



Destilacijske tehnike

Diferencialna destilacija

Ravnotežna destilacija

Destilacija z vodno paro

Rektifikacija

DESTILACIJA

Že stoletja močno povezana s procesi v živilski industriji, kot primer: pridobivanje žganice

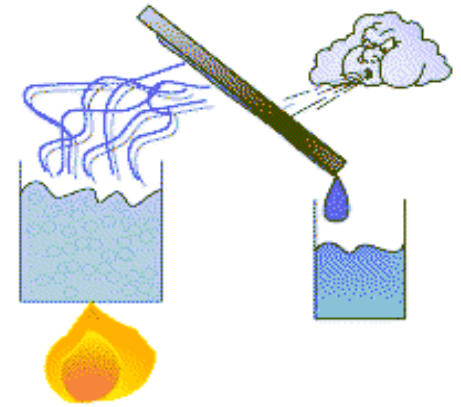
Je operacija, s katero ločujemo zmes hlapnih tekočin v posamezne komponente ali skupine komponent.

Izvršimo jo tako, da del zmesi odparimo, pri čemer dobimo hlapnejše komponente v večji koncentraciji v destilatu, to je v kondenziranih hlapih, manj hlapne pa v destilacijskem ostanku.

Z destilacijo je mogoče izvesti ločitev le, če imajo hlapi drugačno sestavo kot tekoča zmes, iz katere izhajajo.

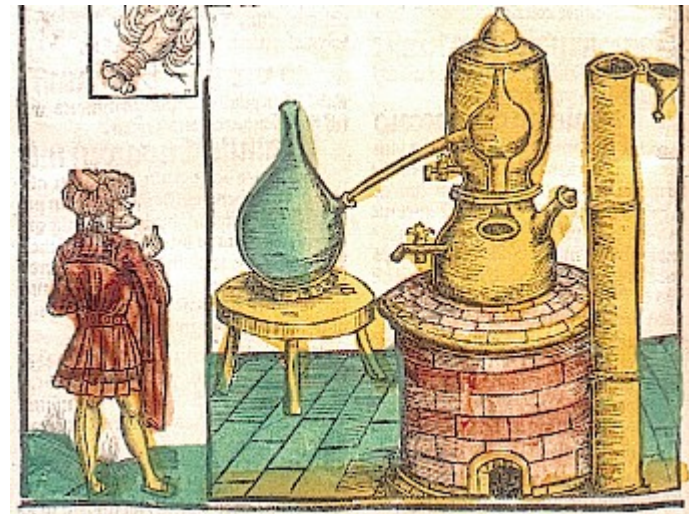
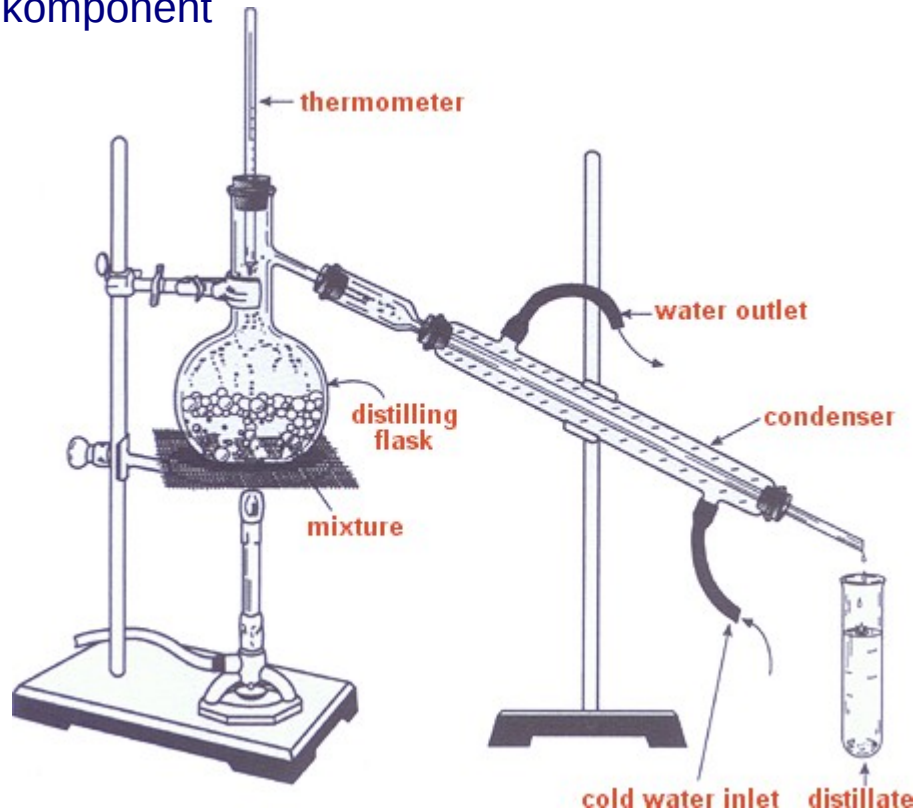
Z destilacijo dosežemo spremembo razmerja koncentracij glede na prvotno zmes, ki jo destiliramo.

Pri destilaciji gre za kombinacijo snovnega in toplotnega prenosa.



Destilacija v kemijskem laboratoriju:

Namen je ločevanje različnohlapnih tekočin z vretjem raztopine na osnovi različne hlapnosti komponent



This early depiction of a distillation apparatus is taken from *Liber de Arte Distillandi* (“The Book of the Art of Distilling”), published in 1512. The retort, the condenser, and the receiver are all clearly shown in this drawing. There is a drawing of a scorpion on the wall because long ago, alchemy and astrology were very intertwined, and zodiac signs often had alchemical meanings.

Kontaktne površine za prenos toplote in snovi ne poznamo.

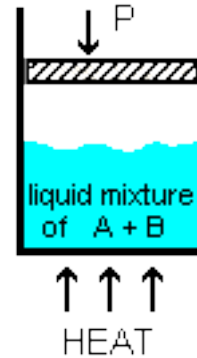
Zato uvedemo koncept ravnotežne stopnje.

Fazi, ki ravnotežno stopnjo zapuščata sta v ravnotežju.

DESTILACIJA

Koncept ravnotežne stopnje:

Pri vretju zmesi je sestava tekoče faze v ravnotežju s sestavo parne faze



A = more volatile component (m.v.c.)

B = less volatile component (l.v.c.)

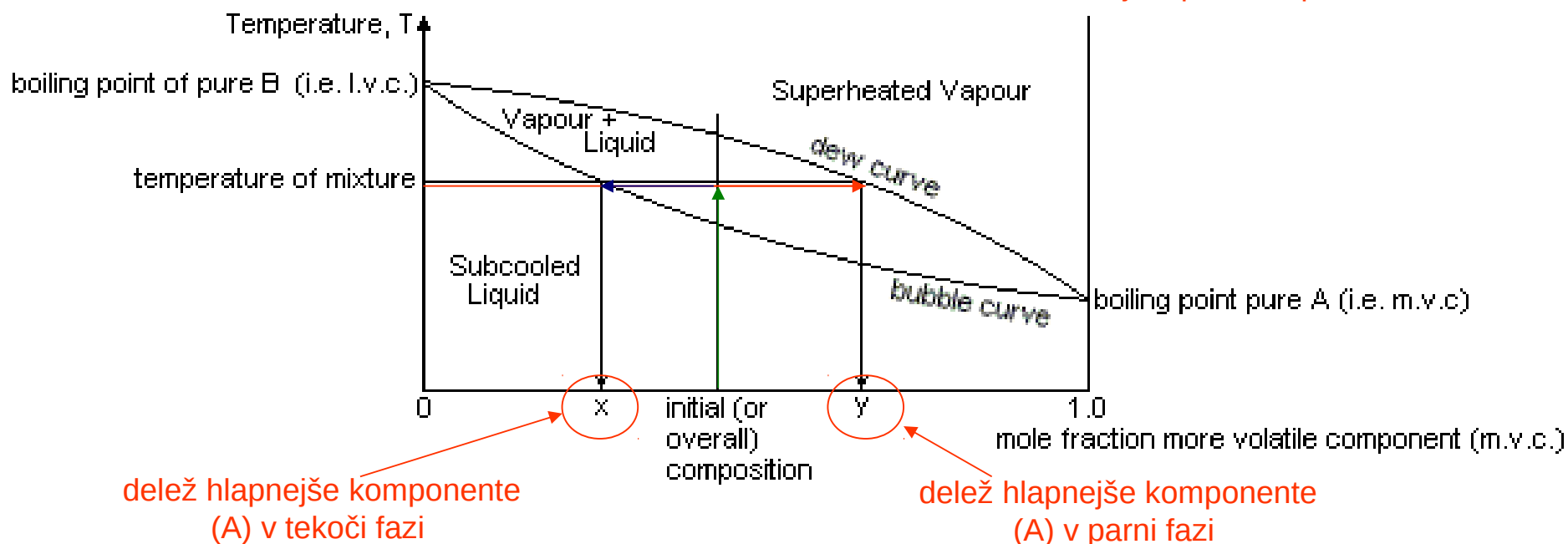
- ➔ Vnos energije s toplotnim tokom poveča tlak hlapov (parni tlak)
- ➔ Parni tlak je povezan z vretjem
- ➔ Tekočina zavre, ko je tlak hlapov enak zunanjemu tlaku
- ➔ Kako hitro tekočina zavre je dovisno od hlapnosti
- ➔ Tekočine z visokim parnim tlakom so bolj hlapne in zavrejo pri nižji temperaturi
- ➔ Tlak hlapov in vrelišče raztopine (več komponent) je odvisno od sestave raztopine in hlapnosti posameznih komponent.
- ➔ Destilacija je učinkovit postopek ločevanja zmesi na posamezne komponente, če je razlika v hlapnosti komponent dovolj velika.

Destilacija dvo komponentne zmesi: ravnotežje med parno in tekočo fazo

Izobarični pogoji - idealna binarna raztopina

B - manj hlapna komponenta

A - bolj hlapna komponenta



Ko binarna zmes zavre manj hlapnejša komponenta B kondenzira iz zmesi v večji količini, sestava x, (bubble curve- vrelna krivulja, ki povezuje ravnotežne sestave kondenzata), bolj hlapna komponenta A izpareva v večji meri, sestava y (dew curve- kondenzacijska krivulja)

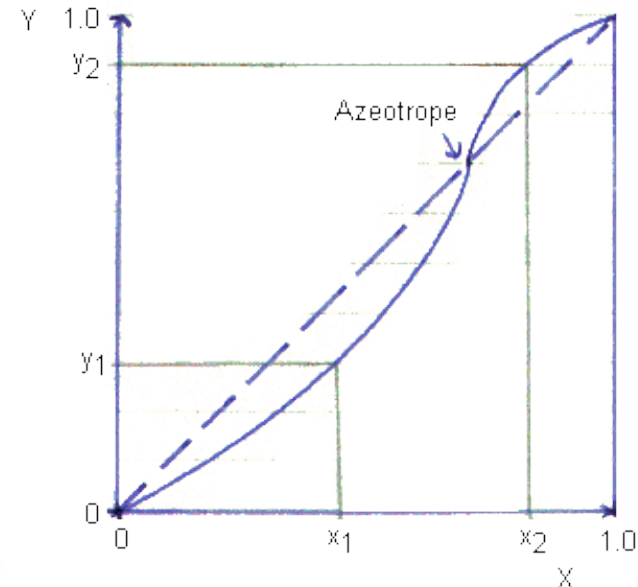
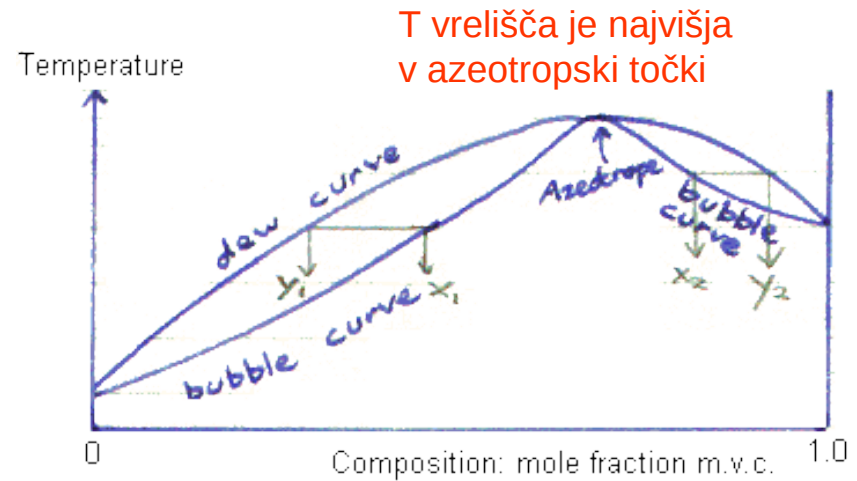
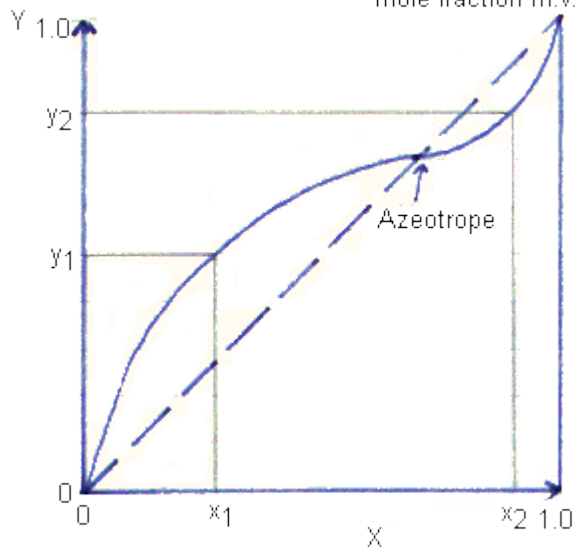
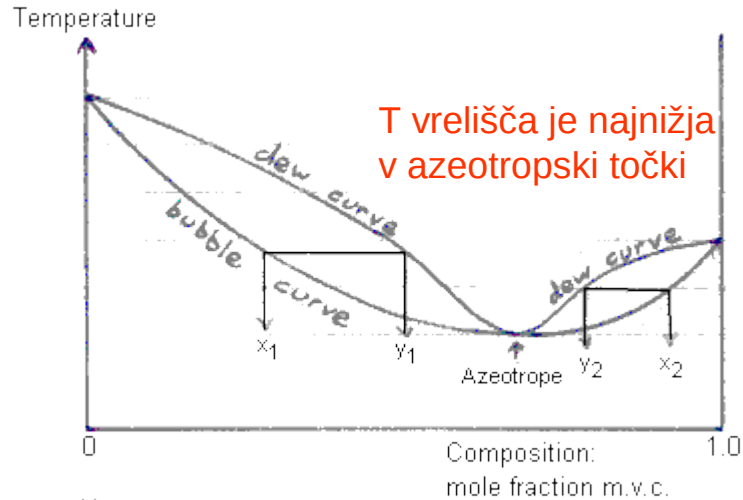
Pri čistih tekočinah je vrelišče tekočine pri danem tlaku snovna lastnost.

V zmesi dveh komponent obstaja ravnotežje med hlapi in tekočo fazo. V hlapih je več hlapnejše komponente, v tekoči fazi pa več manj hlapne komponente.

Azeotropske zmesi: zmes, katere hlapi imajo enako sestavo kot tekoča faza. Sestava, pri kateri se to zgodi je azeotropska točka.

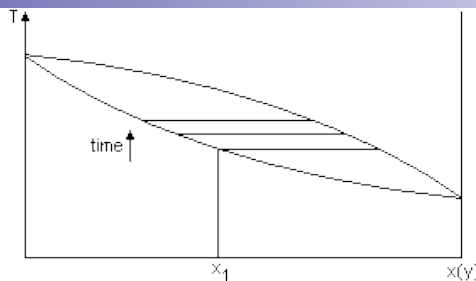
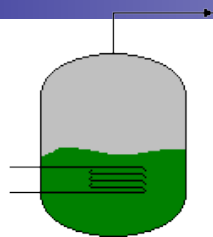
(e.g. Acetone-Chloroform)

e.g. Acetone - CS_2 , Chloroform - methanol)

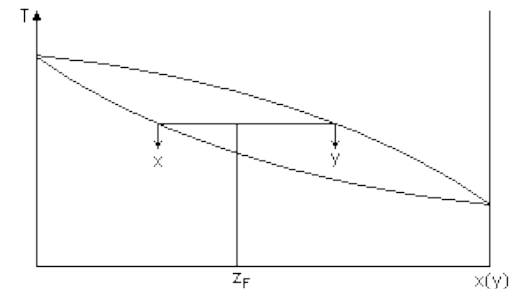
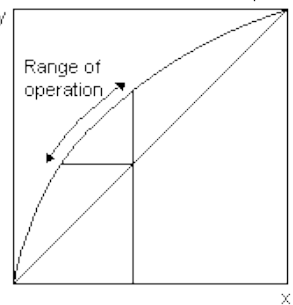
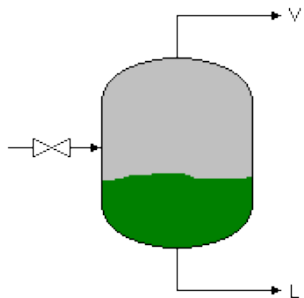


Destilacijske metode

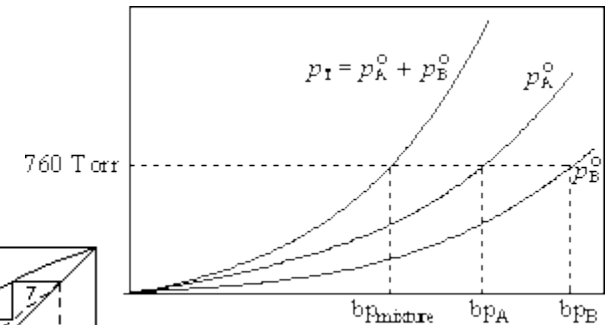
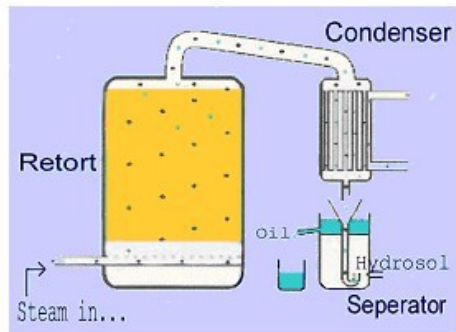
Diferencialna destilacija



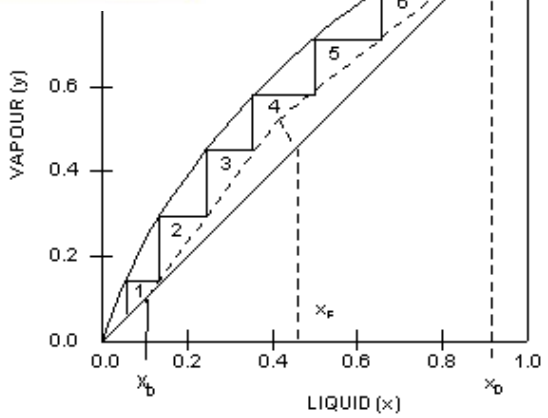
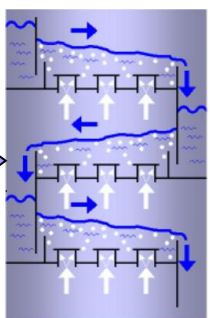
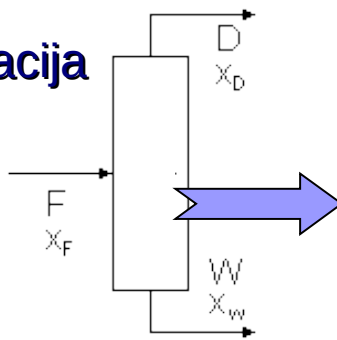
Ravnotežna destilacija



Destilacija z vodno paro



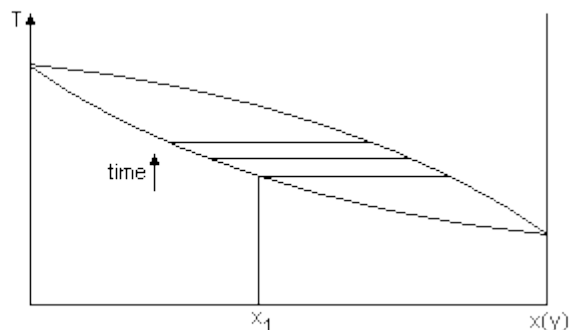
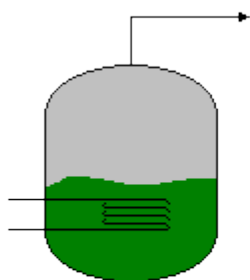
Rektifikacija



Diferencialna destilacija

Najenostavnejša, enostopenjska, šaržna, nestacionarna destilacijska metoda.

