

## WYMIANA (TRANSPORT) CIEPŁA

### Trzy podstawowe mechanizmy transportu ciepła (wymiany ciepła):

1. **PRZEWODZENIE** - przekazywanie energii od jednej cząstki do drugiej, za pośrednictwem ruchu drgającego tych cząstek. Proces ten trwa dopóty, dopóki temperatura ciała nie zostanie wyrównana w całej rozpatrywanej objętości. Dotyczy to bezpośredniego kontaktu ciała z ciałem, części ciała z ciałem.
2. **PROMIENIOWANIE** - przekazywanie ciepła w postaci energii promieniowania, którego natura jest taka sama jak energii świetlnej. Energia cieplna przekształca się w energię promieniowania, przebywa określoną przestrzeń z prędkością światła, aby w innym miejscu przekształcić się całkowicie lub częściowo w energię cieplną.
3. **KONWEKCJA (WNIKANIE)** - wiąże się z ruchem konwekcyjnym gazów lub cieczy, wywołanym bądź różnicą gęstości (różnicą temperatur), bądź przez wymuszenie czynnikami zewnętrznymi.

W przemyśle ruch ciepła zachodzi równocześnie dwoma lub trzema sposobami, najczęściej odbywa się przez **przewodzenie i konwekcję**. Mechanizm transportu ciepła łączący wymienione sposoby ruchu ciepła nazywa się **PRZENIKANIEM CIEPŁA**.

# PRZEWODZENIE

Stan cieplny ciała określa temperatura. Miejsca geometryczne o jednakowej temperaturze tworzą **powierzchnie izotermiczne**, linie o jednakowej temperaturze tworzą **izotermy**.

**Temperatura ciała zmienia się najszybciej w kierunku prostopadłym do izoterm.**

**Przewodzenie dotyczy głównie ciał stałych, gdyż to ciała stałe najlepiej przewodzą ciepło.**

## PODSTAWOWE DEFINICJE

### ***NATĘŻENIE PRZEPŁYWU CIEPŁA (STRUMIEŃ CIEPLNY) $Q_*$***

ilość ciepła jaka przepływa przez dane ciało w jednostce czasu

$$Q_* = \frac{dQ}{dt} \left[ \frac{\text{J}}{\text{s}} \right] = [\text{W}]$$

gdzie:

Q-ciepło,

t-czas,

### ***GĘSTOŚĆ STRUMIENIA CIEPLNEGO $q$ (OBCIĄŻENIE CIEPLNE)***

*natężenie przepływu ciepła odniesione do jednostki powierzchni (straty ciepła przypadające na jednostkę powierzchni)*

$$q = \frac{Q_*}{A} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

gdzie:

A-powierzchnia,

$$\text{Natężenie przepływu ciepła } Q_* = q \cdot A \text{ [W]}$$

**Przewodzenie ciepła jest USTALONE gdy**

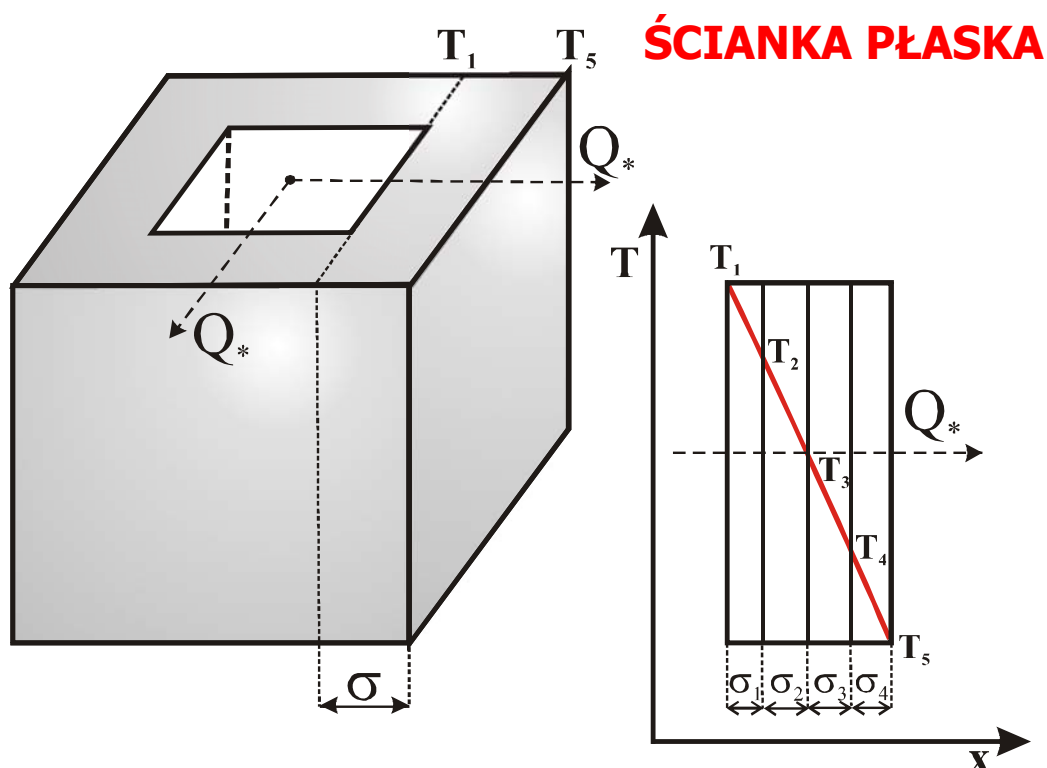
$$dQ/dt = \text{const lub}$$

$$Q_{*1} = Q_{*2} = Q_{*3}$$

**Przewodzenie ciepła jest NIEUSTALONE gdy**

$$dQ/dt \neq \text{const lub}$$

$$Q_{*1} \neq Q_{*2} \neq Q_{*3}$$



### Ścianka płaska jednowarstwowa:

*gęstość strumienia cieplnego*  $q = \frac{\lambda}{\sigma} \cdot (T_1 - T_2) \text{ [W/m}^2\text{]}$

**temperatura  $T_1 >$  temperatury  $T_2$**

gdzie:

$\sigma$ -grubość warstwy (ścianki),

*natężenie przepływu ciepła*  $Q_* = \frac{\lambda \cdot A}{\sigma} \cdot (T_1 - T_2) \text{ [W]}$

