Ciało Doskonale Czarne

Kacper Kłos

27 marca 2025

Abstract

1 Podstawy Teoretyczne

Jedną z podstawowych metod wymiany ciepła między ciałami jest promieniowanie. Promieniujące ciało można opisać za pomocą 3 stałych:

- współczynnik absorbcji A - ułamek promieniowania jaki zostaje wchłonięty po padnięciu na ciało.
- współczynnik odbicia R - ułamek promieniowania jaki zostaje odbity po padnięciu na ciało.
- współczynnik transmisji T - ułamek promieniowania jaki zostaje przepuszczony przez ciał po padnięciu na nie.

Wszystkie stałe muszą sumować się do 1 (A+R+T = 1). Przydatnym uogólnieniem jest ciało doskonale czarne które cechuje $A = 1$ w całym zakresie widma promieniowania.
Wzory używane przy mówieniu o promieniowaniu to: Strumień promieniowania danej długości fali w zależności od temperatury dla ciała doskonale czarnego:

$$I(T, \lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(\frac{hc}{\lambda k T}) - 1} \tag{1}$$

Oraz wynikające z niego prawo Stefana-Boltzmanna będące sumą po wszystkich długościach fal wzoru 1:

$$J_{CDC}(T) = \sigma T^4 \tag{2}$$

Gdzie σ jest stałą Stefana-Boltzmanna.
Wzór ten można uogólnić na ciała inne niż doskonale czarne wprowadzając stałą ϵ definującą zdolność emisyjne ciała, przekształcające wzór 2 na:

$$J(T) = \epsilon \sigma T^4 \tag{3}$$

Korzystając z tych wzorów możemy znaleźć moc jaką będzie wypromieniowywać dana powierzchnia. Jako że ciało emituje promieniowanie przez swoją temperature ale zarazem przyjmuje promieniowania z otoczenia otrzymujemy wzór:

$$\Delta P = AS\sigma(T^4 - T_{ot}^4) \tag{4}$$

W którym A - absorbcja, S - pole powierzchni ciała.
W przypadku ciał punktowych energia będzie izotropowo rozprowadzona na powierzchini sfery co prowadzi nas do wzoru na strumień mocy:

$$J(r) = \frac{AS\sigma(T^4 - T_{ot}^4)}{4\pi r^2} \tag{5}$$

2 Układ Doświadczalny

Podstawowym narzędziem z jakiego będziemy korzystać jest detektor promieniowania termicznego (PASCO TD-8553) dla którego zależność mierzonego napięcia od strumienia mocy jaki pada na miernik jest linowa:

$$U_d = \alpha J_{pad} - \beta \tag{6}$$

Detektor w pomiarach będzie podłączony do miernika uniwersalnego BRYMEN BM827s do pomiaru napięcia.

2.1 Kostka Lesliego

W pierwszej części doświadczenia zbadamy emisyjność różnych powierzchni kostki Lesliego (3B Scientific Physics U8498299-230). Kostka składa się z 4 powierzchni: czarnej, białej, metalowej matowej oraz metalowej błyszczącej, do tego kostka może zostać podgrzana od 40 $°C$ do 120 $°C$. Detektor promieniowania kierujemy na kostkę i mierzymy promieniowania dla różnych powierzchni przy zmienianiu temperatury. Kluczowe jest zasłanianie detektora osłoną podczas oczekiwania na nagrzanie próbki aby nie nabrał temperatury zakłucającej pomiar. W trakcie doświadczenia musimy także mierzyć napięcie jakie pokazuje detektor podczas bycia zasłoniętym a żeby móc zidentyfikować jaka część promieniowania pochodzi od ścian a jaka od otoczenia. Przy najwyższej temperaturze zbadamy co pokarze detektor przy zasłonieniu ścianki czarnej przez szklany ekran.
Zdjęcie

2.2 Lampa Stefana-Boltzmana

W tej części przeprowadzimy walidację prawa Stefana-Boltzmana. Ustawiamy detektor i żarówkę na szynie z zaznaczonymi odległościami.
Zdjęcie
Na początku żarówka i detektor są ustawione blisko siebie żeby zmierzyć zależność strumienia mocy od temperatury. Zarówkę podłączamy do generatora i mierzymy napięcie oraz natężenia na żarówce za pomocą dwóch mierników BRYMEN BM805s. Zależność temperaturową możemy wyznaczyć wzorami [1]:

$$T = \frac{R - R_{ref}}{\alpha R_{ref}} + T_{ref} \tag{7}$$

We wzorze $T_{ref} = 300\,K$ a $R_{ref} = 0{,}277\,\Omega$, a α opisywane jest zależnością:

$$\alpha(K^{-1}) = 0{,}00407 \cdot (\frac{R}{R_{ref}})^{0{,}11778}$$

Z mierzonych wartości opór otrzymujemy przez prawo ohma:

$$R = \frac{U}{I}$$

Przy pomiarze z najwyższą temperaturą sprawdzamy co się stanie gdy pomiędzy detektor a żarówkę wstawimy szklany ekran. Po wykonaniu pomiarów zależnych od temperatury, mierzymy zależność od odległości pozostawiając temperaturę stałą poprzez przesówanie detektora na szynie.

