



Nr ćw.	<b>TERMODYNAMIKA TECHNICZNA - LABORATORIUM</b>
2	Praktyczna realizacja przemiany adiabatycznej

## 1. Wprowadzenie teoretyczne

Przemiana jest adiabatyczna, jeśli dla każdego dwóch stanów 1, 2 leżących na tej przemianie  $Q_{1-2} = 0$ . Inaczej mówiąc, w przemianie adiabatycznej nie ma wymiany ciepła z otoczeniem. Z tej definicji wynika, że aby zrealizować wyżej wymieniony proces, np. ekspansję gazu w cylindrze z ruchomym tłokiem, cylinder i tłok muszą być wykonane z materiału będącego doskonałym izolatorem cieplnym.

Analogicznie, jeśli opróżnia się zbiornik napełniony wcześniej gazem (powietrzem) przez otwarcie zaworu to, aby stan gazu w zbiorniku zmieniał się według adiabaty, ściany zbiornika muszą być idealnie izolowane termicznie. Ponieważ nie ma doskonałej izolacji, więc w praktyce możemy co najwyżej zrealizować adiabatę w przybliżeniu. Miarą tego przybliżenia jest wskaźnik:

$$Y = \frac{|Q_{z1-2}|}{|U_2 - U_1|} \quad (1)$$

gdzie:

$Q_{z1-2}$  – ciepło zewnętrzne przemiany od stanu 1 do stanu 2;

$U_2 - U_1$  - całkowita zmiana energii wewnętrznej gazu przy przejściu od stanu 1 do stanu 2.

Jeśli  $Y = 0$ , to oznacza, że zrealizowano przemianę adiabatyczną. W przeciwnym wypadku w zależności od konkretnej wartości tego wskaźnika można mówić o adiabacie zrealizowanej z dokładnością wynikającą z wartości  $Y$ .

Oszacowanie stopnia przybliżenia realizowanej przemiany do przemiany adiabaty wymaga więc pomiaru wielkości występujących we wzorze (1), lub wykorzystania tzw. równania adiabaty. Dla gazu doskonałego i przez to spełniającego warunek  $c_v = idem$  przemiana adiabatyczna opisana jest wzorem:

$$pv^k = idem \quad (2)$$

Wykładnik "k" (wykładnik adiabaty) jest związany z wielkościami  $c_v$  i  $c_p$  równaniem:

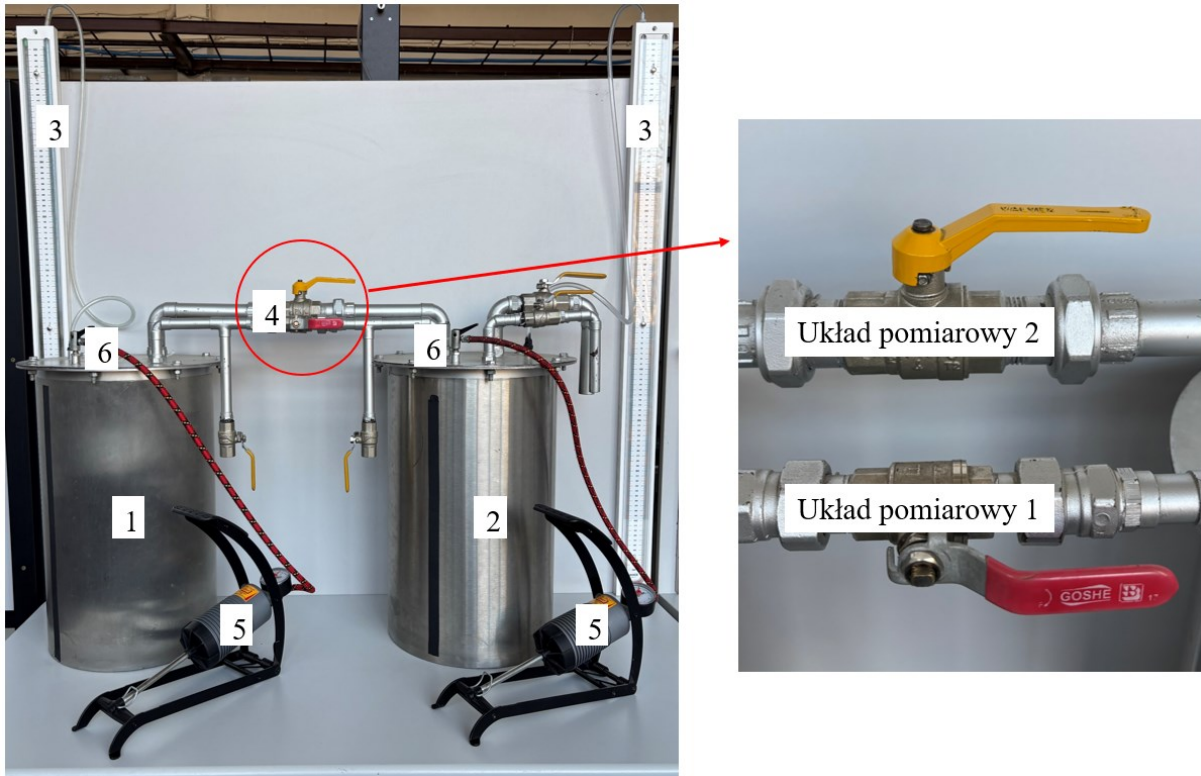
$$k = c_p/c_v \quad (3)$$

## 2. Cel doświadczenia

Celem doświadczenia jest:

- sprawdzić, czy dekompresja zbiornika ze sprężonym powietrzem jest procesem adiabatycznym,
- oszacować dokładność realizacji adiabaty.

## 3. Opis doświadczenia



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe: [1] zbiornik A, [2] zbiornik B, [3] manometry, [4] zawory łączące A z B, [5] pompki, [6] zaworek.

1. Zbiorniki A i B o stałej objętości  $V$  należy napełnić powietrzem, aż do uzyskania nadciśnień odpowiednio  $\Delta p_{A1i}$  oraz  $\Delta p_{B1i}$  (wskazanych w arkuszu pomiarowym) w celu uzyskania relacji:

$$p_{A1i} > p_{B1i} \geq p_o \quad (4)$$

gdzie  $p_o$  – ciśnienie otoczenia.

Ciśnienia absolutne w zbiornikach A i B wyznacza się z zależności:

$$p_{A1i} = p_o + \Delta p_{A1i} \quad (5a)$$

$$p_{B1i} = p_o + \Delta p_{B1i} \quad (5b)$$

Po zakończeniu pompowania temperatura gazu w zbiornikach powinna być równa temperaturze otoczenia. Należy pompować powoli, a po napompowaniu odczekać, aż ciśnienie w zbiorniku się ustabilizuje.

$$t_{A1i} = t_{B1i} = t_o \quad (6)$$

2. Należy otworzyć zawór łączący zbiorniki A i B na około 1 sekundę. W tym czasie nastąpi przepływ powietrza, który zakończy się, gdy ciśnienia w obu zbiornikach się wyrównają, tj.

$$p_{A2i} = p_{B2i} = p_{mi} > p_o \quad (7)$$

Temperatury osiągają wtedy wartości:

$$t_{A2i} < t_o; t_{B2i} > t_o \quad (8)$$

Uwaga:

Ciśnienie  $p_m$  dla gazu doskonałego może być obliczone ze wzoru:

$$p_m = \frac{p_{A1} + p_{B1}}{2} \quad (9)$$

**Wyprowadzenie wzoru:**

*W przedziale czasu od otwarcia zaworu do jego zamknięcia nie jest wykonywana praca zewnętrzna, a dopływy ciepła są znikome z powodu dużej szybkości procesu. Dlatego można przyjąć, że całkowita energia wewnętrzna układu nie zmienia się (w fazie wyrównywania temperatur już tak nie jest!).*

*Dla gazu doskonałego energia wewnętrzna dana jest wzorem:*

$$U = \frac{pV}{k-1} + U_0$$

*Wobec tego warunek stałości energii dla układu wyraża równanie:*

$$\frac{p_{A1}V}{k-1} + \frac{p_{B1}V}{k-1} = \frac{p_{A2}V}{k-1} + \frac{p_{B2}V}{k-1}$$

