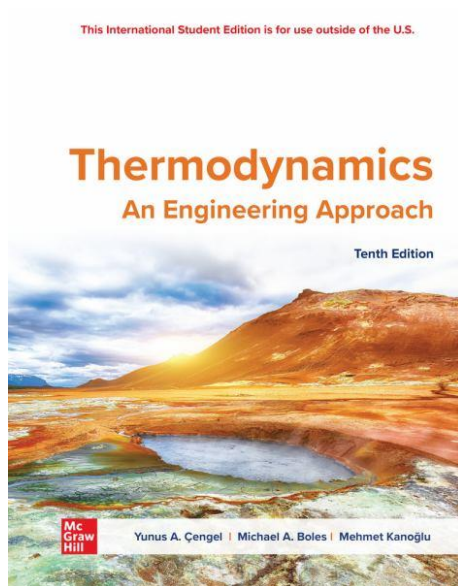




Základy termodynamiky plynů a par

Doporučená literatura

- **Cengel, Y., Boles, M., Kanoglu, M. *Thermodynamics: An Engineering Approach* .**
10th Edition, New York: Mcgraw Hill Education, 2023. ISBN-13: 978-1266152115.
ISBN-10: 1266152113.



Obsah přednášky

- **Termodynamika plynů a par (základní pojmy, dělení)**
- **Diagramy čisté látky**
- **Stavové a procesní veličiny**
- **Základní vztahy popisující chování plynů (TDZ, SRIP)**
- **Zkapalňování reálných plynů**

Termodynamika plynů a par

Termodynamika

- Nauka o zákonitostech přeměn různých forem energií, o směru samovolných dějů, o rovnováhách
- Zkoumá makroskopické vlastnosti systémů (p , T , ...)
- Umožňuje stanovit tepelnou bilanci dějů, umožňuje posoudit, zda určitý děj může proběhnout, neumožňuje stanovit rychlost průběhu dějů
- Patří do skupiny inženýrských předmětů (statika, kinematika, dynamika, pružnost pevnost, mechanika tekutin, sdílení tepla, ...)
- Předpokládá znalosti matematiky

Základní dělení termodynamiky (1)

Fenomenologická termodynamika

- Pracuje s představou spojitého rozložení látky v prostoru: látka = kontinuum
- Stav látky popisuje přímo měřitelnými veličinami (p , T , ...) nebo veličinami, které se z měřitelných dají spočítat (u , s , h , ...)
- Všechny zákony se odvozují z přímých pozorování
- Nelze použít např. pro popis dějů probíhajících ve velmi zředěných plynech
- Makroskopická teorie, tj. pracuje se systémy, jejichž rozměry jsou podstatně větší než rozměry mikročástic

Statistická termodynamika

- Přihlíží k molekulové stavbě látek
- Podstatně náročnější na matematický aparát

Základní dělení termodynamiky (2)

Technická termodynamika

- Aplikovaná na plyny a páry (fyzikální děje probíhající v tepelných strojích a zařízeních)

Termodynamika poddajných těles

- Aplikovaná na látky v tuhém stavu

Chemická termodynamika

- Aplikovaná na chemické děje (např. spalování apod.)

Základní dělení termodynamiky (3)

Rovnovážná (klasická) termodynamika

- Termodynamická rovnováha nastane, nemění-li se složení ani ostatní stavové veličiny s časem
- Systém je v rovnováze, pokud je vůči okolí izolován
- Rovnováha mechanická (tlak), tepelná (teplota), chemická (složení)

Nerovnovážná termodynamika

- Klasická termodynamika + teorie přenosových dějů

Základní termodynamické pojmy

Termodynamický systém (TD systém)

- Část prostoru oddělená od okolí skutečnými nebo myšlenými stěnami, se kterou pracujeme

Hranice systému

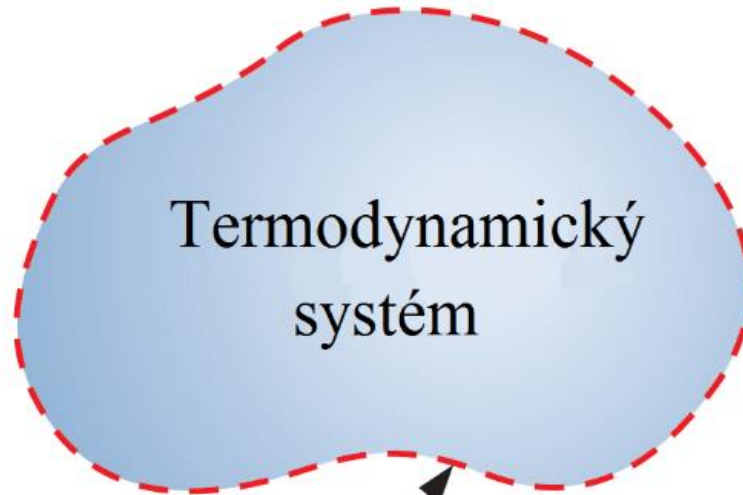
- Uzavřená plocha obklopující termodynamický systém

Okolí systému

- Vše vně termodynamického systému (jiný systém)

Základní termodynamické pojmy (2)

Okolí

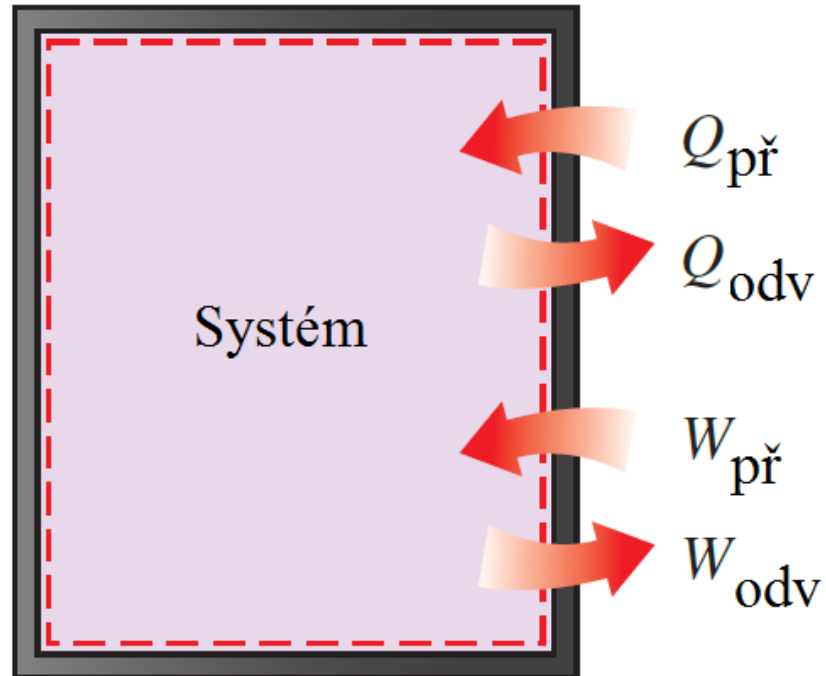


Termodynamický
systém

Hranice

Základní termodynamické pojmy (3)

