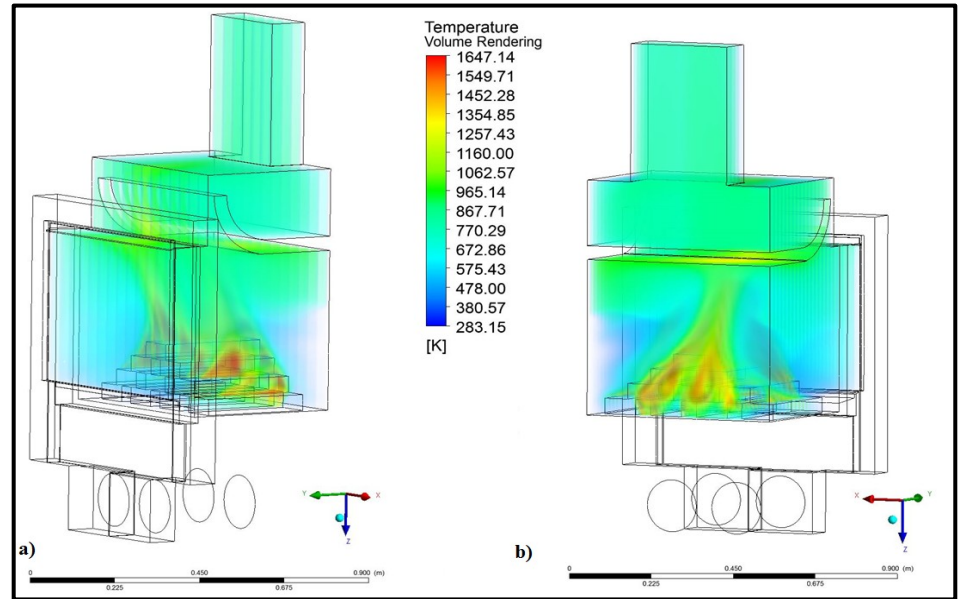
» **Zasada zachowania energii**

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{v}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + (\mathbf{T} \cdot \nabla \mathbf{v})$$