Poteka v eni ravnotežni stopnji

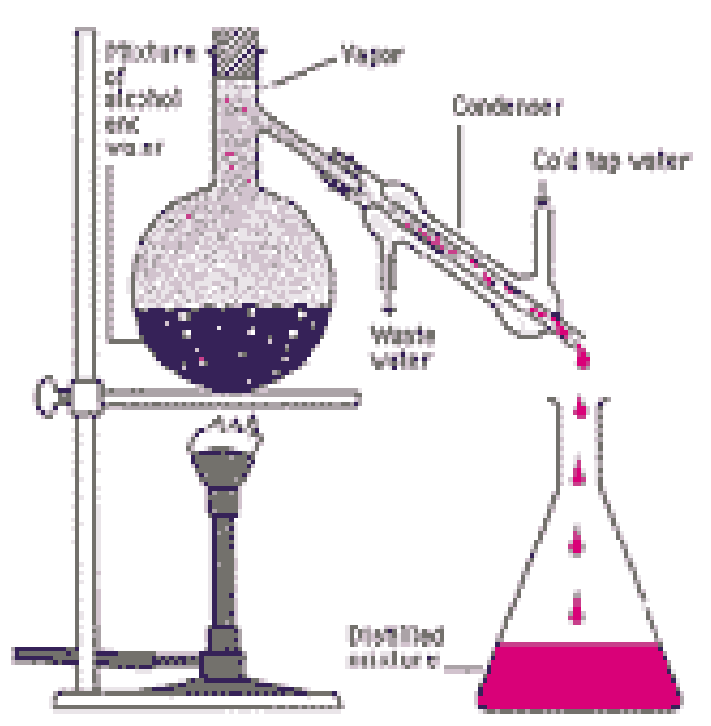


Pri diferencialni destilaciji izvedemo ločitev zmesi hlapnih tekočin s šaržnim načinom dela tako, da del zmesi odparimo in skondeziramo.

Dobimo dva produkta:

DESTILAT in

DESTILACIJSKI OSTANEK.



Diferencialna destilacija

Destilacijski kotel, kjer zmes indirektno ogrejemo in delno uparimo

Ravnotežna stopnja: pri danem P
ravnotežje med parno in tekočo fazo

Hlapnost posamezne komponente:

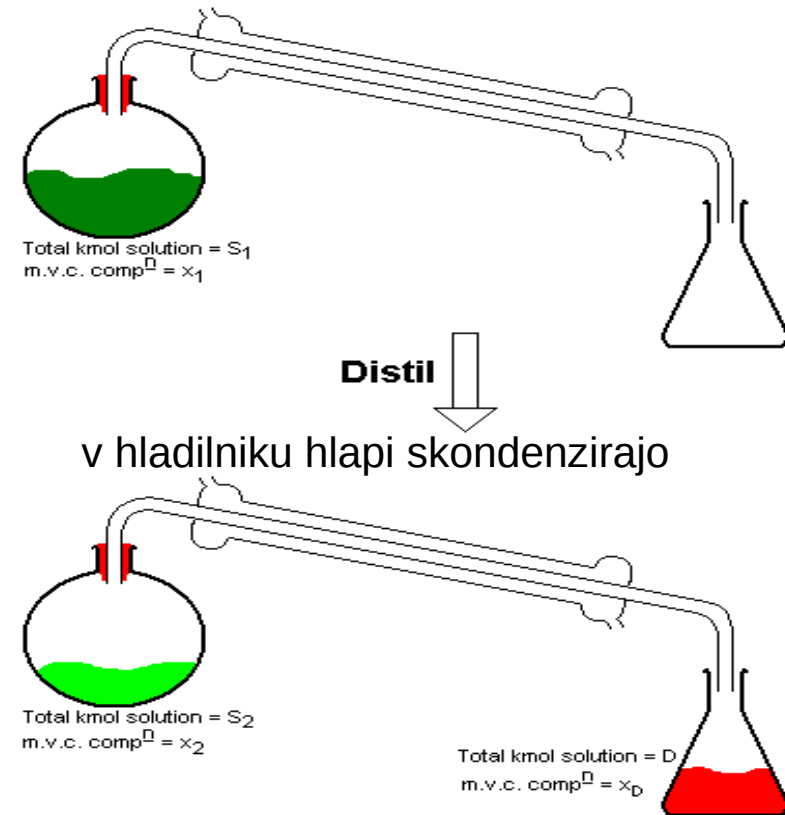
$$y_a/x_a \quad \text{oz} \quad y_b/x_b$$

Relativna hlapnost

$$\alpha = \frac{y_a/x_a}{y_b/x_b} = \frac{y_a(1-x_a)}{x_a(1-y_a)}$$

$$y_b = (1 - y_a)$$

$$x_b = (1 - x_a)$$

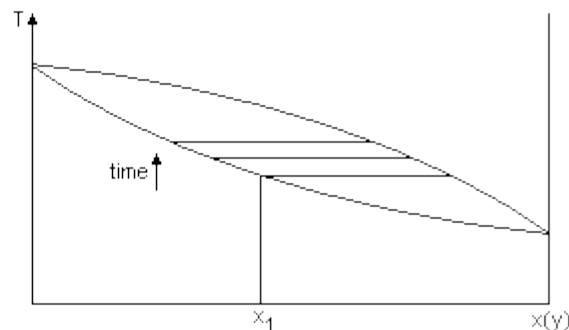
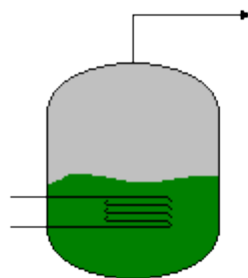


DESTILACIJSKI
OSTANEK

DESTILAT

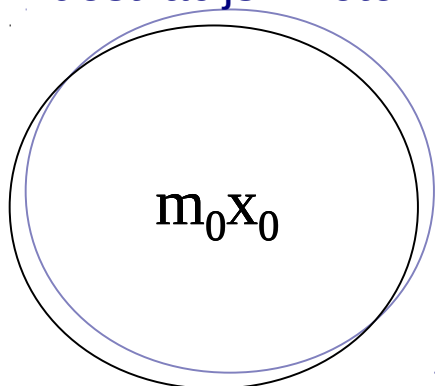
Diferencialna destilacija

Nestacionarni pogoji



po določenem času

destilacijski kotel

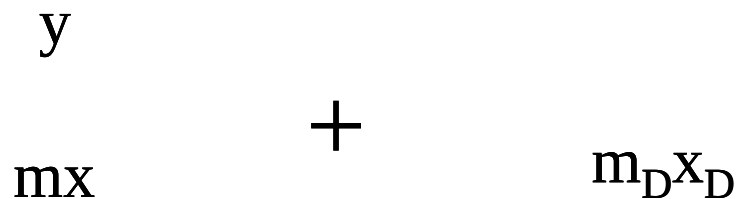


Sestava tekočine v kotlu se s časom spreminja in z njo tudi ravnotežna sestava hlapov.

Sprememba s časom v:

- masi m
- sestavi tekoče in parne faze x, y
- temperaturi vrelišča zmesi

hladilnik



Diferencialna masna bilanca za kotel

$$- y dm = - d(m x)$$

x ... delež hlapnejše komponente v tekoči fazi

y ... delež hlapnejše komponente v parni fazi

Diferencialna destilacija

Diferencialna masna bilanca za kotel

$$-y \, dm = -d(m \, x)$$

deleža hlapnejše komponente v tekoči fazi ... x ... v parni fazi ... y

$$-y \, dm = -m \, dx - x \, dm$$

$$(y-x) \, dm = m \, dx$$

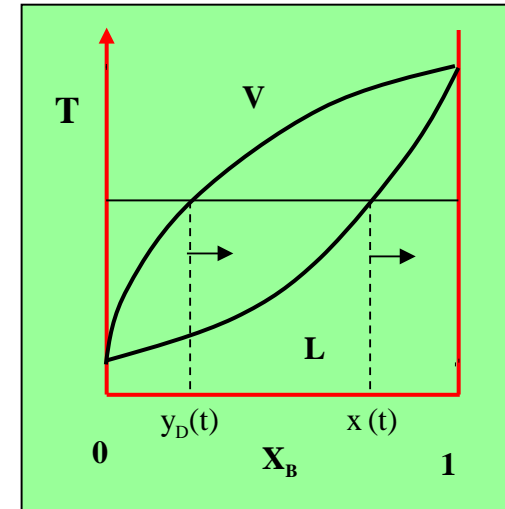
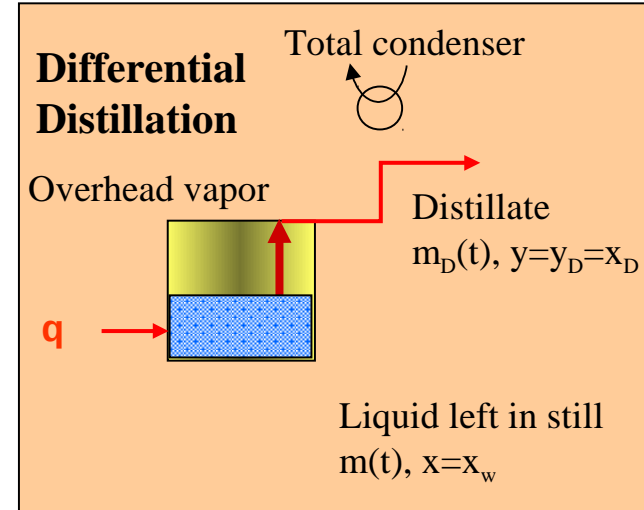
$$\frac{dm}{m} = \frac{dx}{(y-x)}$$

Enačbo integriramo v mejah: $m = m_0, x = x_0$

$$m = m, x = x$$

in dobimo:

$$\int_{m_0}^m \frac{dm}{m} = \int_{x_0}^x \frac{dx}{(y-x)}$$

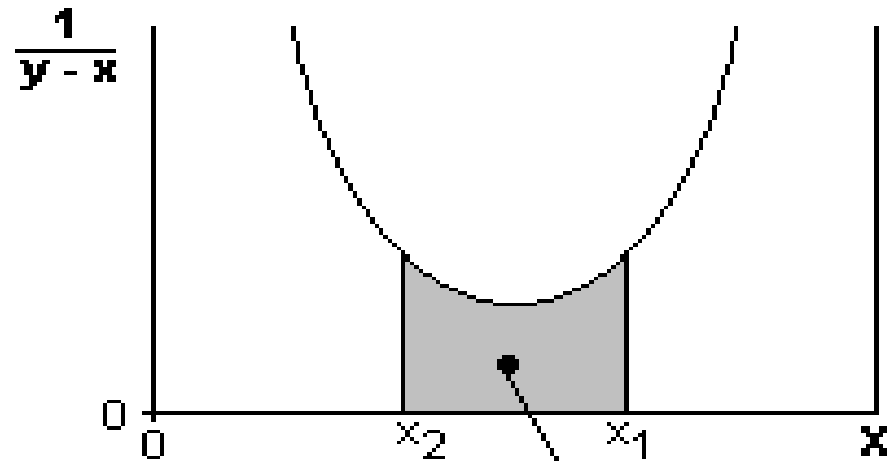
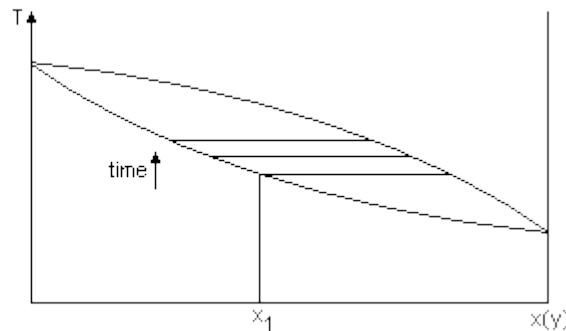
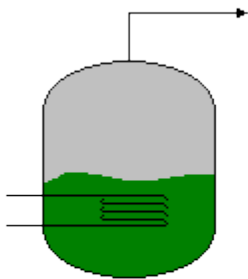


Diferencialna destilacija

Rayleighova enačba:
$$\ln \frac{m}{m_0} = \int_{x_0}^x \frac{dx}{(y-x)}$$

$y = f(x)$ ravnotežne koncentracije hlapnejše komponente v parni in tekoči fazi.

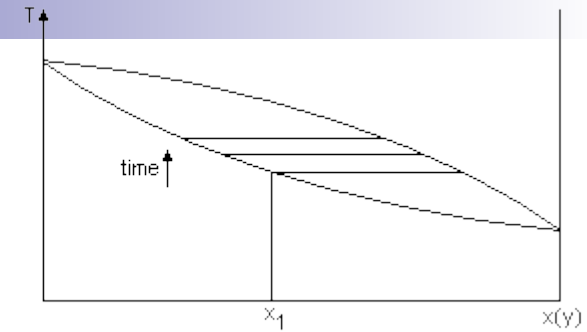
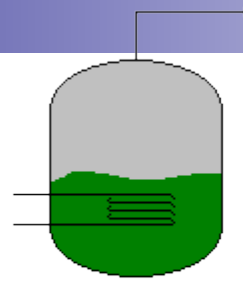
Rešitev Rayleighovega integrala je zaradi neznanе zveze $y = f(x)$ za širše intervale koncentracij med začetno in končno sestavo grafična ali numerična.



površina = $\ln (m/m_0)$

ko sta x in y utežna deleža

Diferencialna destilacija



Rayleighova enačba :

$$\ln \frac{m}{m_0} = \int_{x_0}^x \frac{dx}{(y-x)}$$

Rešitev Rayleighovega integrala v ozkem intervalu koncentracij, ko predpostavimo linearno odvisnost parne in tekoče faze, $\alpha_{AB} \approx \text{konst.}$, lahko integral izračunamo, če poznamo $y_A = f(x_A)$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{AB} &= \frac{y_A/x_B}{y_B/x_B} = \frac{y_A(1-x_A)}{x_A(1-y_A)} \\ y_b &= (1-y_A) \\ x_b &= (1-x_A) \end{aligned} \right\} \int_{m_0}^m \frac{dm}{m} = \int_{x_{A0}}^{x_A} \frac{dx_A}{(y_A - x_A)}$$

$$y_A = f(x_A)$$

$$y_A = \frac{\alpha_{AB} x_A}{1 + x_A(\alpha_{AB} - 1)}$$

$$m = m_0 \exp \left\{ \frac{-1}{(\alpha_{AB} - 1)} \left[\ln \frac{x_{A0}}{x_A} + \alpha \ln \frac{(1-x_A)}{(1-x_{A0})} \right] \right\}$$

Diferencialna destilacija

Masna bilanca:

$$m_0 = m + m_D$$

$$m_0 x_{ut0} = m x_{ut} + m_D X_{utD}$$

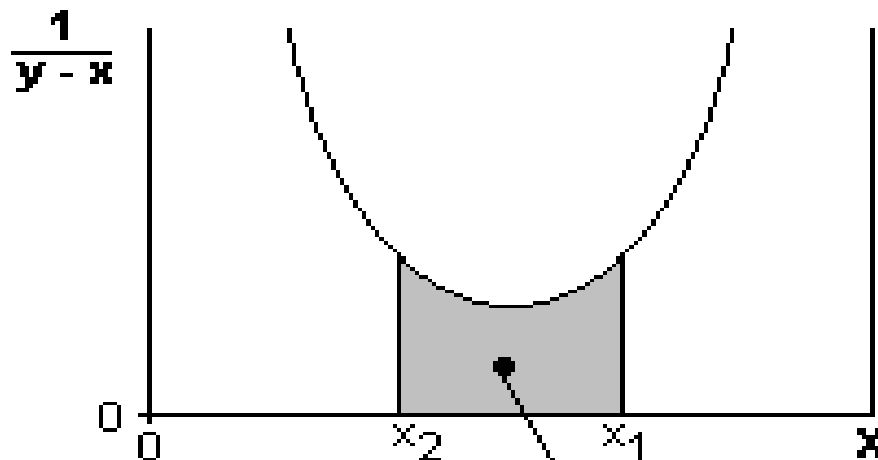
Množinska bilanca

$$n_0 = n + n_D$$

$$n_0 x_0 = n x + n_D x_D$$

x_i .. molski delež, x_{ut} .. masni delež

Povprečna molska masa: $M = \frac{\sum x_i \cdot M_i}{\sum (x_{ut.} / M_i)}$



površina = $\ln(n/n_0)$

ko sta x in y molska deleža

Preračun masni – molski delež

$$x_{ut.} = \frac{X_i \cdot M_i}{\sum X_i \cdot M_i} \quad x_i = \frac{X_{ut} / M_i}{\sum (X_{ut.} / M_i)}$$

Primer 1: Z diferencialno destilacijo destiliramo zmes etanol - voda. 500 kg zmesi s sestavo 5 ut.% destiliramo toliko časa, da destilacijski ostanek vsebuje še 0.5 ut.% etanola. Kakšna sta masa in sestava destilata? Ravnotežni podatki so priloženi v tabeli:

x (ut.)	y (ut.)	Tvr (°C)
1	6.5	98
3	21.5	96
5	37	92

(predpostavimo idealno zmes $x \rightarrow 0, y = c \cdot x$)

Rešitev:

$$m_0 = 500 \text{ kg}$$

$$x_0 = 0.05$$

$$\begin{array}{l}
 y = c \cdot x \\
 6.5 = c \cdot 1 \rightarrow c = 6.5 \\
 21.5 = c \cdot 3 \rightarrow c = 7.1 \\
 37 = c \cdot 5 \rightarrow c = 7.4
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} y = c \cdot x \\ 6.5 = c \cdot 1 \rightarrow c = 6.5 \\ 21.5 = c \cdot 3 \rightarrow c = 7.1 \\ 37 = c \cdot 5 \rightarrow c = 7.4 \end{array}} \right\} \begin{array}{l} y = 7 \cdot x \\ c = 7 \end{array}$$

$$x_D = \frac{m_0 \cdot x_0 - m \cdot x}{m_D} = \frac{500 \cdot 0.05 - 340.6 \cdot 0.005}{159.4}$$

Rayleighova enačba:
$$\ln \frac{m}{m_0} = \int_{x_0}^x \frac{dx}{(y-x)}$$

$$\ln \frac{m}{m_0} = \int_{x_0}^x \frac{dx}{(7x-x)} = \int_{x_0}^x \frac{dx}{6x} = \frac{1}{6} \cdot (\ln x - \ln x_0)$$

$$\ln \frac{m}{m_0} = \frac{1}{6} \cdot \ln \frac{0.5}{5} = -0.384$$

$$\frac{m}{m_0} = e^{-0.384}$$

$$m = m_0 \cdot e^{-0.384} = 340.6 \text{ kg}$$

Masna bilanca:

$$m_0 = m + m_D \rightarrow m_D = 500 - 340.6 = 159.4 \text{ kg}$$

$$m_0 x_{ut0} = m x_{ut} + m_D X_{utD}$$

$$x_D = 0.145$$

Primer 2: Z diferencialno destilacijo smo ločevali vodno raztopino etanola, ki je vsebovala **20 mol %** hlapnejše komponente. Začetna masa raztopine je bila **1.5 kg**. Vodna raztopina je ob koncu destilacije vsebovala še **5 mol %** hlapnejše komponente. V koncentracijskem območju destilacije (molski deleži) je vrednost Rayleighovega integrala znašala **0.44**. Izračunajte maso in sestavo destilata ob koncu destilacije.

