

Fázové heterogenní rovnováhy

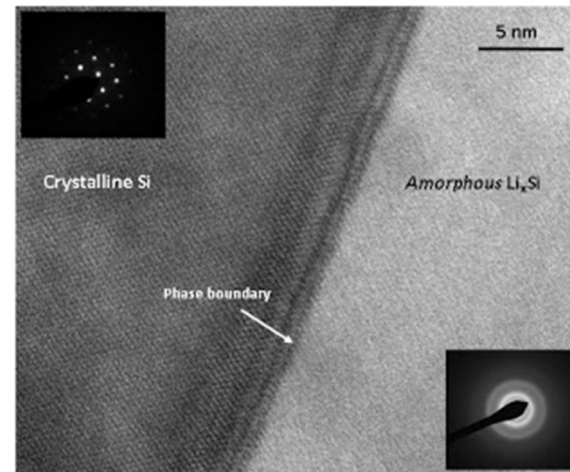
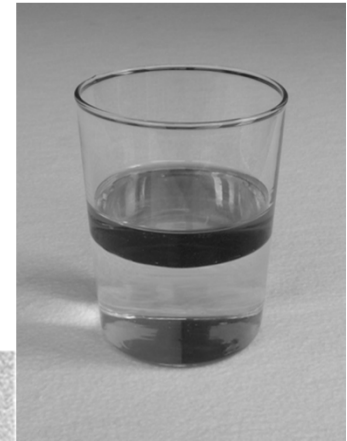
Fáze = homogenní část soustavy, jednoznačně oddělná fyzickým rozhraním, na rozhraní se vlastnosti mění skokem

Rovnováha

- **Tepelná** - T všude stejná
- **Mechanická** - p všude stejný
- **Chemická** - látkové množství jednotlivých složek se nemění, $dG = 0$, **chemický potenciál** všech složek ve všech fázích je stejný

Podmínka koexistence fází:

mají stejnou G , přechod mezi fázemi $\Delta G = 0$



Chemický potenciál

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, p, n_j}$$

Změna G se změnou složení n_i

Pro popis soustav, u kterých se mění složení

Rozdíl v chemickém potenciálu vede k chemické reakci, difuzi,.....

Chemický potenciál každé složky ve všech koexistujících fázích je stejný.

Gibbsův fázový zákon

Fáze (P) = homogenní část soustavy (vlastnosti, struktura),
rozhraní, skoková změna vlastností, skupenství (s, l, g), modifikace
(led I - XII, He I a II)

P = 1: směs plynů, roztok

P = 2: kapalina + nasycená pára, nasycený roztok + pevná látka

P = 3: kapalina + nasycená pára + pevná látka

Kolik různých plynných fází může koexistovat?

Složka (C) = čistá látka

Počet složek = minimální počet čistých látek,

Méně, pokud jsou vázány chemickou reakcí: CaCO_3 , CO_2 , CaO

Stupeň volnosti (V) = parametry soustavy p, T, c

Počet stupňů volnosti = lze měnit aniž by se změnil počet fází

Gibbsův fázový zákon

- Každá fáze P potřebuje $C - 1$ údajů o složení (molární zlomky x_i) plus T a p k popsání stavu,
celkově $P(C - 1) + 2$ stavových **proměnných**
- Pro každou složku C platí $P - 1$ rovnovážných podmínek
 $\mu(\alpha) = \mu(\beta)$, $\mu(\beta) = \mu(\gamma)$, $\mu(\gamma) = \mu(\delta)$,
rovnost chemických potenciálů složky v P fázích (α , β , γ , δ)
celkem $C(P - 1)$ **podmínek**
- Počet stupňů volnosti $V =$ počet **proměnných** minus počet vazných **podmínek**
- $V = P(C - 1) + 2 - C(P - 1)$
- **$V = C - P + 2$**

Gibbsův fázový zákon

$$P + V = C + 2$$

Fáze (P)

Stupně volnosti (V)

Složky (C)

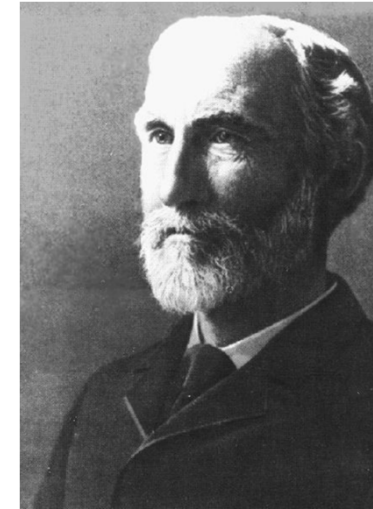
Pro $C = 1$ jednosložková soustava

$P = 1$ $V = 2$ plocha

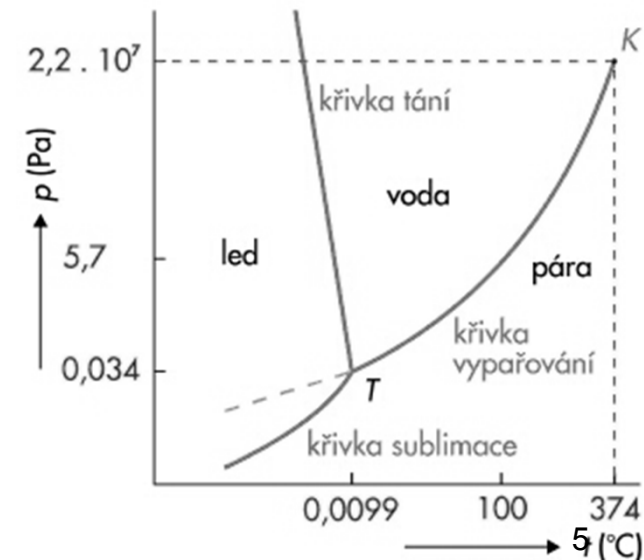
$P = 2$ $V = 1$ křivka

$P = 3$ $V = 0$ trojný bod

----- Tlak par metastabilní
přechlazené vody



J. Willard Gibbs
(1839 - 1903)



Fázový diagram

Fázový diagram = grafická informace o stavu soustavy

Proměnné – tlak, teplota, $C - 1$ údajů o složení (molární zlomky)

pro více než 1 složku v soustavě musí být fázový diagram 3 a vícerozměrný

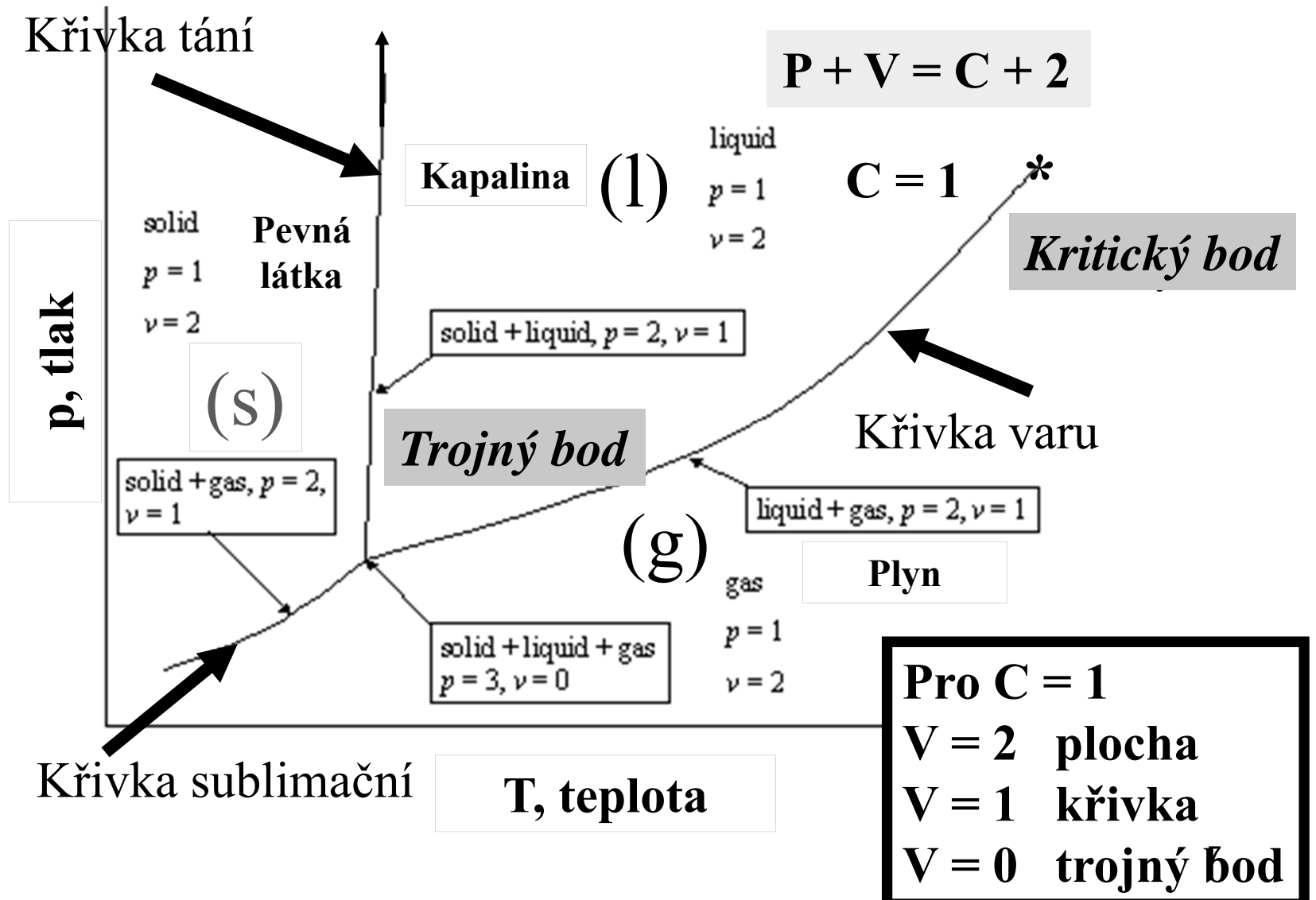
Řezy fázovým diagramem – některé proměnné držíme konstantní:

$p = \text{konst.}$ izobarický diagram

$T = \text{konst.}$ izotermický diagram

$c = \text{konst.}$ izokoncentrační diagram

Fázový (p-T) diagram pro jednosložkovou (C = 1) soustavu



Fázový diagram jednosložkové soustavy

Trojný bod – Teplota a tlak při nichž jsou tři fáze v rovnováze

Je možný čtverný bod?

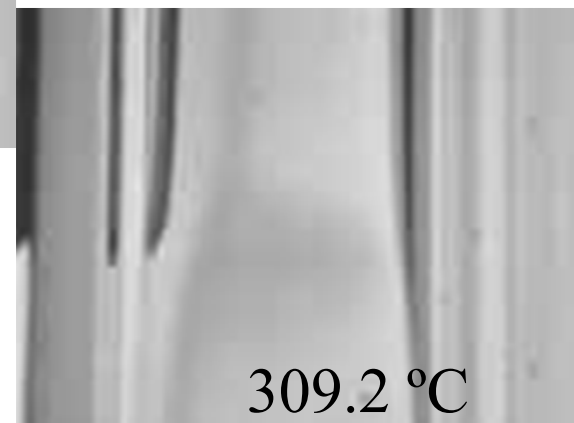
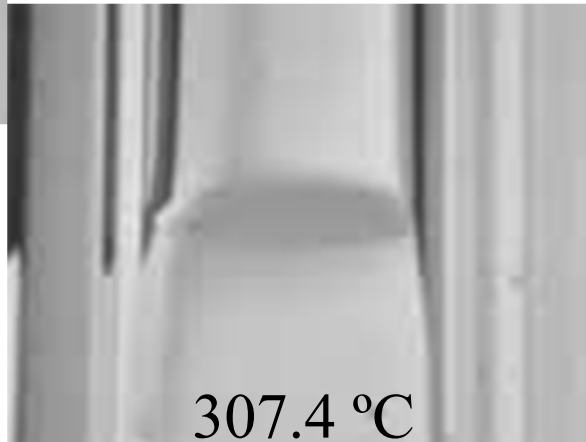
Kritický bod – zakončuje křivku vypařování, nad k. b. jsou kapalná a plynná fáze nerozlišitelné, zmizí meniskus

- ***Kritická teplota*** - minimální teplota pro zkapalnění plynu zvýšeným tlakem. Plyn, který má teplotu vyšší než je k. t., nelze žádným stlačováním zkapalnit
- ***Kritický tlak*** - minimální tlak, který je při k. t. nutný pro zkapalnění plynu

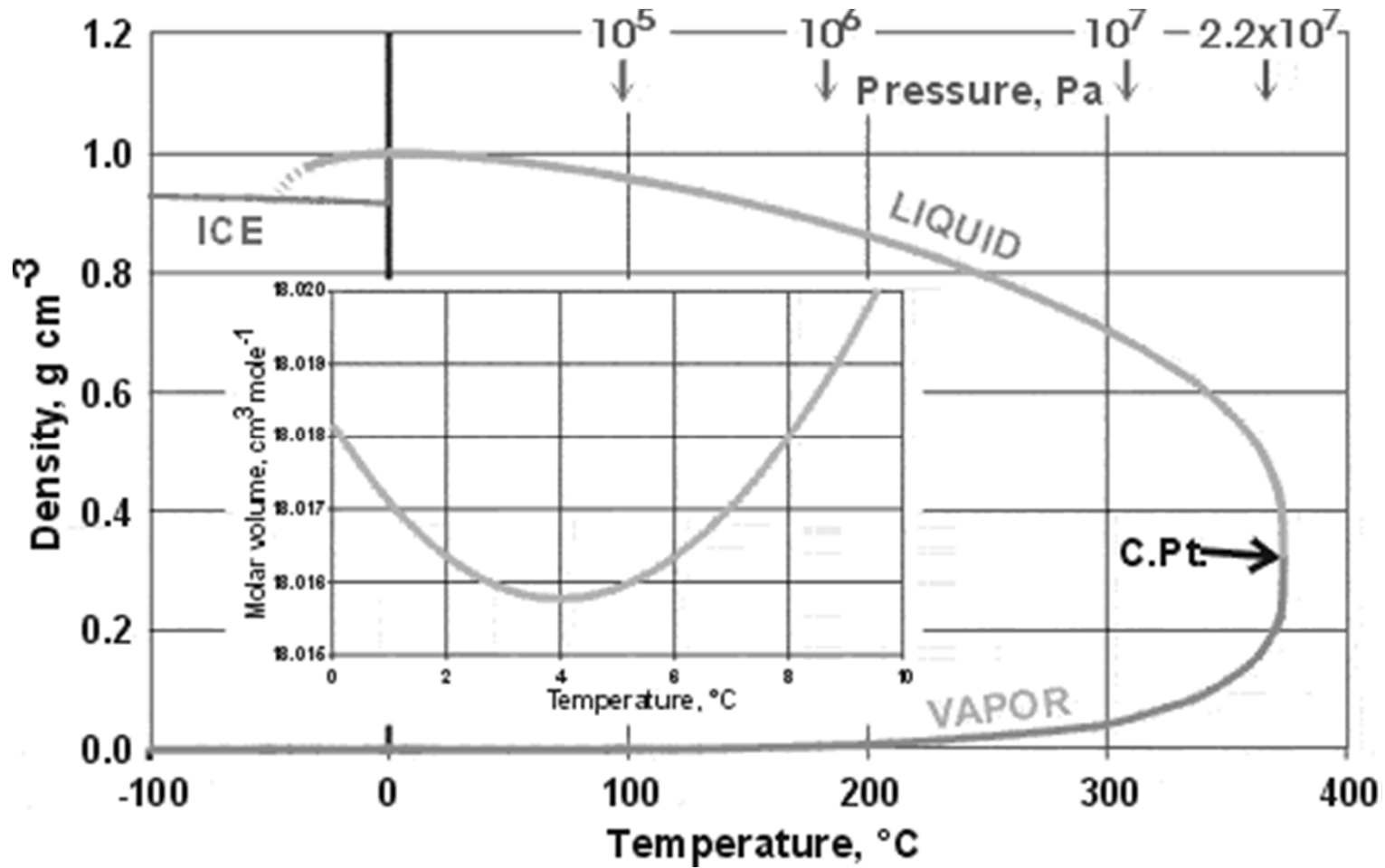
Kritický bod benzenu



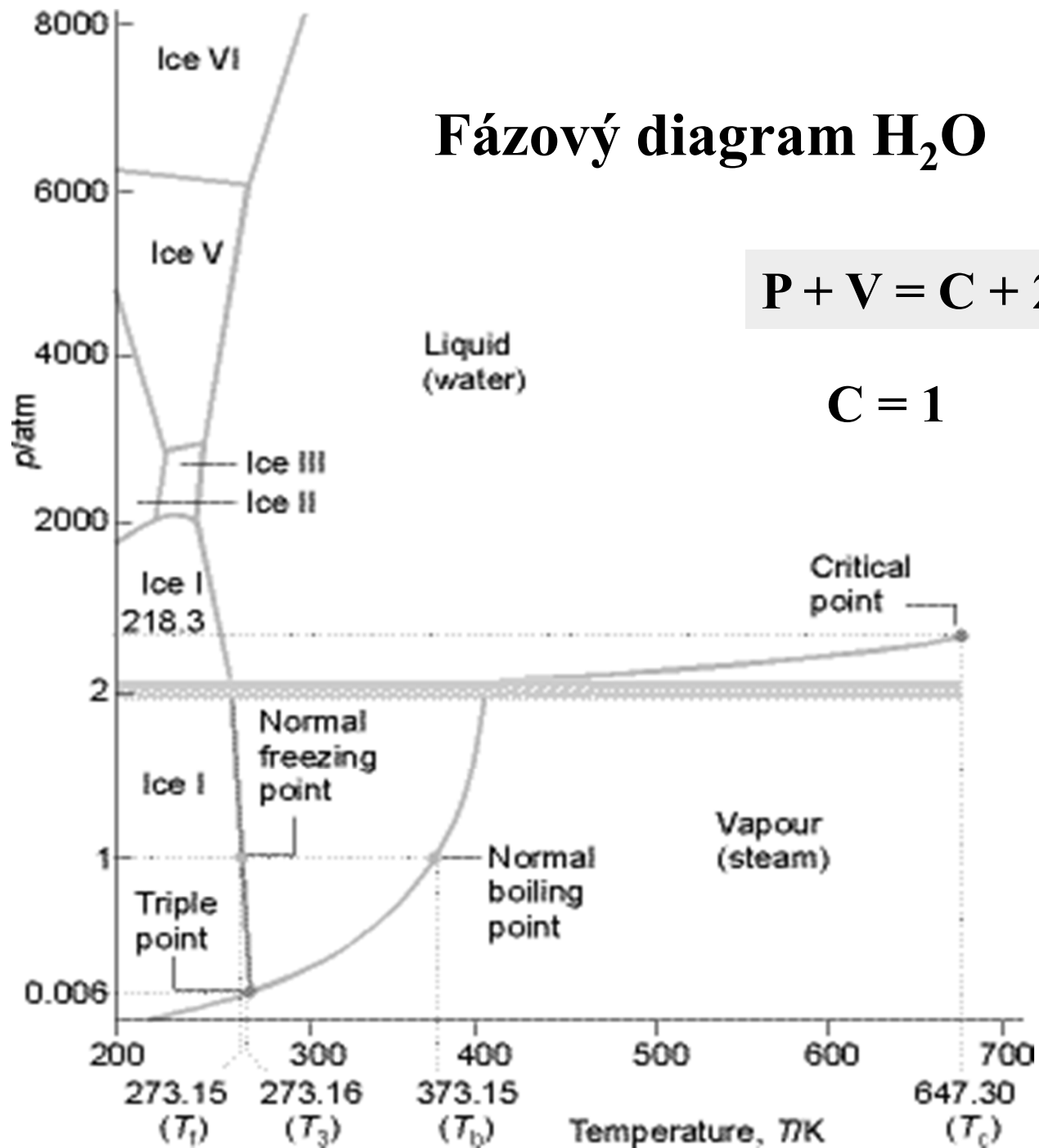
Zmizí fázové rozhraní mezi l a g
(meniskus)