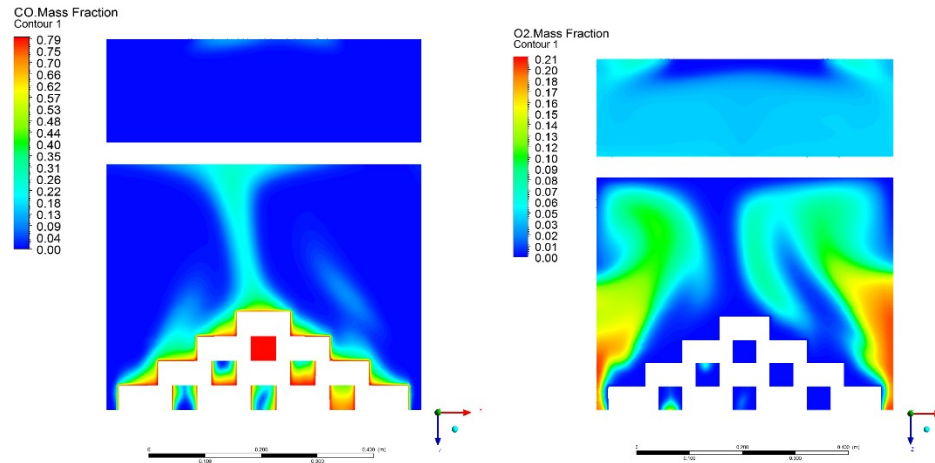
# Przykładowe wyniki – wkład kominkowy



Porównanie wyników z modelu i eksperymentu

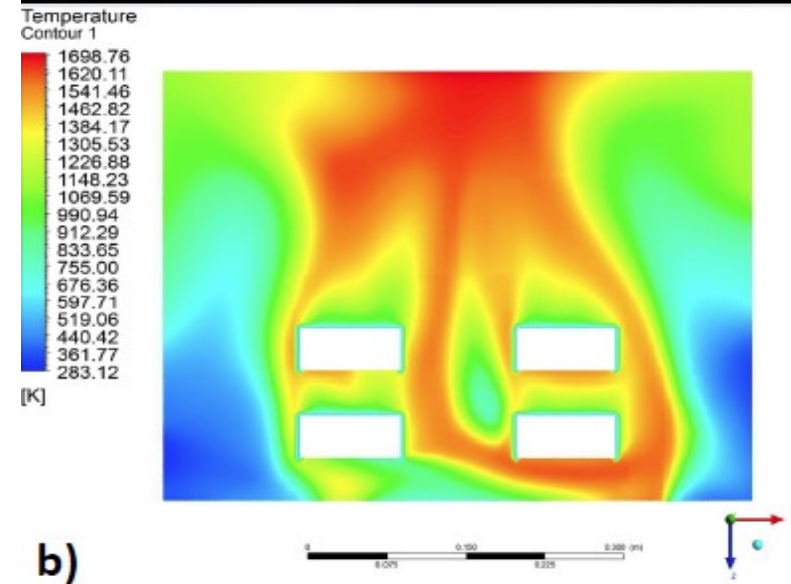
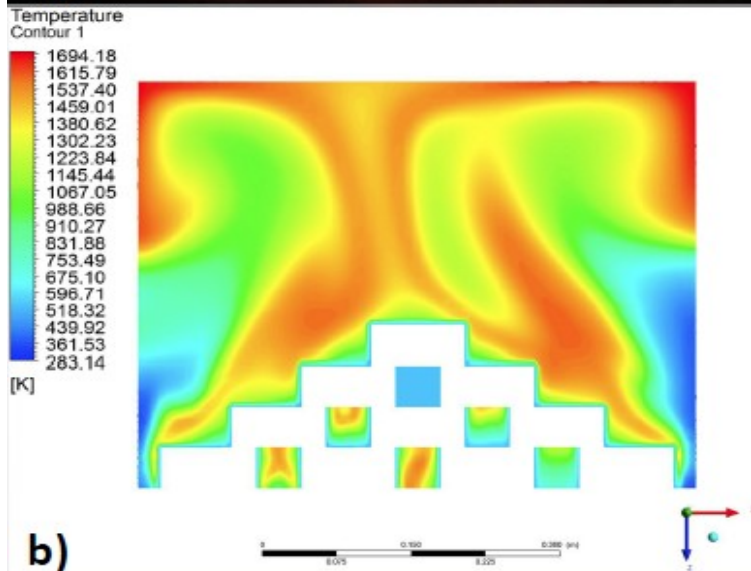


