

Ciepło pochłonięte (oddane)

$$Q = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1)$$

Strumień ciepła pochłoniętego (oddanego) przez przepływającą substancję

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot (t_2 - t_1)$$

$\dot{m}$  - [kg/s] - strumień substancji

Pierwsza zasada termodynamiki

$$E_d = E_{kon} - E_{pocz} + E_w \quad [J]$$

Pierwsza zasada dla układów w stanie stacjonarnym

$$\dot{E}_d = \dot{E}_w \quad [W]; \quad \Delta \dot{E}_u = 0$$

Temperatura bezwzględna  $T[K] = t[^\circ C] + 273,15$

Przyrost temperatury w przemianie 1-2

$$\Delta T_{1-2} = T_2 - T_1 = t_2 - t_1 = \Delta t_{1-2}$$

Termiczne równanie stanu  $p \cdot V = m \cdot R \cdot T$

$$p \cdot V = n \cdot (MR) \cdot T; \quad p \cdot v = R \cdot T; \quad v = \frac{V}{m} \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

$$p = \rho \cdot R \cdot T; \quad \rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

Indywidualna stała gazowa  $R = \frac{(MR)}{M} \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$

$$(MR) = 8314 \frac{J}{kmol \cdot K}; \quad M = \frac{(MR)}{R} \left[ \frac{kg}{kmol} \right]$$

Termiczne równanie stanu dla strumienia gazu

$$p \cdot \dot{V} = \dot{m} \cdot R \cdot T \quad \dot{V} \text{ [m}^3\text{/s]} - \text{strumień objętości;}$$

$\dot{m}$  [kg/s] - strumień substancji

Przeliczenie kmol na kg  $m = n \cdot M$

Przeliczenie kmol na  $um^3$   $V_u = n \cdot (Mv_u)$

Molowa objętość właściwa w warunkach

$$\text{umownych (1 bar, } 0^\circ C) (Mv_u) = 22,71 \frac{um^3}{kmol}$$

Energia wewnętrzna i entalpia ciała stałego i

$$\text{cieczy } U = I = m \cdot c \cdot t \quad [J]$$

Strumień entalpii cieczy (energia strumienia

$$\text{cieczy) } \dot{I} = \dot{m} \cdot c \cdot t \quad [W]$$

Energia wewnętrzna gazu doskonałego

$$U = m \cdot c_v \cdot T \quad [J]$$

Entalpia gazu doskonałego  $I = m \cdot c_p \cdot T \quad [J]$

Strumień entalpii gazu doskonałego (energia strumienia gazu)  $\dot{I} = \dot{m} \cdot c_p \cdot T \quad [W]$

Ciepło właściwe gazu doskonałego przy stałej

$$\text{objętości } c_v = \frac{1}{2} \cdot f \cdot R \quad c_v = \frac{R}{\kappa - 1} \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

Liczba stopni swobody i wykładnik izentropy dla gazów doskonałych

Gaz	1. atomowy (Ar, He, Ne)	2. atomowy (CO, N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , powietrze)	3. i więcej atomowy (CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> )
$f$	3	5	6
$\kappa$	1,67	1,4	1,33

Ciepło właściwe gazu dosk. przy stałym ciśnieniu

$$c_p = c_v + R \quad c_p = \kappa \cdot c_v = \frac{\kappa \cdot R}{\kappa - 1}; \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

Ciepło właściwe zależne od temperatury

- średnie ciepło właściwe (dla dowolnej zależności rzeczywistego ciepła właściwego od temperatury)

$$c_{|_{t_1}}^{t_2} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} c(t) dt}{t_2 - t_1}$$

- rzeczywiste ciepło właściwe liniowo zależne od temperatury

$$c(t) = a + b \cdot t$$

- średnie ciepło właściwe dla liniowej zależności rzeczywistego ciepła właściwego od temperatury

$$c_{|_{t_1}}^{t_2} = c \left( \frac{t_1 + t_2}{2} \right) = a + b \cdot \frac{t_1 + t_2}{2} \quad \text{oraz}$$

$$c_{f_1}^{f_2} = \frac{c(t_1) + c(t_2)}{2} = \frac{a + b \cdot t_1 + a + b \cdot t_2}{2}$$

### Przemiany gazu doskonałego

Dla wszystkich przemian

$$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + L_{1-2}; \quad \Delta U_{1-2} = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$$

$$Q_{1-2} = \Delta I_{1-2} + L_{1-2}; \quad \Delta I_{1-2} = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\boxed{\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}}$$

Izobara  $p = idem$ ;  $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$

$$L_{1-2} = p \cdot (V_2 - V_1) = m \cdot R \cdot (T_2 - T_1);$$

$$L_{1-2} = 0$$

$$Q_{1-2} = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

Izochora  $V = idem$ ;  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$

$$L_{1-2} = 0; \quad L_{1-2} = V \cdot (p_1 - p_2)$$

$$Q_{1-2} = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$$

Izoterma  $T = idem$ ;  $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$

$$L_{1-2} = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = m \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right);$$

$$L_{1-2} = L_{1-2}; \quad Q_{1-2} = L_{1-2}$$

Izentroza  $s = idem$ ;  $p_1 \cdot V_1^\kappa = p_2 \cdot V_2^\kappa$ ;

