

UNIVERSITY OF WARMIA AND MAZURY IN OLSZTYN  
The Faculty of Technical Sciences  
POLAND, 10-957 Olsztyn, M. Oczapowskiego 11  
tel.: (48)(89) 5-23-32-40, fax: (48)(89) 5-23-32-55  
URL: <http://www.uwm.edu.pl/edu/sobieski/> (in Polish)



# TERMODYNAMIKA

## Wymiana ciepła

wersja: 17 grudnia 2024

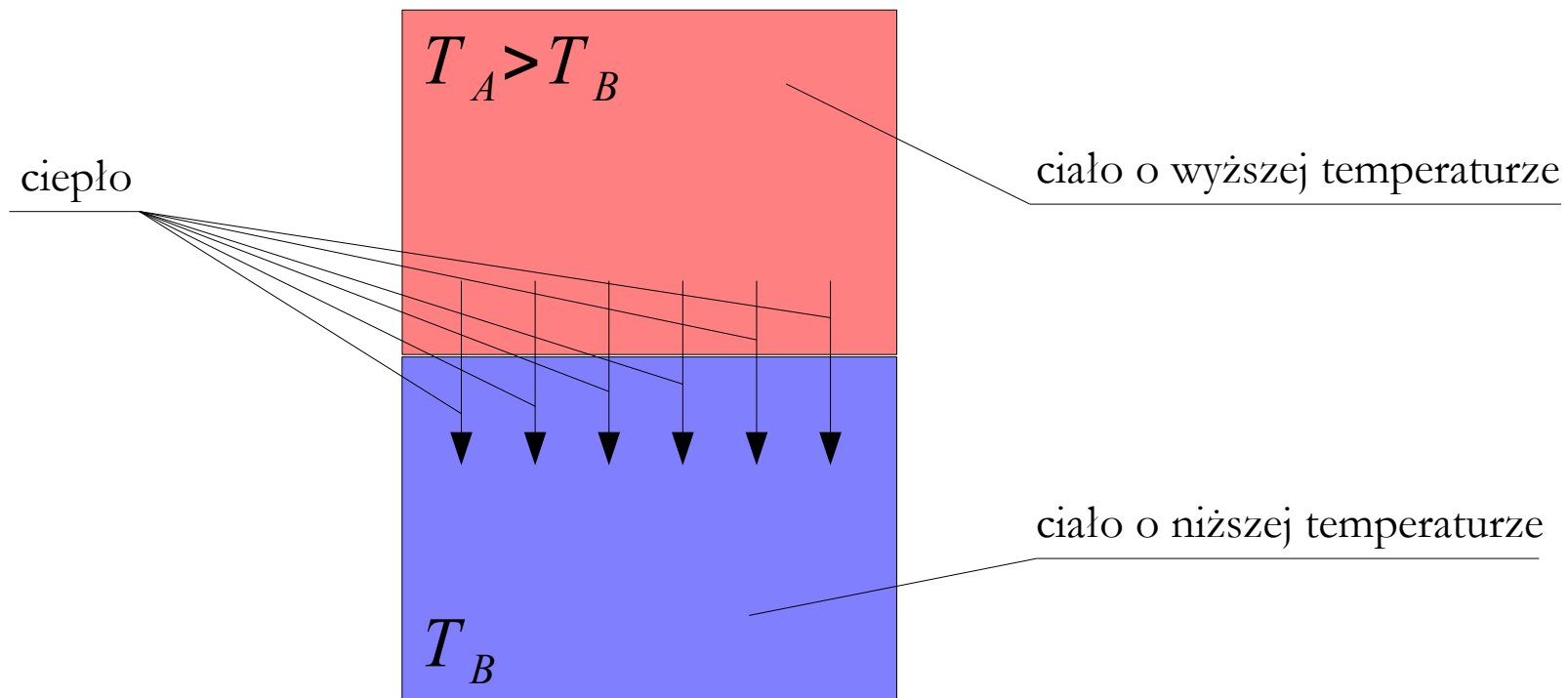
Wojciech Sobieski

Olsztyn, 2013-2024

# Ciepło

---

**Ciepło** (w kontekście wymiany energii) – strumień energii przepływający między obszarami o różnych temperaturach.



# Strumień ciepła

---

**Strumień ciepła** – ciepło przekazane z jednego ciała do drugiego w jednostce czasu.

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \quad \text{- wzór ogólny}$$

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \quad \text{- wzór dla przypadku ustalonego}$$

**Wat** – jednostka mocy lub strumienia energii w układzie SI (jednostka pochodna układu SI), oznaczana symbolem W.

$$[W] = \left[ \frac{J}{s} \right]$$

# Gęstość strumienia ciepła

---

**Gęstość strumienia ciepła** – stosunek strumienia ciepła do jednostki przestrzeni, dla której rozpatruje się przepływ. Rozróżnia się gęstość powierzchniową, objętościową i liniową.

$$q = \frac{\dot{Q}}{A} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$A$  - pole powierzchni, przez którą przepływa strumień ciepła

$$q = \frac{\dot{Q}}{V} \quad \left[ \frac{W}{m^3} \right]$$

$V$  - objętość, przez którą przepływa strumień ciepła

$$q = \frac{\dot{Q}}{L} \quad \left[ \frac{W}{m} \right]$$

$L$  - długość odcinka, wzdłuż którego przepływa strumień ciepła

# Sposoby przekazywania ciepła

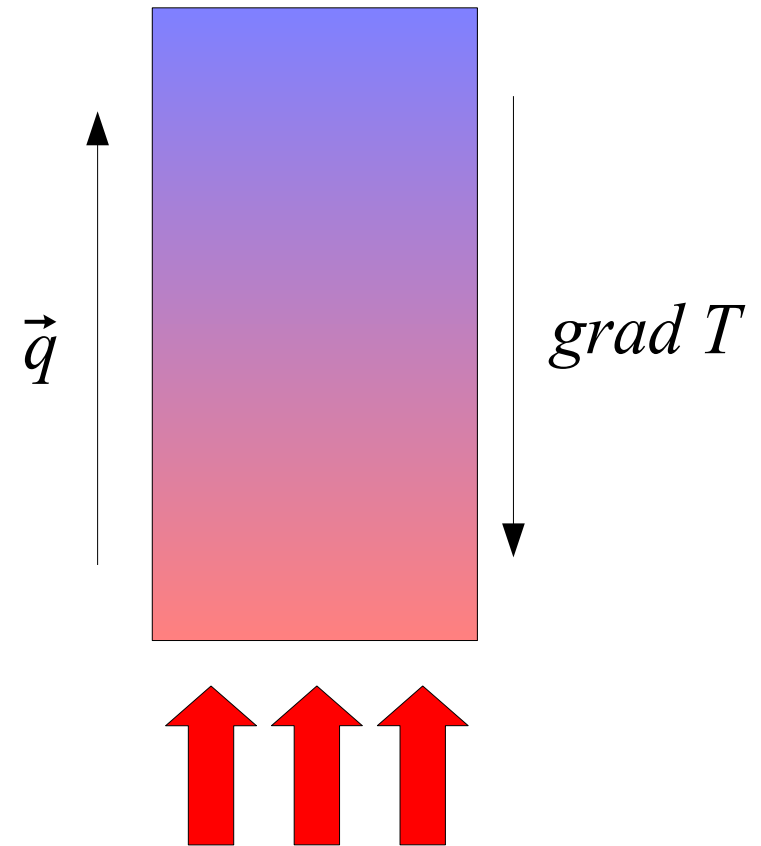
---

## Sposoby przekazywania ciepła:

- proste (gdy jest tylko jedno ciało):
  - przewodzenie
  - konwekcja (unoszenie)
  - promieniowanie
- złożone (gdy jest więcej niż jedno ciało):
  - przejmowanie (gdy jedno ciało oddaje ciepło a drugie pobiera)
  - przenikanie (gdy ciepło przenika przez jakąś przeszkodę, np. ścianę)

# Przewodzenie ciepła

**Przewodzenie ciepła** – przenoszenie energii wewnątrz ośrodka materialnego lub z jednego ośrodka do drugiego przy ich bezpośrednim zetknięciu, z miejsc o temperaturze wyższej do miejsc o temperaturze niższej, przy czym poszczególne cząstki materii nie wykazują większych zmian położenia. Przenoszenie energii odbywa się za pomocą fal sprężystych (w cieczech i dielektrycznych ciałach stałych), poprzez dyfuzję atomów i cząsteczek (w gazach i parach) lub poprzez dyfuzję luźnych elektronów (w przewodzących prąd ciałach stałych).



# Prawo Fouriera

---

**Prawo Fouriera** – prawo opisujące przewodzenie ciepła.

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] = \left[ \frac{W}{m \cdot K} \cdot \frac{K}{m} \right]$$

$q$  - gęstość strumienia ciepła (powierzchniowa)  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

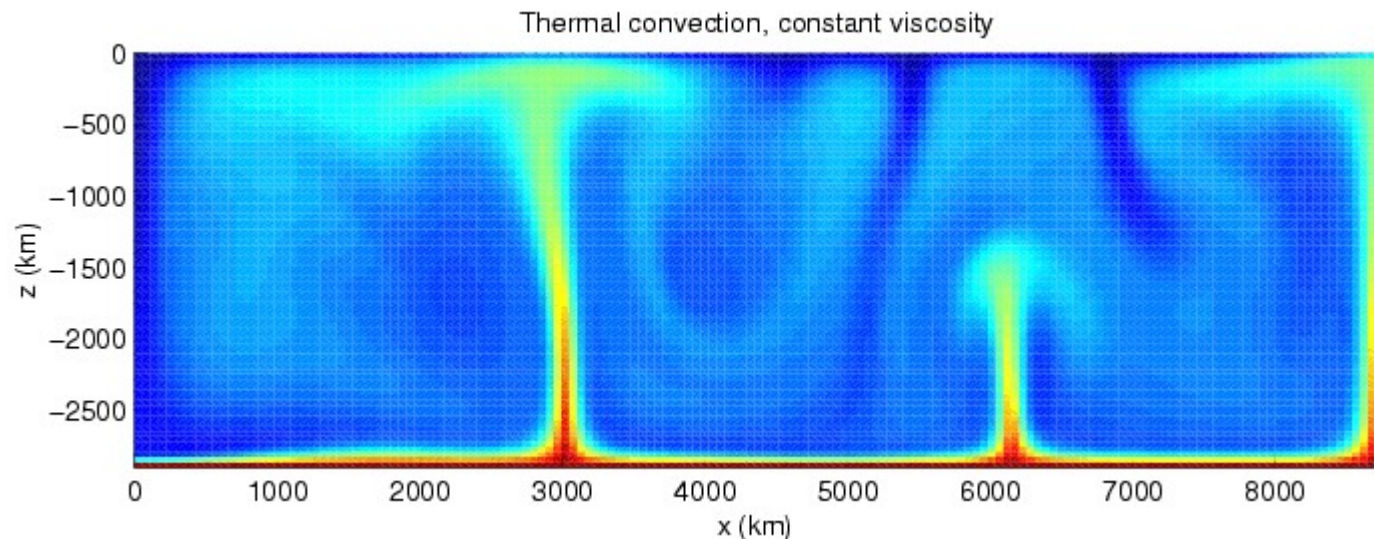
$\text{grad } T$  - „stromość” zmian temperatury  $\left[ \frac{K}{m} \right]$

$\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła  $\left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$

# Konwekcja

---

**Konwekcja** (unoszenie) – proces przekazywania ciepła związany z makroskopowym ruchem materii w gazie, cieczy bądź plazmie. Konwekcja występuje zawsze jednocześnie ze zjawiskiem przewodzenia. Czasami przez konwekcję rozumie się również sam ruch materii związany z różnicami temperatur (a właściwie gęstości), który prowadzi do przenoszenia ciepła. Ruch ten precyzyjniej nazywa się prądem konwekcyjnym.





# Konwekcja

---

## Rodzaje konwekcji:

- swobodna – ruch następuje wskutek różnic gęstości



# Konwekcja

## Rodzaje konwekcji:

- wymuszona – ruch występuje na skutek działania czynników napędzających (wentylatorów, pomp itp)



