

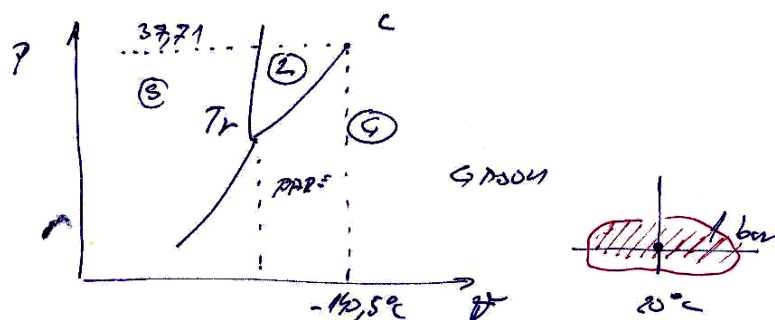
8. Vlažni gasovi

8.1 Uvod

- smeše realnog i idealnog gasa
- smeše kondenzujućeg i nekondenzujućeg gasa
- parno – gasne smeše
- najpoznatiji predstavnik – vlažan vazduh
 - smeša – (suvog) vazduha – idealnog gasa i vlage – realnog fluida
- Na primeru vlažnog vazduha
 - Jedna od komponenti, u običajenom opsegu radnih pritisaka i temperatura, ne menja agregatno stanje
 - (suv) vazduh je i sam smeša (idealnih) gasova

$$x_{N_2} = 0,78, \quad x_{O_2} = 0,21, \quad x_{Ar} = 1\%, \quad x_{CO_2} = \dots,$$

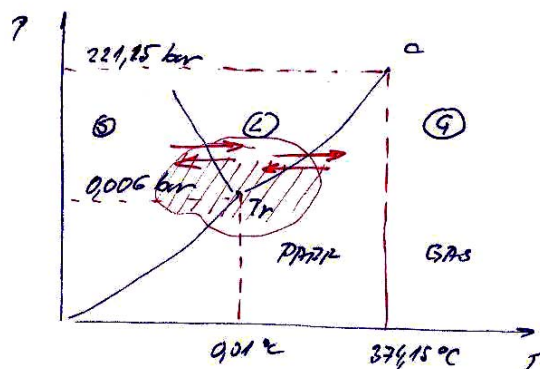
$$(v_c)_{vaz} = -140,5^\circ C, \quad (p_c)_{vaz} = 37,71 \text{ bar}$$



- vlaga (voda – vodena para), - druga komponenta „lako“ menja agregatno stanje u kondenzacionom opsegu radnihtemp. i pritisaka

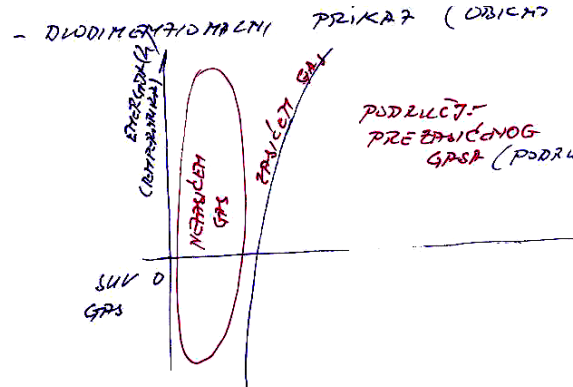
$$v_{tr} = 0,01^\circ C \quad v_c = 374,09^\circ C$$

$$p_{tr} = 0,00611 \text{ bar} \quad p_c = 221,15 \text{ bar}$$



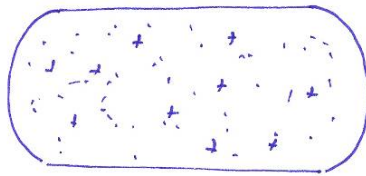
- Slično važi i za bilo koje druge kombinacije nekondenzujućih (O_2 , N_2 , CO_2) produkte sagorevanja,... i kondenzujućih (alkohol, amonijak, freon,...) gasova
- Ako je kondenzujući gas vlaga (voda-vodena para), takav gas nazivamo **vlažnim**, npr. vlažan kiseonik, vlažan azot,...

