

Zavod za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku

Katedra za tehničku termodinamiku

# **Tehnički procesi sušenja**

Doc.dr.sc. Saša Mudrinić

# Ishlapljivanje

Ishlapljivanje je pretvorba iz **kapljevito** u **plinovito** agregatno stanje uz **prisutnost** jednog ili više sudionika u plinovitom agregatnom stanju.

Strujanje vlažnog zraka preko čiste vodene površine ili preko vlažnog poroznog tijela  $\Rightarrow$  ishlapljivanje ( $p_s > p_d$ )

$p_s$  - parcijalni tlak vodene pare neposredno uz vodenu površinu

$p_d$  - parcijalnog tlaka vodene pare u struji vlažnog zraka podalje od slobodne površine

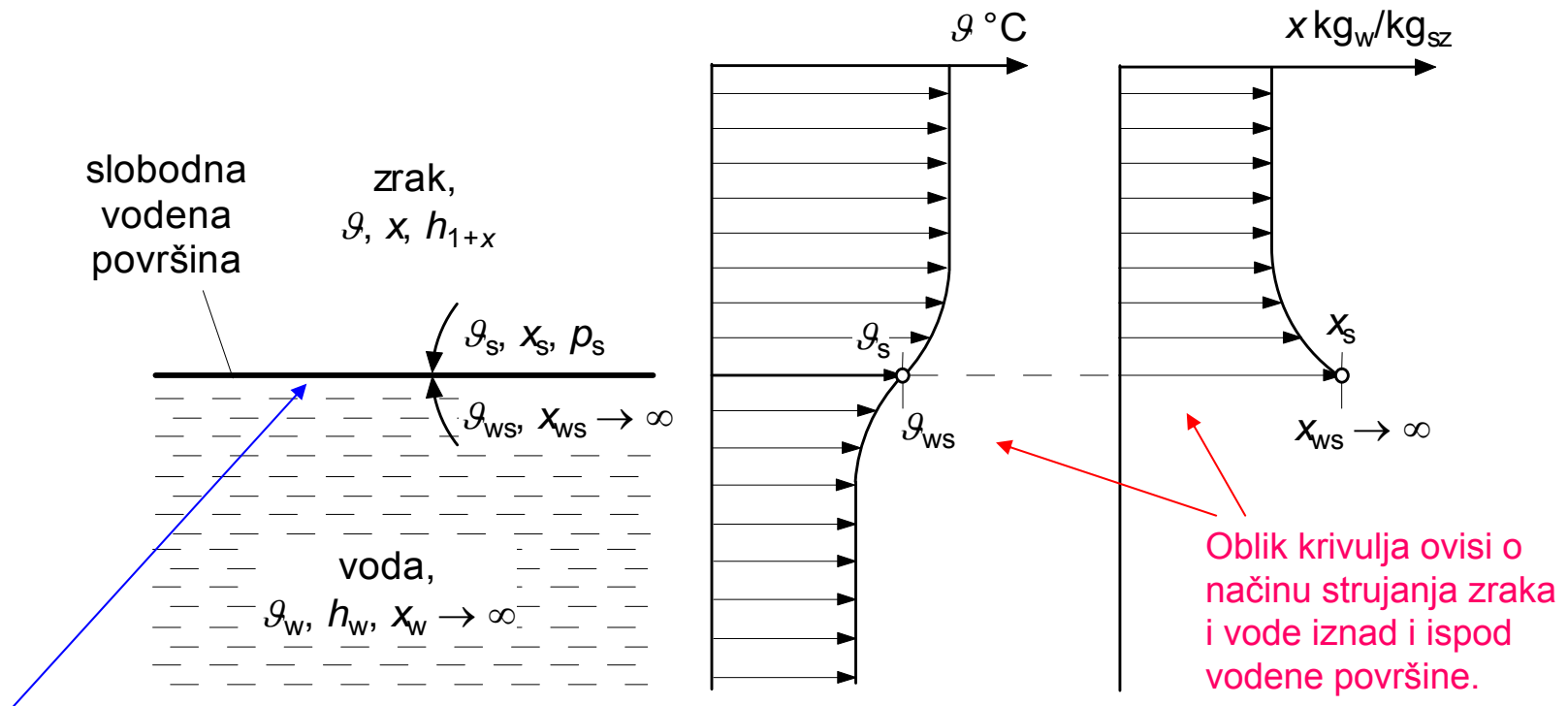
Tijekom ishlapljivanja, paralelno prijenosu mase (ishlapljene vlage) odvija se i prijenos topline.