3 Wyniki Pomierów

We wszystkich pomiarach będziemy korzystać ze zmierzonej stałej temperatury pomieszczenia $T_0 = 22\,°C$. Ważne też jest wspomnieć że w poniższej analizie średnią zmiennej x oznaczamy $\bar{x}$, błąd statystyczny s_x, błąd pomiarowy δx a błąd całkowity $u(x)$. Wzór na sumaryczny błąd z jakiego będziemy korzystać w momencie kiedy jest kilka punktów pomiarowych to:

$$u(x) = \sqrt{s_x^2 + (\frac{\delta x}{\sqrt{3}})^2} \tag{8}$$

Gdy pomiar jest pojedyńczy to $u(x) = \delta x$.
Nadmiernie będziemy też korzystać z równania na propagację błędu:

$$\delta f(x) = \sqrt{\sum_{i=1}(\frac{df}{dx_i}\delta x_i)^2} \tag{9}$$

3.1 Kostka Lesliego

Nr	T [°C]	U_b [mV]	U_w [mV]	U_{ms} [mV]	U_{mm} [mV]	U_s [mV]
1	50	2,05	2,05	0,17	0,53	0,15
2	55	2,56	2,56	0,18	0,63	0,15
3	60	2,94	2,93	0,23	0,71	0,15
4	65	3,45	3,41	0,25	0,80	0,17
5	70	3,89	3,89	0,26	0,95	0,21
6	75	4,43	4,40	0,29	1,04	0,19
7	80	4,97	4,94	0,32	1,16	0,17
8	85	5,43	5,41	0,34	1,28	0,14
9	90	5,95	5,85	0,38	1,39	0,14
10	95	6,52	6,48	0,42	1,53	0,17
11	100	7,12	7,06	0,45	1,71	0,19
12	105	7,66	7,63	0,50	1,85	0,21
13	110	8,34	8,32	0,54	2,06	0,24
14	115	8,87	8,85	0,58	2,15	0,26
15	120	9,52	9,52	0,63	2,34	0,25

Tablica 1: Pomiary napięcia dla różnych powierzchni w funkcji temperatury.

Bane uzyskane z badania kostki Lesliego widizmy w tabeli 1, napięcia są mierzone kolejno dla: U_b - strona czarna, U_w - strona biała, U_{ms} - strona metaliczna błyszcząca, U_{mm} - strona metaliczna matowa i U_s - zasłona blokująca promieniowanie. W tabeli 1 widzimy że pomiary dla ściany czarnej i białej są na podobnym poziomie, podczas gdy ściana metalowa błyszcząca ledwo pokazywała wartości większe od promieniowania otoczenia, a napięcia wywoływane przez ścianę metalową matową były mniejwięcej stale 4x mniejsze od ściany czarnej, lecz około 3x większe od drugiej metalowej ściany. Przeanalizujmy dogłębnie dane aby dowiedzieć się więcej o charakterystyce każdej ze ścian.
Wyznaczmy błąd obserwowany podczas badania kostki. Na ekranie kostki Lesligeo widzieliśmy drobne zmianny temperatury dlatego jej błąd uznajemy jako $\delta T = 1\,°C$. Podczas gdy błąd z jakim mierzyliśmy napięcie otrzymujemy z instrukcji multimetru [2] dla naszego zakresu wynosi $\delta U = 0{,}0012 \cdot U + 0{,}02 [mV]$. Co pozwala nam wyznaczyć błąd dla U_s i jej średnią wartość:

$$\bar{U}_s = 0{,}186\,[mV], \quad s_{U_s} = 0{,}039\,[mV], \quad U_s = 0{,}021\,[mV], \quad U_s = 0{,}04\,[mV] \tag{10}$$

