

Termodynamika – základní veličiny

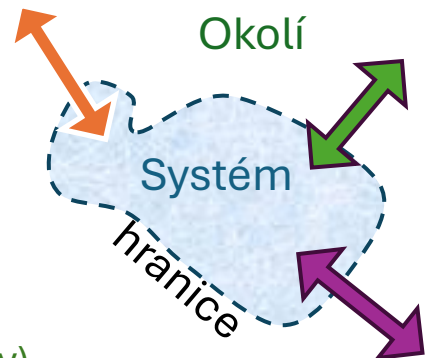
m	hmotnost (kg)
n	látkové množství (mol)
V, v	objem, měrný objem (m^3), ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)
T	termodynamická teplota (K)
ρ	hustota ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
p	tlak (Pa)
M	molární hmotnost ($\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$)
R	univerzální plynová konstanta ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kmol}^{-1}$)
r	měrná plynová konstanta ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)
C_p, c_p	tepelná kapacita isobarická, měrná tepelná kapacita isobarická ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$), ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)
C_v, c_v	tepelná kapacita isochorická, měrná tepelná kapacita isochorická ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$), ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)
κ	Poissonova konstanta (1)
U, u	vnitřní energie, měrná vnitřní energie (J), ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
H, h	entalpie, měrná entalpie (někdy též I, i) (J), ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
W, w	práce, měrná práce (někdy též objemová práce) (J), ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
W_t, w_t	technická práce, měrná technická práce (J), ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Q, q	teplo, měrné teplo (J), ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
$\dot{Q}, \dot{q}$	tepelný tok, plošná hustota tepelného toku (W), ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
F, f	Helmholtzova volná energie, měrná Helmholtzova volná energie (J), ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
G, g	Gibsova energie (volná entalpie), měrná Gibsova energie (J), ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
S, s	entropie, měrná entropie ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$), ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)
L, l	latentní teplo, měrné latentní teplo – teplo fázové přeměny (J), ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Základní pojmy

Termodynamický systém

Hranice termodynamického systému

Okolí systému



Podle vztahu k okolí

Otevřený/uzavřený (z pohledu výměny látky)

Tepelně/mechanicky izolovaný/neizolovaný (z pohledu výměny různých druhů energie)

Používané veličiny

- Extenzitní veličiny = závislé na množství látky (m) v systému ($V, U, Q, W, \dots$)
- Intenzitní veličiny = nezávislé na množství látky (m) v systému ($p, T, v, u, q, w, \dots$)
- Stavové veličiny – popisují stav v daném okamžiku ($V, T, p, h, u, U, F, G, S, \dots$)
- Procesní veličiny – vázané na proces, není možné určit jejich velikost v konkrétním stavu (Q, W, W_t)

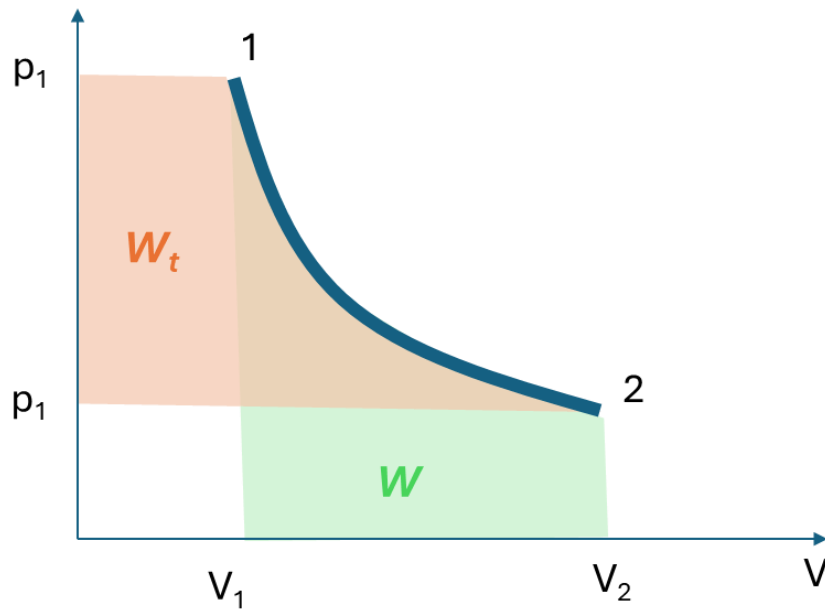
Termodynamické procesy (zde řešené)

