



Wprowadzenie teoretyczne

Doświadczenie „EMISYJNOŚĆ TERMICZNA”

Każde ciało o temperaturze powyżej zera bezwzględnego emituje promieniowanie elektromagnetyczne, zwane promieniowaniem cieplnym. Ten proces nazywamy **emisją termiczną**. Widmo i intensywność tego promieniowania zależą od temperatury oraz od właściwości powierzchni ciała. **Emisyjność** ε to bezwymiarowy współczynnik określający, w jakim stopniu dane ciało emituje promieniowanie ciepłe w porównaniu do ciała doskonale czarnego. Emisyjność przyjmuje wartości w zakresie: $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

Ciało doskonale czarne to model idealnego obiektu, który całkowicie pochłania padające na nie promieniowanie, nie odbija go ani nie przepuszcza. **Prawo Plancka** opisuje, ile energii promieniuje **ciało doskonale czarne** na każdej długości fali przy danej temperaturze. Jest to **widmowa gęstość mocy promieniowania** – czyli jak intensywnie ciało promieniuje w różnych zakresach widma. Wzór (w funkcji długości fali λ):

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1)$$

gdzie:

$B(\lambda, T)$ – natężenie promieniowania ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$),

h – stała Plancka,

c – prędkość światła,

k – stała Boltzmanna,

T – temperatura bezwzględna,

λ – długość fali.

Całkowita emisja promieniowania takiego ciała opisana jest **prawem Stefana-Boltzmannia**:

$$E = \int_0^{\infty} B(\lambda, T) d\lambda = \sigma \cdot T^4, \quad (2)$$

gdzie:

E – całkowita emisja, (scałkowana po wszystkich długościach fal) [W/m^2],

σ – stała Stefana-Boltzmannia ($\approx 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$),

T – temperatura bezwzględna [K].

Ciało doskonale czarne, które nie odbija żadnego promieniowania może być jednak widoczne w ciemności dzięki emisji termicznej – wypromieniowywaniu energii związanej z temperaturą tego ciała. To promieniowanie powstaje na skutek ruchów termicznych cząsteczek i atomów. Ciało o wyższej temperaturze będzie wypromieniowywać głównie fotony o wyższej energii – mniejszej długości fali. Opisuje to **Prawo Przesunięcia Wiena**:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (3)$$

gdzie:

λ_{\max} – długość fali maksymalnej emisji,

$b \approx 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ – stała Wiena,

T – temperatura (w kelwinach).

Ciało szare – model uproszczony ciała rzeczywistego, dla którego emisyjność ε jest stała i niezależna od długości fali. W ogólności nie jest to prawdą dla wielu materiałów, ale przybliżenie stałego ε jest użyteczne.

Wiele materiałów zachowuje się jak ciała szare w ograniczonym zakresie długości fal, np. w zakresie podczerwieni rejestrowanym przez kamerę termowizyjną (8–14 μm).

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4)$$

Powierzchnie ciał rzeczywistych mogą również odbijać promieniowanie z otoczenia. Łączne promieniowanie rejestrowane przez kamerę termowizyjną L_{cam} będzie sumą:

$$L_{cam} = \varepsilon \cdot L_{własne} + \rho \cdot L_{otoczenia} + \tau \cdot L_{tło} \quad (5)$$

gdzie:

ε – emisyjność termiczna,

ρ – współczynnik odbicia ($\rho = 1 - \varepsilon$, dla $\tau = 0$),

τ – współczynnik transmisji, dla ciał nieprzezroczystych $\tau = 0$,

$L_{własne}$ – promieniowanie, jakie byłoby emitowane przez próbkę, gdyby była doskonale czarna

$L_{otoczenia}$ – promieniowanie odbite od próbki, pochodzące z otoczenia (np. od ścian, lamp),

$L_{tło}$ – promieniowanie tła za próbką.

Dla ciał o niskiej emisyjności (np. metale o błyszczącej, wypolerowanej powierzchni), odbite promieniowanie z otoczenia może znacznie zaburzać odczyt temperatury.