*Podstawiając  $p_{A2} = p_{B2} = p_m$  otrzymuje się szukany wzór.*

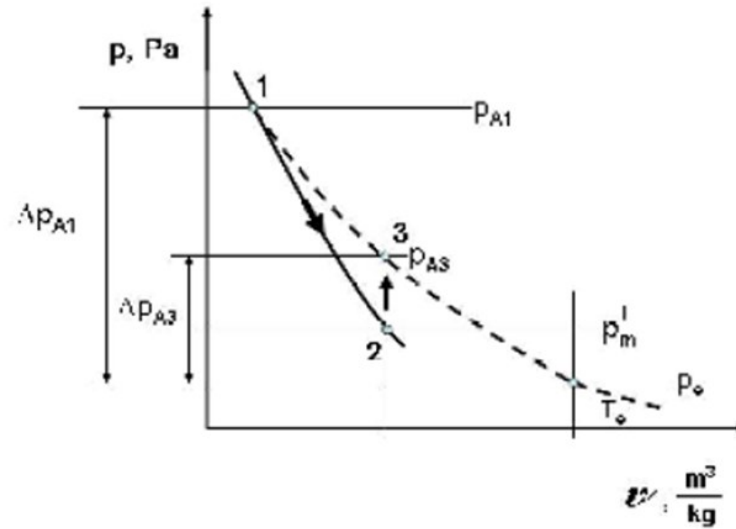
2. Po zamknięciu zaworu należy odczekać, aż temperatura powietrza w zbiornikach ponownie osiągnie wartość:

$$t_{A3i} = t_{B3i} = t_o \quad (10)$$

Wówczas można odczytać ciśnienia  $\Delta p_{A3i}$  i wyliczyć wartość  $p_{A3i}$ :

$$p_{A3i} > p_{B3i} > p_o \quad (11)$$

Opisane wyżej czynności należy powtórzyć dla kilku różnych ciśnień  $p_{B1}$  i tej samej wartości początkowej ciśnienia  $p_{A1}$ .



Rys.2. Proces dekompresji w zbiorniku A w układzie (p-v)

Obowiązują następujące zależności:

$$T_2 < T_o \quad p_{A2i} = p_{mi} \quad (i = 1, 2, \dots, 5)$$

$$T_3 = T_o \quad p_{A3i} > p_m$$

$$p_o v_o = RT_o \quad (R = 0,287 \text{ kJ/kg K})$$

$$p_{mi} = \frac{p_{Ai} + p_{Bli}}{2}$$

$$p_{Ai} = p_o + (\Delta p)_{Ai} \quad p_{Bli} = p_o + (\Delta p)_{Bli}$$

$$(\Delta p)_{Ai} = (\Delta p)_{A1}$$

- stałe np. 800 mm H<sub>2</sub>O

$$(\Delta p)_{Bli} - 0, 150, 300, 450, 600, \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$p_{mi} = \frac{p_o + (\Delta p)_{A1} + p_o + (\Delta p)_{Bli}}{2}$$

lub

$$p_{mi} = p_o + \frac{(\Delta p)_{A1} + (\Delta p)_{Bli}}{2}$$

$$p_{A3i} = p_o + (\Delta p)_{A3i}$$

Stany gazu „1”, „2” leżą na politropie, wobec tego spełniają równanie  $pv^w = idem$

$$p_{.A1} v_{.A1}^w = p_{.A2i} v_{.A2i}^w = p_{mi} v^w \quad \text{stąd:} \quad \frac{p_{.A1}}{p_{.A2i}} = \left( \frac{v_{.A2i}}{v_{.A1}} \right)^w$$

Stany gazów „1” i „3” leżą na izotermie  $T = T_0$ , wobec tego spełniają równanie:

$$p_{A1} v_{A1} = p_{A3i} v_{A3i}$$

Ponieważ:

$$v_{A3i} = v_{A2i} \text{ to:}$$

$$p_{A1} v_{A1} = p_{A3i} v_{A2i} \quad \text{i} \quad \frac{v_{A2i}}{v_{A1}} = \frac{p_{A1}}{p_{A3i}} \quad \text{i ostatecznie:}$$

$$\frac{p_{A1}}{p_{A2i}} = \left( \frac{p_{A1}}{p_{A3i}} \right)^w \quad \text{lub} \quad \frac{p_{A1}}{p_{A3i}} = \left( \frac{p_{A1}}{p_{A2i}} \right)^w$$

