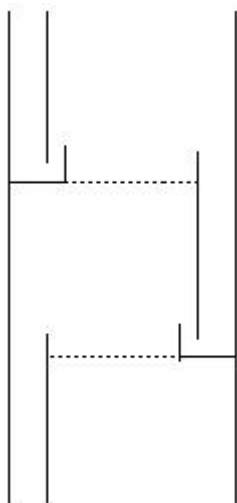


## 8.2 Kolone

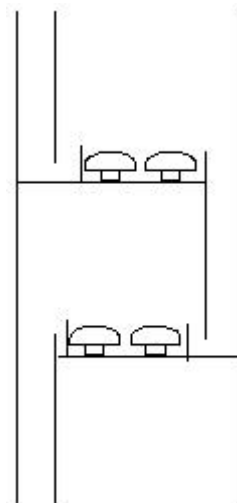
Kolone so najbolj značilen del destilacijske naprave. Po obliki delimo rektifikacijske kolone v kolone s polnilom in v kolone s prekatni.

Kolone s polnilom so stoječi ozki in visoki valji, napolnjeni z inertnim polnilom. Polnilo omaka tekoča faza in je tako mokra površina polnila tisto mesto, kjer poteka snovni prenos med obema fazama, refluxom in hlapi. Poleg tega nam polnilo povzroči povečanje medfazne površine. Pri rektifikaciji jih uporabljamo le za lahko ločljive zmesi in za majhne zmogljivosti.

Najbolj tipična predstavnika prekatnih kolon sta kolona s siti (slika 8.10) in kolona z zvonci (slika 8.11).



Slika 8.11. Prekatna kolona s siti.



Slika 8.12. Prekatna kolona z zvonci.

Kolone s siti so stoječi visoki valji, ki so v notranjosti v enakomernih razmikih pregrajeni s paralelnimi horizontalnimi ploščami z odprtini, ki imajo v razmikih 12 do 50 mm ena od druge premer 6 do 12 mm. Refluks se pretaka na prekatu povprek, s prekata na prekat pa po pretočnih ceveh, ki so na sosednjih prekatih nameščene diametralno. Cevi segajo nekaj cm nad ravnino plošče, da zajezijo refluks na prekatu, s spodnjim koncem pa so potopljene v tekočino na sosednjem spodnjem prekatu. Hlapi prehajajo kolono v obrat smeri in so na vsakem prekatu prisiljeni, da gredo skozi odprtine v sitih in skozi sloj refluksa v obliki mehurčkov, kar povzroči turbulenco v tekočini in omogoči veliko stično površino med fazama, potrebno za učinkovit snovni prenos. Sita morajo ležati popolnoma vodoravno, pa tudi tlak hlapov mora biti dovolj velik, da ne odteče refluks skozi odprtine.

Kolone z zvonci se razlikujejo od kolon s siti po tem, da imajo horizontalne plošče manj odprtin, zato pa širše, nanje pa so pritrjeni kratki, pokončni cevi nastavki s poveznjenim zvoncem. Zvonec je na robu nazobčan ali pa ima o robu ozke reže. Hlapi prihajajo na prekat skozi odprtine in cevni nastavek, obrnejo pod zvoncem smer in prehajajo refluks v obliki mehurčkov skozi reže ali presledke med zobmi ob robu zvonca. Kolone z zvonci so manj občutljive od kolon s siti, so pa za isto zmogljivost dražje.

Rektifikacijske kolone imajo premer od 0,3 do 9 m in več, višino tudi čez 40 m in 15 do 90 cm razmika med prekatni.

**Padec tlaka v koloni**

Zvezo za napoved padca tlaka v koloni nam kaže naslednja enačba:

$$\Delta P = C \cdot \rho_v \cdot v_v^2 \quad (8.30)$$

V enačbi 8.30 predstavlja parameter C odvisnost od vrste polnila in ga lahko poiščemo v ustrezni literaturi npr. Perry's CEH.

Uvedemo še masni fluks plinske faze:

$$G = \rho_v \cdot v_v \quad (8.31)$$

Na grafu  $\log \Delta P$  v odvisnosti od  $\log G$  lahko določimo poplavno točko, kjer pride do zalitja kolone, to pomeni, da se tekočina zadržuje na polnilnih telesih in tako povzroči, da naprava ne more obratovati. To se zgodi pri povečevanju toka plinske in tekoče faze. Tako se imenuje hitrost, pri kateri pride do zalitja, maksimalna ali poplavna hitrost. Obratovanje pa je zaželeno pri hitrost med 50 (snovi, ki se penijo) in 70 % maksimalne hitrosti. To nam zagotavlja optimalno obratovanje kolone. Tudi ti podatki se dobijo v priročnikih, kakršen je Perry's CEH.

**Polnilo**

Pri polnilih nas zanima vpliv tlaka na kapaciteto in selektivnost.

Znižanje tlaka povzroči boljšo ločbo oziroma izboljša selektivnost. Medtem ko pa znižanje tlaka povzroči znižanje kapacite.

$$\Delta P = C \rho_v v_v^2 \quad | \rho$$

$$\rho \cdot \Delta P = C \rho_v^2 v_v^2$$

$$P \Delta P = C' G^2, \text{ kjer je } G = \rho_v v_v \text{ in } \rho_v = \frac{PM}{RT}$$

velja, da sta temperatiri enaki in tako tudi tlačni diferenci

$$P_1 \Delta P = C' G_1^2 \text{ in } P_2 \Delta P = C' G_2^2 \Rightarrow \frac{G_1}{G_2} = \sqrt{\frac{P_1}{P_2}}$$

$$P \downarrow \Rightarrow G \downarrow$$

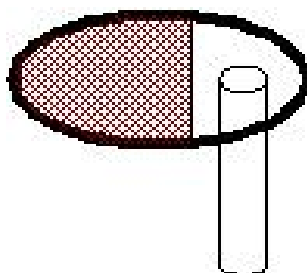
**Dimenzioniranje rektifikacijskih kolon s polnilom**

Višino kolone s polnilom, ki je potrebna za zahtevani rektifikacijski učinek, izračunamo navadno tako, da pomnožimo število teoretičnih prekatov, ki bi jih za enak učinek zahtevala kolona s prekati, z nekim empiričnim faktorjem. Ta faktor se imenuje višinski ekvivalent teoretičnega prekata (HETP) in pove učinkovitost kolone s polnilom. Če ga za dane razmere ne moremo dobiti v literaturi, ga je treba določiti s poskusom:

$$\text{HETP} = \frac{\text{potrebna višina kolone s polnilom}}{\text{število potrebnih teoretičnih prekatov}} \quad (8.32)$$

**Prekati**

Prekati so plošče, ki imajo perforacije (s premerom 2 – 3 mm) in padalne cevi. Prekat je predstavljen na sliki 8.13.



Slika 8.13. Prekat.

Tok, ki teče po kolonah, je lahko:

- čepast (PFR) v kolonah s premerom nad 0,3 m
- povratno mešalni (CSTR) v kolonah s premerom pod 0,3 m.

Za načrtovanje kolon s prekati lahko uporabimo graf  $P_F$  v odvisnosti od  $P_L$ , ki ga dobimo v ustrezni literaturi:

- $P_F$  pomeni parameter toka (flow parameter)

$$P_F = \frac{L}{V} \cdot \left( \frac{\rho_L}{\rho_V} \right)^{0,5} \quad (8.33)$$

- $P_L$  pomeni parameter kapacitete (capacity parameter)

$$P_L = v_{g, \max} \cdot \left( \frac{\rho_V}{\rho_L - \rho_V} \right)^{0,5} \quad (8.34)$$

Na grafu imamo označene različne razdalje med prekati (tray spacing), za katere dobimo različne krivulje  $P_F$  v odvisnosti od  $P_L$ . Tako lahko določamo:

- če imamo podane parametre kolone (razdalja med prekati, maksimalna hitrost plinske faze, gostote), lahko izračunamo  $L/V$
- če pa dimenzioniramo napravo, pa lahko določimo razdaljo med prekati in maksimalno hitrost (poplavno hitrost).

**Učinkovitost prekatov**

Za prekate se izračuna učinkovitost po enačbi 8.35:

$$E = \frac{n_t}{n_p} = \frac{\text{število teoretičnih prekatov}}{\text{število praktičnih prekatov}} \quad (8.35)$$

Podatke za učinkovitost  $E$  dobimo iz literature, pilotne naprave, od proizvajalca opreme...

Poleg te učinkovitosti pa poznamo še Murprejevo učinkovitost, ki je definirana kot:

$$E_M = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}} \quad (8.36)$$

kjer je  $y_n^*$  ravnotežna koncentracija k  $x_n$ .

**Računski primer:**

Zmes benzen – toluen, ki vsebuje 40 % benzena, ločujemo z namenom, da pridobimo 99 % destilat in 1 % ostanek. Zmes uvajamo v kolono pri temperaturi vrelišča. Refluksno razmerje je  $1,5 R_{\min}$ . Koliko prekatov na koloni potrebujemo, če je učinkovitost prekata 0,6. Izračunaj presek in premer kolone za 1 mol/s destilata? V okolici je normalen zračni tlak. Padec tlaka na posamezni prekat je 5 mbar. Koliko znašajo toplotni tokovi v grelniku (uparjalniku) in kondenzatorju? Koliko znaša potrebna površina za izmenjavo toplote? Kakšen naj bo tlak in dotok nasičene pare v uparjalniku? Kakšen naj bo pretok hladilne vode v kondenzatorju, ki se lahko segreje od 15 do 30°C?