**Całkowita ilość przewodzonego ciepła przez ciało:**

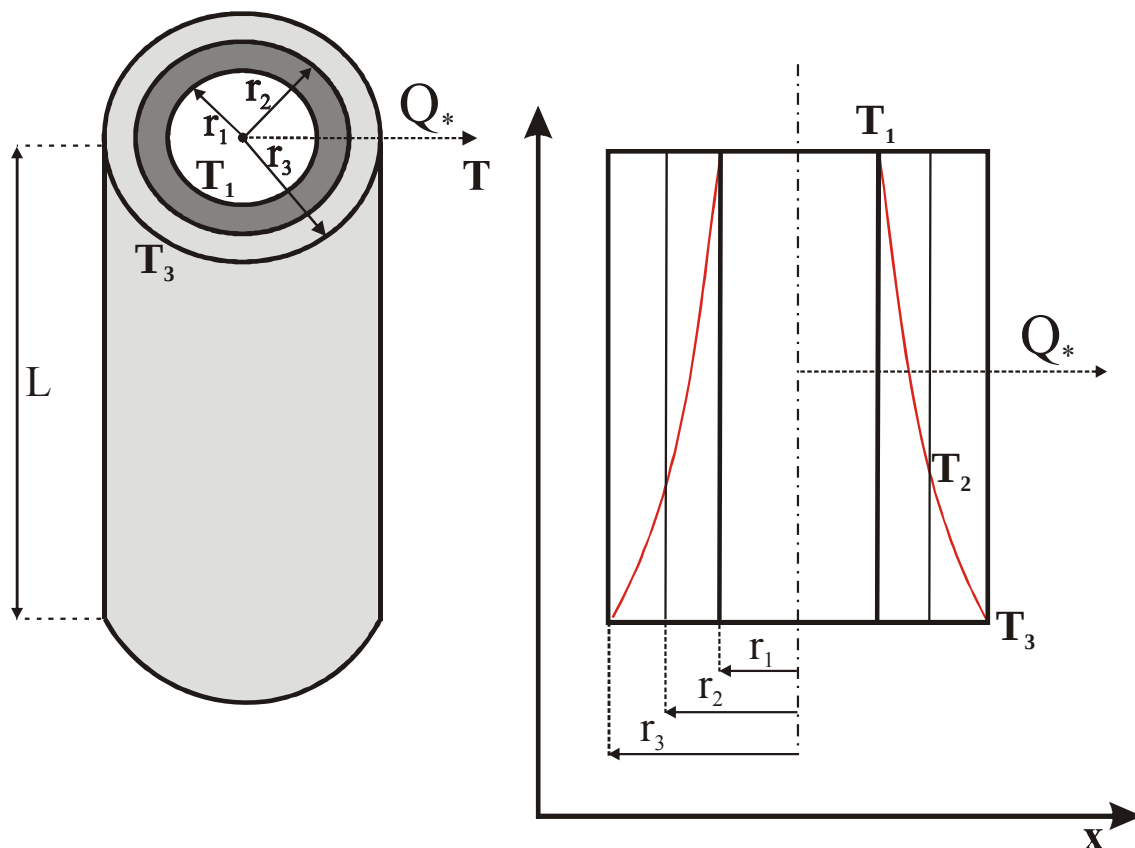
$$Q = q \cdot A \cdot t \text{ [J]}$$

### Ścianka płaska wielowarstwowa:

*natężenie przepływu ciepła*  $Q_* = \frac{A \cdot (T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\sigma_i}{\lambda_i}} \text{ [W]}$

*gęstość strumienia cieplnego*  $q = \frac{(T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\sigma_i}{\lambda_i}} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$

## ŚCIANKA CYLINDRYCZNA



**Przewodzenie ciepła przez ściankę cylindryczną:**

$$Q_* = \frac{\pi \cdot L \cdot (T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \quad [\text{W}]$$

**PRZEWODZENIE** opiera się na prawie **FOURIERA** mówiącym o ilości ciepła przewodzonego przez powierzchnię **A** prostopadłą do kierunku ruchu ciepła:

$$dQ = -\lambda \cdot A \cdot \text{grad}T \cdot (d\tau)$$

gdzie:

T-temperatura,

$\lambda$ -współczynnik przewodzenia ciepła,

$\tau$ -czas,

podstawiając za:

$$\text{grad}T = dT/dx$$

otrzymujemy:

$$dQ = -\lambda \cdot A \cdot (dT/dx) \cdot (d\tau)$$

gdzie:

x ( $\sigma$ )-grubość warstwy,

wiedząc, że:

$$dQ/d\tau = Q_*$$

zakładamy  $dQ/d\tau = \text{const}$  – ustalone przewodzenie ciepła

otrzymujemy:

$$Q_* = -\lambda \cdot A \cdot (dT/dx) \quad [\text{W}]$$

rozważając dalej:

$$Q_* = q \cdot A$$

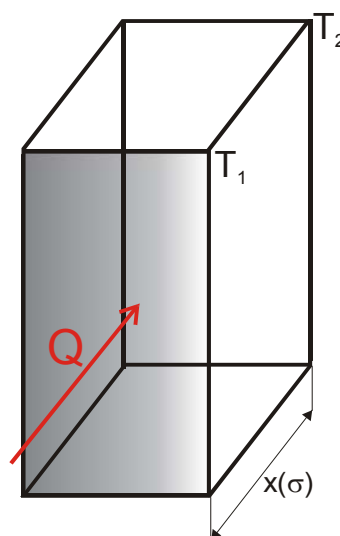
stąd:

$$q = -\lambda \cdot (dT/dx) \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

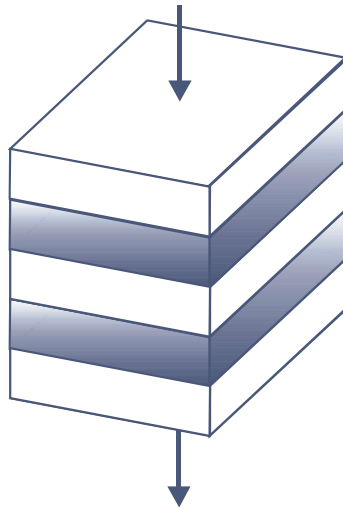
Z powyższych równań wynika, że:

$$\lambda = -\frac{dQ/d\tau}{A \cdot (dT/dx)} \quad \left[ \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot \text{deg}/\text{m})} = \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{deg}} \right]$$

zatem **współczynnik przewodzenia ciepła ( $\lambda$ )** jest to ilość ciepła przewodzona przez ciało o powierzchni  $1\text{m}^2$ , grubości ścianki  $1\text{m}$ , gdy różnica temperatur pomiędzy przeciwległymi ściankami wynosi  $1\text{deg}$ , w ciągu  $1\text{s}$ .