Okolí



Druhy termodynamických systémů

Dle jeho vztahu k okolí

- Otevřený (dochází k výměně látky mezi systémem a okolím)
- Uzavřený (nedochází k výměně látky mezi systémem a okolím)
- Neizolovaný (dochází k přenosu energie mezi systémem a okolím)
- Izolovaný (nedochází k přenosu energie mezi systémem a okolím)

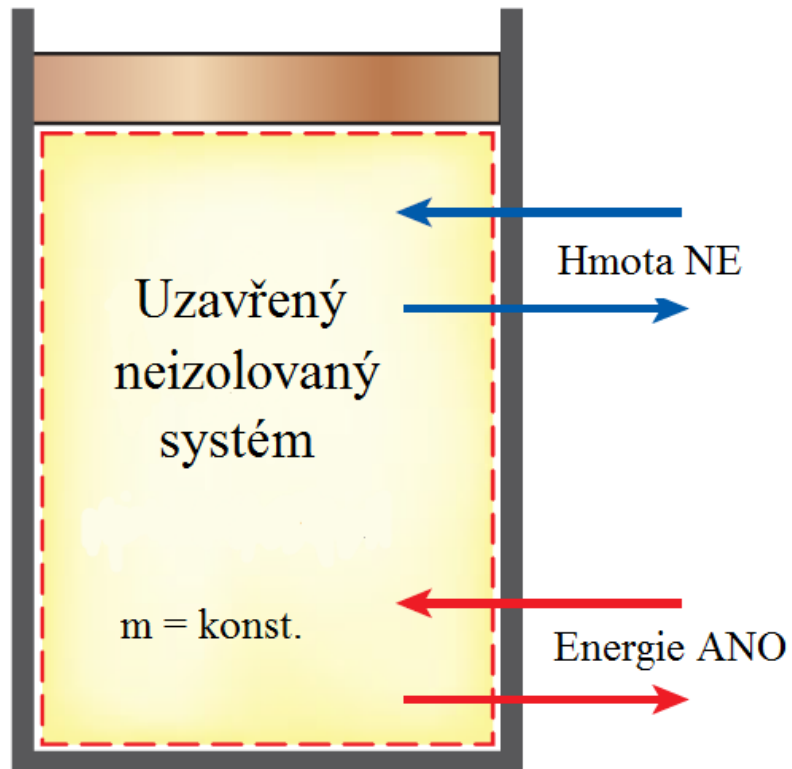
Dle jeho chemického složení

- Jednosložkový (čisté látky, např. voda)
- Vícesložkový (směsi, např. vzduch)

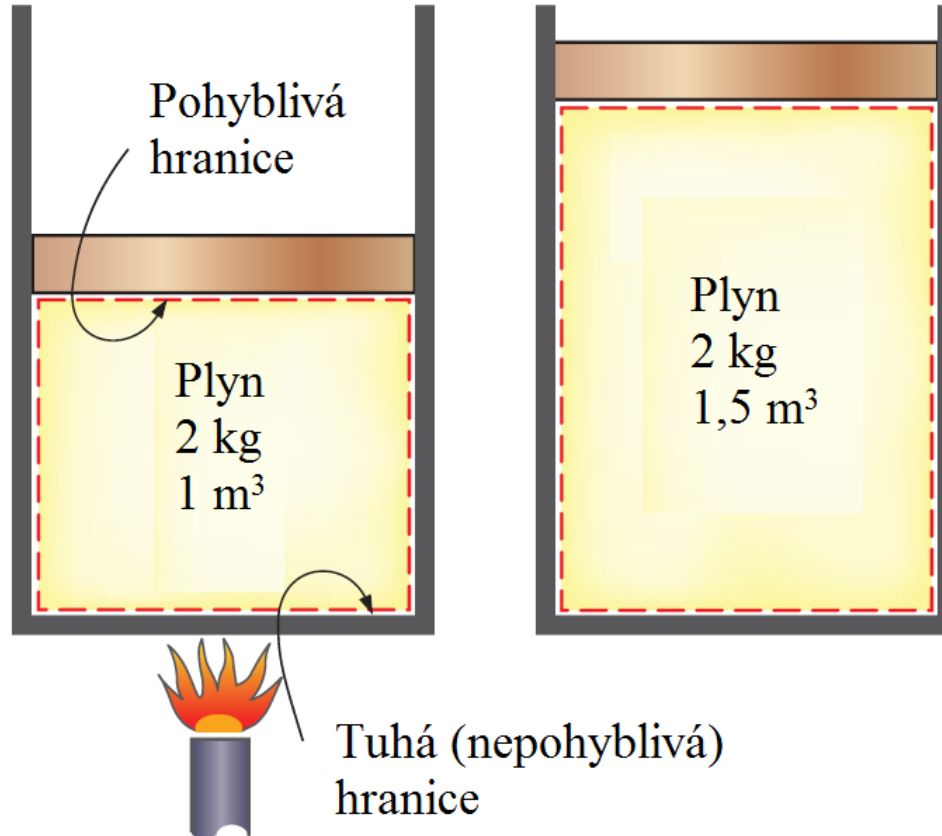
Dle jeho fázového složení

- Homogenní (např. voda v kapalném stavu)
- Heterogenní – více homogenních oblastí (např. voda v kapalném stavu s ledem)