MB:

$$F = D + B; \quad F x_F = D x_D + B x_B \Rightarrow F = 2,51 \text{ mol/s}, B = 1,51 \text{ mol/s}$$

Konfiguracija  $n_t$  (Shortcut metoda)

$$R_{\min} = \frac{1}{\alpha - 1} \left( \frac{x_D}{x_F} - \frac{\alpha(1 - x_D)}{1 - x_F} \right) = 1,8 \Rightarrow R = 2,7$$

$$n_{t,\min} + 1 = \frac{\log \frac{x_D(1 - x_B)}{x_B(1 - x_D)}}{\log \alpha} = 9,7$$

+ Robinson Gillilandov diagram

$$\frac{R - R_{\min}}{R + 1} = 0,243; \quad \frac{n_t - n_{t,\min}}{n_t + 1} = 0,4 \Rightarrow n_t = 16,9 \text{ (17)} \Rightarrow n_p = \frac{17}{0,6} = 28,3 \text{ (30)}$$

Izračun preseka, premera kolone

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}$$

tok hlapov:  $V = D(R + 1) = 3,7 \text{ mol/s}$

$$V \bar{M} = v_v \bar{\rho}_v S \Rightarrow S = \frac{V \bar{M}}{v_v \bar{\rho}_v}$$

$$\rho_v = \frac{\bar{P} \bar{M}}{R \bar{T}} \Rightarrow S = \frac{V R \bar{T}}{v_v \bar{P}}$$

$$\bar{P} = 0,5 \cdot (1013 + 5 n_p + 1013) = 1084 \text{ mbar}$$

$$\bar{T} = (T(1163 = 1013 + 5 n_p) + 353) \text{ K}$$

$$P = P_0 \exp[10,5(1 - T_0/T_{\text{dno}})]$$

$$1163 = 1013 \exp[10,5(1 - 383/T_{\text{dno}})] \Rightarrow T_{\text{dno}} = 388 \text{ K}$$

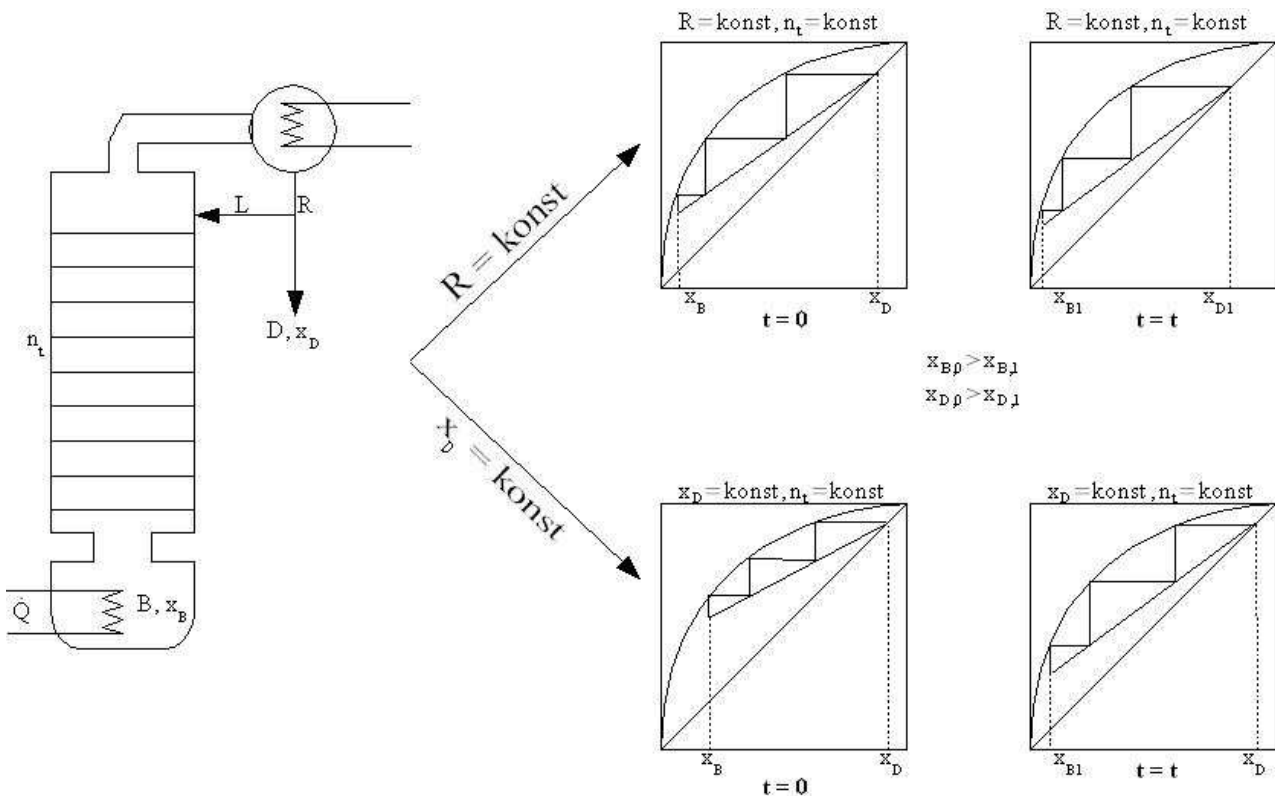
### 8.3 Druge destilacijske metode

#### Šaržna rektifikacija

Je kombinacija diferencialne destilacije in rektifikacije.

Ločimo dve možnosti šaržne rektifikacije, in sicer:

- refluksno razmerje  $R$  je konstantno, število prekatov je konstantno, spreminja se sestava destilata  $x_D$  (se manjša)
- refluksno razmerje  $R$  ni konstantno  $\frac{dR}{dt} > 0$ , število prekatov je konstantno, sestava destilata je konstantna;  $R$  je funkcija sestave destilacijskega ostanka, kjer je funkcija lahko v obliki polinoma,  $R = a \cdot \exp[b \cdot x_B]$ ,  $R = a \cdot x_B^b$



Slika 8.14. Šaržna rektifikacija.

Obravnavanje šaržne rektifikacije za situacijo  $x_D = \text{konst.}$  in  $R = f(x_B)$  sodi v program inženirske klasike, ki rezultira v Bogartovem integralu (1937).

#### Izpeljava Bogartovega integrala

Masna bilanca:

$$t=0 : m_B = m_{B,0} \quad x_B = x_{B,0}$$

$$t=t : m_{B,0} = m_B + m_D$$

$$m_{B,0} \cdot x_{B,0} = m_B \cdot x_B + m_D \cdot x_D$$

iz masne bilance dobimo:

$$m_B = m_{B,0} \cdot \frac{x_D - x_{B,0}}{x_D - x_B} \tag{8.37}$$

Z odvajanjem enačbe 8.37 dobimo:

$$\frac{d m_B}{d x_B} = m_{B,0} \cdot \frac{x_D - x_{B,0}}{(x_D - x_B)^2} \quad (8.38)$$

Nato uvedemo še tok hlapov  $V$ , ki ga definiramo kot:

$$\frac{-d m_B}{dt} = \frac{d m_0}{dt} = \frac{V}{R+1}, \text{ kjer je } R = f(x_B) \quad (8.39)$$

oziroma 
$$d m_B = \frac{-V}{R+1} dt \quad (8.40)$$

Če vstavimo enačbo 8.40 v enačbo 8.38, dobimo Bogartov integral, ki prekate čas  $t$  kot funkcijo destilacijskega ostanka  $x_B$ :

$$-\frac{V}{R(x_B)+1} dt = m_{B,0} \frac{x_D - x_{B,0}}{(x_D - x_B)^2} dx_B \quad (8.41)$$

Z integracijo enačbe 8.41 dobimo:

$$t = -\frac{m_{B,0}(x_D - x_{B,0})}{V} \cdot \int_{x_{B,0}}^{x_B} \frac{R(x_B)+1}{(x_D - x_B)^2} dx_B \quad (8.42)$$

kjer velja:  $V = \frac{\dot{Q}}{\Delta H_{izp}}$ ;  $V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot v \cdot \frac{\rho}{M}$ .

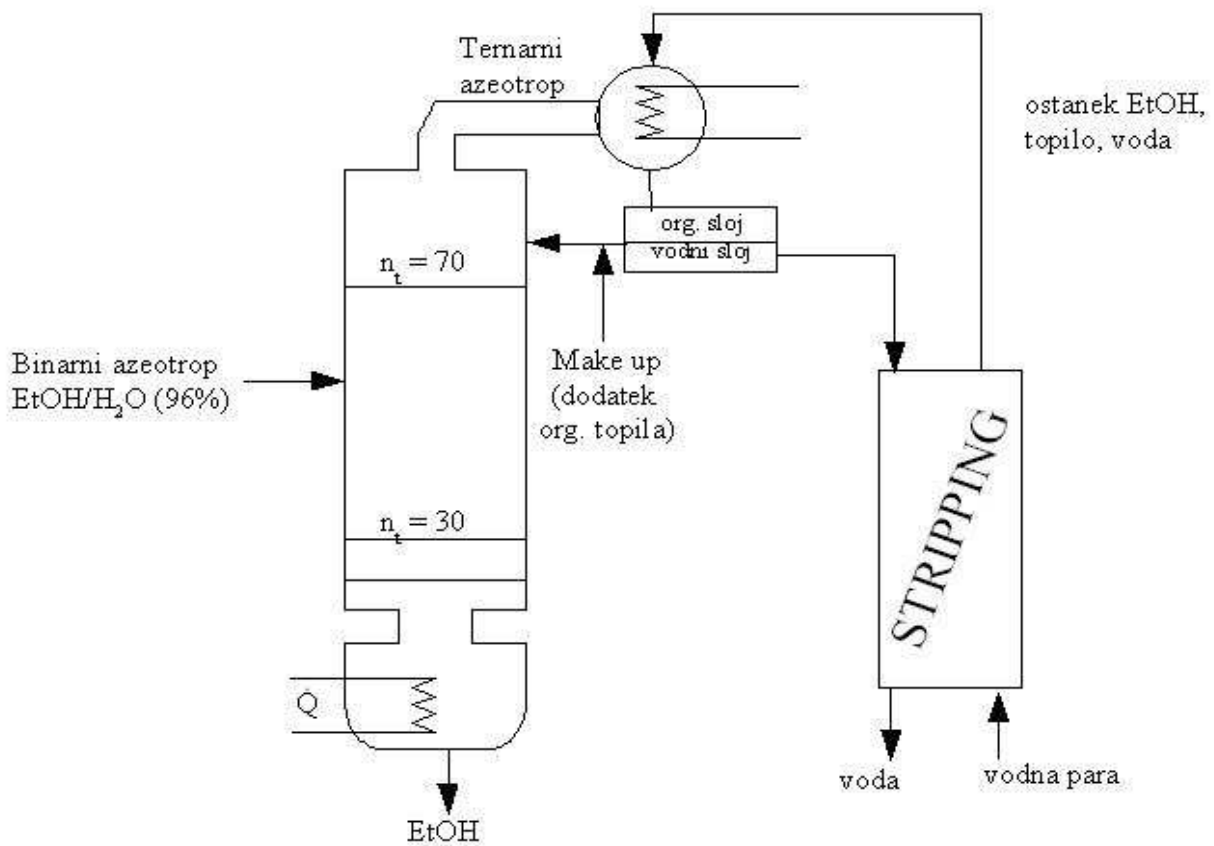
Poseben primer: če je  $x_D \gg x_B \Rightarrow$  potem spodnji del integrala v enačbi 8.42 odpade in ga lahko rešimo analitično:  $R = K \cdot x_B^a$ .