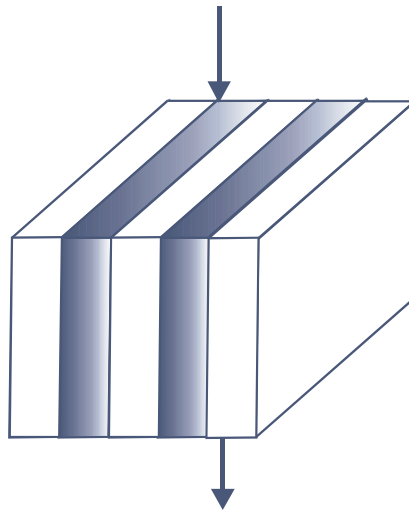
# WSPÓŁCZYNNIK PRZEWODZENIA CIEPŁA MATERIAŁÓW WIELOFAZOWYCH (KOMPÓZYTÓW) MODEL SZEREGOWY



Przewodzenie w kierunku prostopadłym do warstw  
(model szeregowy):

$$\lambda = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 \cdot V_2 + \lambda_2 \cdot V_1}$$

## MODEL RÓWNOLEGŁY



Przewodzenie w kierunku równoległym do warstw  
(model równoległy):

$$\lambda = \lambda_1 \cdot V_1 + \lambda_2 \cdot V_2$$

gdzie:

$V_1, V_2$  – udziały objętościowe faz składowych kompozytu,

# PROMIENIOWANIE

Wymiana ciepła z otoczeniem przez promieniowanie cieplne. Przekształcanie energii cieplnej na promienistą – promieniowanie cieplne, proces odwrotny to pochłanianie (absorpcja ciepła). Promieniowanie cieplne ma tę samą naturę, co promieniowanie świetlne, podlega tym samym prawom.

PROMIENIE WIDZIALNE MAJĄ DŁUGOŚĆ OD 0,4 DO 0,8  $\mu\text{m}$  ZAŚ  
PROMIENIE CIEPLNE (PODCZERWONE) OD 0,8 DO 40  $\mu\text{m}$ .

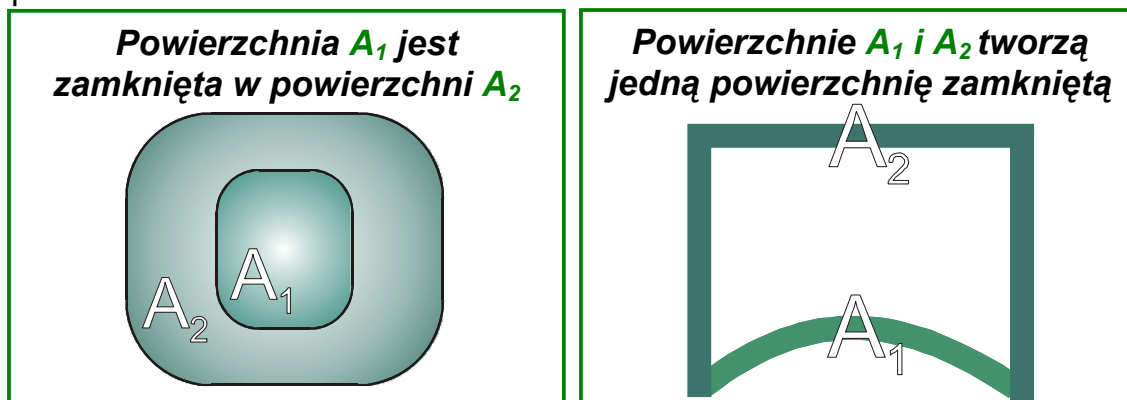
Zgodnie z prawem Stefana–Boltzmana

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4$$

gdzie:

$\sigma_0$ - stała promieniowania  $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

można wyznaczać ilość wymienionego ciepła (natężenie przepływu ciepła) między powierzchniami dwóch ciał zależnie od położenia tych powierzchni:



$$A_2 > A_1$$

Dla ciał szarych:

$$E = C_0 \cdot \varepsilon \cdot (T/100)^4 = C \cdot (T/100)^4$$

gdzie:

$\varepsilon$  - stopień czarności ciała czyli emisyjność,

EMISYJNOŚĆ CAŁKOWITA – stosunek natężenia promieniowania ciała szarego do natężenie promieniowania ciała doskonale czarnego w temperaturze T.

$$\varepsilon = E/E_0 = \frac{C(T/100)^4}{C_0(T/100)^4}$$

Zatem, dla dwóch ciał wymieniających ciepło:

$$Q_{*1-2} = \varepsilon_{1-2} \cdot C_0 \cdot A_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] [\text{W}]$$

gdzie:  $C_0$  – stała promieniowania = 5,67 [W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>]

$\varepsilon$  - emisyjność (stopień czarność ciała)  
zawiera się w granicach od 0 do 1

### **ZASTĘPCZY STOPIEŃ CZARNOŚCI $\varepsilon_{1-2}$**

$$\text{wzór ogólny } \varepsilon_{1-2} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + A_1/A_2 \cdot (1/\varepsilon_2 - 1)}$$

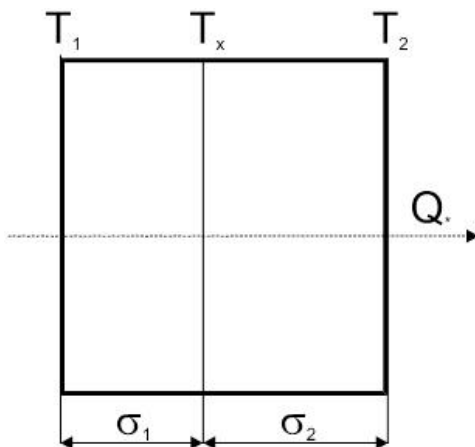
gdy  $A_2 \gg A_1$  wtedy  $\varepsilon_{1-2} \cong \varepsilon_1$

Dla równoległych dostatecznie dużych płyt położonych blisko siebie zastępczy stopień czarność oblicza się z wg poniższego wzoru, gdyż wtedy  $A_1 = A_2$ :

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}$$

# ZADANIA

## ZADANIE 1



Dane:

$$\sigma_1 = 0,5 \text{ m}$$

$$\sigma_2 = 0,2 \text{ m}$$

$$\lambda_1 = 2 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

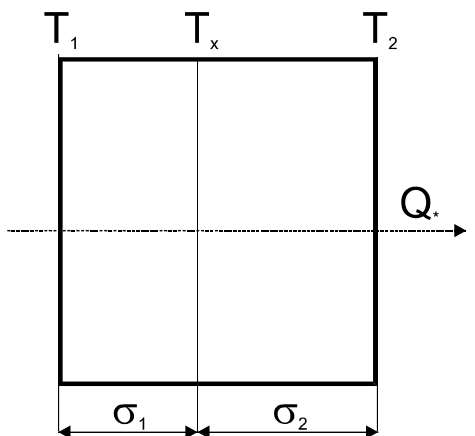
$$\lambda_2 = 0,07 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

$$T_1 = 2500^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 200^\circ\text{C}$$

Obliczyć natężenie przepływu ciepła wiedząc, że  $A = 2 \text{ m}^2$ . Obliczyć gęstość strumienia cieplnego tej ścianki, opór termiczny oraz wyznaczyć temperaturę  $T_x$ . Następnie dobrać grubość warstwy drugiej tak, żeby  $T_2$  wynosiła  $80^\circ\text{C}$  oraz wyznaczyć izotermę gdzie temperatura ścianki wynosi  $2000^\circ\text{C}$ ?

## ZADANIE 2



Dane:

$$T_1 = 1000^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 70^\circ\text{C}$$

$$\sigma_1 = 0,5 \text{ m}$$

$$\sigma_2 = 0,6 \text{ m}$$

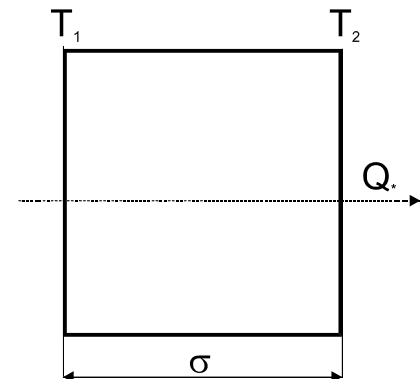
$$\lambda_1 = 1 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

$$\lambda_2 = 0,45 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

Przewodzenie ciepła ustalone  $Q_{*1} = Q_{*2}$ .