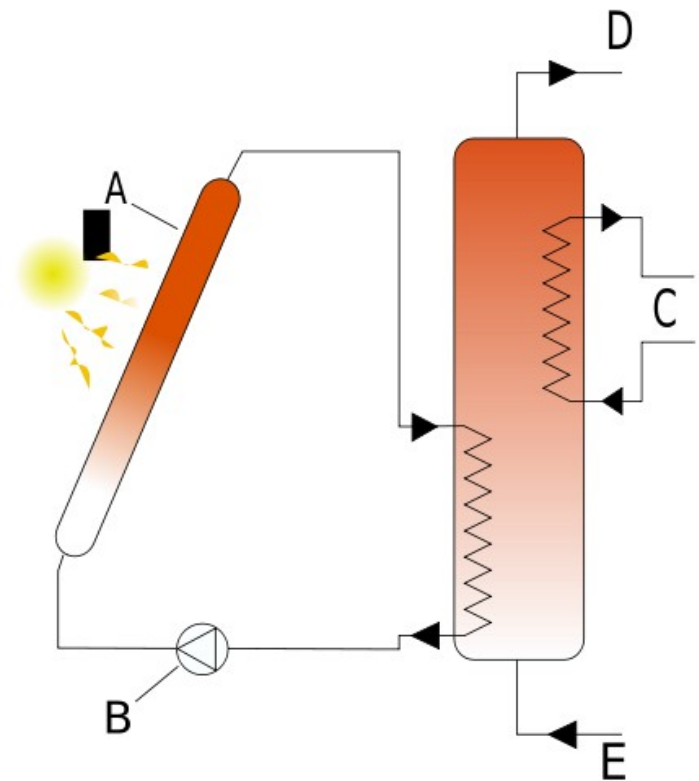
A - kolektor słoneczny

B - pompa

C - grzejnik pomocniczy

D - ciepła woda użytkowa

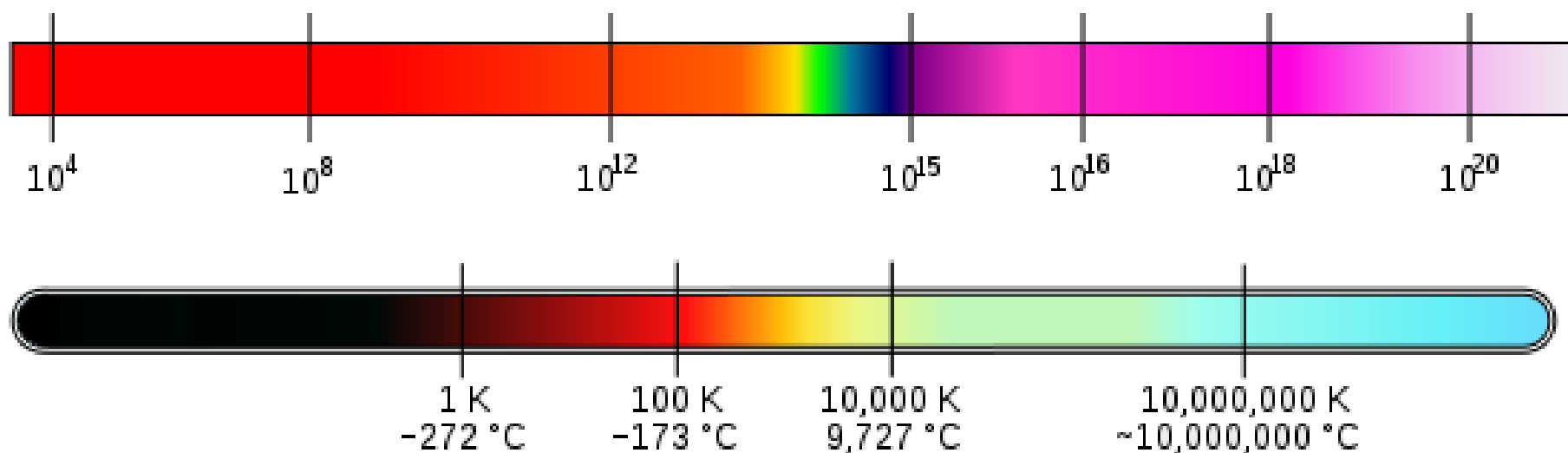
E - woda powrotna



# Promieniowanie

---

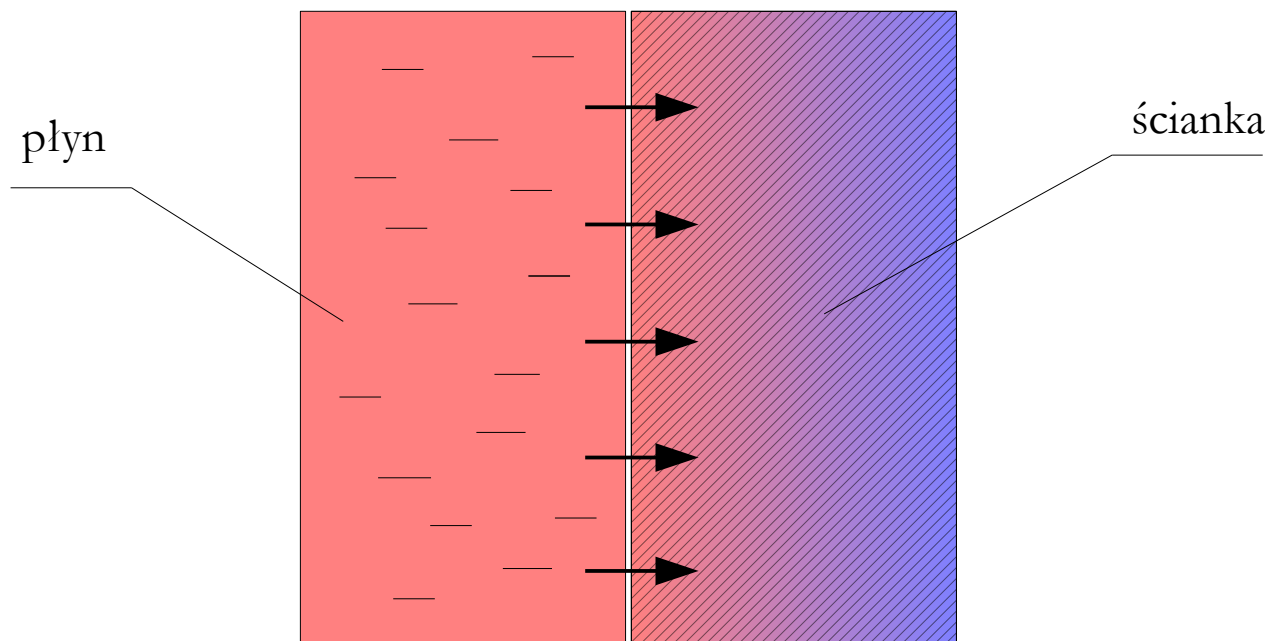
**Promieniowanie** – rozchodzenie się ciepła w postaci fal elektromagnetycznych. Fale takie wysyłane są przez wszystkie ciała, przy czym ilość wypromieniowanej energii zależy od rodzaju powierzchni oraz jej temperatury. Wpływ promieniowania zwiększa się w miarę wzrostu temperatury ciał.



# Przejmowanie ciepła

---

**Przejmowanie (wnikanie) ciepła** – złożona wymiana ciepła między ścianką a przepływającym obok strumieniem płynu. Przepływ ciepła w płynie odbywa się za pomocą konwekcji (oprócz cienkiej warstwy tuż przy ścianie, w której dominuje przewodzenie), w ścianie zaś za pośrednictwem przewodzenia.



# Przejmowanie ciepła

---

**Prawo stygnięcia Newtona** – prawo opisujące przejmowanie ciepła między ciałem a jego otoczeniem.

$$q = -\alpha \cdot \Delta T \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] = \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot K \right]$$

$q$  - gęstość strumienia ciepła (powierzchniowa)  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

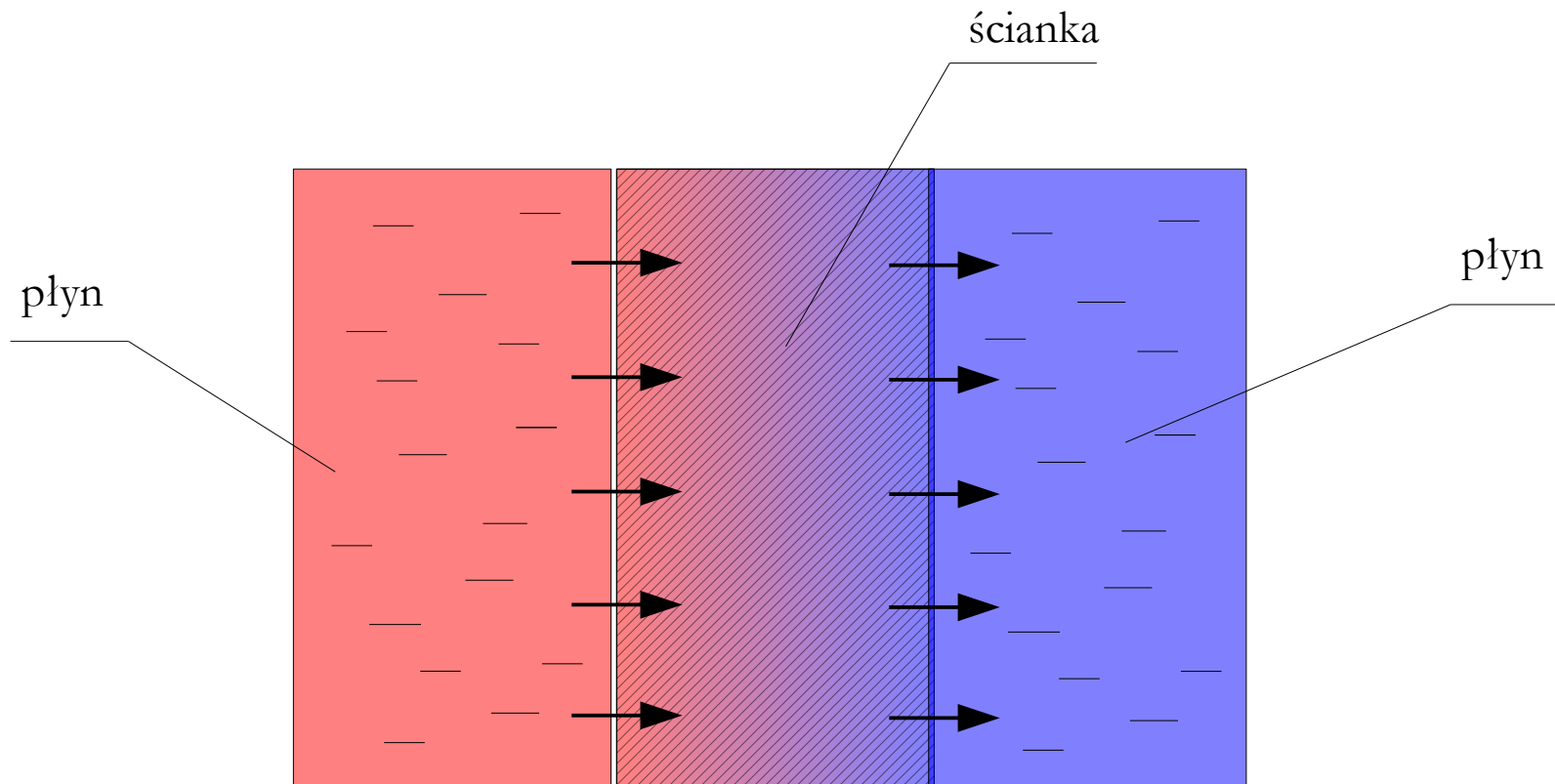
$\Delta T$  - różnica temperatur ciała i otoczenia  $[K]$

$\alpha$  - współczynnik przejmowania ciepła  $\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

# Przenikanie ciepła

---

**Przenikanie ciepła** – złożona wymiana ciepła między dwoma płynami rozdzielonymi ścianką. Na przenikanie składają się przewodzenie, konwekcja i promieniowanie.



# Przenikanie ciepła

---

Ogólny wzór opisujący przenikanie:

$$q = -k \cdot \Delta T \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] = \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot K \right]$$

$q$  - gęstość strumienia ciepła (powierzchniowa)  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

$\Delta T$  - różnica temperatur płynów po obu stronach ścianki  $[K]$

$k$  - współczynnik przenikania ciepła  $\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

# Charakterystyczne współczynniki

---

Przewodzenie ciepła (prawo Fouriera):

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } T$$

$\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła  
(stała materiałowa – z tablic)

$$\left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$$

Przejmowanie ciepła (prawo stygnięcia Newtona):

$$q = -\alpha \cdot \Delta T$$

$\alpha$  - współczynnik przejmowania ciepła  
(wartość zależna od materiału ścianki  
i warunków ruchu płynu – z eksperymentu)

$$\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Przenikanie ciepła (wzór ogólny):

$$q = -k \cdot \Delta T$$

$k$  - współczynnik przenikania ciepła  
(wartość zależna od materiału ścianki  
i warunków ruchu płynu – z eksperymentu)

$$\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$



# Opór termiczny

**Opór termiczny** – stosunek różnicy temperatur panujących po obu stronach ścianki rozdzielającej dwa płyny, do gęstości przepływającego przez ściankę strumienia ciepła. Wartość oporu termicznego jest tym większa im ścianka jest grubsza i im gorzej przewodzi ciepło.

$$R = \frac{\Delta T}{q} = \frac{\delta}{\lambda} \quad \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right] \quad \longrightarrow \quad q = \Delta T \cdot \frac{\lambda}{\delta}$$

$\Delta T$  - różnica temperatur panująca po obu stronach ścianki  $[K]$

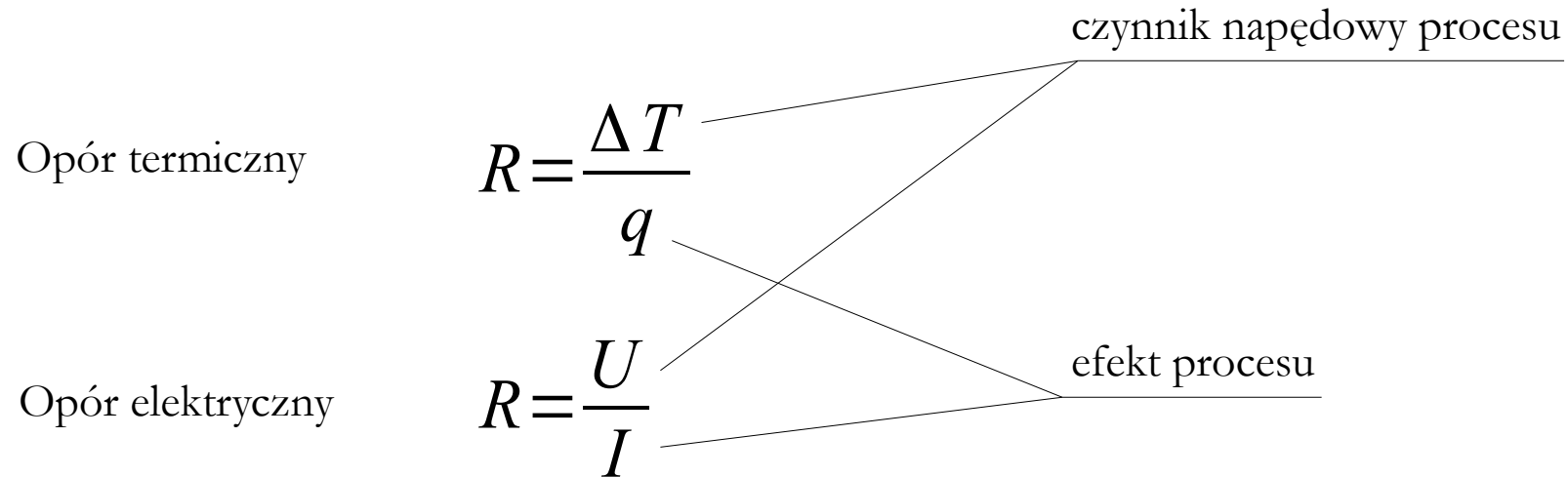
$q$  - gęstość strumienia ciepła (powierzchniowa)  $[W / m^2]$