Hustota vody (g, l, s) v kritickém bodě



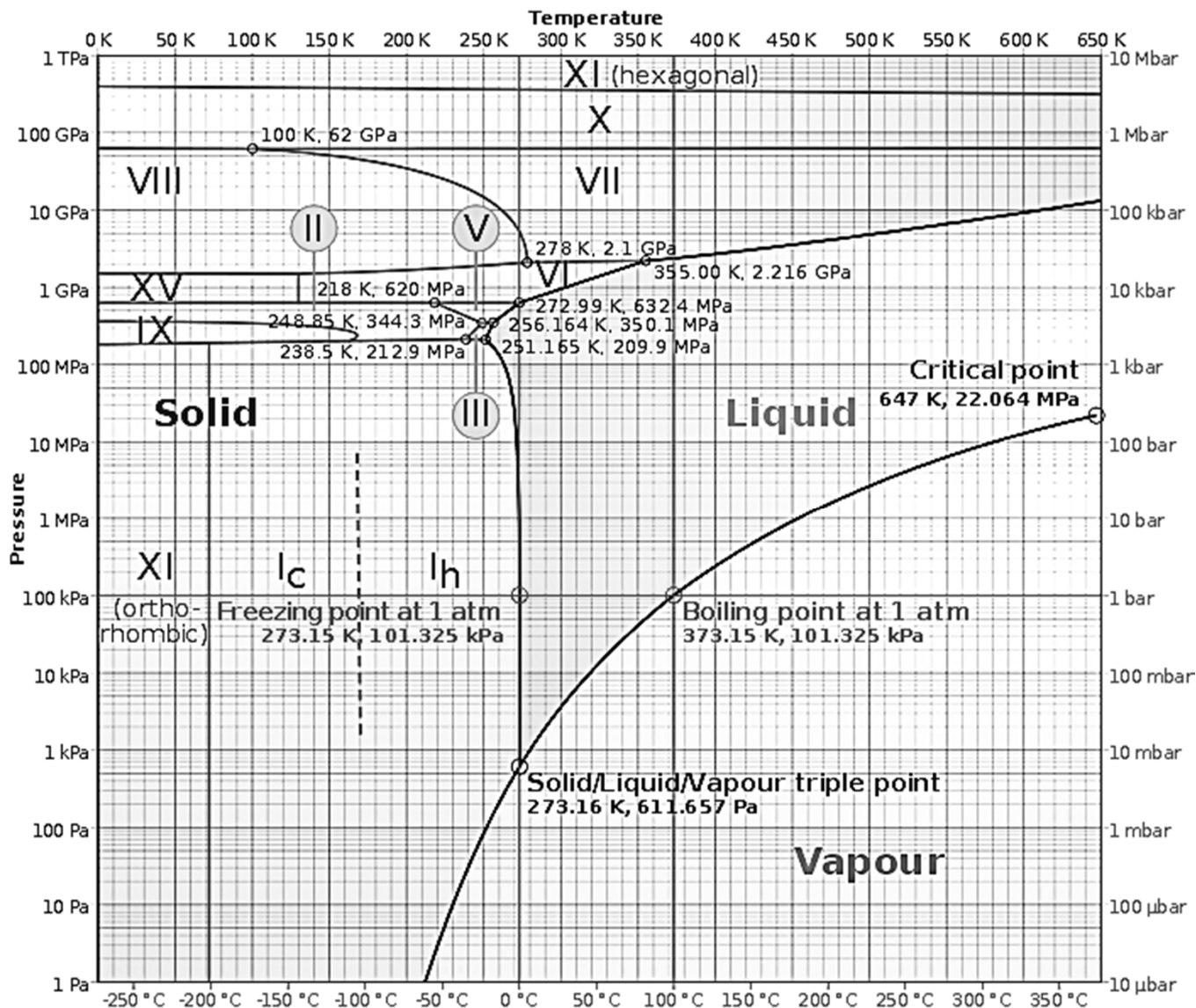
Fázový diagram H₂O



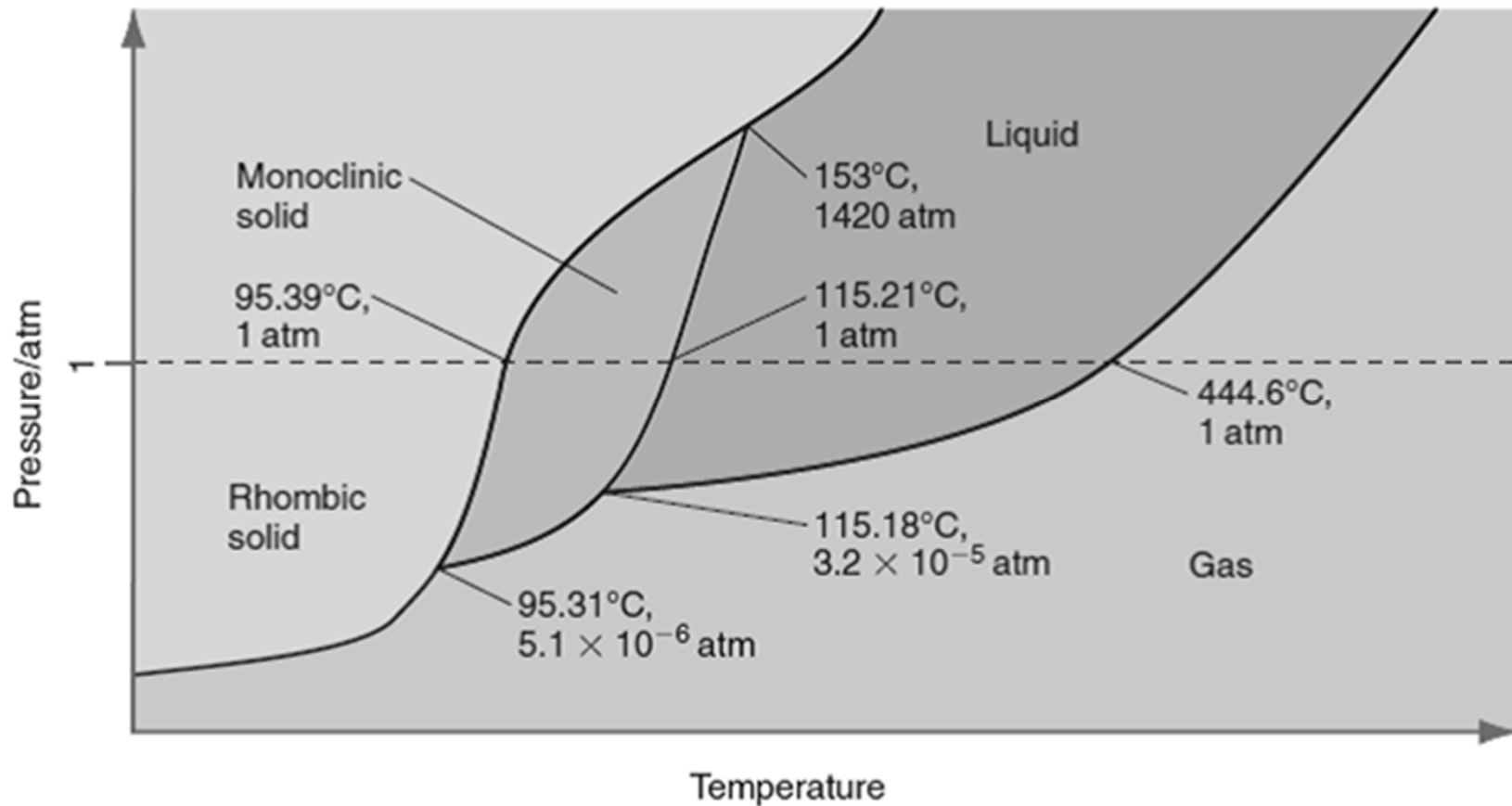
Fázový diagram ledu - vody - páry

17
polymorfních
fází ledu

Normální led
 I_h
hexagonální



Fázový diagram síry



Clausius-Clapeyronova rovnice

Clapeyronova rovnice
pro fázovou přeměnu:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta H_m}{T\Delta V_m}$$

Molární skupenské teplo

Změna molárního objemu

Pro l-g rovnováhu – křivka varu:

1) $V_m(g) \gg V_m(l)$, pak $\Delta V_m = V_m(g) - V_m(l) = V_m(g)$

2) $V_m(g)$ ze stavové rovnice id. plynu

Diferenciální Clausius-Clapeyronova rovnice

$$\frac{d \ln p}{dT} = \frac{\Delta H_m}{RT^2}$$

$$V_m(g) = \frac{RT}{p}$$

Integrovaná Clausius-Clapeyronova rovnice

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{-\Delta H_{výp}^0}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

Změna tenze par vody s teplotou



$$K_p = P_{\text{H}_2\text{O}}$$

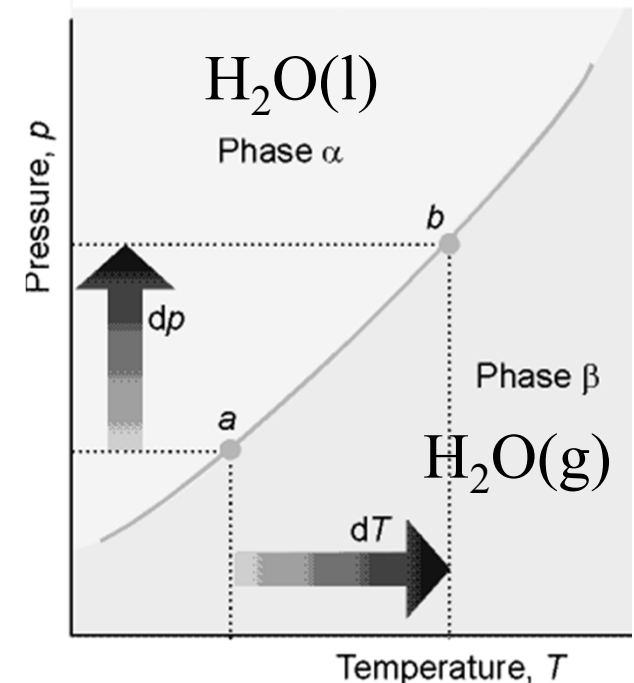
van't Hoffova rovnice

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = \ln \frac{p_T}{p_{\text{var}}} = \ln p_T = \frac{\Delta H_{\text{výp}}^0}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{var}}} - \frac{1}{T} \right)$$

$$P_{\text{var}} = 1 \text{ atm}$$

Clausius-Clapeyronova rovnice

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{-\Delta H_{\text{výp}}^0}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

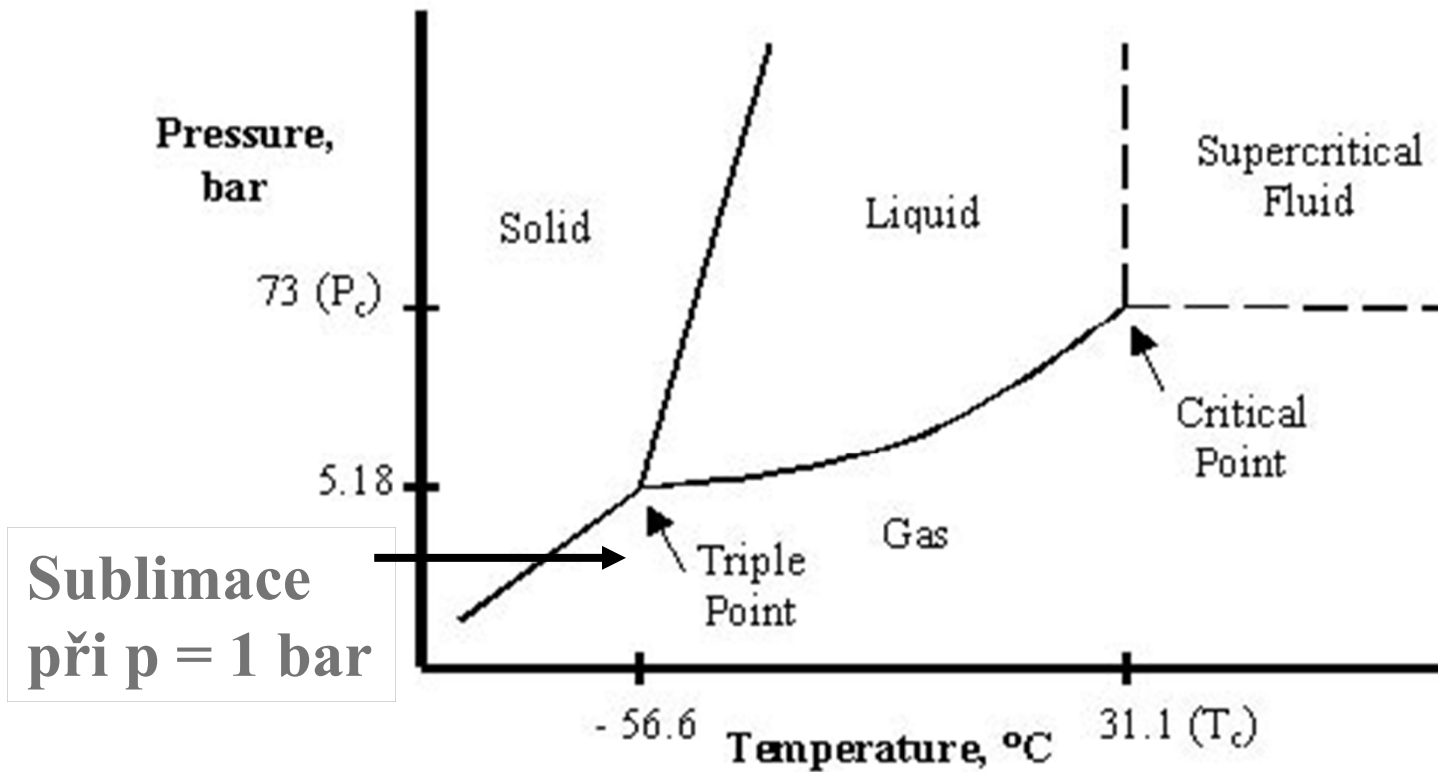


Fázový diagram CO₂

Suchý led

$$P + V = C + 2$$

$$C = 1$$



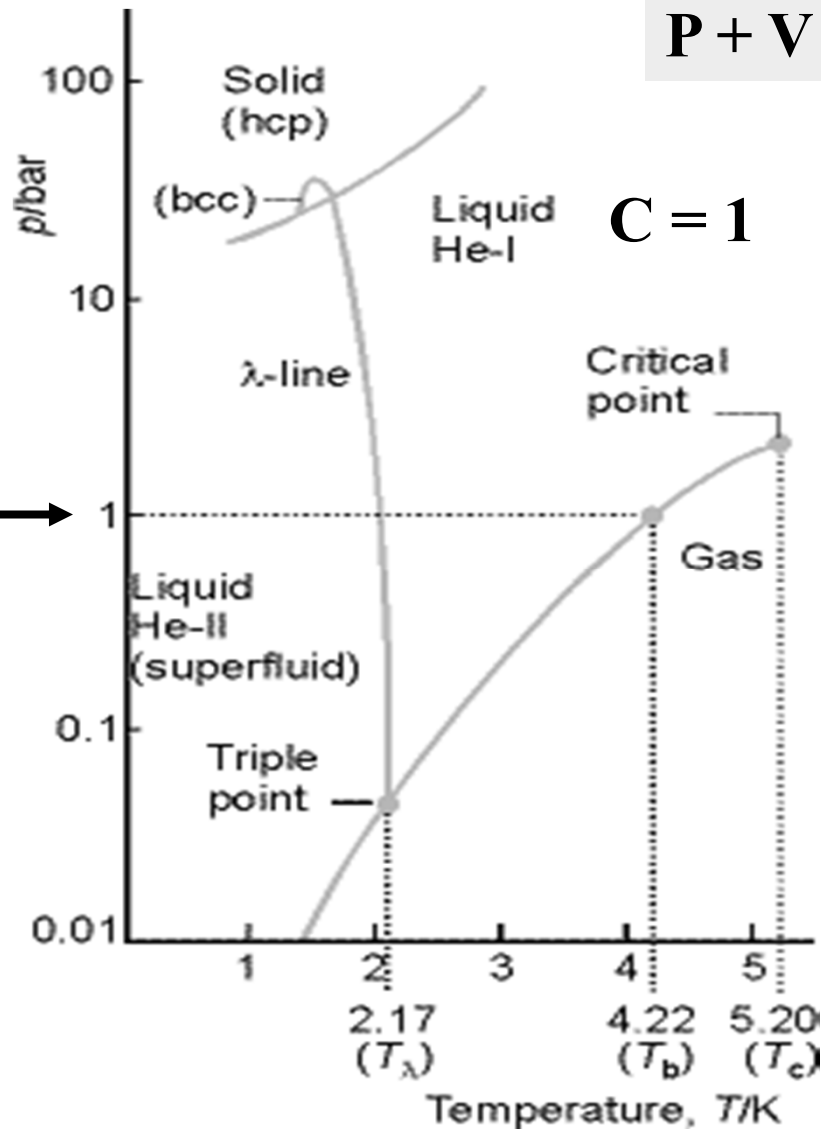
Phase Diagram for carbon dioxide.

Fázový diagram He

He nelze převést do pevného stavu za normálního atmosferického tlaku



He nemá trojný bod koexistence g-l-s fází



Fázový diagram pro dvousložkovou soustavu

$$C = 2, P + V = 4$$

$$V = 4 - P$$

$$P + V = C + 2$$

Minimálně jedna fáze

musí být přítomna $P = 1$

$$V_{\max} = 3 (T, p, x)$$

Tři parametry = třírozměrný
fázový diagram

Na dvourozměrném diagramu:

$$V = 2$$

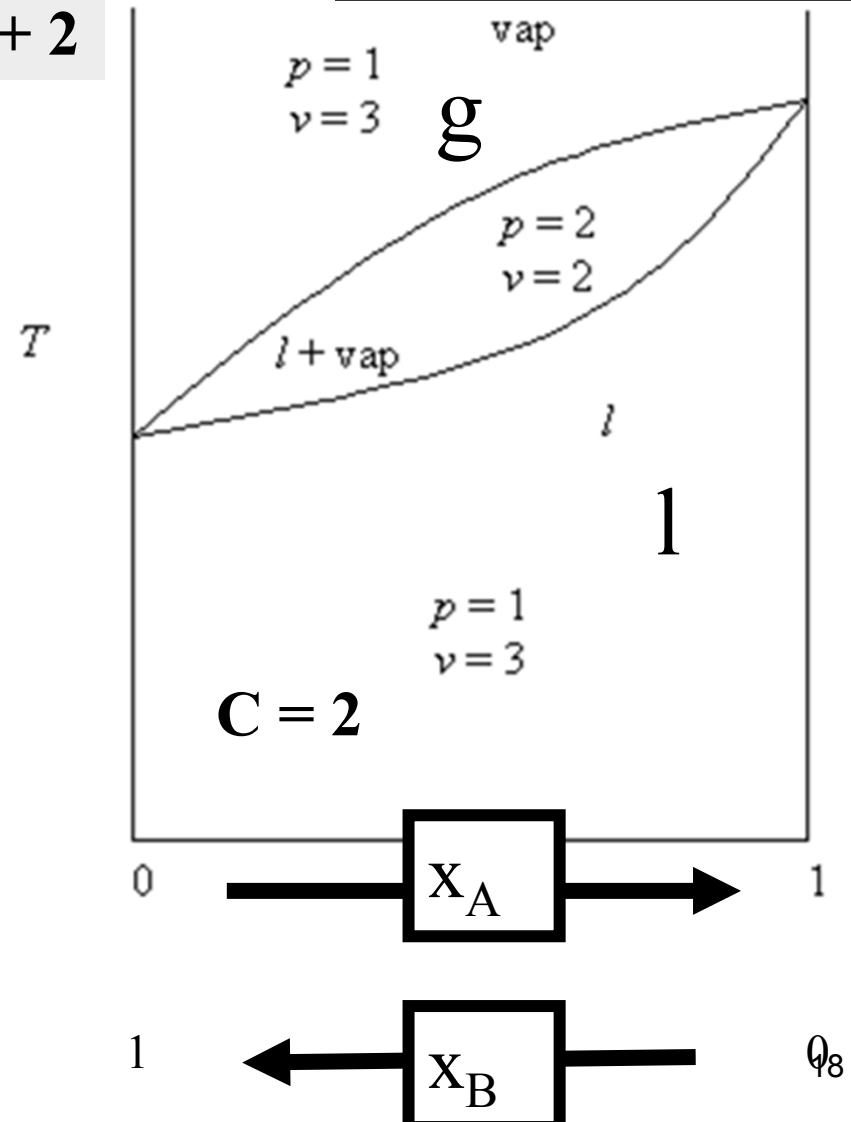
- **Izotermický** $T = \text{konst.}$

p jako funkce x

- **Izobarický** $p = \text{konst.}$

T jako funkce x

Izobarický: $p = \text{konst.}$



Směs dvou kapalin

Ideální směs (chování) dvou kapalin:

vdW interakce **A-A**, **B-B** a **A-B**

jsou přibližně stejné

hexan-heptan

Chemicky podobné látky

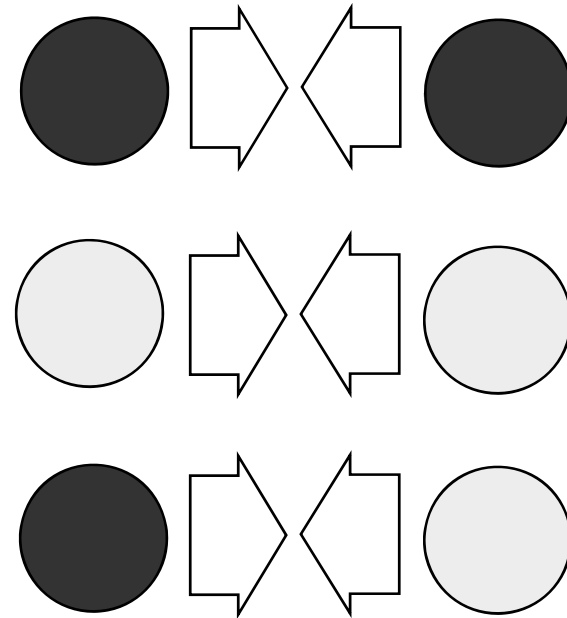
$$\Delta H_{\text{rozp}} = 0 \quad \Delta V_{\text{rozp}} = 0$$

Neideální chování kapalin:

vdW interakce **A-A**, **B-B** jsou různé

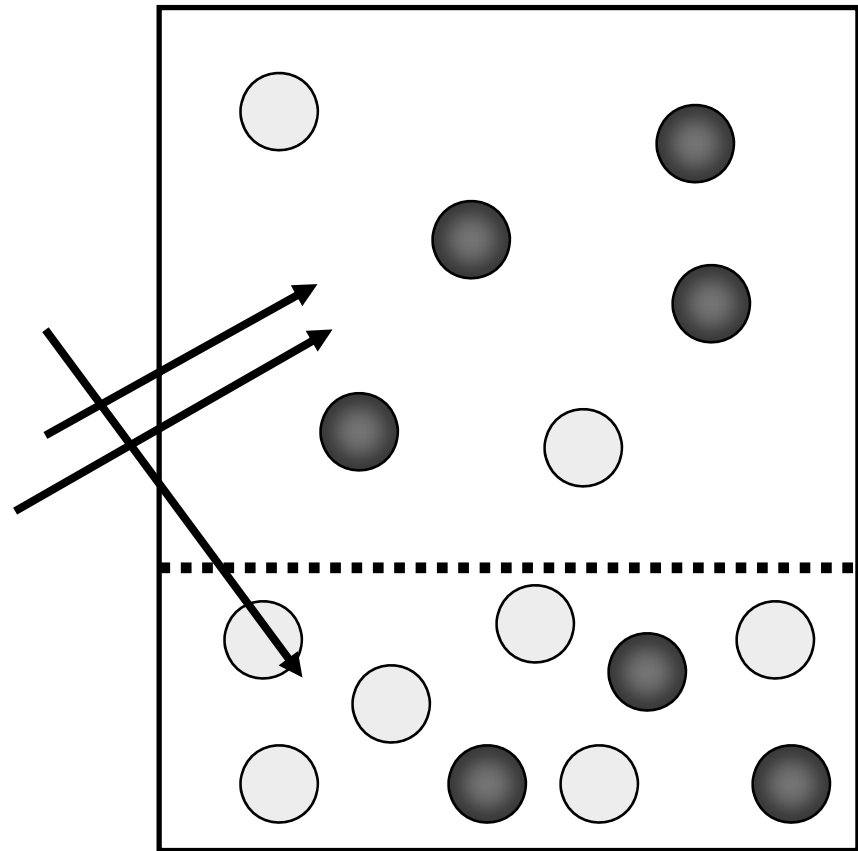
(větší nebo menší) než **A-B**

$$\Delta H_{\text{rozp}} \neq 0 \quad \Delta V_{\text{rozp}} \neq 0$$



Rovnováha $l \rightleftharpoons g$ ve směsi dvou kapalin

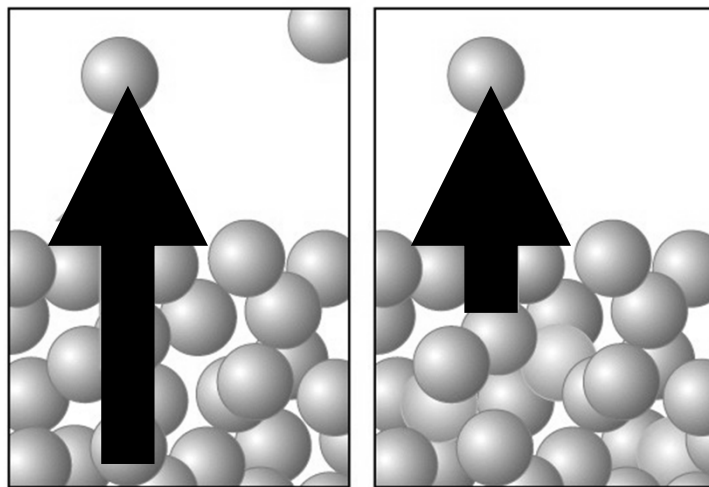
- Obě fáze jsou směsí **A** a **B**
- x_A, x_B molární zlomky v l.
- y_A, y_B molární zlomky v g.
- p_A, p_B parciální tlaky v g.