$M_{\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}} = 46 \text{ g/mol}$ in $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ g/mol}$

Rešitev:

ploščina Rayleigh-ovega integrala, kadar sestave izrazimo v molskih deležih predstavlja logaritemsko razmerje množin

Izračunamo začetno množino:

$$n_0 = \frac{m_0}{M_0} = \frac{1500\text{g}}{23.6\frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 63.65 \text{ mol}$$

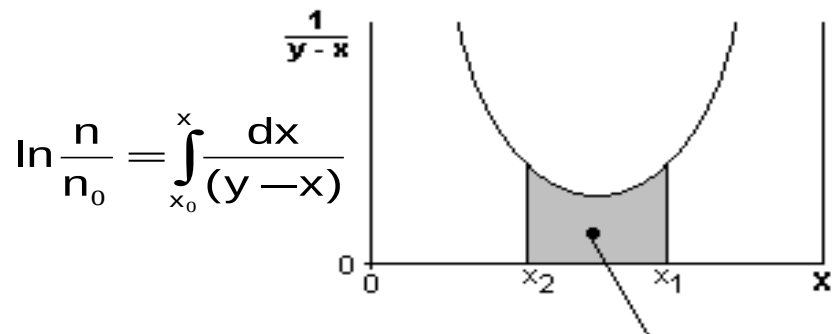
Povprečna molska masa:

$$M_0 = 0.2 \cdot 46 + 0.8 \cdot 18 = 23.6 \text{ g/mol}$$

$$M = 0.05 \cdot 46 + 0.95 \cdot 18 = 19.4 \text{ g/mol}$$

$$m = n \cdot M = 40.93 \cdot 19.4 = 794 \text{ g}$$

$$m_D = m_0 - m = 1500 - 794 = 706 \text{ g}$$



površina = $\ln(n/n_0) = -0.44$ ko sta x in y molska deleža

$$\ln \frac{n}{n_0} = -0.44$$

$$n = n_0 \cdot e^{-0.44}$$

$$n = 63.56 \cdot e^{-0.44} = 40.93 \text{ mol}$$

$$n_D = n_0 - n = 63.56 - 40.93 = 22.62$$

$$x_D = \frac{n_0 \cdot x_0 - n \cdot x}{n_D} = \frac{63.56 \cdot 0.2 - 40.93 \cdot 0.05}{22.62} = 0.47$$

Primer 3: Vodno raztopino etanola šaržno destiliramo toliko časa, da v kotlu ostane 1/3 začetne mase. Začetna masa raztopine, ki je vsebovala 20 mol% etanola je bila 1.5 kg. Kakšni sta bili masa in sestava destilata, če lahko v koncentracijskem območju destilacije utežno sestavo hlapov izrazimo z linearno zvezo: $y = 2.5x$. Kakšna bi bila sestava destilata, če bi isto raztopino etanola destilirali toliko časa, da bi v kotlu ostala polovica začetne mase, pri tem pa bi utežno sestavo hlapov izrazili z isto linearno zvezo? ($M_{\text{etanola}} = 46\text{g/mol}$, $M_{\text{vode}} = 18\text{g/mol}$)

Rešitev: (a) masa in sestava destilata:

Poiskati je treba koncentracijo etanola v kotlu ob koncu destilacije: uporabimo Rayleighiv integral

$$\ln \frac{m}{m_0} = \int_{x_0}^x \frac{dx}{(y-x)} = \int_{x_0}^x \frac{dx}{(2.5x-x)} = \frac{1}{1.5} \int_{x_0}^x \frac{dx}{x}$$

$$\ln \frac{m}{m_0} = \frac{1}{1.5} \cdot \ln \frac{x}{x_0}$$

Masna milanca: $m = (1/3) \cdot m_0 = 1.5/3 = 0.5 \text{ kg}$ $m_D = m_0 - m = 1 \text{ kg}$

$$1.5 \cdot \ln \frac{0.5}{1.5} = \ln \frac{x}{x_0} = -1.65$$

Koncentracija je izražena v utežnih deležih: molske deleže je treba spremeniti v utežne

$$x_{\text{ut.}} = \frac{X_i \cdot M_i}{\sum X_i \cdot M_i} = \frac{46 \cdot 0.2}{(46 \cdot 0.2 + 18 \cdot 0.8)} = 0.39 \quad \ln \frac{x}{0.39} = -1.65 \Rightarrow x = 0.39 \cdot e^{-1.65} = 0.075$$

Primer 3

Sestava destilata: dobimo iz masne bilance:

$$x_D = \frac{m_0 \cdot x_0 - m \cdot x}{m_D} = \frac{1.5 \cdot 0.39 - 0.5 \cdot 0.075}{(1.5 - 0.5)} = 0.55$$

(b): če v kotlu ostane polovica začetne mase in upoštevamo enako zvezo med x in x velja:

$$m = 1/m_0 = 0.75 \text{ kg} = m_D$$

$$\ln \frac{m}{m_0} = \frac{1}{1.5} \cdot \ln \frac{x}{x_0}$$

$$1.5 \cdot \ln \frac{0.75}{1.5} = \ln \frac{x}{0.39} = -1.039$$

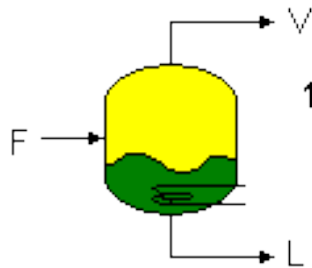
$$x/x_0 = 0.35 \text{ in } x = 0.138$$

$$x_D = \frac{m_0 \cdot x_0 - m \cdot x}{m_D} = \frac{1.5 \cdot 0.39 - 0.75 \cdot 0.138}{0.75} = 0.642$$

Rektifikacija

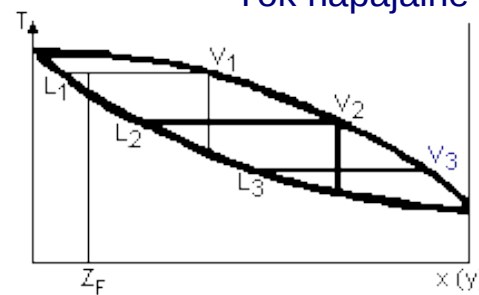
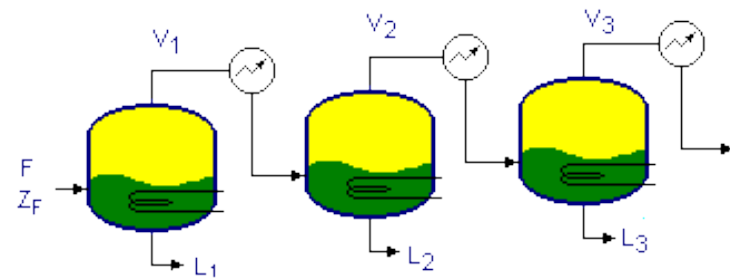
V primerih, ko z diferencialno ali ravnotežno destilacijo ne moremo doseči zadovoljive ločitve, uporabljamo **rektifikacijo**.

Poteka kontinuirno, vzpostavi se stacionarno stanje, ločitev je v večih ravnotežnih stopnjah



1 Equilibrium Stage

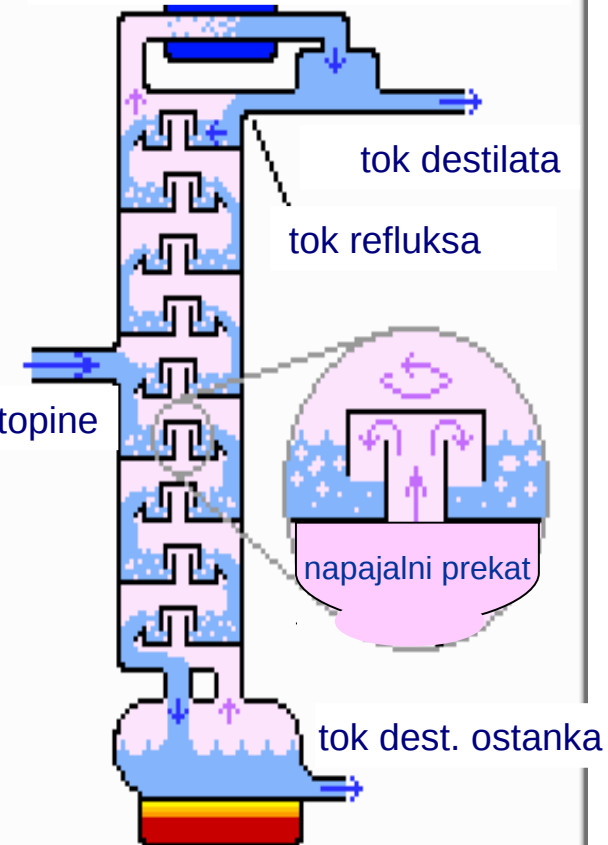
V is in equilibrium with L (hopefully !)



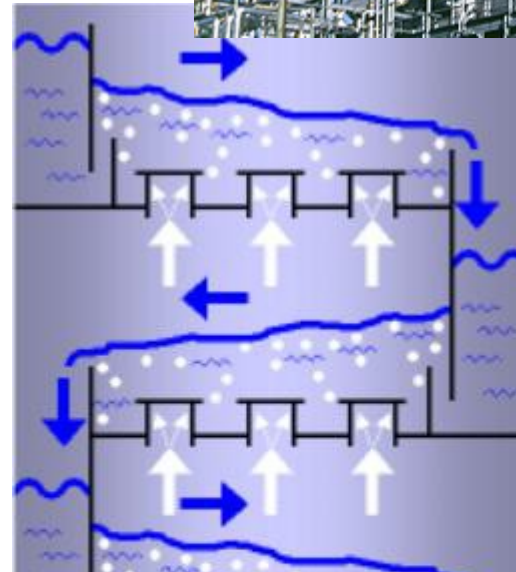
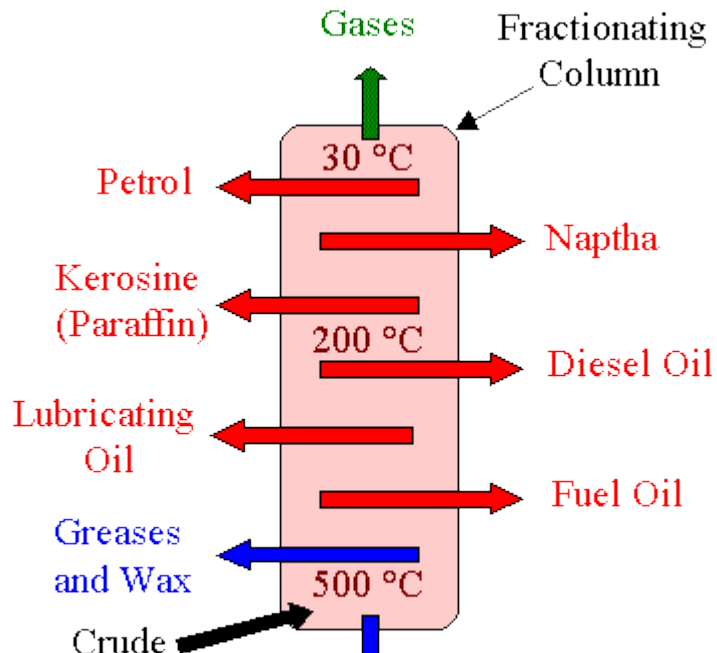
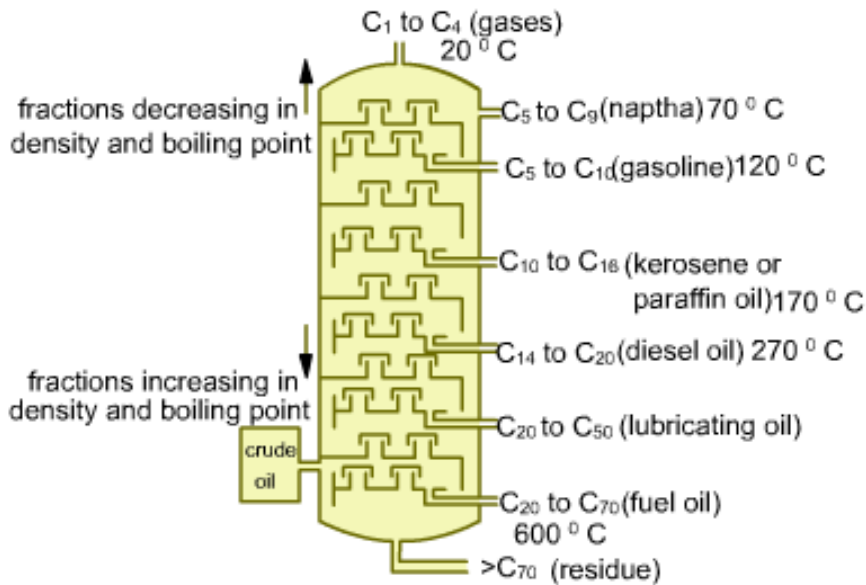
Tok napajalne raztopine

Kolona s prekati:

kontinuirna destilacija



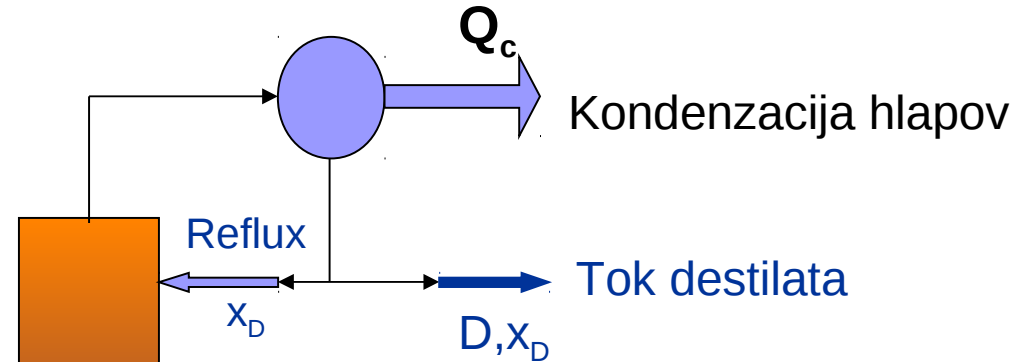
Fractional Distillation



Rektifikacija

Del kondenziranih hlapov, ki ga imenujemo **refluks**, nazaj v destilacijski kotel tako, da pride na svoji poti v čim tesnejši stik s hlapi, ki iz kotla izhajajo.

Tok napajalne zmesi F, x_F



Kolona s polnilom:

Intalox-sedlo



INTALOX SADDLE



PALL RING

Palovi-prstan

Raschingo v prstan



RASCHIG RING



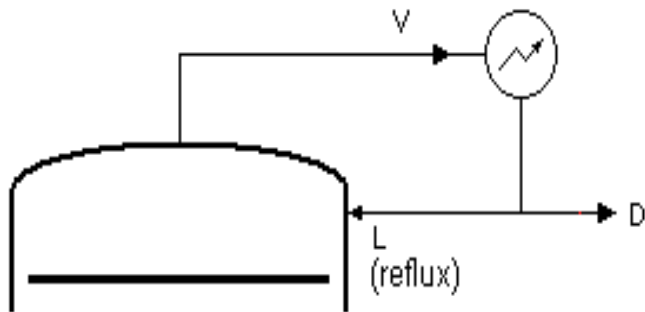
BERL SADDLE

Berlovo-sedlo

Tok destilacijskega ostanka W, x_w

Ogrevanje kotla Q

Rektifikacija - ravnotežne stopnje



$$R = \frac{L}{D}$$

Refluksno razmerje R;

$$R = L / D$$

$$V = L + D$$

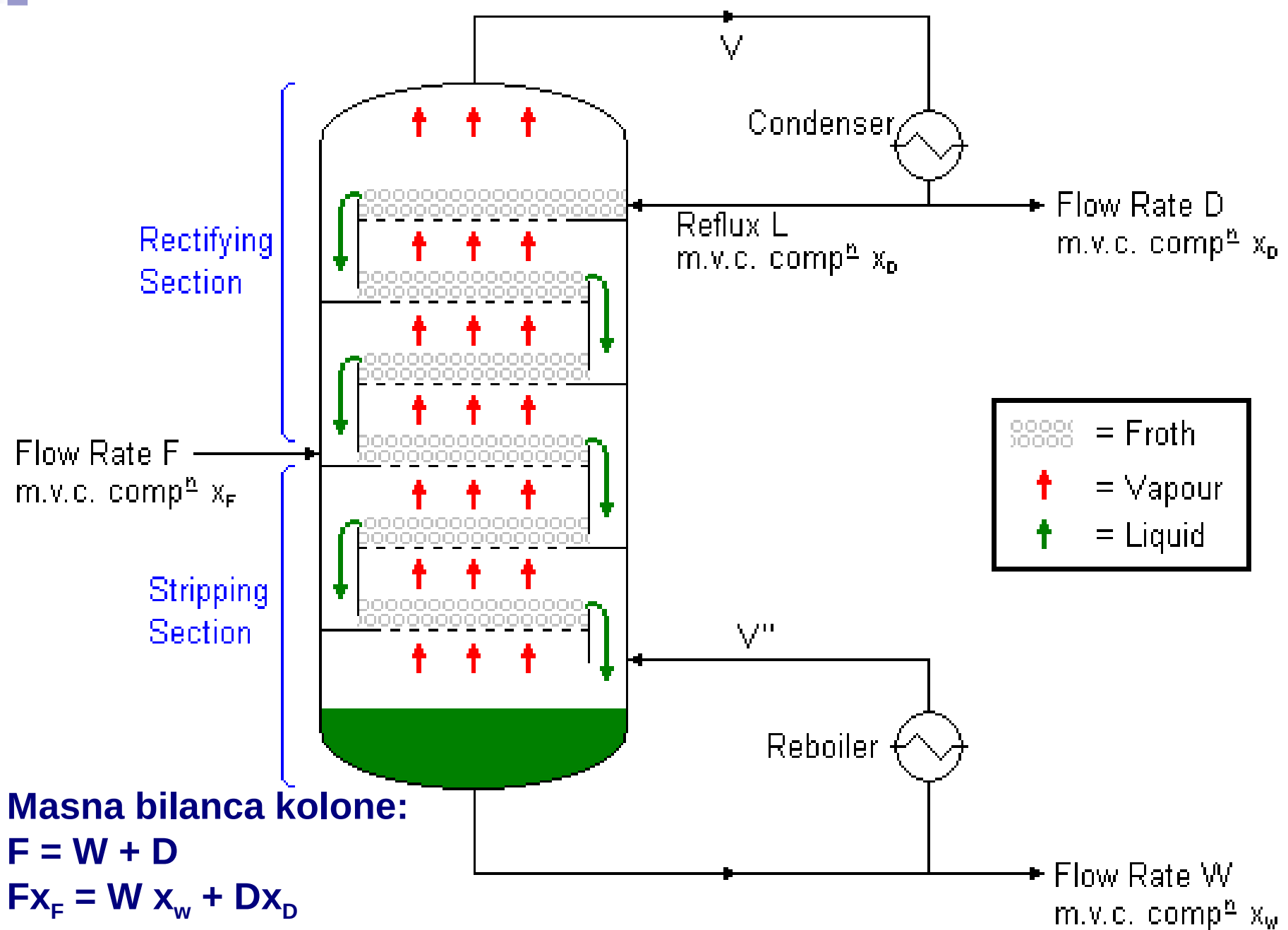
hlapi imajo enako sestavo kot destilat

$$L / V = R / (R + 1)$$

Snovna in toplotna izmenjava: L – V

Ko vstopata na prekat nista v ravnotežju

Ko prekat zapuščata sta v ravnotežju



- ○ ○ ○ ○ = Froth
- ↑ = Vapour
- ↓ = Liquid

Masna bilanca kolone:
 $F = W + D$
 $Fx_F = Wx_W + Dx_D$

Sušenje

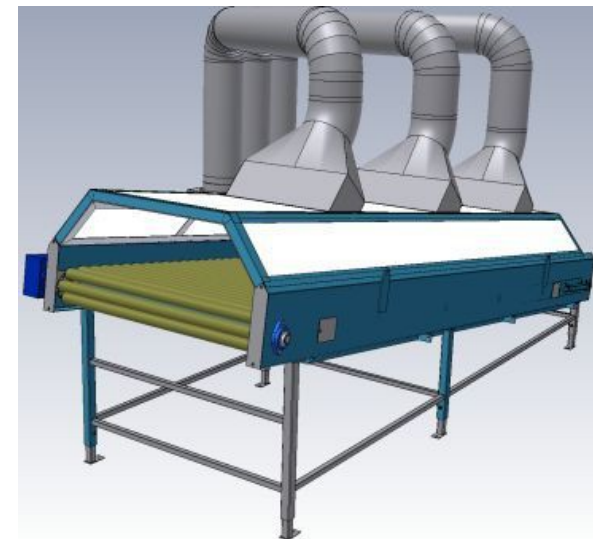
je operacija, pri kateri iz mokre trdne snovi odstranjujemo kapljevino z odhlapljanjem in z odparjanjem.