$\delta$  - grubość ścianki  $[m]$

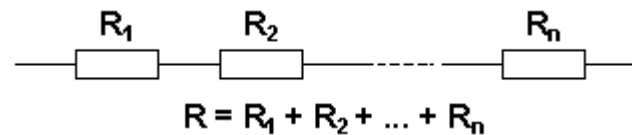
$\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła  $[W / (m \cdot K)]$

wzór na gęstość strumienia ciepła (podczas przewodzenia) wykorzystujący koncepcję oporu termicznego

# Opór termiczny – analogia elektryczna



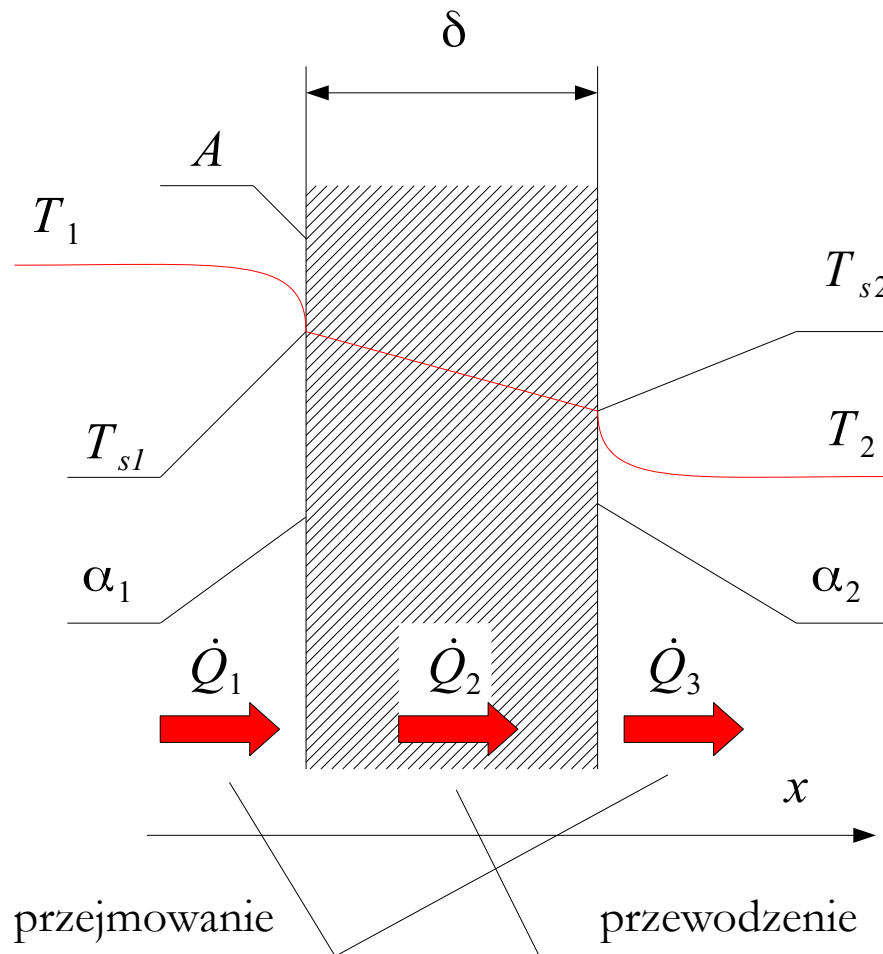
$$R = \frac{\Delta T}{q} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$$



Opór termiczny dla ścianek n-warstwowych  
– wzór jest analogią oporu grupy rezystorów połączonych szeregowo

# Ścianka płaska jednowarstwowa

Ustalone przenikanie ciepła przez jednowarstwową ściankę płaską.

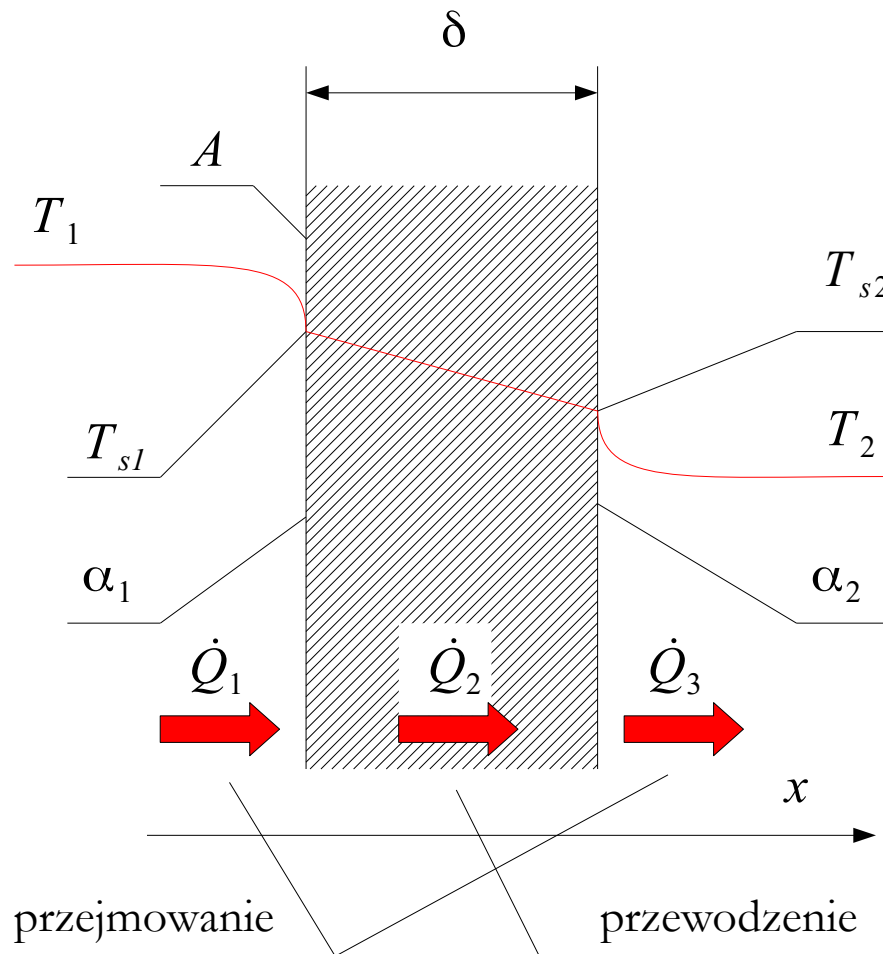


Założenia:

- temperatury po obu stronach ścianki są stałe
- układ znajduje się w stanie równowagi (stan ustalony)
- ścianka ma małą grubość w porównaniu z powierzchnią
- brzozy ścianki są do siebie równoległe
- ścianka jest jednorodna

# Ścianka płaska jednowarstwowa

Ustalone przenikanie ciepła przez jednowarstwową ściankę płaską.



$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3 = \dot{Q}$$

$$\dot{Q}_1 = q \cdot A = \alpha_1 \cdot (T_1 - T_{s1}) \cdot A$$

$$\dot{Q}_2 = q \cdot A = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (T_{s1} - T_{s2}) \cdot A$$

$$\dot{Q}_3 = q \cdot A = \alpha_2 \cdot (T_{s2} - T_2) \cdot A$$

# Ścianka płaska jednowarstwowa

---

$$1) \quad q \cdot A = \alpha_1 \cdot (T_1 - T_{s1}) \cdot A \quad \longrightarrow \quad T_{s1} = T_1 - \frac{q}{\alpha_1}$$

$$3) \quad q \cdot A = \alpha_2 \cdot (T_{s2} - T_2) \cdot A \quad \longrightarrow \quad T_{s2} = T_2 + \frac{q}{\alpha_2}$$

$$2) \quad q \cdot A = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (T_{s1} - T_{s2}) \cdot A \quad \longleftarrow$$

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \left( T_1 - \frac{q}{\alpha_1} - T_2 - \frac{q}{\alpha_2} \right)$$

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot (T_1 - T_2)$$

# Ścianka płaska jednowarstwowa

---

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot (T_1 - T_2)$$

$$q = k \cdot (T_1 - T_2)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Strumień ciepła:

$$\dot{Q} = q \cdot A$$

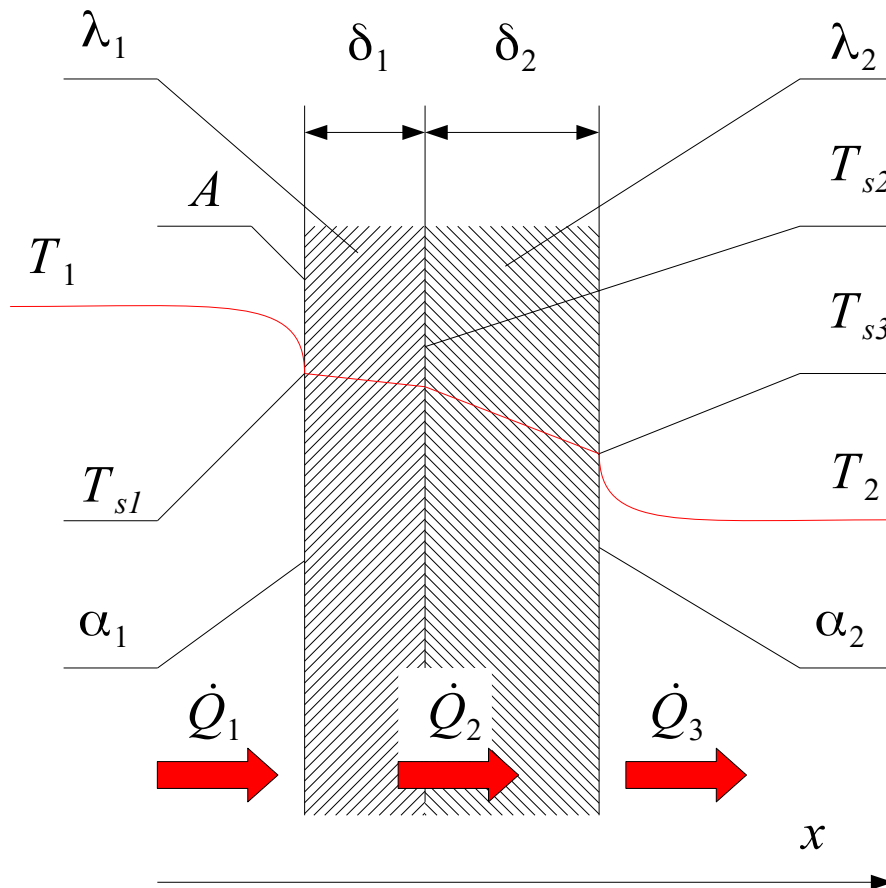
$$\dot{Q} = k \cdot (T_1 - T_2) \cdot A$$

- wzór Pecleta

k – współczynnik przenikania ciepła

# Ścianka płaska wielowarstwowa

Ustalone przenikanie ciepła przez wielowarstwową ściankę płaską.



$$\dot{Q} = k \cdot (T_1 - T_2) \cdot A$$

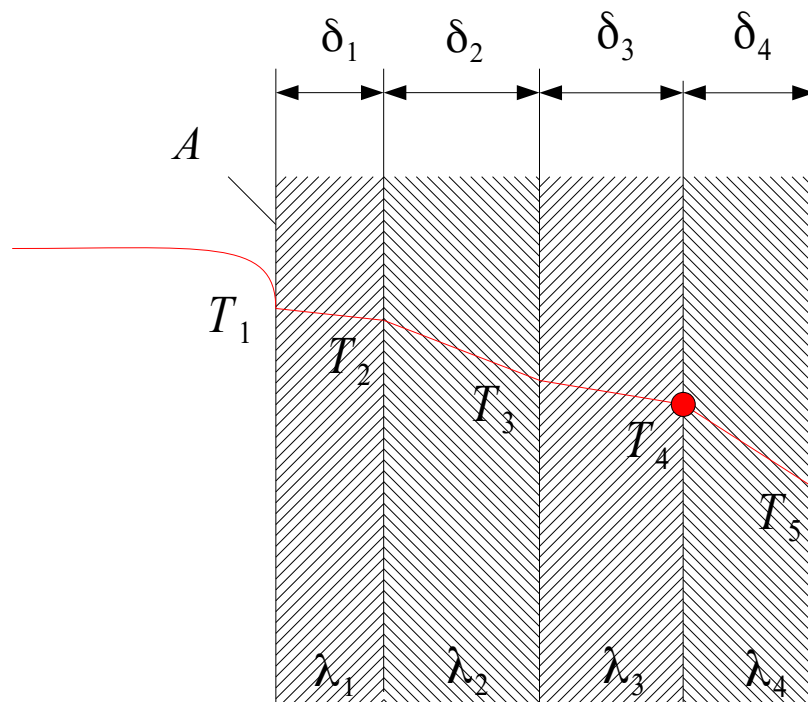
$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Różnica jest tylko w wartości oporu termicznego

# Ścianka płaska wielowarstwowa

Obliczanie wartości temperatur w środku ścianki:

1. obliczenie gęstości strumienia ciepła (temperatury graniczne są zazwyczaj znane)
2. ponowne wykorzystanie wzoru, dla ścianki granicznej (pierwszej lub ostatniej)
3. powtarzanie punktu 2, jeśli zachodzi konieczność