Seminar 4. Šaržna rektifikacija.

### Azeotropna in ekstraktivna destilacija

Od zmesi z več komponentami je treba posebej omeniti ternarne sisteme, ki imamo z njimi opraviti v tako imenovani azeotropni in ekstraktivni destilaciji. Oba postopka sodita k rektifikaciji in se uporabljata v primerih, v katerih sta si vrelišči dveh komponent tekoče zmesi zelo blizu skupaj, ali pa tvorita komponenti celo azeotropno zmes tako, da je popolna ločitev, če že ne nemogoča pa vsaj zelo težavna.

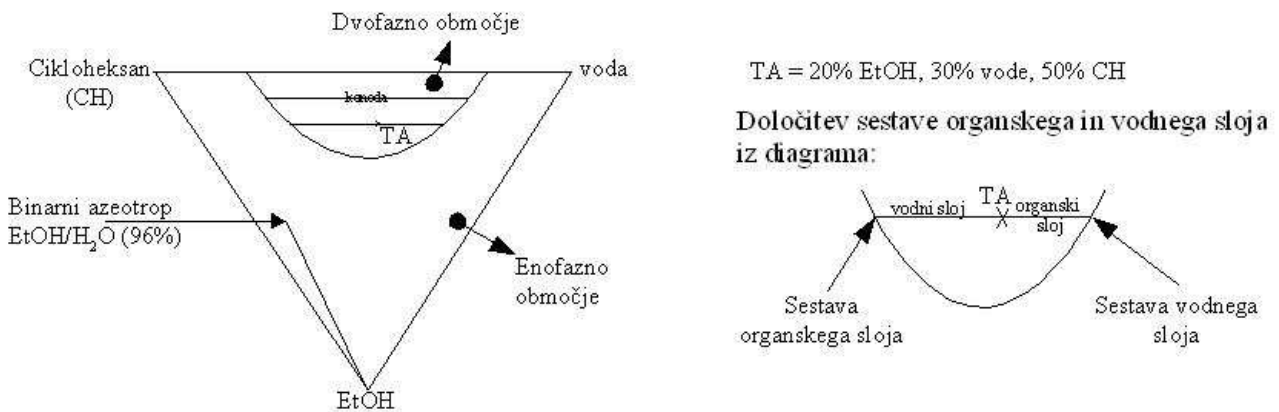
V obeh primerih si delo olajšamo z vnosom tretje komponente v sistem. Če sestavlja dodana komponenta z azeotropno zmesjo novo, ternarno azeotropno zmes z najnižjim vreliščem, dobimo lahko z dodatkom tretje komponente samo in eno komponento prvotne zmesi v celoti v destilat, druga pa ostane čista v destilacijskem ostanku. Azeotropna zmes etanola in vode (BA) daje na primer z benzenom ternarno azeotropno zmes (TA), ki vsebuje več vode od binarne zmesi (azeotropne zmesi etanola in vode in vre pri 65°C). Za rektifikacijo zmesi, ki vsebuje preračunano količino benzena, dobimo ternarno zmes z vsem benzenom in vso vodo v destilat, absolutni etanol pa je destilacijski ostanek. Pri azeotropni destilaciji, kakor se opisani postopek imenuje, vnašamo tretjo komponento v kolono z napajalno tekočino.



Slika 8.15. Azeotropna destilacija.

Ekstraktivno destilacijo pa imenujemo postopek, pri katerem vnašamo na vrh kolone, ki jo napajamo na sredi s slabo ločljivo binarno napajalno tekočino (tretjo komponento). Le-ta je mnogo manj hlapna od obeh ostalih, vpliva pa drugačno hlapnost vsake od njih. Če rektificiramo na primer zmes benzena in cikloheksana, bo ločitev izredno težavna. Če pa pri tem uvajamo v tok refluxa na vrhu kolone fenol, bo dodatek močno zmanjšal hlapnost sorodnejšega benena, na hlapnost cikloheksana pa ne bo mnogo vplival. V hlapih se bo zato zlahka bogatil cikloheksan, ker bo fenol odnašal benzen v destilacijski ostanek.

Ternarni diagram obravnavanega sistema prikazuje slika 8.16.



Slika 8.16. Ternarni diagram.

## 9. Sušenje

### 9.1Uvod

Sušenje je pomembna termodifuzijska operacije, ki vpliva na kvaliteto in obliko produkta. Sušenje ima velik vpliv na kristalizacijo, nasipnost, granulacijo in druge lastnosti. Je tehnika, ki se uporablja na koncu procesa in jo lahko kombiniramo z drugimi kemijsko-tehnološkimi procesi (npr. s kemijsko reakcijo). Prednost sušenega produkta je v nižji masi, kar poceni transport, produkt je lažje obvladljiv, koncentriran...

Največji problem sušenja je odvajanje nasičenega toplega zraka. Sama definicija sušenja pa je naslednja: Sušenje je termodifuzijska operacija, pri kateri s pomočjo toplote iz zmesi (suspenzije, trdne snovi, raztopine) odstranjujemo hlapne substance.

Inženirska stroka vpelje sušenje leta 1905, ko Grosvenor nariše psihrometrijsko karto (vlažnost (Y) vs. temperatura (T)). Pomembni diagram je osnoval tudi Mollier, ko je risal diagram entalpija (I) v odvisnosti od vlažnosti (Y). Slednji diagram je uporaben pri obravnavanju toplotnih bilanc.

Definirajmo vlažnost zraka:

$$Y = \frac{\text{masa vlage}}{\text{masa suhega zraka}} = \frac{m_{\text{vlage}}}{m_{\text{sz}}} \quad (9.1)$$

Izhodišče za enačbo 9.1 je razmerje molov, ki jih pomnožimo s molskimi masami:

$$Y = \frac{n_{\text{vlage}}}{n_{\text{sz}}} \cdot \frac{18}{29} = \frac{p_{\text{vlage}}}{P_{\text{TOT}} - p_{\text{vlage}}} \cdot \frac{18}{29} \quad (9.2)$$

Tako lahko dobimo tudi povezavo s relativno vlažnostjo  $\varphi$ , če v enačbo 9.2 vstavimo enačbo 9.3:

$$p = \varphi \cdot p_s \quad (9.3)$$

kjer  $p_s$  predstavlja parni tlak vode oziroma parcialni tlak vodne pare pri nasičenju, ki pa je odvisen od temperature.

Tabela 9.1. Parni tlak vode pri različnih temperaturah.

T [°C]	20	60	80	100	200
$p_s$ [mbar]	23,2	199,6	500	1013	2000

Nasičeno vlažnost  $Y_s$  pa izračunamo po enačbi 9.4:

$$Y_s = \frac{p_s}{P_{\text{TOT}} - p_s} \cdot \frac{18}{29} \quad (9.4)$$

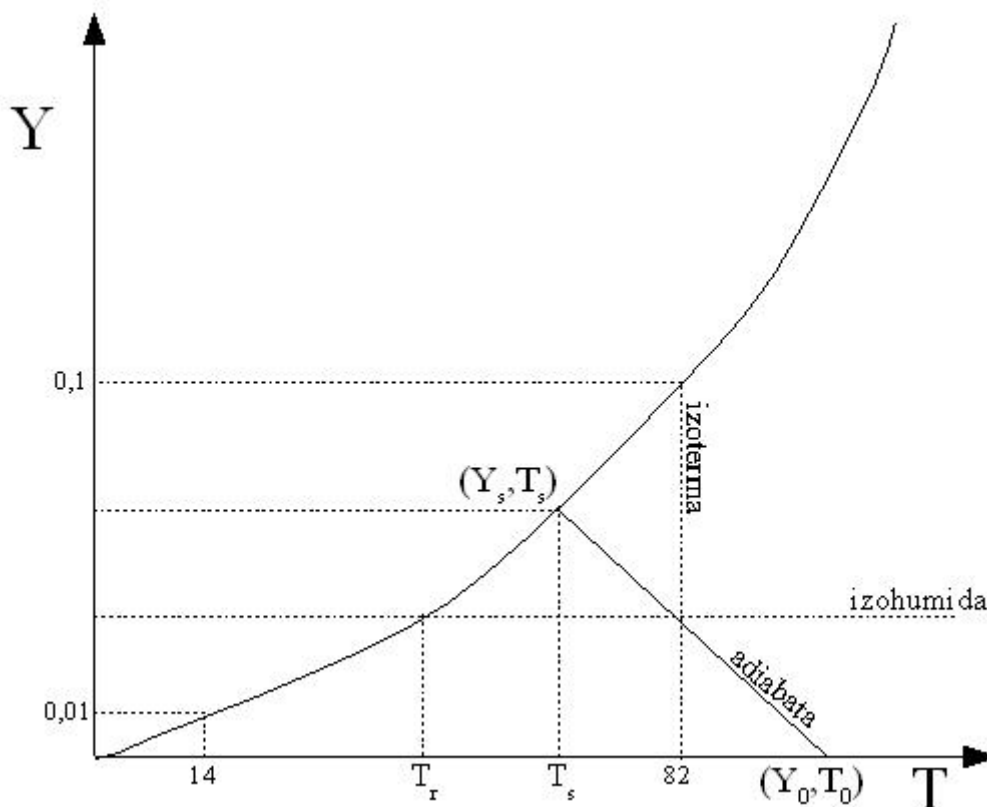
Tabela 9.2. Nasičena vlažnost pri različnih temperaturah.

