

# WYMIANA CIEPŁA

## WYMIANA (TRANSPORT) CIEPŁA

**PRZEWODZENIE (KONDUKCJA)** - 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.

**PROMIENIOWANIE (RADIACJA)** - 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.

**KONWEKCJA (WNIKANIE, UNOSZENIE)** 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 wnikanie. Mechanizm transportu ciepła łączący wymienione sposoby ruchu ciepła nazywa się **PRZENIKANIEM CIEPŁA**.

# PRZEWODZENIE CIEPŁA

**STRUMIEŃ CIEPLNY (NATEŻENIE PRZEPIYWU CIEPŁA)  $Q_*$**   
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,

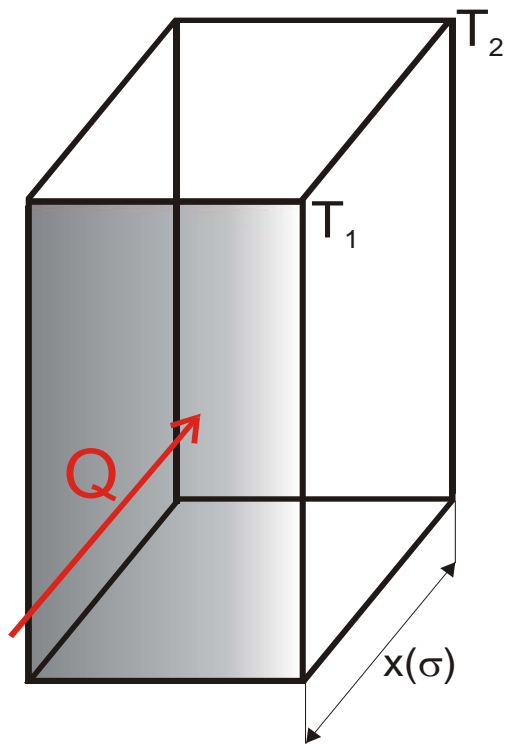
**GĘSTOŚĆ STRUMIENIA CIEPLNEGO  $q$  (OBCIĄŻENIE CIEPLNE)**

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 prostopadła do kierunku ruchu ciepła,



## PRZEWODZENIE CIEPŁA - prawo FOURIERA

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

$$\text{w kierunkach } x, y \text{ i } z \quad dQ = -\lambda \cdot A \cdot \text{grad}T \cdot (d\tau)$$

gdzie:

$T$ - temperatura,

$\lambda$ - współczynnik przewodzenia ciepła,

$\tau$ - czas,

$$\text{w jednym kierunku np. } x: \quad dQ = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \cdot d\tau$$

gdzie:  $x$  (s)-grubość warstwy,

Zakładamy  $\frac{dQ}{d\tau} = \text{const}$  - ustalone przewodzenie ciepła, otrzymujemy:

wiedząc, że **strumień cieplny** to:  $\frac{dQ}{d\tau} = Q_*$

$$\text{Otrzymujemy: } Q_* = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

$$-\frac{dT}{dx} = \frac{Q_*}{\lambda A}$$

Ośrodek płynny - równanie Kirchoffa-Furiera:

$$\frac{\delta T}{\delta \tau} + u_x \frac{\delta t}{\delta x} + u_y \frac{\delta t}{\delta y} + u_z \frac{\delta t}{\delta z} = \frac{\lambda}{c\rho_F} \left( \frac{\delta^2 t}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 t}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 t}{\delta z^2} \right)$$

Dla ciała stałego:

$$\frac{\delta T}{\delta \tau} + u_x \frac{\delta t}{\delta x} + u_y \frac{\delta t}{\delta y} + u_z \frac{\delta t}{\delta z} = 0, \text{ bo } u_x = u_y = u_z = 0$$

Dla ustalonych warunków wymiany ciepła  $\frac{\delta T}{\delta x} = 0$  otrzymuje się:

$$\frac{\lambda}{c\rho_F} \left( \frac{\delta^2 t}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 t}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 t}{\delta z^2} \right) = 0$$

gdzie:  $\frac{\lambda}{c\rho_F} = \alpha$  to **DYFUZYJNOŚĆ CIEPLNA**

# PRZEWODZENIE CIEPŁA

Przewodzenie ciepła jest USTALONE gdy

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

lub

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

lub inaczej

Jeżeli gradient temperatury jest niezależny od czasu i stały, to proces przewodzenia ciepła jest ustalony.