- Dvokomponentna mešavina \Rightarrow 3 stepena slobode
 - potrebno je definisati 3 veličine stanja da bi stanje vlažnog gasa bilo određeno
 - trodimenzionalni prikaz
 - dvodimenzionalni prikaz (obično $p = \text{idem}$)



8.2 Veličine stanja vlažnih gasova

- Posmatra se neki vlažan gas koji se nalazi u rezervoaru



- Masa vlažnog gasa (m_{vg}) jednaka je zbiru mase suvog gasa (m_{sg}) i mase vlage (m_{vl})

$$m_{vg} = m_{sg} + m_{vl}$$

- Po Daltonovom zakonu, pritisak smeše gasova - vlažnog gasa (p_{vg}), jednak je zbiru parcijalnih pritisaka komponenti (p_{sg}) - suvog gasa i vlage (p_{vl}) - pare (p_p)

$$p_{vg} = p_{sg} + p_{vl} = p_{sg} + p_p$$

- Svaka od komponenti, a i sama smeša rasprostiru se po čitavoj zapremini rezervoara (V_r). Zato je zapremina vlažnog gasa (V_{vg}) ista je kao i zapremina suvog gasa (V_{sg}), odnosno zapremina pare (V_p).

$$V_r = V_{vg} = V_{sg} = V_p$$

- Gasna smeša se nalazi u termičkoj ravnoteži, pa sve komponente ($T_{sg} = T_p$), kao i sama smeša imaju istu temperaturu (T_{vg}). Takođe, ukoliko usled promene temperature dođe do

izdvajanja kondenzata - tečne faze (T_l), ili pak pojave leda – čvrste faze (T_{ξ}), i dalje će sve komponente (faze) imati istu temperaturu.

$$T_{vg} = T_{sg} = T_p (= T_t = T_{\xi})$$

- Definisanje sastav vlažnog gasa

- Apsolutna vlažnost gasa

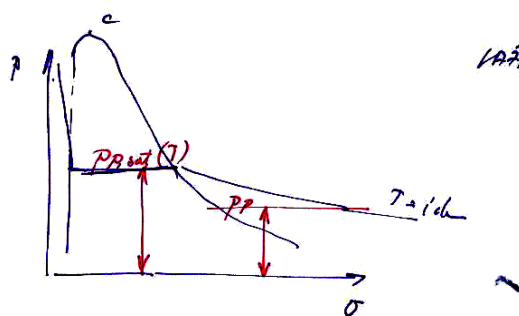
$$x = \frac{m_{vl}}{m_{sg}} = \frac{m_p + m_t + m_c}{m_{sr}} = x_p + x_t + x_c$$

$$m_{vg} = m_{sv} (1 + x)$$

- Relativna vlažnost (samo za nezasićeno područje) – udobnost, subjektivan osećaj vlažnosti

$$\varphi = \left(\frac{m_{vl}}{(m_{vl})_{\max}} \right)_T = \left(\frac{m_p}{(m_p)_{\max}} \right)_T = \frac{\frac{p_p V}{R_p T}}{\frac{p_{p,\text{sat}} V}{R_p T}} = \left(\frac{p_{p,\text{sat}}}{p_{p,\text{sat}}} \right)_T$$

$$p_{p,\text{sat}} = f(T) \quad \text{samo od } T!!!$$



LAŽNO!
 $\underline{p_{p,\text{sat}} = f(T)}$
 samo od $T!!!$

- Između apsolutna i relativne vlažnosti vlažnog gasa u nezasićenom području postoji međusobna zavisnost.
 - Predpostavka – ponašanje i kondenzujućeg i ne kondenzujućeg gas može se opisati jednačinom stanja idealnog gasa

$$p_p V = m_p R_p T \quad \text{i} \quad p_{sv} V = m_{sg} R_{sg} T$$

- Apsolutna vlažnost vlažnog gasa

$$x = \frac{m_p}{m_{sg}} = \frac{\frac{p_p V}{R_p T}}{\frac{p_{sg} V}{R_{sg} T}} = \frac{M_p}{M_{sg}} \frac{p_p}{p_{sg}} = \frac{M_{H_2O}}{M_{sg}} \frac{\varphi \cdot p_{p,\text{sat}}}{p - \varphi \cdot p_{p,\text{sat}}}$$