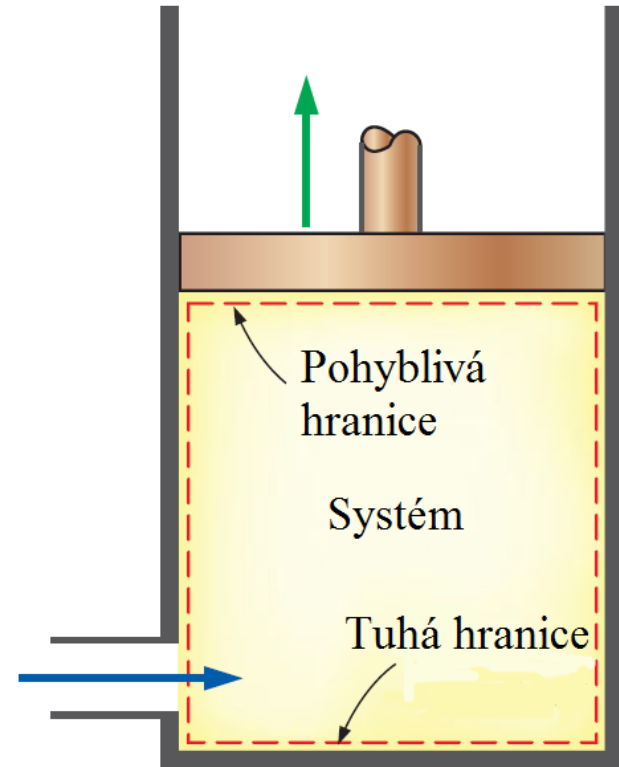
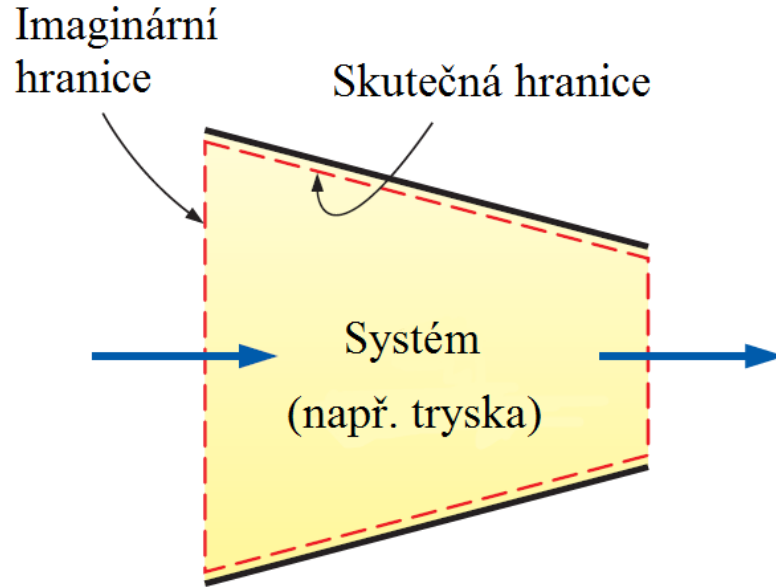
Druhy termodynamických systémů (2)



Druhy termodynamických systémů (3)



Druhy termodynamických systémů (4)

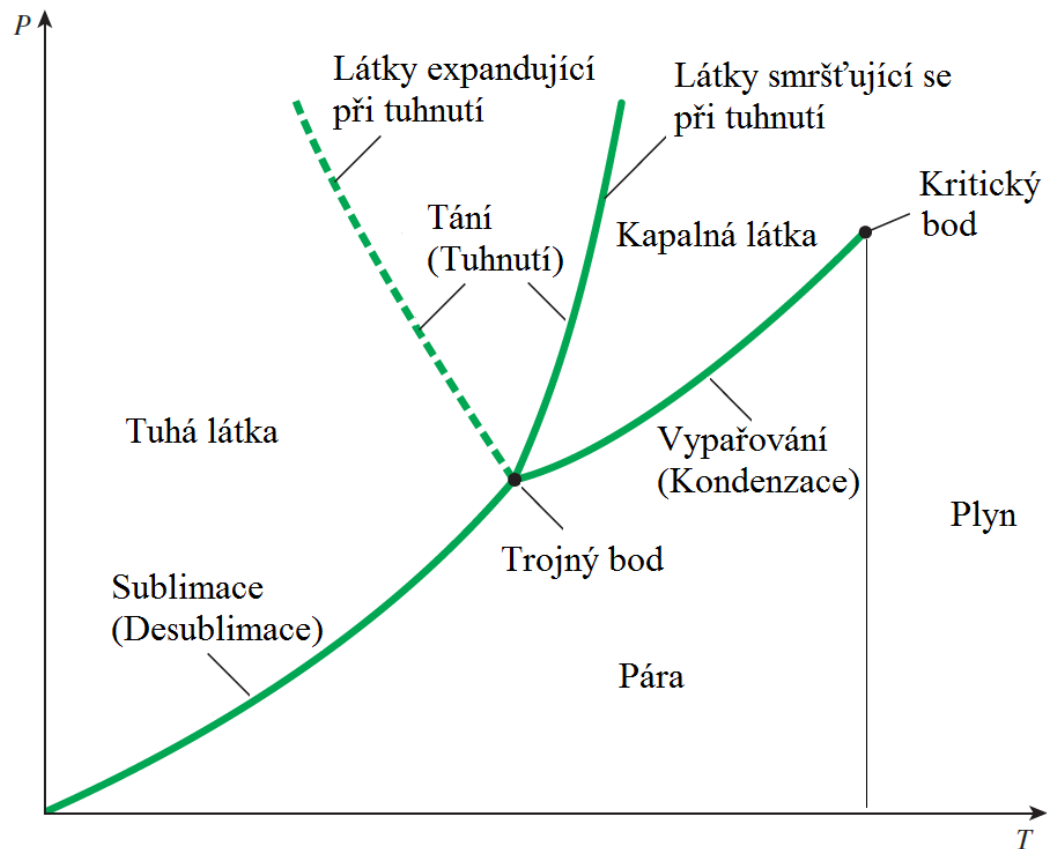


Diagramy čisté látky

Jednotlivé fáze čistých látek

Téměř každou látku lze převést do tuhého, kapalného a plynného stavu.

Rovnovážený fázový diagram čisté látky



Rovnovážný fázový diagram čisté látky (2)

Křivky ve fázovém diagramu (mezní křivky)

- Oddělují jednotlivé fáze látky (tuhá, kapalná, plynná)
- Tvar křivek je podobný pro všechny látky
- křivka tání/tuhnutí ($t - k$) - často téměř kolmice, kdy teplota tání závisí na tlaku jen velmi nepatrně
- křivka vypařování/kondenzace ($k - p$) - teplota varu s tlakem výrazně narůstá
- křivka sublimace/desublimace ($t - p$) - teplota sublimace s tlakem výrazně narůstá
- Na mezních křivkách je heterogenní (vícefázový) systém
- Mimo mezní křivky je homogenní (jednofázový) systém

Rovnovážný fázový diagram čisté látky (3)