Przewodzenie ciepła jest NIEUSTALONE gdy

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

lub

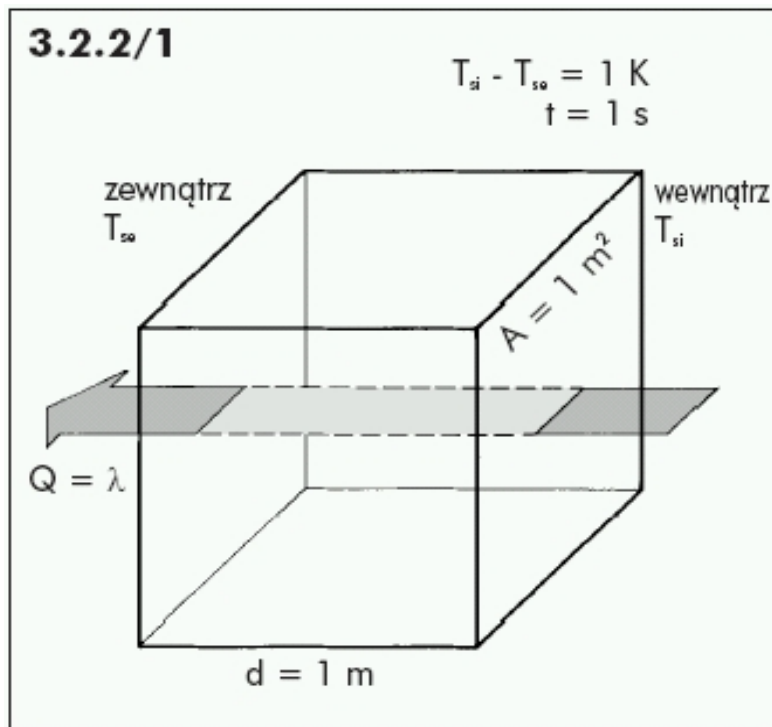
$$Q_{*1} \neq Q_{*2} \neq Q_{*3}$$

wiedząc, że:  $q = \frac{Q_*}{A}$

Stąd, gęstość strumienia ciepłego:  $q = -\lambda \frac{dT}{dx}$

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  $1\text{deg}$  (stopień), w ciągu  $1\text{s}$ .

**współczynnik przewodzenia ciepła ( $\lambda$ )** - stała materiałowa, charakterystyczna dla danego materiału, określająca zdolność materiału do przewodzenia ciepła,

# WSPÓŁCZYNNIK PRZEWODZENIA CIEPŁA

Wielkość współczynnika przewodzenia ciepła jest uzależniona od szeregu czynników:

- ✓ rodzaju wiązań chemicznych ciała stałego i jego struktury
- ✓ zdefektowania struktury
- ✓ mikrostruktury materiału
- ✓ temperatury

**Dyfuzyjność** cieplna określa przepływ ciepła w stanie nieustalonym, natomiast w stanie ustalonym funkcję tę pełni **przewodność** cieplna.

$$\frac{\lambda}{c\rho_F} = \alpha \text{ - dyfuzyjność cieplna}$$

$\rho$  - gęstość,  $c$  - ciepło właściwe



# 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 mm  
ZAŚ PROMIENIE PODCZERWONE OD 0,8 DO 40 mm.**

$$Q = Q_A + Q_R + Q_T \quad /: Q$$

$$1 = Q_A/Q + Q_R/Q + Q_T/Q \quad \text{czyli } 1 = a + r + t$$

$a$  = współczynnik absorpcji (pochłaniania)

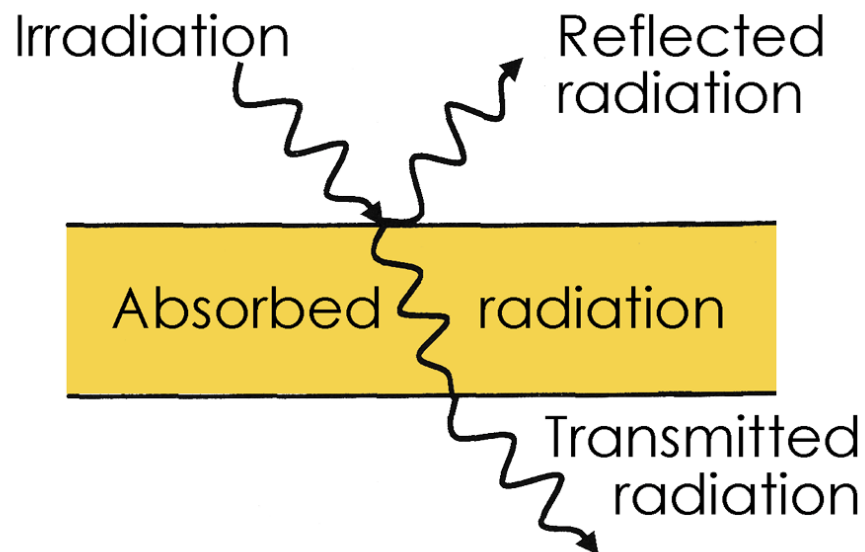
$$a = Q_A / Q$$

$r$  = współczynnik refleksji (odbicia)

