



Nr ćw.	TERMODYNAMIKA TECHNICZNA – LABORATORIUM
1	Wyznaczanie ciepła właściwego c_p i c_v dla powietrza

1. Wprowadzenie teoretyczne

Średnia pojemność cieplna ciała (często nazywana ciepłem właściwym) to współczynnik proporcjonalności określający, ile energii cieplnej należy dostarczyć, aby podnieść temperaturę danej substancji. Jest to charakterystyczna cecha materiału, ponieważ różne substancje nagrzewają się łatwiej lub trudniej.

Dodatkowo ilość ciepła potrzebna do ogrzania substancji zależy od warunków, w jakich przebiega proces – innymi słowy, od rodzaju przemiany termodynamicznej. Wśród przemian odwracalnych można wyróżnić dwa skrajne przypadki:

- przemianę izochoryczną (przy stałej objętości, $V=\text{idem}$),
- przemianę izobaryczną (przy stałym ciśnieniu, $P=\text{idem}$).

Nawet dla tej samej substancji i identycznej ilości materiału ilość dostarczonego ciepła wymagana do zmiany temperatury będzie inna, w zależności od tego, czy podgrzewanie odbywa się w warunkach stałej objętości (np. w zamkniętym naczyniu) czy w otwartym otoczeniu przy stałym ciśnieniu (np. ciśnieniu atmosferycznym).

Z tego powodu dla każdej substancji wyróżnia się dwa współczynniki ciepła właściwego w zależności od sposobu dostarczania ciepła:

- c_v – ciepło właściwe przy stałej objętości,
- c_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu.

Te wartości są dokładnie określone jedynie dla idealnych procesów izochorycznych i izobarycznych, które są przemianami odwracalnymi. W rzeczywistości jednak nie istnieją idealnie odwracalne procesy termodynamiczne, dlatego wartości wyznaczone eksperymentalnie mogą się nieco różnić od teoretycznych.

Zgodnie z definicją ciepła właściwe c_v i c_p dane są wzorami:

$$c_v = \frac{Q_{v1-2}}{m(T_2 - T_1)} \quad (1)$$

$$c_p = \frac{Q_{p1-2}}{m(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

gdzie : Q_{v1-2} , Q_{p1-2} – ciepło doprowadzone do układu przy stałej, odpowiednio objętości, ciśnieniu,
 m – masa czynnika termodynamicznego,

T_1 , T_2 – temperatury bezwzględne w stanie 1 i 2.

Wyznaczenie c_v i c_p wymaga zmierzenia wszystkich wielkości występujących we wzorach. Metody korzystające z definicji to metody kalorymetryczne. Dają one dokładne wyniki dla cieczy i ciał stałych.

Dla gazów, tak w zakresie niskich jak i wysokich ciśnień, prowadzą do dużych błędów.

Dlatego do pomiaru c_v i c_p gazu o niskim ciśnieniu używa się metody dynamicznej, wykorzystującej proces ekspansji adiabatycznej.

Równanie adiabaty powietrza o własnościach zbliżonych do gazu doskonałego ma postać:

$$p v^k = \text{const} \quad (3)$$

gdzie wykładnik adiabaty k :

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (3.1)$$

Ponadto c_v i c_p powiązane są zależnością:

$$c_p - c_v = R \quad (4)$$

gdzie R – indywidualna stała gazowa.

Indywidualną stałą gazową wyznacza się na podstawie uniwersalnej stałej gazowej. Jest to charakterystyczna wartość dla danego gazu i stanowi iloraz uniwersalnej stałej gazowej ($\bar{R} = 8314,7 \left[\frac{J}{\text{kmol}} \cdot K \right]$) oraz molowej masy ($M \left[\frac{kg}{\text{kmol}} \right]$) tego gazu.

Ze skojarzenia wzorów (3.1) i (4) wynika:

$$c_v = \frac{R}{k - 1} \quad (5.1)$$

$$c_p = R \frac{k}{k - 1} \quad (5.2)$$

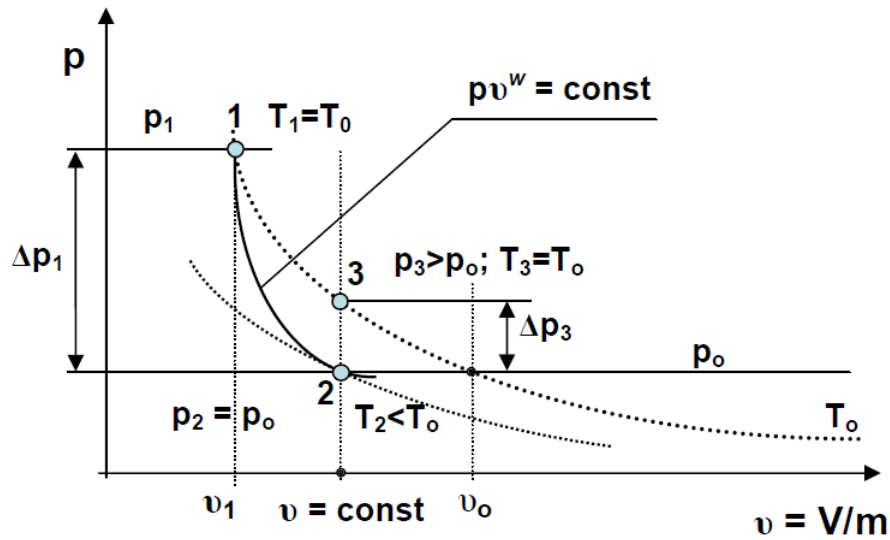
2. Cel ćwiczenia

Wyznaczenie ciepła właściwego c_p i c_v dla powietrza

3. Opis doświadczenia

Zbiornik o stałej objętości napełnia się powietrzem do ciśnienia $p_1 > p_0$ (p_0 – ciśnienie otoczenia; $p_1 = p_0 + \Delta p_1$). Temperatura początkowa powietrza $t_1 = t_{ot} = t_0$. Otwierając "na moment" zawór zbiornik łączy się z otoczeniem. Następuje szybki wypływ powietrza do otoczenia. Ciśnienie w zbiorniku spada do wartości $p_2 = p_0$, a temperatura osiąga wartość $t_2 < t_0$. Po zamknięciu zaworu

należy odczekać, aż temperatura powietrza t_3 zrówna się z temperaturą otoczenia t_0 , tzn. $t_3 = t_0$ (a Δp_3 ustabilizuje się). Wówczas odczytuje się ciśnienie $p_3 > p_0$ ($p_3 = p_0 + \Delta p_3$).



Podczas wypływu gazu ze zbiornika z oczywistych względów nieuniknione są dopływy ciepła, ale można wykazać, że w rozpatrywanym przedziale zmian temperatury i ciśnienia ich wielkość jest taka, że wskaźnik Y jest mały:

$$Y = \frac{Q_{z1-2}}{|U_2 - U_1|} \quad (6)$$

gdzie:

- Q_{z1-2} - całkowita ilość ciepła (dodatnia lub ujemna) dostarczona do gazu w czasie Δt ,
- $|U_2 - U_1|$ - całkowita zmiana energii wewnętrznej gazu przy przejściu od stanu 1 do stanu 2.

Rzeczywista adiabata występuje w przypadku $Y = 0$. W przeciwnym, wypadku w zależności od konkretnej wartości tego wskaźnika, mówi się o adiabadzie zrealizowanej z dokładnością do 1%, 0,1% itd.

Przyjmując wstępnie $Q_z \neq 0$ sugeruje się, że realizowana jest przemiana politropowa o wykładniku $w \neq k$. Znając wartość wykładnika „w” można by oszacować wielkość Q_z .

Opisane doświadczenie daje tę możliwość, albowiem „w” można wyliczyć ze wzoru, w którym po prawej stronie znaku równości występują tylko wielkości mierzone. Poszukiwaną wartość wykładnika „w” oblicza się ze wzoru:

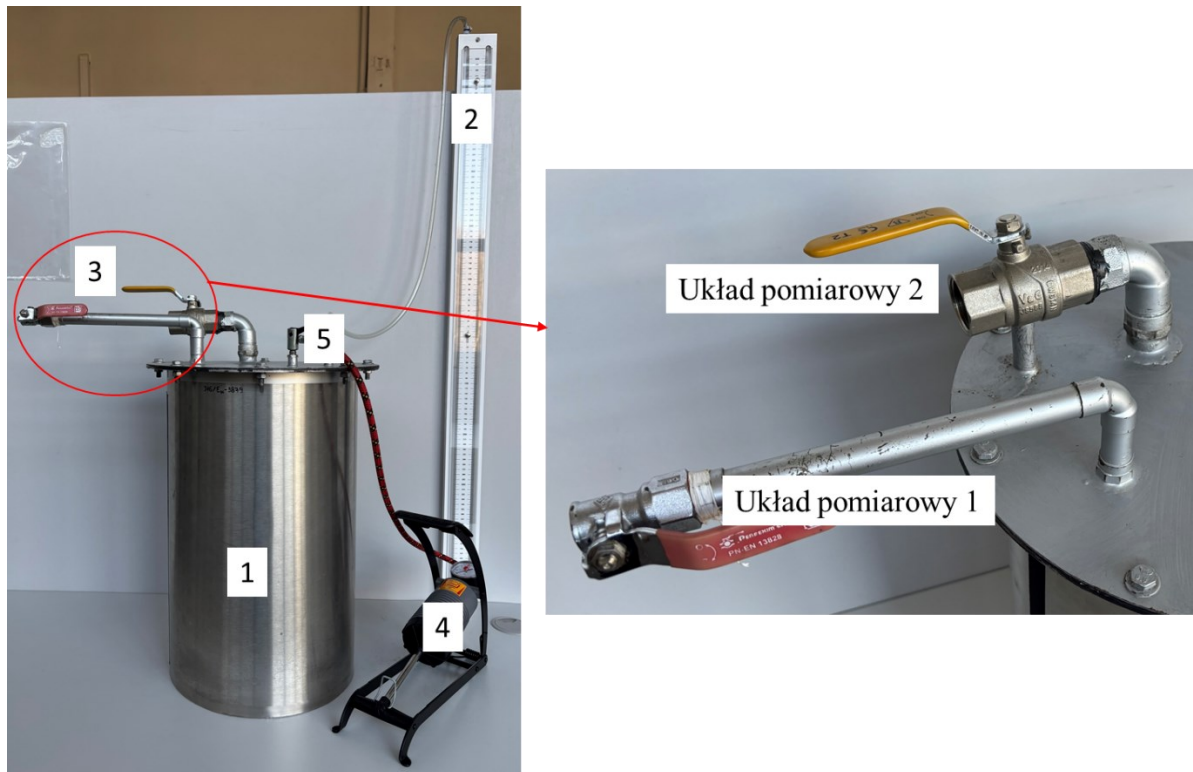
$$w_i = \frac{\ln(p_{1i} / p_0)}{\ln(p_{1i} / p_{3i})} \quad (7)$$

Doświadczenie należy wykonać dla kilku wartości ciśnienia początkowego:

$$p_{1i} = p_0 + \Delta p_{1i}$$

gdzie:

- i – numer pomiaru; przyjmuje wartości od 1 do 5,
- Δp - nadwyżka ciśnienia z przedziału (0 – 1000 mmH₂O), np. 800, 650, 500, 350, 200.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe: [1] zbiornik, [2] manometr, [3] zawory łączące zbiornik z otoczeniem, [4] pompka, [5] zaworek.

4. Opracowanie wyników

1. Dla każdego pomiaru „ i ” obliczyć wartość „ w_i ” a następnie wartość średnią arytmetyczną:

$$w_{sr} = \frac{\sum_i w_i}{i} \quad (8)$$

2. Obliczyć c_v i c_p z zależności:

$$c_{vm} = \frac{R}{w_{sr} - 1} \quad (9.1)$$

$$c_{pm} = R \frac{w_{sr}}{w_{sr} - 1} \quad (9.2)$$

Te wartości należy porównać z wartościami obliczonymi ze wzorów (5.1) i (5.2) dla $k = 1,4$ i wyznaczyć błąd względny pomiaru.

*Instrukcja do ćwiczeń laboratoryjnych z Termodynamiki technicznej
nr 1 pt. Wyznaczanie ciepła właściwego c_p i c_v dla powietrza*

Koordynator kursu	dr inż. Aleksander Górniak	aleksander.gorniak@pwr.edu.pl
Data aktualizacji instrukcji	28.02.2025	

*Instrukcja do ćwiczeń laboratoryjnych z Termodynamiki technicznej
nr 1 pt. Wyznaczanie ciepła właściwego c_p i c_v dla powietrza*

Ćw. 1. Wyznaczanie ciepła właściwego c_p i c_v dla powietrza

Układ pomiarowy 1

lp	wielkość \ i	1	2	3	4	5
1	$p_o, \text{Pa} / p_o, \text{mm H}_2\text{O}$					
2	$\Delta p_{1i}, \text{mm H}_2\text{O}$	800	650	500	350	200
3	p_{1i}					
4	$\Delta p_{3i}, \text{mm H}_2\text{O}$					
5	p_{3i}					
6	w_i					
7	w_{sr}					
8	c_{vm}					
9	c_{pm}					
10	c_v					
11	c_p					
12	c_{vm}/c_v					
13	c_{pm}/c_p					

Układ pomiarowy 2

lp	wielkość \ i	1	2	3	4	5
1	$p_o, \text{Pa} / p_o, \text{mm H}_2\text{O}$					
2	$\Delta p_{1i}, \text{mm H}_2\text{O}$	800	650	500	350	200
3	p_{1i}					
4	$\Delta p_{3i}, \text{mm H}_2\text{O}$					
5	p_{3i}					
6	w_i					
7	w_{sr}					
8	c_{vm}					
9	c_{pm}					
10	c_v					
11	c_p					
12	c_{vm}/c_v					
13	c_{pm}/c_p					