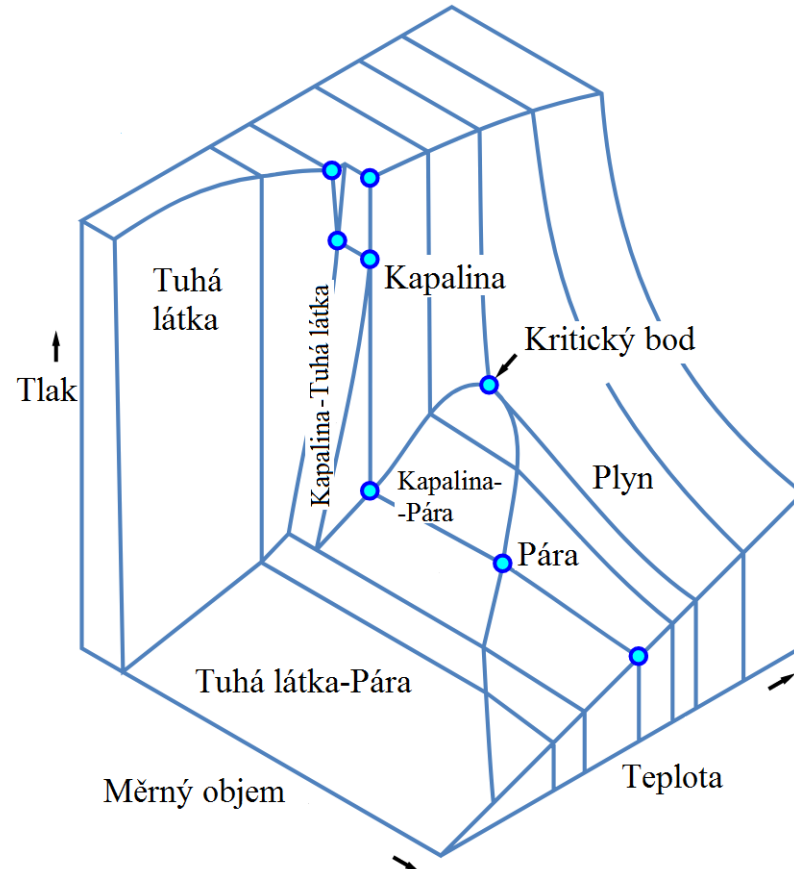
Důležité body ve fázovém diagramu

- trojný bod = průsečík mezních křivek, oblast existence všech tří fází současně
- kritický bod = téměř žádný rozdíl mezi kapalnou a plynnou fází
- poloha trojného a kritického bodu se u různých látek liší, např. H_2O :

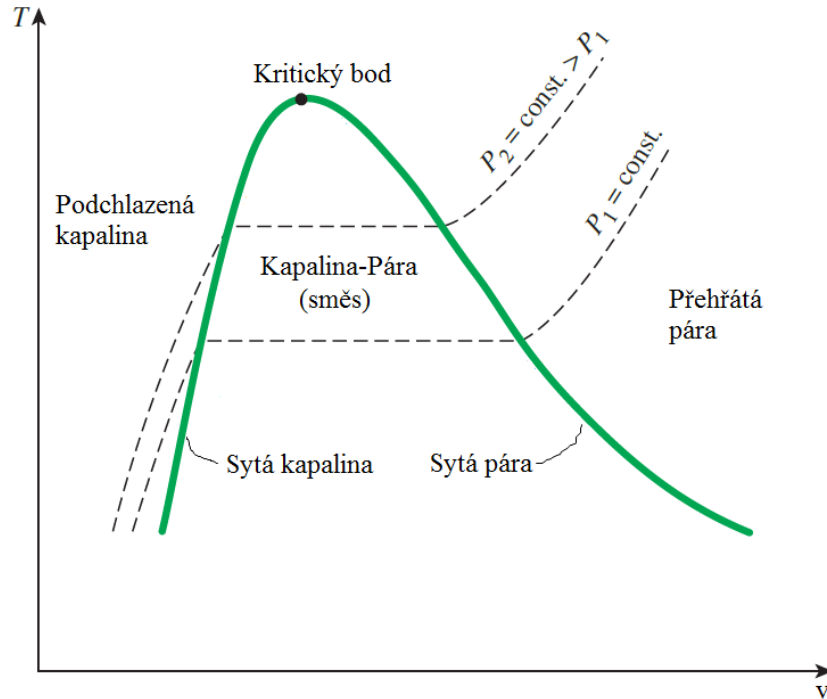
$$p_{\text{tr}} = 611,657 \text{ Pa}$$
$$T_{\text{tr}} = 273,16 \text{ K} = 0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$p_{\text{krit}} = 22,064 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$
$$T_{\text{krit}} = 647,096 \text{ K} = 373,946 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

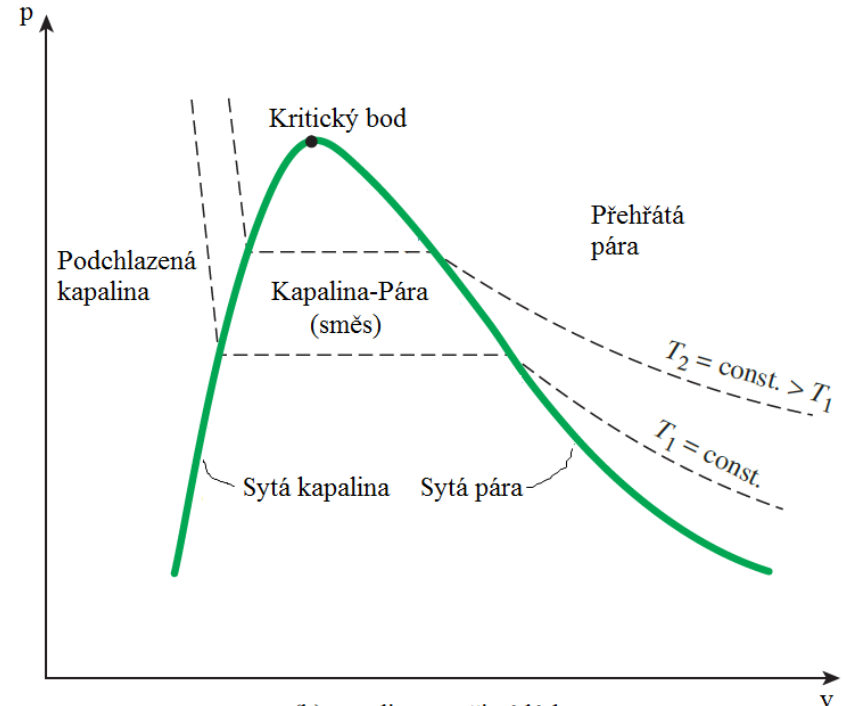
Další diagramy čisté látky



Další diagramy čisté látky (2)