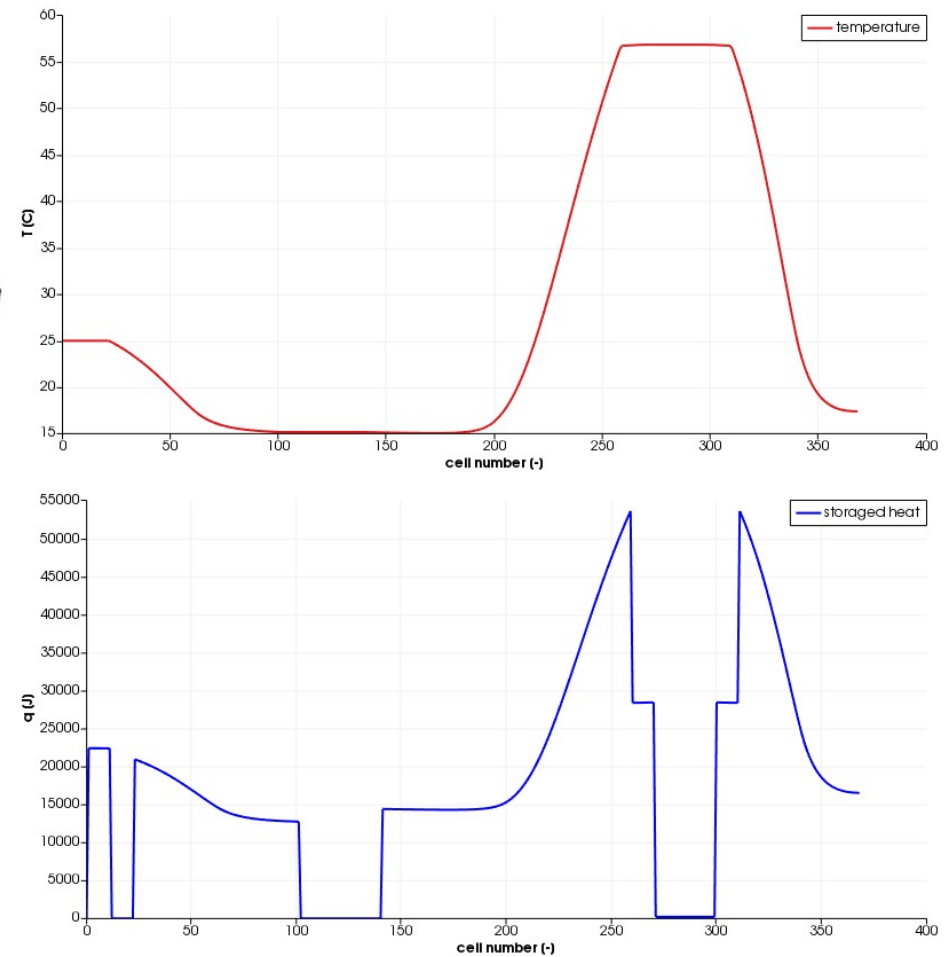
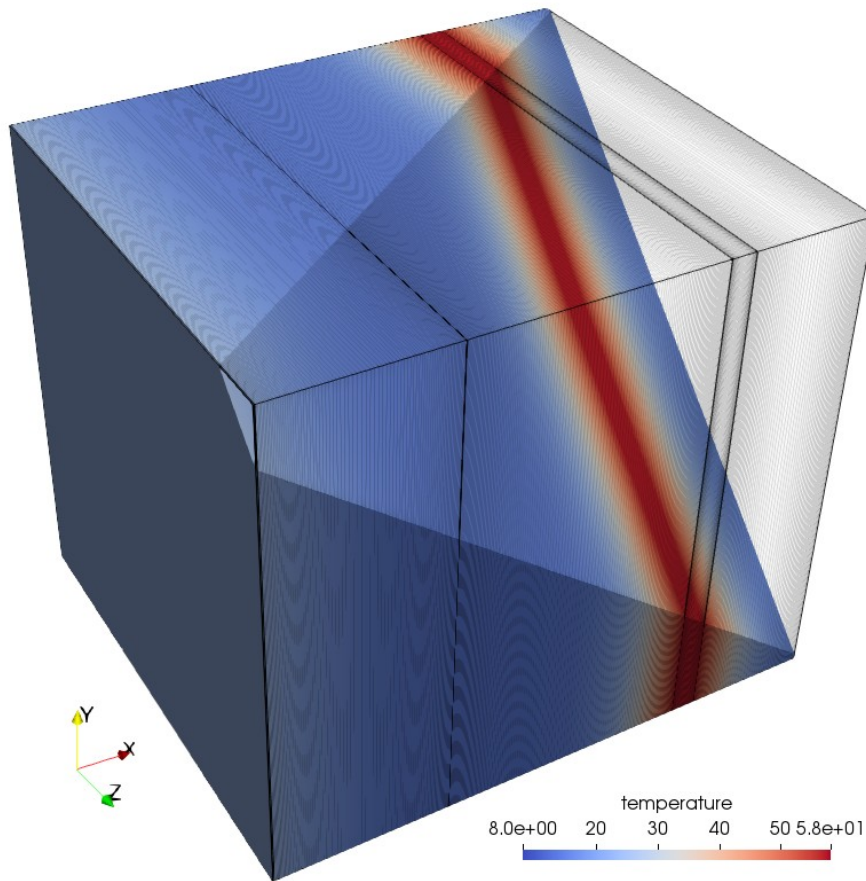
$$q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_5 - T_1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4}}$$

$$q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_5 - T_4}{\frac{\delta_4}{\lambda_4}}$$



# Ścianka płaska wielowarstwowa

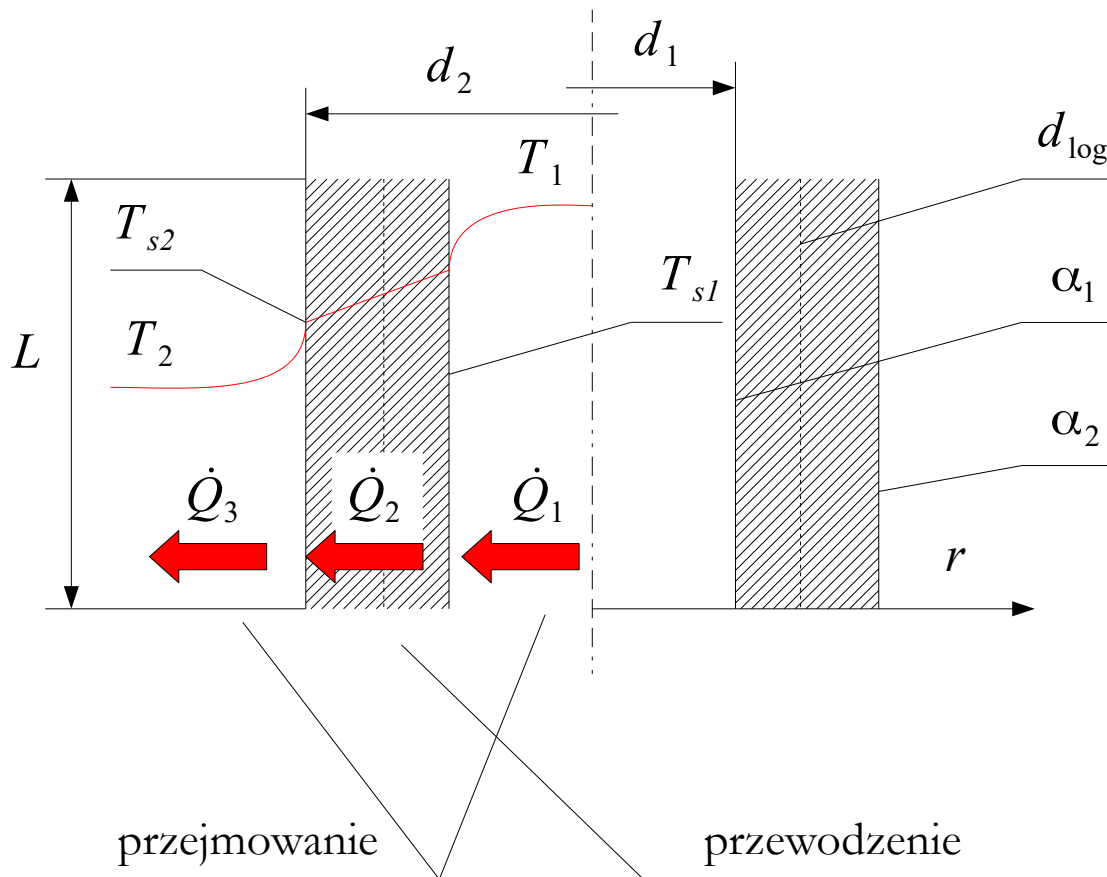
Model of a heat storage



Autorski program do modelowania przepływu ciepła przez wielowarstwową ściankę płaską Metodą Objętości Skończonych.

# Ścianka cylindryczna jednowarstwowa

Ustalone przenikanie ciepła przez jednowarstwową ściankę cylindryczną.

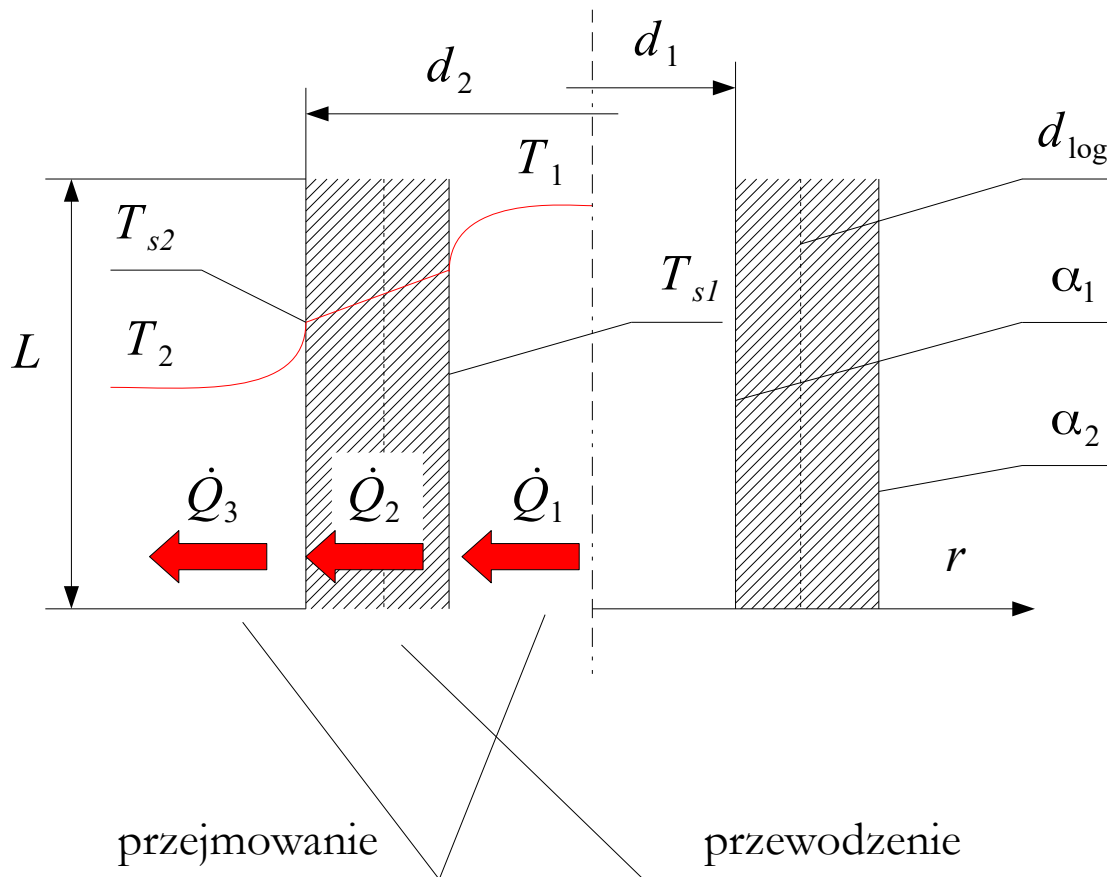


Założenia:

- temperatury po obu stronach ścianki są stałe
- układ znajduje się w stanie równowagi (stan ustalony)
- ścianka ma małą grubość w porównaniu z powierzchnią
- powierzchnie ścianek są współosiowe
- ścianka jest jednorodna
- do rozważań brana jest pod uwagę ścianka o jednostkowej długości  $L = 1$  [m] (wysokość części cylindrycznej)

# Ścianka cylindryczna jednowarstwowa

Ustalone przenikanie ciepła przez jednowarstwową ściankę cylindryczną.



$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3 = \dot{Q}$$

$$\dot{Q}_1 = q \cdot A = \alpha_1 \cdot (T_1 - T_{s1}) \cdot \pi \cdot d_1 \cdot L$$

$$\dot{Q}_2 = q \cdot A = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (T_{s1} - T_{s2}) \cdot A$$

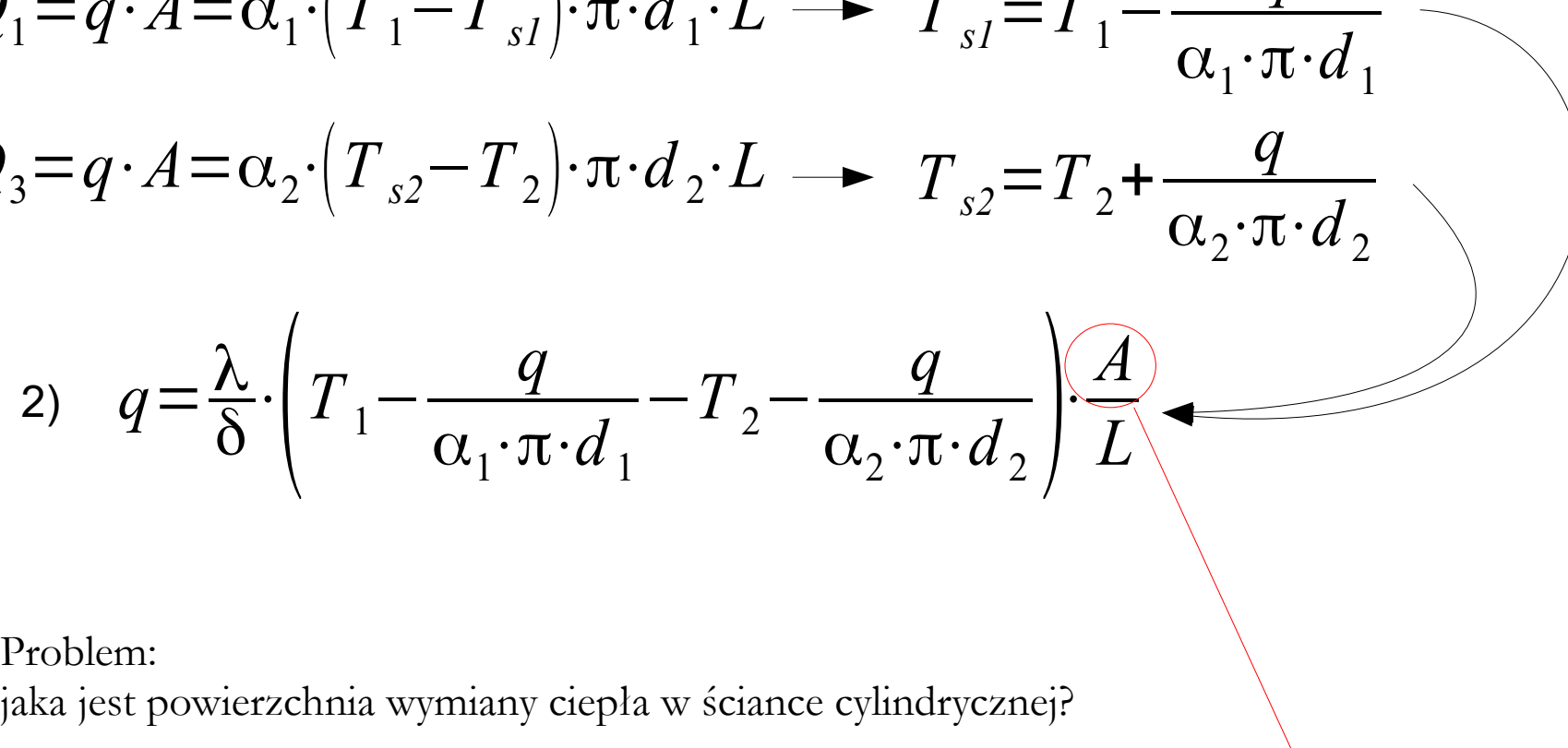
$$\dot{Q}_3 = q \cdot A = \alpha_2 \cdot (T_{s2} - T_2) \cdot \pi \cdot d_2 \cdot L$$