Snížení tlaku par nad roztokem

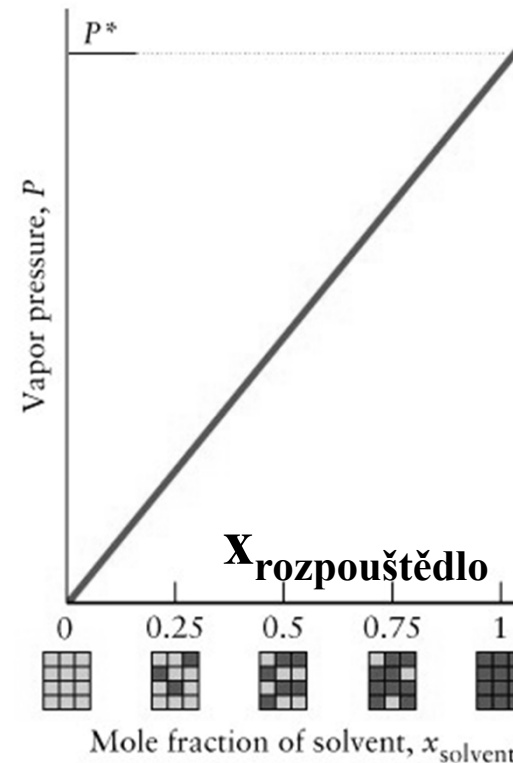
Přídavek rozpuštěné látky do rozpouštědla vede ke snížení tlaku par dvěma mechanismy

1. Vzrůst entropie roztoku sníží hnací sílu pro vypařování
2. Zředění rozpouštědla sníží počet molekul schopných opustit povrch roztoku

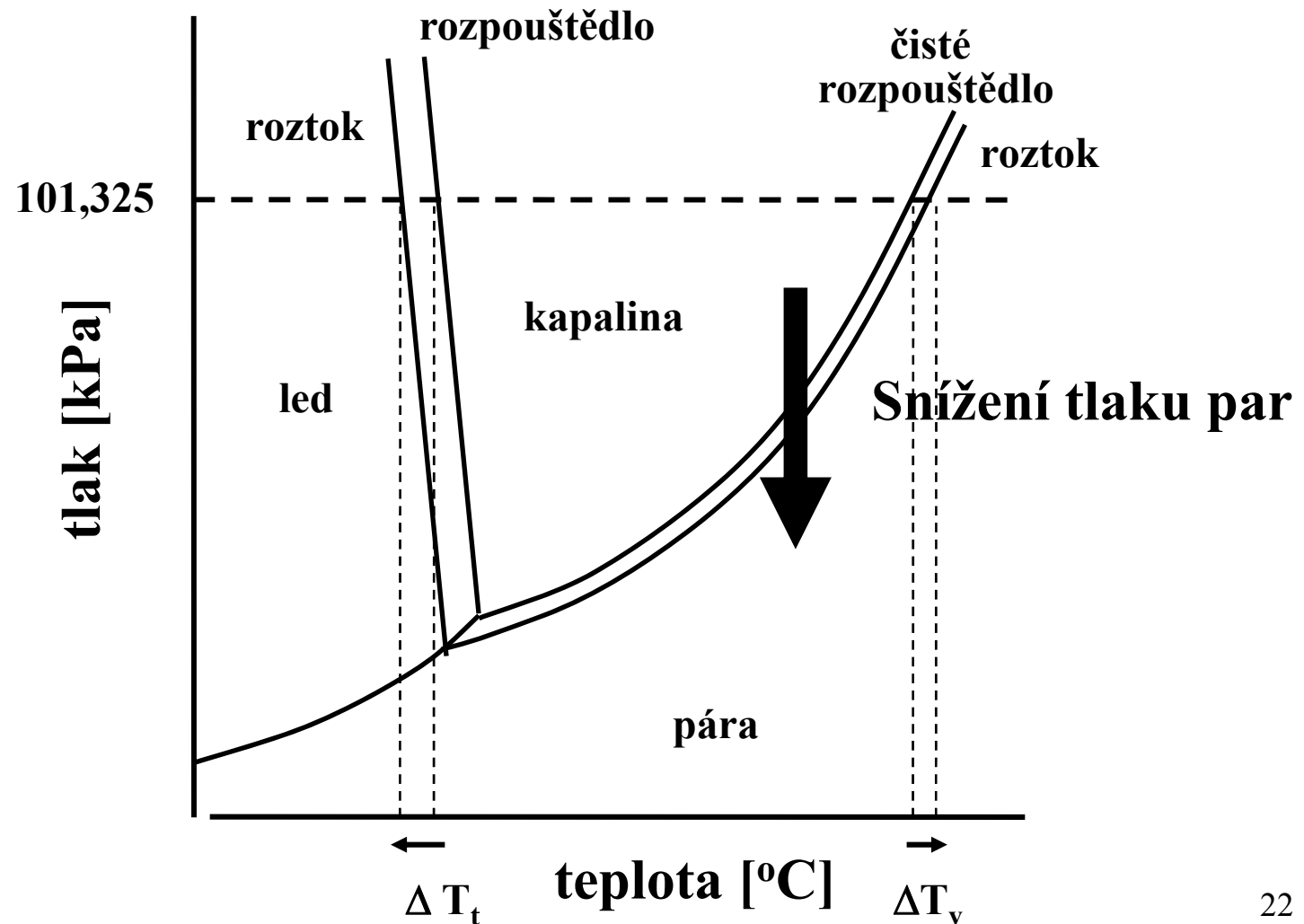


(a)

$$p^0 > p_{\text{rozt}}$$



Snížení tlaku par nad roztokem má za následek snížení teploty tání a zvýšení teploty varu



Raoultův zákon

Tlak par rozpouštědla nad roztokem je roven součinu tlaku par čistého rozpouštědla P° a molárního zlomku rozpouštědla x_1

Tlak par rozpouštědla nad roztokem

$$p_{\text{rozpouštědla}} = x_1 P^\circ_{\text{rozpouštědla}}$$

Celkový tlak par nad roztokem

$$p_{\text{celkový}} = p_{\text{rozpouštědla}} + p_{\text{rozpuštěné látky}}$$

= 0 pro netěkavé látky (NaCl)

$$p_{\text{celkový}} = x_1 P^\circ_{\text{rozpouštědla}}$$

Raoultův zákon

$$P_1 = x_1 P_1^\circ \quad (x_1 = \text{rozpouštědlo})$$

$$x_1 = 1 - x_2 \quad (x_2 = \text{rozpuštěná látka})$$

$$P_1 = (1 - x_2) P_1^\circ$$

$$P_1 = P_1^\circ - x_2 P_1^\circ$$

$$P_1^\circ - P_1 = \Delta P_1 = x_2 P_1^\circ$$

Snížení tlaku par

= součin tlaku par
čistého rozpouštědla a
molárního zlomku
rozpuštěné látky

Dvě těkavé látky, A a B

$$P_A = x_A P_A^\circ$$

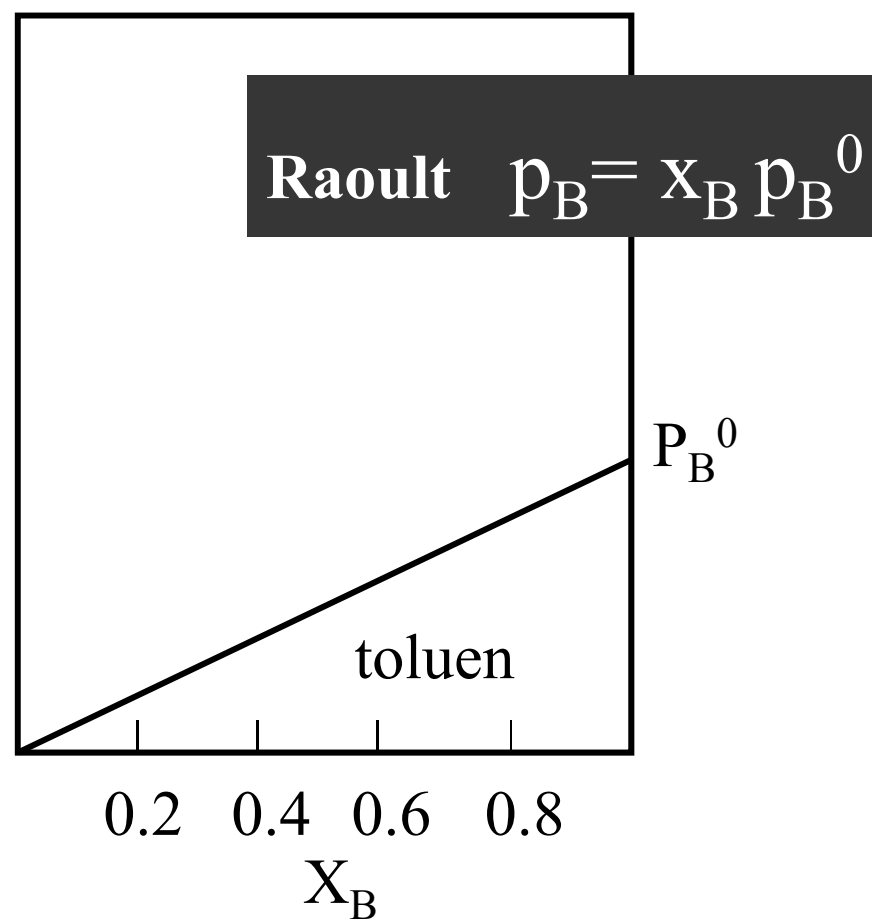
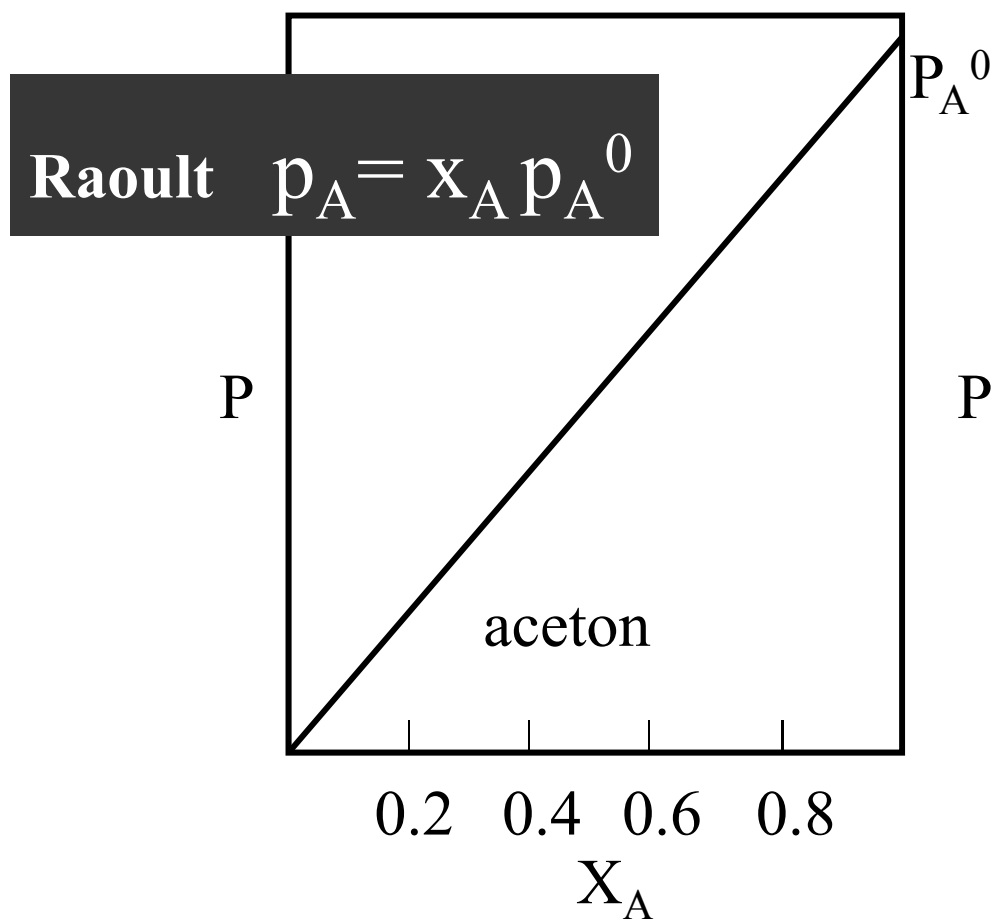
$$P_B = x_B P_B^\circ$$

$$P_{\text{celk}} = P_A + P_B = x_A P_A^\circ + x_B P_B^\circ$$

Tlak par v závislosti na složení kapalné fáze

Těkavější složka = vyšší tenze par

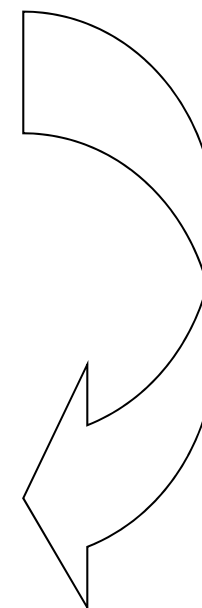
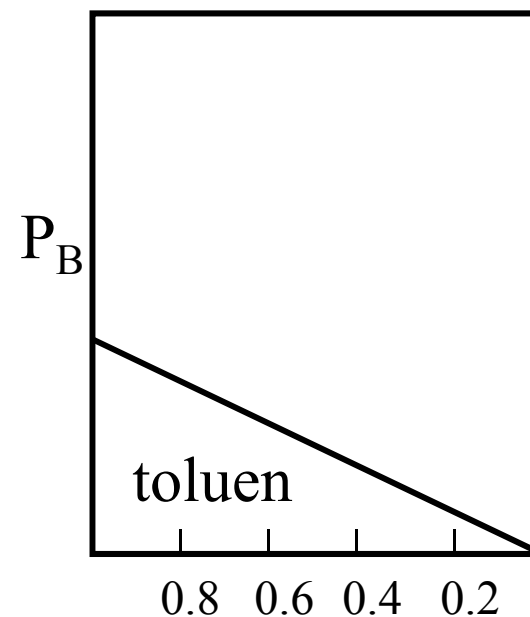
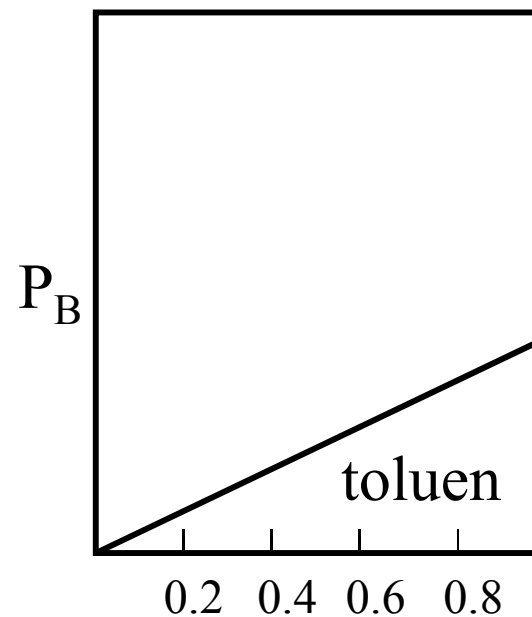
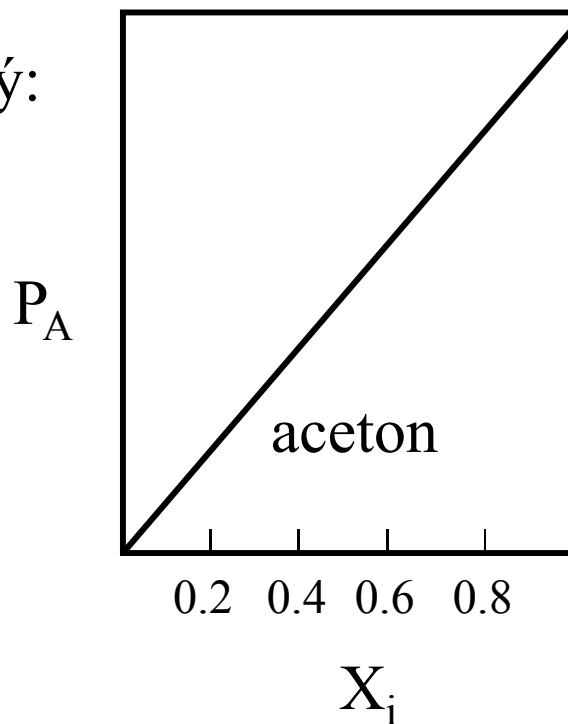
Izotermický: $T = \text{konst.}$



směs dvou kapalin: aceton a toluen

Tlak par v závislosti na složení kapalné fáze

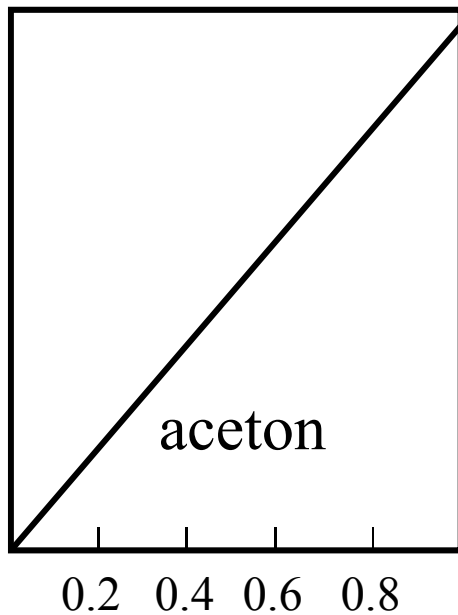
Izotermický:
 $T = \text{konst.}$



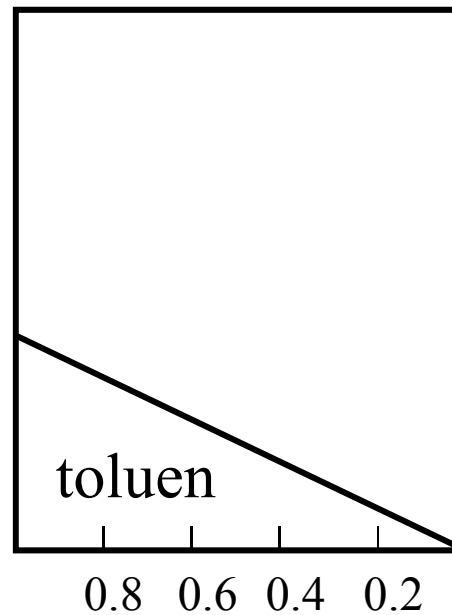
$$X_{\text{acetone}} + X_{\text{toluen}} = 1$$