$$r = Q_R / Q$$

$t$  = współczynnik transmisji

(przepuszczenia)  $t = Q_T / Q$



# CIAŁA DOSKONAŁE

$$1 = a + r + t - \text{CIAŁO SZARE}$$

najczęściej dla ciał szarych  $a + r = 1$

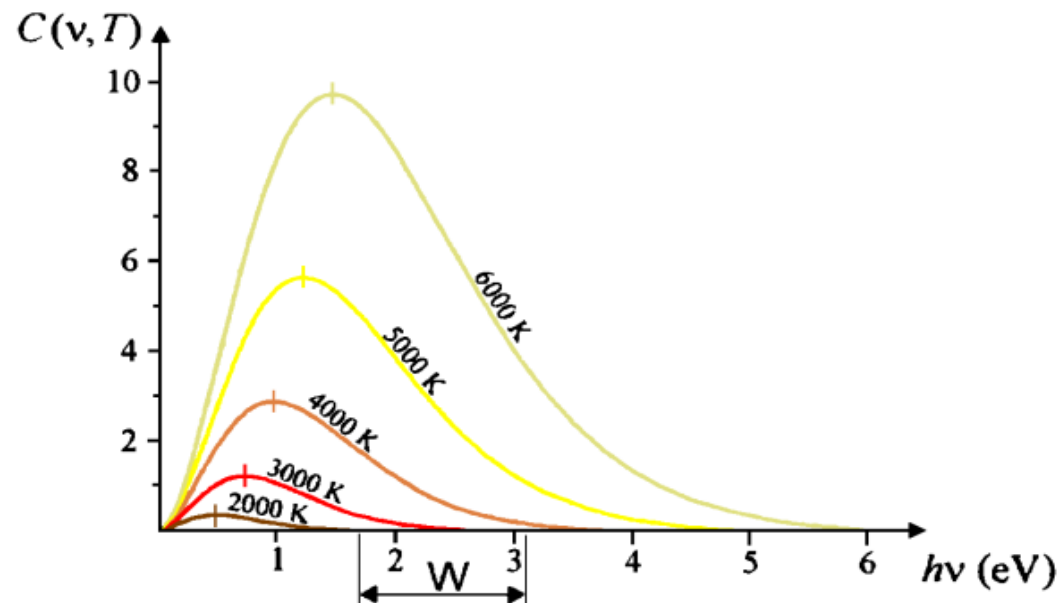
CIAŁO DOSKONAŁE CZARNE -  $a = 1$ ;  $r = 0$  i  $t = 0$