Pri sušenju z odhlapljanjem je temp. vlažne snovi manjša od temp. vrelišča in je hlapanje posledica razlike med parnim tlakom vode v sušečem materialu in parcialnim tlakom vode v zraku, ki obdaja vlažno snov. Vzdržujemo jo tako, da odvajamo hlape s tokom toplega zraka, ob enem pa dovajamo v sušilnik potrebno energijo (za kritje izparilne toplote).

Sušilne naprave:



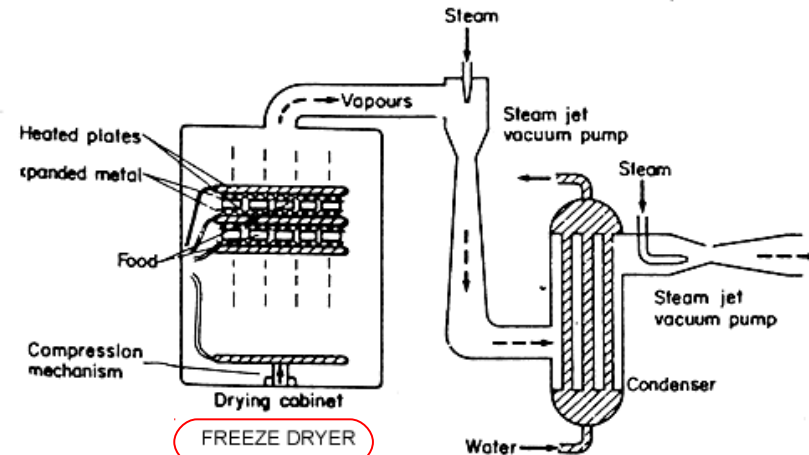
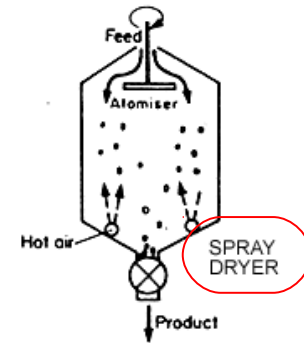
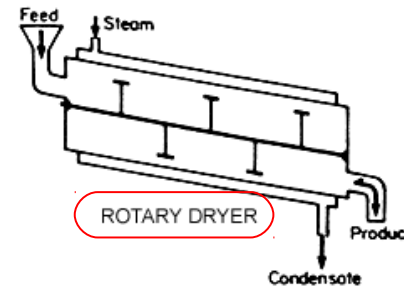
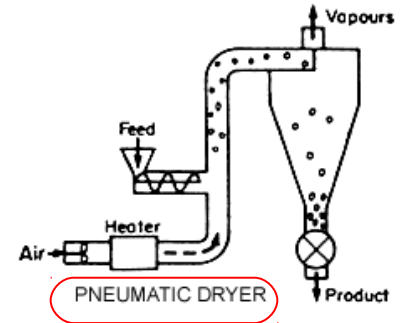
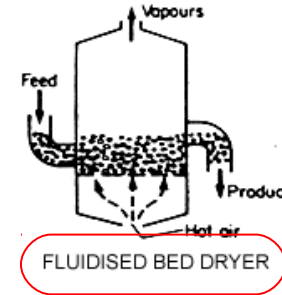
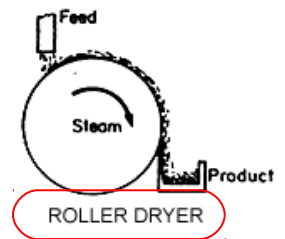
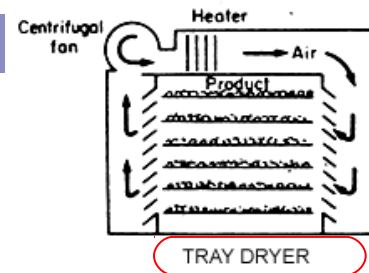
Dishwashing Conveyor System



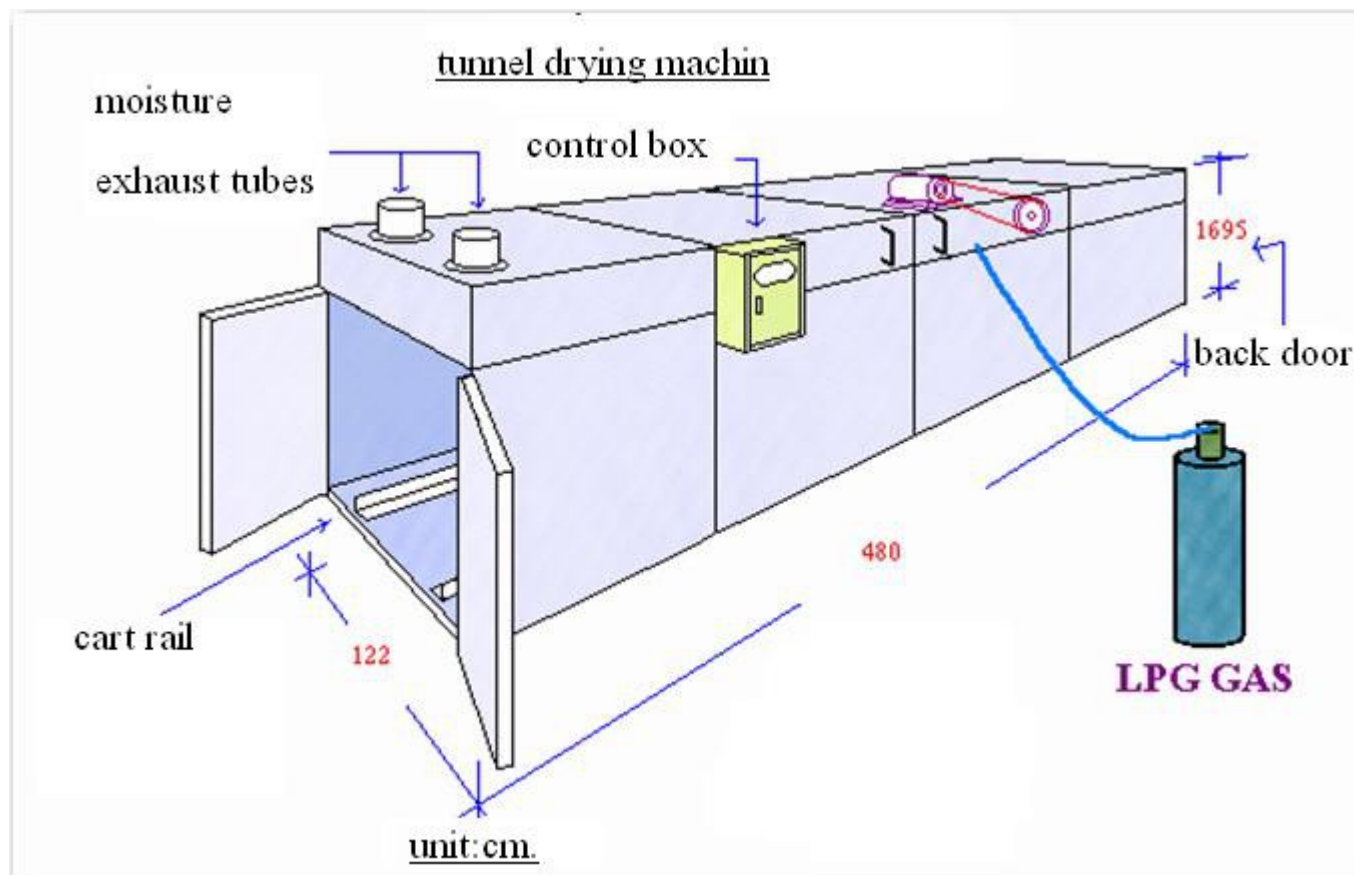
Sušilne naprave:



DRYING TUNNEL - The Pharmagel drying tunnel system is constructed from modular panels in stainless steel AISI 304. The tunnels have a laminar flow air filtration unit, which allows a better and more efficient drying of the capsule products.



Sušilne naprave - tunelski sušilniki



Voda, ki jo vsebuje trdna snov nastopa kot:

- Tekočina, ki lahko odteče (pred sušenjem jo odstranimo, npr s filtriranjem – ceneje)
- Tekočina, ki se drži površine trdne snovi. (ne-higroskopne). Zadržujejo jo velike kapilare. Predstavlja **nevezano vlago**.
- Tekočina, ki jo zadržujejo fine kapilare v materialu. Snovi se obnašajo dokler so mokre kot nehigroskopne, pri določeni vlažnosti pa se začne parni tlak tekočine manjšati, osuše se le do **ravnotežne vlažnosti** (ta je odvisna od vlažnosti sušičnega zraka in snovi same). V materialu ostane **vezana vlaga**.
- Vlaga, ki se veže na molekule materiala (pri kristalizaciji, geli,..) – **vezana vlaga**.

Razlika med vlago, ki jo vsebuje trdna snov in vlago, ki ustreza ravnotežni vlažnosti imenujemo **prosta vlaga**

Vlažnost zraka: količina vodnih hlapov (kg), ki jo vsebuje 1 kg suhega zraka Y

Vlažnost zraka je odvisna od parcialnega tlaka vodnih hlapov in od skupnega tlaka zmesi.

$$\text{Absolutna vlažnost: } Y = \frac{P_A}{P - P_A} \cdot \frac{18}{29} \quad \text{Nasičena absolutnevalažnost: } Y = \frac{P_{AS}}{P - P_{AS}} \cdot \frac{18}{29}$$

Nasičeno vlažen zrak: zrak, ki je v ravnotežju s tekočo vodo pri danem tlaku in temperaturi. Ravnotežni parcialni tlak vode je skoraj neodvisen od skupnega tlaka in enak parnemu tlaku vode.

Relativna vlažnost zraka: (procentna vlažnost) je razmerje v % med dejansko količino vodnih hlapov v 1 kg zraka in količino vodnih hlapov, ki bi jih 1 kg suhega zraka sprejel, da bi dosegel nasičeno vlažnost.

$$\%Y = Y/Y_s \cdot 100 = P_A \cdot (P - P_A) / P_{AS} (P - P_{AS})$$

$$\%RH = (P_A/P_{AS}) \cdot 100$$

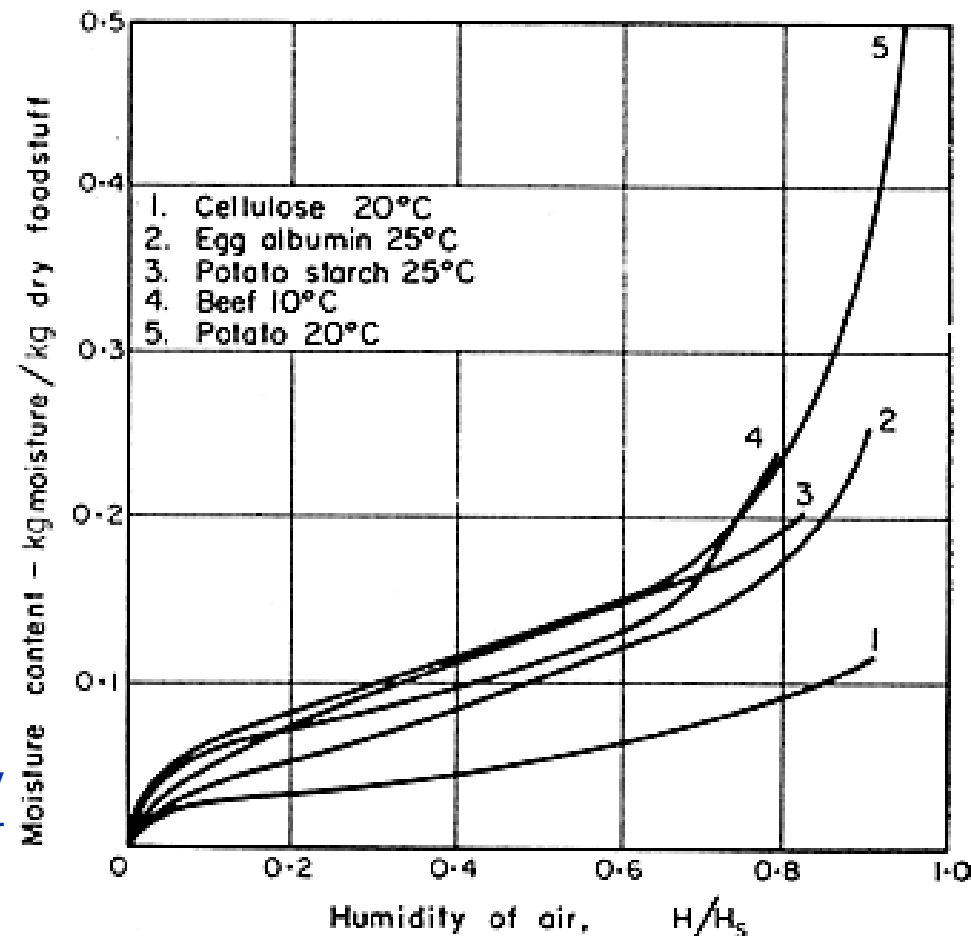
Relativna vlažnost: procentno razmerje med parcialnim in parnim tlakom vode v zraku pri danem tlaku in temperaturi

Tekočina, ki jo zadržujejo fine kapilare v materialu, oz. je kemijsko vezana se imenuje vezana vlaga. Material se osuši se le do **ravnotežne vlažnosti**

- je odvisna od vlažnosti sušečega zraka
- je odvisna od lastnosti sušeče snovi.

graf:

1. celuloza, 2. jajčna beljakovina, 3. krompirjev škrob, 4. govedina, 5. krompir

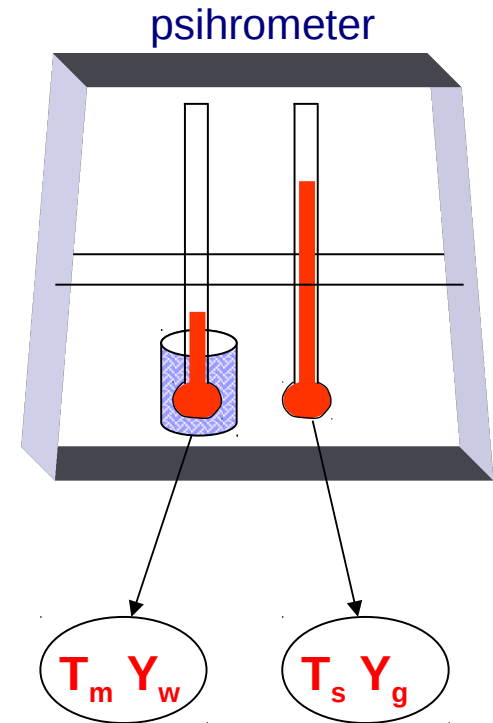


Temperatura mokrega termometra in temperatura adiabatnega nasičenja

Temp adiabatnega nasičenja je tista, ki jo dobita zrak in voda če sta toliko časa v stiku, da pride do ravnotežja med njima, pri čemer postane zrak nasičeno vlažen. Zrak se z ovlaževanjem tudi ohlaja. Zato je pri adiabatnem nasičevanju do ravnotežna temperatura nižja, ker setoplota okolice ohladi, ker voda porablja toploto za izhlapevanje.

Temp. mokrega termometra je stacionarna - ne-ravnotežna temperatura, ki jo doseže majhna količina vode v toku ne-nasičenega zraka z izparevanjem. Zrak se pri tem nasiti z vlago in postane tik ob površini kapljice nasičeno vlažen. Temperatura pa je nižja kot v glavni masi zraka, zaradi izparevanja vode (izparilna toplota).

S psihometrom in psihometrično karto določamo vlažnost zraka



Sušenje : Periode sušilnega procesa

začetna faza: mokra površina sušeče se snovi se ogreva/ohlaja na temperaturo mokrega termometra

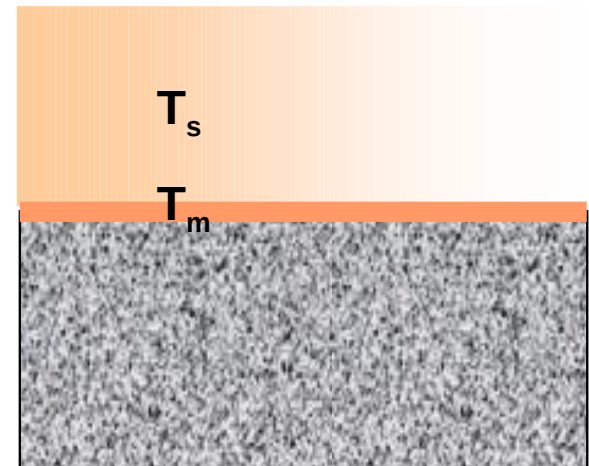
faza konstantne sušilne hitrosti: površina sušeče se snovi je pokrita s filmom vode, ki s obnavlja s kapilarnim dvigom

faza padajoče sušilne hitrosti: kapilarni dvig vode iz notranjosti snovi je počasnejši od izhlapevanja, umik fronte sušenja s površine v notranjost, upor vse debelejšega suhega sloja

Potek sušenja opisujeta:

VLAŽNOST

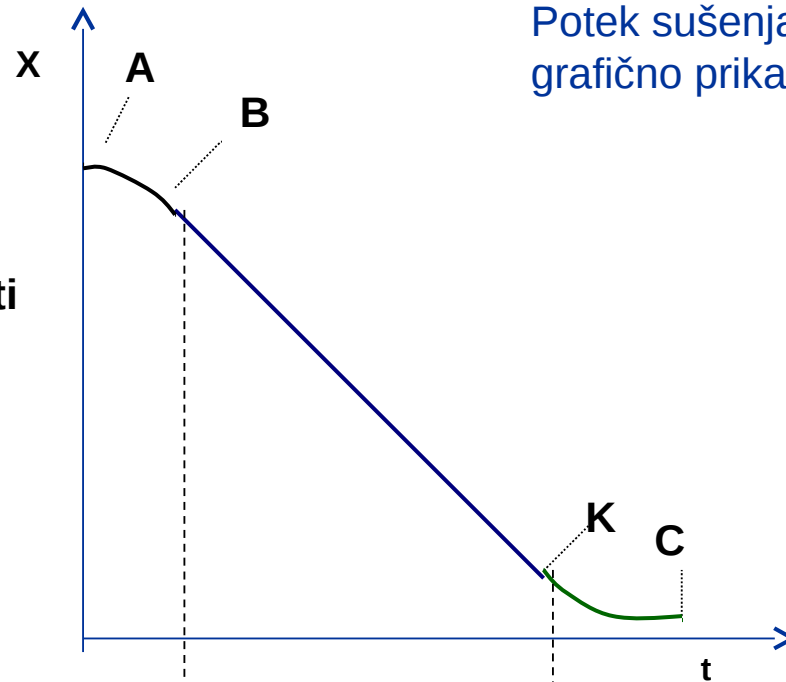
SUŠILNA HITROST



Sušenje :