rozkład temperatury



Koncentracja tlenku węgla oraz tlenu w komorze spalania

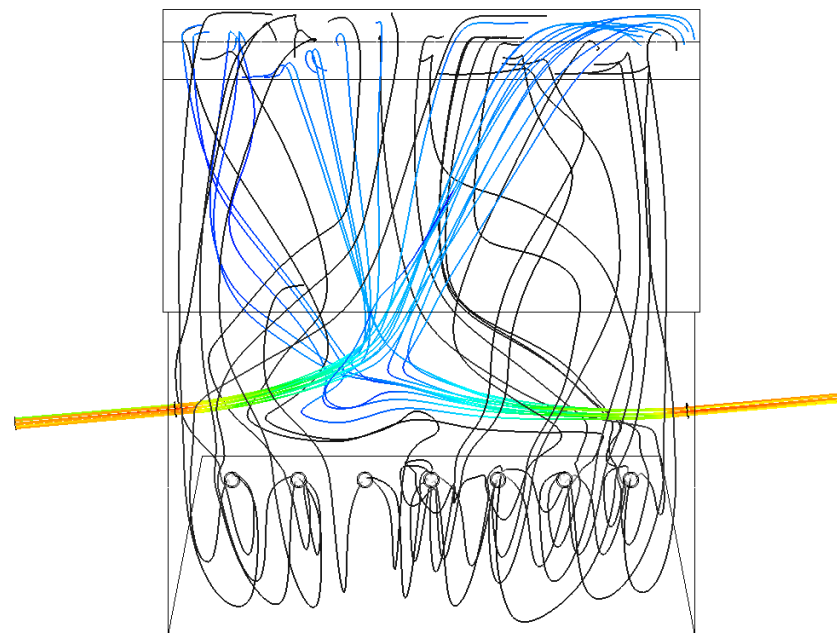
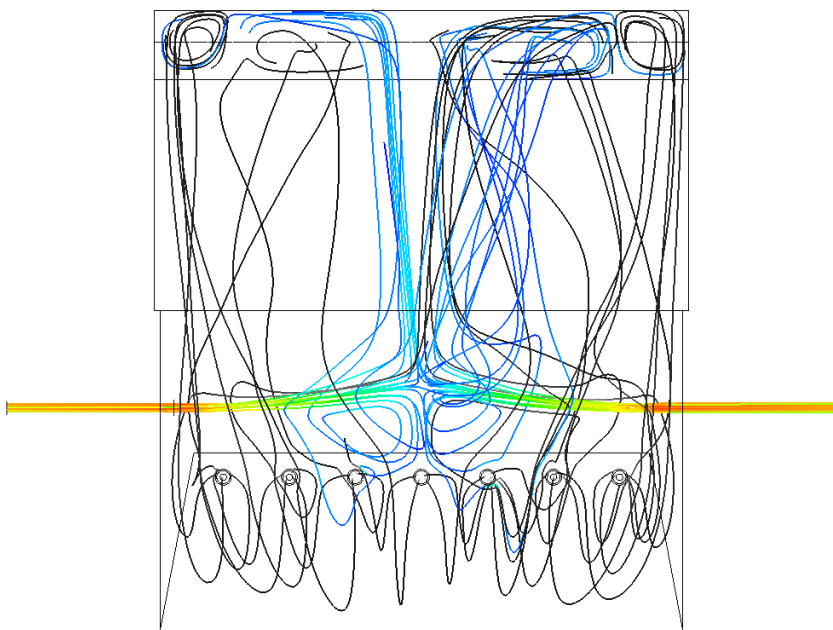
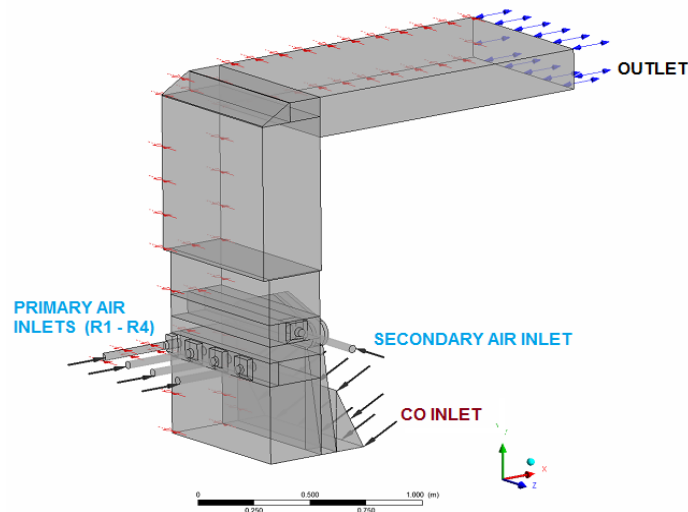
# Przykładowe wyniki – wkład kominkowy



Porównanie rozkładu płomienia podczas eksperymentu i symulacji dla różnych konfiguracji geometrycznych wsadu paliwa