- Molarna masa vode i molarana masa najčešćeg suvog gasa – suvog vazduha

$$M_{H_2O} = 18,016 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol} \text{ i } M_{sv} = 28,964 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

pa je za vlažan vazduh

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{p,\text{sat}}(T)}{p - \varphi \cdot p_{p,\text{sat}}(T)}$$

- Gustina nezasićenog vlažnog gasa

$$\rho_{vg} = \frac{m_{vg}}{V_{vg}} = \frac{m_{sg} + m_p}{V_{vg}} = \rho_{sv} + \rho_p \quad \text{ili} \quad \rho_{vg} = \frac{m_{sg}}{V_{sg}}(1 + x_p) = \rho_{sg}(1 + x_p)$$

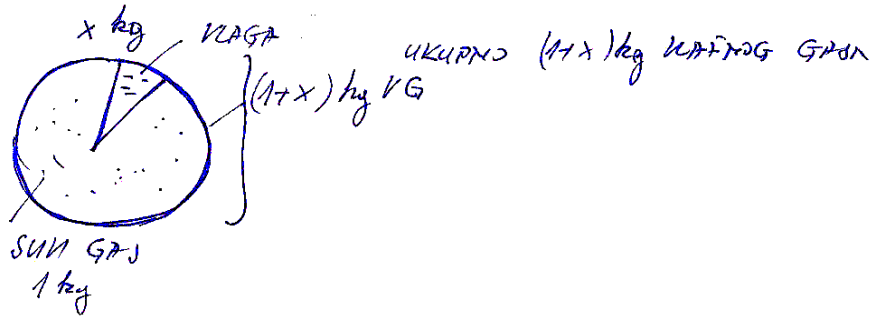
- Entalpija vlažnog gasa

$$H_{vg} = H_{sg} + H_{vl} \quad / : m_{sg}$$

$$\frac{H_{vg}}{m_{sg}} = \frac{m_{sg} \cdot h_{sg}}{m_{sg}} + \frac{m_{vl} \cdot h_{vl}}{m_{sg}} = h_{sg} + x h_{vl}$$

Specifična entalpija vlažnog gasa (svedena na 1 kg suvog gasa ili vlažnog gasa)

$$h_{1+x} = h_{sg} + x h_{vl} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg SG}} \right] \quad \text{ili} \quad \left[\frac{\text{kJ}}{(1+x)\text{kg VG}} \right]$$



8.3 Vlažan vazduh

- Važe sve relacije kao i za svaki drugi vlažan gas
- Indeksi – suv gas (sg) prelazi u suv vazduh (sv), vlažan gas (vg) u vlažan vazduh (vv), npr.

$$m_{sg} \rightarrow m_{sv} \quad m_{vg} + m_{vv} \Rightarrow$$

- Masa vlažnog vazduha

$$m_{vv} = (1 + x) m_{sv}$$

- Pritisak vlažnog vlažnog

$$p_{vv} = p_{sv} + p_p$$

- Zapremima vlažnog vazduha, suvog vazduha i pare

$$V_{vv} = V_{sv} = V_p$$

- Temperatura vlažnog vazduha, suvog vazduha i pare

$$T_{vv} = T_{sv} = T_p$$

- Apsolutna vlažnost vlažnog vazduha

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{p,sat}(\vartheta)}{p - \varphi \cdot p_{p,sat}(\vartheta)}$$