Izotermický:
 $T = \text{konst.}$

P_A



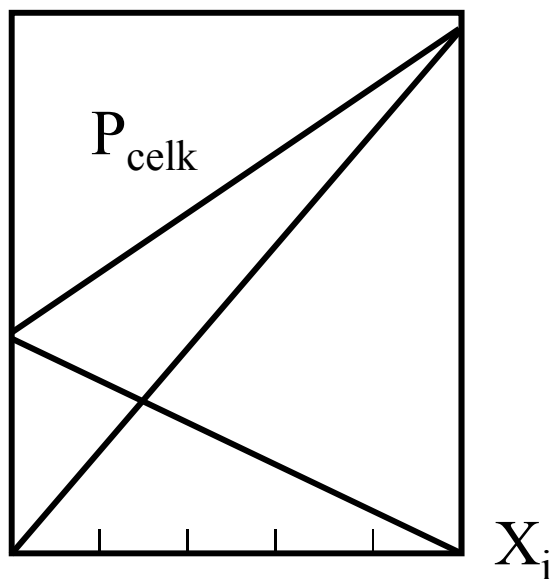
P_B



X_i

$$P_{\text{acetone}} + P_{\text{toluene}} = P_{\text{celk}}$$

P



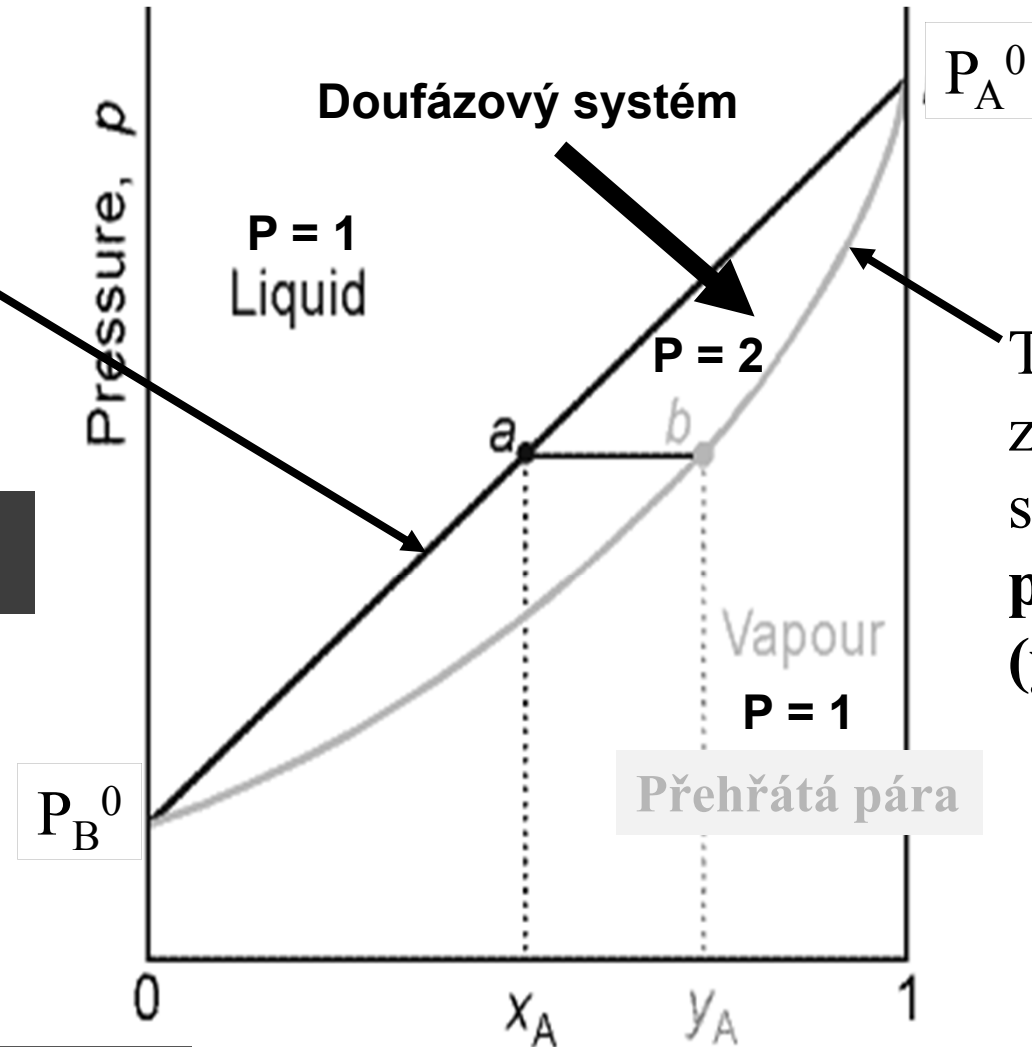
X_i

Fázový diagram pro dvousložkovou soustavu

$$P + V = C + 2$$

Tlak par v závislosti na složení **kapalné fáze** (x_A)

$$P_{\text{aceton}} + P_{\text{toluen}} = P_{\text{celk}}$$



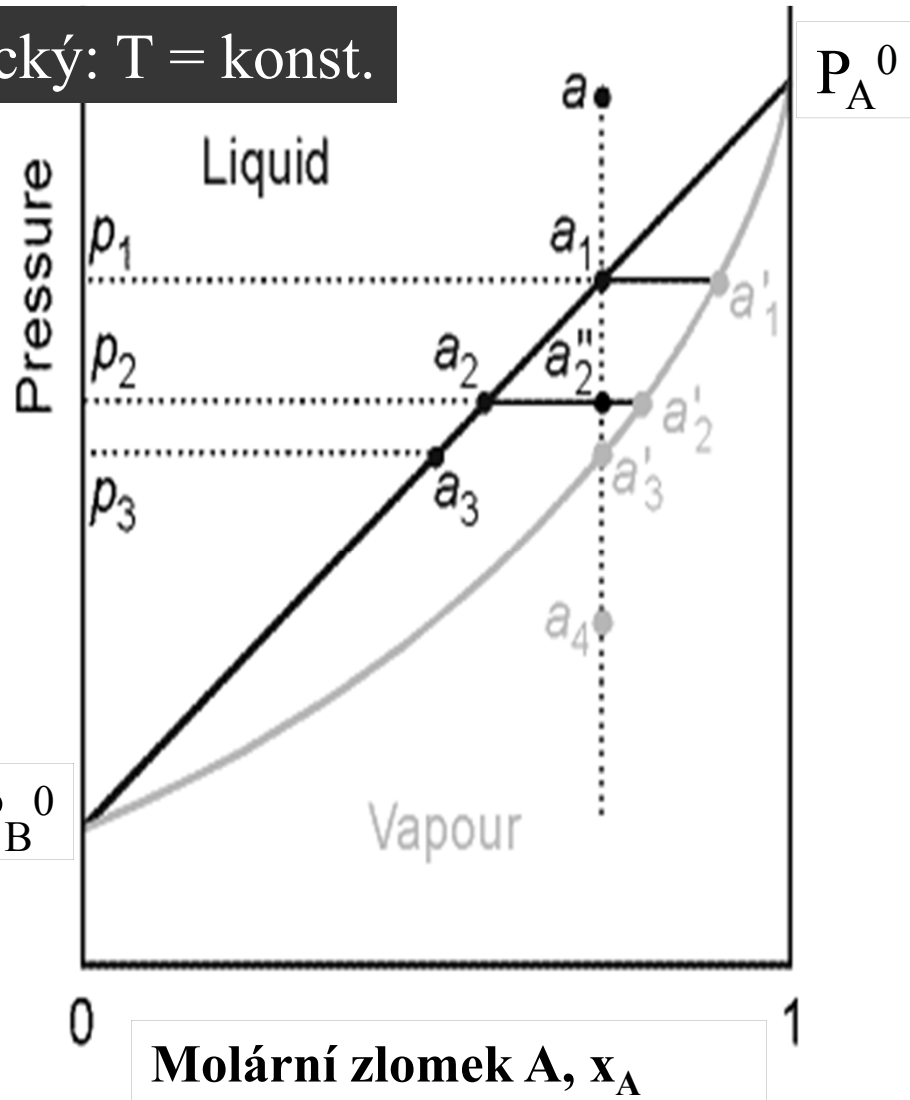
Tlak par v závislosti na složení **plynné fáze** (y_A)

Izotermický: $T = \text{konst.}$

Molární zlomek A

Destilace za konstantní T snižováním tlaku

Izotermický: $T = \text{konst.}$



A = těkavější složka
= vyšší tenze par

Destilace:

$a \rightarrow a_1 \rightarrow a''_2 \rightarrow a'_3$

Pára je obohacena
těkavější složkou a'_1

V kapalně fázi ubývá
těkavější složka a_2

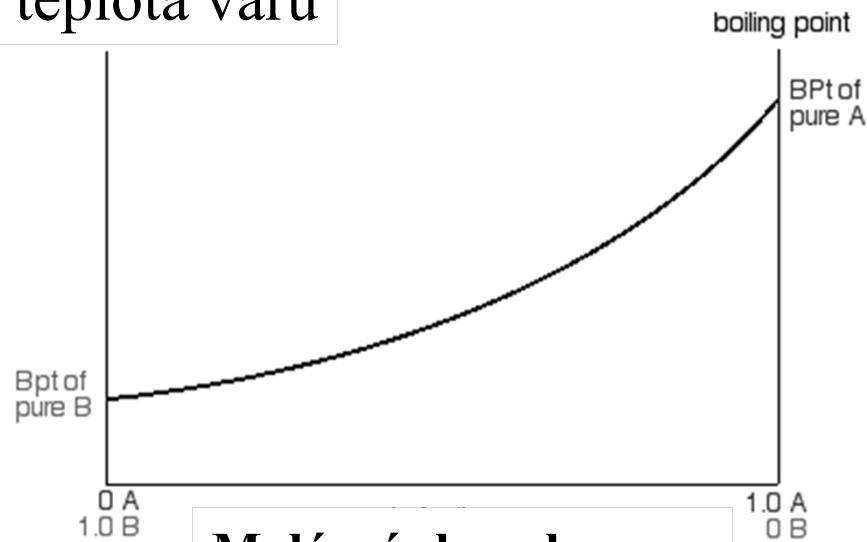
B = méně
těkavá
složka =
nižší tenze
par

Fázové diagramy

Izobarický: $p = \text{konst.}$

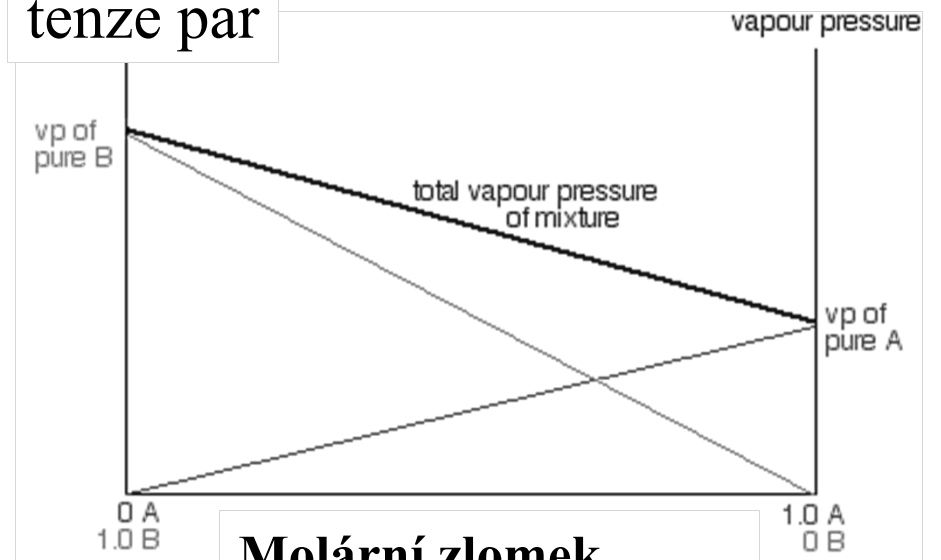
Izotermický: $T = \text{konst.}$

teplota varu



Molární zlomek

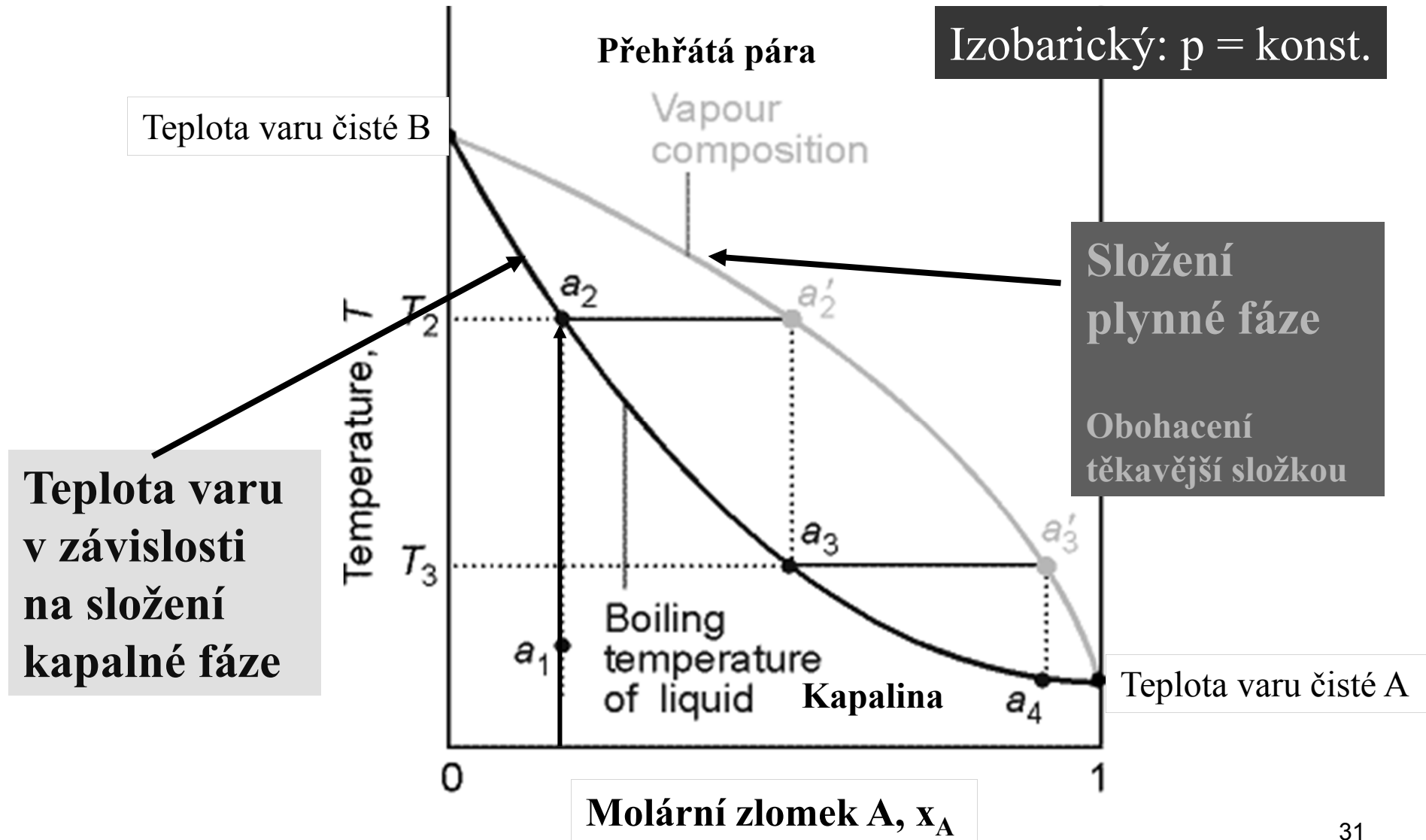
tenze par



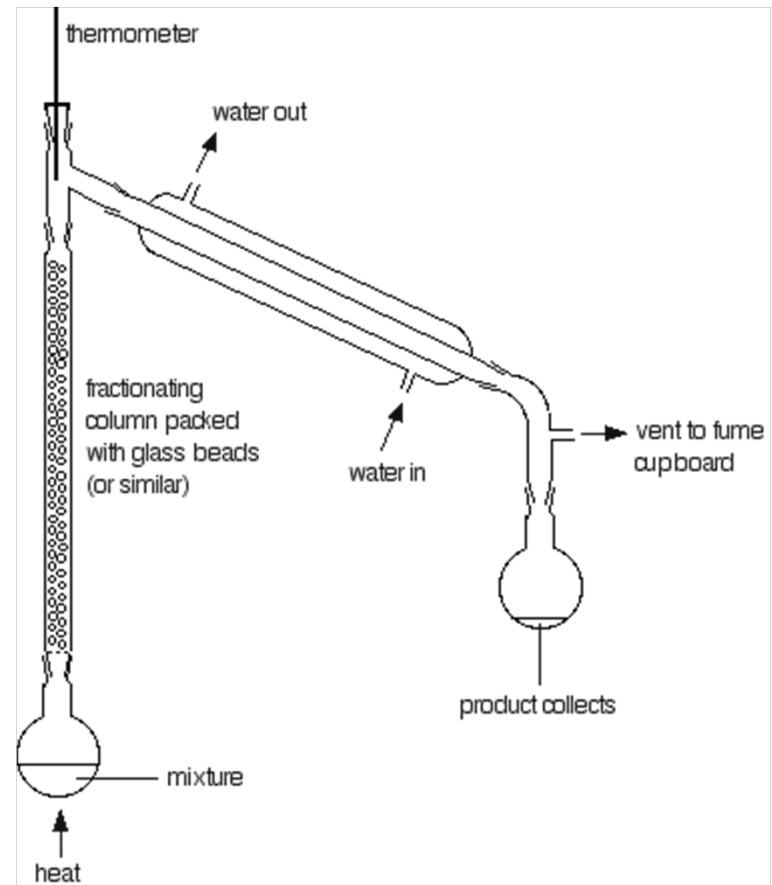
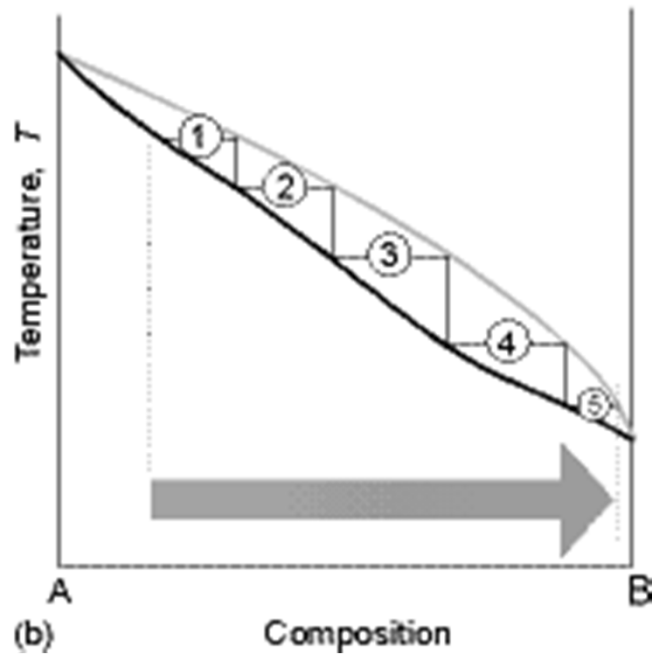
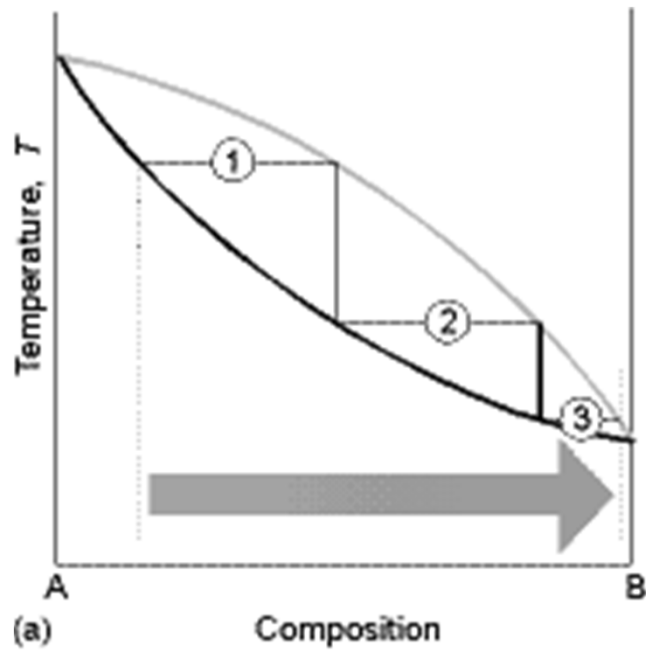
Molární zlomek

Těkavější složka = vyšší tenze par = nižší teplota varu

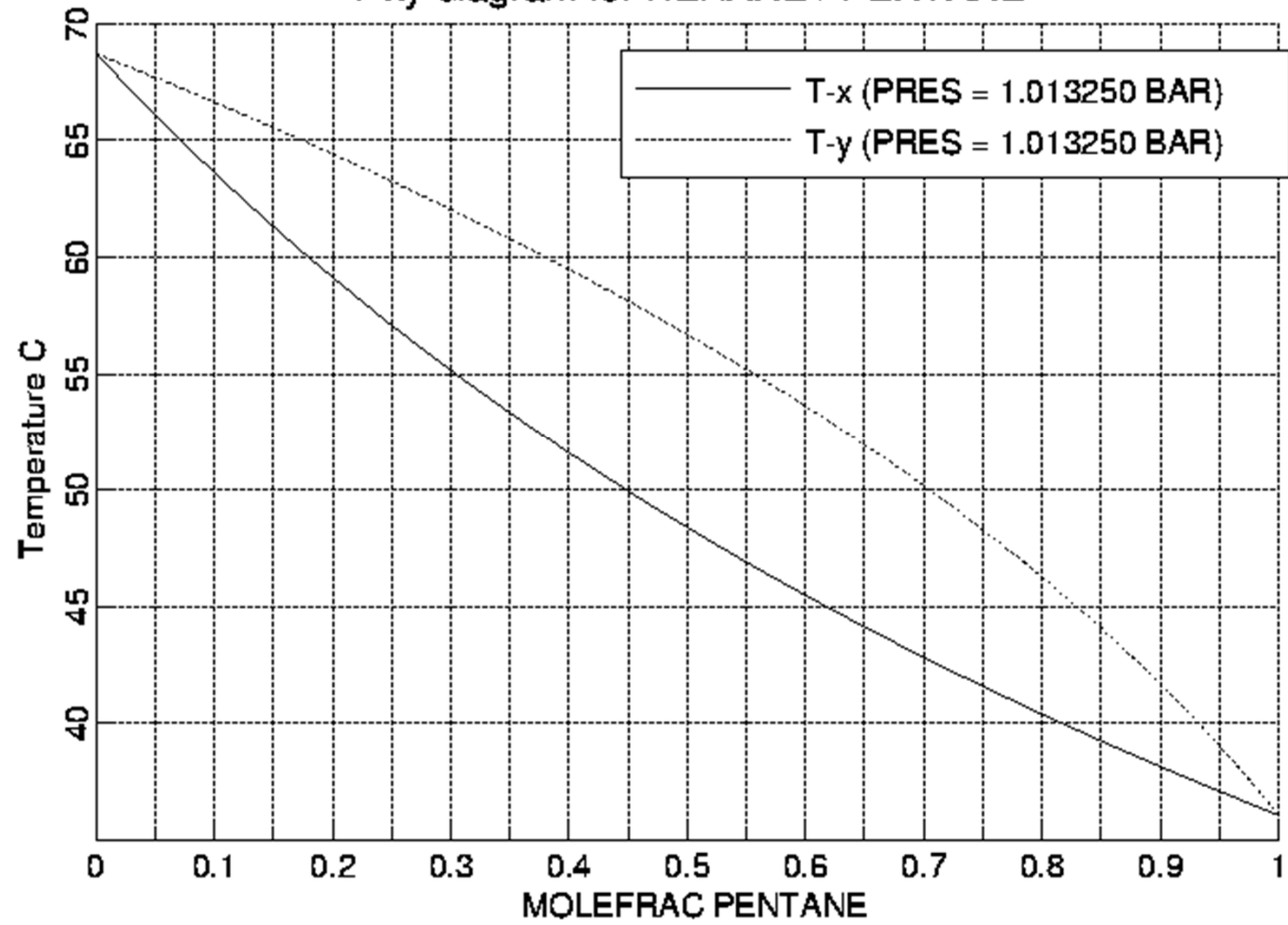
Destilace za konstantního p zvyšováním T