T [°C]	14	52	85*
$Y_s$	0,01	0,1	1

\* Točka dvojne enice  $Y_s$  je 1 in  $\varphi$  je 1.



Psihrometrijska karta je skicirana na sliki 9.1.



Slika 9.1. Psihrometrijska karta.

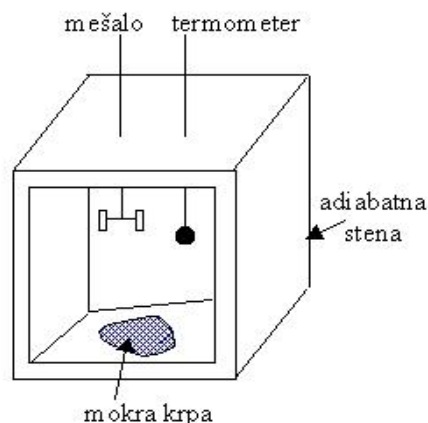
Na karti sta pomembni dve črti, po katerih lahko poteka ohlajanje:

- ohladitev zraka pri konstantni vlažnosti nam poda temperaturo rosišča  $T_r$  (krivulja 1)
- če se zrak ohlaja ob prisotnosti vode pride do navlaževanja zraka do nasičenja (krivulja 2)

Proces, ki ga predstavlja krivulja 2 na sliki 9.1, eksperimentalno izvedemo takole. V adiabatno izolirano posodo, opremljeno z mešalom in termometrom, položimo čim bolj raztegnjeno (večja površina) mokro krpo in pustimo, da voda izhlapeva. Pri tem se zrak ohlaja, saj voda za izhlapevanje potrebuje toploto, ki jo dobi iz zraka v posodi. Grafično je eksperiment predstavljen na sliki 9.2.

Proces lahko časovno opredelimo kot:

$t = 0$	$Y = Y_0$	$T = T_0$
$t = t$	$Y = Y_s$	$T = T_s$



Slika 9.2. Adiabatsno ohlajanje in navlaževanje zraka.

Bilanco procesa lahko zapišemo kot:

$$m_{sz} (Y_s - Y_0) \cdot \Delta H_{izp} = m_{sz} c_{psz} (T_0 - T_s) \quad (9.5)$$

V naslednji tabeli so zbrane najpomembnejše higrotermične lastnosti nasičenega zraka pri 100kPa (1bar):

T [°C]	p <sub>s</sub> [kPa]	Y <sub>s</sub> [kg vlage/kg sz]	ΔH [kJ/kg]
0	⋮	⋮	2500
14	⋮	0,01	⋮
20	2,32	⋮	⋮
52	⋮	0,1	⋮
60	19,96	⋮	⋮
80	⋮	1	⋮
100	101,3	⋮	2256

Izračun masne koncentracije po enačbi:

$$C_s [\text{kg/m}^3] = \frac{m}{V} = \frac{p_s M}{RT} \quad (9.6)$$

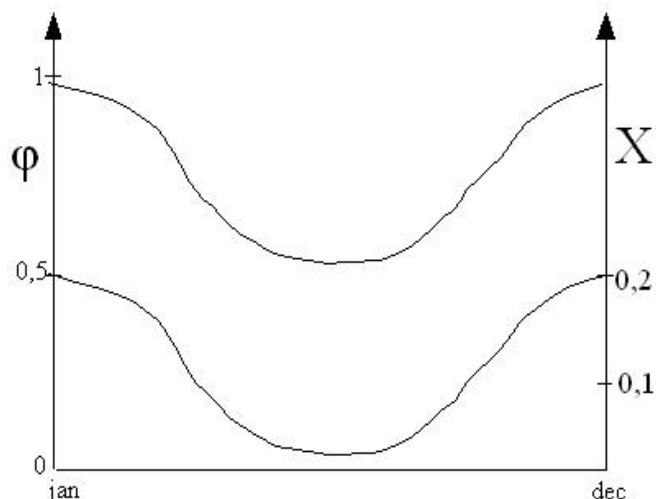
Izračun entalpije po enačbi:

$$\Delta H_{izp} = \Delta H(T_0) + \Delta c_p \cdot \Delta T = \Delta H(T_0) + (c_{p, \text{H}_2\text{O}} - c_{p, \text{vod. pare}}) \cdot \Delta T \quad (9.7)$$

Pri procesu sušenja sta v ravnotežju vlaga v zraku  $\varphi$  in vlaga v materialu X (masa vlage/masa suhe trdne snovi). Po Gibbsovem faznem pravilu dobimo, da je število neodvisnih spremenljivk 3, število odvisnih pa 1, število vseh pa je 4 (P, T, Y( $\varphi$ ), x(X))

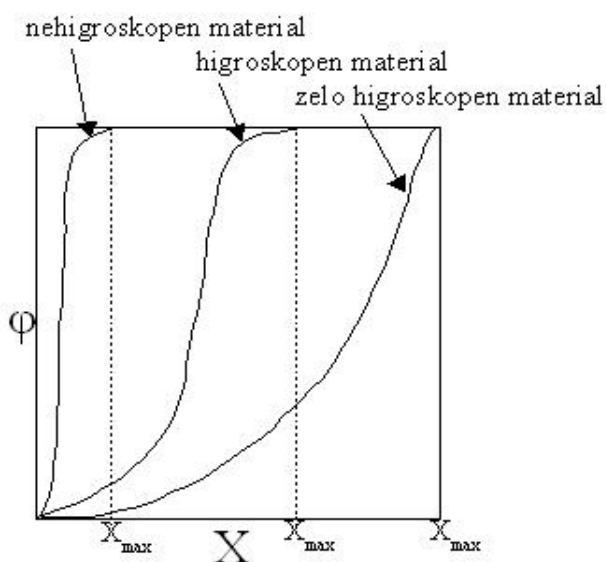
$$f + s = k + 2 \rightarrow f = 2 \rightarrow k = 3 \rightarrow s = 3$$

Te ugotovitve pa služijo za praktične diagrame.



Slika 9.3. Spreminjanje vlažnosti lesa glede na vlažnost zraka v Srednji Evropi.

Sorbcijske izoterme so krivulje na diagramu vlažnosti zraka v odvisnosti od vlažnosti materiala.



Slika 9.4. Sorbcijske izoterme za različne materiale.

Zvezo za krivulje pa nam predstavlja Luikova zveza (1975 – 80):

$$\ln \frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{1}{a} \left[ \frac{1}{X_{\max}} - \frac{1}{X} \right] \tag{9.8}$$

V enačbi 9.6 predstavljata  $a$  in  $X_{\max}$  Luikova parametra, kjer je  $a$  naklon,  $X_{\max}$  pa vlažnost materiala pri vlažnosti zraka 1.

Naslednje nasičene raztopine pri 20°C vzdržujejo konstantno vlažnost zraka:

NaCl	$\varphi = 76 \%$
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	$\varphi = 90 \%$
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	$\varphi = 34 \%$
NaNO <sub>2</sub>	$\varphi = 66 \%$

**Računski primer:**

Volna s 45 % vlažnostjo ( $x$ ) sušimo do ravnotežne vlažnosti 60 % ( $\varphi$ ). Koliko vode je potrebno odvesti na kg volne? Luikovi parametri za volno so:  $a = 6,7$  in  $X_{\max} = 0,32$ .

$$X_0 = \frac{x}{1-x} = \frac{0,45}{1-0,45} = 0,82$$

$$\ln \frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{1}{a} \left[ \frac{1}{X_{\max}} - \frac{1}{X_k} \right] \Rightarrow \ln \frac{0,6}{1} = \frac{1}{6,7} \left[ \frac{1}{0,32} - \frac{1}{X_k} \right] \Rightarrow X_k = 0,15$$

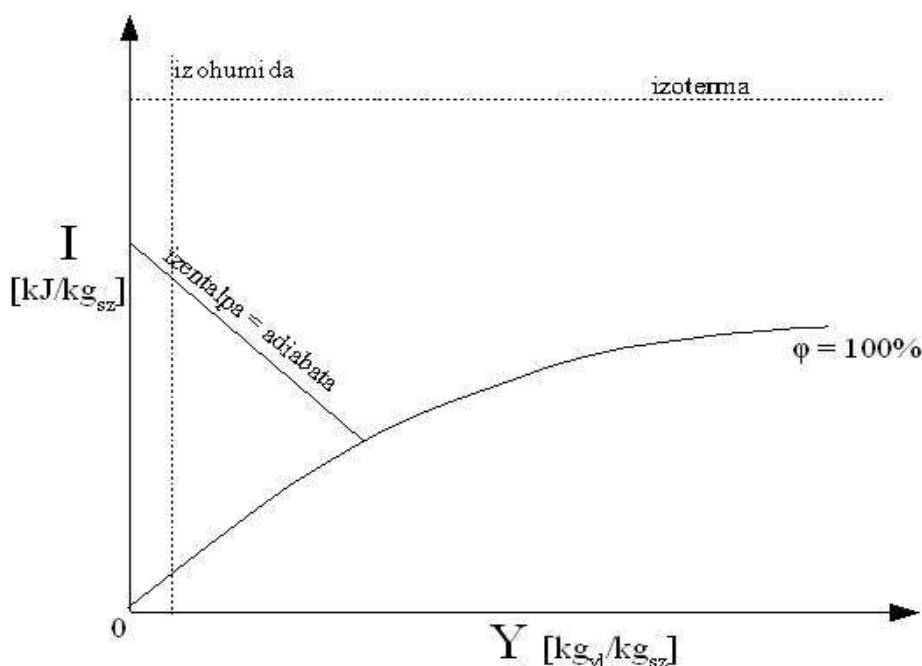
## 9.2 Mollierov diagram

Mollierov diagram služi kot odličen pripomoček za analizo in predstavitev toplotnih bilanc. Diagram prikazuje odvisnost entalpije  $I$  [ $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{suhega zraka}}$ ] od vlažnosti zraka. Na diagramu imamo referenčno točko: ( $Y = 0, T = 0, I = 0$ ). Od te točke naprej pa velja naslednja zveza:

$$I \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{sz}}} \right] = c_{p, \text{zr}} (T - T_{\text{ref}}) + Y (2500 + c_{p, \text{vlage}} (T - T_{\text{ref}})) \quad (9.9)$$

kjer so:  $c_{p, \text{vode}} = 4,2 \text{ kJ}/\text{kgK}$ ,  $c_{p, \text{vlage}} = 2,1 \text{ kJ}/\text{kgK}$ ,  $c_{p, \text{zraka}} = 1,05 \text{ kJ}/\text{kgK}$ .