Periode sušilnega procesa

Diagram odvisnosti
vlažnosti od časa

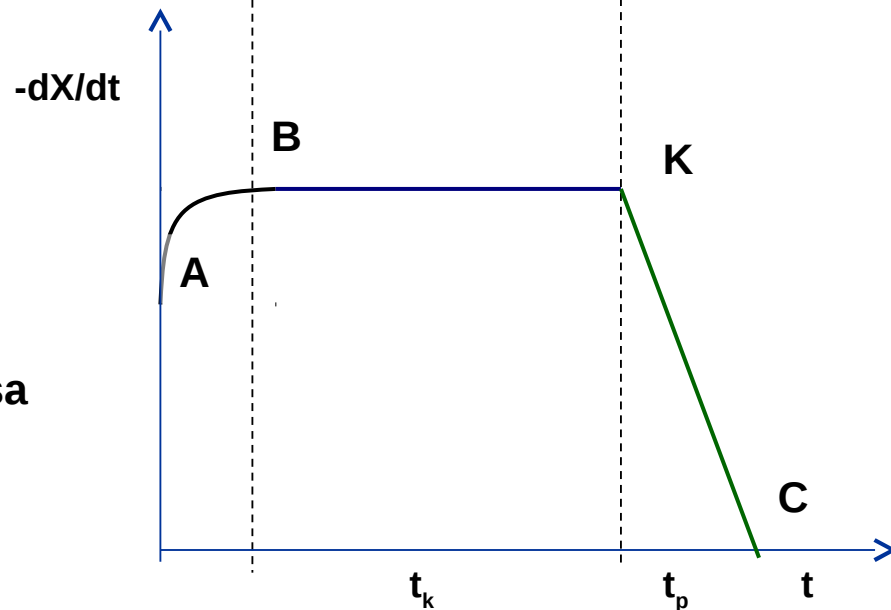


AB - začetna faza

BK - f. konstantne sušilne hitrosti

KC - f. padajoče sušilne hitrosti

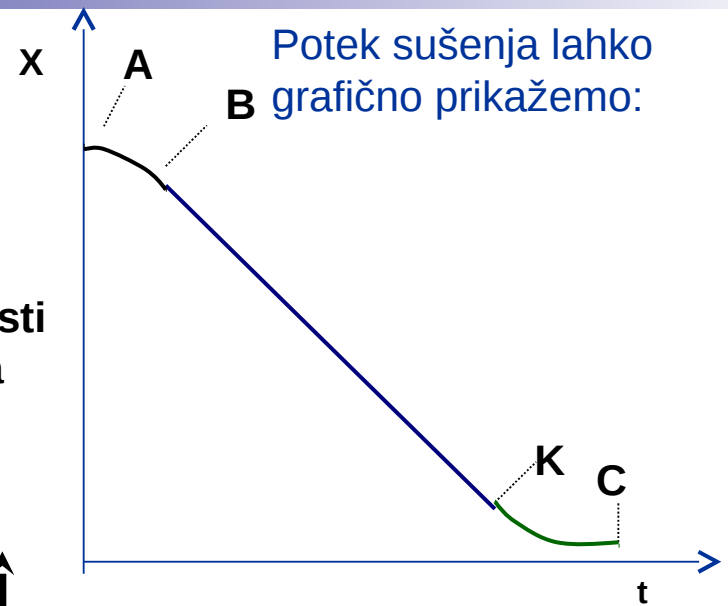
Diagram odvisnosti
sušilne hitrosti od časa



Sušenje :

Periode sušilnega procesa

Diagram odvisnosti
vlažnosti od časa

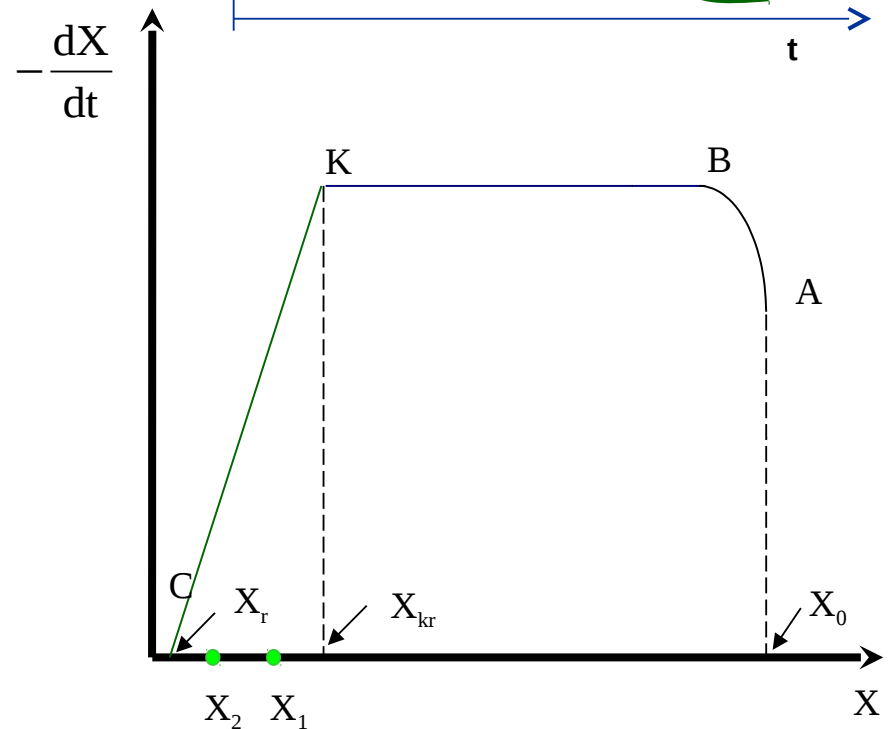


AB - začetna faza

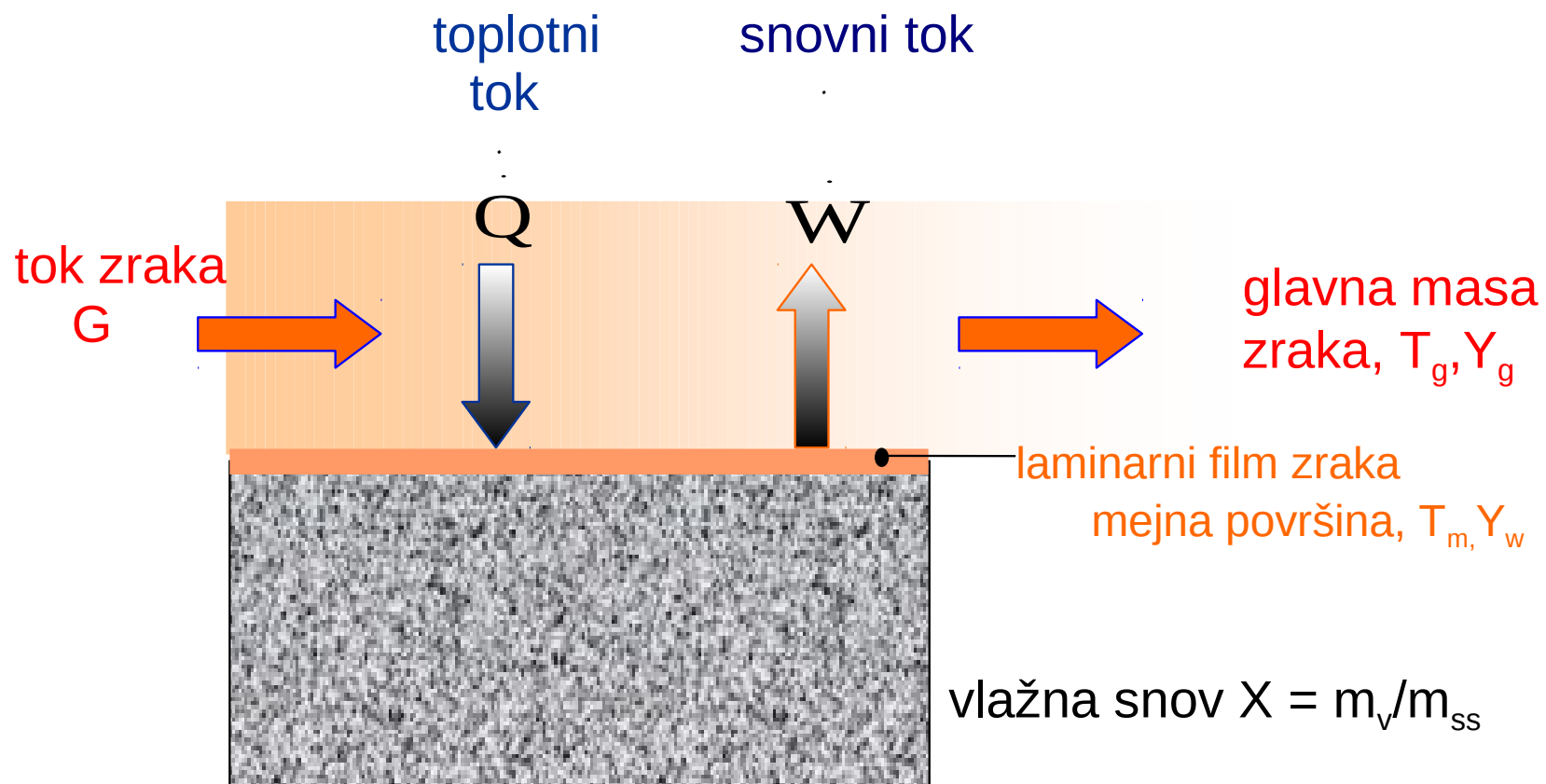
BK - f. konstantne sušilne hitrosti

KC - f. padajoče sušilne hitrosti

Diagram odvisnosti
sušilne hitrosti od
vlažnosti



Pogoji pri adijatnem sušenju v periodi konstantne sušilne hitrosti



Sušenje : Perioda konstantne sušilne hitrosti

koeficienta snovne in toplotne prestopnosti h , k_y

Snovni tok: $\dot{W} = -\frac{\Delta m_{\text{vlage}}}{\Delta t} = -\frac{\Delta X}{\Delta t} \cdot m_{\text{suhe snovi}}$

$$\dot{W} = k_y \cdot A \cdot (Y_w - Y_g)$$

Pri eksperimentalni vaji:
snovni tok določimo s tehtanjem

Toplotni tok: Za izračun toplotnega toka potrebujemo še izparilno entalpijo pri temperaturi površine filma vode T_w .

$$q = \dot{W} \cdot \Delta H_{\text{kon}} \quad (\text{pri } T_w)$$

$$q = h \cdot A \cdot (T_g - T_w)$$

Potencialni razliki določimo s psihometrijsko karto

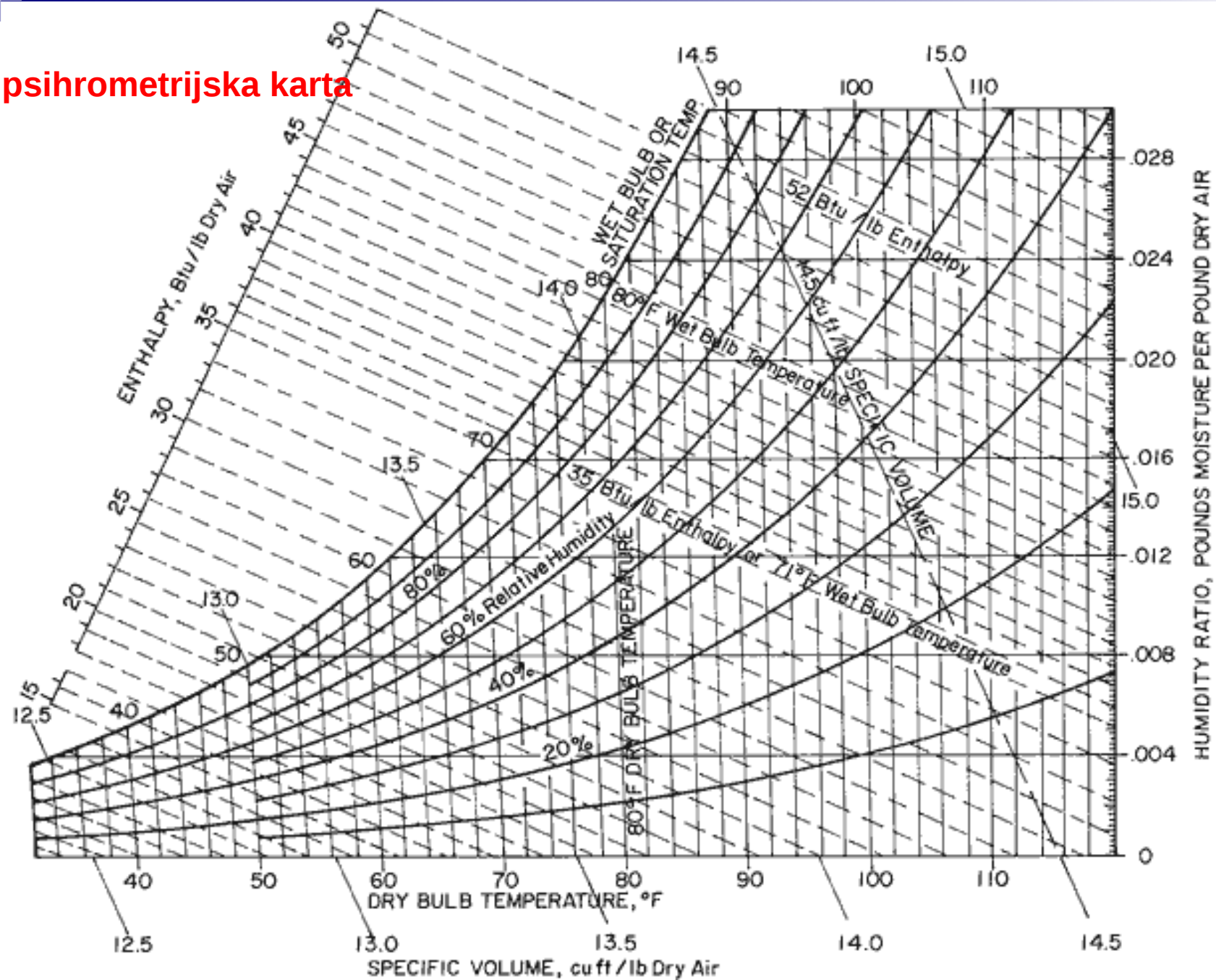
Snovno in toplotno prestopnost pri adiabatnem sušenju z zrakom v tunelskem sušilniku lahko približno ocenimo na podlagi naslednjih korelacij:

$$k_y = 0.00986 \cdot G^{0.8} \quad (\text{kg/m}^2\text{s})$$

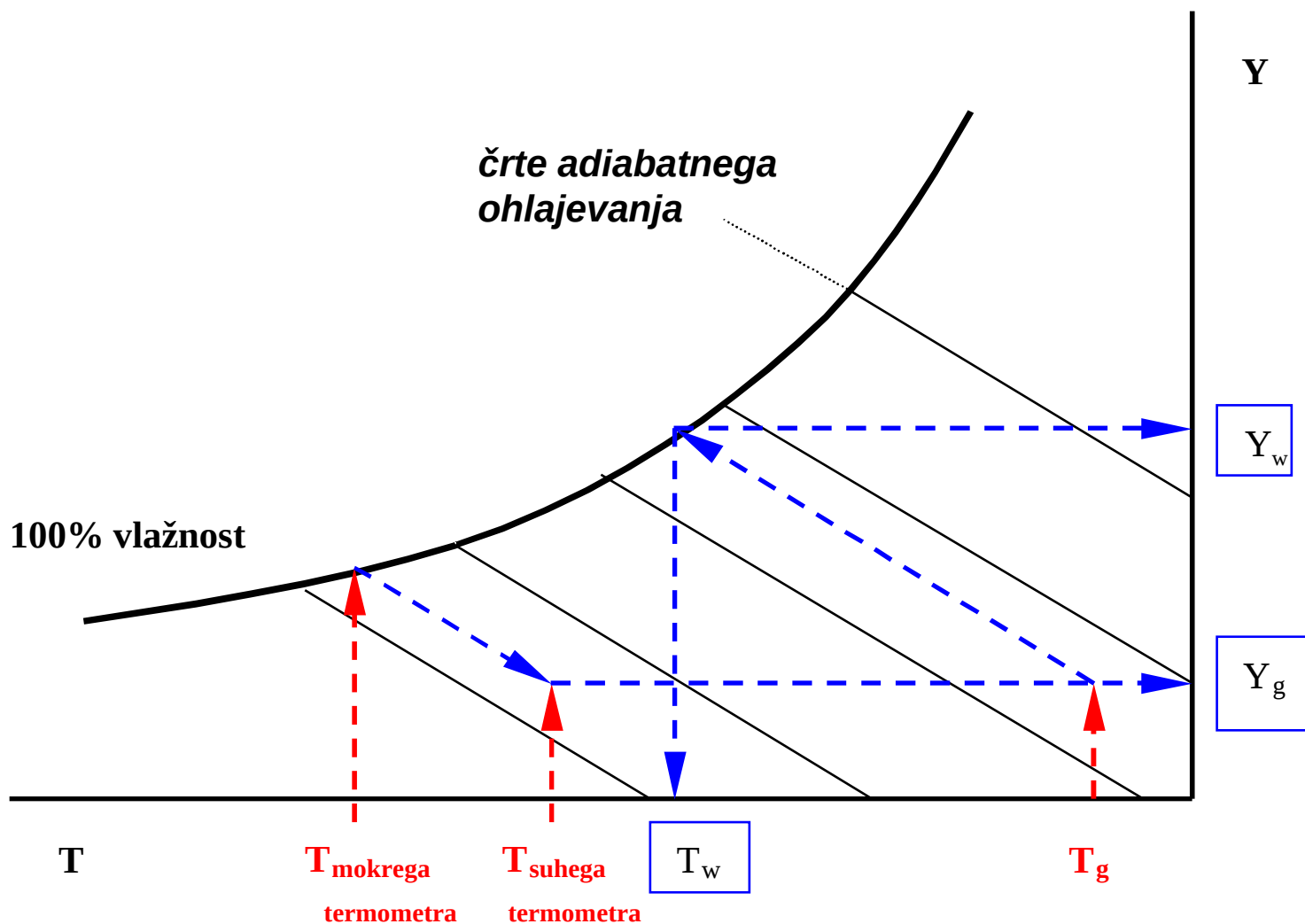
$$h = 14.3 \cdot G^{0.8} \quad (\text{W/m}^2\text{K})$$

G = masni pretok zraka (kg/s)

psihrometrijska karta



Določanje kondicije zraka s psihrometrijsko karto



Sušenje : Perioda padajoče sušilne hitrosti

določamo konstanto sušilnika

Čas sušenja v periodi padajoče sušilne hitrosti

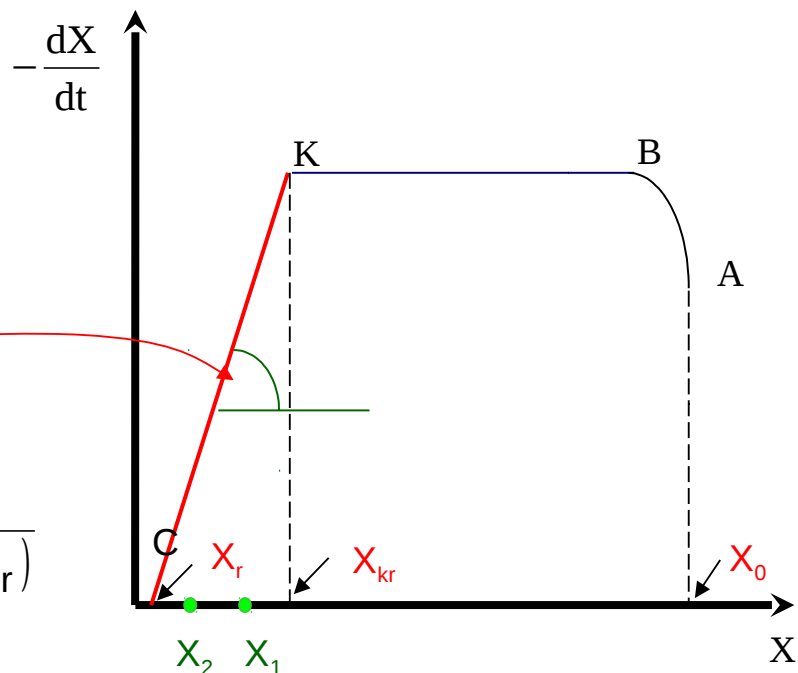
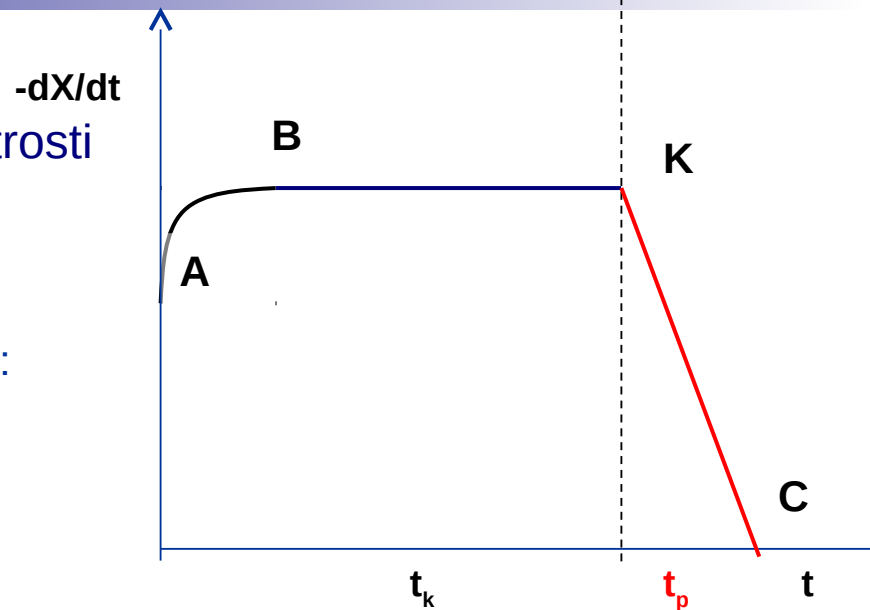
Sušilna hitrost je sorazmerna prosti vlažnosti snovi:

$$-\frac{dX}{dt} = K(X - X_r)$$

Po integraciji enačbe v časovnem intervalu sušenja periode padajoče sušilne hitrosti lahko iz enačbe izrazimo konstanto sušilnika:

$$t_p = t_2 - t_1 = \frac{1}{K} \cdot \ln \frac{X_1 - X_r}{X_2 - X_r}$$

$$K = \frac{-\left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{konst.}}}{X_{kr} - X_r} = \frac{X_0 - X_{kr}}{t_k (X_{kr} - X_r)}$$