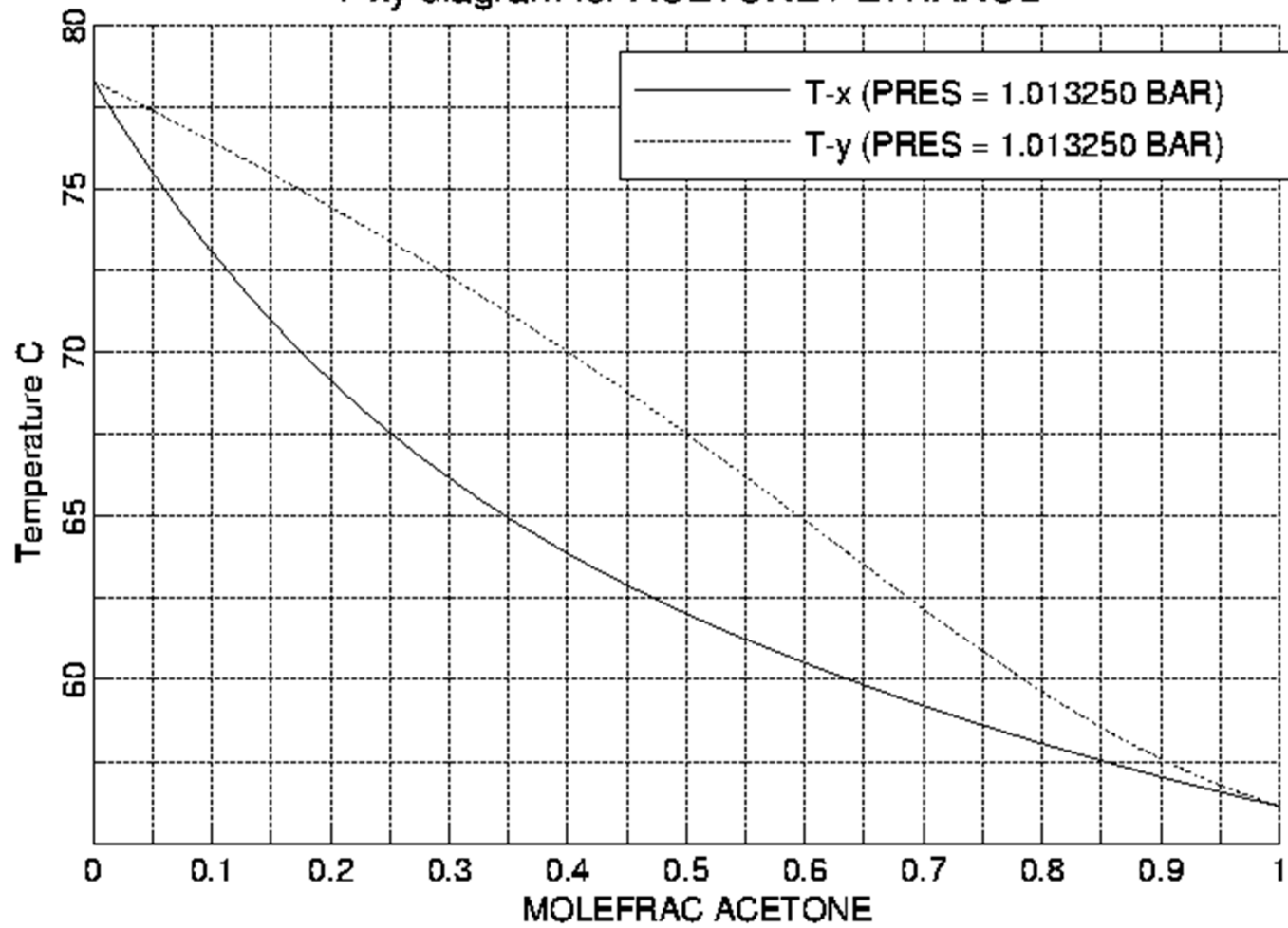
Frakční destilace



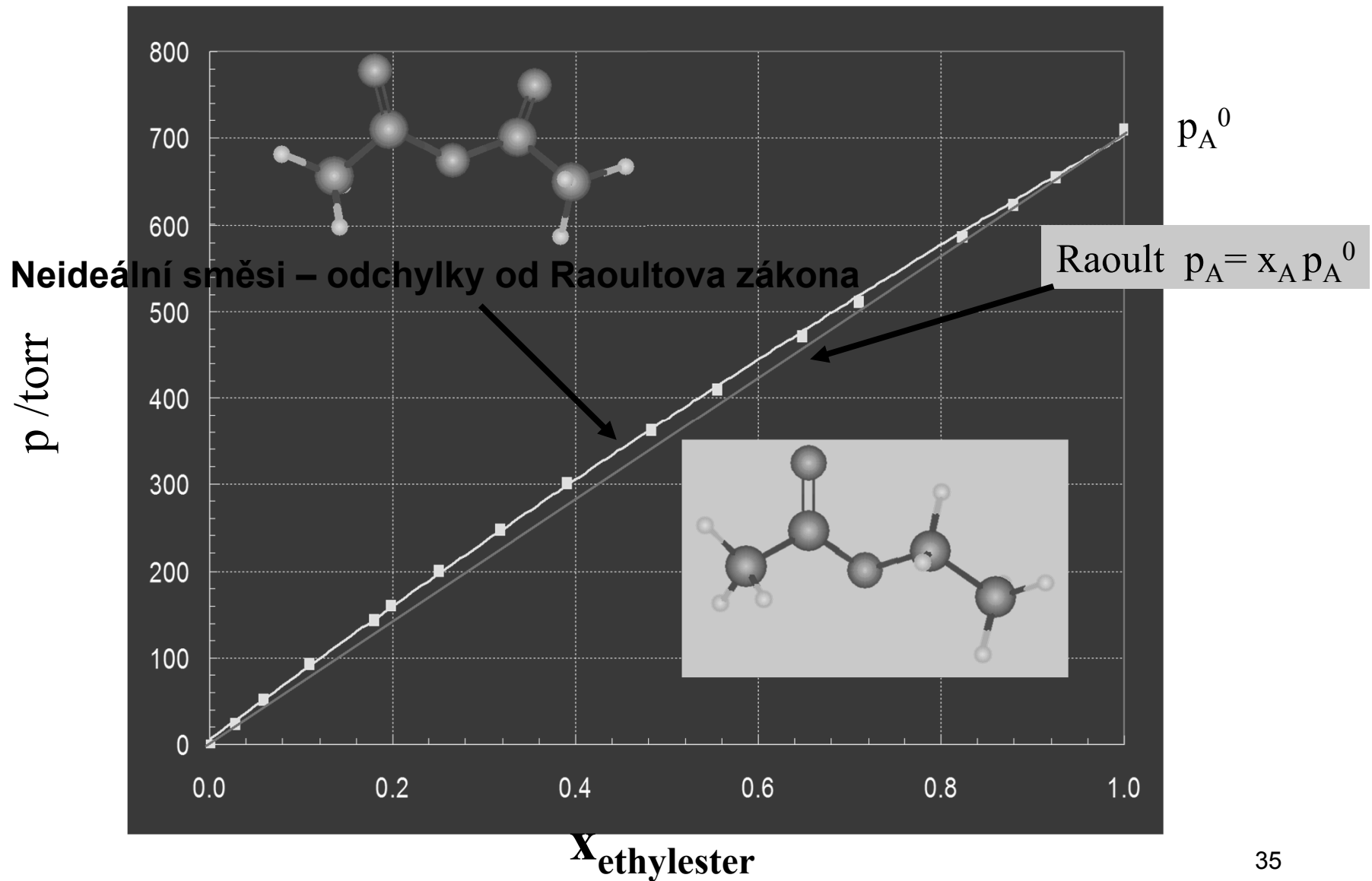
T-xy diagram for HEXANE / PENTANE



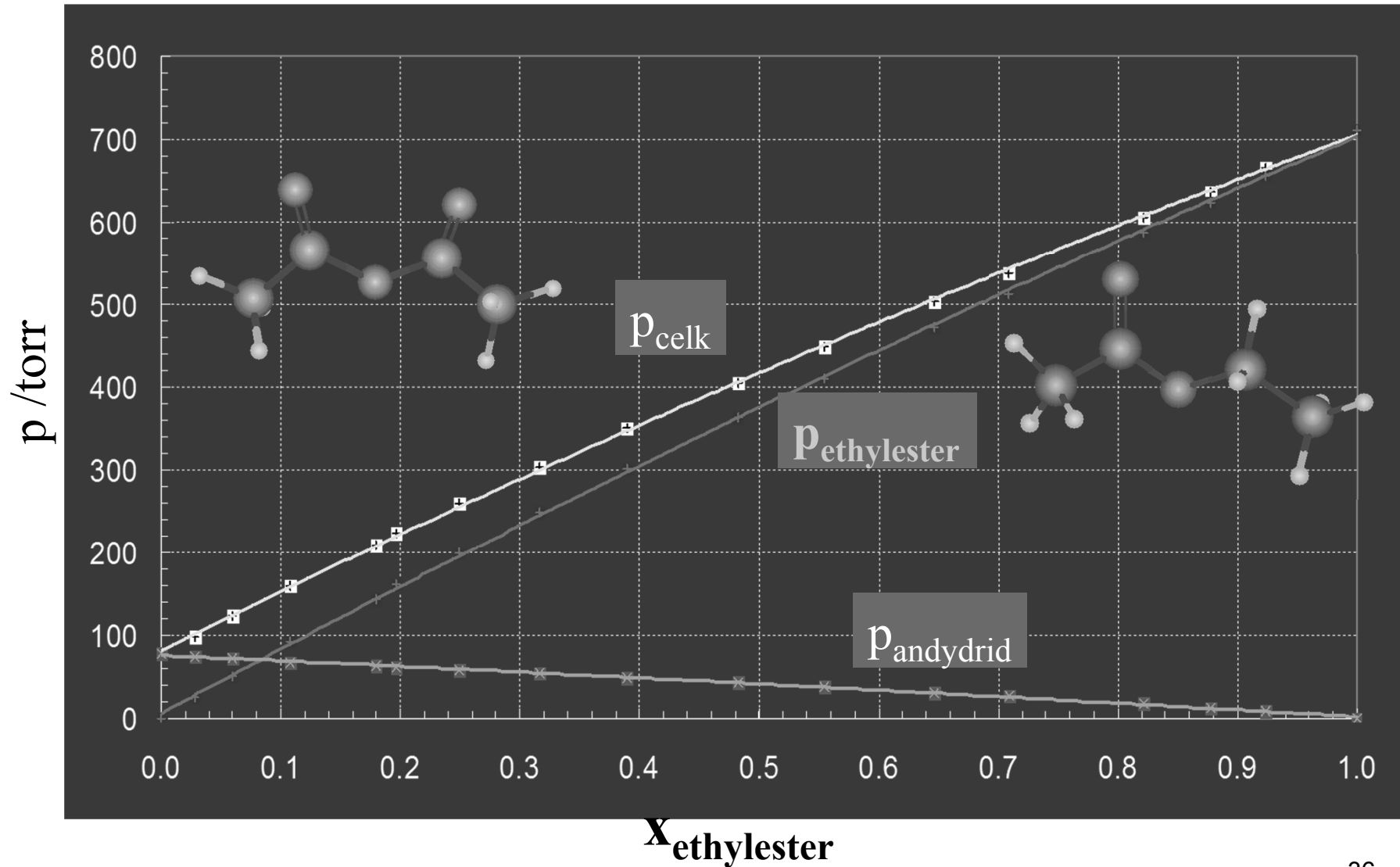
T-xy diagram for ACETONE / ETHANOL



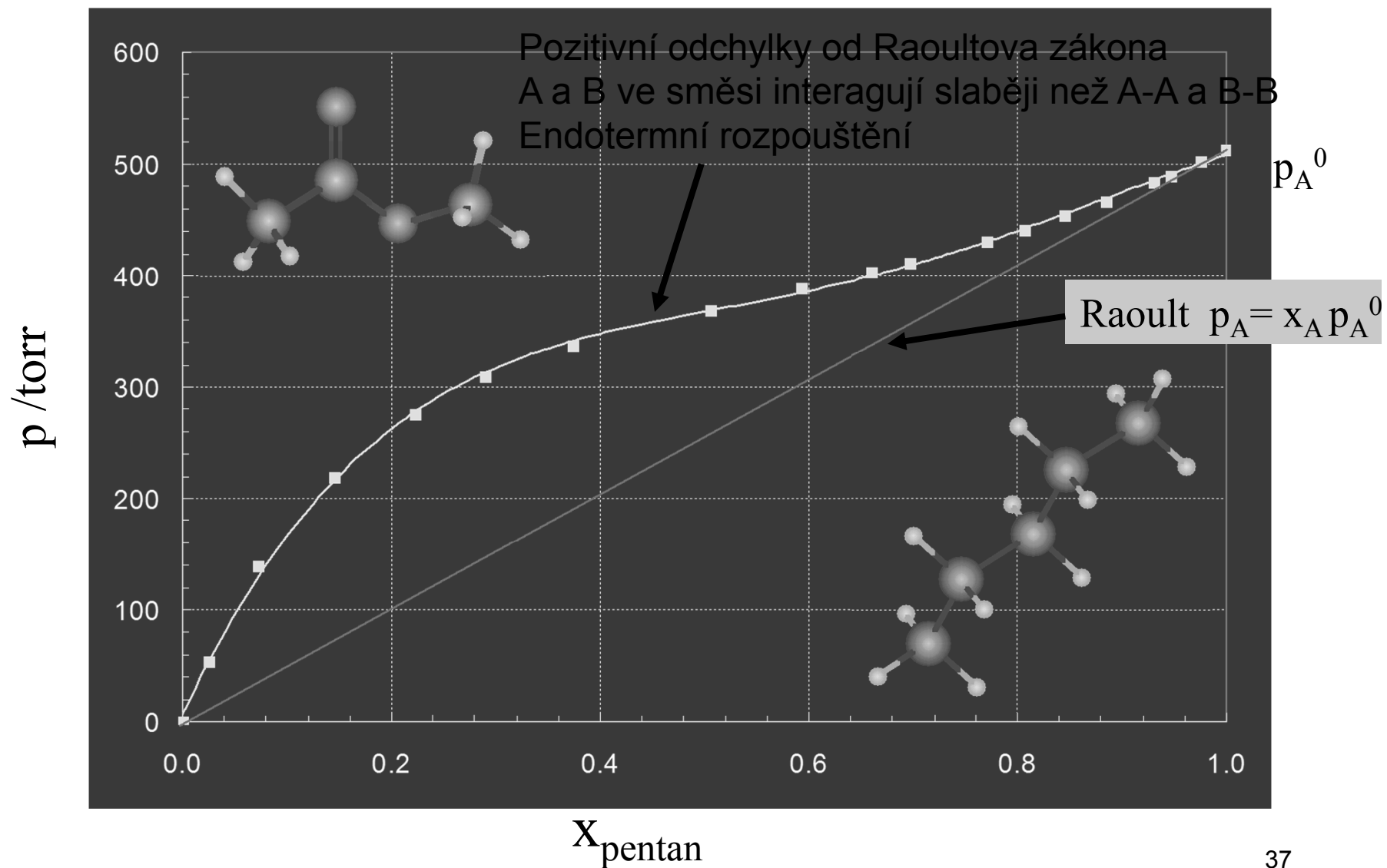
Tenze par ethylesteru kys. octové v anhydridu kys. octové



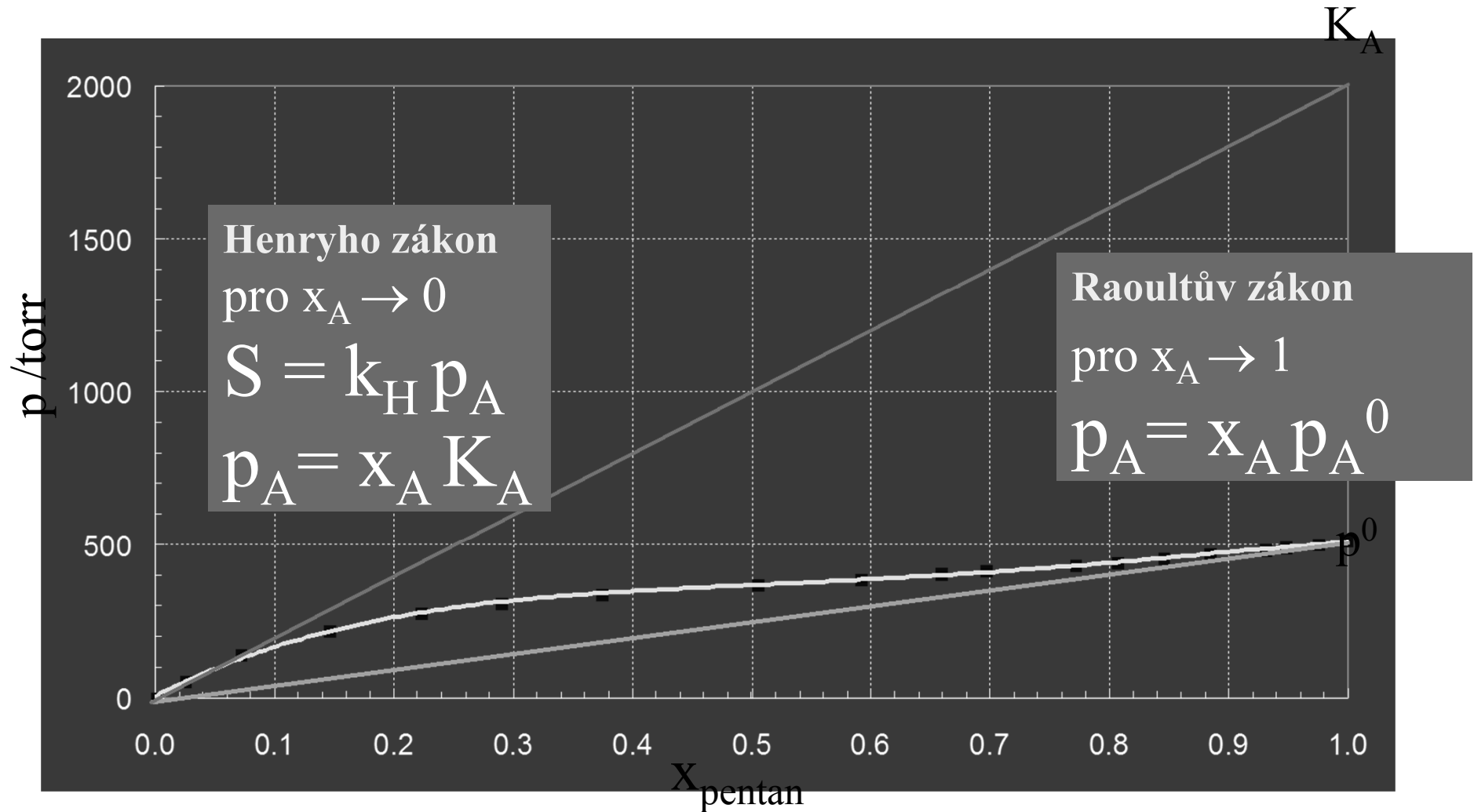
Celkový tlak ethylesteru a anhydridu kys. octové



n-Pentan v methylesteru kys. octové



Raoultův a Henryho zákon



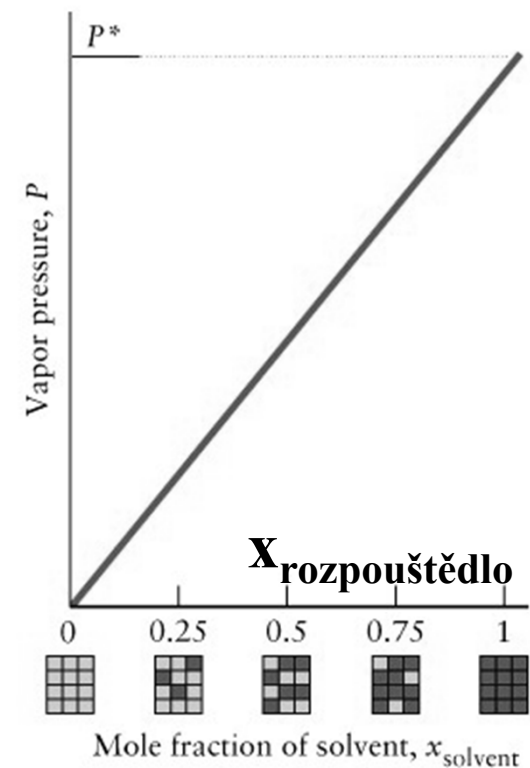
Raoultův zákon

Tlak nasycené páry složky nad roztokem se mění lineárně s molárním zlomkem látky v roztoku.