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{\kappa}}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}; \quad \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}};$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1}; \quad \frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$$

$$L_{1-2} = m \cdot c_v \cdot (T_1 - T_2) = \frac{p_1 \cdot V_1}{\kappa - 1} \cdot \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]$$

$$L_{1-2} = \kappa \cdot L_{1-2}$$

$$Q_{1-2} = 0$$

### Roztwory gazów doskonałych

Udziały składników w roztworze

$$g_i = \frac{m_i}{m}; \quad z_i = \frac{n_i}{n}, \quad r_i = \frac{V_{ui}}{V_u}$$

$$g_1 + g_2 + g_3 + \dots = 1$$

$$z_1 + z_2 + z_3 + \dots = 1; \quad r_1 + r_2 + r_3 + \dots = 1$$

Zastępcza indywidualna stała gazowa

$$R_z = g_1 \cdot R_1 + g_2 \cdot R_2 + g_3 \cdot R_3 + \dots$$

Zastępcza masa molowa

$$M_z = z_1 \cdot M_1 + z_2 \cdot M_2 + z_3 \cdot M_3 + \dots$$

Zastępcze ciepło właściwe przy stałej objętości

$$c_{vz} = g_1 \cdot c_{v1} + g_2 \cdot c_{v2} + g_3 \cdot c_{v3} + \dots$$

Zastępcze ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu

$$c_{pz} = c_{vz} + R_z$$

Zastępczy wykładnik izentropy (zawiera się w granicach od 1,333 do 1,667)

$$\kappa_z = \frac{c_{pz}}{c_{vz}}$$

### Obiegi cieplne

Praca obiegu

$$L_{ob} = Q_d - |Q_w| = L_{eks} - |L_{kom}|$$

Sprawność termiczna obiegu

$$\eta_t = \frac{L_{ob}}{Q_d} = 1 - \frac{|Q_w|}{Q_d} = \frac{l_{ob}}{q_d} = 1 - \frac{|q_w|}{q_d}$$

**Pamiętać!** Ciepło jest doprowadzane, gdy podczas przemiany wzrasta entropia. Praca jest wyprowadzana, gdy podczas przemiany wzrasta objętość (ekspansja).

### Para wodna

Stopień suchości pary (nasyconej) mokrej

$$x = \frac{m''}{m' + m''}$$

Entalpia wody  $i_w = c_{pw} \cdot t$  [kJ/kg]

Entalpia wrzącej wody (w stanie punktu pęcherzyków)

$$i' = c_{pw} \cdot t_s$$

### Energia wewnętrzna pary

$$u = i \text{ [J/kg]} - p \text{ [Pa]} \cdot v \text{ [m}^3 \text{/kg]} \quad \text{[J/kg]}$$

#### Izobara 1-2

$$Q_{1-2} = m \cdot (i_2 - i_1)$$

$$L_{1-2} = m \cdot p \cdot (v_2 - v_1)$$

$$L_{t1-2} = 0$$

#### Izochora 1-2

$$Q_{1-2} = m \cdot (u_2 - u_1)$$

$$L_{1-2} = 0$$

#### Izoterma 1-2

$$Q_{1-2} = m \cdot (s_2 - s_1) \cdot T_{1,2}$$

$$L_{1-2} = Q_{1-2} - \Delta U_{1-2}$$

$$\Delta U_{1-2} = m \cdot (u_2 - u_1)$$

#### Izentropa 1-2

$$Q_{1-2} = 0$$

$$L_{1-2} = m \cdot (u_1 - u_2)$$

$$L_{t1-2} = m \cdot (i_1 - i_2)$$

### Wybrane oznaczenia

$c_v$  [J/(kg·K)] – ciepło właściwe przy stałej objętości

$c_p$  [J/(kg·K)] – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu

$E_d$  [J] – energia doprowadzona do układu

$E_w$  [J] – energia wyprowadzona z układu

$E_{pocz}$  [J] – energia początkowa układu

$E_{kon}$  [J] – energia końcowa układu

$\dot{E}_d$  [W] – strumień energii doprowadzanej do układu

$\dot{E}_w$  [W] – strumień energii wyprowadzanej z układu

$f$  – liczba stopni swobody cząsteczki gazu doskonałego

$g_i$  – udział kilogramowy w roztworze składnika o numerze  $i$

$i$  [J/kg] – entalpia właściwa

$I$  [J] – entalpia

$\dot{I}$  [W] – strumień entalpii

$L_{1-2}$  [J] – praca bezwzględna przemiany

$L_{t1-2}$  [J] – praca techniczna przemiany

$L_{ob}$  [J] – praca obiegu

$L_{eks}$  [J] – praca ekspansji (suma prac ekspansji)

$L_{kom}$  [J] – praca kompresji (suma prac kompresji)

$M$  [kg/kmol] – masa molowa

$Q_{1-2}$  [J] – ciepło przemiany

$Q_d$  [J] – ciepło doprowadzone do obiegu

$Q_w$  [J] – ciepło wyprowadzone z obiegu

$\dot{Q}$  [W] – strumień ciepła

$u$  [J/kg] – energia wewnętrzna właściwa

$U$  [J] – energia wewnętrzna

$R$  [J/(kg·K)] – indywidualna stała gazowa

$t_s$  [°C] – temperatura wrzenia/skrapiania

$v$  [m<sup>3</sup>/kg] – objętość właściwa

### Przeliczanie jednostek

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$$

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ litrów (l)}$$

### Matematyka

$$\ln\left(\frac{x}{y}\right) = a \Rightarrow \frac{x}{y} = e^a$$

$$\text{Gdy } \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^p = \frac{y_2}{y_1} \text{ to także } \left(\frac{x_1}{x_2}\right)^p = \frac{y_1}{y_2} \text{ oraz}$$

$$\frac{x_2}{x_1} = \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^{\frac{1}{p}}$$

$$\text{Jeżeli } a \cdot b = x \cdot y \text{ to } a = \frac{x \cdot y}{b}$$

$$\int a \cdot dx = a \cdot x \quad - \text{gdzie } a \text{ jest stałą}$$

$$\int x = \frac{x^2}{2}$$