

Piotr Durniat
I rok, Fizyka
Wtorek, 8:00-10:15

Data wykonania pomiarów:
29.04.2025

Prowadząca:
dr Iwona Mróz

Ćwiczenie nr 26

Wyznaczanie ciepła właściwego ciał stałych przy użyciu kalorymetru

Spis treści

1	Wstęp teoretyczny	2
2	Opis doświadczenia	2
3	Opracowanie wyników pomiarów	3
3.1	Tabele pomiarowe	3
4	Tabele Pomiarowe	3
4.1	Wyznaczenie temperatury początkowej i końcowej	3
4.2	Ciepło właściwe poszczególnych ciał	4
5	Ocena niepewności pomiaru	5
5.1	Niepewność pomiaru masy	5
5.2	Niepewność pomiaru temperatury	5
5.3	Niepewność pomiaru ciepła właściwego	5
6	Wnioski	6
7	Wykresy	8

1 Wstęp teoretyczny

Ciepło właściwe substancji c określa ilość energii potrzebnej do podwyższenia temperatury jednostkowej masy ciała o jednostkę temperatury. Jest ono definiowane jako:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (1)$$

gdzie Q to dostarczona energia cieplna, m to masa ciała, a ΔT to zmiana temperatury.

W doświadczeniu wykorzystujemy kalorymetr, który pozwala na pomiar ciepła właściwego ciał stałych. Metoda opiera się na zasadzie bilansu cieplnego, zgodnie z którą suma ciepła oddanego i pobranego w układzie izolowanym jest równa zero:

$$Q_1 + Q_2 = 0 \quad (2)$$

gdzie Q_1 to ciepło oddane przez ciało o wyższej temperaturze (wartość ujemna), a Q_2 to ciepło pobrane przez ciało o niższej temperaturze (wartość dodatnia).

Dla badanego ciała stałego o masie m_c , temperaturze początkowej T_c i cieple właściwym c_p , które zostaje umieszczone w wodzie o masie m_w , temperaturze początkowej T_p i cieple właściwym c_w , przy uwzględnieniu pojemności cieplnej naczynka kalorymetrycznego $K_n = m_n \cdot c_n$, bilans cieplny przyjmuje postać:

$$m_c \cdot c_p \cdot (T_k - T_c) + [m_w \cdot c_w + m_n \cdot c_n] \cdot (T_k - T_p) = 0 \quad (3)$$

gdzie T_k to temperatura końcowa układu.

Przekształcając powyższe równanie, otrzymujemy wzór na ciepło właściwe badanego ciała:

$$c_p = \frac{[m_w \cdot c_w + m_n \cdot c_n] \cdot (T_p - T_k)}{m_c \cdot (T_k - T_c)} \quad (4)$$

Prawo Dulonga-Petita stanowi, że molowe ciepło właściwe pierwiastków stałych w temperaturze pokojowej jest w przybliżeniu stałe i wynosi około $3R \approx 25 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$, gdzie R to stała gazowa. Prawo to jest przybliżeniem i sprawdza się głównie dla metali i prostych substancji krystalicznych w temperaturze pokojowej.

W rzeczywistym przebiegu doświadczenia występuje wymiana ciepła z otoczeniem, co wprowadza błąd systematyczny. Aby go zminimalizować, stosuje się metodę interpolacji do wyznaczenia rzeczywistych temperatur początkowej i końcowej, analizując zmiany temperatury w czasie przed i po osiągnięciu stanu równowagi.

Wstęp teoretyczny został opracowany na podstawie podręcznika Fizyka dla szkół wyższych, Tom 2, Dział Temodynamika, rozdział 1 - Temperatura i Ciepło [2].

2 Opis doświadczenia

1. Zważenie badanych ciał oraz naczynka kalorymetrycznego z mieszadełkiem.
2. Napełnienie naczynka wodą (do 2/3 objętości) i określenie jej masy.
3. Ogrzanie badanego ciała w ogrzewaczu elektrycznym z termoparą do temperatury 100-105°C.
4. Rejestracja temperatury początkowej wody w kalorymetrze przez 5 minut (pomiar co 30 sekund).
5. Przeniesienie ogrzanego ciała do kalorymetru i pomiar zmian temperatury:

- pierwsze 5 minut: pomiar co 30 sekund
- następnie: pomiar co minutę

6. Powtórzenie procedury dla pozostałych badanych ciał.

Doświadczenie pozwala wyznaczyć pojemność cieplną badanych ciał poprzez analizę wymiany ciepła między ogrzanim ciałem a wodą w kalorymetrze.