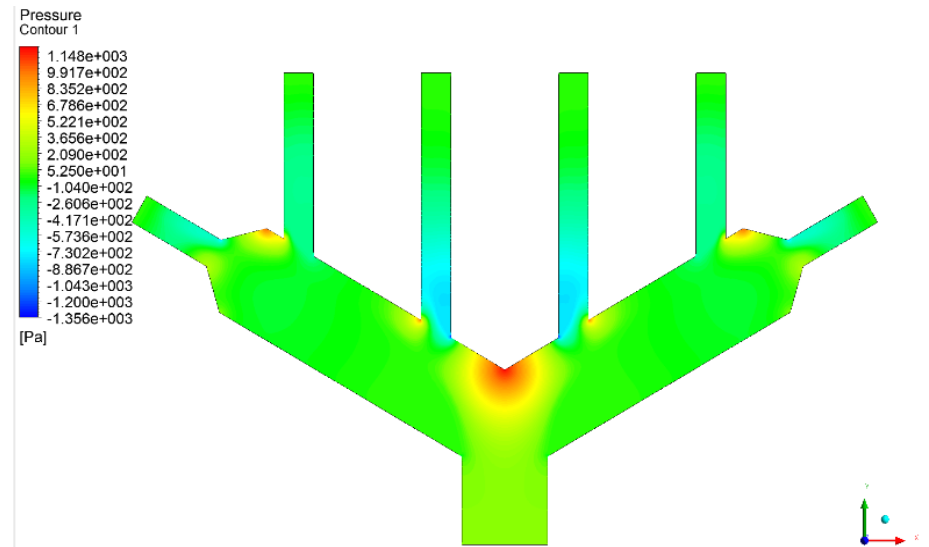
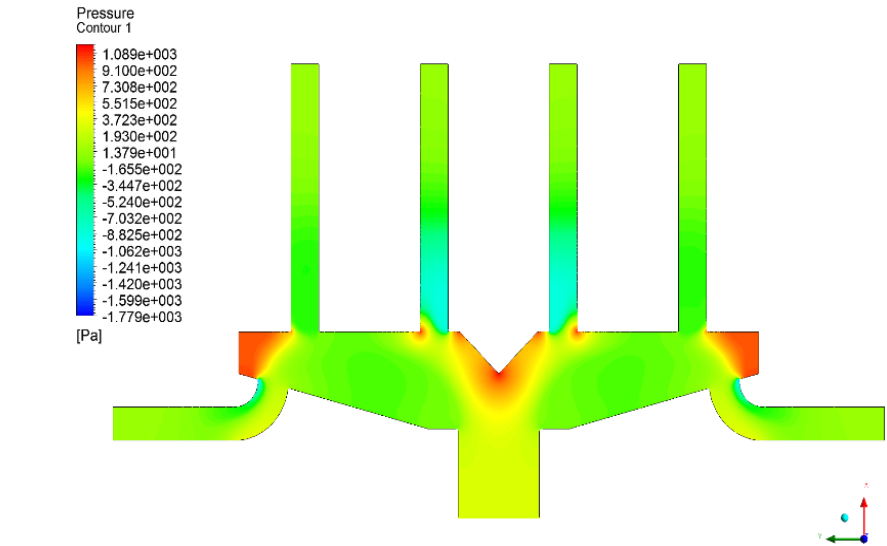
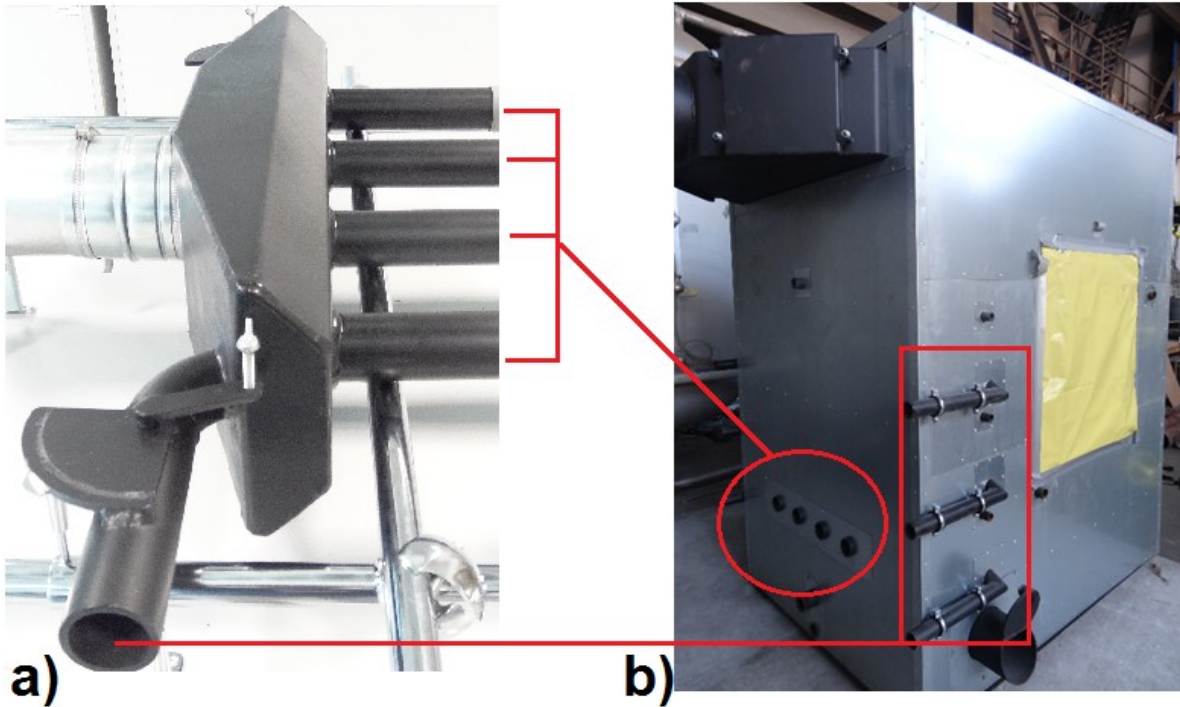