# Ścianka cylindryczna jednowarstwowa

---

$$1) \quad \dot{Q}_1 = q \cdot A = \alpha_1 \cdot (T_1 - T_{s1}) \cdot \pi \cdot d_1 \cdot L \rightarrow T_{s1} = T_1 - \frac{q}{\alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1}$$

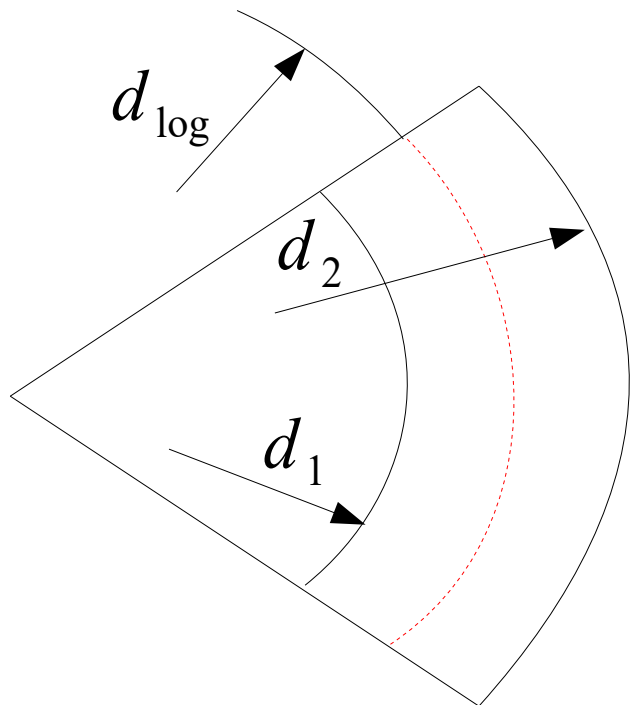
$$3) \quad \dot{Q}_3 = q \cdot A = \alpha_2 \cdot (T_{s2} - T_2) \cdot \pi \cdot d_2 \cdot L \rightarrow T_{s2} = T_2 + \frac{q}{\alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2}$$

$$2) \quad q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \left( T_1 - \frac{q}{\alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1} - T_2 - \frac{q}{\alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2} \right) \cdot \frac{A}{L}$$


Problem:

jaka jest powierzchnia wymiany ciepła w ścianie cylindrycznej?

# Ścianka cylindryczna jednowarstwowa



$$A = d_{\log} \cdot \pi \cdot L = \frac{d_2 - d_1}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot \pi \cdot L = \frac{2\delta}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot \pi \cdot L$$

$d_{\log}$  - średnica (średnia) logarytmiczna

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \left( T_1 - \frac{q}{\alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1} - T_2 - \frac{q}{\alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2} \right) \cdot \frac{2 \cdot \delta \cdot \pi}{\ln \frac{d_2}{d_1}}$$

$$\frac{q}{2 \cdot \lambda \cdot \pi} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{q}{\alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1} + \frac{q}{\alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2} = (T_1 - T_2)$$

$$q \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot \lambda \cdot \pi} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2} \right) = (T_1 - T_2)$$

$$d_{\log} = \frac{d_2 - d_1}{\ln \frac{d_2}{d_1}}$$

# Ścianka cylindryczna jednowarstwowa

---

$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda \cdot \pi} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2}} = k \cdot (T_1 - T_2)$$

Strumień ciepła:

$$\dot{Q} = q \cdot L$$

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}}$$

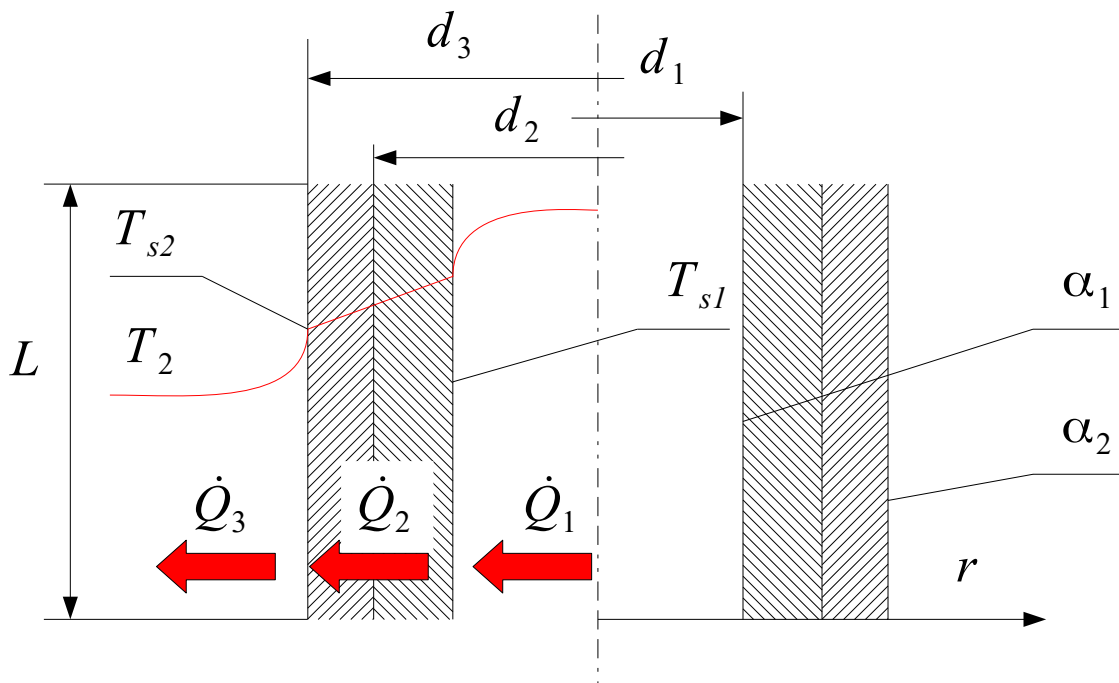
$$\dot{Q} = k \cdot (T_1 - T_2) \cdot L$$

- wzór Pecleta

k – współczynnik przenikania ciepła

# Ścianka cylindryczna wielowarstwowa

Ustalone przenikanie ciepła przez wielowarstwową ściankę cylindryczną.



$$\dot{Q} = k \cdot (T_1 - T_2) \cdot L$$

Różnica jest tylko w wartości oporu termicznego

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_{n+1}}}$$

# Liczby podobieństwa (kryterialne)

---

**Liczba podobieństwa** (liczba kryterialna) – bezwymiarowa wielkość pozwalająca na porównywanie wybranych cech różnych układów fizycznych.



model („Albacore”)



obiekt rzeczywisty („Albacore”)



# Liczba Reynoldsa

---

**Liczba Reynoldsa** – stosunek sił czynnych (sił bezwładności) do sił biernych związanych z tarciem wewnętrznym w płynie przejawiającym się w postaci lepkości.

$$Re = \frac{c \cdot l}{\nu}$$

$c$  - średnia prędkość przepływu [m/s]

$l$  - wymiar charakterystyczny [m]

$$Re = \frac{\rho \cdot c \cdot l}{\mu}$$

$\nu$  - kinematyczny współczynnik lepkości [m<sup>2</sup>/s]

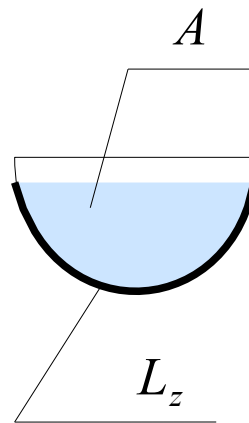
$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Dla przewodów kołowych:

$$l = d$$

Dla pozostałych przewodów:

$$l = 4 \cdot r_h$$



$$r_h = \frac{A}{L_z}$$

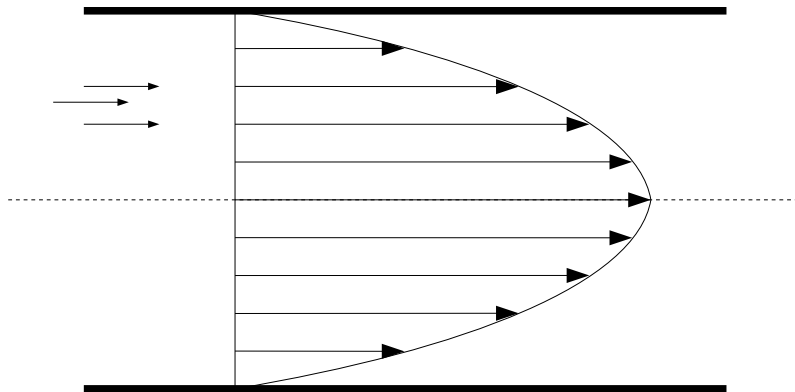
$r_h$  - promień hydrauliczny [m]

$A$  - przekrój strumienia płynu [m<sup>2</sup>]

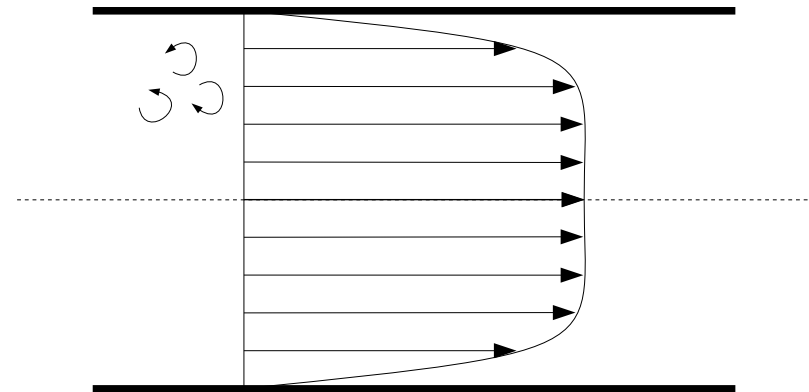
$L_z$  - obwód zwilżony [m]

# Krytyczne wartości liczby Reynoldsa

profil laminarny



profil turbulentny



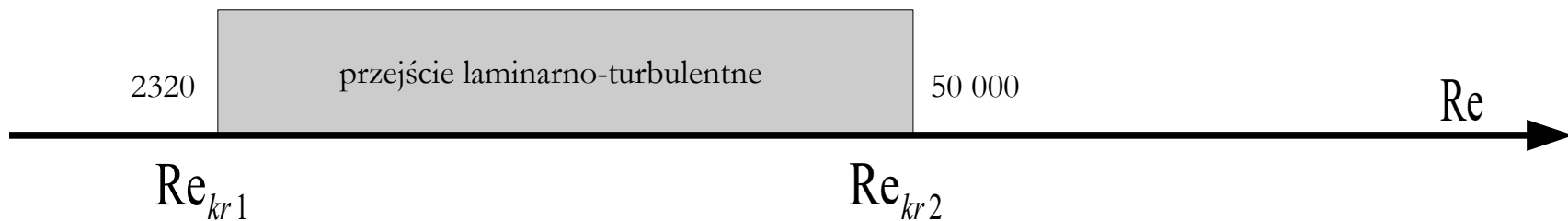
$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu}$$

$$Re_{kr1} < 2320$$

- przepływ laminarny

$$Re_{kr1} > 2320$$

- przepływ turbulentny



# Liczba Prandtla

---

**Liczba Prandtla** – jest to bezwymiarowe kryterium opisujące stosunek dyfuzji pędu do dyfuzji ciepła. Określa, który z procesów – transport ciepła czy transport pędu – dominuje w danym przepływie.

$$\text{Pr} = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda}$$

$c_p$  - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)]

$\mu$  - lepkość dynamiczna [Pa s]

$\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)]

- Mała liczba Prandtla ( $\text{Pr} \ll 1$ ) – oznacza, że dyfuzja ciepła (przewodzenie ciepłe) jest znacznie szybsza niż dyfuzja pędu. Jest to typowe dla gazów o wysokim przewodnictwie cieplnym, gdzie transport ciepła dominuje nad wpływem lepkości.
- Duża liczba Prandtla ( $\text{Pr} \gg 1$ ) – wskazuje, że dyfuzja pędu (lepkość) jest znacznie szybsza niż dyfuzja ciepła. Jest to charakterystyczne dla cieczy o niskim przewodnictwie cieplnym, takich jak oleje, gdzie ciepło rozprzestrzenia się stosunkowo wolno w porównaniu do przenoszenia pędu.

# Liczba Nusselta

---

**Liczba Nusselta** – jest to bezwymiarowe kryterium opisujące stosunek strumienia ciepła przenoszonego przez konwekcję do strumienia ciepła przenoszonego przez przewodzenie cieplne w płynie.

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$$

$\alpha$  - współczynnik wnikania ciepła [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$l$  - charakterystyczny wymiar liniowy [m]

$\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)]

- Mała liczba Nusselta ( $\text{Nu} \approx 1$ ) – wskazuje, że transport ciepła odbywa się głównie przez przewodzenie (sytuacja zbliżona do braku ruchu płynu lub bardzo słabej konwekcji).
- Duża liczba Nusselta ( $\text{Nu} \gg 1$ ) – oznacza, że konwekcja znacząco zwiększa transport ciepła, co prowadzi do bardziej efektywnej wymiany ciepła.