Logarytmując otrzymuje się:

$$\ln \frac{p_{A1}}{p_{mi}} = w \ln \frac{p_{A1}}{p_{A3i}}$$

co można zapisać w postaci:

$$\eta_i = w \xi_i$$

#### 4. Opracowanie wyników

1. Wyniki pomiarów umieścić w tabeli:

Tabela wyników pomiarów						
$(\Delta p)_{.A1}$	800 mm H <sub>2</sub> O					ustalić
$(\Delta p)_{.B1i}$	0	150	300	450	600	ustalić
$(\Delta p)_{.A3i}$						mierzyć
$p_{mi}$						wyliczyć
$p_{.A1}$						wyliczyć
$p_{.A3i}$						wyliczyć

2. Obliczyć:

$$\eta_i = \ln \frac{p_{.A1}}{p_{mi}} \qquad \xi_i = \ln \frac{p_{.A1}}{p_{.A3i}}$$

3. Obliczone wartości wstawić do tabeli:

$(\Delta p)_{B1i}$	0	150	300	450	600
$\eta_i$					
$\xi_i$					

i przedstawić na wykresie.

4. Wyznaczyć tzw. linię trendu w postaci  $\eta = w\xi + u$  (wielomianu pierwszego stopnia).
5. Wyznaczyć postać analityczną linii trendu (równanie) oraz współczynnik determinacji  $R_2$ . Tak wyznaczona wartość „w” jest przybliżeniem wykładnika „k” adiabaty gazu doskonałego.
6. Wyznaczyć wskaźnik dokładności oszacowania Y oraz błąd pomiaru b (wyznaczyć wartość w, w stosunku do oczekiwanej wartości k).

#### Oszacowanie dokładności odwzorowania adiabaty

We wstępie podano, że można dokładność tego oszacowania określić wskaźnikiem:

$$Y = \frac{Q_{z1-2}}{U_2 - U_1} = \frac{q_{z1-2}}{u_2 - u_1}$$

Ponieważ  $w \neq k$  i  $w = \text{idem}$  (bo zrealizowana przemiana jest przemianą politropową), to ciepło tej przemiany wynosi:

$$Q_{w1-2} = m c_w (T_2 - T_1)$$

oraz

$$c_w = c_\sigma - \frac{R}{w-1}$$

Ponieważ  $U_2 - U_1 = m c_v (T_2 - T_1)$

Podstawiając w/w zależności do „Y” otrzymuje się:

$$Y = \frac{w-k}{w-1}$$

Dla powietrza  $k=1,4$

Wyznaczenie błędu względnego pomiaru:

$$b = \frac{|w-k|}{k} 100 \%$$

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

Ćw. 2 Praktyczna realizacja przemiany adiabatycznej

**Układ pomiarowy 1:**

Tabela wyników pomiarów						
$p_o$ , hPa/ $p_o$ , mm H <sub>2</sub> O	/					
$\Delta p_{A1}$	800 mm H <sub>2</sub> O					ustalić
$\Delta p_{B1i}$	0	150	300	450	600	ustalić
$\Delta p_{A3i}$						mierzyć
$p_{mi}$						wyliczyć
$p_{A1}$						wyliczyć
$p_{A3i}$						wyliczyć

Dane do wykresu - obliczone wartości  $\eta_i$  i  $\xi_i$ :

$\Delta p_{B1i}$	0	150	300	450	600
$\eta_i$					
$\xi_i$					

**Układ pomiarowy 2:**

Tabela wyników pomiarów						
$p_o$ , hPa/ $p_o$ , mm H <sub>2</sub> O	/					
$\Delta p_{A1}$	800 mm H <sub>2</sub> O					ustalić
$\Delta p_{B1i}$	0	150	300	450	600	ustalić
$\Delta p_{A3i}$						mierzyć
$p_{mi}$						wyliczyć
$p_{A1}$						wyliczyć
$p_{A3i}$						wyliczyć

Dane do wykresu - obliczone wartości  $\eta_i$  i  $\xi_i$ :

$\Delta p_{B1i}$	0	150	300	450	600
$\eta_i$					
$\xi_i$					