3 Opracowanie wyników pomiarów

3.1 Tabele pomiarowe

4 Tabele Pomiarowe

t [min:sec]	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
00:00:00	25,3	24,9	25,1
00:00:30	25,3	24,9	25,1
00:01:00	25,3	24,9	25,1
00:01:30	25,3	24,9	25,1
00:02:00	25,3	24,9	25,1
00:02:30	25,3	24,9	25,1
00:03:00	25,3	24,9	25,1
00:03:30	25,3	24,9	25,1
00:04:00	25,3	24,9	25,1
00:04:30	25,3	24,9	25,1
00:05:00	25,2	24,9	25,1
00:05:30	27,6	25,0	27,5
00:06:00	29,8	27,9	27,6
00:06:30	30,3	29,0	27,6
00:07:00	30,4	29,4	27,7
00:07:30	30,5	31,0	27,6
00:08:00	30,4	30,0	27,6
00:08:30	30,3	29,9	27,6
00:09:00	30,3	29,8	27,6
00:09:30	30,2	29,7	27,6
00:10:00	30,1	29,7	27,5
00:11:00	30,0	29,6	27,4
00:12:00	29,9	29,4	27,4
00:13:00	29,8	29,3	27,3
00:14:00	29,7	29,0	27,3
00:15:00	29,5	28,8	27,3

Tabela 1: Pomiary temperatury ciał.

4.1 Wyznaczenie temperatury początkowej i końcowej

Temperatury początkowe i końcowe wyznaczone zostały przy użyciu interpolacji liniowej. Do 10 pierwszych pomiarów temperatury wody (zanim wrzucono ciało do kalorymetru) dopasowano linię prostą, następnie do 10 ostatnich pomiarów temperatury wody (po wrzuceniu ciała

Badane ciała	Temperatura początkowa badanych ciał [°C]
1 - Miedziane	100,2
2 - Mosiężne	100,4
3 - Aluminiowe	102,4

Tabela 2: Temperatury początkowe badanych ciał

Masa [g]							
m_1	m_2	m_3	m_n	$m_w + m_n$	m_{w1}	m_{w2}	m_{w3}
73	70,8	15,2	126,1	192,9	66,8	61,2	75,6

Tabela 3: Masy

do kalorymetru) dopasowano drugą linię prostą. Wyznaczono następnie linię pionową w taki sposób, żeby pola ograniczone przez tą linię, linie dopasowań oraz linię punktów pomiarowych, po obu stronach linii pionowej były sobie równe.

Otrzymane wyniki interpolacji temperatury wody przedstawiono na wykresach 1, 2 i 3.

Wartości temperatur początkowych i końcowych odczytano z wykresów i przedstawiono w tabeli 4.

Ciało	Temperatura początkowa	Temperatura końcowa
Miedziane	25,30	30,67
Mosiężne	24,90	30,29
Aluminiowe	25,10	27,75

Tabela 4: Temperatury początkowe i końcowe

4.2 Ciepło właściwe poszczególnych ciał

Korzystając z wyprowadzonego wzoru 4 obliczono ciepło właściwe poszczególnych ciał.

Przykładowe obliczenia dla ciała miedzianego:

$$c_p = \frac{[0,0668 \cdot 4186 + 0,1261 \cdot 377] \cdot (25,30 - 30,67)}{0,073 \cdot (30,67 - 100,2)} = 346,13 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$c_p = \frac{[0,0612 \cdot 4186 + 0,1261 \cdot 377] \cdot (24,90 - 30,29)}{0,0708 \cdot (30,29 - 100,4)} = 329,80 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$c_p = \frac{[0,0756 \cdot 4186 + 0,1261 \cdot 377] \cdot (25,10 - 27,75)}{0,0152 \cdot (27,75 - 102,4)} = 850,11 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Wyniki obliczeń ciepła właściwego dla wszystkich badanych ciał przedstawiono w tabeli 5.

Ciało	Ciepło właściwe [J/kgK]
Miedziane	346,13
Mosiężne	329,80
Aluminium	850,11

Tabela 5: Ciepło właściwe poszczególnych ciał

Tabela rzeczywistych ciepł właściwych poszczególnych ciał przedstawiona jest w tabeli 6.