- Relativna vlažnost vlažnog vazduha

$$\varphi = \left(\frac{p_p}{p_{p,sat}} \right)_{\vartheta}$$

8.3.1 Entalpija vlažnog vazduha

- po zonama u zavisnosti od stanja vlage

1. Nezasićen vlažan vazduh – I zona

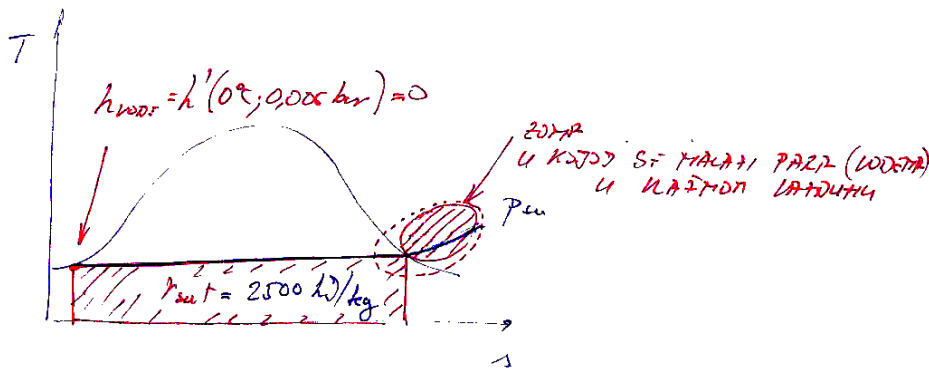
$$h_{1+x} = \underbrace{h_{sv}}_{\text{idealn gas}} + \underbrace{x \cdot h_{vl}}_{\text{realan gas - para}}$$

- Prema dogovoru entalpija vode pri $\vartheta_{tr} = 0,01^\circ\text{C} \approx 0$, $p_{tr} = 611,2 \text{ Pa}$ je jednaka nuli

$$h_{vode} = 0 \text{ kJ/kg}$$

- U zoni veoma niskih pritisaka svaki realni gas ponaša se kao idealan. To ujedno znači i linearnu vezu između entalpije i temperature gasa, pa se entalpija vodene pare pri tako niskim pritiscima može računati preko izraza

$$h_p = r_{sat} + c_{p,vp} \cdot \vartheta$$



Toplota promene faze na $p_{tr} \approx 611,2 \text{ Pa}$ ($\vartheta_{tr} = 0,01^\circ\text{C} \approx 0$) iznosi

$$r_{sat} = 2501,3 \text{ kJ/kg} \approx 2500 \text{ kJ/kg}$$

a pri malim pritiscima, specifični toplotni kapacitet vodene pare približno stalan, to jest ima približno nepromenjivu vrednost

$$c_{p,vp} \approx 1,86 \text{ kJ/(kg K)},$$

pa se entalpija vlažnog vazduha

$$h_{1+x,sat} = c_{p,sv} \cdot \vartheta + \underbrace{x \cdot (r_{sat} + c_{p,vp} \cdot \vartheta)}_{\text{entalpija vode-vodene pare}}$$

može izračunati iz

$$h_{1+x} = 1 \cdot \vartheta + x \cdot (2500 + 1,86 \cdot \vartheta)$$

2. Linija zasićenja– II –zasićen vlažan vazduh

- Za vazduh zasićen vlagom $\varphi = 1$ ($x \rightarrow x_{\text{sat}}$), entalpija se određuje kao

$$h_{1+x,\text{sat}} = c_{p,\text{sv}} \cdot \vartheta + x \cdot (r_{\text{sat}} + c_{p,\text{vp}} \cdot \vartheta)$$

$$h_{1+x,\text{sat}} = 1 \cdot \vartheta + x_{\text{sat}} \cdot (2500 + 1,86 \cdot \vartheta)$$