Mollier pa je vse te podatke predstavil v diagramu (slika 9.5).



Slika 9.5. Mollierov diagram.

### Računski primer:

Izračunaj entalpijo zraka pri temperaturi  $60^\circ\text{C}$  in  $\varphi = 60\%$  ter izračunamo vrednost primerjaj s tisto, ki jo odčitaš v Mollierovem diagramu.

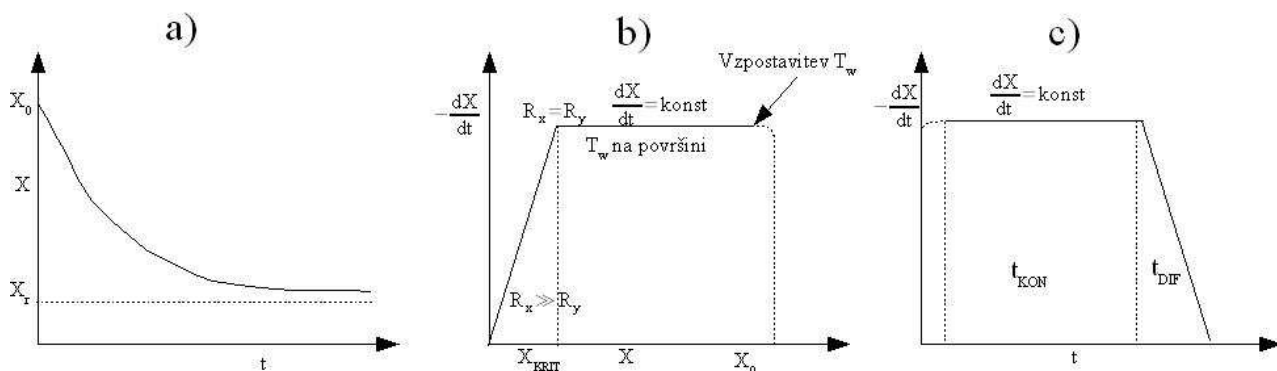
$$I = 1,05(60 - 0) + \frac{0,6 \cdot 1996}{1013 - 0,6 \cdot 1996} \cdot \frac{18}{29} \cdot (2500 + 2,1(60 - 0)) = 281,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{sz}}}$$

Odčitek:  $I = 280 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{sz}}$

### 9.3 Sušilni diagram, čas sušenja

#### 9.3.1 Sušilni diagram

Sušilni diagram nam predstavlja graf vlažnost materiala  $X$  v odvisnosti od časa (Slika 9.6a). Vendar pa je bolje proučevati odvod vlažnosti materiala od časa  $dX/dt$  v odvisnosti od vlažnosti materiala  $X$  (slika 9.6b) ali časa  $t$  (slika 9.6c).



Slika 9.6. Sušilni diagrami.

Sušilni proces lahko razdelimo na posamezne faze.

V začetni fazi se mokra površina sušeče se snovi ohlaja ali segreva na temperaturo mokrega termometra.

V fazi konstantne sušilne hitrosti je površina sušeče se snovi pokrita s filmom vode, ki se obnavlja s kapilarnim dvigom vode iz sušeče se snovi. V tej fazi določata hitrost sušenja snovni in toplotni tok skozi film zraka tik nad površino sušeče se snovi.

Pri doseženi kritični vlažnosti površina ni več mokra, upor ni več v površinskem filmu zraka, temveč se preseli v notranjost materiala.

Pri sušenju nastopata dva upora:

- upor površinskega filma zraka  $R_y = \frac{1}{k_y}$
  - upor sušečega se materiala  $R_x = \frac{K}{k_x}$ ,
- kjer velja, da je prvi večji kot drugi.  $R_y > R_x$ .

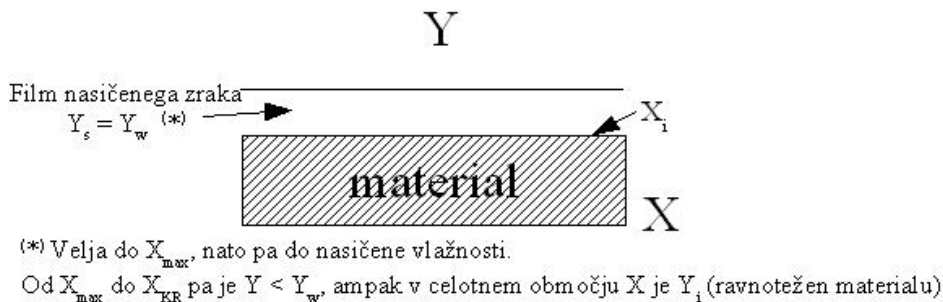
#### 9.3.2 Snovni fluks skozi dva zaporedna upora

Snovni fluks lahko zapišemo:

$$w = \frac{Y^* - Y}{\frac{1}{k_y} + \frac{K}{k_x}} \quad (9.10)$$

oziroma

$$w = \frac{X - X^*}{\frac{1}{K \cdot k_y} + \frac{1}{k_x}} \quad (9.11)$$



Slika 9.7. Snovni fluks skozi pri sušenju.

Izpeljava:

Snovna fluksa zapišemo posebej za zrak in material ter nato oba seštejemo, pri čemer upoštevamo zveze na fazni meji  $Y_i = K \cdot X_i$ ,  $Y^* = K \cdot X$ ,  $Y = K \cdot X^*$  :

$$w = k_x (X - X_i) \quad \Rightarrow \quad w = \frac{Y^* - Y}{\frac{1}{k_y} + \frac{K}{k_x}}$$

seštejemo in dobimo

### 9.3.3 Čas sušenja

Čas sušenja je pomembna količina pri dimenzioniranju sušilnikov. Če ga izračunamo za razmere, ki vladajo v sušilniku, ugotovimo lahko potem velikost sušilnika, potrebno za zahtevano zmogljivost. Ločimo dva časa, ki nastopata pri sušenju. Odvisna sta od tega, v kateri fazi potekata:

- čas sušenja v konvektivnem režimu
- čas sušenja v difuzivnem režimu.

#### Čas sušenja v konvektivnem režimu

V konvektivnem načinu sušenja je ves upor v plinski fazi, to pomeni v zraku ( $R_y \gg R_x$ ). Izhajamo iz snovnega fluksa, kjer velja:

$$w = k_y (Y_i - Y) = k_y (Y_w - Y) \tag{9.13}$$

ko velja  $Y_i = Y_w$  pri temperaturi mokrega termometra  $T_w$ , snovni koeficient pa je v naslednjih mejah:  
 $10 < k_y < 100 \text{ g/m}^2 \text{ s}$ .

Z zapisom masne bilance lahko izračunamo čas. Masna bilanca je sledeča: manjkajoča vlaga v določenem času je enaka vlagi, ki jo odnese zrak:

$$\frac{m_{ss} (X_0 - X_{kr})}{A \cdot t_{kon}} = k_y (Y_w - Y) \tag{9.14}$$

Če maso suhe snovi zapišemo drugače, dobimo:

$$\frac{\rho_{ss} d_{ss} A (X_0 - X_{kr})}{A \cdot t_{kon}} = k_y (Y_w - Y) \tag{9.15}$$

Čas sušenja v konvektivnem režimu pa je tako enak:

$$t_{kon} = \frac{\rho_{ss} d_{ss} (X_0 - X_{kr})}{k_y (Y_w - Y)} \tag{9.16}$$

**Čas sušenja v difuzivnem režimu**

V difuzivnem režimu sušenja prevladuje upor v materialu, saj ni več kapilarnega dviga vode na površino, kjer bi vodno paro odnašal zrak. Sušenje se namreč pomakne v notranjost materiala.

Izhodišče za izračun časa je drugi Fickov zakon, saj je vlažnost materiala funkcija lokacije in časa ( $X = f(z, t)$ ):

$$\frac{\partial c_A}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_A}{\partial z^2} \quad (9.17)$$

Robni in začetni pogoji so enaki, kot če bi obravnavali koncentracije:

$$\begin{array}{lll} t = 0 & -z_1 \leq z \leq z_1 & c_A = c_{A,0} \\ t > 0 & z = \pm z_1 & c_A = c_{A,i} \\ t < 0 & z = 0 & \frac{dc_A}{dz} = 0 \end{array}$$

Parcialne diferencialne enačbe rešujemo tako, da spremenljivke prevedemo v obliko, katere vrednosti nastopajo med 0 in 1. Tako  $c_A$  prevedemo v  $X$  in uvedemo naslednjo spremenljivko

$$Y = \frac{c_A - c_{A,i}}{c_{A,0} - c_{A,i}}$$

**PAZI!!!**  $Y$  tu ne nastopa kot vlažnost zraka, temveč kot spremenljivka!

Velja:

$$\begin{array}{llll} t = 0 & c_A = c_{A,0} & Y = 1 & X_D = 0 \\ t = \infty & c_A = c_{A,i} & Y = 0 & X_D = \infty \end{array}$$

$X_D$  predstavlja analogijo s Fourierovim številom ( $Fo = \frac{at}{z_1^2}$ ) in je enak:  $X_D = \frac{Dt}{z_1^2}$ . Rešitev je