Obliczyć gęstość strumienia cieplnego i natężenie przepływu ciepła tej ścianki, wyznaczyć temperaturę  $T_x$ ? Powierzchnia tej ścianki wynosi  $1 \text{ m}^2$ .

## ZADANIE 3



Dane:

$$\sigma = 0,2 \text{ m}$$

$$T_1 = 300^\circ\text{C}$$

$$\lambda = 0,252 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

$$T_2 = 275^\circ\text{C}$$

$$A = 3,5 \text{ m}^2$$

Obliczyć natężenie przepływu ciepła, gęstość strumienia cieplnego oraz wyznaczyć izotermę, dla której temperatura ścianki będzie równa  $280^\circ\text{C}$ . Ponadto obliczyć całkowite ciepło przewodzone przez tą ściankę w ciągu 1s ?

#### ZADANIE 4

Ściana pieca składa się z trzech warstw. Wewnętrzną warstwę stanowi cegła ognioodporna o grubości  $\sigma_1=0,1$  m i współczynniku przewodzenia ciepła  $\lambda_1=0,95$  W/m·deg. Środkową warstwą jest cegła zwykła o  $\sigma_2=0,2$  m i  $\lambda_2=0,65$  W/m·deg, zewnętrzną natomiast izolacja o  $\sigma_3=0,06$  m i  $\lambda_3=0,1$  W/m·deg. Pomiary temperatury wykazały, że temperatura wewnętrzna ściany wynosi  $750^\circ\text{C}$ , a ściany zewnętrznej  $80^\circ\text{C}$ . Obliczyć straty ciepłe pieca z  $1\text{m}^2$  powierzchni ściany oraz zakres temperatur, w jakim znajduje się warstwa cegły zwykłej.

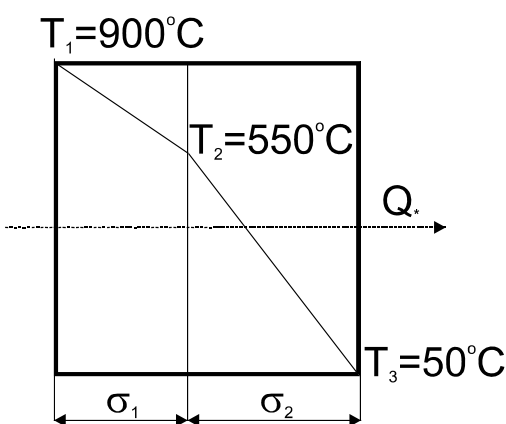
#### ZADANIE 5

Cegła dziurawka jest przybliżeniem kompozytu warstwowego złożonego z warstw ciała stałego i warstw porów (powietrza). Wyznaczyć współczynniki przewodzenia ciepła w kierunku równoległym prostopadłym do warstw, wiedząc, że:

$$V_{\text{c.stałego}} = 78\% \quad \lambda_{\text{c.stałego}} = 0,2 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$$

$$V_{\text{porów}} = 22\% \quad \lambda_{\text{powietrza}} = 0,001 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$$