Prijenos mase, kao i prijenos topline, podliježu **sličnim** zakonima.

Veći intenzitet ako je  $p_s \gg p_d$ ,  $\mathcal{G} \gg \mathcal{G}_s$

**Rošenje** je prijenos mase u suprotnom smjeru, tj. iz vlažnog zraka prema slobodnoj vodenoj površini.

Javlja se ako je  $p_d > p_s$ .



Neposredno iznad i ispod vodene površine formiraju se laminarni granični slojevi.

Prijenos topline provođenjem, a mase difuzijom.

Prilike u blizini slobodne vodene površine

# Osnovne bilance tvari i energije

Matematički model:

1. odabir osnovnog **infinitezimalnog volumena** u uređaju
2. postavljanje **osnovnih bilanci tvari i energije** za sve sudionike

Intenzitet interakcije među sudionicima određuje brzinu promjene stanja sudionika.

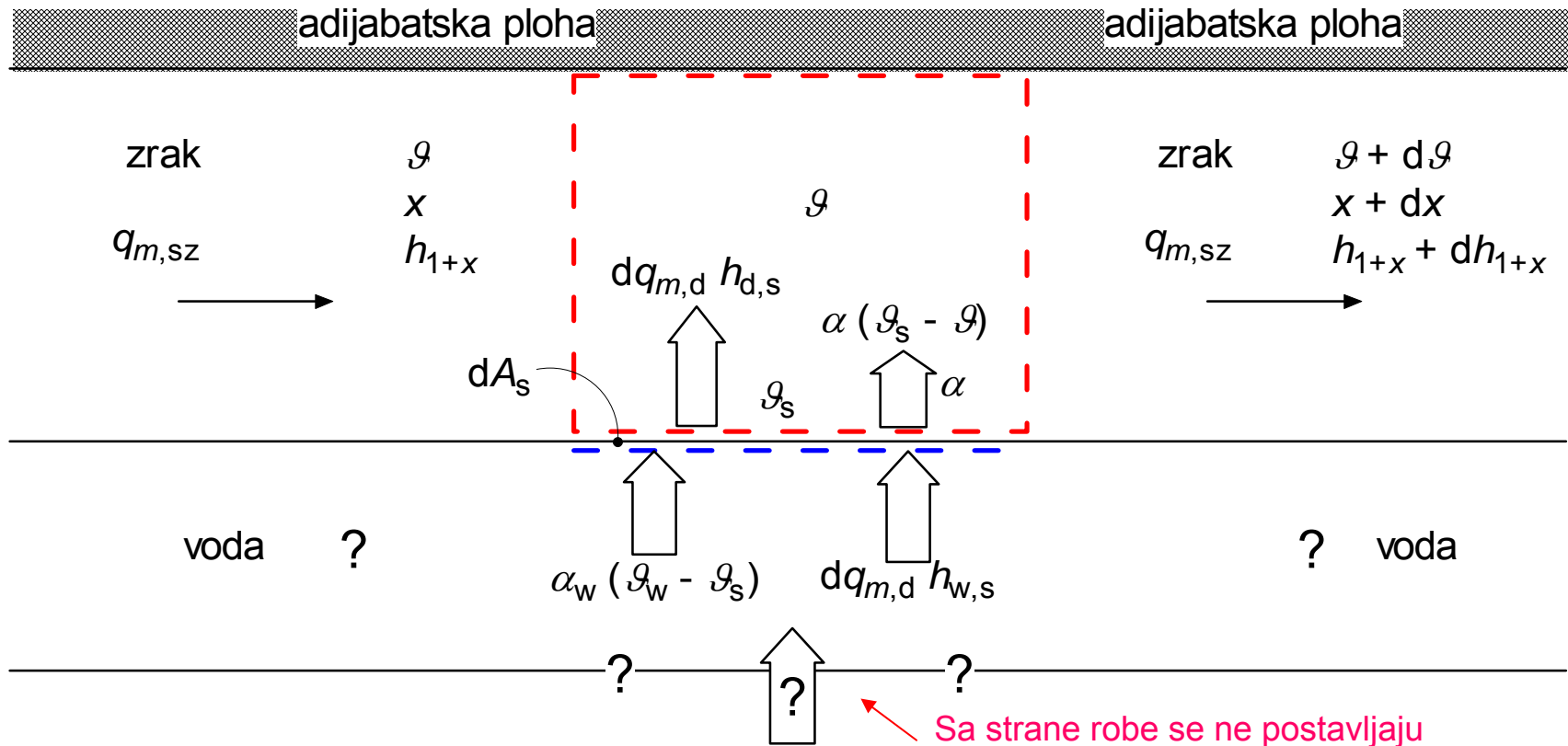
**Intenzitet ishlapljivanja** na dodirnoj površini vode sa zrakom opisan je **Lewisovim** zakonom:

$$dq_{m,d} = -dq_{m,w} = \sigma(x_s - x)dA_s$$

$dq_{m,d}$  - brzina povećanja sadržaja vlage u zraku

$dq_{m,w}$  - brzina smanjenja mase vode u robu

$\sigma$ , kg/(m<sup>2</sup> s) - koeficijent ishlapljivanja  $\Rightarrow$  masa zraka koji u 1 s dostruji na 1 m<sup>2</sup> slobodne vodene površine i tamo se zasiti na  $x_s$ , odvedeći pri tome s vodene površine  $dq_{m,w}$ , kg/s, vode



Osnovni (infinitenzimalni) element volumena na kojem se postavljaju bilance tvari i energije



## Bilance mase u struji zraka

Bilanca mase suhog zraka:

$$q_{m,sz} = q_{m,sz}$$

Bilanca mase vlage u zraku:

$$\text{ulaz : } q_{m,sz}x + dq_{m,d}$$

$$\text{izlaz : } q_{m,sz}(x + dx)$$

iz čega slijedi, uz **Lewisov** zakon:

$$q_{m,sz} dx = \sigma(x_s - x)dA_s$$

# Bilanca energije u struji zraka

Bilanca energije (prvi glavni stavak) svodi se na:

- izmjenu **toplinskog toka** kroz razdjelnu plohu voda-zrak
- na transport **entalpije tvari** koje ulaze ili izlaze kroz opne promatranog elementa.

Promjene **ostalih oblika energije** nema.

U promatrani sustav zrak **ulazi** s entalpijom:

$$q_{m,sz} h_{1+x} + dq_{m,d} h_{d,s} + \alpha(\mathcal{G}_s - \mathcal{G})dA_s$$

a **izlazi** s entalpijom:

$$q_{m,sz} (h_{1+x} + dh_{1+x})$$

Granica sustava tik uz dodirnu plohu voda-zrak (na strani zraka)

ulaz

➤ suhozasićena vodena para temperature  $\vartheta_s$  sa specifičnom entalpijom  $h_{d,s}$

➤ toplinski tok konvekcijom (ako je  $\vartheta_s > \vartheta$ ) kroz granični sloj na strani zraka (s koeficijentom konvektivnog prijelaza topline  $\alpha$ ):

$$q_{m,SZ} dh_{1+x} = \alpha(\vartheta_s - \vartheta) dA_s + dq_{m,d} h_{d,s} = \alpha(\vartheta_s - \vartheta) dA_s + q_{m,SZ} dx h_{d,s}$$

Granica sustava tik uz dodirnu plohu voda-zrak (na strani vode)

ulaz

➤ kapljevita voda koja će upravo ishlapiti (masenog protoka  $-dq_{m,w} = dq_{m,d}$ ) temperature  $\vartheta_s$  sa specifičnom entalpijom  $h_{w,s}$ , a također ulazi,

