PROMIENIOWANIE CIEPLNE

Podstawy teoretyczne

Promieniowanie cieplne jest promieniowaniem tego samego rodzaju co promieniowanie świetlne, więc rządzą nimi te same prawa.

Promieniowanie cieplne opisują następujące prawa:

1. Prawo Kirchoffa
2. Prawo Maxa Plancka
3. Prawo przesunięć Wiena
4. Prawo Stefana-Boltzmanna
5. Prawo Lamberta

Prawo Kirchhoffa

Prawo Kirchhoffa ujmuje zależność pomiędzy zdolnością ciała do pochłaniania promieniowania oraz do emitowania promieniowania.

„W równowadze cieplnej zdolność do pochłaniania promieniowania równa jest zdolności do emitowania promieniowania".

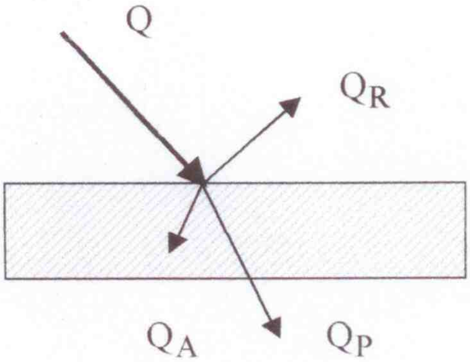
$$A = \varepsilon \tag{1}$$

gdzie:

A - absorpcyjność powierzchni,

ε - emisyjność powierzchni

Rozpatrzymy bilans energetyczny najogólniejszego przypadku, gdy dowolne ciało znajduje się w polu działania promieni cieplnych (rys. 1.)



Rys. 1. Schemat objaśniający bilansowanie energii promieniowania

Przyjmijmy, że Q jest energią promieni padających. Część promieni ulega odbiciu - Q_R, część – jeżeli ciało jest przezroczyste – może przyjść przez ciało - Q_P, a wreszcie część energii ulega absorpcji - Q_A. Zbilansowanie tych energii daje równanie

$$Q = Q_A + Q_R + Q_P \tag{2}$$

gdzie:

Q_A - ciepło pochłonięte (absorpcyjność),

Q_R - ciepło (energia) odbite (refleksyjność),

Q_P - ciepło przepuszczone (przepuszczalność).

Równanie (2) możemy przedstawić w postaci bezwymiarowej

$$1 = \frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_P}{Q} = A + R + P \tag{3}$$

$$1 = A + R + P \tag{4}$$

gdzie:

A - absorpcyjność,

R - refleksyjność,

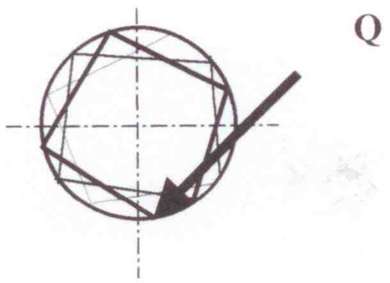
P - przepuszczalność.

Wartości A, R i P będą ułamkami wyrażającymi, w jakiej części dostarczona energia promieniowania jest **absorbowana, odbita czy przepuszczona.**

Możemy założyć trzy skrajne przypadki:

a) A (absorpcja) **= 1,** **R** (refleksja) **= 0,** **P** (przepuszczalność) **= 0;**

Ciało, które by się w ten sposób zachowywało, będzie tzw. ciałem doskonale czarnym. **Ciało doskonale czarne**, to ciało, które w 100 % pochłania padające na niego promieniowanie. Przykładami ciał doskonale czarnych są: półprzestrzeń, sadza – pochłaniają promieniowanie w 99 %. **Laboratoryjnym przykładem ciała doskonale czarnego jest kula, jej wnętrze, w którym zostaje pochłonięta cała energia promieniowania.**



Rys. 2. Układ zastępujący ciało doskonale czarne, gdzie cała energia promieniowania zostaje pochłonięta

b) **R** (refleksja) = **1,** **A** (absorpcja) = **0,** **P** (przepuszczalność) = **0;**

Ciało doskonale białe, cała energia zostaje odbita.

c) **P** (przepuszczalność) = **1,** **A** (absorpcja) = **0,** **R** (refleksja) = **0;**

Ciało doskonale przezroczyste, które przepuszcza bez strat całą energię promieniowania.