Ciało	Ciepło właściwe [J/kgK]
Miedź	385,00
Mosiądz	375,00
Aluminium	900,00

Tabela 6: Ciepło właściwe poszczególnych ciał (źródło: [1])

5 Ocena niepewności pomiaru

5.1 Niepewność pomiaru masy

Masa została zmierzona za pomocą wagi laboratoryjnej, której niepewność maksymalna wynosi $\Delta m = 0,0001$ kg.

5.2 Niepewność pomiaru temperatury

Temperatura została zmierzona za pomocą termometru laboratoryjnego, którego niepewność wynosi $\Delta T = 0,1$ K.

5.3 Niepewność pomiaru ciepła właściwego

Niepewność pomiaru ciepła właściwego obliczono zgodnie z zasadami propagacji niepewności.

$$\Delta c_p = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial c_p}{\partial x_i} \right| \cdot \Delta x_i \quad (5)$$

Obliczając poszczególne pochodne cząstkowe, otrzymano:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_i}{\partial m_w} &= \frac{c_w \Delta T}{m_i \Delta T_i} \\ \frac{\partial c_i}{\partial m_n} &= \frac{c_n \Delta T}{m_i \Delta T_i} \\ \frac{\partial c_i}{\partial \Delta T} &= \frac{m_w c_w + m_n c_n}{m_i \Delta T_i} \\ \frac{\partial c_i}{\partial m_i} &= -\frac{(m_w c_w + m_n c_n) \Delta T}{m_i^2 \Delta T_i} \\ \frac{\partial c_i}{\partial \Delta T_i} &= -\frac{(m_w c_w + m_n c_n) \Delta T}{m_i \Delta T_i^2} \end{aligned}$$

Przykładowe obliczenia dla ciała miedzianego:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial c_i}{\partial m_w} &= \frac{c_w \cdot \Delta T}{m_i \cdot \Delta T_i} = 4499,876722 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \\
\frac{\partial c_i}{\partial m_n} &= \frac{c_n \cdot \Delta T}{m_i \cdot \Delta T_i} = 405,268400 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \\
\frac{\partial c_i}{\partial \Delta T} &= \frac{Q}{m_i \cdot \Delta T_i} = -64,531396 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}^2) \\
\frac{\partial c_i}{\partial m_i} &= -\frac{c_i}{m_i} = -4817,754936 \text{ J}/(\text{kg}^2 \cdot \text{K}) \\
\frac{\partial c_i}{\partial \Delta T_i} &= -\frac{c_i}{\Delta T_i} = 5,064019 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}^2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta c_1 &= \left| \frac{\partial c_i}{\partial m_w} \right| \cdot \Delta m_w + \left| \frac{\partial c_i}{\partial m_n} \right| \cdot \Delta m_n + \left| \frac{\partial c_i}{\partial \Delta T} \right| \cdot \Delta T_p + \left| \frac{\partial c_i}{\partial \Delta T} \right| \cdot \Delta T_k \\
&+ \left| \frac{\partial c_i}{\partial \Delta T_i} \right| \cdot \Delta T_k + \left| \frac{\partial c_i}{\partial \Delta T_i} \right| \cdot \Delta T_c + \left| \frac{\partial c_i}{\partial m_i} \right| \cdot \Delta m_i \\
&= 4499,876722 \cdot 0,0001 + 405,268400 \cdot 0,0001 + 64,531396 \cdot 0,1 + 64,531396 \cdot 0,1 \\
&+ 5,064019 \cdot 0,1 + 5,064019 \cdot 0,1 + 4817,754936 \cdot 0,0001 \\
&= 0,450 + 0,041 + 0,645 + 0,645 + 0,051 + 0,051 + 0,482 \\
&= 14,84 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})
\end{aligned}$$

Ciało	Niepewność pomiaru ciepła właściwego [J/(kg·K)]
Miedź	14,84
Mosiądz	14,14
Aluminium	73,10