Fourierova vrsta, kjer uporabimo le prvi člen:

$$Y = \frac{c_A - c_{A,i}}{c_{A,0} - c_{A,i}} = \frac{4}{\pi} \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{2 z_1}\right) \exp\left[-\frac{\pi^2 Dt}{4 z_1^2}\right] \quad (9.18)$$

Rešitve za različne geometrije so zbrane v Gourney-Lourijevih diagramim, kjer je abscisa  $X_D$ , ordinata  $Y$ . Poleg tega velja še:

$$m = \frac{R_y}{R_x}; \quad m = 0 \Rightarrow R_x \gg R_y \quad \text{in} \quad m = 1 \Rightarrow R_x = R_y; \quad n = 0 \Rightarrow z = 0 \Rightarrow \cos\left(\frac{\pi z}{2 z_1}\right) = 1$$

Tako dobimo funkcijsko odvisnost vlažnosti materiala  $X$  od lokacije in časa:

$$X = X_i + (X_0 - X_i) \frac{4}{\pi} \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2 Dt}{4 z_1^2}\right] \quad (9.19)$$

Z odvajanjem enačbe 9.19 in deljenjem s prvotno funkcijo, dobimo:

$$\frac{dX}{dt} = (X_0 - X_i) \frac{4}{\pi} \exp\left[-\frac{\pi^2 Dt}{4 z_1^2}\right] \left(-\frac{\pi^2 D}{4 z_1^2}\right) \quad (9.20)$$



Obe strani integriramo:

$$\frac{dX/dt}{X - X_i} \Rightarrow \int_{X_k}^X \frac{d(X - X_i)}{X - X_i} = -\frac{\pi^2 D}{4 z_1^2} \int_0^{t_{dif}} dt \quad (9.21)$$

in dobimo naslednji rezultat:

$$\ln \frac{X - X_i}{X_k - X_i} = -\frac{\pi^2 D}{4 z_1^2} t_{dif} \quad (9.22)$$

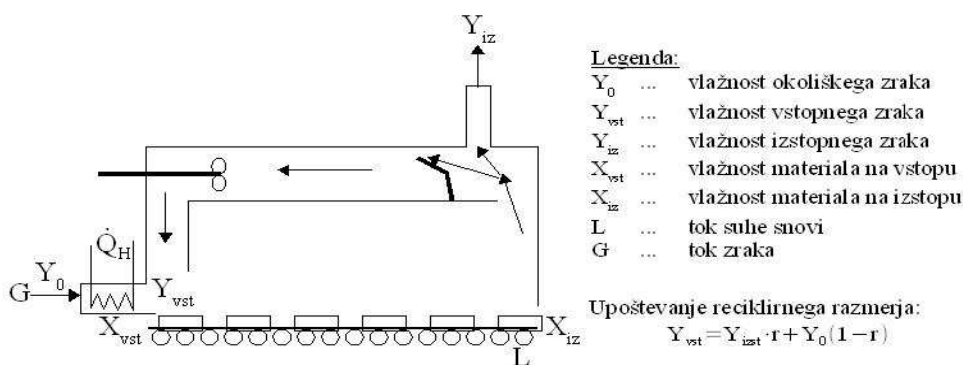
Čas sušenja v difuzivnem načinu je tako enak:

$$t_{dif} = \frac{4 z_1^2}{\pi^2 D} \ln \frac{X_k - X_i}{X - X_i} \quad (9.23)$$

### 9.4 Toplotna bilanca

Toplotna inventura sušilnih procesov je pomembna inženirska naloga, saj v veliki meri prispeva k ekonomskemu uspehu proizvodnje. Pogoste se izkaže, da je material po sušenju presušen (skrajšaj zadrževalni čas, znižaj potencial), da slaba izolacija močno prispeva k toplotnim izgubam, da bi z uvedbo recikla zraka prihranili precej energije. Predvsem pa nam da misliti, kako izrabiti toploto izstopajočega zraka.

Za predstavitev toplotnih bilanc je primeren Mollierov diagram.



Slika 9.8. Sušilnik z oznakami.

Uvedemo novo količino, to je reciklirno razmerje:

$$r = \frac{Y_v - Y_0}{Y_{iz} - Y_0} \quad (9.24)$$

Reciklirno razmerje meri ekonomičnost sušenja. Pri nizkem reciklirnem razmerju sušimo z večjim potencialom, kar je ob enaki kapaciteti povezano z nižjimi investicijskimi, ampak večjimi obratovalnimi stroški. Po drugi strani pa večji  $r$  pomeni manjši potencial ( $Y_w - Y$ ), manjše obratovalne in večje investicijske stroške. Pogosto je bolje sušiti z manjšim potencialom tudi zaradi poškodb, ki nastanejo pri sušenju, saj snovni fluks ne sme preseči maksimalni snovni fluks, ki ga lahko zagotavlja tok vlage iz notranjosti. Merilo za stopnjo sušenja oziroma intenzivnost sušenja je:

$$N = \frac{w}{\rho X_0 \frac{D}{b}} \quad (9.25)$$



Velikostni red koeficienta snovnega prestopa je:  $10^{-2} < k_c < 10^{-1}$

Z upoštevanjem zveze 9.27

$$k_c \cdot \rho_{zr} = k_y \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{s}} \right] \quad (9.27)$$

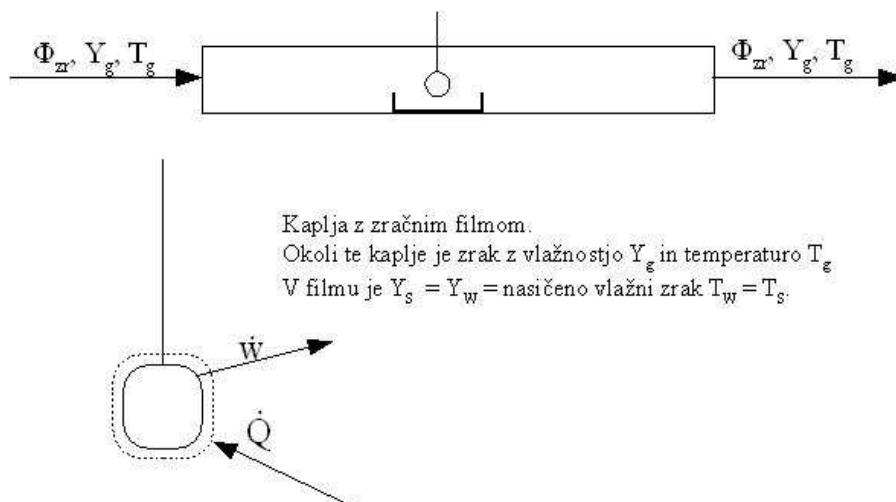
dobimo enačbo, ki pove fluks, ki ga zrak odnaša:

$$w = k_y (Y_i - Y) \quad (9.28)$$

kjer je velikostni red  $k_y$ :  $10 < k_y < 100$ .

### Temperatura mokrega termometra (“wet-bulb temperature”)

Temperatura mokrega termometra je stacionarna, neravnotežna temperatura, ki jo doseže majhna količina vode v stalnem toku zraka pri adiabatih razmerah. Ker je masa vode v tem primeru majhna glede na maso zraka, se lastnosti zraka zaradi hlapljenja vode le neznatno spremenijo in so spremembe opazne le pri vodi.



Slika 9.11. Temperatura mokrega termometra.

Pri tem procesu velja naslednja enačba:

$$\dot{Q} = \dot{W} \cdot \Delta H_{izp} \quad (9.29)$$

ki jo lahko zapišemo kot:

$$A \cdot h \cdot (T_g - T_w) = k_y \cdot (Y_w - Y_g) \cdot A \cdot \Delta H_{izp} \quad (9.30)$$

Za vzpostavitev stacionarnega stanja, ko se vlažnost nasičenega filma in temperatura nasičenega filma ne spreminja več. V tem trenutku postane toplotni tok, ki prhaja iz zraka na kapljo enak snovnemu toku iz nasičeno vlažnega filma na okoliški zrak pomnoženemu z izparilno toploto in se ne spreminja več.

Tako lahko zapišemo enačbo za črto temperature mokrega termometra:

$$Y_w - Y_g = \frac{h}{k_y \Delta H} \cdot (T_g - T_w) \quad (9.31)$$

**Temperatura adiabatnega nasičenja**

Temperatura adiabatnega nasičenja je tista temperatura, ki jo dobita zrak in voda, če sta toliko časa v medsebojnem stiku, da pride do ravnotežja med njima, pri čemer nastane zrak pri tej temperaturi nasičeno vlažen. Ker se pri stiku z vodo nenasičeno vlažni zrak ne le ovlažuje, ampak tudi ohlaja, je začetna temperatura takega zraka višja od temperature adiabatnega nasičenja.

**Primerjava enačb črt mokrega termometra in adiabate**

Enačba za črto temperature mokrega termometra:

$$Y_w - Y_g = \frac{h}{k_y \Delta H} \cdot (T_g - T_w) \quad (9.31)$$

Enačba za črto temperature adiabatnega nasičenja

$$Y_s - Y_g = \frac{c_{p,zr}}{\Delta H} \cdot (T_g - T_s) \quad (9.32)$$

Za sistem voda – zrak imata obe enačbi enak naklon, kar pomeni, da sta temperatura mokrega termometra in temperatura adiabatnega nasičenja enaki. To pa pomeni, da sta tudi vlažnosti enaki:  $(T_w = T_s \Rightarrow Y_w = Y_s)$ . Razlog za enakost je v psihometrijskem razmenju, ki je za sistem voda – zrak enak 1.

Psihometrijsko razmerje pa je definirano kot:

$$PR = \frac{h}{k_y \cdot c_p} \quad (9.33)$$

Psihometrijsko razmerje za druge sisteme:

zrak – voda	PR = 1
benzen – zrak	PR = 2
aceton – zrak	PR = 1,76

Seminar 5. Temperatura mokrega termometra.