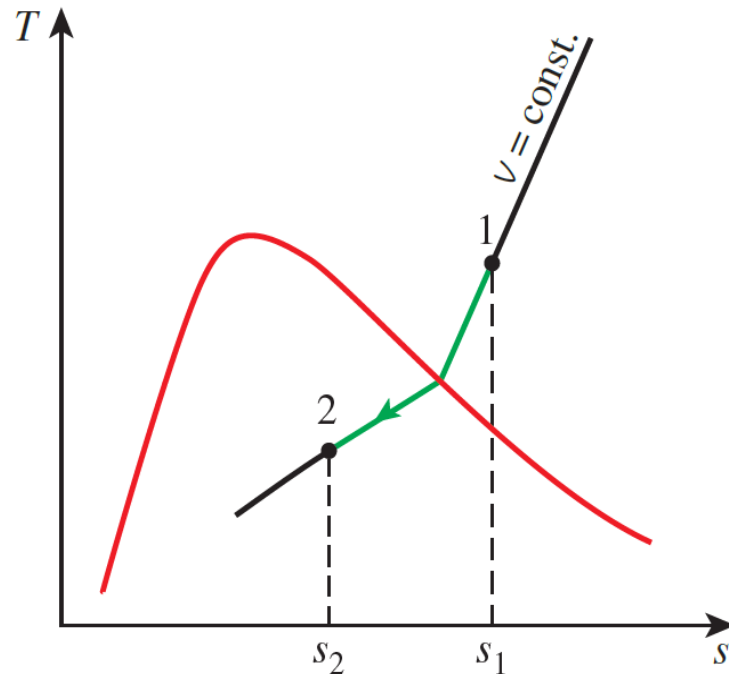
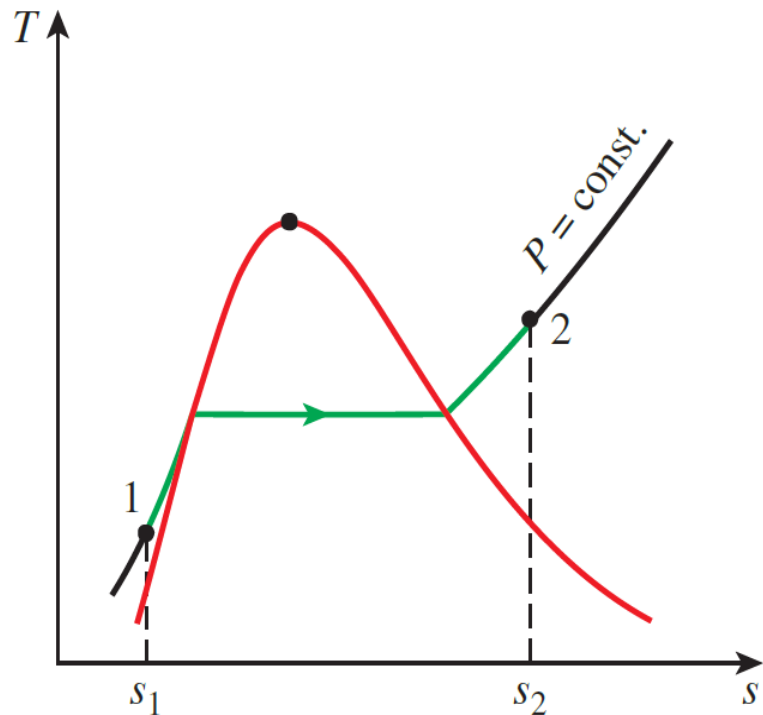


(a) T-v diagram čisté látky



(b) p-v diagram čisté látky

Další diagramy čisté látky (3)



Stavové a procesní veličiny

Množství látky

Hmotnost, celkový objem, látkové množství

- Hmotnost m [kg]
- Celkový objem V [m³] – není jednoznačné!
- Látkové množství n [mol, kmol]
- 1 mol obsahuje N_A elementárních částic, $N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ (Avogadrova konstanta)
- Elementární částice jsou různě "veliké", tj. 1 mol různých látek má různou hmotnost
- Hmotnost 1 molu látky udává molární hmotnost M [kg/kmol]

Molární hmotnosti vybraných látek

Látka	M (kg/kmol)
Kyslík (O)	16
Dusík (N)	14
Helium (He)	4
Uhlík (C)	12
Argon (Ar)	40
Vzduch (N ₂ , O ₂ , CO ₂ , Ar, ...)	29
Vodík (H)	1

Stav systému

Stav systému

- Určen souhrnem termodynamických vlastností (stavových veličin)
- Je-li výchozí stav TD systému nerovnovážný a systém je vůči okolí izolován, pak se jeho stav mění tak, že samovolně spěje do rovnovážného stavu

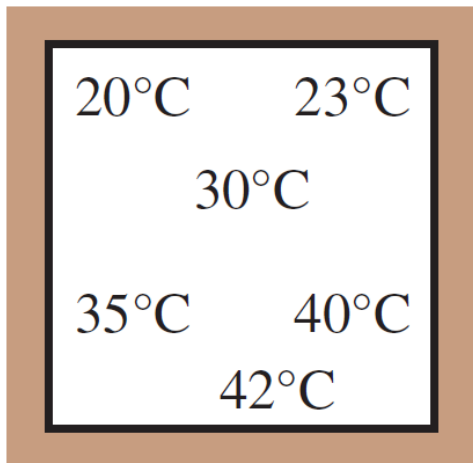
Rovnovážný systém

- Stav systému se s časem nemění
- V systému neexistuje nerovnoměrné rozložení veličin

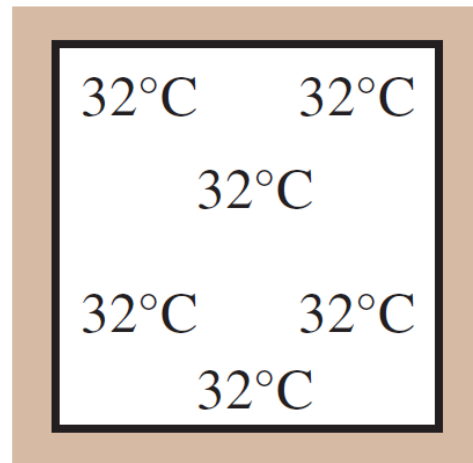
Nerovnovážný systém

- Některá z veličin je v systému nerovnoměrně rozložena

Stav systému (2)



(a) PŘED



(b) PO

Zavedené druhy veličin

Stavové veličiny

- Nezávisí na způsobu, jakým se systém dostal z daného stavu 1 do daného stavu 2 (např. $p_1, T_1, u_2, \dots$)

Procesní veličiny

- Závisí na způsobu, jakým se systém dostal z daného stavu 1 do daného stavu 2 (např. $q_{12}, w_{12}, \dots$)

Zavedené druhy veličin (2)

Intenzitní veličiny

- Nezávisí na množství látky v systému (p , T , ...), jejich nerovnoměrné rozložení uvnitř TD systému je příčinou termodynamických dějů

Extenzitní veličiny

- Závisí na množství látky v systému, jsou aditivní, dané součtem příspěvků jednotlivých částí systému (V , U , ...)
- Možno vytvořit veličiny intenzitní (měrné nebo molární)

Měrný objem [m^3/kg]:

Molární objem [m^3/kmol]:

$$v = dV/dm \sim V/m = 1/\rho$$

$$V_m = dV/dn \sim V/n$$

Stav látky

- Počet stavových veličin (n), které je třeba zadat k jednoznačnému určení stavu TD systému je dán **Gibbsovým pravidlem**: $n = s - f + 2$

n – počet stupňů volnosti systému

s – počet složek v systému

f – počet fází v systému

- Stav plynu je jednoznačně určen dvěma nezávisle proměnnými (např. T a v)

Stav látky (2)



Základní vztahy popisující chování plynů

Stav látky (3)

Stavové rovnice

- Vztahy platící mezi stavovým veličinami, např. $v = v(p, T)$; $p = p(\rho, T)$; ...
- Konkrétní tvar závisí na vlastnostech systému
- Např. **model ideálního plynu**

$$pV = mrT$$

Stav látky (4)