CIAŁO DOSKONAŁE PRZEźRO CZYSTE -  $t = 1$ ;  $a = 0$  i  $r = 0$

CIAŁO DOSKONAŁE BIAŁE -  $r = 1$ ;  $t = 0$  i  $a = 0$

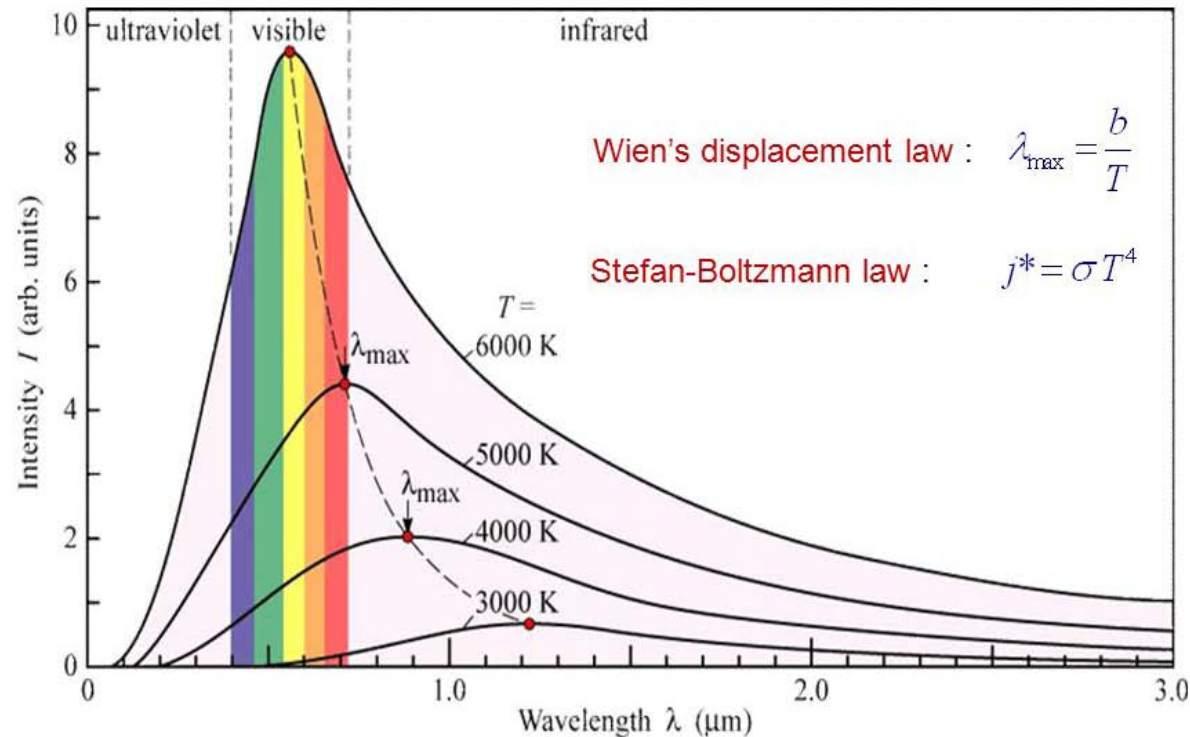


Max Planck



# PRAWA PROMIENIOWANIA

## Prawo Plancka



## Prawo Wiena

$$\lambda_{\text{max}} T = 0,002892 \text{ m} \cdot \text{K}$$

Iloczyn długości fali promieni o maksymalnym natężeniu i temperatury bezwzględnej, w której to promieniowanie zachodzi jest wielkością stałą.

# PRAWA PROMIENIOWANIA

## Prawo Kirchoffa

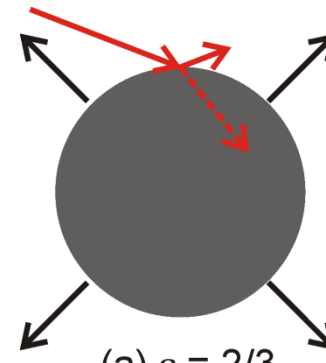
W stanie równowagi termicznej natężenie promieniowania i absorpcji energii dla danego ciała są jednakowe.

Ciało szare emituje tyle energii promienistej ile absorbowałoby ciało doskonale czarne w tej samej temperaturze:

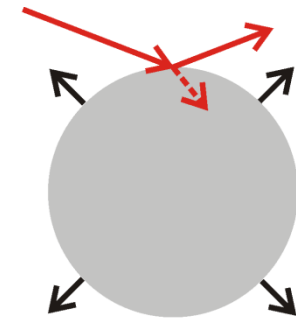
$$E_1 = a_1 E_0$$

$$E_0 = \frac{E_1}{a_1} \quad E_0 = \frac{E_2}{a_2} \quad \dots \quad E_0 = \frac{E_n}{a_n}$$

$$\frac{E_1}{a_1} = \frac{E_2}{a_2} = \dots = \frac{E_n}{a_n} = E_0$$



(a)  $\varepsilon = 2/3$

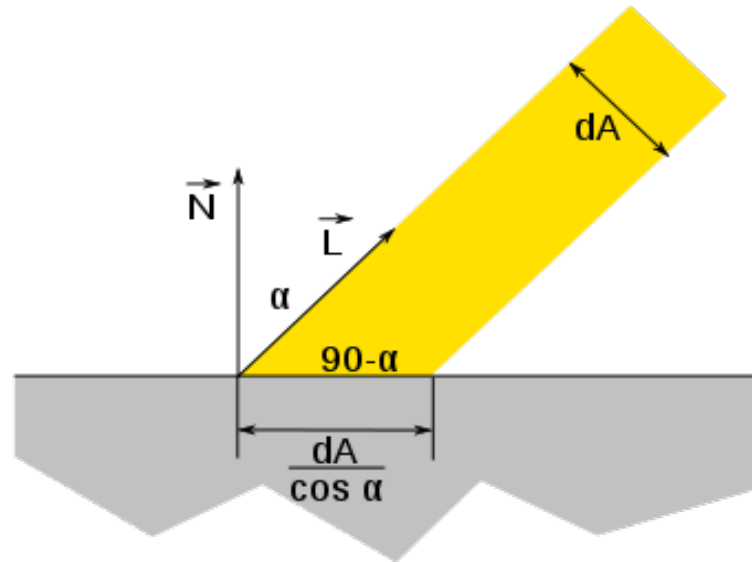


(b)  $\varepsilon = 1/3$

Stosunek natężenia promieniowania do współczynnika absorpcji jest wielkością stałą dla wszystkich ciał i równą natężeniu promieniowania ciała doskonale czarnego w temperaturze T.

# PRAWA PROMIENIOWANIA

## Prawo Lamberta



Jeżeli źródło światła jest punktowe i promieniuje izotropowo, wówczas moc promieniowania światła przypadająca na jednostkę powierzchni (natężenie oświetlenia) maleje z odległością i zależy od kąta padania.