Dla dwóch nieprzezroczystych ciał ($\tau = 0$), które mają tę samą temperaturę T , ale różne zdolności emisyjne ε_1 i ε_2 , promieniowanie tych ciał, obserwowane w kamerze termowizyjnej, można opisać zależnościami:

$$L_{1cam} = \varepsilon_1 \cdot L_{własne}(T) + (1 - \varepsilon_1) \cdot L_{otoczenia} \quad \text{oraz} \quad L_{2cam} = \varepsilon_2 \cdot L_{własne}(T) + (1 - \varepsilon_2) \cdot L_{otoczenia}$$

gdzie $L_{własne}(T)$ jest promieniowaniem termicznym, zależnym wyłącznie od temperatury ciała T .

Odejmując od siebie te równania otrzymamy $L_{1cam} - L_{2cam} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot L_{własne}(T) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot L_{otoczenia}$,

a po przekształceniach $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{L_{1cam} - L_{2cam}}{L_{własne}(T) - L_{otoczenia}}$.

Iloraz promieniowania będzie taki sam jak iloraz temperatur w skali bezwzględnej, stąd:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{T_{1cam} - T_{2cam}}{T_{próbek} - T_{otoczenia}} \quad (6)$$

Znając współczynnik emisyjności ε_w jakiegoś wzorcowego, matowego materiału np. bakelitu, możemy wyznaczyć współczynnik emisyjności ε_x błyszczącego materiału o dowolnym stopniu wypolerowania ze wzoru:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_w \cdot \frac{T_{wcam} - T_{xcam}}{T_{próbek} - T_{otoczenia}} \quad (7)$$

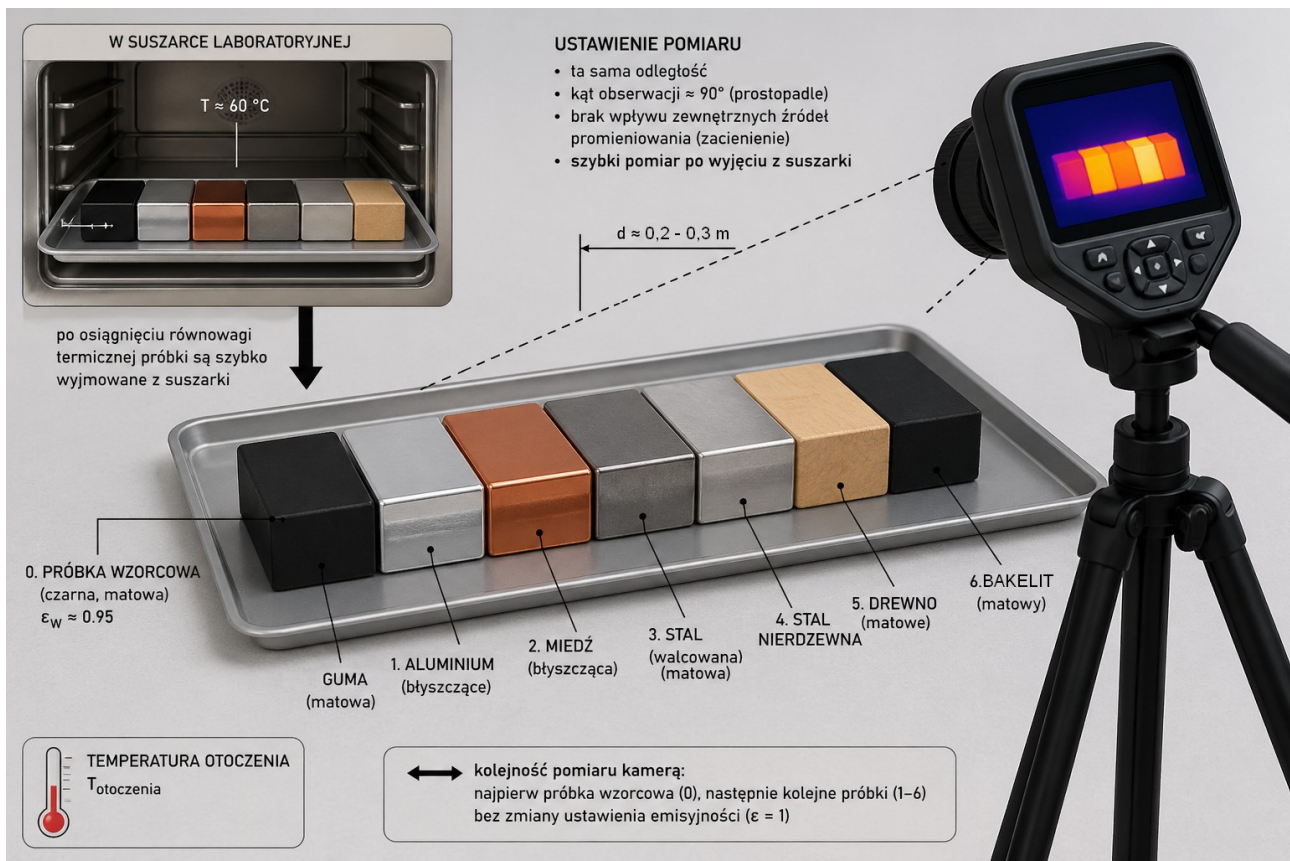
gdzie:

T_{wcam} – temperatura wzorcowej próbki o emisyjności ε_w ,

T_{xcam} – temperatura próbki o nieznannej emisyjności ε_x ,

$T_{próbek}$ – temperatura próbek odczytana z termostatu suszarki,

$T_{otoczenia}$ – temperatura powietrza w sali laboratoryjnej.



Celem ćwiczenia jest eksperymentalne wyznaczenie współczynnika emisyjności termicznej wybranych ciał stałych, poznanie wpływu emisyjności na odczyt temperatury w kamerze termowizyjnej i opanowanie metody porównawczej z wykorzystaniem materiału wzorcowego o znanej emisyjności. W tym ćwiczeniu zastosowana zostanie metoda porównawcza, polegająca na porównaniu temperatury odczytanej z próbki badanego materiału do temperatury próbki wzorcowej, której emisyjność jest znana, a temperatura rzeczywista — zakładana jako identyczna (dzięki długotrwałemu nagrzewaniu w tych samych warunkach).

Pytania do przygotowania:

„EMISYJNOŚĆ TERMICZNA”

1. Czym jest emisyjność termiczna i jakie wartości może przyjmować?
2. Czym różni się ciało doskonale czarne od ciała szarego?
3. Jakie znaczenie praktyczne ma wartość emisyjności w pomiarach temperatury?
4. Jak zmienia się emisyjność różnych materiałów i powierzchni (np. metal, ceramika, szkło)?
5. Na czym polega prawo Stefana–Boltzmana i jaką ma postać matematyczną?
6. Co opisuje prawo przesunięcia Wiena i jak wykorzystuje się je w praktyce?
7. Dlaczego temperatura ciała wpływa na długość fali, w której emituje ono najwięcej promieniowania?
8. Jakie praktyczne zastosowanie ma prawo przesunięcia Wiena w diagnostyce termicznej?
9. Jak działa kamera termowizyjna i na jakiej zasadzie mierzy temperaturę?
10. Czym różni się pomiar temperatury kamerą termowizyjną od pomiaru pirometrem?
11. Jakie czynniki mogą wpłynąć na dokładność pomiaru temperatury przy użyciu pirometru?
12. Dlaczego ważne jest ustawienie odpowiedniej emisyjności w urządzeniach pomiarowych?
13. Jakie ograniczenia występują podczas pomiarów temperatury obiektów silnie refleksyjnych (np. wypolerowanych metali)?
14. Jaka długość fali odpowiada maksimum promieniowania ciała o temperaturze pokojowej (~ 300 K)?
15. Dlaczego Słońce, mając temperaturę powierzchni ok. 5800 K, emituje najwięcej promieniowania w zakresie światła widzialnego?
16. Oblicz (lub oszacuj), jaka jest długość fali maksymalnej emisji dla ciała o temperaturze 1000 K. W jakim zakresie promieniowania elektromagnetycznego się ona znajduje?