# Obliczanie współczynnika wnikania ciepła

---

W obliczeniach wymienników ciepła często wykorzystuje się funkcje między podstawowymi liczbami kryterialnymi:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr})$$

1) obliczamy liczbę Reynoldsa:  $\text{Re} = \frac{c \cdot l}{\nu}$

2) obliczamy liczbę Prandtla:  $\text{Pr} = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda}$

3) obliczamy liczbę Nusselta (na podstawie funkcji charakterystycznej dla danego typu układu):

$$\text{Nu} = 0.023 \cdot \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{1/3}$$

4) z liczby Nusselta obliczamy współczynnik przejmowania ciepła:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \longrightarrow \alpha = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda}{l}$$

# Wymienniki ciepła

---

**Wymiennik ciepła** – urządzenie służące do wymiany energii cieplnej pomiędzy dwoma czynnikami.

Podział wymienników:

- zasada działania: przeponowe, bezprzeponowe, regeneratory
- rodzaj czynnika: ciecz-ciecz, ciecz-gaz, ciecz-ciało stałe, gaz-gaz i inne
- organizacja przepływu: współprądowe, przeciwprądowe, krzyżowe
- ilość czynników wymieniających ciepło
- obecność mieszania: z mieszaniem, bez mieszania, z mieszaniem niektórych czynników
- charakter działania: praca ciągła, praca okresowa

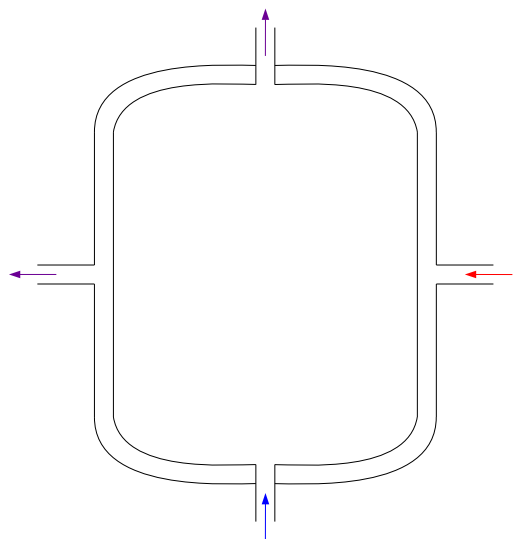
# Wymienniki ciepła

---

**Wymienniki przeponowe** (rekuperatory) – urządzenia, w których czynniki wymieniające ciepło oddzielone są cienką ścianką (przeponą). Ciepło wnika od czynnika gorącego do ścianki, przenika przez nią, a następnie wnika do czynnika ogrzewanego.

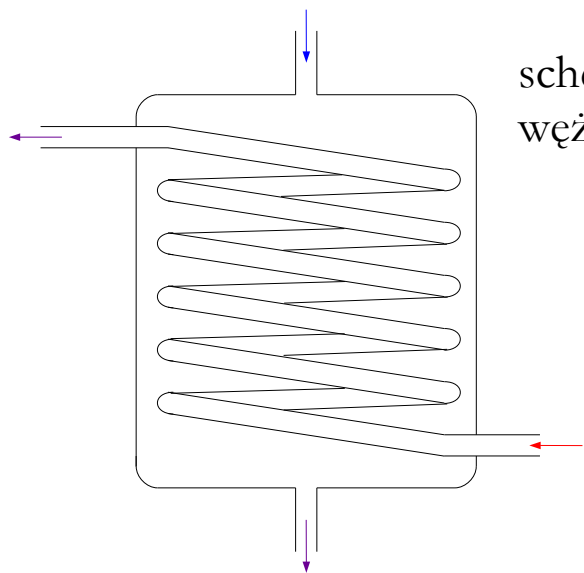
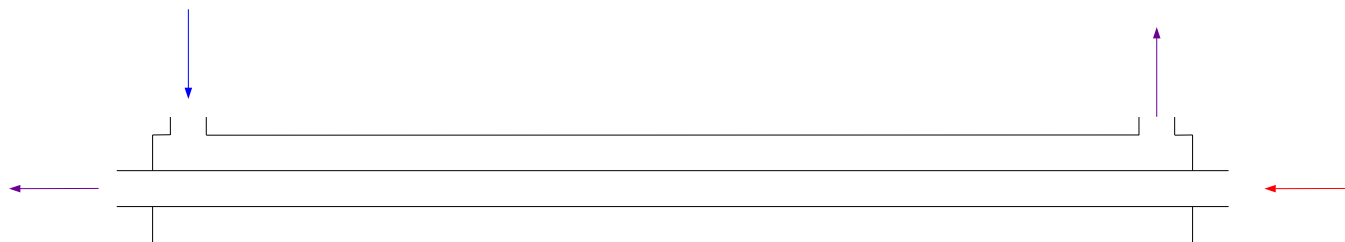
Wymienniki przeponowe pracują na ogół w sposób ciągły i ruch ciepła ma charakter ustalony. Istotne jest, aby materiał z którego wykonana jest ścianka posiadał dobre własności cieplne. Rozróżnia się wymienniki z płaszczem grzewczym, węzownicowe, typu rura w rurze, płaszczowo-rurowe, płytowe, lamelowe i inne.

# Wymienniki ciepła



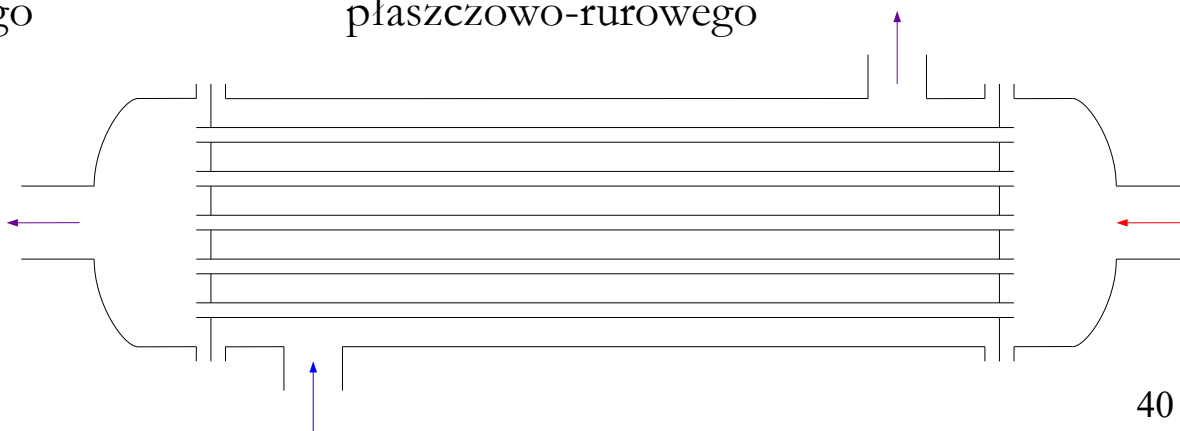
schemat wymiennika z płaszczem grzewczym

schemat wymiennika „rura w rurze”



schemat wymiennika wężownicowego

schemat wymiennika płaszczowo-rurowego



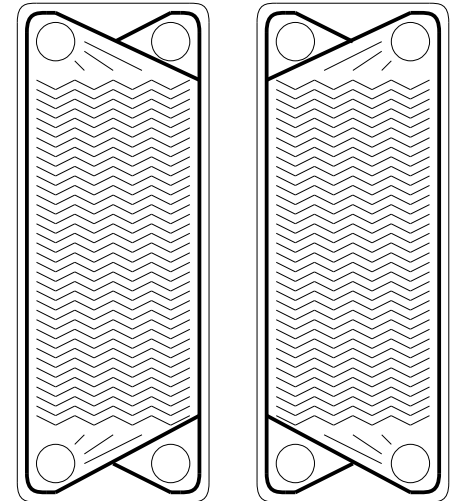


# Wymienniki ciepła

Zalety wymienników płytowych:

- najwyższa sprawność wśród aparatów do wymiany ciepła
- wysokie wartości współczynników wnikania ciepła przy stosunkowo małych oporach przepływu
- zwarta i hermetyczna budowa
- wysoki stosunek powierzchni wymiany ciepła do objętości aparatu
- małe zużycie materiału na jednostkę strumienia cieplnego
- łatwy dostęp do wnętrza wymiennika i możliwość łatwego czyszczenia powierzchni wymiany ciepła
- prostota wykonywania elementów wymiennika i ich wysoka unifikacja

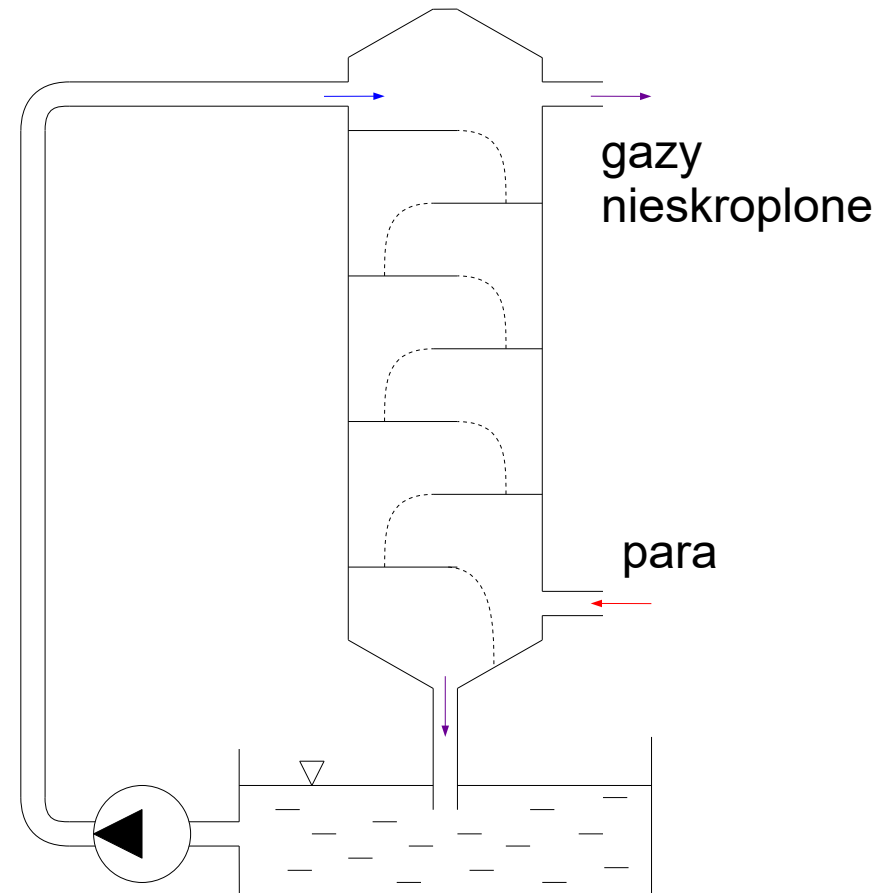
schemat płyty strumieniowej



widok wymiennika płytowego

# Wymienniki ciepła

**Wymienniki bezprzeponowe** – urządzenia, w których wymiana ciepła odbywa się przez bezpośredni kontakt czynników, najczęściej gorącej pary, która skraplając się oddaje ciepło parowania cieczy nagrzewanej. Przykładami wymienników bezprzeponowych mogą być skraplacze kaskadowe lub kolumny barbotażowe.

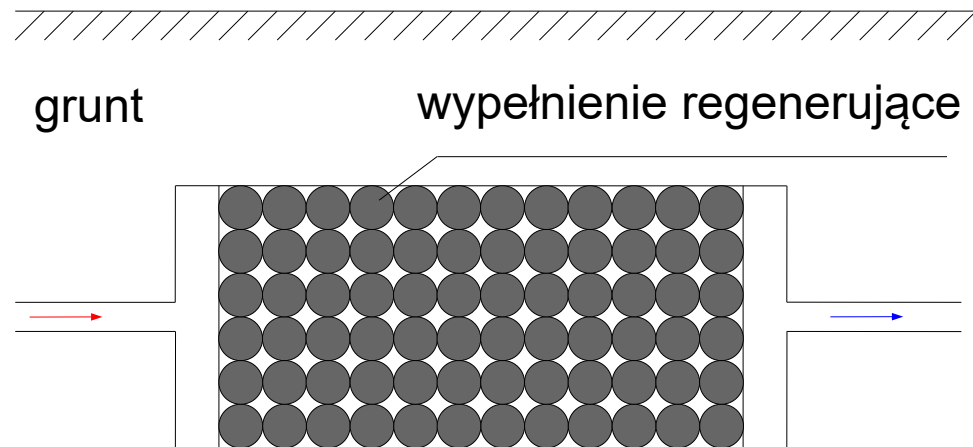


schemat skraplacza kaskadowego

# Wymienniki ciepła

---

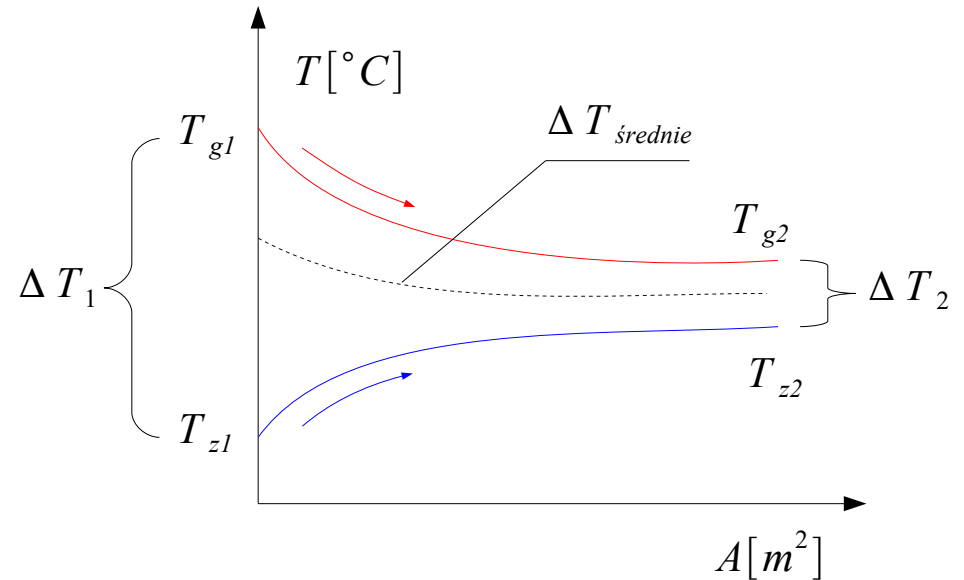
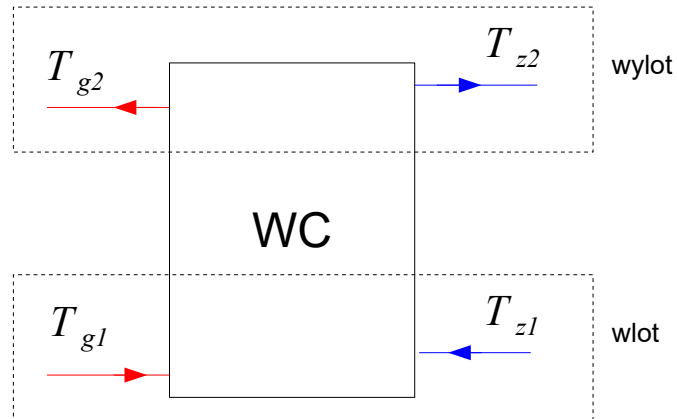
**Regeneratory** – urządzenia, w których przekazywanie ciepła od jednego czynnika do drugiego odbywa się przy udziale nieruchomego lub przemieszczanego wypełnienia, najczęściej z materiałów stałego. Przykładem tego typu urządzeń mogą być pracujące w sposób okresowy gruntowe wymienniki ciepła.