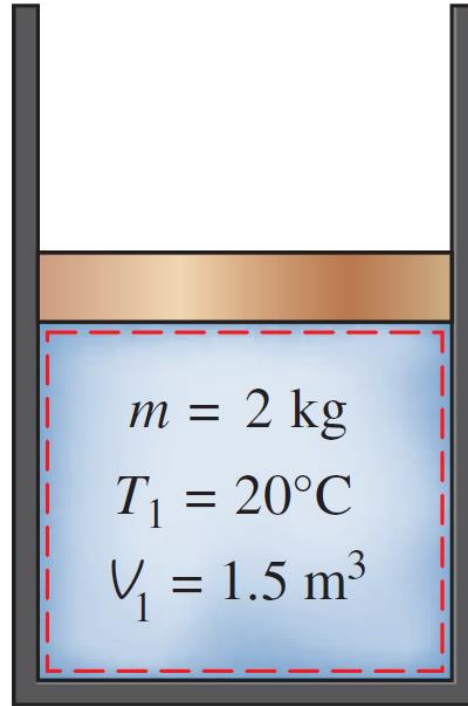
Termodynamický děj

- změna stavu TD systému
- stav se mění působením okolí na TD systém
- mechanické působení $\Rightarrow$ komprese/expanze
- tepelné působení $\Rightarrow$ ohřev/chlazení

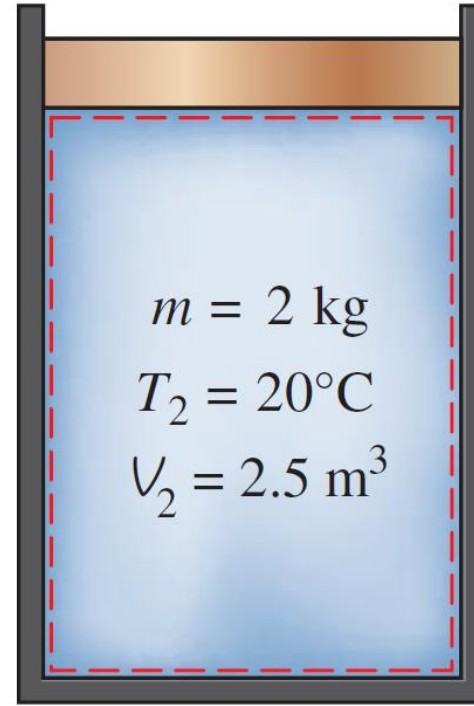
Druhy dějů

- Jednoduchý děj (ze stavu 1 do stavu 2) / kruhový děj (cyklus, oběh)
- Kvazistatický (rovnovážný) děj / dynamický (nerovnovážný) děj
- Vratný děj (model) / nevratný děj (skutečný)

Stav látky (5)