W przyrodzie nie istnieją ciała odpowiadające wyidealizowanym pojęciom doskonałej czerni, doskonałej bieli i doskonałej przezroczystości. Zachowanie się ciał rzeczywistych zależy od własności ciała, obok innych parametrów, jak np. długość fali, temperatura itd.

Prawo M. Plancka

Prawo Plancka **ujmuje zależność między energią wysyłaną przez ciało promieniujące, doskonale czarne, jego temperaturą i długością fali emitowanego promieniowania.**

$$E_{0\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5\left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1\right)} \qquad \left[\frac{W}{m^3}\right] \tag{5}$$

lub

$$E_{0\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5\left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1\right]} \qquad \left[\frac{W}{m^3}\right] \tag{6}$$

gdzie:

$$C_1 = 2\pi c^2 h ; \qquad C_2 = \frac{h c}{k} ;$$

$E_{0\lambda}$ - gęstość emisji monochromatycznego promieniowania (czyli dotyczącego jednej długości fali), W/m^3,

λ - długość fali (m),

T	-	**temperatura bezwzględna, K,**

c - prędkość światła, $c = 3 \cdot 10^8$, m/s,

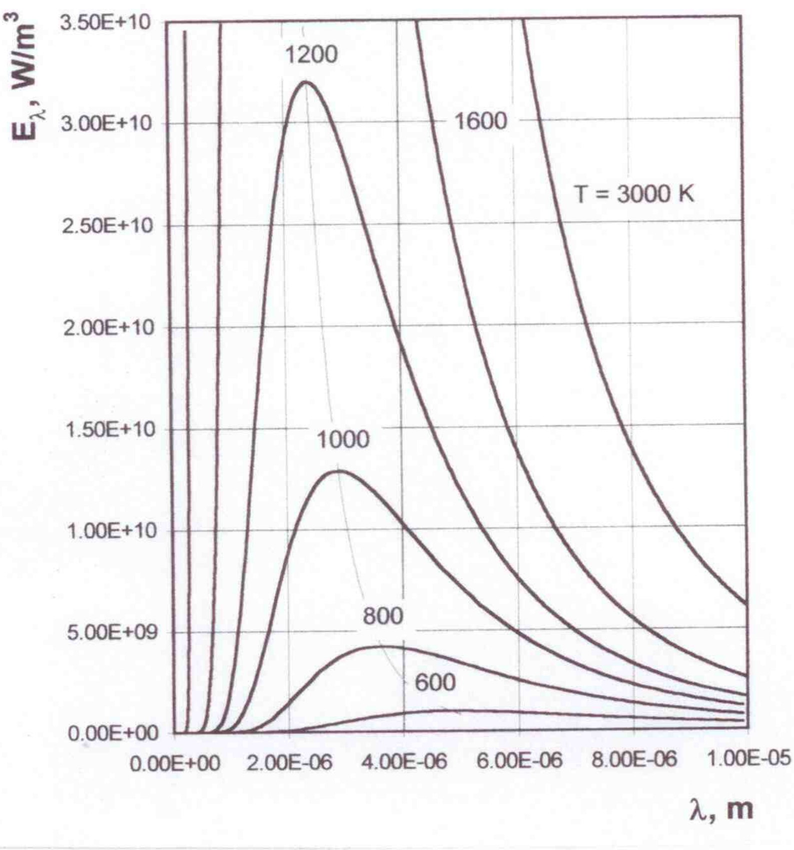
h - stała Plancka, $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Js,

k - stała Boltzmanna, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$, J/K.

