

# Karta Wzorów — Termodynamika Techniczna

## Tabela stałych

	$\mu$	$R$	$c_p$	$c_v$	
Substancja	$kg/kmol$	$J/(kg \cdot K)$	$kJ/(kg \cdot K)$	$kJ/(kg \cdot K)$	$\kappa$
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	$\kappa$	$S = \text{const}$	$Q = 0$
Izochora	$\infty$	$V = \text{const}$	$Q = mc_v \Delta T$

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

## 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:  $U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_z}}$
- 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:  $\eta_t = (t_{naw,wy} - t_{naw,we}) / (t_{wyw,we} - t_{naw,we})$