Otrzymaną wartość (10) możemy odjąć od każdej ze zmierzonych napięć aby otrzymać jedynie wkład promieniowania pochodzący od kostki otrzymując U' dla każdej ze stron.
Sprawdzmy czy zależność od temperatury zgadza się z z przewidywanym prawa Stefana-Boltzmana (2) poprzez dopasowanie lini do wykresu $U'(T^4)$ dla wszystkich materiałów.
ZDJĘCIE
Przyczyna błędu otrzymanego w dopasowaniach dla wykresów **??** zależy od materiału, możemy to zaobserwować na wykresach $U'(T^4)$. Wszystkie powierzchnie posiadają te samę błędy dla temperatur i w przypadku powierzchni czarnej i białej to jest główny błąd jaki widzimy. Natomiast gdy przejdziemy do ścian metalowych których promieniowanie powodowało znacznie mniejsze napięcie na detektorze, błąd pochodzący z tego pomiaru zaczyna mieć większy wpływ. Szczególnie jest to widoczne na wykresie **??** dla ściany metalowej błyszczącej.
Trzeba wspomnieć też o przyczynach niektórych błędów. Napięcie otoczenia mierzyliśmy podczas zasłonięcia kostki osłoną, lecz jak jest to widoczne w tabeli 1 napięcie to znacznie się stosunkowo zwiększyło, najprawdopodobniej przez nagrzanie osłony. Podobnie istnieje ryzyko że zapisaliśmy wartość napięcia za szybko. Starając się nie nagrzać detektora otkrywaliśmy go jak najkrócej lecz tak by napięcie mogło się ustabilizować, jednak w przypadku dużych temperatur trudno jest stwierdzić kiedy napięcie się ustabilizowałą a kiedy rośnie z powodu nagrzania detektora.
Jako że w trakcie wszystkich pomiarów trzymaliśmy detektor nieruchomo możemy wyznaczyć emisyjność w prawie Stefana-Boltzmana (3) znając emisyjność jednej ze stron i porównując ich dopasowanie. Zatem załóżmy że strona czarna posiada $\epsilon_b = 0{,}95$ przy innych parametrach identycznych dla każdej ściany skorzystamy z wzoru:

$$\epsilon_o = \epsilon_b \frac{a_o}{a_b} \quad u(\epsilon_o) = \epsilon_o \sqrt{(\frac{u(a_o)}{a_o})^2 + (\frac{u(a_b)}{a_b})^2} \tag{11}$$

We wzorze ϵ_o jest emisyjnością innego materiału, a stałe a_b i a_o to współczynniki kierunkowe dla krzywej jakie otrzymaliśmy z dopasowania liniowego. Do otrzymania $u(\epsilon_o)$ wykorzystaliśmy wzór na propagecję błędu (9). Podstawiając wartości z (**??**) do (11) otrzymane wartości otrzymujemy:

WARTOŚCI

3.2 Żarówka Boltzmana

Nr	$U_{\text{żarówka}}$ [V]	$I_{\text{żarówka}}$ [A]	U_{czujnik} [mV]	$U_{\text{otoczenie}}$ [mV]
1	0,828	0,919	0,15	0,05
2	1,775	1,191	1,13	0,05
3	2,725	1,432	2,89	0,05
4	3,681	1,648	5,68	0,07
5	4,64	1,847	9,12	0,08
6	5,60	2,033	12,31	0,06
7	6,57	2,207	16,15	0,09
8	7,53	2,370	20,25	0,08
9	8,50	2,524	25,13	0,10
10	9,47	2,671	30,24	0,11

Tablica 2: Pomiar napięcia na detektorze dla różnych temperatur źródła promieniowania.

Następnie przebadajmy zależność promieniowania od odległości źródła.

Nr	d [cm]	U_d [mV]	U_s [mV]
1	149	30,58	0,12
2	144	9,29	0,10
3	139	4,11	0,11
4	134	2,36	0,11
5	129	1,52	0,11
6	124	1,08	0,08
7	119	0,82	0,06
8	114	0,64	0,05
9	109	0,52	0,05

Tablica 3: Pomiar napięcia na detektorze dla różnych odległości detektora od źródła.

W tabeli 3 d oznacza dystans jaki odczytaliśmy na szynie w momęcie gdy żarówka znajdowała się na $d_0 = 154\,[cm]$. Na podstawie wzorów (5) oras (6) zakładamy że napięcie będzie proporcjonalne do $\frac{1}{r^2}$. W celu przetestowania tej hipotezy dopasujmy krzywą do zależności $\log(U'(\log(r)))$ gdzie $r = |d - d_0|$ a $U' = U_d - \bar{U_s}$.

3.3 Transmisyjność Szkła

4 Podsumowanie

Literatura

[1] *Badanie Promieniowaniia Termicznego*, Uniwersytet Warszawski, Aneta Drabińska.

[2] `brymen.eu/wp-content/uploads/biall/102091/102091.KARTA_EN..2015-07-08.1.pdf`, miernik uniwersalny BRYMEN BM827s.

[3] `https://static.eleshop.nl/mage/media/downloads/bm805_datasheet.pdf`, miernik uniwersalny BRYMEN BM 805s.