C_1 - pierwsza stała Plancka, $C_1 = 3.74 \cdot 10^{-16}$, $W \cdot m^2$,

C_2 - druga stała Plancka, $C_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2}$, $m \cdot K$.

Ilustracją wzoru (6) jest rys. 3.



Rys. 3. Rozkład energii promieniowania wg prawa Plancka

Prawo Plancka określa rozkład energii E_λ emitowanej przez jednostkę powierzchni doskonale czarnej. Rys. 3 ilustruje te zależność. Widać, że im wyższa jest temperatura emisji, tym większą intensywność wykazuje promieniowanie. Widać również, że im wyższa jest temperatura, tym bardziej maksimum intensywności promieniowania przesuwa się w lewo, tj. ku promieniowanie świetlnemu. Badaniem położenia tego maksimum przy danej temperaturze zajmował się Wien.

Prawo przesunięć Wiena

Prawo Wiena dotyczy maksymalnej długości fali λ_m (λ_{max}), przy której w określonej temperaturze T natężenie promieniowania osiąga wartość maksymalną $E_{0\lambda}$. Tę maksymalną wartość gęstości strumienia emisji monochromatycznego ciała doskonale czarnego osiąga się wówczas, gdy spełniony jest warunek, zwany prawem Wiena

$$\lambda_m \cdot T = 2.8976\ [mm \cdot K] \cong 2.9 \cdot 10^{-3}\ [m \cdot K] \tag{7}$$

Prawo Stefana-Boltzmanna

Prawo Stefana-Boltzmanna określa całkowitą ilość energii wypromieniowanej w określonej temperaturze w całym zakresie długości fali od 0 do ∞

$$q_0 = E_0 = \int_0^\infty E_{0\lambda}\, d\lambda = \sigma_0 T^4 \tag{8}$$

lub

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4 = \sigma_0 T^4 \tag{9}$$

gdzie:

$$\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4}\right]; \qquad C_0 = 5.67 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4}\right]$$

przeliczenie $10^8 = 100^4$

σ_0 - stała promieniowania ciała doskonale czarnego (stała Boltzmanna), stosowana w fizyce,

C_0 - techniczna stała promieniowania ciała doskonale czarnego, $[W/(m^2\,K^4)]$

Prawo Lamberta

Gęstość strumienia cieplnego wypromieniowana w kierunku do normalnej do powierzchni ujmuje wzór

$$q_n = \frac{q_0}{\pi} \tag{10}$$

$$q_0 = \pi\, q_n \tag{11}$$

Gęstość strumienia emisji z płaskiej powierzchni we wszystkich kierunkach jest π razy większa od intensywności emisji w kierunku prostopadłym do tej powierzchni.

Ciało szare

Stosunek monochromatycznego natężenia promieniowania E_λ o danej długości fali λ dla ciała nieczarnego do monochromatycznego natężenia promieniowania $E_{0\lambda}$ przy tej samej długości fali dla ciała czarnego znajdującego się w tej samej temperaturze nosi nazwę **emisyjności monochromatycznej ε_λ. Współczynnik ε_λ zwany jest również zdolnością emisji lub stopniem czarności.**

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{0\lambda}} \tag{12}$$

Ciało, którego emisyjność zachowuje stałą wartość nosi nazwę **ciała szarego.** Emisyjność ciała szarego dla całkowitego zakresu promieniowania zwana jest emisyjnością całkowitą, która jest równa ilorazowi natężenia promieniowania w pełnym zakresie dla ciała szarego i dla ciała doskonale czarnego znajdującego się w tej samej temperaturze.

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} < 1 \tag{13}$$

Emisyjność ciała szarego **jest zawsze mniejsza od jedności**.