3. Područje obične magle – prezasićen vlažan vazduh –III zona

- Vlažan vazduh, temperature veće od $\vartheta = 0^\circ\text{C}$, prezasićen vlagom. Ona se u njemu nalazi u vidu molekula vode (u maksimalno mogućoj koncentraciji ($x_p = x_{\text{sat}}$)) i u molarnom obliku (sitne lebdeće kapljice vode – magla)

$$h_{1+x} = c_{p,\text{sv}} \cdot \vartheta + \underbrace{x_{\text{sat}} \cdot (r_{\text{sat}} + c_{p,\text{vp}} \cdot \vartheta)}_{\text{molekule vode - para}} + \underbrace{x_t \cdot c_{p,t} \cdot \vartheta}_{\text{kapljice vode - magla}}$$

$$x_t = x - x_{\text{sat}}$$

$$c_{p,t} = 4,186 \text{ kJ/(kg K)}$$

$$h_{1+x} = 1 \cdot \vartheta + x_{\text{sat}} (2500 + 1,86 \cdot \vartheta) + x_t 4,186 \cdot \vartheta$$

4. Područje susnešne magle – prezasićen vlažan vazduh – IV zona

- Vlažan vazduh, temperature jednake $\vartheta = 0^\circ\text{C}$, prezasićen vlagom. Ona se u njemu nalazi u vidu molekula vode (u maksimalno mogućoj koncentraciji ($x_p = x_{\text{sat}}$)) i u molarnom obliku (i sitne lebdeće kapljice vode – x_t , i sitni lebdeći kristali leda – ledena magla – $x_{\check{c}}$)

$$h_{1+x} = c_{p,\text{sv}} \cdot \vartheta + \underbrace{x_{\text{sat}} \cdot (r_{\text{sat}} + c_{p,\text{vp}} \cdot \vartheta)}_{\text{molekule vode - para}} + \underbrace{x_t \cdot c_{p,t} \cdot \vartheta}_{\text{kapljice vode - magla}} + \underbrace{x_{\check{c}} \cdot (-r_{\text{liq}} + c_{p,\text{sol}} \cdot \vartheta)}_{\text{kristali leda - ledena magla}}$$

susnežna magla

Kako je $\vartheta = 0^\circ\text{C}$

$$h_{1+x} = \cancel{c_{p,\text{sv}} \cdot \vartheta} + x_{\text{sat}} \cdot (\cancel{r_{\text{sat}}} + \cancel{c_{p,\text{vp}} \cdot \vartheta}) + \cancel{x_t \cdot c_{p,t} \cdot \vartheta} + x_{\check{c}} \cdot (\cancel{-r_{\text{liq}}} + \cancel{c_{p,\text{sol}} \cdot \vartheta})$$

$$h_{1+x} = r_{\text{sat}} \cdot x_{\text{sat}} - r_{\text{liq}} \cdot x_{\check{c}}$$

Specifični toplotni kapacitet leda

$$c_{p,\text{sol}} = c_{p,\text{leda}} = 2,04 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

Toplota očvršćavanja (toploenja) leda

$$r_{\text{liq}} = r_{\check{c}} = 332,4 \text{ kJ/kg}$$

Specifična entalpija vlažnog vazduha u području susnežne magle

$$h_{1+x} = 2500 \cdot x_{\text{sat}} - 332,4 \cdot x_{\check{c}}$$

$$x = x_{\text{sat}} + x_t + x_{\check{c}}$$

5. Područje ledene magle – prezasićen vlažan vazduh – V zona

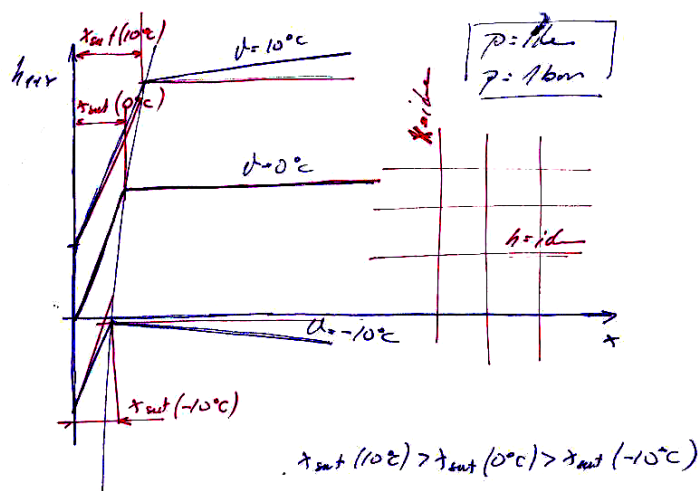
- Vlažan vazduh, temperature manje od $\vartheta < 0^\circ\text{C}$, prezasićen vlagom. Ona se u njemu nalazi u vidu molekula vode (u maksimalno mogućoj koncentraciji ($x_p = x_{\text{sat}}$)) i u molarnom obliku (sitni lebdeći kristali leda – ledena magla – x_ξ)