# Przykładowe wyniki – komora wtórna kotła na słomę

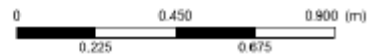
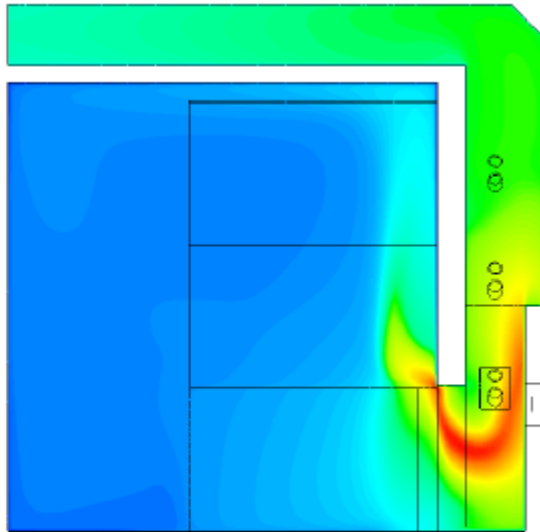
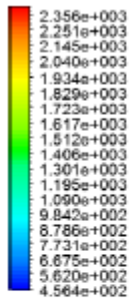


Linie przepływu powietrza dla dwóch rodzajów układu doprowadzania powietrza wtórnego

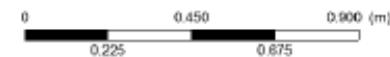
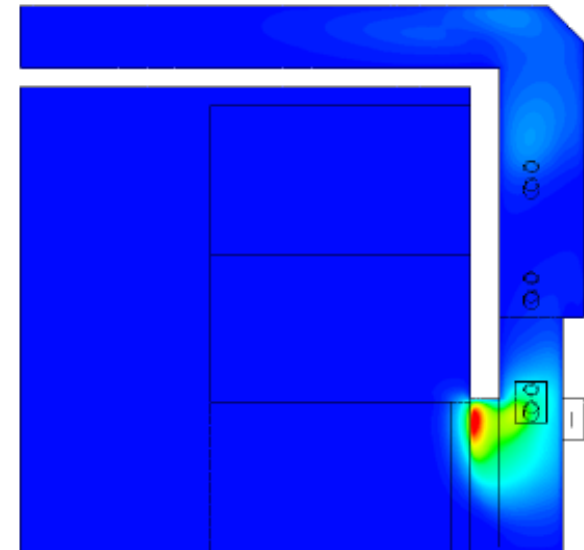
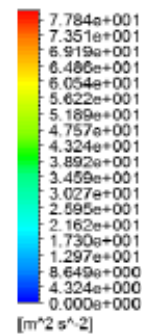
# Przykładowe wyniki – układ dystrybucji powietrza kotła na słomę



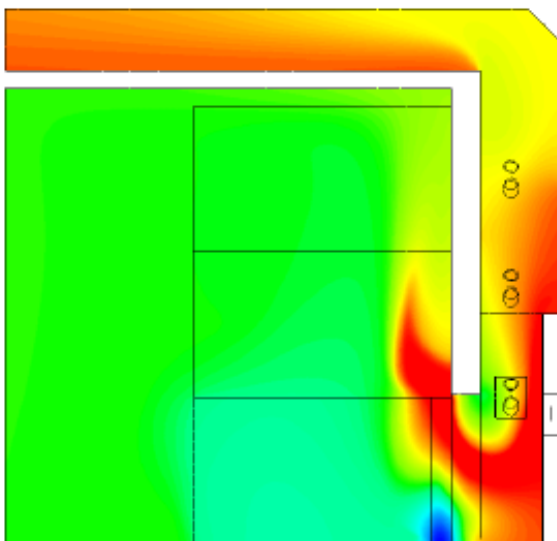
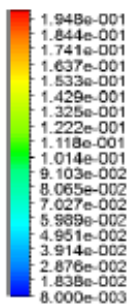
Temperature  
Contour 1