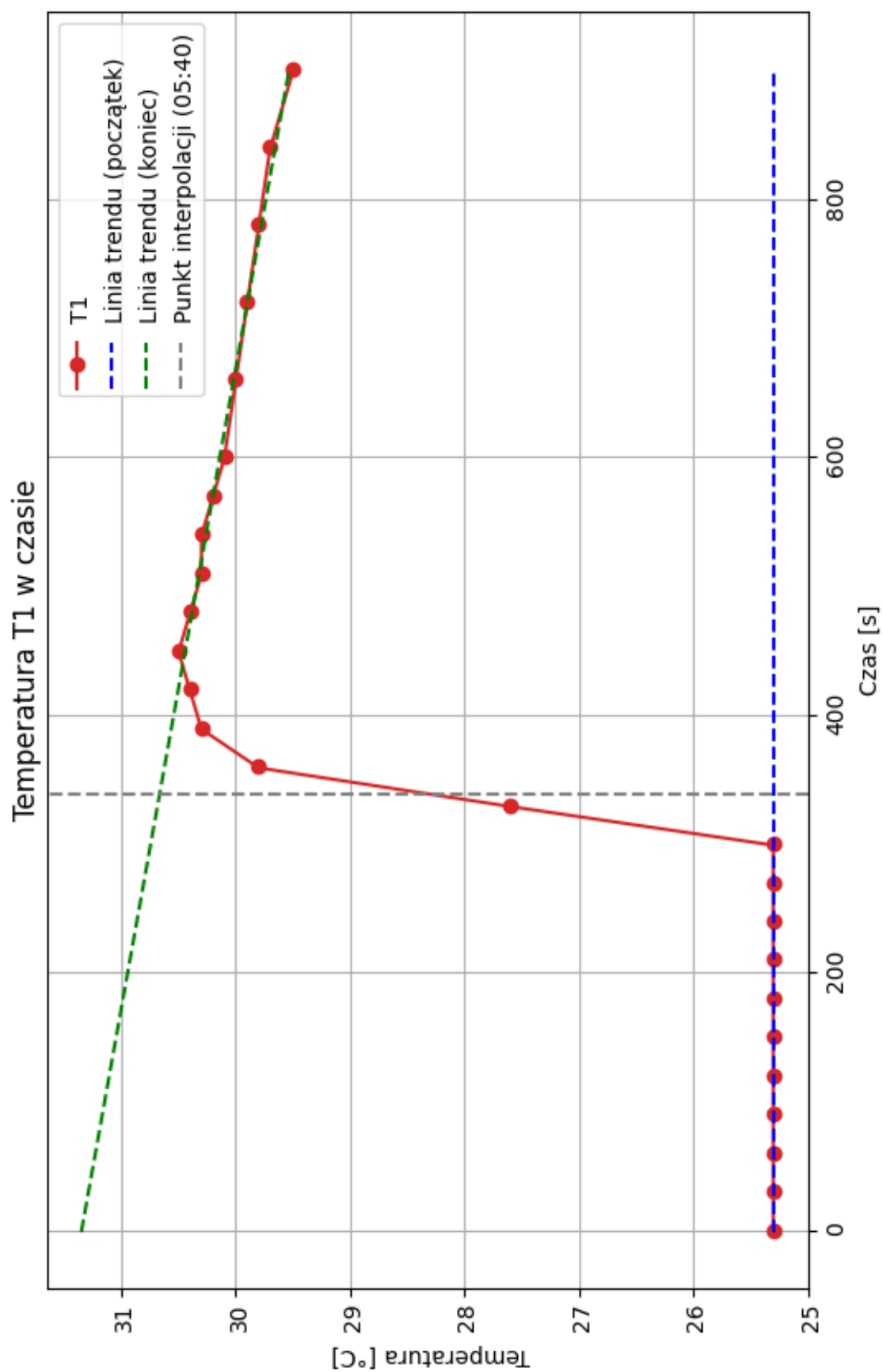
Tabela 7: Niepewności pomiaru ciepła właściwego