Jeżeli promienie dane tworzą razem kąt  $\alpha$  wraz z normalną do powierzchni, wtedy oświetlenie jest proporcjonalne do  $\cos \alpha$ .

$$d^2 \Omega = \frac{\varepsilon}{\pi} C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 d\Omega dA_1 \cos \alpha \quad E_\alpha = E_n \cos \alpha$$

# PROMIENIOWANIE

Światłość  $J_\varphi$  lub natężenie światła

Jest to strumień świetlny wysyłany w danym kierunku w jednostkę kąta bryłowego.

Luminancja  $L$  lub jaskrawość

Wyraża gęstość powierzchniową światłości w danym kierunku.

$$L = \frac{dJ}{dF \cos \varphi}$$

gdzie:

$dF$  - elementarny element powierzchni promieniującej,

$\varphi$  - kąt między normalną do powierzchni promieniującej a kierunkiem wyznaczenia luminancji - kąt widzenia,

Luminancja decyduje o nasileniu subiektywnego wrażenia jasności.

# PRAWO STEFANA - BOLTZMANA

Rozwiązanie prawa Plancka daje prawo Stefana - Boltzmana (1879r.), które głosi, że natężenie promieniowania ciała doskonale czarnego jest proporcjonalne do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej tego ciała.

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

gdzie:

$\sigma_0$ - stała promieniowania  $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$      $C_0 = \sigma_0 \cdot 10^8$

**dla ciał szarych**

$$E_0 = C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

$$E = \varepsilon \cdot C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 = C \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

gdzie:

$\varepsilon$  - stopień czarności ciała czyli emisyjność,

## EMISYJNOŚĆ (STOPIEŃ CZARNOŚCI CIAŁA) $\varepsilon$

Określa zdolność materiałów do emisji i absorpcji promieniowania temperaturowego, zawiera się w granicach od 0 do 1

Emisyjność (stopień czarność) przybiera wartości  $0 < \varepsilon < 1$  zatem  $C$  wynosi od 0 do  $5,67 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K}^4]$ .

**EMISYJNOŚĆ CAŁKOWITA** - stosunek natężenia promieniowania ciała szarego do natężenie promieniowania ciała doskonale czarnego w temperaturze  $T$ .

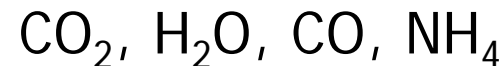
$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{C \left( \frac{T}{100} \right)^4}{C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4}$$



# PROMIENIOWANIE GAZÓW

CIECZE - natężenia promieniowania jest zbliżone do ciał stałych; ze względu na małe różnice temperatur występujące pomiędzy poszczególnymi punktami w cieczy i konwekcyjny ruch ciepła udział promieniowania cieplnego w ogólnej ilości ciepła jest mały,

GAZY - w gazach występuje selektywne promieniowanie o określonych długościach fal. Promieniowanie cieplne emitują tylko te gazy, które mają moment dipolowy



Cząsteczki gazów, które są symetryczne np.  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , są dla promieniowania cieplnego przezroczyste.

## SELEKTYWNA ABSORPCJA I EMISJA

W ciałach stałych wymiana energii promieniowania odbywa się w warstwie powierzchniowej, dla gazów w całej ich objętości, zatem:

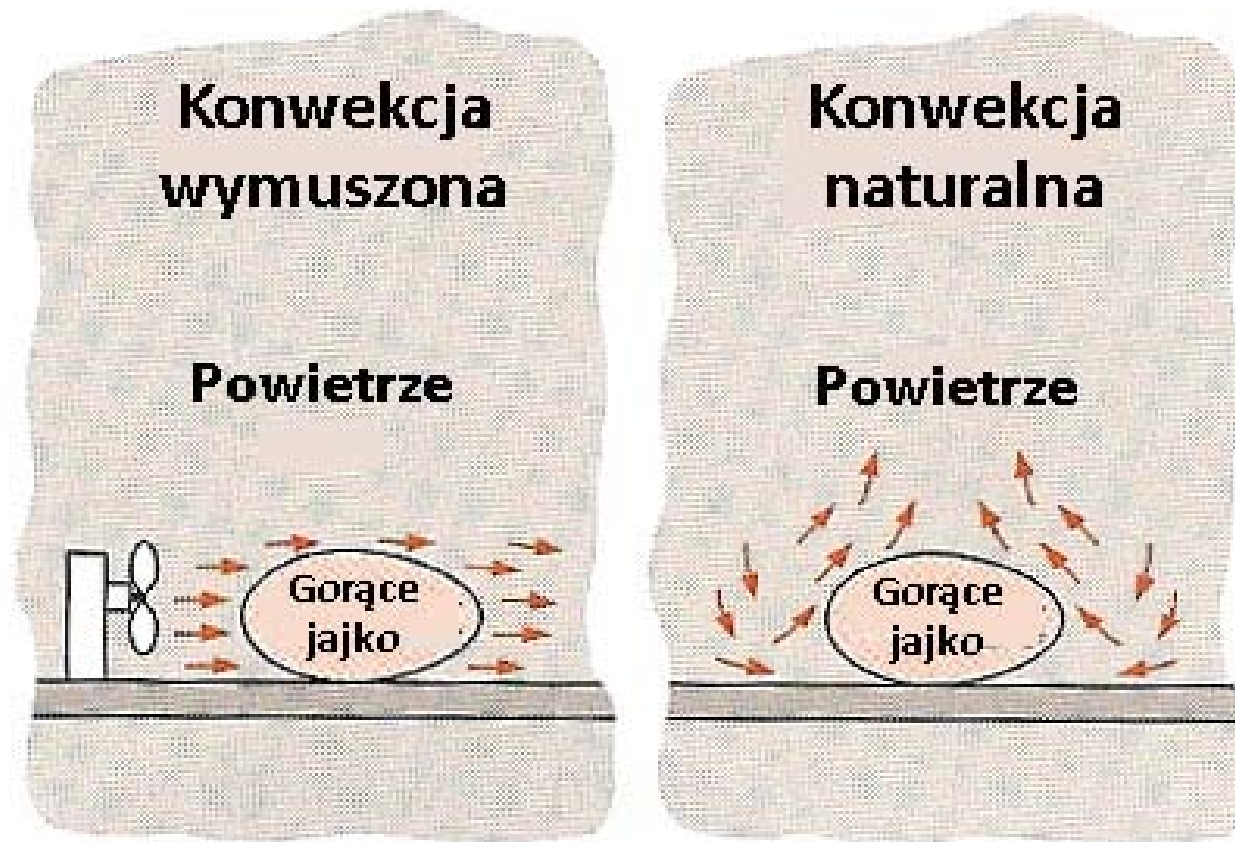
$$E_{\Delta\lambda} = f(T, L, p_c)$$

# KONWEKCJA (WNIKANIE, UNOSZENIE)

1. Związana jest z ruchem płynów.
2. Konwekcyjny ruch ciepła może się odbywać podczas uwarstwionego, burzliwego czy przejściowego przepływu płynu.
3. Występuje w przewodach transportujących płyny za pomocą wentylatora lub pompy (konwekcja wymuszona), w przewodach kominowych gdzie różnica temperatur w różnych punktach wywołuje zmianę gęstości płynu (zmianę ciśnień statycznych), co powoduje ruch płynów (konwekcja naturalna), w zbiornikach gdzie wrze ciecz lub kondensuje para (konwekcja przy zmianie stanu skupienia).
4. Zachodzi zarówno podczas ogrzewania jak i chłodzenia płynów.
5. Jest trudna do teoretycznego ujęcia przez związek ruchu płynu z ruchem ciepła. Różny charakter ruchu płynu, zmienna lepkość w różnych temperaturach, różny rozkład prędkości, wiry, kłębiania itp. wpływają na zjawisko konwekcji. Formułuje się tzw. równania kryterialne, wyznaczane na podstawie analizy wymiarowej.

# KONWEKCJA (WNIKANIE, UNOSZENIE)

5. Z technicznego punktu widzenia najważniejszym mechanizmem jest przekazywanie ciepła od (do) ścianki do (od) płynącego zarówno ruchem laminarnym jak i burzliwym płynu (WNIKANIE),



# KONWEKCJA (WNIKANIE)

Wnikanie ciepła pomiędzy powierzchnią ścianki i płynem opisuje równanie Newtona:

$$\frac{dQ}{d\tau} = Q_* = \alpha A (T_w - T)$$

gdzie:

$Q_*$  - natężenie przepływu ciepła [W],

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

$A$  - powierzchnia ścianki [m<sup>2</sup>].