Celokupni čas sušenja:

čas(perioda konstantne sušilne hitrosti) + čas(perioda padajoče sušilne hitrosti)

$$t = t_k + t_p$$

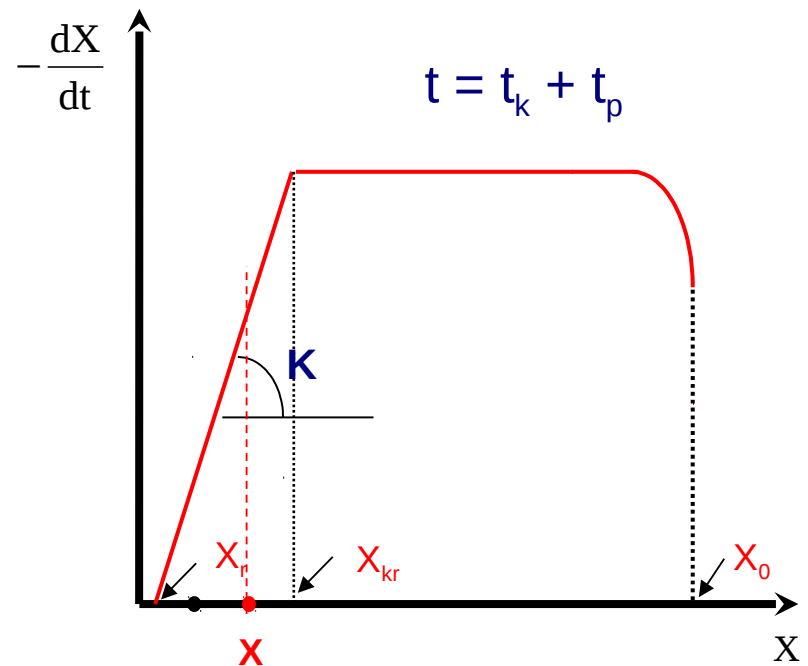
V periodi konstantne sušilne hitrosti je čas sušenja odvisen od vlažnosti materiala in sušilne hitrosti same.

$$-\frac{dX}{dt} = \text{Konst.}$$

$$t_k = \frac{X_0 - X_{kr}}{\left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{konst}}}$$

$$t = t_k + t_p = \frac{X_0 - X_{kr}}{\left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{konst}}} + \frac{1}{K} \cdot \ln \frac{X_{kr} - X_r}{X - X_r}$$

Če toploto materialu, ki se suši dovajamo indirektno (torej ne le z vročim zrakom, ta enačba ne velja.



Eksperimentalna vaja: Meritve in podatki: Sušenje

STEHTAJ:

Masa pladnja:

Masa pladnja+ suha mivka:



IZRAČUNAJ

vlažnost mivke **X**

Temperatura (je konstantna) v sušilniku T_g

Tabela 1: Odčitane mase mivke in izračunane vlažnosti in sušilne hitrosti pri sušenju mivke v odvisnosti od časa.

t (min)	$m_{\text{mivke+pl+v}}$	X (/)	$\Delta X/\Delta t$ (min^{-1})
------------	-------------------------	----------	--

Izmeri in določi kondicijo zraka: (psihrometer) :

$T_m, T_s \rightarrow T_w, Y_g, Y_w$

Eksperimentalna vaja: Meritve in podatki: Sušenje

Rezultati:

Sušilni diagrami:

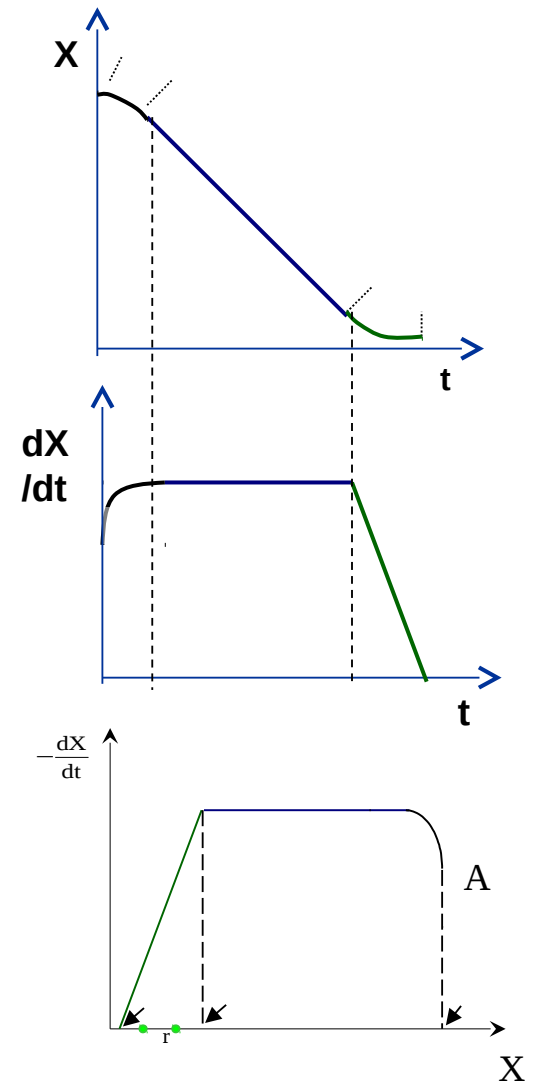
Koeficient snovnega prenosa

k_y (kg m²/s)

Koeficient toplotnega prenosa

h (W/m²s)

Konstanta sušilnika



Primer 1: V adiabatnem sušilniku osušimo material iz začetne vlažnosti $X_1 = 0.19$ na vlažnost $X_2 = 0.06$. Začetna vlažnost materiala je bila manjša od kritične vlažnosti, ki znaša 20 kg vlage na 100 kg sušine. Ravnotežna vlažnost materiala znaša 4 kg vlage na 100 kg sušine. Koliko časa je bilo potrebno sušiti, če sušilna hitrost pri istih pogojih v periodi konstantne sušilne hitrosti znaša $2 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$?

Perioda konstantne sušilne hitrosti:

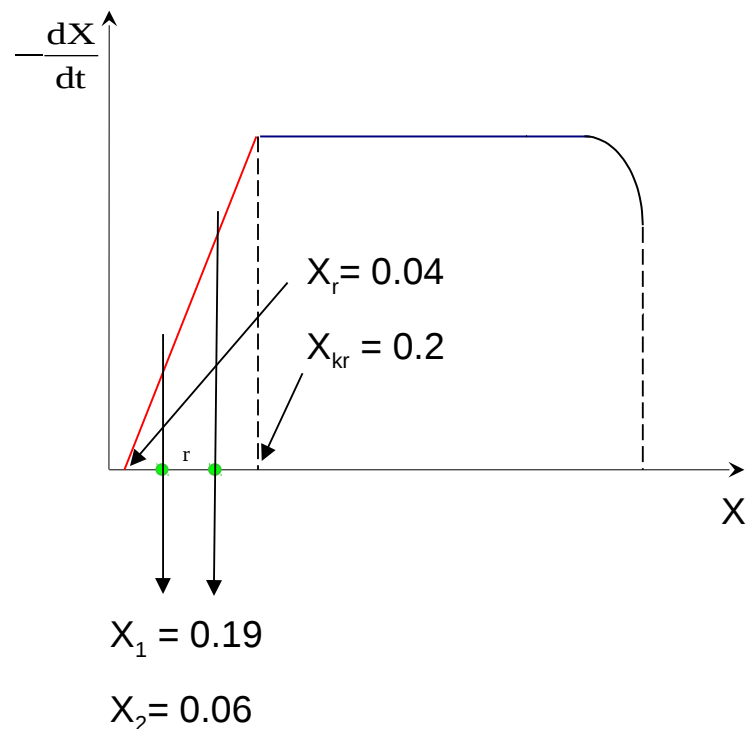
$$-\frac{dX}{dt} = -\frac{\Delta X}{\Delta t} = \text{Konst.} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$$

Perioda padajoče sušilne hitrosti:

$$-\frac{dX}{dt} = K(X - X_r)$$

$$K = \frac{-\left(\frac{dX}{dt}\right)_{\text{konst.}}}{X_{kr} - X_r} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}}{0.2 - 0.04} = 0.0125 \text{ min}^{-1}$$

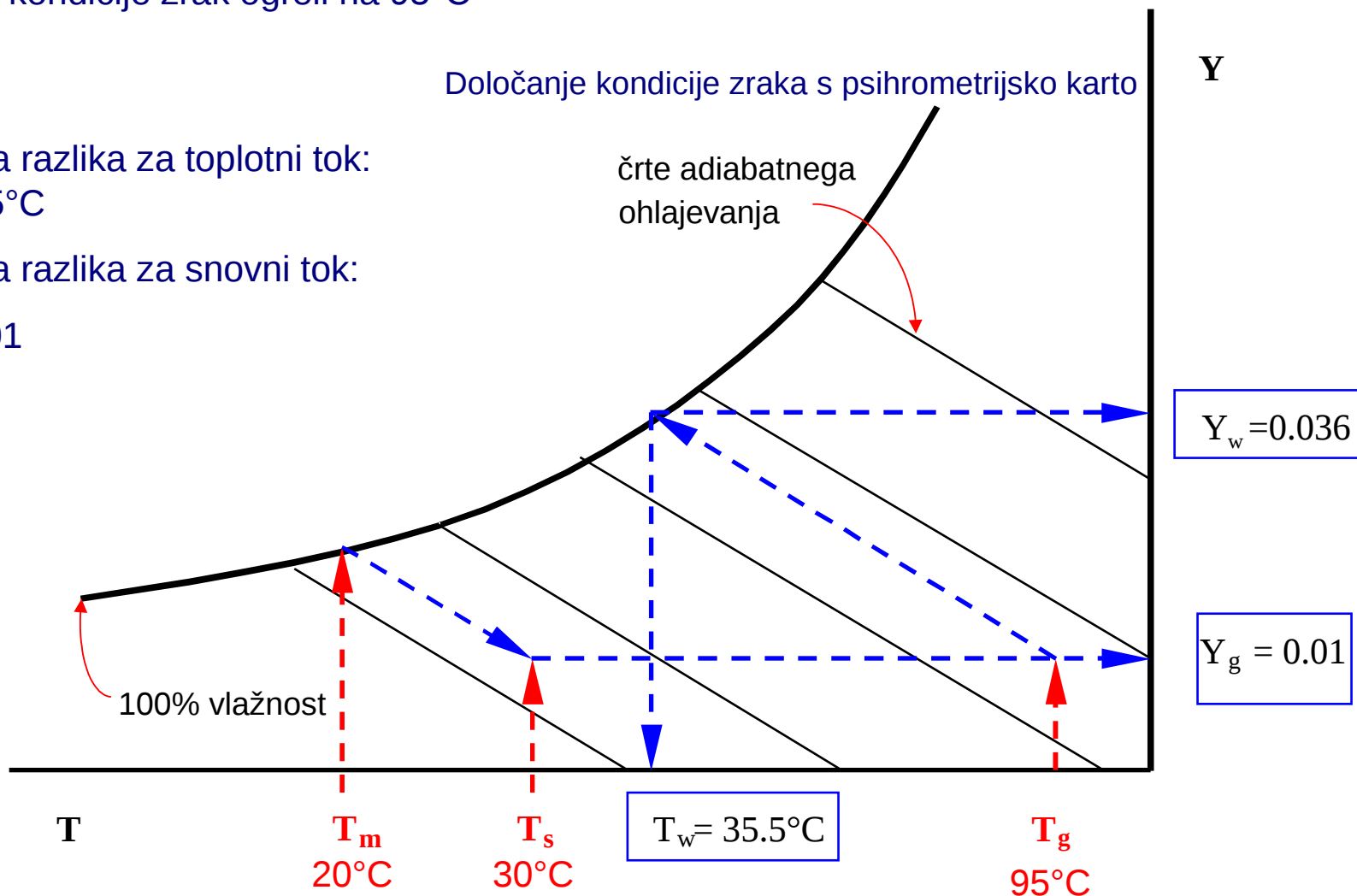
$$t = \frac{1}{K} \cdot \ln \frac{X_1 - X_r}{X_2 - X_r} = \frac{1}{0.0125} \cdot \ln \frac{0.19 - 0.04}{0.06 - 0.04} = 161.2 \text{ min} = 2.7 \text{ h}$$



Primer 2: S psihrometrom smo izmerili temperaturi mokrega in suhega termometra: $T_m = 20^\circ\text{C}$ in $T_s = 30^\circ\text{C}$. S pomočjo priložene psihrometrične karte določite vlažnost zraka in potencialni razliki za snovni in toplotni tok, če bi pri sušenju materiala v komornem sušilniku zrak enake kondicije zrak ogreli na 95°C

Potencialna razlika za toplotni tok:
 $95^\circ\text{C} - 35.5^\circ\text{C}$

Potencialna razlika za snovni tok:
 $0.036 - 0.01$



Primer 3: Na kako veliko površino moramo razprostrti **100 kg vlažne snovi** z začetno vlažnostjo $X_0 = 0.2$, če jo želimo v 5 urah osušiti na **15 %** začetne vlažnosti pri **80°C**. V tem območju vlažnosti snovi sušenje poteka v periodi konstante sušilne. Kondicijo zraka smo določili s psihrometrom: $T_m = 17.5 \text{ °C}$, $T_s = 25 \text{ °C}$. Koliko znaša pri teh pogojih koeficient snovnega prestopa ($\text{kg/m}^2\text{s}$), če je koeficient toplotnega prestopa **25 W/m²K**. Izparilna entalpija vode pri temperaturi mokrega termometra v sušilniku je **2425 kJ/kg**.

Rešitev:

$$X_0 = 0.2 \Rightarrow X = 0.02 \cdot 0.15 = 0.03$$

(a) psihrometer, podatki iz karte:

$$T_m = 17.5 \text{ °C}; T_s = 25 \text{ °C}$$

$$Y_g = 0.008; Y_w = 0.028$$

(b) Snovni tok: $w = \left[\frac{\Delta X}{\Delta t} \right]_{\text{konst}} \cdot m_{\text{SS}} = \left[\frac{0.2 - 0.03}{5 \text{ h}} \right]_{\text{konst}} \cdot 83.3 \text{ kg} = 2.83 \text{ kg/h}$

masa suhe snovi:

$$m_{\text{VS}} = m_{\text{SS}} + m_{\text{V}}$$

$$X = \frac{m_{\text{V}}}{m_{\text{SS}}}$$

$$m_{\text{VS}} = m_{\text{SS}} + X \cdot m_{\text{SS}} = m_{\text{SS}} \cdot (1 + X)$$

$$m_{\text{SS}} = \frac{m_{\text{VS}}}{1 + X} \quad m_{\text{SS}} = \frac{100 \text{ kg}}{1 + 0.2} = 83.33 \text{ kg}$$

(c) toplotni tok: $q = h \cdot A(T_g - T_w) = w \cdot \Delta H_{\text{izp}}$

$$q = (2.83/3600) \text{ kg/s} \cdot 2425 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$$

$$q = 1908 \text{ J/s oz. W}$$

Primer 3: Na kako veliko površino moramo razprostreti **100 kg vlažne snovi**

$$q = h \cdot A \cdot (T_g - T_w)$$

$$A = \frac{q}{h \cdot (T_g - T_w)}$$

$$A = \frac{1909 \text{ W}}{25 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot (80 - 31.5) \text{ K}} = 1.57 \text{ m}^2$$

Koliko znaša pri teh pogojih koeficient snovnega prestopa (kg/m²s),

$$w = k_y \cdot A \cdot (Y_w - Y_g)$$

$$k_y = \frac{w}{A \cdot (Y_w - Y_g)}$$

$$k_y = \frac{7.87 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}}{1.57 \text{ m}^2 \cdot (0.028 - 0.008)} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Primer 4: Material se je v 5 urah osušil od 25 na 10 kg vlage / 200 kg sušine. Začetna vlažnost materiala je bila manjša od kritične vlažnosti (sušimo v periodi padajoče sušilne hitrosti). Ravnotežna vlažnost materiala znaša $X_r = 0.03$. Koliko časa je potrebno sušiti, da se material pri istih pogojih osuši na 16 kg vlage / 200 kg sušine?

$$X_1 = 25 \text{ kg vl./200kg suš.} = 0.125$$

$$X_2 = 10 \text{ kg vl./200kg suš.} = 0.05$$

$$X_r = 0.03$$

$$X_3 = 16 \text{ kg vl./200kg suš.} = 0.08$$

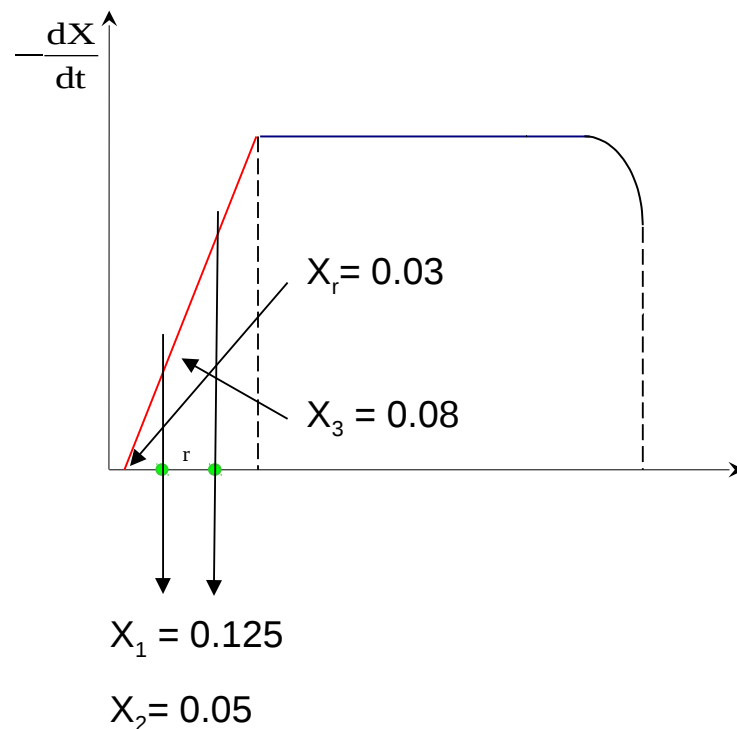
Perioda padajoče sušilne hitrosti:

$$-\frac{dX}{dt} = K(X - X_r)$$

$$\int_0^t dt = \frac{1}{K} \cdot \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{(x - x_r)}$$

$$K = \frac{1}{t} \cdot \ln \frac{x_1 - x_r}{x_2 - x_r} = \frac{1}{5} \cdot \ln \frac{0.125 - 0.03}{0.05 - 0.03} = 0.3116 \text{ h}^{-1}$$

$$t = \frac{1}{K} \cdot \ln \frac{x_1 - x_r}{x_2 - x_r} = \frac{1}{0.3116 \text{ h}^{-1}} \cdot \ln \frac{0.125 - 0.03}{0.08 - 0.03} = 2.06 \text{ h} = 123.6 \text{ min}$$



Primer 5: V tunelskem sušilniku površine 1m^2 sušimo 100 kg vlažnega materiala pri pogojih adiabatnega sušenja. Material se v 4 urah osuši iz začetne vlažnosti $X_0 = 0.25$ na vlažnost $X = 0.05$, pri čemer se sušenje odvija v periodi konstantne sušilne hitrosti. Na katero temperaturo moramo ogreti 100% vlažen zrak pri 25°C , če je ocenjena snovna prestopnost skozi film pri uporabljenem pretoku zraka $k_y = 37\text{g/m}^2\text{s}$?