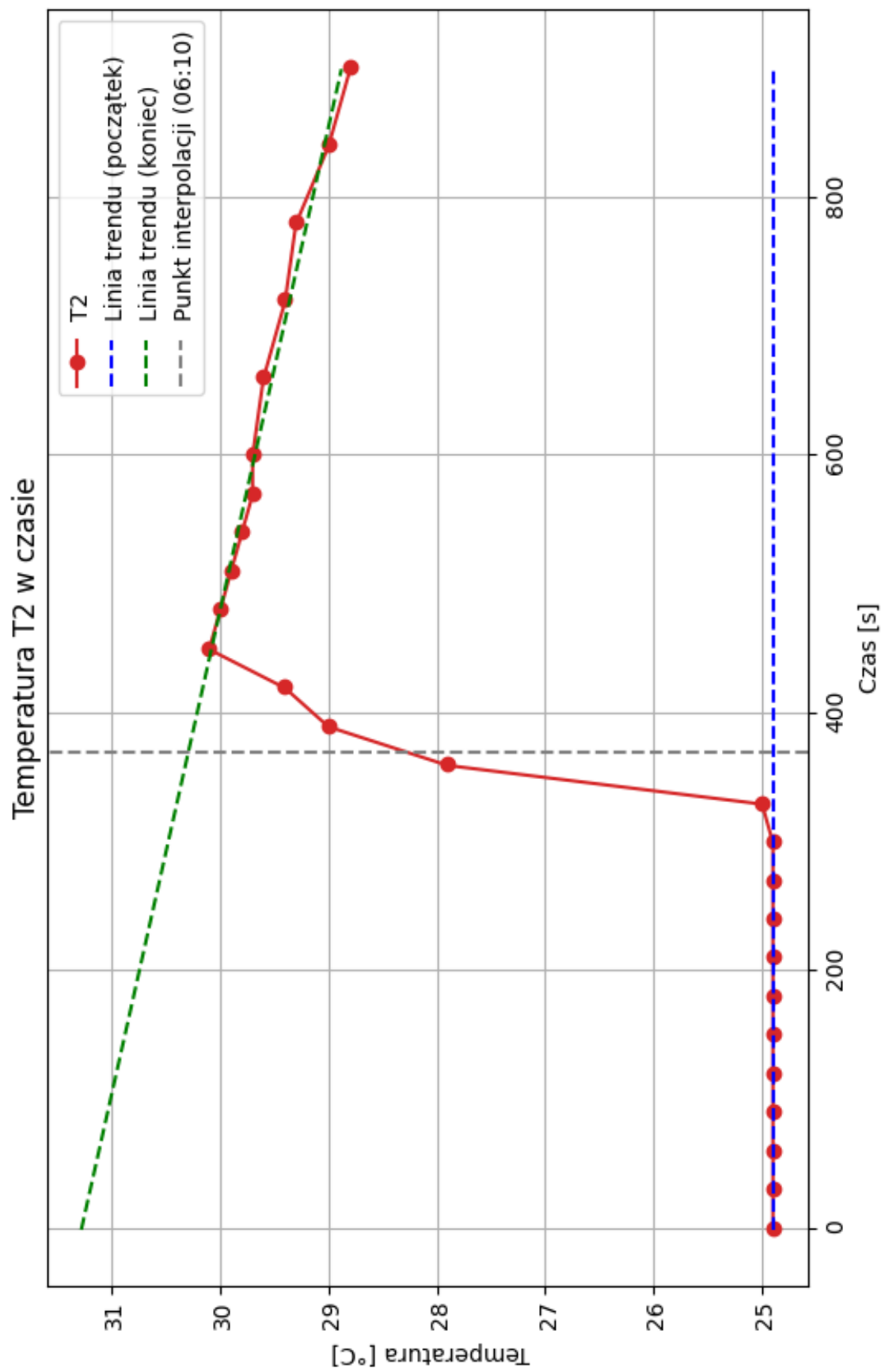
6 Wnioski

- Wyznaczone wartości ciepła właściwego** dla badanych ciał wynoszą:
 - Dla ciała miedzianego: $(346 \pm 14) \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 - Dla ciała mosiężnego: $(329 \pm 14) \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 - Dla ciała aluminiowego: $(850 \pm 73) \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- Porównanie z wartościami tablicowymi:** Wszystkie wyznaczone wartości ciepła właściwego są niższe od wartości tablicowych, co może wskazywać na systematyczne błędy pomiarowe.
- Dokładność pomiarów dla poszczególnych materiałów:**
 - Najlepszą zgodność z wartościami tablicowymi uzyskano dla aluminium (różnica 5,54%).
 - Największe rozbieżności wystąpiły dla mosiądzu (różnica 10,12%).
- Potencjalne źródła błędów systematycznych:**