$$h_{1+x} = c_{p,\text{sv}} \cdot \vartheta + \underbrace{x_{\text{sat}} \cdot (r_{\text{sat}} + c_{p,\text{vp}} \cdot \vartheta)}_{\text{molekule vode - para}} + \underbrace{x_\xi \cdot (-r_{\text{liq}} + c_{p,\text{sol}} \cdot \vartheta)}_{\text{kristali leda - ledena magla}}$$

$$h_{1+x} = 1 \cdot \vartheta + x_{\text{sat}} \cdot (2500 + 1,86 \cdot \vartheta) + x_\xi \cdot (-332,4 + 2,04 \cdot \vartheta)$$

8.3.2 Molierov (Mollier) kosougli $h_{1+x} - x$ dijagram za vlažan vazduh

- ucrtavanje izoterma – definisanje zona)



1. Nezasićen vlažan vazduh

Entalpija

$$h_{1+x} = 1 \cdot \vartheta + x(2500 + 1,86 \cdot \vartheta)$$

- Izoterma $\vartheta = 0^\circ\text{C}$

$$(h_{1+x})_{\vartheta=0} = 2500 \cdot x$$

$$(\text{tg} \alpha)_{\vartheta=0} = \left(\frac{\partial h_{1+x}}{\partial x} \right)_{\vartheta=0} = 2500$$

- Izoterma $\vartheta = 10^\circ\text{C}$

$$(h_{1+x})_{\vartheta=10^\circ\text{C}} = 10 + x \cdot 2518$$

$$(\text{tg} \alpha)_{\vartheta=10^\circ\text{C}} = 2518$$

- Izoterma $\vartheta = -10^\circ\text{C}$

$$(h_{1+x})_{\vartheta=-10^\circ\text{C}} = -10 + 2481 \cdot x$$

$$(\text{tg} \alpha)_{\vartheta=-10^\circ\text{C}} = 2481$$

- Apsolutna vlažnost

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{p,\text{sat}}(\vartheta)}{p - \varphi \cdot p_{p,\text{sat}}(\vartheta)} \Rightarrow$$

$$\text{za } \vartheta_1 > \vartheta_2 \quad \Rightarrow \quad p_{\text{sat}_1} > p_{\text{sat}_2} \quad \Rightarrow \quad x_{\text{sat}_1} > x_{\text{sat}_2}$$

2. Linija zasićenja

3. Područje obične magle – III zona

Entalpija

$$h_{1+x} = 1 \cdot \vartheta + x_{\text{sat}} \cdot (2500 + 1,86 \cdot \vartheta) + x_t \cdot 4,186 \cdot \vartheta$$

- Izoterma $\vartheta = 0^\circ\text{C}$

$$\left(\frac{\partial h_{1+x}}{\partial x_t} \right)_{\vartheta=0^\circ\text{C}} = 0$$

- Izoterma $\vartheta = 10^\circ\text{C}$

$$\left(\frac{\partial h_{1+x}}{\partial x_t} \right)_{\vartheta=10^\circ\text{C}} = 41,86$$

- Izoterma $\vartheta = -10^\circ\text{C}$

•

$$\left(\frac{\partial h_{1+x}}{\partial x_t} \right)_{\vartheta=-10^\circ\text{C}} = -41,86$$

- uska zona nezasićenog područja u dijagramu
- prelazi sa pravouglog na kosougli dijagram