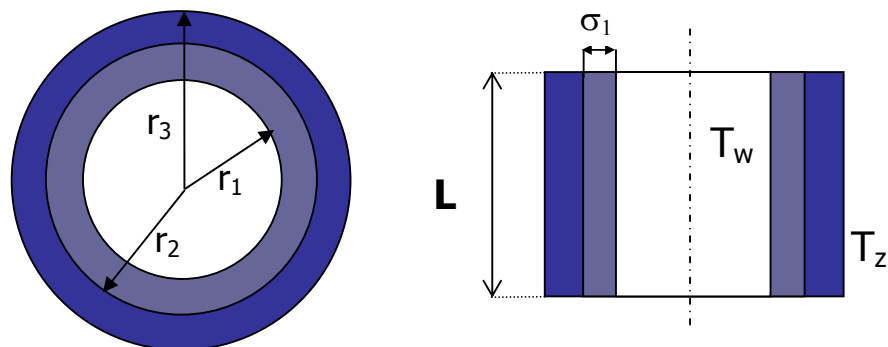
#### ZADANIE 6



Określić minimalną grubość ściany paleniska, jeśli wiadomo, że ściana składa się z dwóch warstw: wewnętrznej z cegły szamotowej i zewnętrznej z cegły czerwonej, straty ciepłe  $1\text{m}^2$  ściany wynoszą  $1,2$  kW. Współczynniki przewodzenia ciepła obu materiałów są następujące: cegła szamotowa  $\lambda_1=1,3$  W/m·deg, cegła czerwona  $\lambda_2=0,5$  W/m·deg.

Temperaturowy przekrój przez ścianę przedstawiono na rysunku powyżej.

### ZADANIE 7



Dany jest rurociąg, którego podstawowe parametry są następujące:

$$r_1 = 0,1 \text{ m} \quad r_3 = 0,5 \text{ m} \quad \sigma_1 = 0,05 \text{ m}$$

$$\lambda_1 = 3,8 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]} \quad \lambda_2 = 0,05 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

$$L = 2 \text{ m}$$

Temperatura wewnętrznej ścianki wynosi  $500^\circ\text{C}$ , zaś zewnętrznej  $50^\circ\text{C}$ . Wyznaczyć natężenie przepływu ciepła na drodze przewodzenia przez ściankę tego rurociągu.

### ZADANIE 8

Stalowy rurociąg o średnicach  $d_w/d_z = 100/110\text{mm}$  i współczynniku przewodzenia ciepła  $\lambda_1 = 40 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  pokryto dwoma warstwami izolacji o grubości  $\sigma_2 = \sigma_3 = 30\text{mm}$ . Temperatura wewnętrznej powierzchni rurociągu  $T_1 = 623 \text{ K}$  i zewnętrznej powierzchni izolacji  $T_4 = 323 \text{ K}$ . Określić natężenie przepływu ciepła  $Q^*$ , oraz temperaturę  $T_3$  na styku izolacji, jeżeli warstwy przylegają do siebie. Ile będzie wynosić natężenie przepływu ciepła  $Q^*$  oraz temperatura  $T_3$ , jeżeli warstwy izolacji zostaną zamienione w kolejności. Współczynniki przewodzenia ciepła izolacji wynoszą  $\lambda_2 = 0,046 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ,  $\lambda_3 = 0,11 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

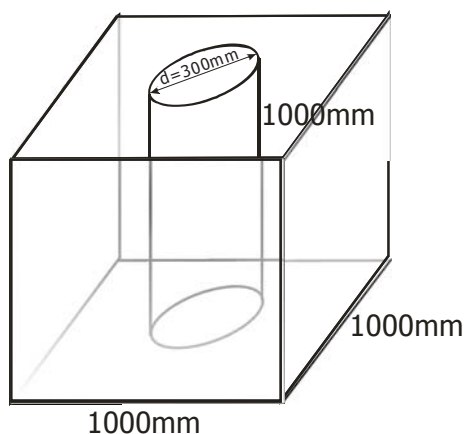
### ZADANIE 9

Rura stalowa o średnicy  $102/112 \text{ mm}$  jest zaizolowana warstwą waty azbestowej o grubości  $\sigma = 70\text{mm}$ . Różnica temperatur pomiędzy powierzchnią wewnętrzną a zewnętrzną wynosi  $200^\circ\text{C}$ . Obliczyć natężenie przepływu ciepła, jeżeli długość rury wynosi  $15\text{m}$ . Współczynniki przewodzenia ciepła wynoszą:  $50 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$  dla stali, zaś dla waty azbestowej  $\lambda = 0,05 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$ .

### ZADANIE 10

Ściana igloo zbudowana jest z desek o grubości  $\sigma_1 = 0,02$  m, warstwy ziemi  $\sigma_2 = 0,15$  m i warstwy śniegu. Współczynniki przewodzenia ciepła wynoszą odpowiednio:  $\lambda_1 = 0,2$  W/(m·deg),  $\lambda_2 = 0,5$  W/(m·deg),  $\lambda_3 = 0,4$  W/(m·deg). Obliczyć gęstość strumienia ciepłego, dopuszczalną grubość  $\sigma_3$  warstwy śniegu, jeżeli temperatura powierzchni desek wewnątrz igloo wynosi  $T_1 = 10^\circ\text{C}$ , temperatura wewnętrznej powierzchni śniegu jest równa temperaturze topnienia lodu a temperatura zewnętrznej powierzchni śniegu wynosi  $T_4 = -40^\circ\text{C}$ . Wyznaczyć również temperaturę na połączeniu warstwy desek i ziemi oraz opór termiczny poszczególnych warstw w ścianie.