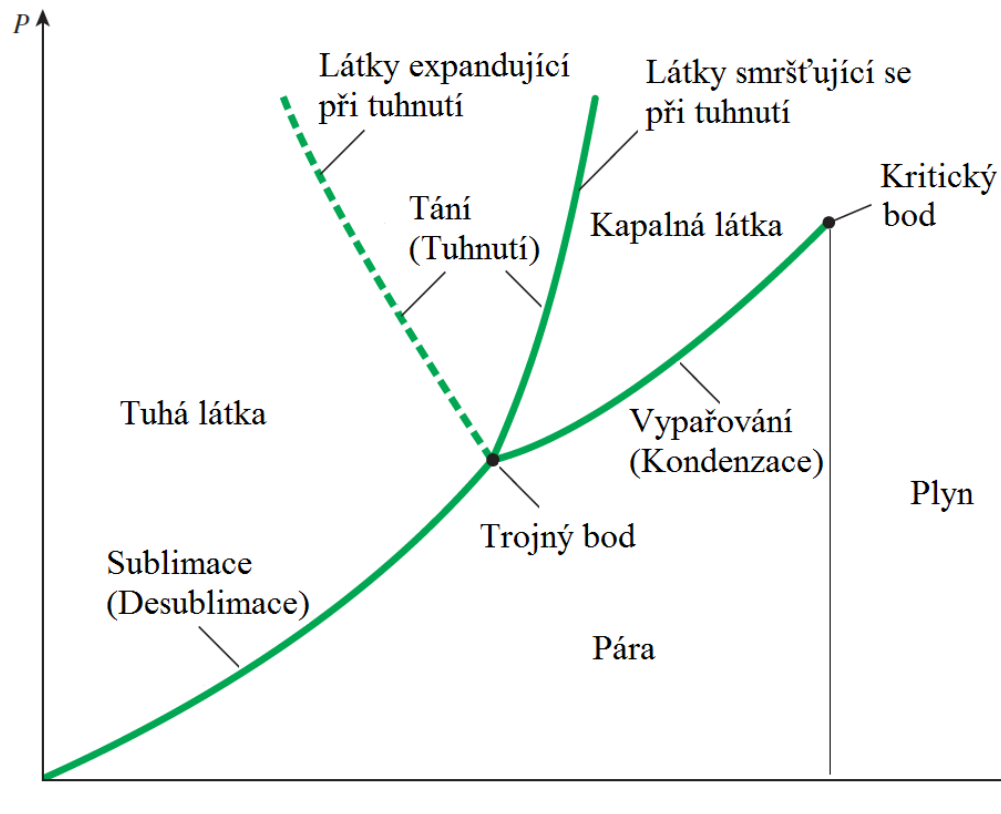


(a) Stav 1

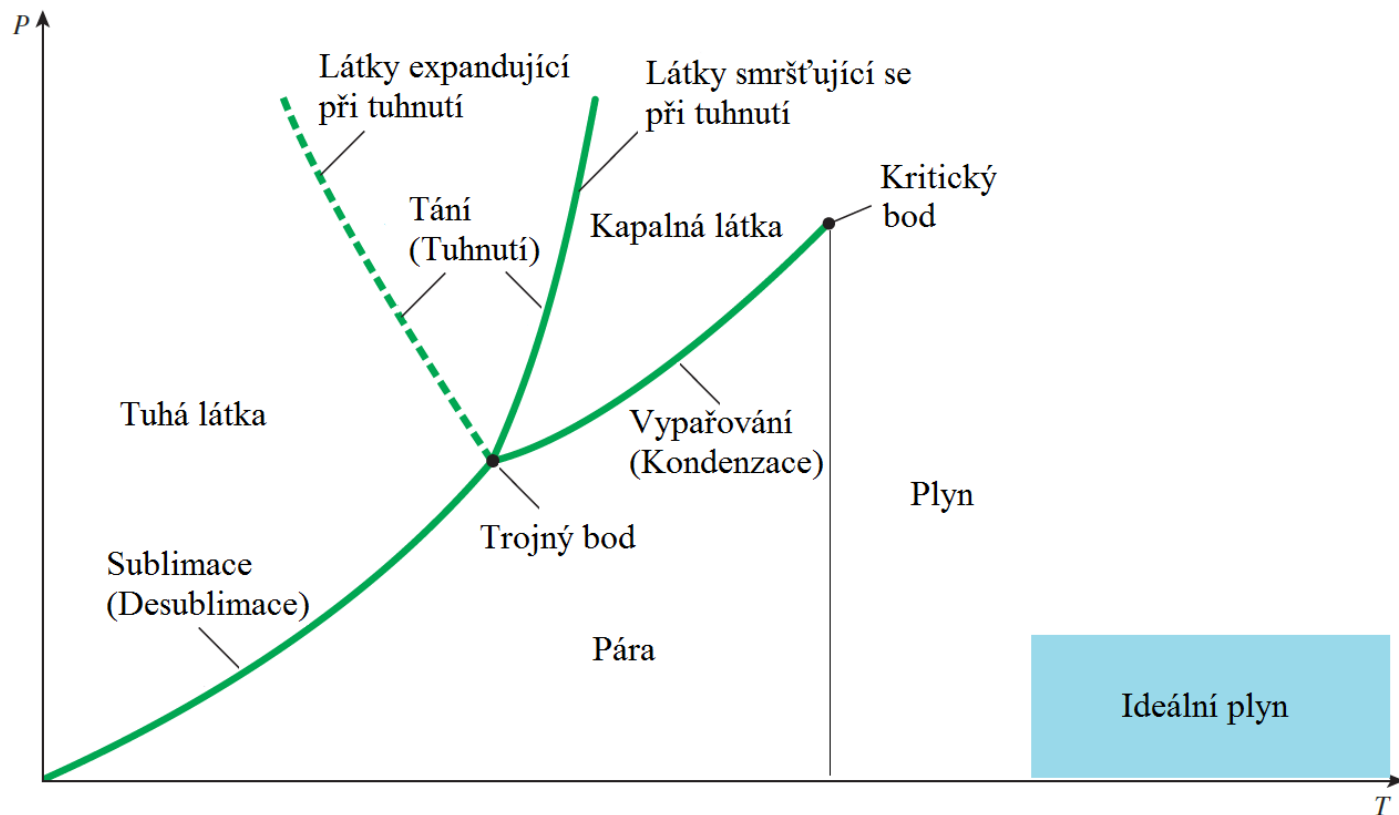


(b) Stav 2

Ideální plyn



Ideální plyn (2)



Základní parametry vybraných látek

Látka	Teplota trojného bodu (°C)	Tlak trojného bodu (kPa)	Kritická teplota (°C)	Kritický tlak (kPa)	Teplota varu při tlaku 100 kPa (°C)
Kyslík (O ₂)	-219	0,146	-119	5050	-183
Dusík (N ₂)	-210	12,6	-147	3390	-196
Oxid dusný (N ₂ O)	-91	87,9	36	7240	-88
Helium (He)	-272	26,0	-268	227	-269
Oxid uhličitý (CO ₂)	-57	517	31	7380	NA
Argon (Ar)	-189	68,9	-122	4870	-186
Medicínální vzduch (N ₂ , O ₂ , CO ₂ , Ar, ...)	-213*	5,27*	-141*	3750*	-194*
Voda (H ₂ O)	0,01	0,612	374	22060	100

Zákony termodynamiky

- Celkem jsou čtyři, dva z nich jsou nejdůležitější (1. a 2. TDZ)

I. Zákon termodynamiky

- Zákon zachování energie aplikovaný na termodynamický systém
- energii nelze zničit, lze pouze převádět jednu její formu na jinou
- Není možné sestavit perpetuum mobile 1. druhu (tj. stroj, který by produkoval energii z ničeho)
- Existuje stavová veličina celková vnitřní energie (U), jejíž změny lze dosáhnout přenosem celkového tepla nebo přenosem celkové mechanické energie

$$dQ = dU + dW$$

$$dQ = dH + dW_t$$

Zákony termodynamiky (2)

- I. Zákon termodynamiky připouští i nepřirozené děje !

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

II. Zákon termodynamiky

- Určuje směr, druh a možnosti termodynamického děje
- Práci (uspořádanou, makroskopickou formu energie) lze libovolně převádět na teplo
- Teplo (neuspořádanou, mikroskopickou formu energie) lze na práci převádět jen omezeně
- Carnot-Clausius: Teplo nemůže samovolně přecházet z teploty nižší na teplotu vyšší
- Teplo můžeme převést z tělesa o nižší teplotě na těleso o vyšší teplotě jen s vynaložením mechanické práce
- Není možné sestavit perpetuum mobile 2. druhu (tj. periodicky pracující stroj, který by odebíral nějaké látce teplo a celé by ho beze zbytku převedl na mechanickou práci)
- Všechny samovolné děje jsou nevratné (ztrátové)
- Existuje stavová veličina zvaná celková entropie S

Zákony termodynamiky (3)

III. Zákon termodynamiky

- Tzv. Nernstův teorém
- Čistou pevnou látku nelze konečným počtem pochodů ochladit na 0 K
- Při absolutní nulové teplotě je entropie čisté pevné látky nebo kapalného skupenství rovna nule
- Ani bezeztrátový tepelný stroj nemůže dosáhnout 100% účinnosti vzhledem k nedosažitelnosti absolutní nulové teploty

Základní zákony termodynamiky – shrnutí

- I. TDZ = Zákon zachování energie (kvantita energie)
- II. TDZ = Určuje směr samovolného přenosu energie, tepla (kvalita energie)
- III. TDZ = Nelze dosáhnout absolutní nuly (0 K)

Zákony termodynamiky (4)

Co říká tzv. nultý zákon termodynamiky?



Poznámky k energetickým veličinám

- Mohou být jak **stavové**, tak procesní

Vnitřní energie (celková) – U

- Stavová veličina, forma energie akumulované v systému (závisí především na teplotě)
- Dána energií neuspořádaných pohybů a interakcemi elementárních částic
- Stavová rovnice pro měrnou vnitřní energii v integrálním tvaru: $u = u(T, v)$

Entalpie (celková) – H

- Stavová veličina, forma energie akumulované v systému (závisí především na teplotě)
- Definována jako součet vnitřní a vnější energie: $H = U + pV$
- Stavová rovnice pro měrnou entalpii v integrálním tvaru: $h = h(T, p)$

Poznámky k energetickým veličinám (2)

- Mohou být jak **stavové**, tak procesní

Entropie (celková) – S

- Stavová veličina
- Míra neuspořádanosti systému
- Stavová rovnice pro měrnou entropii v integrálním tvaru: $s = s(T, p)$

Poznámky k energetickým veličinám (3)

- Mohou být jak stavové, tak **procesní**

Celková objemová (jednorázová) práce – W

- Procesní veličina
- Forma energie akumulované v systému
- Definována jako: $dW = pdV$

Celková technická (opakovatelná) práce – W_t

- Procesní veličina
- Forma energie akumulované v systému
- Definována jako: $dW_t = -Vdp$

Poznámky k energetickým veličinám (4)