- Jednoduché děje (expanze, komprese...)
- Kruhové děje = cykly (cyklus plynové turbíny)
- Rovnovážné = kvazistatické (nekonečně pomalé)
- Vratné = idealizované (průběh lze obrátit)
- Nevratné = skutečné

Základní pojmy

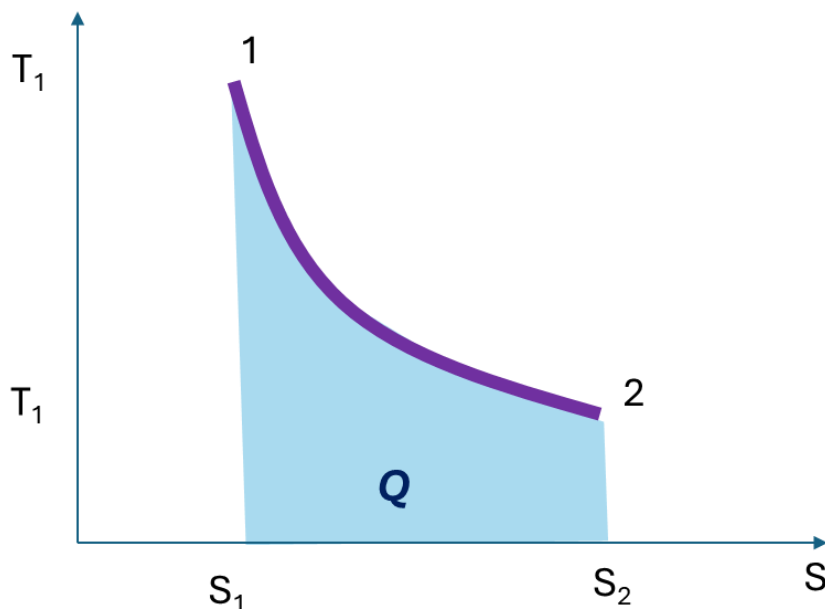
Pracovní diagram (p - V)

Plocha pod křivkou odpovídá vykonané práci nebo technické práci



Tepelný diagram (T - S)

Plocha pod křivkou odpovídá přivedenému/odvedenému teple



Termodynamické zákony

1. zákon termodynamiky

Teplo je rovnomocné mechanické práci

$$dU = \delta Q - \delta W$$

kde: $\delta W = -pdV$ je práce dodaná systému

Platí pro ideální i reálné plyny, pro vratné i nevratné děje

Další tvary 1. zákonu

1. zákon termodynamiky pro otevřený systém

$$dH = \delta Q - \delta W_t$$

kde: $H = U + pV$, $\delta W_t = -Vdp$

Platí pro ideální i reálné plyny, pro vratné i nevratné děje

Gibbsova rovnice

$$dU = TdS - pdV$$

Platí pro vratné děje

Druhý tvar Gibbsovy rovnice

$$dH = TdS + Vdp$$

Platí pro vratné děje

1. zákon termodynamiky pro kruhový děj

$$\oint dQ = \oint dW = \oint dW_t$$

Termodynamické zákony

2. zákon termodynamiky

Thomson-Planck: Není možné sestrojít trvale pracující stroj, který by nezpůsoboval žádných jiných změn, než že by produkoval práci odnímáním ekvivalentního množství tepla ze zdroje o stále teplotě.

Carnot-Claussius: Teplo samo o sobě (bez dalšího působení) nemůže samovolně přecházet z teploty nižší na teplotu vyšší. Všechny samovolné děje jsou nevratné.

Lewis: Pro žádný proces nelze najít způsob, jak vrátit celý systém do výchozího stavu.

Plank: Práci lze převést totálně v teplo, opačný proces je nemožný.

Matematická formulace

Pro nevratné děje

$$dS > \frac{dQ}{T}$$

Pro vratné děje

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

3. zákon termodynamiky

Čistou pevnou látku není možné konečným počtem pochodů ochladit na 0 K.

Při absolutní nule je entropie čisté pevné látky nebo kapalného skupenství rovna nule.