$T_w$  - temperatura powierzchni ścianki [K, °C],

$T$  - temperatura płynu [K, °C],

$$\alpha = \frac{Q_*}{A \cdot (T_w - T)} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{deg}} \right]$$

# PRZENIKANIE CIEPŁA

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

PRZE(WODZENIE)+(W)NIKANIE  
= PRZENIKANIE

Przepływ ciepła jest ustalony, zatem:

$$\frac{dQ}{dt} = Q_* = \textit{const}$$

Ponieważ ruch ciepła jest ustalony  $Q_{*1} = Q_{*2} = Q_{*3}$

można równania dodać stronami, Strumień cieplny i gęstość strumienia cieplnego na drodze przenikania można, zatem wyrazić następująco:

$$Q_* = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sigma}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} A \cdot (T_1 - T_2) \quad [\text{W}]$$

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sigma}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot (T_1 - T_2) \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

$$\text{gdzie: } K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sigma}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{deg}} \right]$$

współczynnik przenikania ciepła  
deg (z ang. degree)- stopień °C, K

$$Q_* = K \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \text{ [W]} \quad q = K \cdot (T_1 - T_2) \text{ [W/m}^2 \text{]}$$

zatem:

$$\frac{Q_*}{A} = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{1}{K}}$$

gdzie,  $1/K$  to opór termiczny  $R_t$  równy sumie oporów: ośrodka ogrzewającego, ścianki i ośrodka ogrzewanego :

$$\frac{1}{K} = R_t = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sigma}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

**WSPÓŁCZYNNIK PRZENIKANIA K:**

$$K = \frac{Q_*}{A(T_1 - T_2)} = \left[ \frac{W}{m^2 \cdot deg} \right]$$

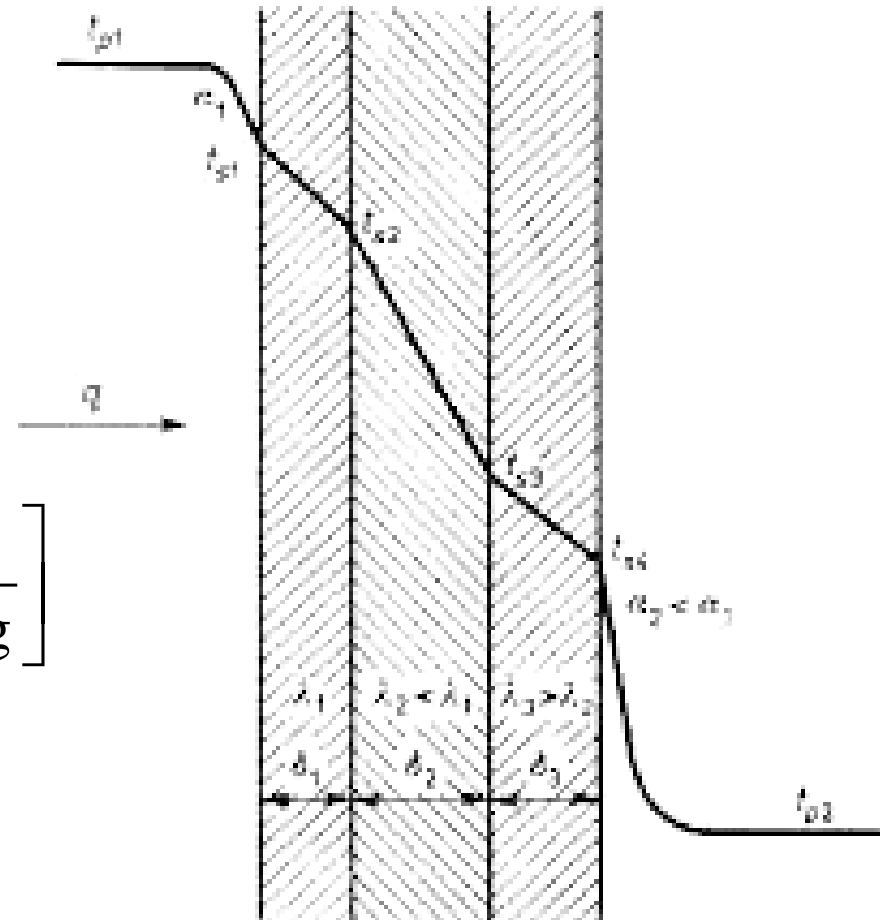
Współczynnik  $K$  oznacza tę ilość ciepła jaka przenika przez ściankę od ośrodka grzejącego do ogrzewanego gdy powierzchnia ścianki wynosi  $1\text{m}^2$  a spadek temperatury  $1\text{ deg}$ .

## PRZENIKANIE PRZEZ ŚCIANKĘ PŁASKĄ WIELOWARSTWOWĄ

$$Q_* = K \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \text{ [W]}$$

$$q = K \cdot (T_1 - T_2) \text{ [W/m}^2 \text{]}$$

gdzie: 
$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\sigma}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{deg}} \right]$$





# PRZENIKANIE PRZEZ ŚCIANKĘ CYLINDRYCZNĄ JEDNOWARSTWOWĄ

1. Wnikanie od ośrodka grzejjego do ścianki

$$Q_{*1} = \alpha_1 2\pi r_1 L (T_1 - T_{w1})$$

2. Przewodzenie przez ściankę

$$Q_{*2} = \frac{\pi L (T_{w1} - T_{w2})}{\frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