$$p_A = x_A p_A^0$$

Raoultův zákon platí nejpřesněji pro $x_A \rightarrow 1$

Platí pro chemicky podobné látky



Henryho zákon

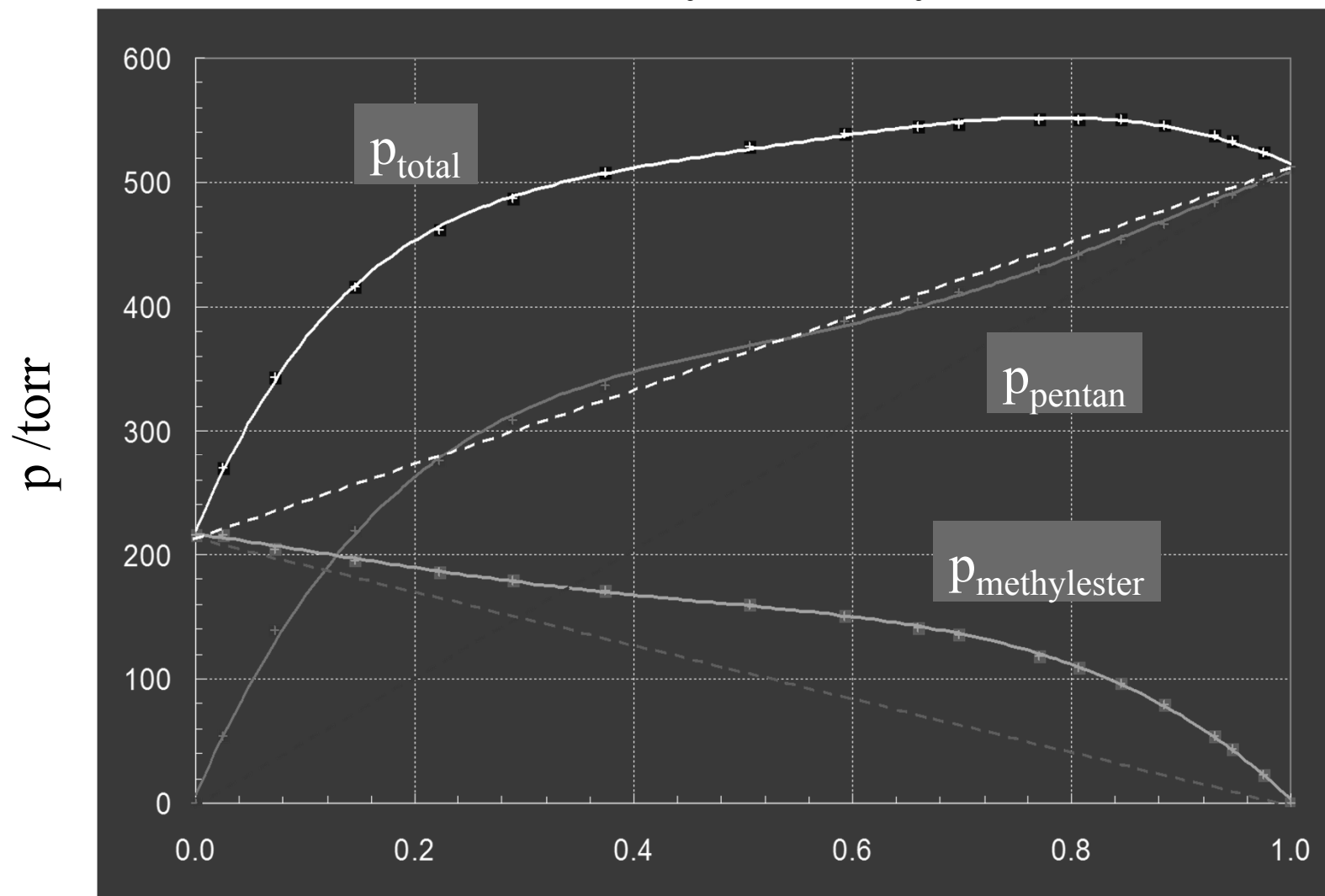
Molární rozpustnost je úměrná parciálnímu tlaku složky nad roztokem. Tlak páry složky je úměrný molárnímu zlomku v roztoku.

$$S = k_H p_A \qquad p_A = x_A K_A$$

Henryho zákon platí nejpřesněji pro $x_A \rightarrow 0$

K_A hypotetický tlak par čisté A, kdyby se chovala v čistém stavu stejně jako v nekonečně zředěném roztoku.

n-Pentan a methylester kys. octové

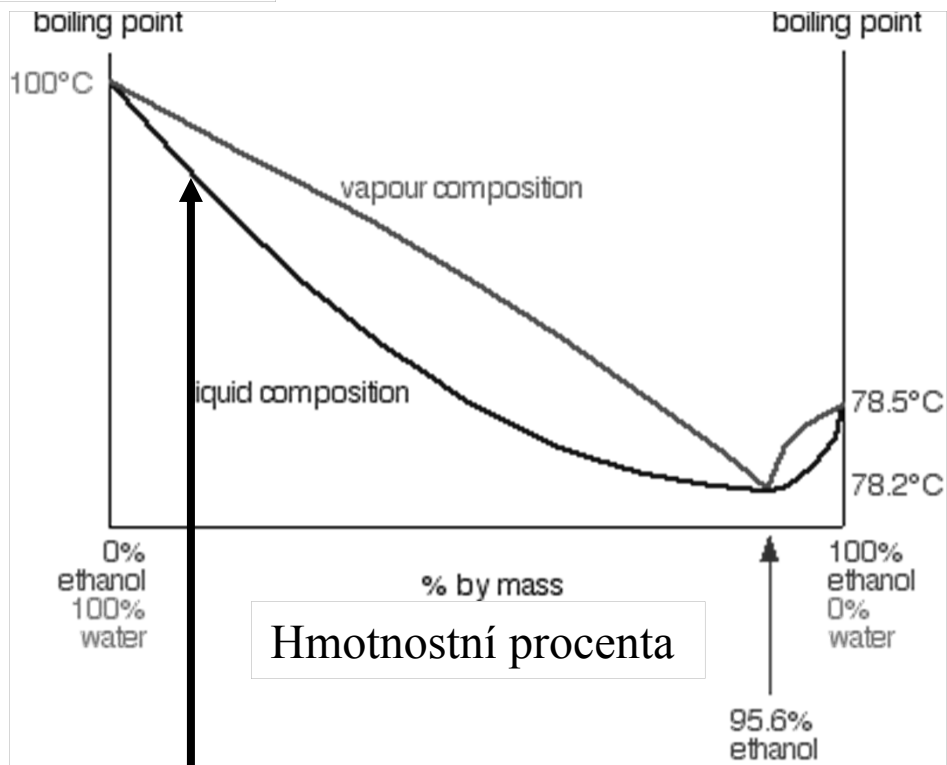


Izotermický $T = \text{konst.}$

X_{pentan}

Azeotropická směs s min. T_v (max. p)

teplota varu



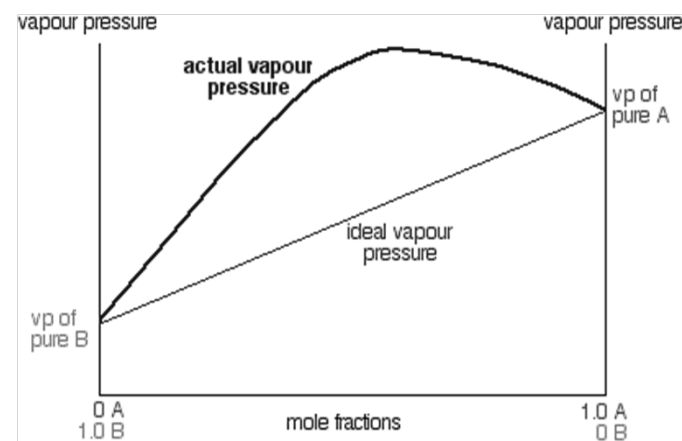
Frakční destilací lze získat ethanol max. 95.6% v destilátu a čistou vodu v destilačním zbytku

Ethanol – voda

$$w = 95.6\% \quad x = 0.895$$

Pozitivní odchylky od Raoultova zákona, A a B ve směsi interagují slaběji než A-A a B-B, směs se vypařuje snadněji než čisté látky

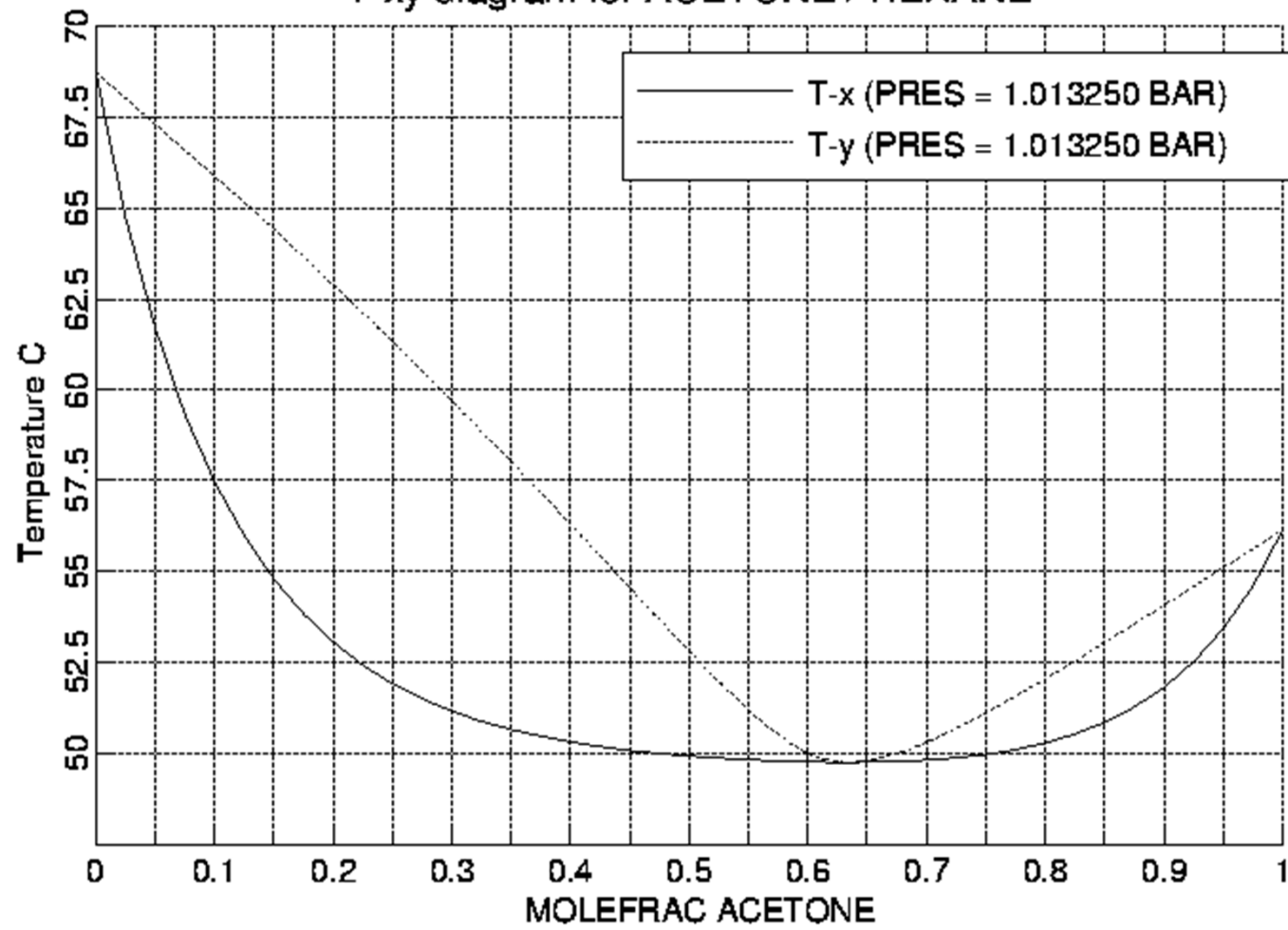
Endotermní rozpouštění



Frakční destilace

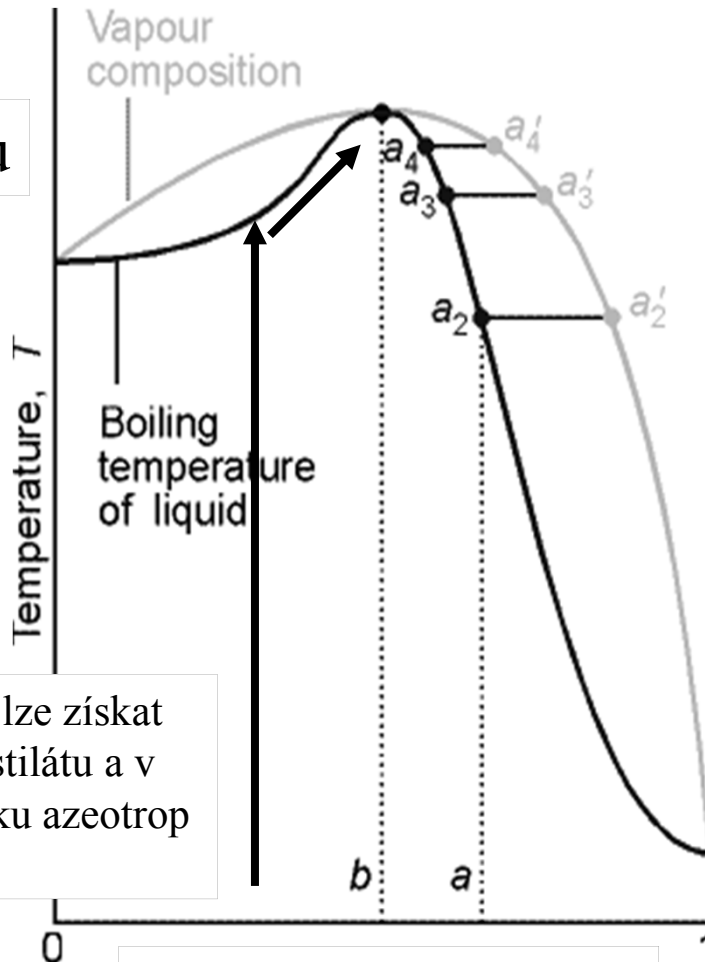


T-xy diagram for ACETONE / HEXANE



Azeotropická směs s max. T_v (min. p)

teplota varu



Frakční destilací lze získat čistou vodu v destilátu a v destilačním zbytku azeotrop HCl 20.2%

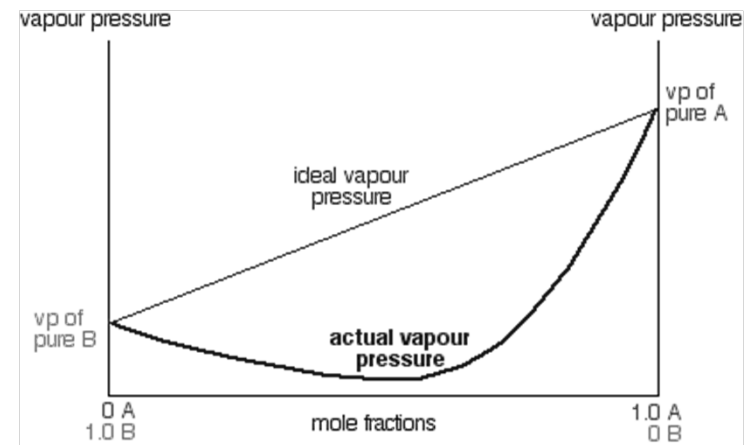
Molární zlomek HCl

HCl – voda

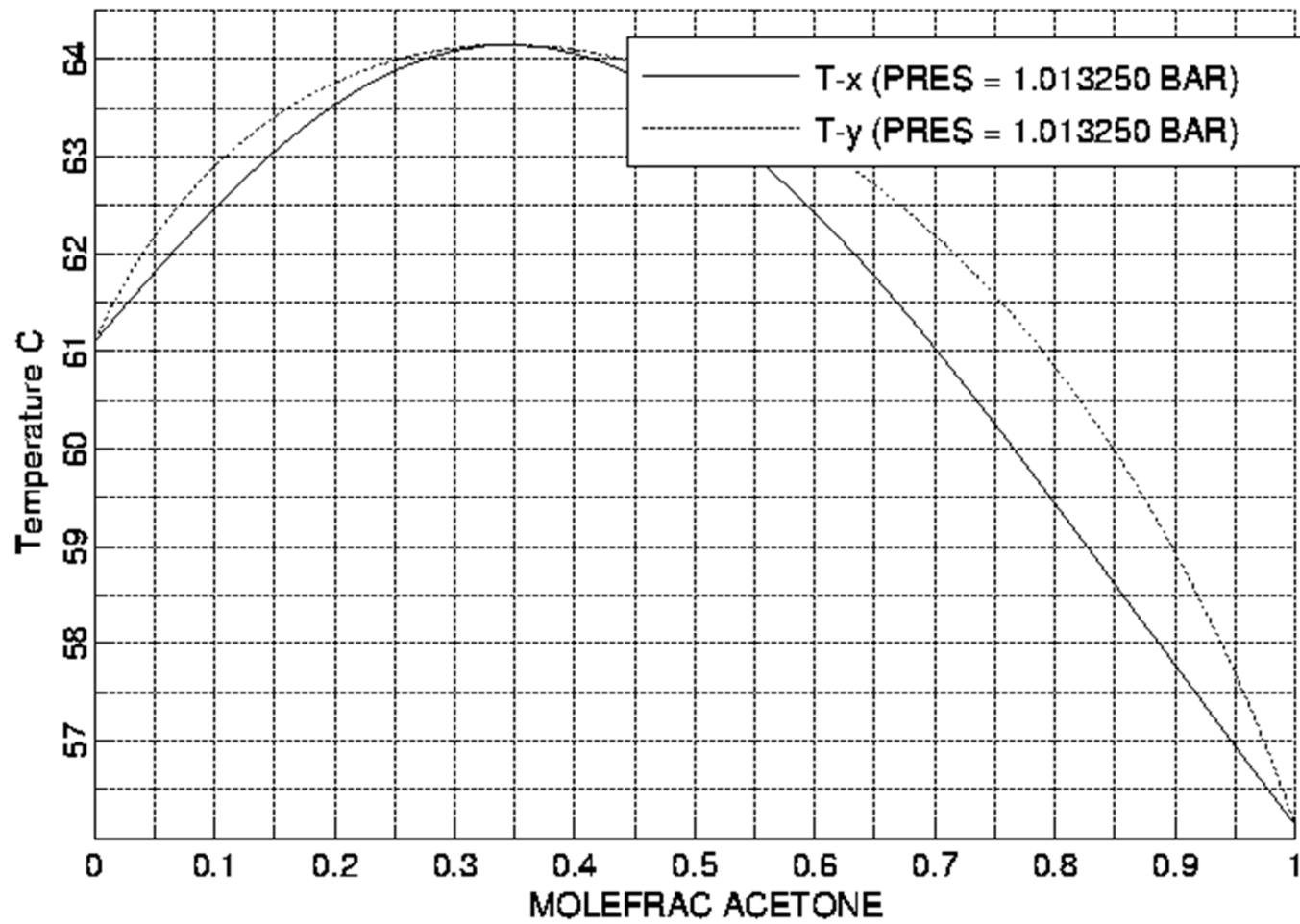
108.584 °C

20.222 % HCl

Negativní odchylky od Raoultova zákona, A a B ve směsi interagují silněji než A-A a B-B
Exotermní rozpouštění



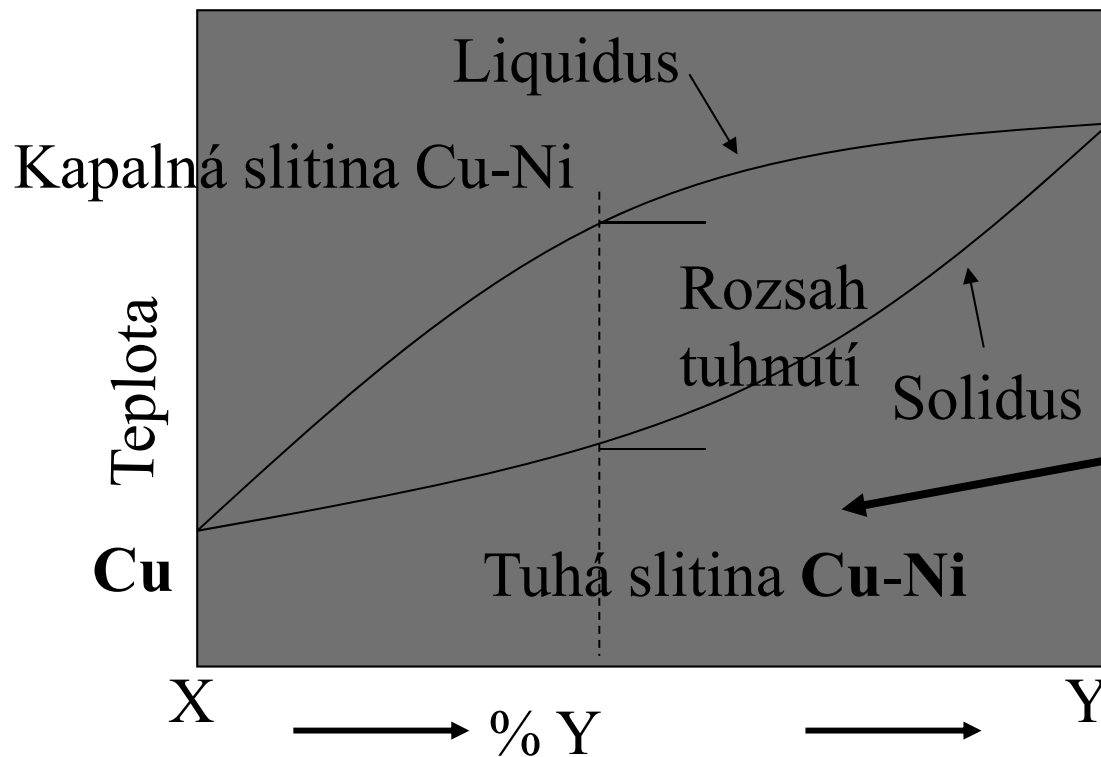
T-xy diagram for ACETONE / CHLOROFORM



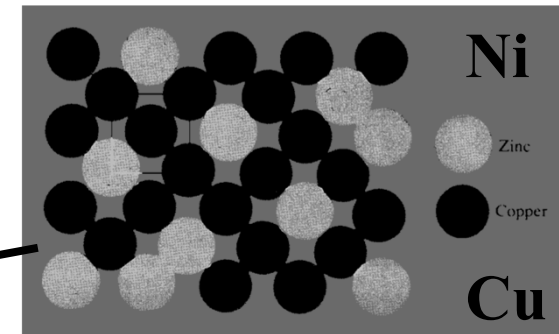
Dvě složky dokonale mísitelné v (l) i (s)