### ZADANIE 11



W kanale ceglanym o przekroju 1000x1000mm znajduje się rurociąg stalowy o średnicy zewnętrznej 300mm. Temperatura zewnętrznej powierzchni rurociągu wynosi  $227^\circ\text{C}$ , a temperatura wewnętrznej powierzchni ścianek kanału  $30^\circ\text{C}$ . Obliczyć straty ciepłe wskutek promieniowania 1 metra bieżącego rurociągu ( $L=1$ m). Stopień czarności wynosi dla stali  $\varepsilon_1=0,80$ ; dla cegły  $\varepsilon_2=0,93$ .

### ZADANIE 12

W dużej hali fabrycznej znajduje się rurociąg stalowy o średnicy zewnętrznej 120mm i długości 20m. Temperatura zewnętrznej powierzchni rurociągu wynosi  $300^\circ\text{C}$ , zaś temperatura ścian hali jest równa  $17^\circ\text{C}$ . Obliczyć straty ciepłe rurociągu na drodze promieniowania, jeżeli stopień czarności stali  $\varepsilon_1=0,80$ .

### ZADANIE 13

Dwie jednakowej wielkości płyty stalowe o wymiarach 2x2m są umieszczone równolegle, blisko siebie tak, iż wpływ promieniowania na boki można pominąć. Pierwsza z nich ma temperaturę  $500^\circ\text{C}$  a druga  $80^\circ\text{C}$ . Obliczyć natężenie przepływu ciepła na drodze promieniowania między płytami. Podać temperaturę ekranu stalowego wstawionego między płyty o identycznych wymiarach. Stopień czarności stali  $\varepsilon_1=\varepsilon_2=0,82$ . O ile % pierwotnej wartości zmniejszy się natężenie przepływu po wstawieniu ekranu.

#### **ZADANIE 14**

Ściana pieca ma wysokość 3m. Temperatura ściany wynosi  $80^{\circ}\text{C}$ , natomiast temperatura otoczenia  $40^{\circ}\text{C}$ . Obliczyć straty ciepła i porównać na sposób konwekcji i promieniowania. Parametry powietrza dla temperatury  $60^{\circ}\text{C}$ :  $Pr=0,722$ ;  $\eta=20\cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\rho=1,0 \text{ kg/m}^3$ ;  $\lambda=0,028 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Ponadto wiadomo, że stopień czarności ściany (emisyjność) wynosi 0,8 zaś czynnik kształtu  $f=1$ .

#### **ZADANIE 15**

Grzałka szamotowa o średnicy 30mm jest umieszczona wewnątrz stalowej rury o średnicy 350mm. Obliczyć ilość ciepła wymienianego między grzałką i rurą przez promieniowanie jeżeli temperatura wewnętrznej powierzchni rury wynosi  $80^{\circ}\text{C}$  a temperatura grzałki wynosi  $320^{\circ}\text{C}$ .

Dane do zadania:

stopnie czarności: szamot  $\varepsilon=0,6$ ; stal  $\varepsilon=0,77$ . Zakładamy długość rury i grzałki  $L=1\text{m}$ .

#### **ZADANIE 16**

Przeanalizować zależność ciepła traconego wskutek promieniowania przez powierzchnię nieizolowanego odcinka stalowego rurociągu ( $\varepsilon=0,77$ ) o średnicy równej 25mm i długości wynoszącej 5m do otoczenia o temperaturze  $0^{\circ}\text{C}$ , jeżeli rurociągiem przepływa para wodna o ciśnieniu  $4,7\cdot 10^5 \text{ Pa}$  i temperaturze 423K.

Wyznaczyć ciepło tracone dla innych temperatur otoczenia ( $-20$ ;  $-10$ ;  $10$ ;  $20$ ;  $30$  i  $40^{\circ}\text{C}$ ) i porównać.