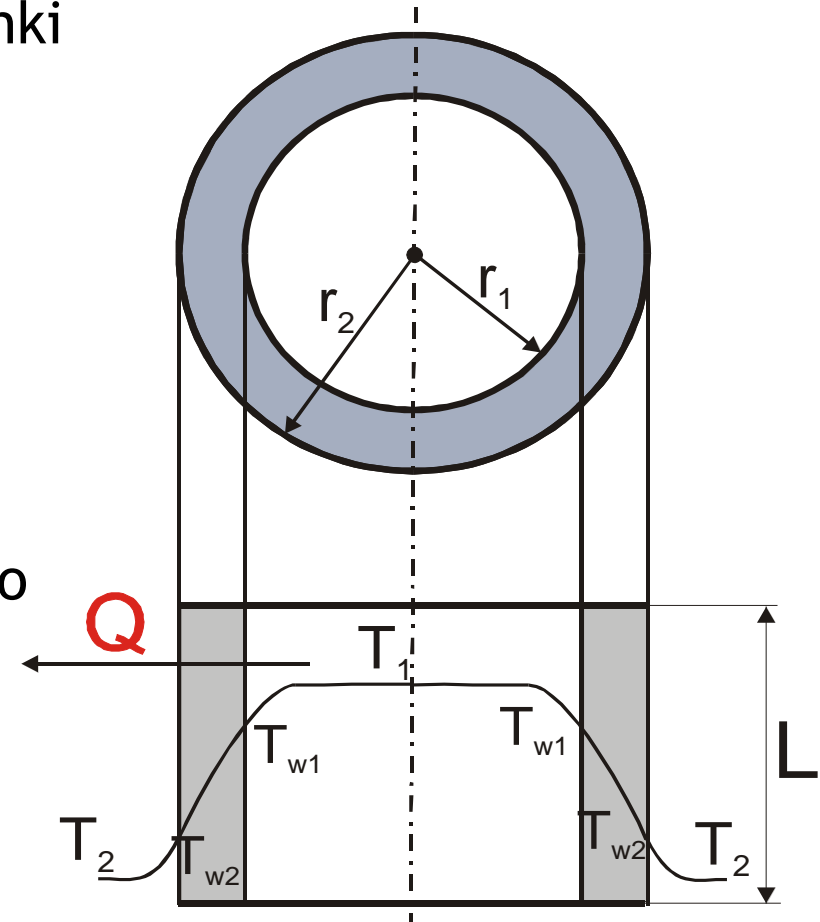
3. Wnikanie od ścianki do ośrodka ogrzewanego

$$Q_{*3} = \alpha_2 2\pi r_2 L (T_{w2} - T_2)$$

Zsumowanie równań na spadki temperatur dla każdego przypadku daje:

$$Q_* = K_d \cdot \pi \cdot L \cdot (T_1 - T_2) \text{ [W]}$$

$$K_d = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot 2r_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot 2r_2}} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{deg}} \right]$$



$$K_d = \frac{Q_*}{\pi L(T_1 - T_2)} = \left[ \frac{W}{m \cdot deg} \right]$$

Współczynnik  $K_d$  oznacza tę ilość ciepła jaka przenika przez ściankę od ośrodka grzejnego do ogrzewanego gdy długość rury wynosi 1m a spadek temperatury 1 deg.

**Sumaryczny opór cieplny podczas ruchu ciepła przez ściankę cylindryczną:**

$$\frac{1}{K_d} = R_t = \frac{1}{\alpha_1 2r_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_2 2r_2}$$

**PRZENIKANIE PRZEZ ŚCIANKĘ CYLINDRYCZĄ WIELOWARSTWOWĄ**

$$K_d = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot 2r_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot 2r_2}} \left[ \frac{W}{m \cdot deg} \right]$$

W przypadku ścianek cylindrycznych można stosować uproszczenia:

Gdy rura jest cienkościenna i gdy  $\Delta T$  jest nieznaczna można stosować wzory dla ścianki płaskiej.

Warunek  $d_{ZEWN}/d_{WEWN} \leq 2$ .

$$Q_* = K \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \text{ [W]} \quad A = 2\pi r_x L$$

Wówczas we wzorze na powierzchnię za  $r_x$  podstawia się:

jeżeli  $\alpha_1 \gg \alpha_2$  to  $r_x = r_2$  - promień zewnętrzny rury,  
(przenikanie od wnętrza ścianki do otoczenia)

jeżeli  $\alpha_1 \approx \alpha_2$  to:

$$r_x = \frac{r_1 + r_2}{2}$$

jeżeli  $\alpha_1 \ll \alpha_2$  to  $r_x = r_1$   
- promień wewnętrzny rury.

(przenikanie od otoczenia do wnętrza ścianki)

