

Karta Wzorów — Termodynamika Techniczna

Tabela stałych

	μ	R	c_p	c_v	
Substancja	$kg/kmol$	$J/(kg \cdot K)$	$kJ/(kg \cdot K)$	$kJ/(kg \cdot K)$	κ
Powietrze	28,96	287,0	1,005	0,718	1,40
Para wodna	18,01	461,5	1,860	1,399	1,33
Azot N_2	28,01	296,8	1,039	0,743	1,40
Tlen O_2	32,00	259,8	0,918	0,658	1,40
CO_2	44,01	188,9	0,844	0,655	1,29
Metan CH_4	16,04	518,3	2,226	1,708	1,30
Woda (ciecz)	18,01	—	4,19	—	—

Stała uniwersalna: $MR = 8314 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$. Stała Stefana-Boltzmanna: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Równanie stanu gazu doskonałego

$$pV = mRT, \quad R = \frac{MR}{\mu}, \quad c_p - c_v = R, \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

I Zasada Termodynamiki

- Układ zamknięty: $Q_{1-2} = \Delta U + L_{1-2}$
- Układ otwarty (przepływ ustalony): $Q_{1-2} = \Delta H + L_t$
- Praca objętościowa: $L = \int p dV$, praca techniczna: $L_t = -\int V dp$
- Bilans turbiny/sprężarki (adiabat., przepływ ustalony): $P = \dot{m} \left[(h_1 - h_2) + \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2} \right]$
- Bilans kotła/wymiennika: $\dot{Q} = \dot{m}(h_{wy} - h_{we})$

Przemiany gazu doskonałego ($pv^n = \text{const}$)

Przemiana	n	Warunek	Ciepło
Izobara	0	$p = \text{const}$	$Q = mc_p \Delta T$
Izoterma	1	$T = \text{const}$	$Q = L = mRT \ln(V_2/V_1)$
Izentropa	κ	$S = \text{const}$	$Q = 0$
Izochora	∞	$V = \text{const}$	$Q = mc_v \Delta T$

Związek izentrop: $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\kappa-1)/\kappa}$

Sprawności obiegów

- Sprawność termiczna: $\eta = 1 - \frac{|Q_{odpr}|}{Q_{dop}}$
- Obieg Carnota: $\eta_C = 1 - \frac{T_L}{T_H}$ (temperatury w K)
- COP chłodziarki: $COP_{ch} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$, COP pompy ciepła: $COP_{PC} = \frac{T_H}{T_H - T_L} = COP_{ch} + 1$
- Związek moc — ciepło: $\dot{Q}_{dop} = P/\eta$, $\dot{Q}_{odpr} = \dot{Q}_{dop} - P$

Para wodna

- Stopień suchości: $x = m''/(m' + m'')$
- Entalpia pary mokrej: $h_x = h' + x \cdot r$, gdzie $r = h'' - h'$

Tablica entalpii pary wodnej nasyconej

p [bar]	t_s [°C]	h' [kJ/kg]	h'' [kJ/kg]	r [kJ/kg]
1	99,6	417	2675	2258
2	120,2	505	2707	2202
4	143,6	605	2738	2133
6	158,8	670	2757	2087
8	170,4	721	2769	2048
10	179,9	763	2778	2015
15	198,3	845	2792	1947
20	212,4	909	2799	1890
30	233,8	1008	2803	1795
40	250,3	1087	2801	1714

Entalpia pary przegrzanej [kJ/kg]

p [bar]	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C	500 °C
1	2875	2974	3074	3175	3278	3488
4	2861	2964	3067	3170	3273	3484
8	2839	2950	3057	3162	3268	3481
15	—	2924	3038	3148	3257	3474
20	—	2903	3024	3138	3248	3468
30	—	—	2994	3116	3231	3457
40	—	—	2961	3093	3214	3446

„—” oznacza, że para nie istnieje przy tych parametrach (poniżej temperatury nasycenia).

Wymiana ciepła

- Przewodzenie (Fourier): $\dot{Q} = \lambda A \Delta T / \delta$
- Konwekcja (Newton): $\dot{Q} = \alpha A (T_s - T_\infty)$
- Współczynnik przenikania: $U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} + \sum \frac{\rho_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_z}}$
- Wymiennik ciepła: $\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm}$, gdzie $\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$
- Promieniowanie: $\dot{Q} = \varepsilon \sigma A T^4$

Powietrze wilgotne

- Zawilżenie: $X = 622 \cdot \frac{p_w}{p_B - p_w}$
 g/kg
- Wilgotność względna: $\varphi = p_w / p_s(T)$
- Entalpia: $h \approx 1,005 t + X(2,5 + 0,00186 t)$
 kJ/kg
- Mieszanie: $X_M = (m_1 X_1 + m_2 X_2) / (m_1 + m_2)$, analogicznie t_M
- Sprawność rekuperatora: $\eta_t = (t_{naw,wy} - t_{naw,we}) / (t_{wyw,we} - t_{naw,we})$