Wskazówki do wykonania pomiarów

1. Używana aparatura to:
 - Suszarka laboratoryjna z regulowaną temperaturą
 - Kamera termowizyjna – należy pobrać od pracownika technicznego
 - Zestaw próbek z różnych materiałów (np. aluminium, miedź, stal nierdzewna, drewno, guma)
 - Termometr do wyznaczenia temperatury otoczenia
2. W kamerze termowizyjnej ustaw wartość emisyjności $\varepsilon = 1$ (jest to ustawienie celowe — umożliwia późniejsze wyznaczenie rzeczywistej emisyjności materiałów poprzez porównanie wskazań).
3. Umieść wszystkie próbki (badane i wzorcową) na tacy w suszarce laboratoryjnej.
4. Jako próbki wzorcowej użyj materiału, który jest czarny i matowy np. gumy lub bakelitu, o znanej emisyjności $\varepsilon_W = 0.95$.
5. Ustaw temperaturę suszarki T na ok. $60 - 70^\circ\text{C}$.
6. Po co najmniej 30 minutach, lub po osiągnięciu równowagi termicznej przez próbki, otwórz suszarkę i szybko wyjmij tacę z próbkami.
7. Ustaw kamerę termowizyjną tak, aby patrzyła na próbki z tej samej odległości (20 – 30 cm), przy takim samym kącie i bez wpływu zewnętrznego źródła promieniowania – ogranicz możliwość rejestrowania światła odbitego.
8. W jak najkrótszym czasie odczytaj przy pomocy kamery termowizyjnej: temperaturę próbki wzorcowej $T_{W\text{ cam}}$, oraz, bez zmiany ustawień emisyjności, zmierz temperatury pozostałych próbek $T_{X\text{ cam}}$.
9. Wyniki wpisz do tabeli notując dla rozróżnienia kolor/cechy materiałów (np. błyszczący, matowy, utleniony, szary itp.)
10. Oblicz rzeczywistą emisyjność pozostałych materiałów na podstawie wzoru (7) i oszacuj jego niepewność

Uwagi:

- Próbki powinny mieć zbliżone rozmiary i kształty.
- Należy unikać dotykania powierzchni próbki po wyjęciu z suszarki — może to zmienić odczyt temperatury.
- Czas pomiaru po wyjęciu z suszarki powinien być możliwie krótki.
- Pomiaru należy wykonać w zacienionym miejscu, by ograniczyć wpływ światła odbitego na odczyt temperatury.

„EMISYJNOŚĆ TERMICZNA”

Temperatura w suszarce

$$T_{\text{próbek}} =$$

$$\Delta T_{\text{próbek}} =$$

Temperatura w pomieszczeniu

$$T_{\text{otoczenia}} =$$

$$\Delta T_{\text{otoczenia}} =$$

Oblicz wartości emisyjności próbek 1 – 8:

$$\varepsilon_X = \varepsilon_W \frac{T_{W\text{cam}} - T_{X\text{cam}}}{T_{\text{próbek}} - T_{\text{otoczenia}}}$$

Dla wybranej próbki oblicz niepewność pomiarową emisyjności:

$$\Delta \varepsilon_X = \frac{A}{B} \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2}, \text{ gdzie:}$$

$$A = T_{W\text{cam}} - T_{X\text{cam}},$$

$$B = T_{\text{próbek}} - T_{\text{otoczenia}},$$

$$\Delta A = \sqrt{(\Delta T_{W\text{cam}})^2 + (\Delta T_{X\text{cam}})^2},$$

$$\Delta B = \sqrt{(\Delta T_{\text{próbek}})^2 + (\Delta T_{\text{otoczenia}})^2}$$

0. Próbka wzorcowa, czarna, matowa $T_{W\text{cam}} =$ $\Delta T_{W\text{cam}} =$	1. Kolor/cecha $T_{1\text{cam}} =$ $\Delta T_{1\text{cam}} =$	2. Kolor/cecha $T_{2\text{cam}} =$ $\Delta T_{2\text{cam}} =$
3. Kolor/cecha $T_{3\text{cam}} =$ $\Delta T_{3\text{cam}} =$	4. Kolor/cecha $T_{4\text{cam}} =$ $\Delta T_{4\text{cam}} =$	5. Kolor/cecha $T_{5\text{cam}} =$ $\Delta T_{5\text{cam}} =$
6. Kolor/cecha $T_{6\text{cam}} =$ $\Delta T_{6\text{cam}} =$	7. Kolor/cecha $T_{7\text{cam}} =$ $\Delta T_{7\text{cam}} =$	8. Kolor/cecha $T_{8\text{cam}} =$ $\Delta T_{8\text{cam}} =$

Wnioski, na przykład:

Pomimo przetrzymywania próbek w tej samej temperaturze, odczytana wartość z kamery termowizyjnej wynosiła od do

Różnice stanowią % wartości temperatury próbki odczytanej z ustawień suszarki.

Najniższą emisyjność mają próbki (wymień cechy)

Najwyższą emisyjność mają próbki (wymień cechy)

Pomiary temperatury, wykonane kamerą termowizyjną bez dostosowywania emisyjności, są najbardziej zafałszowane dla materiałów