*Dodatek k sliki v prilogah* (Slika 7. Kontinuirni sušilnik in sliki.8. Toplotna bilanca v diagramu entalpija-vlažnost)

Postavke pri sušenju:

- Vnos toplote
  1. tok goriva:  $G(I_v - I_0) = \dot{Q}_H$ 
    - 1.a  $G I_0$
  2.  $L C_{PL}(T_L - T_r) + L X_v c_{p,vap}(T_L - T_r)$
  3.  $P_{MOTORJEV}$
- Izstop toplote
  4.  $G I_{IZ}$
  5.  $\dot{Q}_{IZGUB}$
  6.  $L C_{PL}(T_{IZ} - T_r) + L X_{iz} c_{p,vap}(T_{IZ} - T_r)$

Za primer, ko so točke 1.a + 2 + 3 = 5 + 6, vidimo, da je  $I_{VS} = I_{IZ}$ . Proces ohlajevanja sušenja poteka po adiabati.

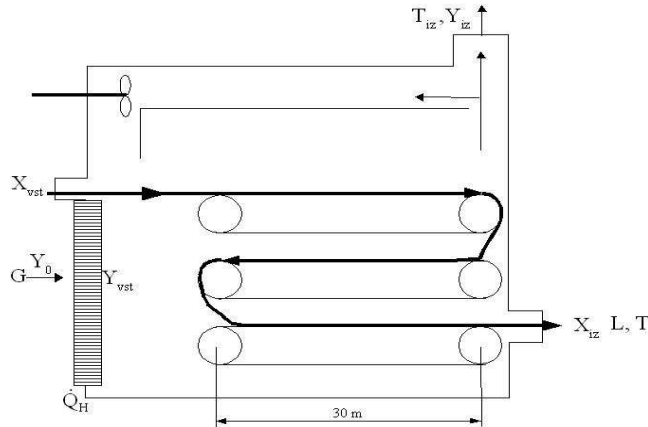
Velja:

$$I_V = c_{Pz}(T_V - T_r) + Y_V(2500 + c_{p,vi}(T_V - T_r)) = I_{IZ} = c_{Pz}(T_{IZ} - T_r) + Y_{IZ}(2500 + c_{p,1}(T_{IZ} - T_r))$$

9.6 Primeri sušilnih naprav

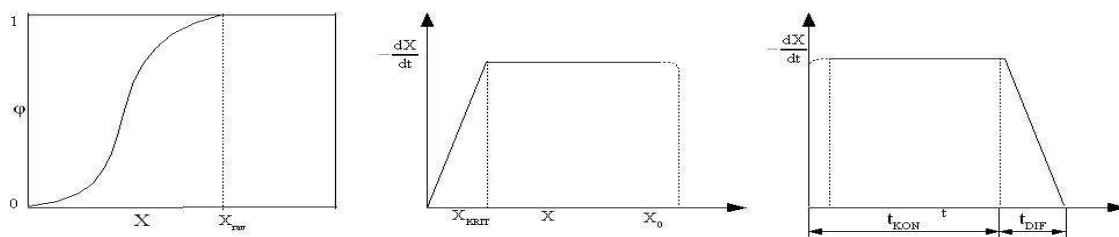
Analiza kontinuirne sušilne proge za umetno usnje

Za sušenje uporabimo Dornejev sušilnik, ki je prikazan na sliki 9.12.



Slika 9.12. Dornejev sušilnik.

Moker material z vstopno vlažnostjo ( $X_0$ ) 0,72 sušimo na tračnem sušilniku dolžine 90 m do izstopne vlažnosti ( $X_{iz}$ ) 0,12. Laboratorijski poskusi so pokazali, da je pri temperaturi 80°C maksimalna vlažnost materiala ( $X_{max}$ ) 0,22. Sušilni diagram, narejen pri podobnih pogojih, kot so na sušilniku, pa je pokazal, da je kritična vlažnost ( $X_{krit}$ ) enaka 0,23.



Slika 9.13. Ravnotežni in sušilni diagram.

Pripravi masno in toplotno bilanco in izračunaj, na katerem mestu sušilne proge pride do spremembe režima sušenja. Temperatura zraka v hali je 20°C, segrejemo ga na 120°C, pri izstopu pa ima zrak 70°C. Maksimalna temperatura, ki jo zrak še prenese je 120°C. Tok suhega materiala (L) je 500 kg/h. G/L za večino industrijskih sušilnikov je med 10 in 100. Sušimo na mreži, dvostransko. Izračunaj čas sušenja v konvektivnem in difuzijskem režimu.

Podatki:  $k_y = 40 \text{ g/m}^2\text{s}$ ,  $D = 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $X_R = 0,05$ ,  $\check{s} = 2,5 \text{ m}$ ,  $d = 1\text{mm}$ ,  $\rho_{\text{materiala}} = 800 \text{ kg/m}^3$

$$L = \left[ \frac{1}{t_{kon} + t_{dif}} \right] \cdot \check{s} \cdot d \cdot \rho_{\text{materiala}}$$

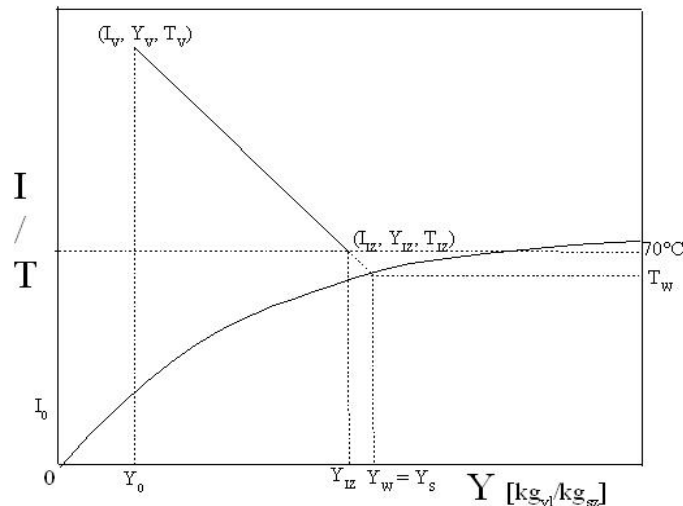
REŠITEV:

Določitev  $T_w$ ,  $Y_w$  in  $\overline{Y_w - Y_{\text{sušilni}}}$  iz Mollierovega diagrama:

$$Y_0(20^\circ\text{C}, \varphi = 60) = \frac{0,6 \cdot 23,2}{1013 - 23,2 \cdot 0,3} \cdot \frac{18}{29} = 0,01$$

Očitki iz Mollierovega diagrama (glej priloge):

$$Y_{iz} = 0,031; Y_w = 0,042; T_w = 37^\circ\text{C}$$



Slika 9.14. Mollierov diagram.

Čas v konvektivnem režimu:  $t_{kon} = \frac{\rho_{ss} \cdot d_{ss} (X_0 - X_{kr})}{k_y (Y_w - Y)} = \frac{800 \cdot 10^{-3} \cdot (0,72 - 0,23)}{40 \cdot 10^{-3} (0,043 - 0,02)} = 435s$

Čas v difuzivnem režimu:  $t_{dif} = \frac{4z^2}{\pi^2 D_{AB}} \ln \left[ \frac{X_{kr} - X_i}{X - X_i} \right] = \frac{4 \left( \frac{10^{-3}}{2} \right)^2}{\pi^2 \cdot 10^{-10}} \ln \left[ \frac{0,23 - 0,05}{0,12 - 0,05} \right] = 957s$

!!(z = d/2, ker je obojestransko sušenje zaradi uporabe mreže)

$L = \left[ \frac{1}{t_{kon} + t_{dif}} \right] \cdot \dot{s} \cdot d \cdot \rho_{materiala} = \left[ \frac{90}{435 + 957} \right] \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 800 = 466 \text{ kg/h}$

Masna bilanca:

$L(X_{vst} - X_{izst}) = G(Y_{izst} - Y_{vst}) \Rightarrow G = \frac{L(X_{vst} - X_{izst})}{(Y_{izst} - Y_{vst})} = \frac{500(0,72 - 0,12)}{(0,03 - 0,01)} = 15000 \text{ kg/h}$

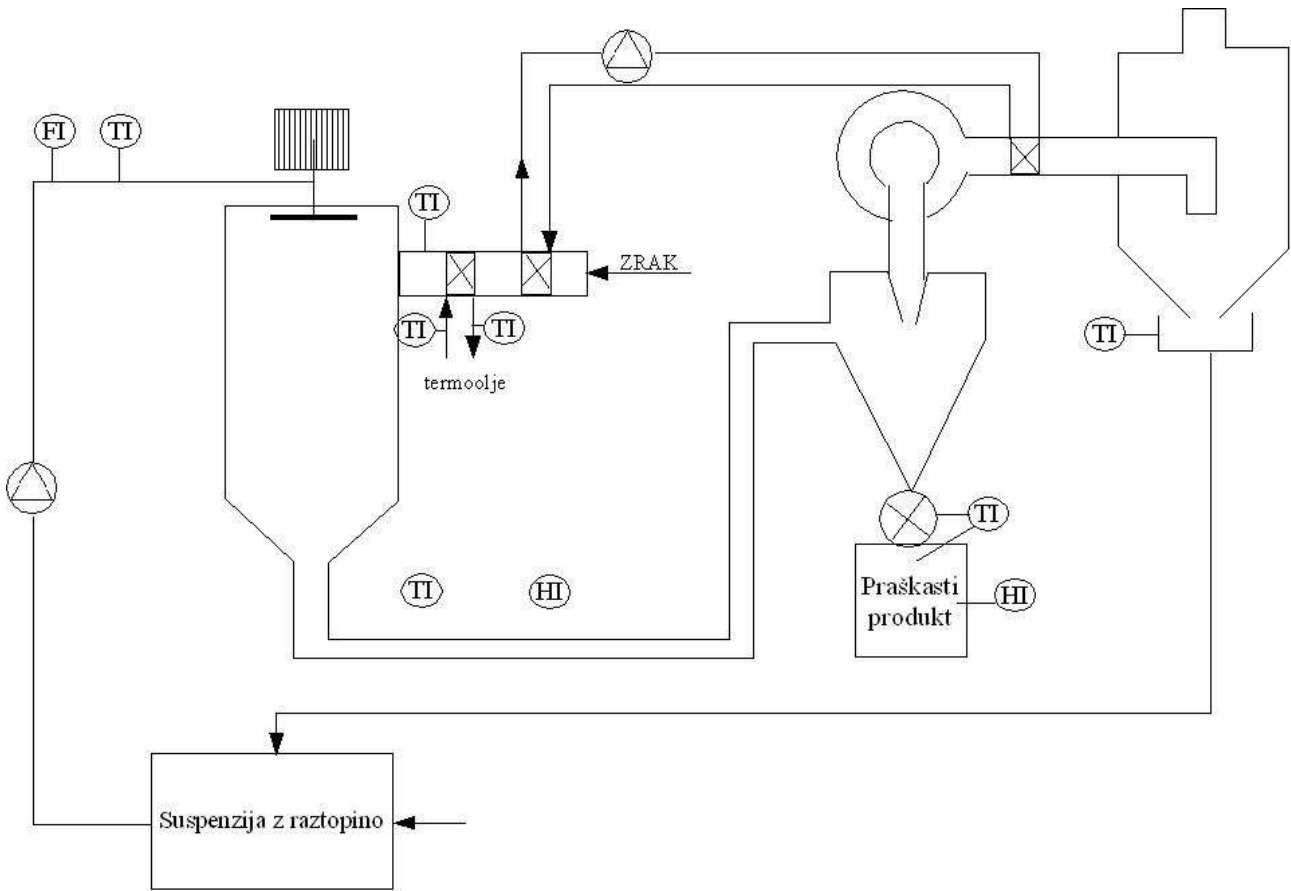
$G/L = 15000/500 = 30$  (znotraj meja)