Izobarický: $p = \text{konst.}$

Substituční slitina Cu-Ni
Pevný roztok

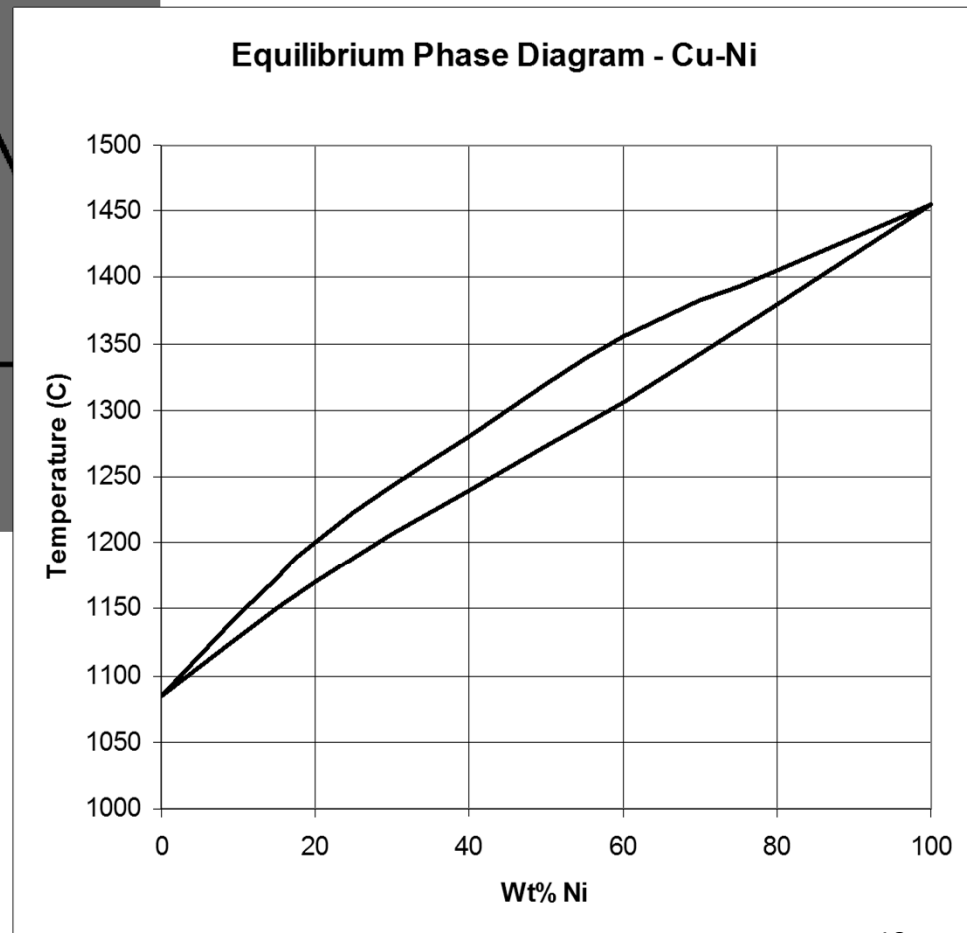
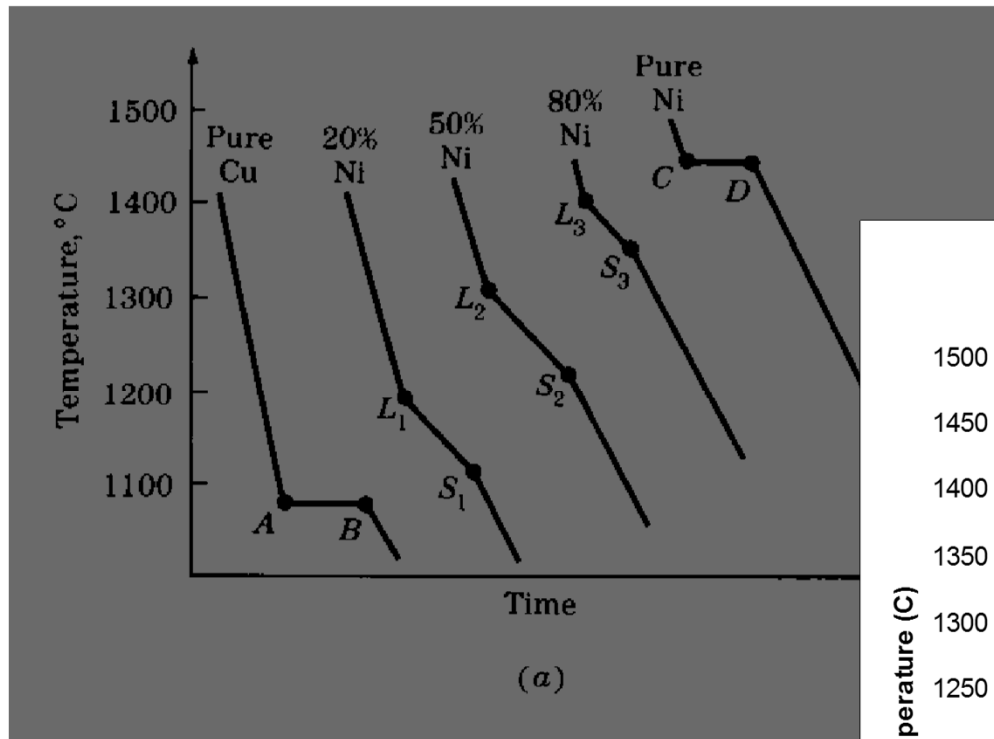


Ni – teplota tání



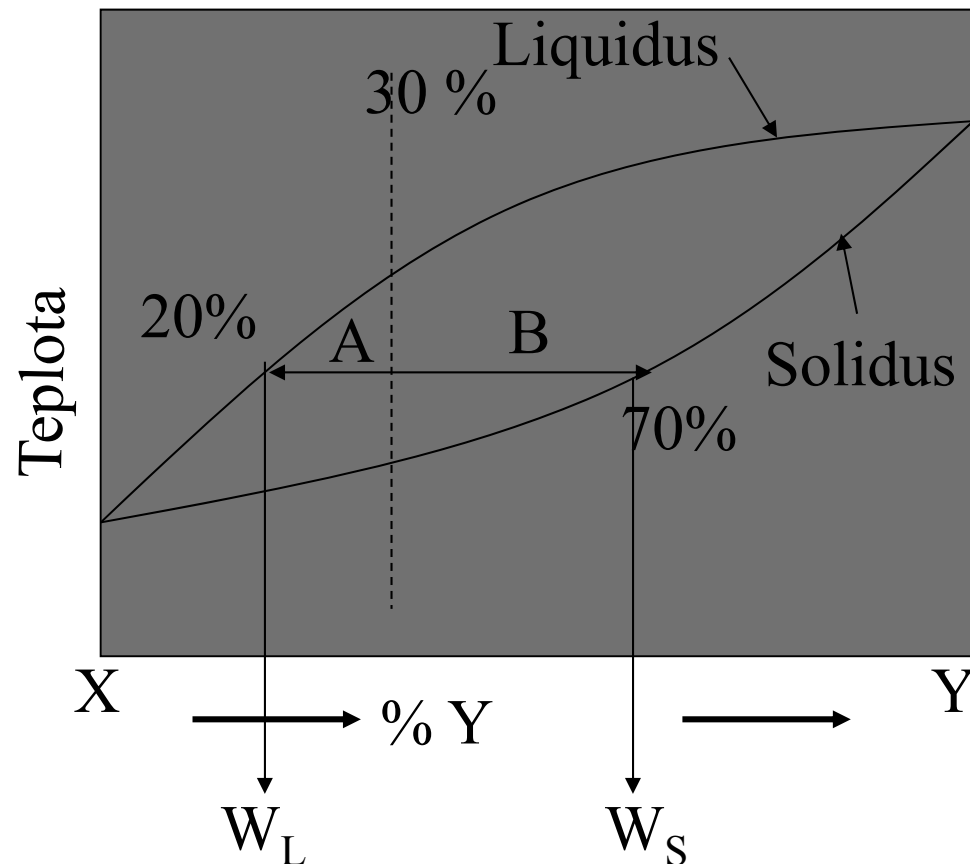
Poloměry $\pm 15\%$
Podobné elektronegativity
Podobné mocenství
Stejná krystalová struktura

Křivky tuhnutí slitiny Cu-Ni



Pákové pravidlo

Hmotnostní poměr kapalné a pevné fáze



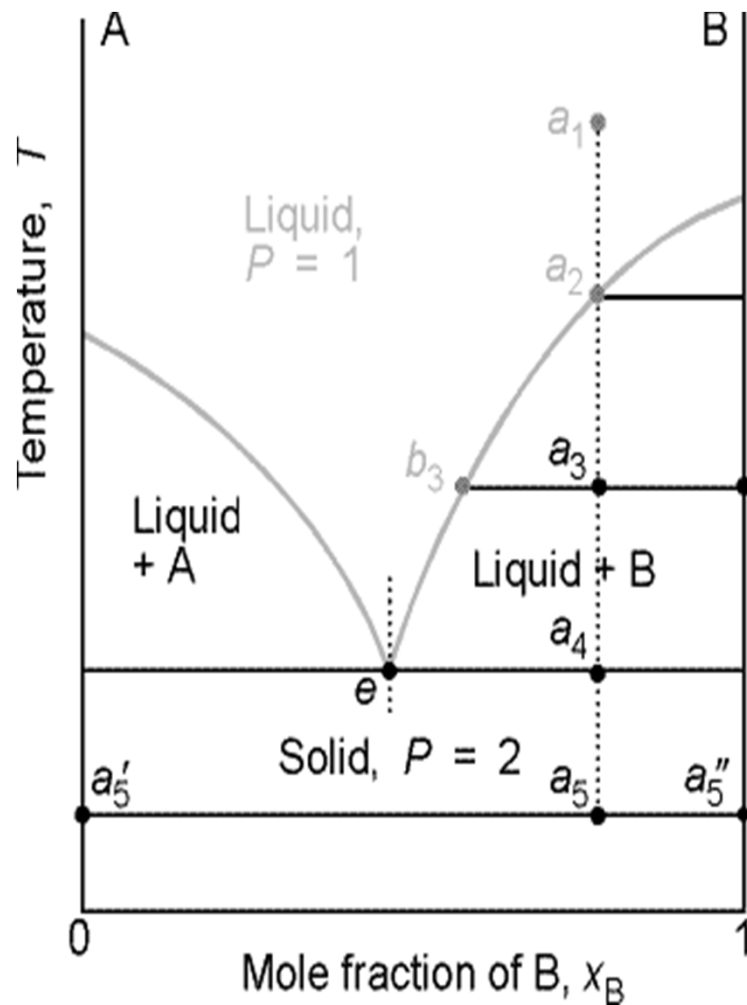
$$W_S = A / (A + B)$$

$$\%W_S = \frac{30 - 20}{70 - 20} * 100$$

$$W_L = B / (A + B)$$

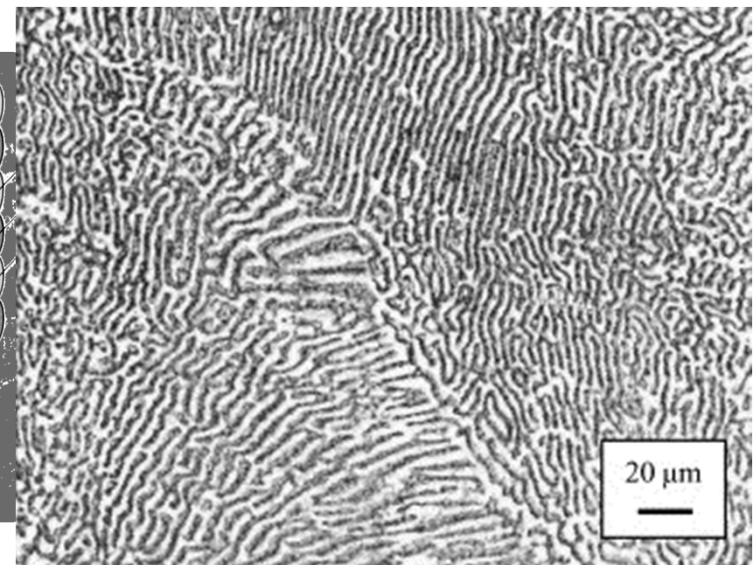
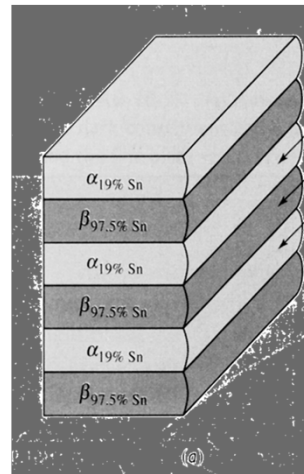
$$\%W_L = \frac{70 - 30}{70 - 20} * 100$$

Dvě složky dokonale mísitelné v (l) a dokonale nemísitelné v (s)