Model ideálního plynu

Ideální plyn (IP):

- dokonale stlačitelný
- bez vnitřního tření
- rozměry částic jsou zanedbatelné vzhledem ke vzdálenostem mezi nimi
- kromě srážek na sebe částice jinak nepůsobí
- celková kinetická energie částic se při vzájemných srážkách nemění, tzn. srážky částic jsou dokonale pružné

Stavová rovnice ideálního plynu:

$$pV = nRT$$

$$pV = mrT$$

$$pv = rT$$

Kde: $r = \frac{R}{M}$, T – termodynamická teplota (K), $R = 8\,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kmol}^{-1}$,

$r_{\text{vzduch}} = 287 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Pro IP platí:

$$U = U(T) \rightarrow dU = C_v dT$$

$$H = H(T) \rightarrow dH = C_p dT$$

Mayerova rovnice:

$$c_p + c_v = r$$

$$\frac{c_p}{c_v} = \kappa$$

Počet atomů v molekule	κ	Příklad
1	1,66	Vzácné plyny
2	1,40	N_2 , O_2 , H_2
3 a více	1,33	H_2O , CO_2 , ...

Prvek	Molární hmotnost M ($\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$)
H	1
C	12
N	14
O	16

Vratné změny stavu ideálního plynu

Izochorická změna		$dv = 0$ (v je konstantní)
Izobarická změna		$dp = 0$ (p je konstantní)
Izotermická změna		$dT = 0$
Izoentropická změna		
(vratná adiabatická)		$dS = 0$
Izoenergetická změna		$dU = 0$
Izoentalpická změna		$dH = 0$
Adiabatická změna		$dQ = 0$ (tepelně izolovaný systém)

Obecná vratná změna = polytropická změna

Funkce pro jednotlivé změny:

$$pv = rT$$



$$pv^x = konst$$

$$x = 0 \dots p = konst.$$

$$x = 1 \dots T = konst.$$

$$x = \kappa \dots s = konst.$$

$$x = n \dots \text{polytropa}$$

$$x = \infty \dots v = konst.$$

Vratné změny stavu ideálního plynu

$$pv^x = konst$$

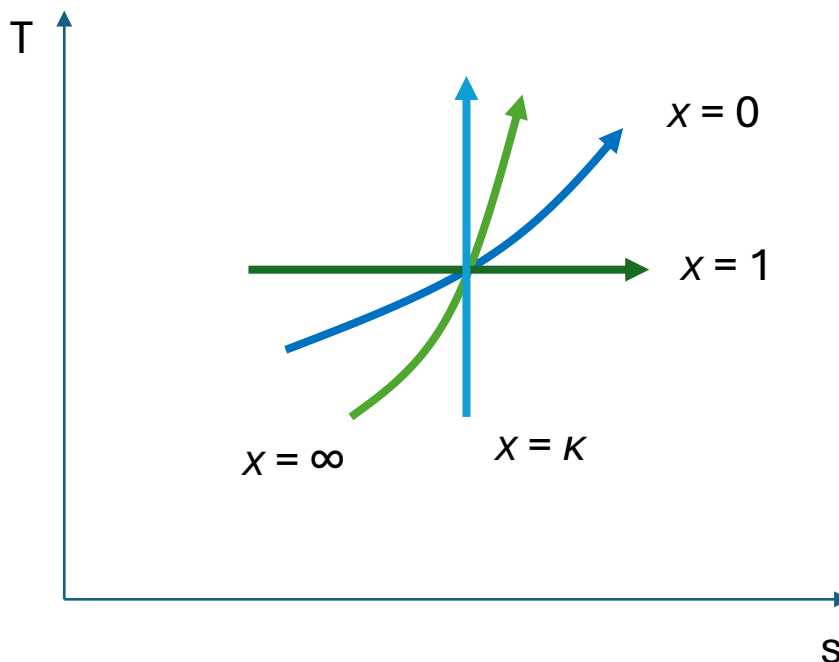
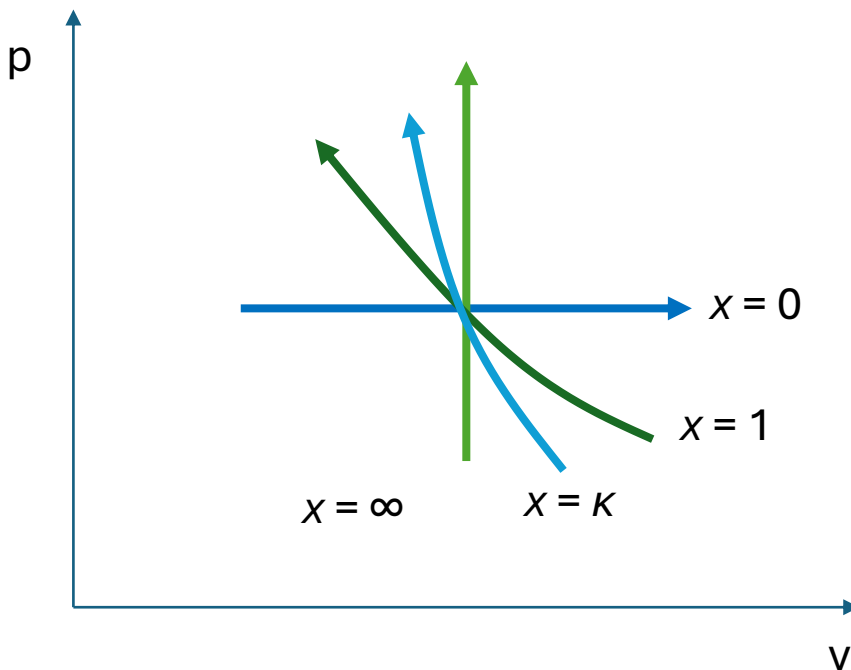
$x = 0 \dots p = konst.$