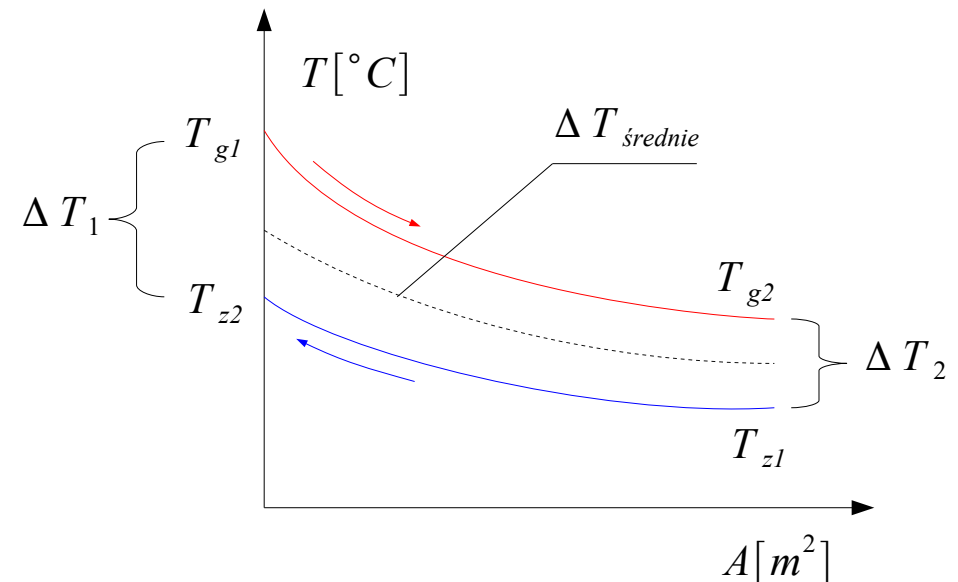
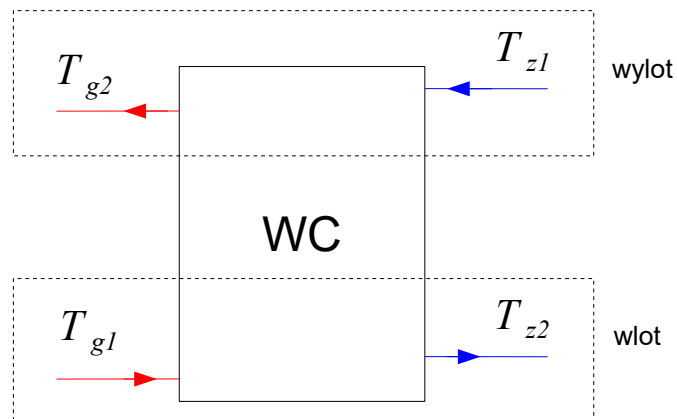
schemat gruntowego  
wymiennika ciepła

# Układ współprądowy i przeciwny

układ współprądowy ( $T_{z2}$  zawsze niższa od  $T_{g2}$ )

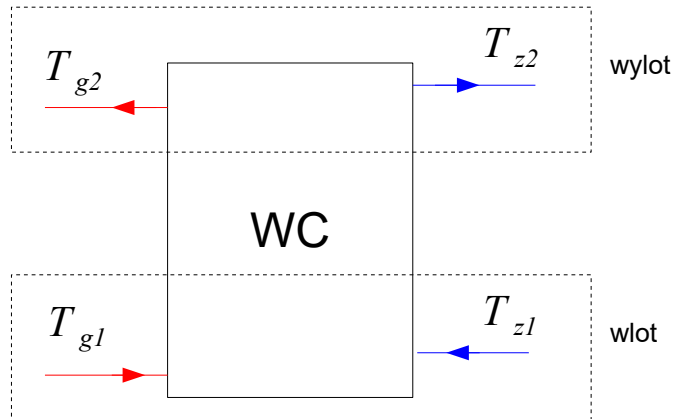


układ przeciwny ( $T_{z2}$  wyższa od  $T_{g2}$ )



# Wyznaczanie współczynnika przenikania

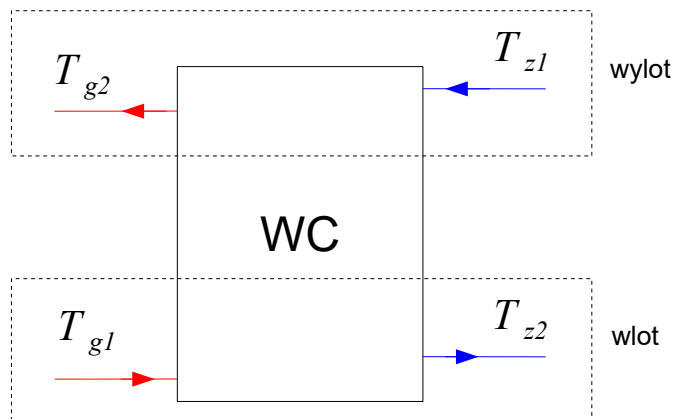
układ współprądowy



$$\dot{Q} = k \cdot (T_1 - T_2) \cdot A$$

Problem: różnica temperatur nie jest stała wzdłuż przepływu

układ przeciwprądowy



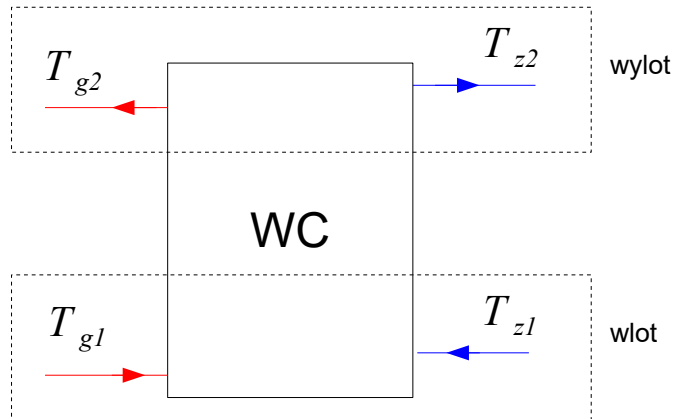
$$\Delta T = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

$\Delta T_1$  - różnica temperatur czynników na wlocie do wymiennika  $[K, ^\circ C]$

$\Delta T_2$  - różnica temperatur czynników na wylocie z wymiennika  $[K, ^\circ C]$

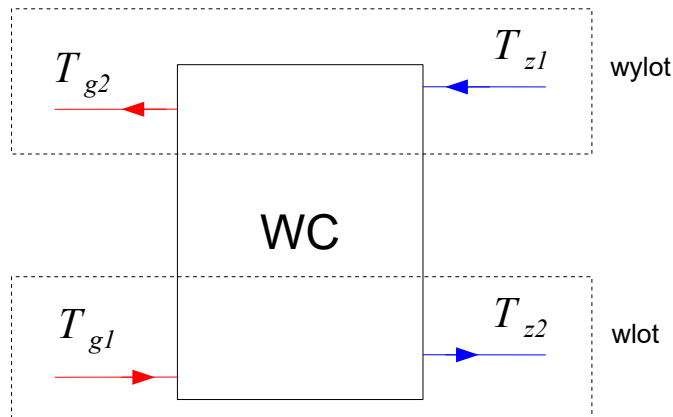
# Wyznaczanie współczynnika przenikania

układ współprądowy



$$\Delta T = \frac{(T_{g1} - T_{z1}) - (T_{g2} - T_{z2})}{\ln \frac{T_{g1} - T_{z1}}{T_{g2} - T_{z2}}}$$

układ przeciwnprądowy



$$\Delta T = \frac{(T_{g1} - T_{z2}) - (T_{g2} - T_{z1})}{\ln \frac{T_{g1} - T_{z2}}{T_{g2} - T_{z1}}}$$

# Wyznaczanie współczynnika przenikania

$$\dot{Q} = k \cdot \Delta T \cdot A$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_g \cdot c \cdot (T_{g1} - T_{g2})$$

w warunkach przepływu ustalonego strumień cieplny wyznacza się z bilansu czynnika gorącego

$$\dot{m}_g \cdot c \cdot (T_{g1} - T_{g2}) = k \cdot \Delta T \cdot A$$

$$k = \frac{\dot{m}_g \cdot c \cdot (T_{g1} - T_{g2})}{\Delta T \cdot A}$$

$c$  - ciepło właściwe czynnika

$$\left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

$\dot{m}_g$  - masowe natężenie przepływu czynnika gorącego

$$\left[ \frac{kg}{s} \right]$$

$k$  – współczynnik przenikania ciepła

# Wyznaczanie współczynnika przenikania

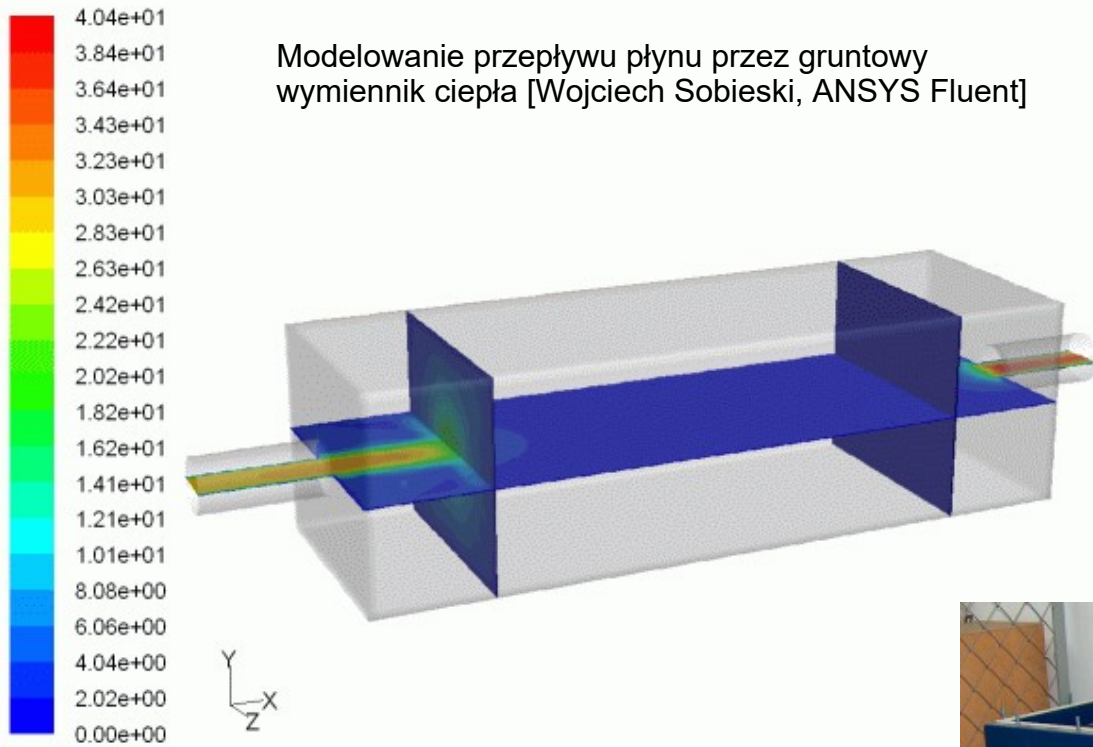
---



Stanowisko do wyznaczania współczynnika przenikania ciepła.