Uwzględniając zależność (12), **prawo Stefana-Boltzmanna dla ciała szarego przyjmuje postać**

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4 \tag{14}$$

Wymiana ciepła przez promieniowanie między ciałami stałymi

1. Dwie płyty równoległe

Zakładamy, że szare płyty są tak blisko położone i tak duże (założeniem ścisłym jest układ płyt nieskończenie dużych), że całe ich promieniowanie ulega wymianie. Zakładamy, że temperatura jednej płyty jest wyższa od drugiej i że posiadają one różne współczynniki emisyjności ε_1 oraz ε_2. **Natężenie strumienia cieplnego** dla takiego układu ujmuje wzór

$$q_{1,2} = C_{1,2}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \qquad \left[\frac{W}{m^2}\right] \tag{15}$$

gdzie: $\boxed{T_1,\ T_2\ \text{- temperatury bezwzględne, K.}}$

$$C_{1,2} = \varepsilon_{1,2} \cdot C_0 = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}} \tag{16}$$

gdzie:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}; \qquad C_1 = C_0\,\varepsilon_1; \qquad C_2 = C_0\,\varepsilon_2$$

C_1 - stała promieniowania ciała „1”,

C_2 - stała promieniowania ciała „2”,

C_0 - stała promieniowania ciała doskonale czarnego,

$C_0 = 5.67,\ W/\left(m^2 \cdot K^4\right)$,

$C_{1,2}$ - wypadkowa stała promieniowania ciał „1” i „2”,

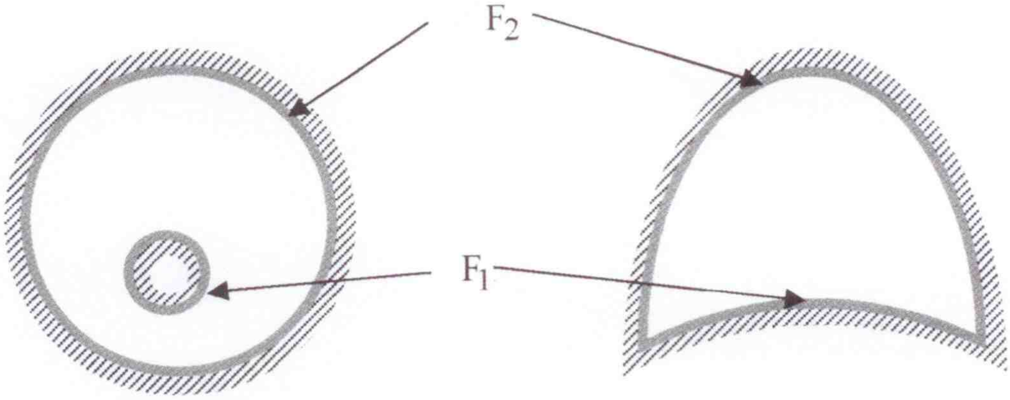
ε_1 - współczynnik emisyjności ciała „1”,

ε_2 - współczynnik emisyjności ciała „2”,

$\varepsilon_{1,2}$ - zastępczy współczynnik emisyjności ciał „1’ i „2”.

2. Jedna powierzchnia tworząca powierzchnię zamkniętą dokoła drugiej

a) wymiana ciepła na drodze promieniowania pomiędzy powierzchnią F_1 (nie wklęsłą, czyli płaską albo wypukłą), a otaczającą ją powierzchnią F_2



Rys. 4. Różne przypadki wymiany ciepła przez promieniowanie między powierzchnią F_1 nie wklęsłą a powierzchnią ją otaczającą F_2

$$q_{1,2} = F_1 \cdot C_{1,2}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \quad [W] \tag{17}$$

przy czym

F_1 - powierzchnia ciała o wyższej temperaturze, m^2,

$$C_{1,2} = \varepsilon_{1,2}\, C_0; \qquad \varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \tag{18}$$

b) wymiana ciepła na drodze promieniowania pomiędzy powierzchnią F_1 a powierzchnią F_2, przy czym $F_2 >> F_1$ (np. hala fabryczna)

$$q_{1,2} = F_1 \cdot C_{1,2}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \quad [W] \tag{19}$$

przy czym

$$C_{1,2} = \varepsilon_{1,2}\, C_0; \qquad \varepsilon_{1,2} = \varepsilon_1 \tag{20}$$