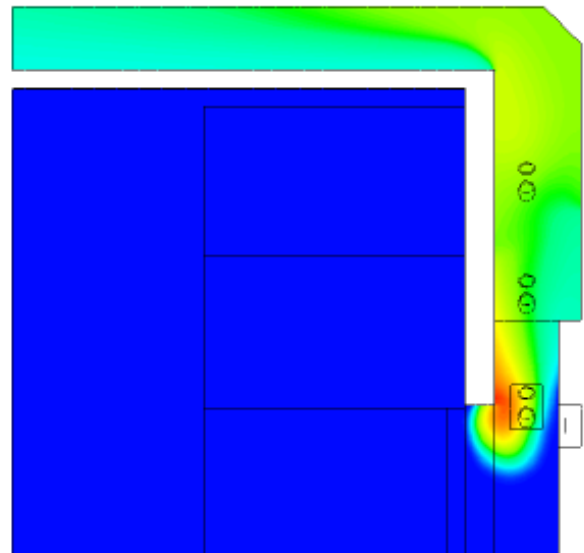
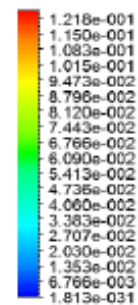
Turbulence Kinetic Energy  
Contour 1



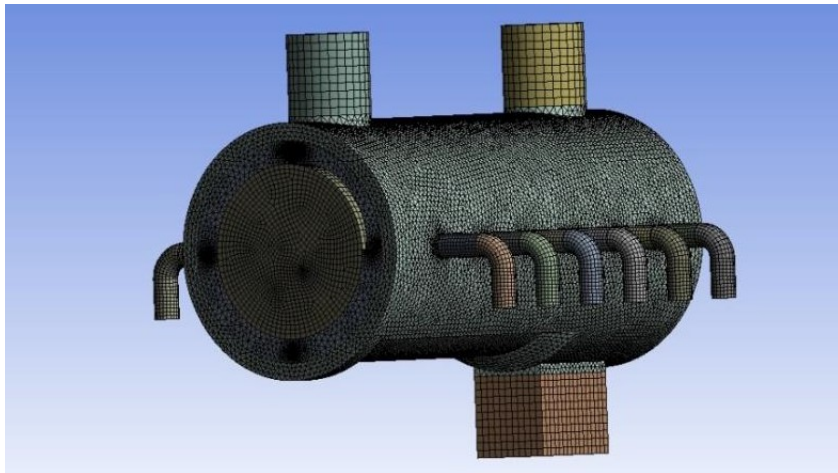
Co<sub>2</sub> Mass Fraction  
Contour 1