# Numeryczne modelowanie wymiany ciepła



Materiał magazynujący ciepło

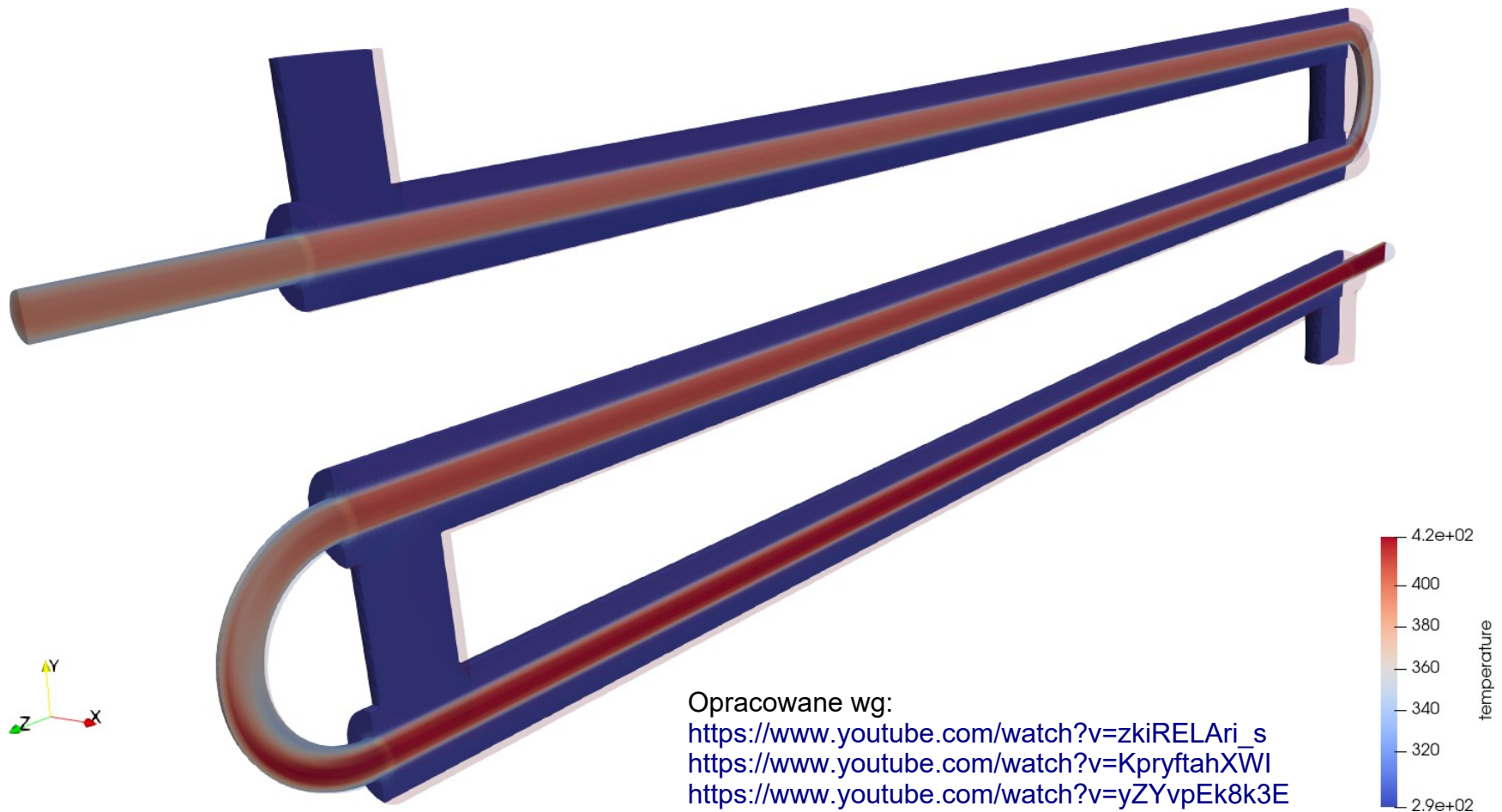
Rozkład ciśnień statycznych (GAMBIT + Fluent)

Stanowisko badawcze

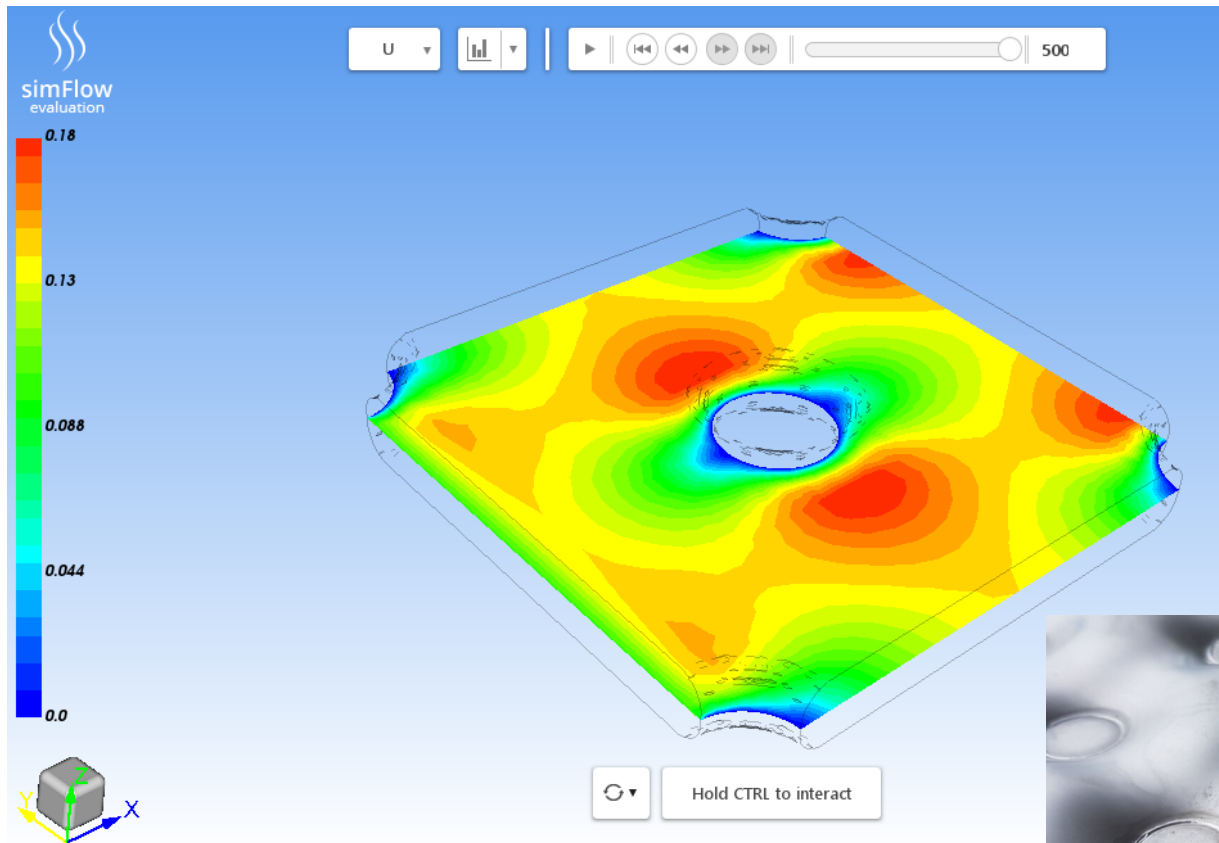


# Numeryczne modelowanie wymiany ciepła

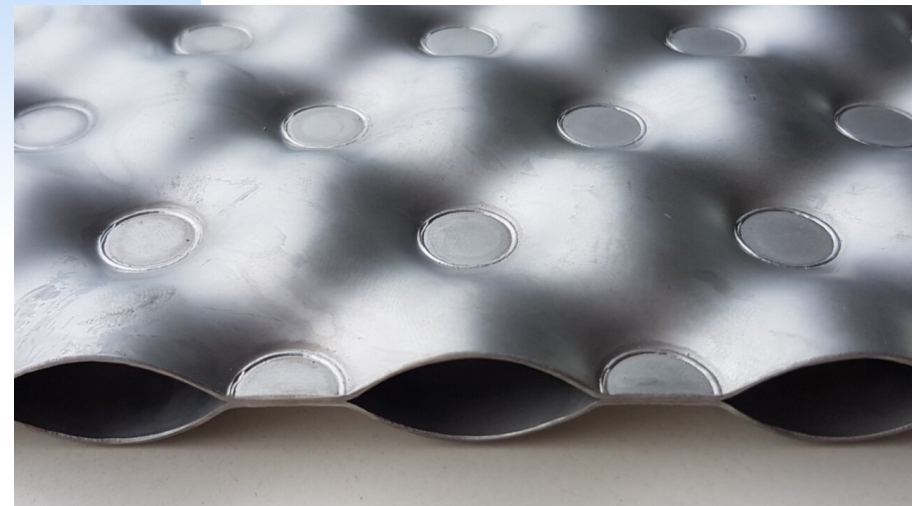
Modelowanie wymiennika ciepła typu rura w rurze  
[Wojciech Sobieski, ANSYS Fluent]



# Numeryczne modelowanie wymiany ciepła



Modelowanie przepływu wody przez płaszczy grzewczy typu pillow-plate  
[Wojciech Sobieski, SimFlow/OpenFOAM]

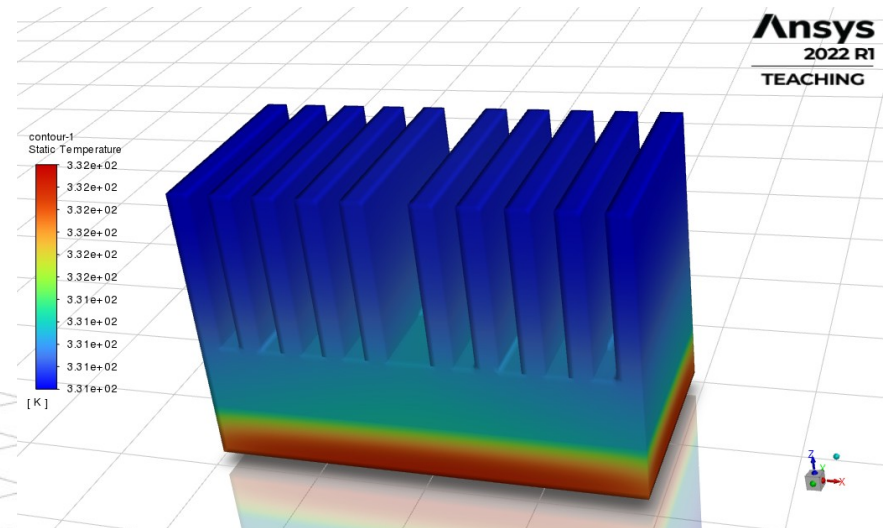




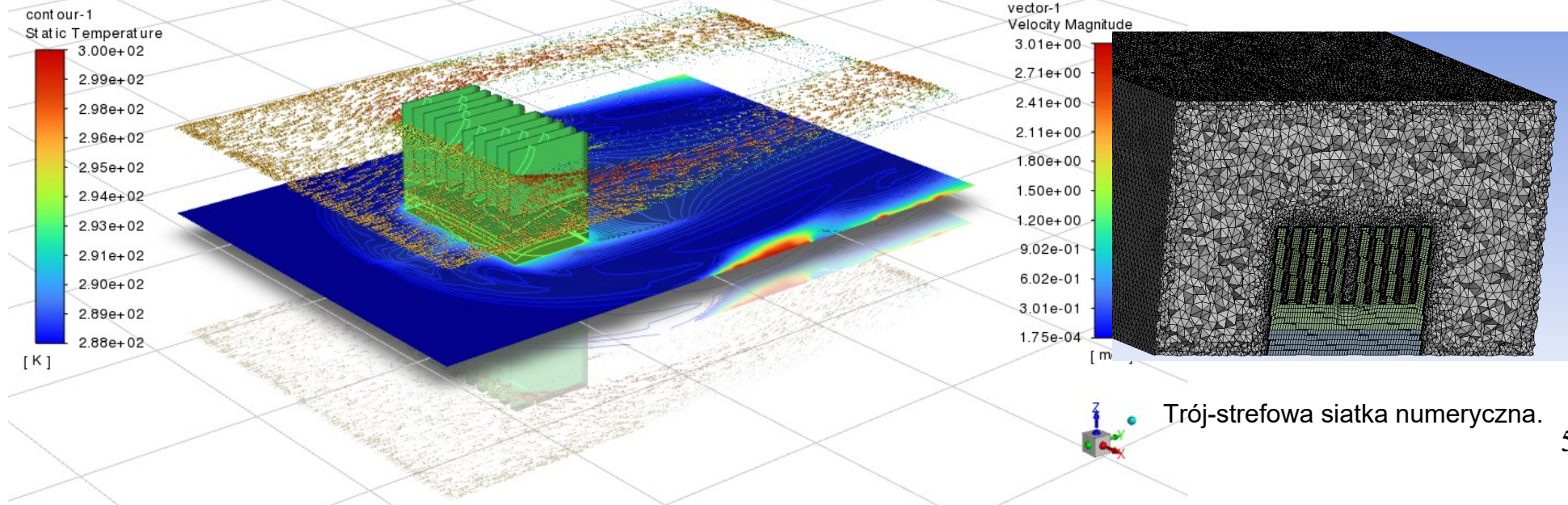
# Numeryczne modelowanie wymiany ciepła

Przykład modelowania przepływu ciepła przez radiator  
(Wojciech Sobieski, ANSYS Fluent 2022)

Radiator bez chłodzenia opływającym go płynem.



Radiator z chłodzeniem przez opływający go płyn.

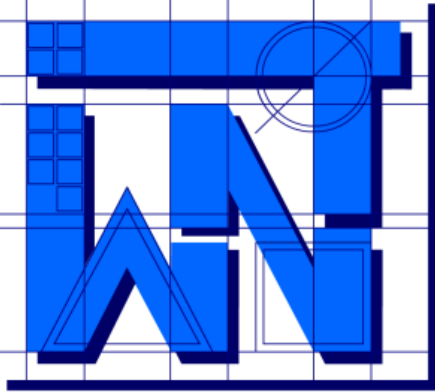


# Podsumowanie

---

## Zagadnienia:

Ciepło, strumień ciepła, gęstość strumienia ciepła, sposoby przekazywania ciepła (proste i złożone), przewodzenie ciepła, prawo Fouriera, konwekcja (swobodna i wymuszona), promieniowanie, przejmowanie (wnikanie) ciepła, prawo stygnięcia Newtona, przenikanie ciepła, opór termiczny, opór termiczny – analogia elektryczna, ustalone przenikanie ciepła przez ścianki (jedno- i wielowarstwowe oraz płaskie i cylindryczne), wzór Pecleta, liczby podobieństwa, liczba Reynoldsa, krytyczne wartości liczby Reynoldsa, liczba Prandtla, liczba Nusselta, obliczanie współczynnika wnikania ciepła, wymienniki ciepła, układ współ- i przeciwprądowy, wyznaczenie współczynnika przenikania, numeryczne modelowanie wymiany ciepła.



UNIVERSITY OF WARMIA AND MAZURY IN OLSZTYN  
The Faculty of Technical Sciences  
POLAND, 10-957 Olsztyn, M. Oczapowskiego 11  
tel.: (48)(89) 5-23-32-40, fax: (48)(89) 5-23-32-55  
URL: <http://www.uwm.edu.pl/edu/sobieski/> (in Polish)



---

**Dziękuję za uwagę**

**Wojciech Sobieski**

---

Olsztyn, 2013-2024