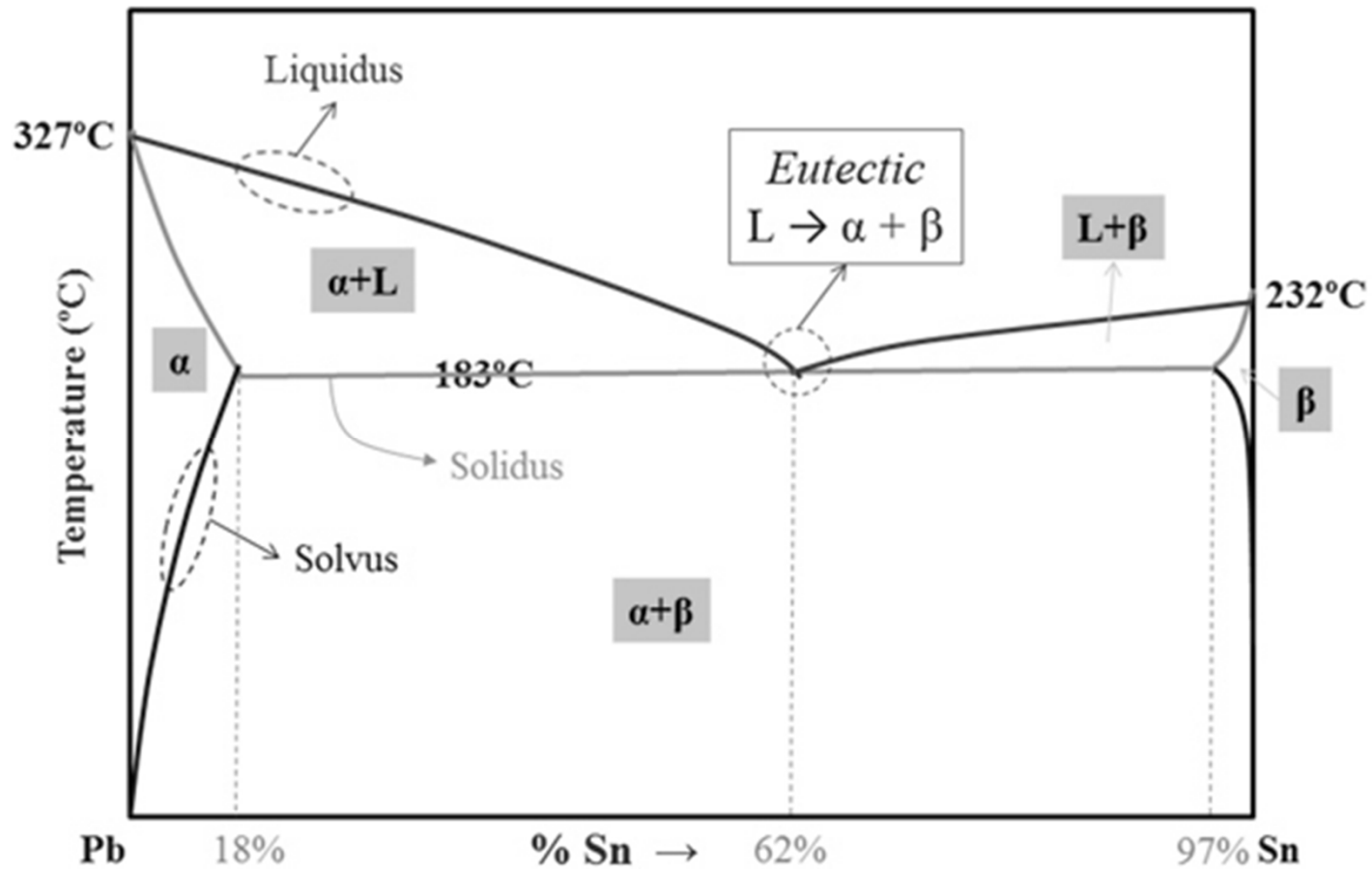
Eutektikum

Při eutektickém složení taje směs při nejnižší teplotě přímo na kapalinu

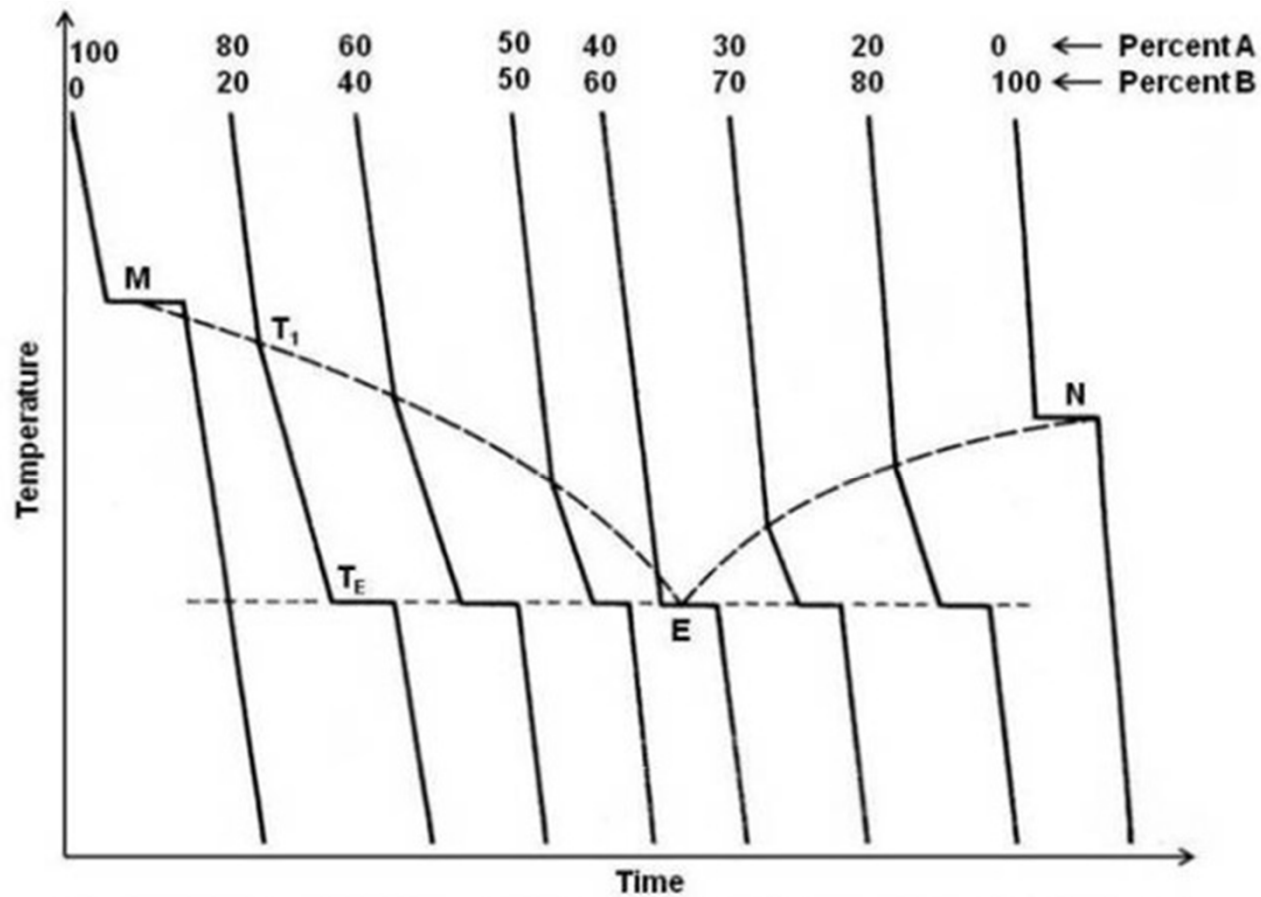


Pb-Sn pájka

Pájka (Pb 38%) taje při 183 °C
cín 232 °C a olovo 327 °C

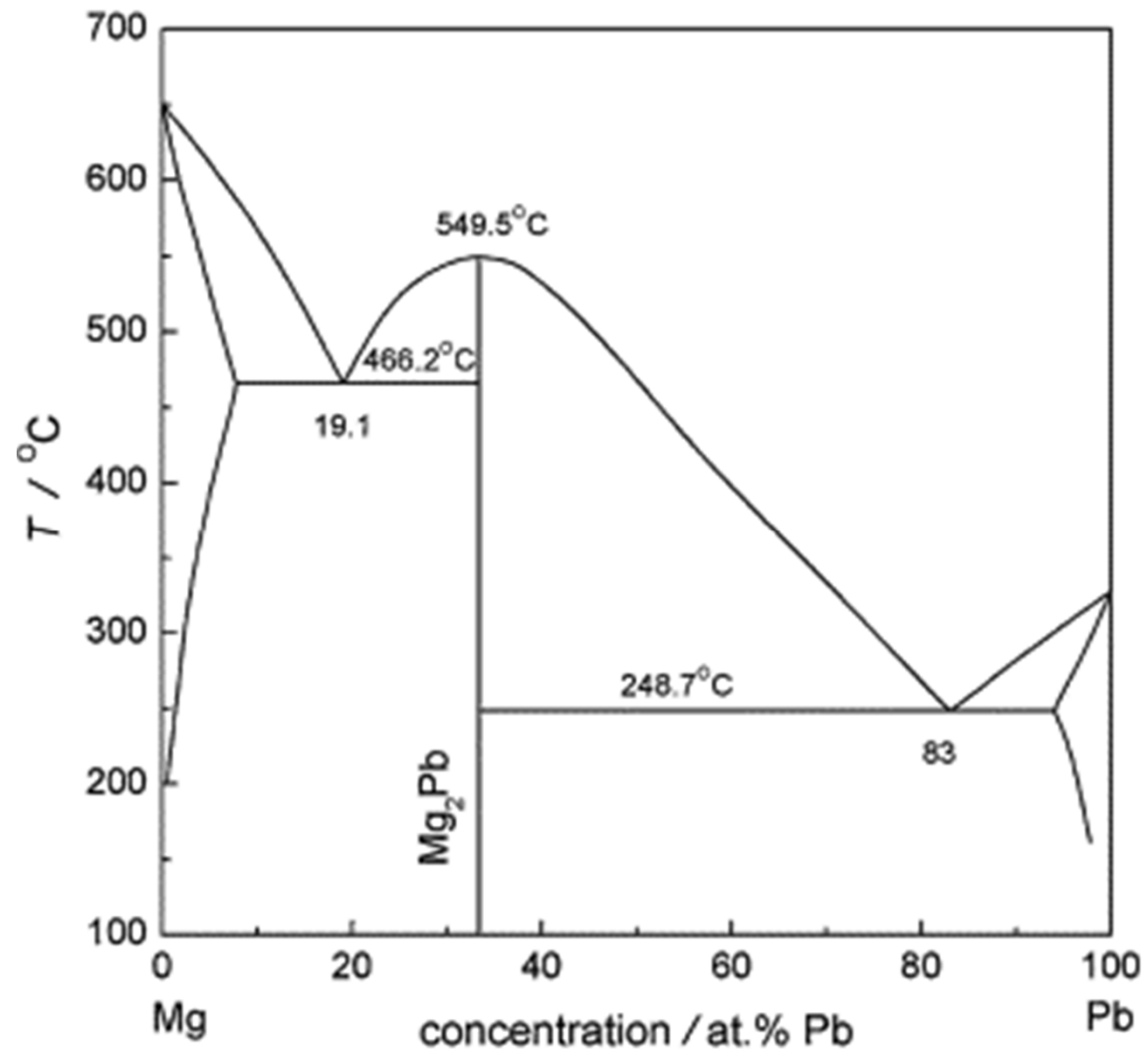


Termická analýza eutektika

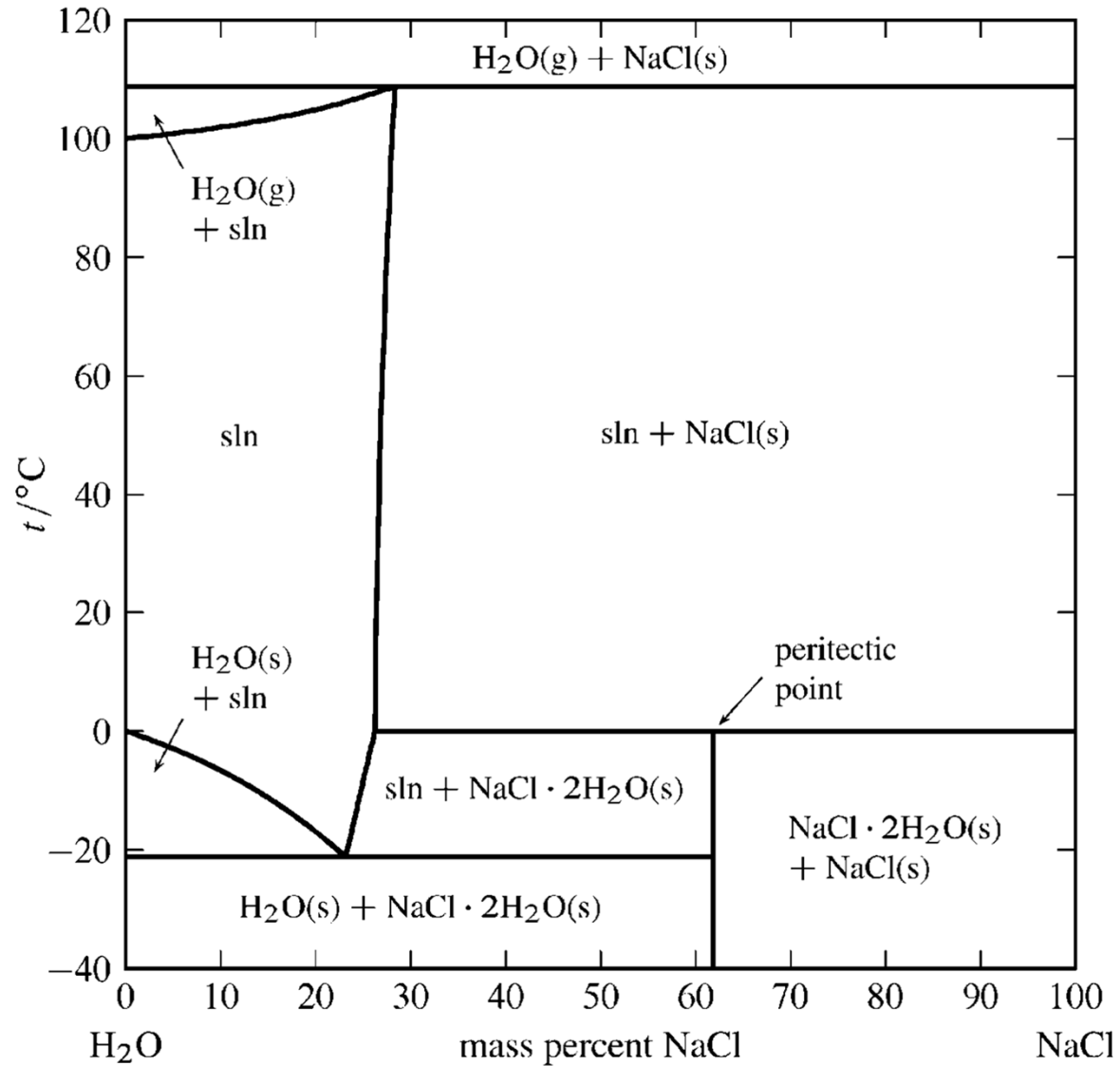


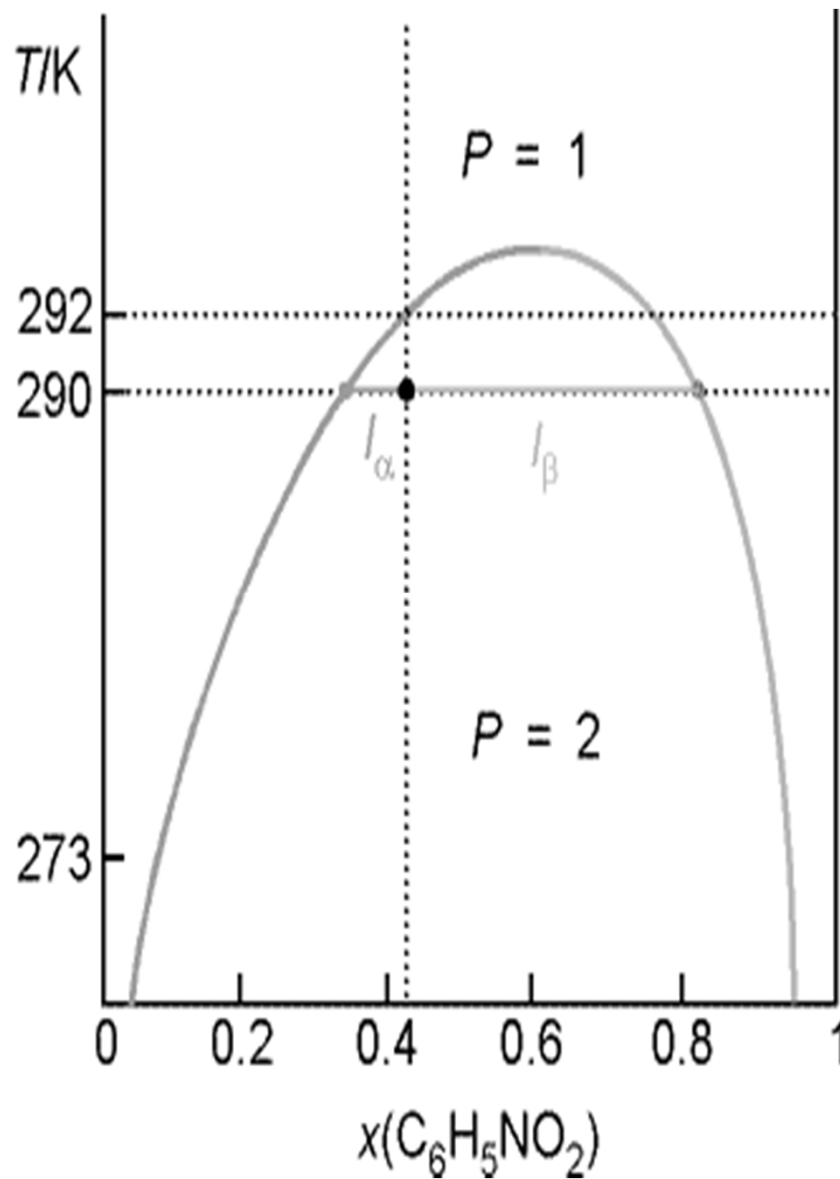
Cooling curves for a series of alloys of two metals that are insoluble in the solid state

Fázový diagram intermetalické sloučeniny



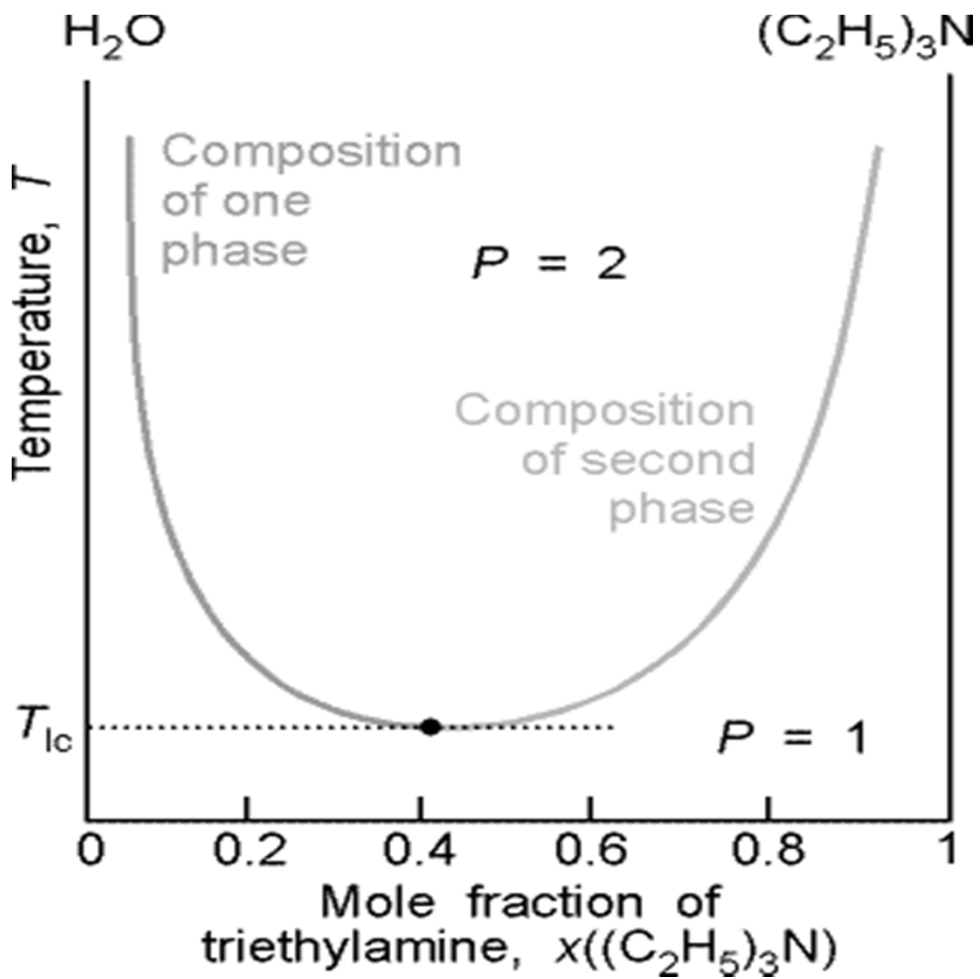
Fázový diagram sůl - voda





Omezeně mísitelné kapaliny
Hexan- nitrobenzen

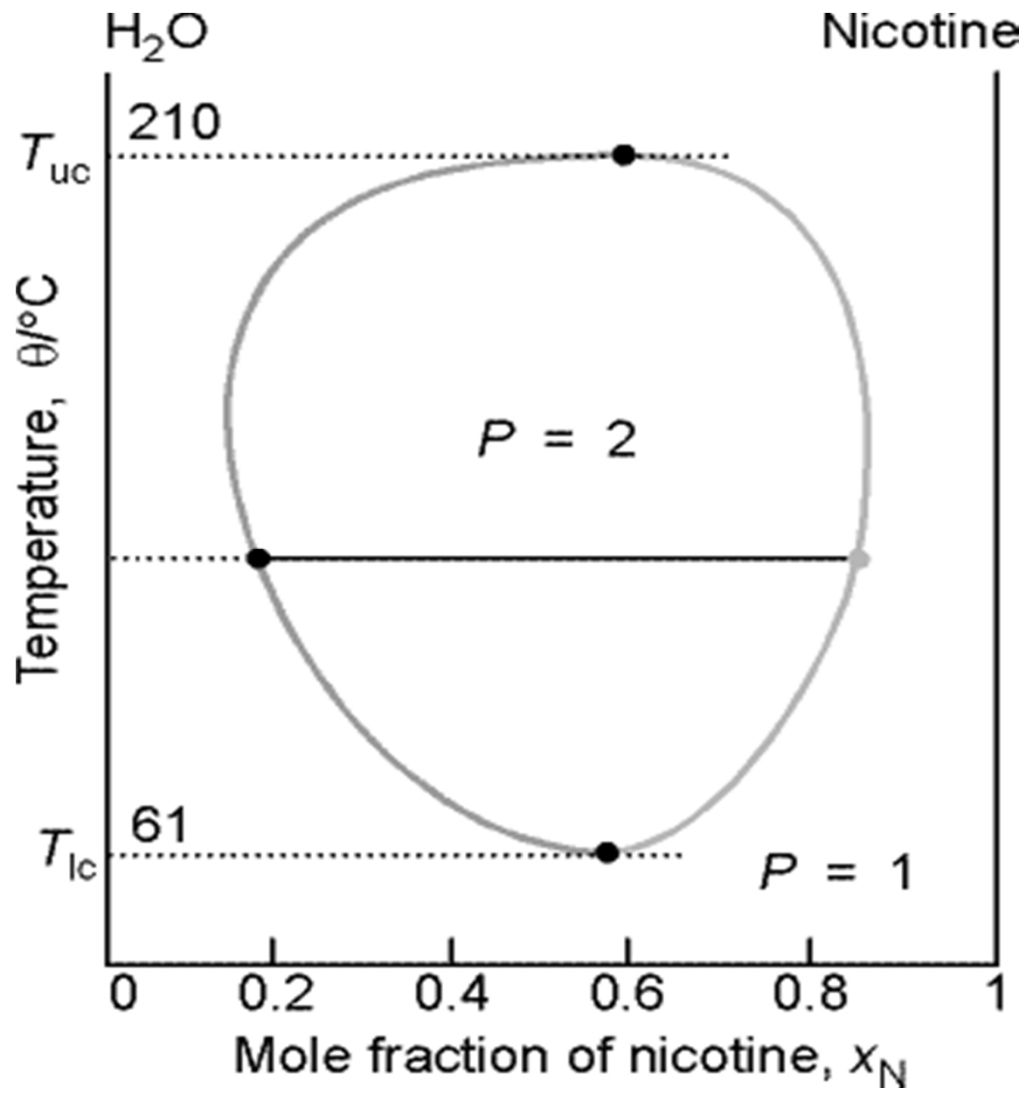
Horní kritická teplota



Omezeně mísitelné kapaliny

Voda - triethylamin

Dolní kritická teplota



Omezeně mísitelné kapaliny
Voda - nikotin

Dolní a horní kritická teplota



1															
H Hydrogen 1.008															
2					3						4				
He Helium 4.003					Li Lithium 6.941										
4				5				6				7			
Be Beryllium 9.012				B Boron 10.811				C Carbon 12.011							
7			8			9			10			11			
N Nitrogen 14.007			O Oxygen 15.999			F Fluorine 18.998			Ne Neon 20.180						
11		12		13		14		15		16		17		18	
Na Sodium 22.990		Mg Magnesium 24.305		Al Aluminum 26.982		Si Silicon 28.086		P Phosphorus 30.974		S Sulfur 32.066		Cl Chlorine 35.453		Ar Argon 39.948	
19		20		21		22		23		24		25		26	
K Potassium 39.098		Ca Calcium 40.078		Sc Scandium 44.956		Ti Titanium 47.88		V Vanadium 50.942		Cr Chromium 51.996		Mn Manganese 54.938		Fe Iron 55.847	
27		28		29		30		31		32		33		34	
Co Cobalt 58.933		Ni Nickel 58.693		Cu Copper 63.546		Zn Zinc 65.39		Ga Gallium 69.723		Ge Germanium 72.61		As Arsenic 74.922		Se Selenium 78.96	
35		36		37		38		39		40		41		42	
Br Bromine 79.904		Kr Krypton 84.80		Rb Rubidium 84.468		Sr Strontium 87.62		Y Yttrium 88.906		Zr Zirconium 91.224		Nb Niobium 92.906		Mo Molybdenum 95.94	
43		44		45		46		47		48		49		50	
Tc Technetium 98.907		Ru Ruthenium 101.07		Rh Rhodium 102.906		Pd Palladium 106.42		Ag Silver 107.868		Cd Cadmium 112.411		In Indium 114.818		Sn Tin 118.71	
51		52		53		54		55		56		57		58	
Sb Antimony 121.760		Te Tellurium 127.6		I Iodine 126.904		Xe Xenon 131.29		Cs Cesium 132.905		Ba Barium 137.327		La Lanthanum 138.905		Ce Cerium 140.115	
61		62		63		64		65		66		67		68	
Pm Promethium 144.913		Sm Samarium 150.36		Eu Europium 151.966		Gd Gadolinium 157.25		Tb Terbium 158.925		Dy Dysprosium 162.50		Ho Holmium 164.930		Er Erbium 167.26	
69		70		71		72		73		74		75		76	
Tm Thulium 168.934		Yb Ytterbium 173.04		Lu Lutetium 174.967		Hf Hafnium 178.49		Ta Tantalum 180.948		W Tungsten 183.85		Re Rhenium 186.207		Os Osmium 190.23	
77		78		79		80		81		82		83		84	
Ir Iridium 192.22		Pt Platinum 195.08		Au Gold 196.967		Hg Mercury 200.59		Tl Thallium 204.383		Pb Lead 207.2		Bi Bismuth 208.980		Po Polonium [209]	
85		86		87		88		89		90		91		92	
At Astatine 209.987		Rn Radon 222.018		Fr Francium 223.020		Ra Radium 226.025		Ac Actinium 227.028		Th Thorium 232.038		Pa Protactinium 231.036		U Uranium 238.029	
93		94		95		96		97		98		99		100	
Np Neptunium 237.048		Pu Plutonium 244.064		Am Americium 243.061		Cm Curium 247.070		Bk Berkelium 247.070		Cf Californium 251.080		Es Einsteinium [252]		Fm Fermium 257.095	
101		102		103		104		105		106		107		108	
Md Mendelevium 261		No Nobelium 269.101		Lr Lawrencium [262]		Rf Rutherfordium [261]		Db Dubnium [262]		Sg Seaborgium [266]		Bh Bohrium [264]		Hs Hassium [269]	
109		110		111		112		113		114		115		116	
Mt Meitnerium [268]		Ds Darmstadtium [268]		Rg Roentgenium [272]		Cn Copernicium [277]		Uut Ununtrium unknown		Fl Flerovium [293]		Uup Ununpentium unknown		Lv Livermorium [293]	
117		118		119		120		121		122		123		124	
Uus Ununseptium unknown		Uuo Ununoctium unknown		Uue Ununennium unknown		Uuq Unquadium unknown		Uur Unrhexium unknown		Uus Ununseptium unknown		Uuo Ununoctium unknown		Uuq Unquadium unknown	