➤ toplinski tok konvekcijom (ako je  $\vartheta_w > \vartheta_s$ ) kroz granični sloj na strani vode (s koeficijentom konvektivnog prijelaza topline  $\alpha_w$ ):

$$\text{ulaz : } q_{m,sz} h_{1+x} - dq_{m,w} h_{w,s} + \alpha_w (\vartheta_w - \vartheta_s) dA_s$$

$$\text{izlaz : } q_{m,sz} (h_{1+x} + dh_{1+x})$$

Sređivanjem se dobiva:

$$q_{m,sz} dh_{1+x} = \alpha_w (\mathcal{G}_w - \mathcal{G}_s) dA_s - dq_{m,w} h_{w,s} = \alpha_w (\mathcal{G}_w - \mathcal{G}_s) dA_s + q_{m,sz} dx h_{w,s}$$

Zbog jednakosti lijevih strana jed. (4-3) i (4-4), jednake su i njihove desne strane:

$$\alpha_w (\mathcal{G}_w - \mathcal{G}_s) dA_s + q_{m,sz} dx h_{w,s} = \alpha (\mathcal{G}_s - \mathcal{G}) dA_s + q_{m,sz} dx h_{d,s}$$

Sređivanjem i uvođenjem **Lewisovog** zakona dobiva se:

$$\alpha_w (\mathcal{G}_w - \mathcal{G}_s) = \alpha (\mathcal{G}_s - \mathcal{G}) + \sigma (x_s - x) (h_{d,s} - h_{w,s})$$

Gornja jednačba može se malo preraditi:

$$\alpha_w (\mathcal{G}_w - \mathcal{G}_s) = \alpha (\mathcal{G}_s - \mathcal{G} - \mathcal{G}_w + \mathcal{G}_w) + \sigma (x_s - x_d) (h_{d,s} - h_{w,s})$$

$$(\alpha_w + \alpha) (\mathcal{G}_w - \mathcal{G}_s) = \alpha (\mathcal{G}_w - \mathcal{G}) + \sigma (x_s - x_d) (h_{d,s} - h_{w,s})$$

i pomnožiti s  $c_p / \alpha$  tako da se dobije:

$$c_p (\mathcal{G}_w - \mathcal{G}_s) = \frac{\alpha}{\alpha_w + \alpha} \left[ c_p (\mathcal{G}_w - \mathcal{G}) + \frac{\sigma c_p}{\alpha} (x_s - x_d) (h_{d,s} - h_{w,s}) \right]$$

U gornjoj jednadžbi pojavljuje se bezdimenzijski **Lewisov** broj:

$$Le = \frac{\sigma c_p}{\alpha}$$

koji je određen vrlo zamršenim pojavama izmjene tvari i topline u koncentracijskom i temperaturnom graničnom sloju.



# Adijabatska granica hlađenja

Ako je  $(\mathcal{G}_w - \mathcal{G}_s) = 0$ , tj.  $\mathcal{G}_w = \mathcal{G}_s = \mathcal{G}_{sH}$ , iz jednačbe slijedi:

$$c_p (\mathcal{G} - \mathcal{G}_{sH}) = \frac{\sigma c_p}{\alpha} (x_{sH} - x) (h_{d,sH} - h_{w,sH})$$

Taj odnos mora biti zadovoljen da bi temperatura vode **bila stalna u vremenu**.

Suštinski to znači da temperatura vode mora biti toliko niža od temperature zraka da zrak može **konvekcijom** predati površini vode taman toliko topline koliko se potroši za ishlapljivanje vode koje je određeno razlikom  $(x_{sH} - x)$ .

Ako je voda **toplija** od granice hlađenja,  $\mathcal{Q}_w > \mathcal{Q}_{sH}$ , razlika  $(\mathcal{Q} - \mathcal{Q}_s)$  je manja pa zrak konvekcijom predaje manje topline vodi od te ravnotežne količine, a istodobno je razlika  $(x_s - x)$  veća pa se intenzivnijim ishlapljivanjem troši više topline.

Razlika se namiruje iz entalpije vode i zato se njena temperatura **snižava**.

Slično ali suprotno događa se ako je temperatura vode **niža** od granice hlađenja – tada postoji višak konvektivno dovedene topline od zraka prema površini vode, a manje se troši za ishlapljivanje pa temperatura vode počne **rasti** sve dok se opet ne izjednače toplina potrošena za ishlapljivanje i toplina dovedena površini konvekcijom.