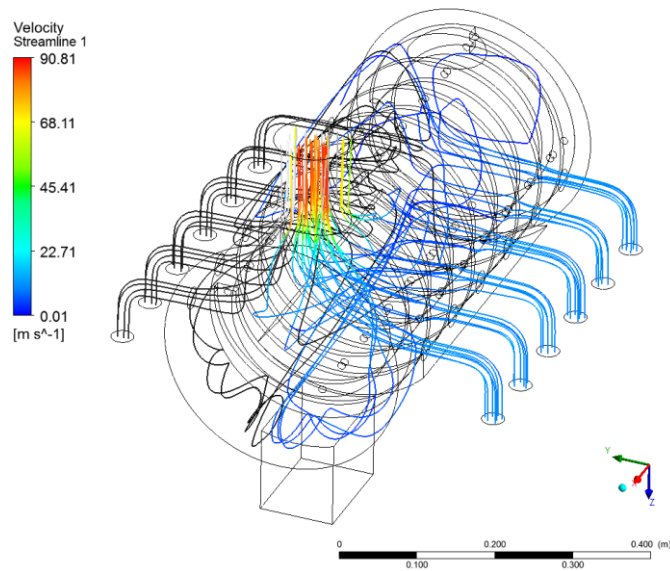
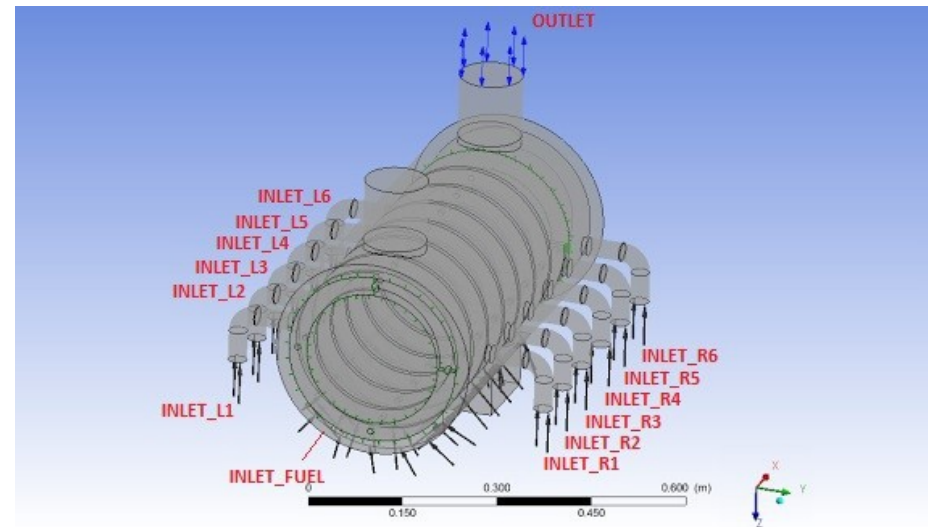
O<sub>2</sub> Mass Fraction  
Contour 1



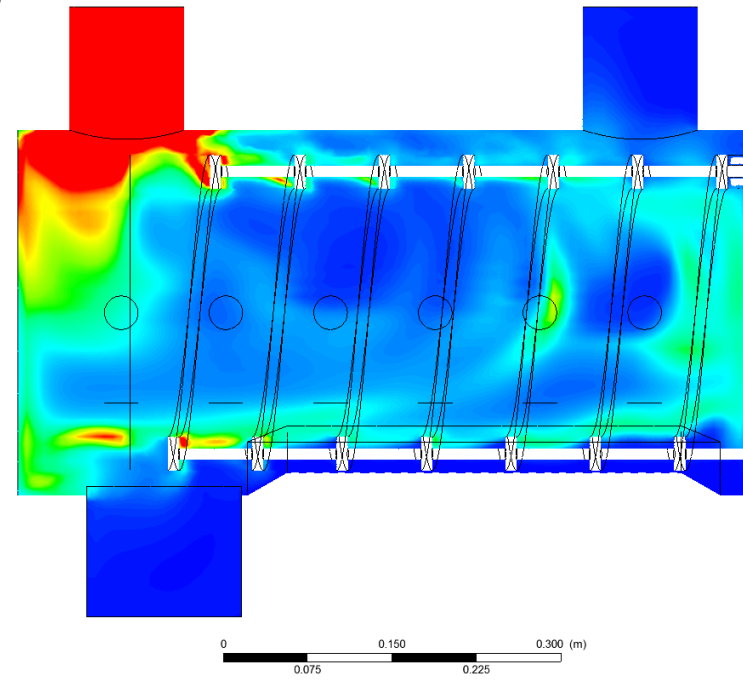
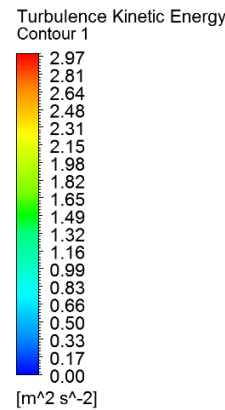
# Przykładowe wyniki – piec obrotowy