$x = 1 \dots T = konst.$

$x = \kappa \dots s = konst.$

$x = n \dots \text{polytropa}$

$x = \infty \dots v = konst.$



Vratné změny stavu ideálního plynu

Izobarická změna

$$pv^0 = konst$$

$$\delta w_{t,1-2} = 0$$

$$\Delta w (= w_{1-2}) = p\Delta v$$

$$\Delta w_t = 0$$

$$\Delta q = \Delta h = c_p \Delta T$$

$$\Delta u = c_v \Delta T$$

Izochorická změna

$$pv^\infty = konst$$

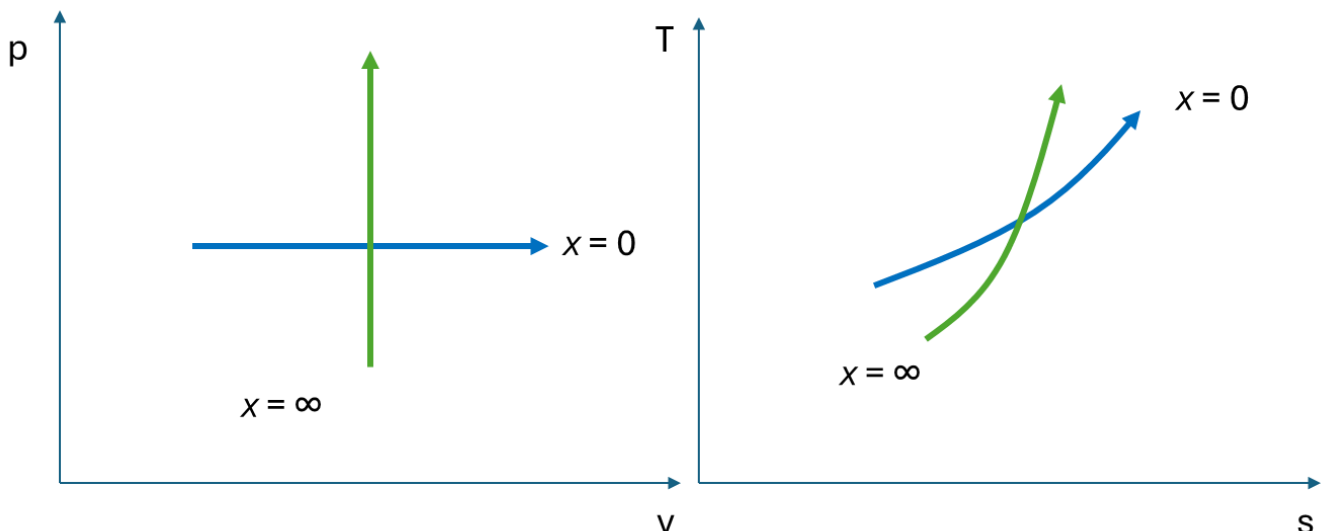
$$\delta w_{1-2} = 0$$

$$\Delta w = 0$$

$$\Delta w_t = v\Delta p$$

$$\Delta q = \Delta u_{1-2} = c_v \Delta T$$

$$\Delta h = c_p \Delta T$$



Vratné změny stavu ideálního plynu

Izotermická změna

$$pv^1 = konst$$

$$\Delta w = \Delta q = rT_1 \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right)$$