Toplotna bilanca:

<i>kW</i>	<i>VSTOP</i>	<i>IZSTOP</i>	<i>kW</i>
187,5	$G I_0 = \frac{15000}{3600} \cdot 45$	$G I_{iz} = \frac{15000}{3600} (150)$	625
437	$G(I_v - I_0) = \dot{Q}_H = \frac{15000}{3600} (150 - 45)$	$\dot{Q}_{IZGUB} = U \cdot A (T_{SUŠ} - T_{okolice})$	20
30	$P_{MOTORJEV}$	$L C_{PL} (T_{IZ} - T_r) = \frac{500}{3600} (70)$	17,5
5	$L C_{Pm} (T_{vs} - T_{ref}) = \frac{500}{3600} \cdot 1,8 \cdot 20$	$L X_{iz} c_{p,vap} (T_{IZ} - T_r) = \frac{500}{3600} \cdot 0,12 \cdot 4,2 \cdot 70$	4,9
8,4	$L X_V C_{P,vode} (T_{vs} - T_{ref}) = \frac{500}{3600} \cdot 0,72 \cdot 4,2 \text{ codt } 20$		
668,4			667,4

**Načrtovanje razpršilnih sušilnikov**

Primer razpršilnega sušilnika je na sliki 9.15.



HI relativna vlažnost

Slika 9.15. Razpršilni sušilnik.

Zaporedje aktivnosti produkt, proces, oprema si oglejmo še na primeru načrtovanja razpršilnega sušilnika za obdelavo 5 ton/h 40% raztopine, iz katere želimo dobiti praškast produkt, ki vsebuje 90% suhe substance (silikati, fosfati, keramični materiali, antibiotiki...). Čas sušenja kapljic dobimo na pilotni napravi ali od proizvajalca opreme za različne materiale in sušilne pogoje. Zaradi specifičnih pogojev pri razpršilnem sušenju izračun na osnovi prvega in drugega Fickovega zakona ( $t_{kon}$  in  $t_{dif}$ ) ni dovolj točen. Čas sušenja v industrijskih razpršilnikih je za različne materiale od 5 do 60s (zadrževalni čas), pri čemer pa moramo ločiti med zadrževalnim časom plina in časom zadrževanja materiala, ki pogosto nista enaka.

Podatki:  $\tau = 25s$ ,  $F = 5 \text{ ton/h}$ ,  $X_F = 0,4$ ,  $X_L = 0,9$ .

Vstopna vlažnost zraka je 0,01; izstopna vlažnost pa naj bo rezultat  $T_{vst, zrak} = 550^\circ\text{C}$  in  $T_{izst, zrak} = 150^\circ\text{C}$ . Zanima nas tok suhega zraka. Izračunaj tudi geometrije sušilnika.

**REŠITEV:**

$$\begin{aligned}
 F &= L + V & V &= F - L = F \left( 1 - \frac{X_F}{X_L} \right) = 5 \left( 1 - 0,4/0,9 \right) = 2,78 \text{ ton/h} \\
 F X_F &= L X_L & L &= \frac{X_F}{X_L} F = 3,89 \text{ ton/h} \\
 V &= G (Y_{izst} - Y_{vst})
 \end{aligned}$$

Iz Mollierovega diagrama odčitamo:

$Y_{iz} = 0,17$  to pomeni, da je  $G = 29,9$  ton/h

Izračun geometrije sušilnika:

$G = 30$  ton/h, gostota ( $150^{\circ}\text{C}$ ) =  $0,82$  kg/m<sup>3</sup>

$$V = \frac{G}{\rho_{zr}} \cdot \tau = 254,1 \text{ m}^3$$

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \left( H + \frac{H}{3} \right) \Rightarrow D = 6,2 \text{ m}$$

Zveza za določitev velikosti kapljice, na podlagi katere lahko dobimo tudi velikost posušenega zrna:

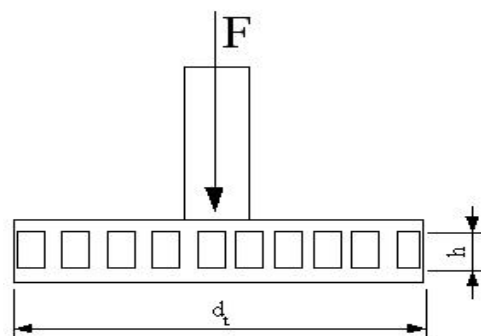
$$d_{50} = \frac{K \cdot F^a \cdot 10^4}{N^b \cdot d_t^c (nh)^d}, \text{ kjer so:}$$

- F ... pretok (7000)
- K ... konstanta
- N ... število obratov ( $10^4$ )
- n ... število lukenj (24)
- $d_t$  ... premer turbine (210mm)
- h ... višina reže (0,02m)

Natok masnega toka na rezalno površino:  $\Phi_m = \frac{F}{n h} = \frac{7000}{24 \cdot 0,02} = 14383$  kg/mh

$$d_{50} = \frac{K \cdot F^a \cdot 10^4}{N^b \cdot d_t^c (nh)^d} = \frac{1,2 \cdot 7000^{0,12} \cdot 10^4}{(10^4)^{0,8} \cdot 0,21^{0,6} (0,24 \cdot 0,02)^{0,12}} = 61 \mu\text{m}$$

Obodna hitrost [m/s]	85 – 140
$\Phi_m$	3000 – 6000
a	0,12
b	0,8
c	0,6
d	0,12
K	1,2



Slika 9.16. Turbina z oznakami.



**Računski primeri**

1. Neizrabljena toplota (možnost rekuperacije toplote in ekološki problem)

Vroč in navlažen zrak iz razpršilnega sušilnika vodimo po ločitvi delcev v ciklonih na venturijev pralnik (scrubber). Koliko naj bo dodatek vode, da:

- dosežemo temperaturo rosišča
- dosežemo temperaturo adiabatnega nasičenja
- dosežemo temperaturo vode 30°C.

Kondicija zraka, ki zapušča sušilnik je 150°C, vlažnost 0,15 in  $G = 25\text{ton/h}$

**REŠITEV:**

a) temp. rosišča

$$G(I_{\text{vst}} - I_{\text{izst}}) = L \cdot c_p \cdot (60 - 15) \Rightarrow L = 14,5\text{ton/h}$$

$$I_{\text{vst}}(\text{pralnik}) = I_{\text{vst}}(150^\circ\text{C}; 0,15) = 580\text{kJ/kg}$$

$$I_{\text{izst}}(\text{pralnik}) = I_{\text{iz}}(60^\circ\text{C}; 0,15) = 470\text{kJ/kg}$$

$$T(\text{rosišča}) = 60^\circ\text{C}$$

b) temp. adiabatnega nasičenja

!Slepi tir!

$$I = 580\text{kJ/kg}$$

$$\text{Rabimo koliko vode za } G(Y_{\text{iz}} - Y_{\text{v}}) = L = 25000 \cdot 0,04 = 1\text{ tona/h}; \quad T = 63^\circ\text{C}$$

c) ohladimo zrak na 30°C in kondenzacija vlage

$$I_{\text{vst}}(\text{pralnik}) = I_{\text{vst}}(150^\circ\text{C}; 0,15) = 580\text{kJ/kg}$$

$$I_{\text{izst}}(\text{pralnik}) = I_{\text{iz}}(30^\circ\text{C}; 0,0,029) = 100\text{kJ/kg}$$

$$G(I_{\text{vst}} - I_{\text{izst}}) = L \cdot c_p \cdot (60 - 15) \Rightarrow L = 190\text{ton/h}$$

2. Izračunaj maksimalni snovni fluks za vodo, ki izhaja iz mokre površine. Površino konvektivno segrevamo z zrakom, za katerega velja  $T_g = 200^\circ\text{C}$ ,  $T_w = 50^\circ\text{C}$ ,  $h = 30\text{ W/m}^2\text{K}$ . Kolikšna je bila vlažnost vročega zraka? S pomočjo psihrometrijskega razmerja izrazi snovni tok tudi z vlažnostnim potencialom.

**REŠITEV:**

$$Y_G = 0,02, \quad PR = \frac{h}{k_y c_{pz}} \Rightarrow k_y = 30\text{ g/m}^2\text{s}$$

$$w = k_y \Delta Y = k_y (Y_w - Y_g) = 30(0,087 - 0,02) = 2\text{ g/m}^2\text{s}$$

$$w = \frac{h \Delta T}{\Delta H_w} = \frac{30 \cdot 150}{2382} = 1,9\text{ g/m}^2\text{s}$$