Siatka obliczeniowa



Linie przepływu powietrza

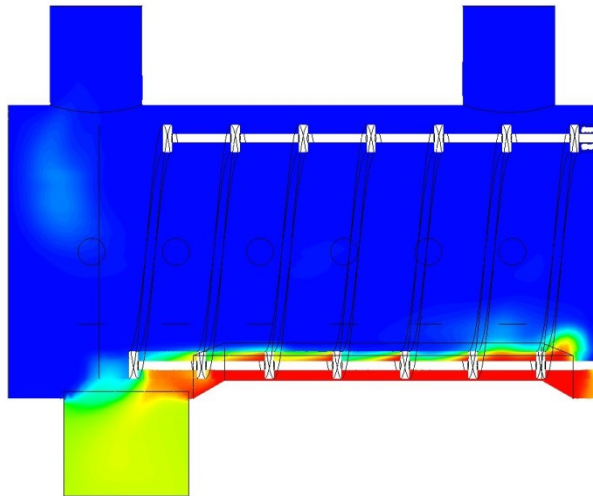
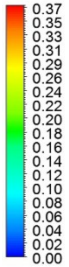


Energia kinetyczna turbulencji

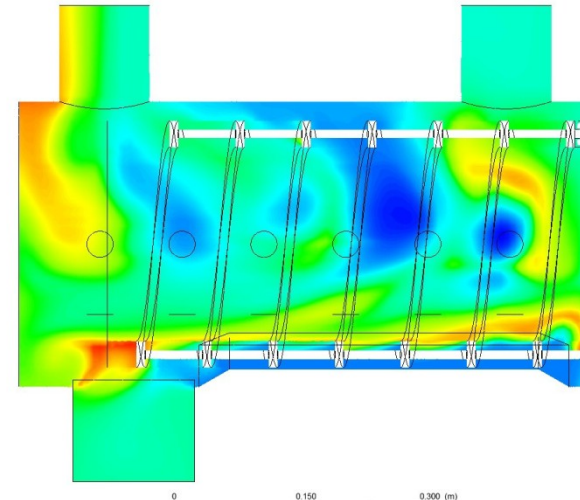
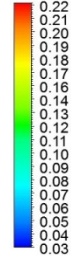


# Koncentracje składników gazowych

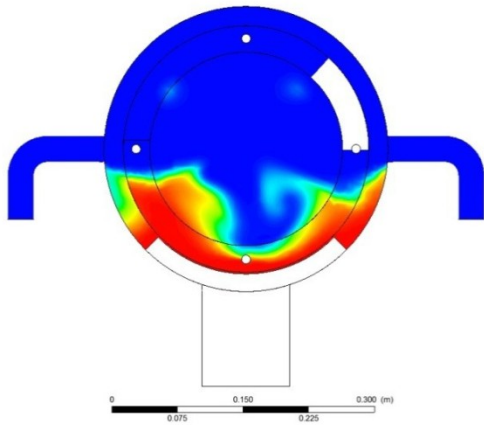
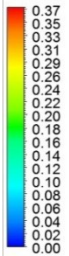
CO, Mass Fraction  
Contour 1



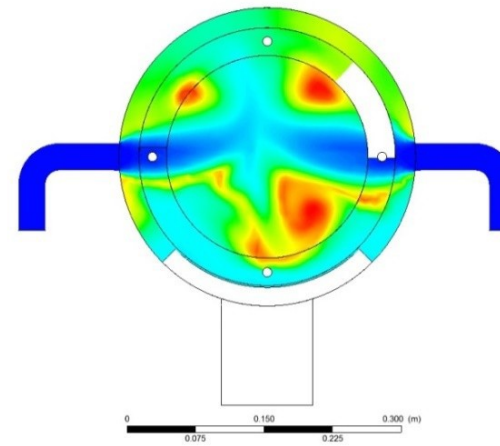
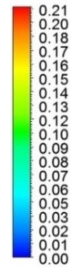
CO2, Mass Fraction  
Contour 1



CO, Mass Fraction  
Contour 1



CO2, Mass Fraction  
Contour 1



# Podsumowanie

- » Lepsze zrozumienie procesu spalania w różnych układach
- » Identyfikacja stref dobrego i złego spalania związanych z występowaniem/brakiem mieszania, turbulencjami, niewystarczającą temperaturą i inne
- » Wyznaczenie wielkości emisji składników gazowych i określenie metod ich redukcji
- » Optymalizacja konstrukcji elementów kotłów i procesu prowadzenia spalania
- » Wizualizacje procesów związanych ze spalaniem

Dziękuję za uwagę!

[filipow@agh.edu.pl](mailto:filipow@agh.edu.pl)