$$\Delta w_t = -v\Delta p$$

$$w_{t,1-2} = q_{1-2} = rT_1 \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right)$$

$$\Delta h = 0$$

$$\Delta u = 0$$

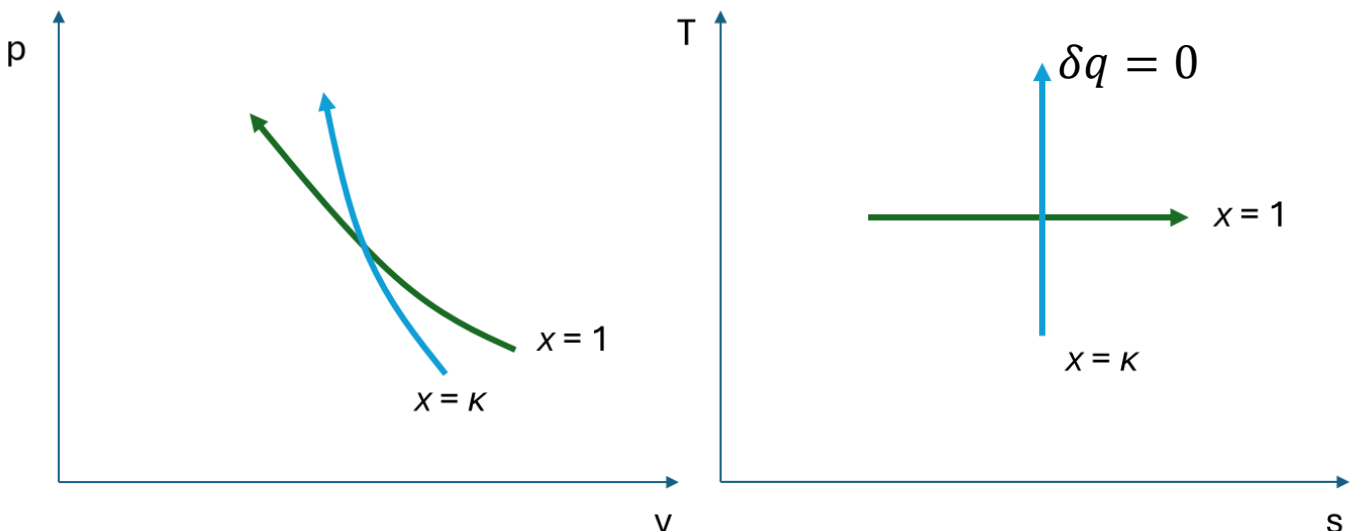
Izoentropická změna (vratná adiabata)

$$pv^\kappa = konst$$

$$\Delta w = \Delta u = c_v \Delta T$$

$$\Delta w_t = \Delta h = c_p \Delta T$$

$$\Delta q = 0$$



Základní porovnávací cykly (vratné)

Typ	Komprese, 1→2	Dodání tepla, 2→3	Expanze, 3→4	Odvod tepla, 4→1
<u>S externím spalováním</u>				
<u>Carnot</u>	$ds = 0$	$dT = 0$	$ds = 0$	$dT = 0$
<u>Rankine</u>	$ds = 0$	$dp = 0$	$ds = 0$	$dp = 0$
<u>Stirling</u>	$dT = 0$	$dv = 0$	$dT = 0$	$dv = 0$
<u>S interním spalováním</u>				
<u>Brayton</u>	$ds = 0$	$dp = 0$	$ds = 0$	$dp = 0$
<u>Diesel</u>	$ds = 0$	$dp = 0$	$ds = 0$	$dv = 0$
<u>Humphrey</u>	$ds = 0$	$dv = 0$	$ds = 0$	$dp = 0$
<u>Lenoir</u>		$dv = 0$	$ds = 0$	$dp = 0$
<u>Otto</u>	$ds = 0$	$dv = 0$	$ds = 0$	$dv = 0$

Příklad – Brytonův cyklus (Plynová turbína)