(pomagajte si s psihromerijsko karto)

Snovni tok:

$$w = \left[\frac{\Delta X}{\Delta t} \right]_{\text{konst}} \cdot m_{\text{ss}} \quad m_{\text{ss}} = \frac{m_{\text{vs}}}{1 + X} \quad m_{\text{ss}} = \frac{100\text{ kg}}{1 + 0.25} = 80\text{ kg}$$

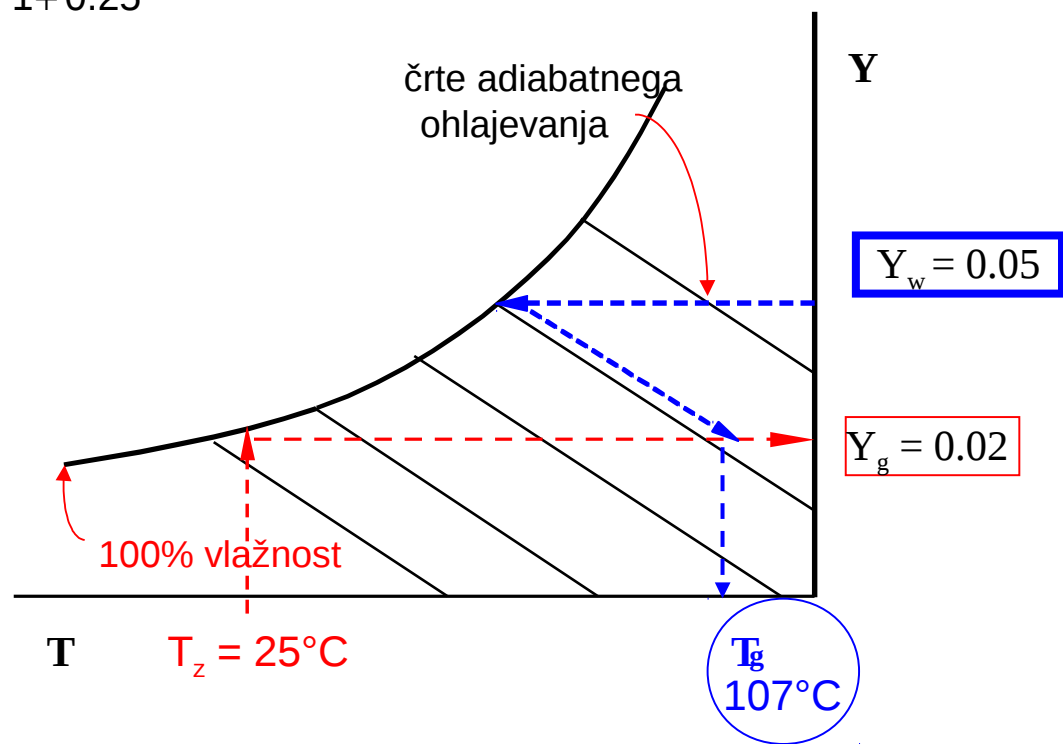
$$w = \left[\frac{0.25 - 0.05}{4\text{h}} \right]_{\text{konst}} \cdot 80\text{kg} = 4\text{ kg/h}$$

$$w = k_y \cdot A \cdot (Y_w - Y_g)$$

$$(Y_w - Y_g) = \frac{w}{k_y \cdot A} = \frac{4000\text{ g} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}}{3600\text{s} \cdot 37\text{g} \cdot 1\text{m}^2} = 0.03$$

$$Y_w = \Delta Y + Y_g = 0.03 + Y_g$$

$$Y_w = 0.05$$



Primer 6: V adiabatnem komornem sušilniku s površino $(1.5 \times 1.5) \text{ m}^2$ želimo v periodi konstantne sušilne hitrosti v 6 urah osušiti 200 kg vlažne snovi iz začetne vlažnosti 0.25 do vlažnosti 0.03. Na kolikšno temperaturo moramo segreti zrak s 70% relativno vlažnostjo pri temperaturi 30°C , če je povprečna linearna hitrost zraka v sušilniku 3.8 m/s , njegova gostota 1 kg/m^3 , za izračun koeфициenta snovnega prenosa pa upoštevamo naslednjo zvezo:

$$k_y = 0.01 (v \cdot \rho)^{0.8} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}]$$

linearno hitrost zraka vstavimo v $[\text{m/s}]$, gostoto $[\text{kg/m}^3]$

$$m_{ss} = \frac{200 \text{ kg}}{1 + 0.25} = 160 \text{ kg}$$

$$k_y = 0.01 \cdot ((3.8 \text{ m/s}) \cdot (1 \text{ kg/m}^3))^{0.8} = 0.029 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$w = \left[\frac{\Delta X}{\Delta t} \right]_{\text{konst}} \cdot m_{ss}$$

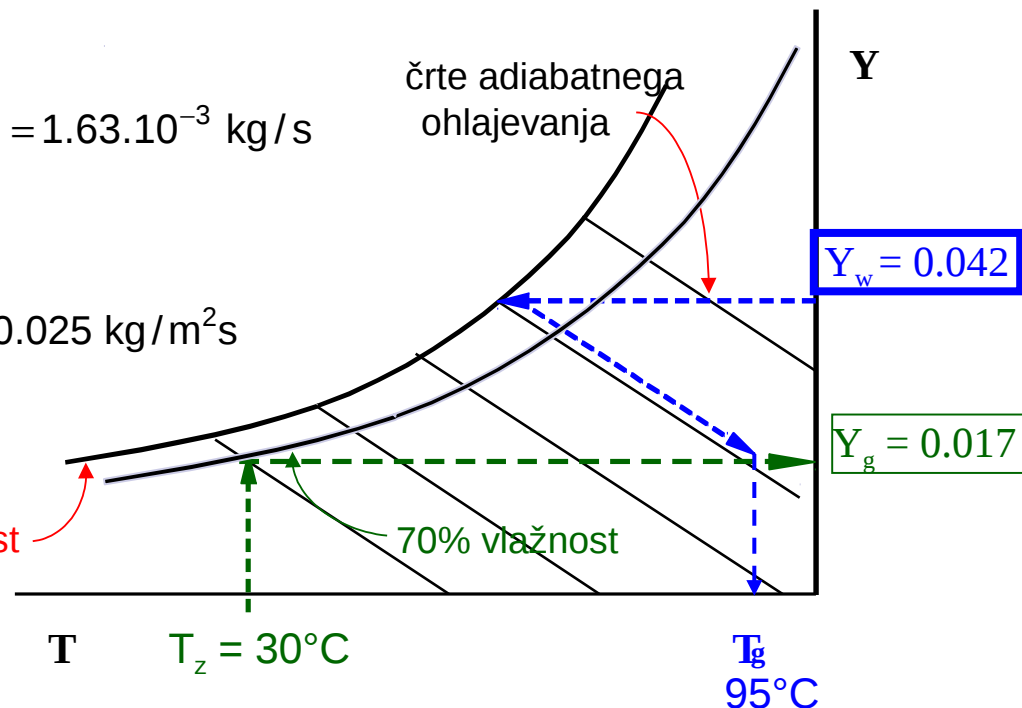
$$w = \left[\frac{0.25 - 0.03}{6 \text{ h}} \right]_{\text{konst}} \cdot 160 \text{ kg} = 5.87 \text{ kg/h} = 1.63 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$w = k_y \cdot A \cdot (Y_w - Y_g)$$

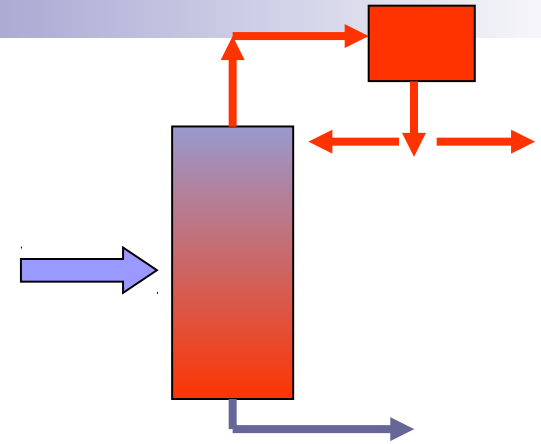
$$(Y_w - Y_g) = \frac{w}{k_y \cdot A} = \frac{1.63 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}}{\text{s} \cdot 0.029 \text{ kg} \cdot 1.5^2 \text{ m}^2} = 0.025 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$Y_w = \Delta Y + Y_g = 0.025 + 0.017$$

$$Y_w = 0.042$$



Rektifikacija – ravnotežne stopnje



Obratovna črta

povezuje sestave ki prekat zapuščajo in sestave ki na prekat prihajajo.

Zgornja obratovna črta:
$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_D}{R+1}$$

Presečišče zgornje in spodnje obratovne črte je odvisno od temperature F

napajalna razt. hladna $T < T_{vrel}$ $e > 1$

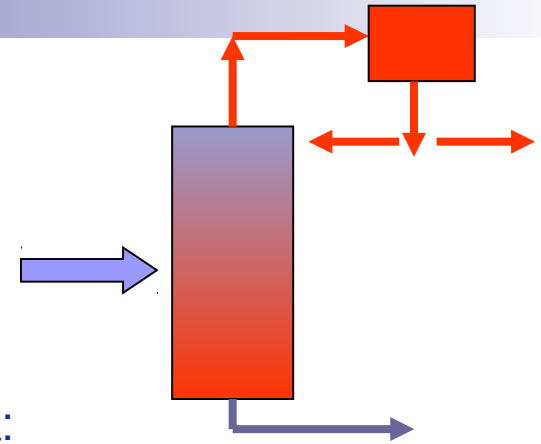
napajalna raztopina vre $T = T_{vrel}$ $e = 1$

napajalna raztop. mešanica hlapov in vrele razt. $e < 1$

$$y = \frac{e}{e-1}x - \frac{x_F}{e-1}$$

Vrednost e določa spremembo v toku refluxa, ki jo v izganjalnem delu povzroči napajalni tok.

Rektifikacija – ravnotežne stopnje



Vrednost e določimo na podlagi entalpije napajalnega toka:

$$e = \frac{H_{fs} - h_f}{H_{fs} - h_{fs}} = 1 + \frac{(T_{vrF} - T_F)(\sum c_{pi} x_i)}{\sum r_i x_i}$$

H_{fs} ... entalpija hlapov pri vrelišču

h_{fs} ... entalpija hlapov

h_f ... entalpija tekoče faze

c_{pi} ... specifična toplota komponente i

r_i ... izparilna toplota

Masna bilanca rektifikacijske kolone:

$$F = W + D$$

$$F x_F = W x_w + D x_D$$

Določitev teoretičnega števila prekatov po metodi McCabe-Thiele

(Metoda temelji na grafični predstavitvi snovnih in toplotnih bilanc ter ravnotežja med fazama.)

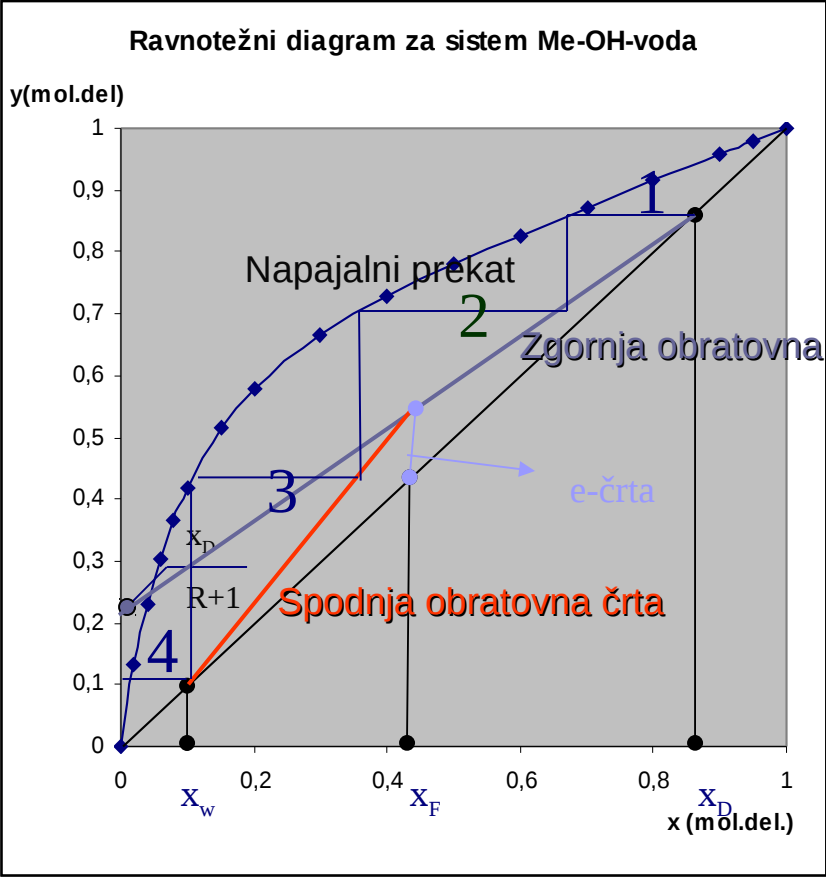
x	y
0	0
0.02	0.13
0.04	0.23
0.06	0.30
0.08	0.37
0.10	0.42
0.15	0.52
0.20	0.58
0.30	0.67
0.40	0.73
0.50	0.78
0.60	0.83
0.70	0.87
0.80	0.92
0.90	0.96
0.95	0.98
1	1

Ravnotežni
molski deleži
parne in
tekoče faze

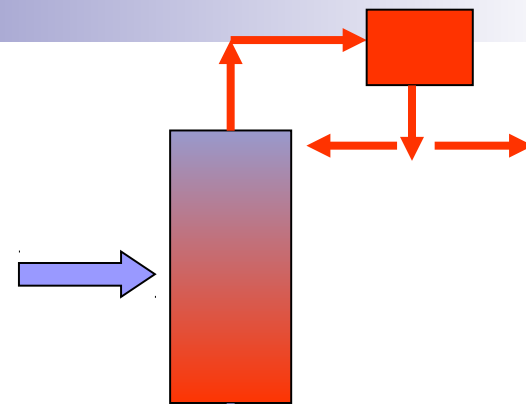
Zgornja obratovna črta

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_D}{R+1}$$

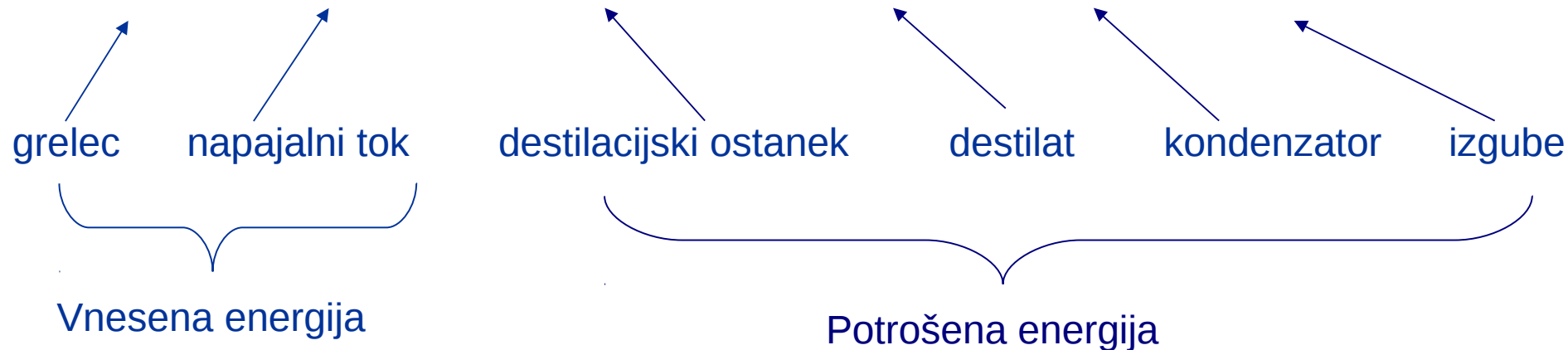
$$x = 0 \rightarrow Y = x_D/(R+1)$$



Rektifikacija – toplotna bilanca



$$q_r + F \cdot h_F = W \cdot h_W + D \cdot h_D + q_c + q_{IZG}$$



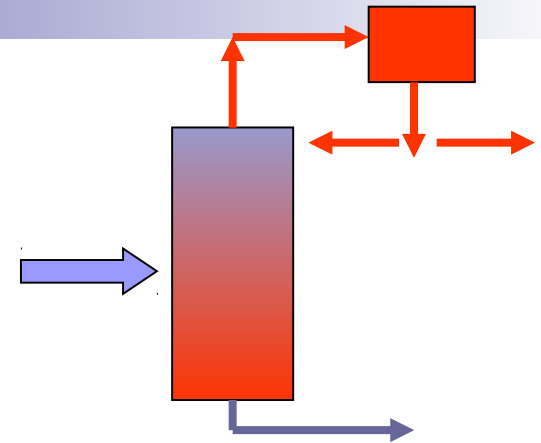
Entalpije posameznih tokov (h) : F, W, D

$$h = \sum_i c_{pi} x_i T$$

Toplotni tok kondenzatorja:

$$\dot{Q}_c = \Phi_{mv} \cdot c_{pv} \cdot \Delta T$$

Eksperimentalna vaja: Rektifikacija



Na laboratorijski rektifikacijski koloni pri danih obratovalnih pogojih destiliraj dvokomponentno zmes.

Iz ravnotežnih in eksperimentalnih podatkov določi teoretično število prekatov in višino teoretičnega prekata.

Izračunaj toplotne izgube

HETP = višina teoretičnega prekata

HETP = višina kolone / število teoretičnih prekatov (McCabe Thiele)

Meritve in podatki: Rektifikacija

Podatki:

- Pretok napajalne zmesi:.....
- Temperatura napajalne zmesi:.....
- Sestava sestava napajalne zmesi (x_F):.....
- Refluksno razmerje R:.....
- Pretok hladilne vode:.....
- Moč grelca = W

Izmeri:

Tabela:

T destilat a D	T ostanka W	Thl.vod a (vstop)	Thl.vod a (izstop)	X_D refraktomete r	X_W refraktomete r	X_D	X_W
----------------------	-------------------	-------------------------	--------------------------	----------------------------	----------------------------	-------	-------

LITERATURNI PODATKI

Poišči ravnotežne podatke metanol-voda:

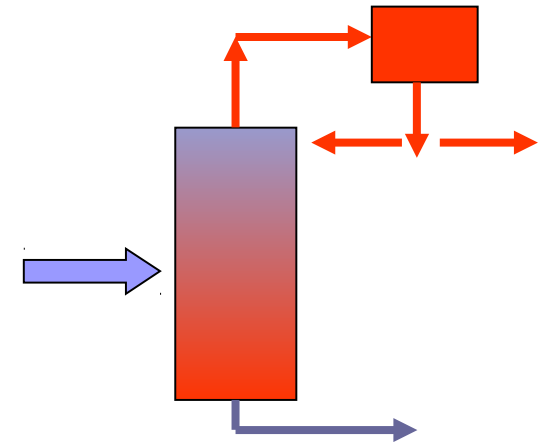
Podaki za izračun e-črte

c_p (metanol): pri temp. T_F ...

c_p (voda): pri temp. T_F

ΔH (metanol) pri temp. $T_{F \text{ vrel.}}$

ΔH (voda) pri temp. $T_{F \text{ vrel.}}$



Rezultati: Rektifikacija

Na diagramu $y=f(x)$ prikaži grafično določitev teoretičnih prekatov kolone.

Navedi vrednosti HETP in toplotnih izgub.