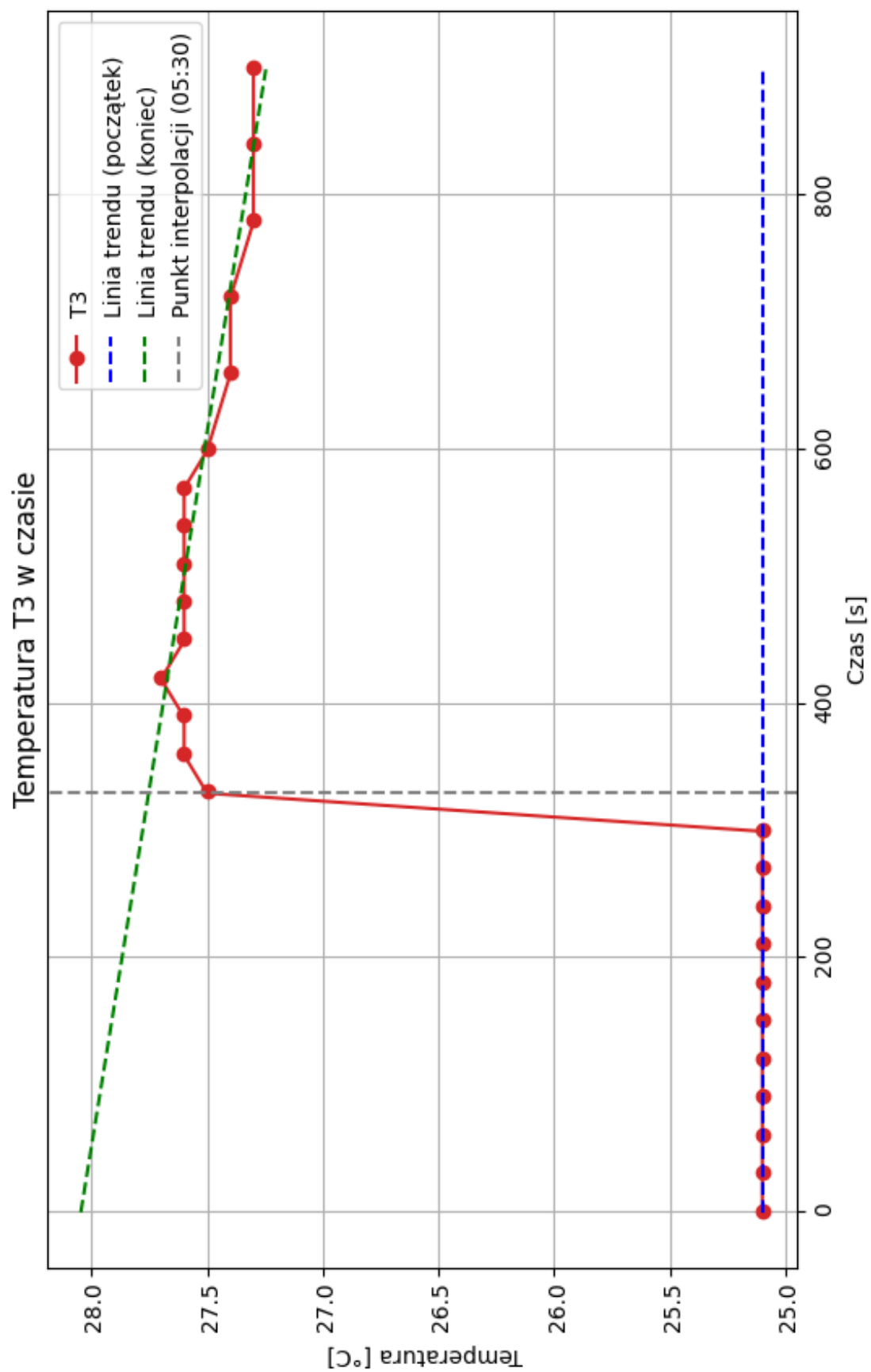
- Straty ciepła do otoczenia podczas przenoszenia ogrzanego ciała do kalorymetru.
 - Wymiana ciepła kalorymetru z otoczeniem w trakcie pomiarów.
 - Niekonieczna izolacja termiczna kalorymetru.
5. **Identyfikacja materiałów:** Na podstawie uzyskanych wyników ciepła właściwego możemy z dużą pewnością potwierdzić, że badane ciała były wykonane z miedzi, mosiądzu i aluminium, zgodnie z przewidywaniami.

7 Wykresy





Rysunek 2: Interpolacja temperatury dla ciała mosiężnego



Rysunek 3: Interpolacja temperatury dla ciała aluminiowego

Literatura

- [1] Calculla. Tabela ciepła właściwego. https://calculla.pl/tabela_ciepla_wlasciwego, 2024. Dostęp: 14.04.2024.
- [2] William Moebs, Samuel J. Ling, and Jeff Sanny. *Fizyka dla szkół wyższych, Tom 2*. OpenStax, 2018. Dostęp: 14.04.2024.