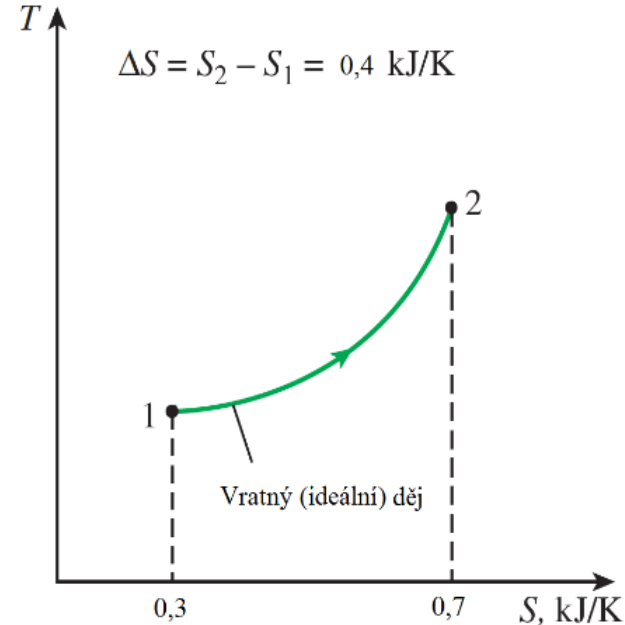
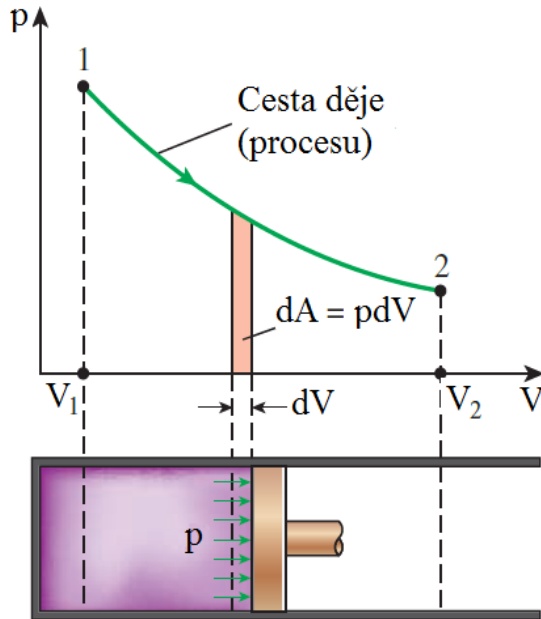
- Mohou být jak stavové, tak **procesní**

Celkové teplo – Q

- Procesní veličina
- Jeho přenos je vyvolán rozdílem teplot
- Definováno jako: $dQ = mcdT$

Pracovní diagram (p-v) a tepelný diagram (T-s)

- Slouží k řešení praktických dějů v plynech
- **Pracovní diagram** vyjadřuje získanou nebo dodanou **práci**
- **Tepelný diagram** vyjadřuje přivedené nebo odvedené **teplo**

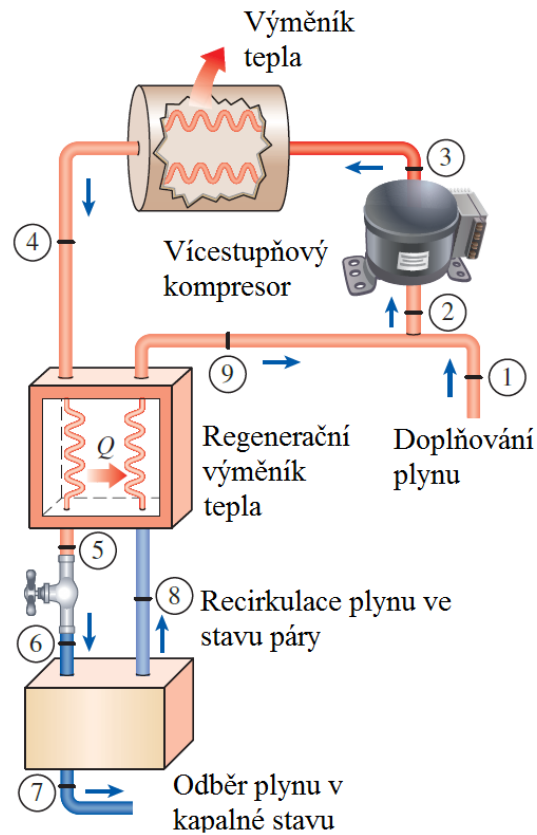
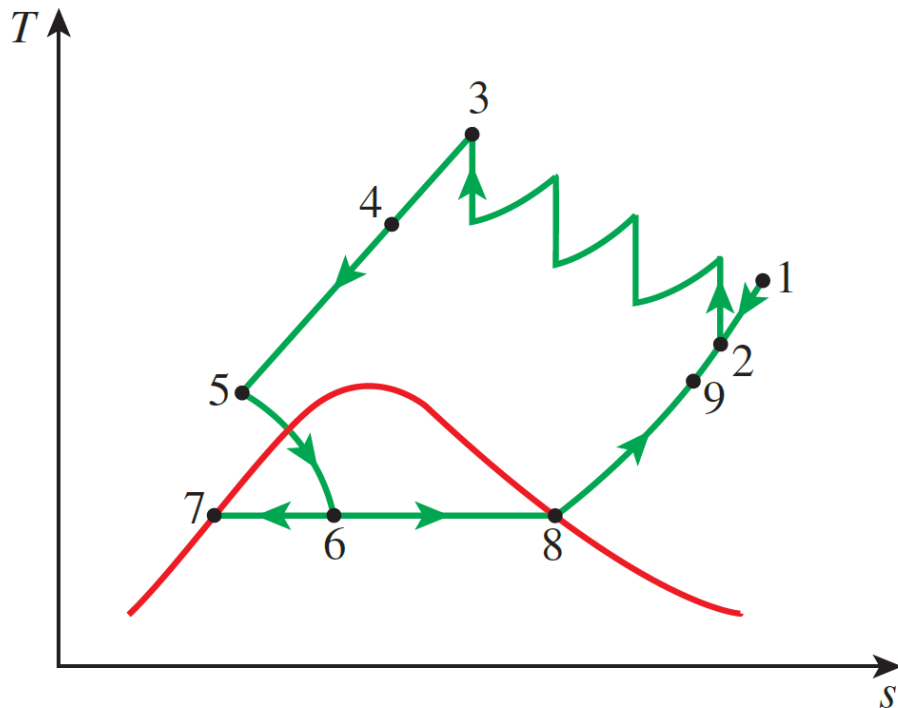


Zkapalňování reálných plynů

Zkapalňování plynů

- Oběh **Linde-Hampson**
- Podobný princip se využívá také pro získání tuhé fáze
- Ideální vs. **reálný plyn!**

Zkapalňování plynů



Shrnutí přednášky

- **Termodynamika**
- **Druhy diagramů čisté látky**
- **Stavové a procesní veličiny**
- **Základní vztahy (1. TDZ, 2. TDZ, SRIP)**
- **Používané diagramy čisté látky a zkapalňování plynů**



Děkuji za pozornost