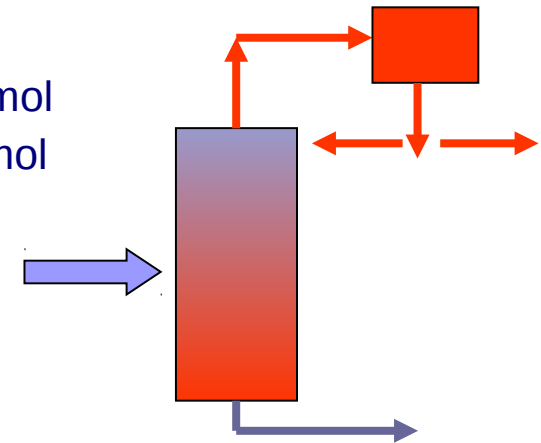
Primer 4 : Na rektifikacijski koloni s polnilom destiliramo vodno raztopino metanola in vode, ki vsebuje **30 mol % metanola**. Napajalni tok ($F=10 \text{ mol/s}$), vodimo v kolono pri temperaturi **65.8 °C**. Kolona obratuje pri refluksnem razmerju $R = 2$. Destilat, ki odteka s pretokom **2.9 mol/s vsebuje 91 mol % metanola**, destilacijski ostanek pa vsebuje še **5 mol % metanola**. Koliko znaša pretok destilacijskega ostanka. Kakšno je število teoretičnih prekatov in višinski ekvivalent reoretičnega prekata (HETP), če je višina kolone **1.5 m**? Ravnotežni diagram metanol - voda je priložen (na drugem listu).

Snovne lastnosti napajalnega toka:

Temperatura vrelišča napajalne raztopine je 78 °C

c_p metanol: 94.4 J/mol K r_i metanol: 34128 J/mol

c_p voda: 75.4 J/mol K r_i voda : 42138 J/mol



Rešitev:

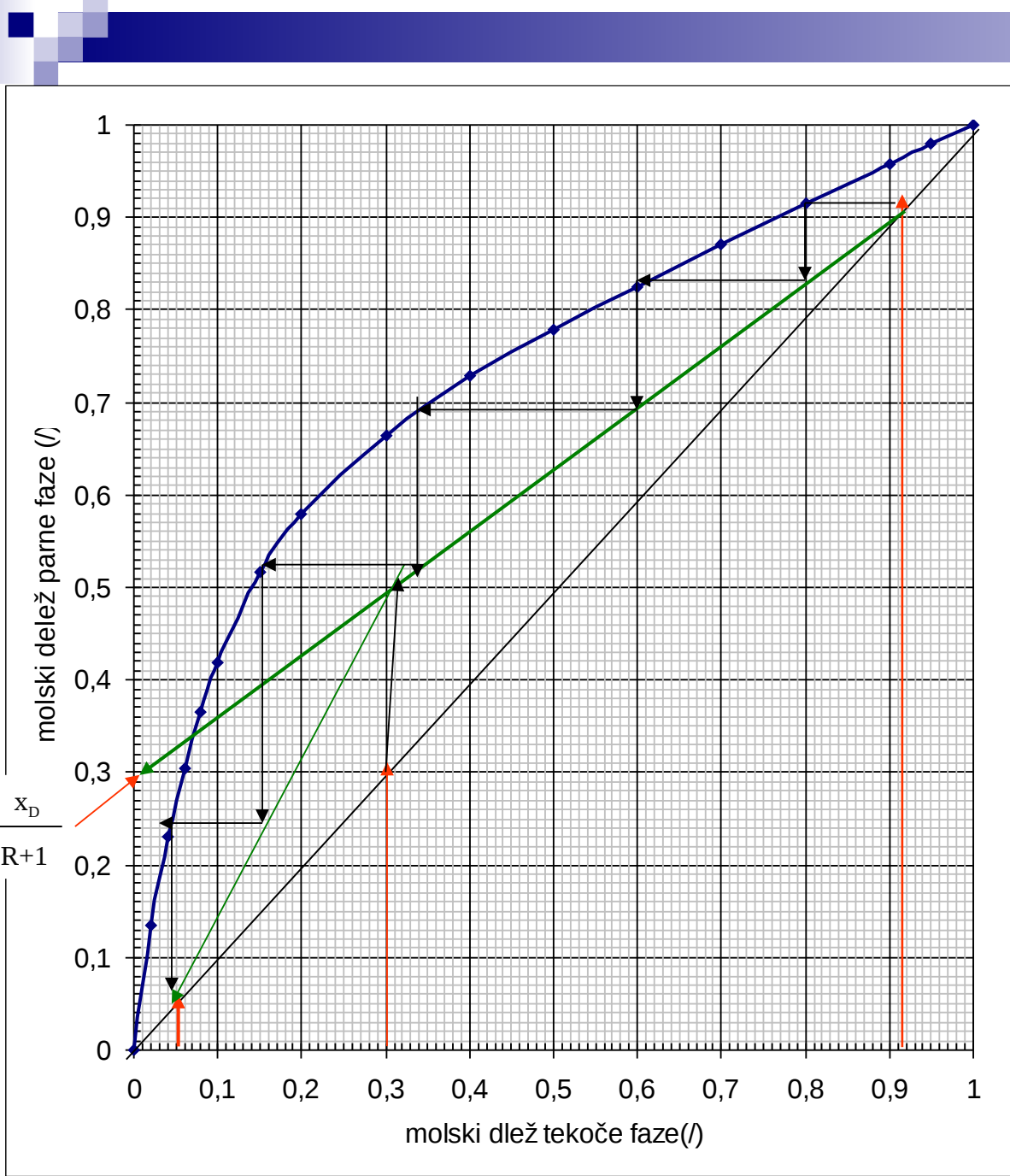
Masna bilanca: $F = W+D \rightarrow W = F - D = 10 - 2.9 = 7.1 \text{ mol/s}$

Število teoretičnih prekatov določimo grafično, po metodi Mc Cabe-Thiele:

Zgornja obratovna črta: $y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_D}{R+1}$

Naklon zgornje obratovne črte: $x = 0 \rightarrow y = x_D/(R+1) = 0.91/(2+1) = 0.3$

e-črta: $y = \frac{e}{e-1}x - \frac{x_F}{e-1}$ izračunati je treba vrednost e



$$e = \frac{H_{fs} - h_f}{H_{fs} - h_{fs}} = 1 + \frac{(T_{vrF} - T_F)(\sum c_{pi} x_i)}{\sum r_i x_i}$$

$$\sum c_{pi} \cdot x_i = 94.4 \cdot 0.3 + 75.4 \cdot 0.7$$

$$\sum c_{pi} \cdot x_i = 81.1 \text{ J/molK}$$

$$\sum r_i \cdot x_i = 34128 \cdot 0.3 + 42138 \cdot 0.7$$

$$\sum r_i \cdot x_i = 39735 \text{ J/mol}$$

$$e = 1 + \frac{(78 - 65.8(K))(81.1 \text{ J/molK})}{39735 \text{ J/mol}} = 1.025$$

$$y = \frac{e}{e-1} x - \frac{x_F}{e-1}$$

$$\frac{e}{e-1} = 41.1$$

HETP = višina teoretičnega prekata

HETP = višina kolone / število teoretičnih prekatov (McCabe Thiele)

$$\text{HETP} = 1.5\text{m}/5 = 0.3 \text{ m}$$

Primer 5: V rektifikacijski koloni s polnilom, ki obratuje pri atmosferskem tlaku in refluksnem razmerju $R = 3.8$ želimo ločevati zmes CS_2 in CCl_4 . Hlapnejša komponenta je CS_2 . Napajalna zmes vstopa v kolono pri temperaturi vrelišča s sestavo: 30 mol% CS_2 in 70 mol% CCl_4 . Destilacija poteka tako, da destilat vsebuje 96 mol% CS_2 , destilacijski ostanek pa 96 mol% CCl_4 . Določi potrebno število teoretičnih prekatov in kateri prekat je napajalni. Kolikšen mora biti dotok napajalnega toka F (kg/h), da bo tok destilata D , 50 kg/h? Ravnotežni diagram sestave parne in tekoče faze za hlapnejšo komponento (zmes CS_2 in CCl_4) v mol % je priložen.

Rešitev: Kakšen mora biti dotok napajalnega toka?

Uporabimo masne bilance:

$$F = W + D \rightarrow W = F - D$$

$$F \cdot x_F = W \cdot x_w + D \cdot x_D$$

$$F \cdot x_F = (F-D) \cdot x_w + D \cdot x_D \rightarrow F \cdot x_F - F \cdot x_w = D \cdot x_D - D \cdot x_w$$

$$F = \frac{D \cdot (x_D - x_w)}{(x_F - x_w)} = \text{Tok destikata: } D = 50 \text{ kg/h}$$

Spremenimo v molski tok, ker imamo podane molske deleže komponent v posameznih tokovih, izračunamo povprečno molsko maso:

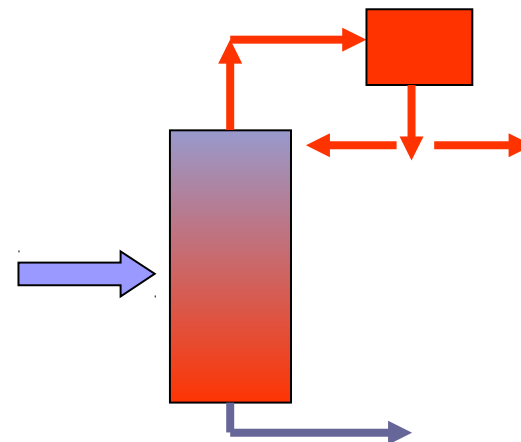
$$F = \frac{0.632 \cdot (0.96 - 0.04)}{(0.3 - 0.04)} = 2.236 \text{ kmol/h}$$

$$W = F - D = 2.236 - 0.632 = 1.604 \text{ kmol/h}$$

$$M_D = 0.96 \cdot 76 + 0.04 \cdot 154 = 79.12 \text{ g/mol}$$

$$n = m/M; \rightarrow D_{\text{molski}} = 50 \text{ kg/h} / 79.12 \text{ kg/kmol}$$

$$D_{\text{molski}} = 0.632 \text{ kmol/h}$$



$$F = \frac{0.632 \cdot (0.96 - 0.04)}{(0.3 - 0.04)} = 2.236 \text{ kmol/h}$$

Za izračun napajalnega toka v kg/h rabimo povprečno molsko maso napajalnega toka

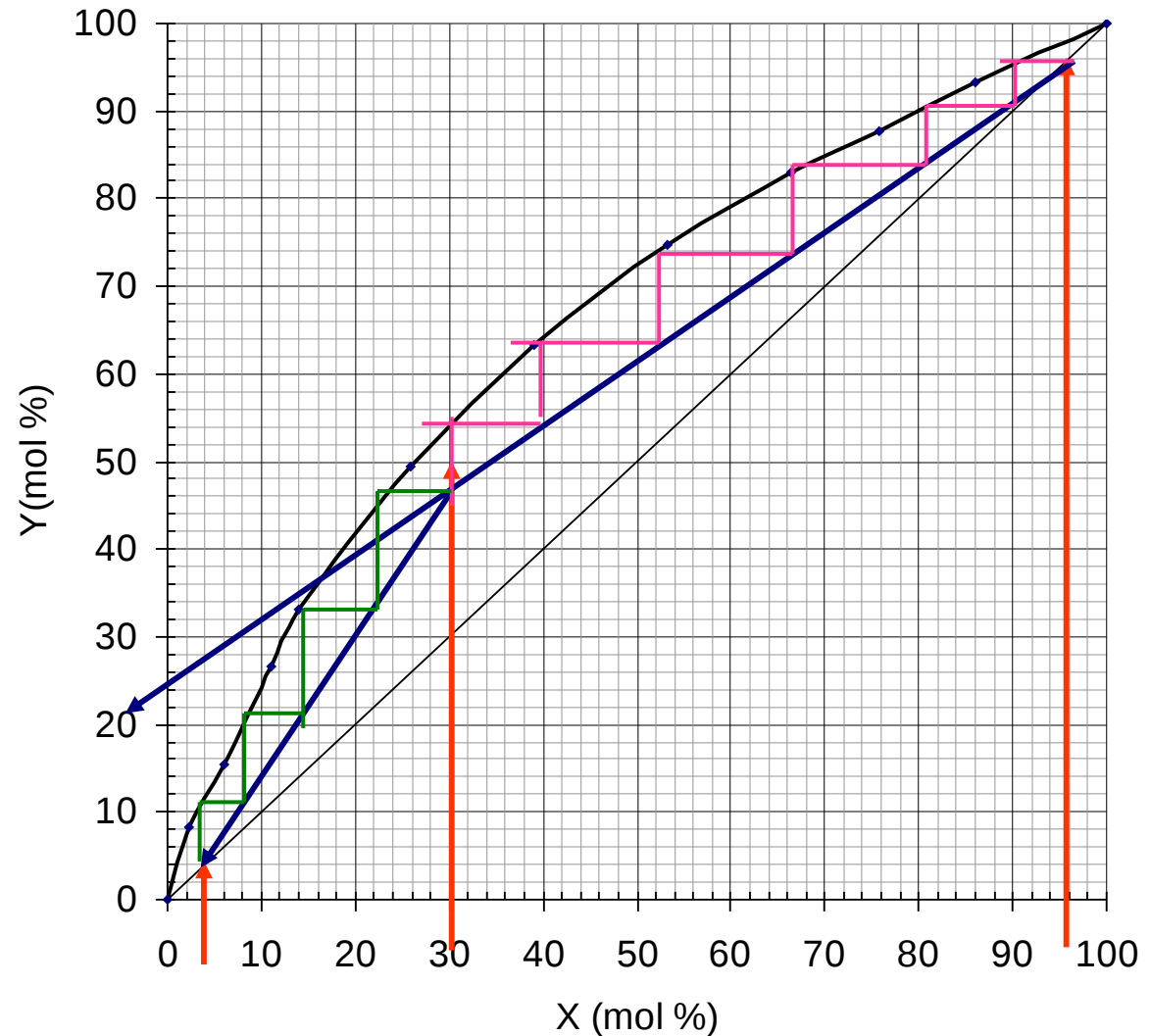
$$M_F = 0.3 \cdot 76 + 0.7 \cdot 154 = 130.6 \text{ g/mol}$$

$$R = 3.8$$

$$x_D / (R + 1) = 0.96 / 4.8$$

$$x_D / (R + 1) = 0.24$$

ravnotežni diagram $\text{CS}_2 - \text{CCl}_4$



Primer 6: V rektifikacijsko kolono vodimo vodno raztopino metanola, ki vsebuje 20 mol % hlapnejše komponente, s pretokom 100 mol/h. Pri konstantni obremenitvi grelca in refluksnem razmerju $R = 3$, je sestava destilacijskega ostanka 3 mol % hlapnejše komponente, pretok destilacijskega ostanka pa znaša 82 mol/h. Kolikšen je pretok in sestava destilata? V kondenzator vstopa hladilna voda s temperaturo 15°C, ki v celoti odvede kondenzacijsko entalpijo hlapov ($\Delta H_{\text{kond hlapov}} = 35.7 \text{ kJ/mol}$). Izračunajte izstopno temperaturo vode iz hladilne kače kondenzatorja, če je pretok hladilne vode 25 L/h (voda: $c_p = 4180 \text{ J/kgK}$, $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$)

Rešitev:

Masna bilanca: $D = F - W$; $D = 100 - 82 = 18 \text{ mol/h}$

$$x_D = \frac{F \cdot x_F - W \cdot x_w}{D} = \frac{100 \cdot 0.2 - 82 \cdot 0.03}{18} = 0.974$$

Toplotna bilanca: $q_c = V \cdot \Delta H_{\text{izp}} = \Phi_m \cdot c_p \cdot (T_{v1} - T_{v2})$

$$V = L + D \quad \text{in} \quad R = L/D$$

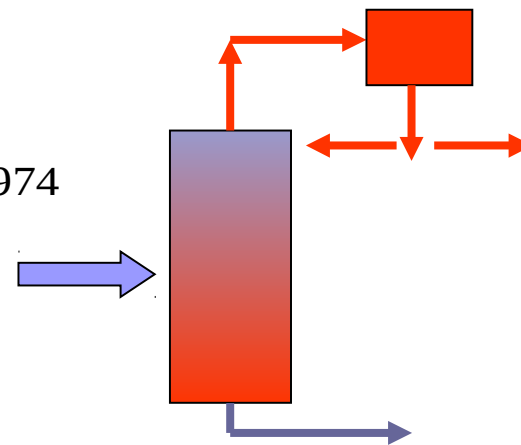
$$V = R \cdot D + D = D \cdot (R + 1) = 18 \cdot (1 + 3) = 72 \text{ mol/h}$$

$$q_c = (72 \text{ mol} / 3600 \text{ s}) \cdot 35.7 \cdot 10^3 \text{ J/mol} = 714 \text{ J/s} = \Phi_m \cdot c_p \cdot (T_{v1} - T_{v2})$$

$$T_{v1} - T_{v2} = q_c / \Phi_m \cdot C_p = 714 \text{ J/s} / (0.00692 \text{ kg/s} \cdot 4180 \text{ J/kgK}) = 24.67 \text{ K}$$

$$\Phi_m = \Phi_v \cdot \rho = (0.025 \text{ m}^3 \cdot 997 \text{ kg/m}^3) / 3600 \text{ s}$$

$$T = 15 + 24.7 = 39.7 \text{ }^\circ\text{C}$$



Primer 7: V rektifikacijsko kolono vodimo 22 mol% vodno raztopino metanola s pretokom 6.5 kg/h. Pri konstantni obremenitvi grelca refluksnem razmerju $R = 2.5$, je pretok hlapov 7 kg/h, njihova sestava pa 95 mol % hlapnejše komponente. Pretok hladilne vode, ki v celoti odvede entalpijo hlapov znaša 36 kg/h, voda v hladilni kači se pri tem ogreje za 15 K. Kolikšen je pretok in sestava destilacijskega ostanka? Kakšne so toplotne izgube pri procesu rektifikacije, če je povprečna moč grelca 1200 W, temperature izstopnih tokov in pripadajoče specifične toplote vode in metanola so podane v tabeli:

$M_{\text{CH}_3\text{OH}} = 32 \text{ g/mol}$ in $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ g/mol}$

	T / °C	c_p (voda) / kJ/kg K	c_p (metanol) / kJ/kg K
F	68	4.19	2.84
D	36	4.18	2.58
W	93	4.2	3.08

Rešitev: toplotna bilanca

$$q_r + F \cdot h_F = W \cdot h_W + D \cdot h_D + q_c + q_{\text{IZG}}$$

$$q_{\text{IZG}} = q_r + F \cdot h_F - W \cdot h_W - D \cdot h_D - q_c$$

✓

✓

✗

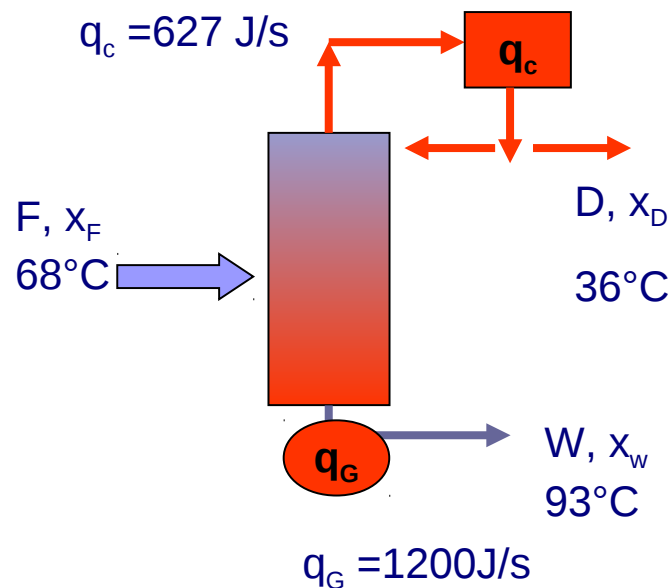
✗

✓

$$q_c = \Phi_m \cdot c_p \cdot (T_{v1} - T_{v2})$$

$$q_c = (36 \text{ kg} / 3600 \text{ s}) \cdot 4180 \text{ J/kgK} \cdot 15 \text{ K}$$

$$q_c = 627 \text{ J/s}$$



Primer 7: za izračun toka destilata in destilacijskega ostanka in njunih sestav uporabimo masne bilance:

$$V = L + D \text{ in } R = L/D$$

$$V = R \cdot D + D = D(L + 1)$$

$$D = V / (R + 1) = 7/3.5 = 2 \text{ kg/h}$$

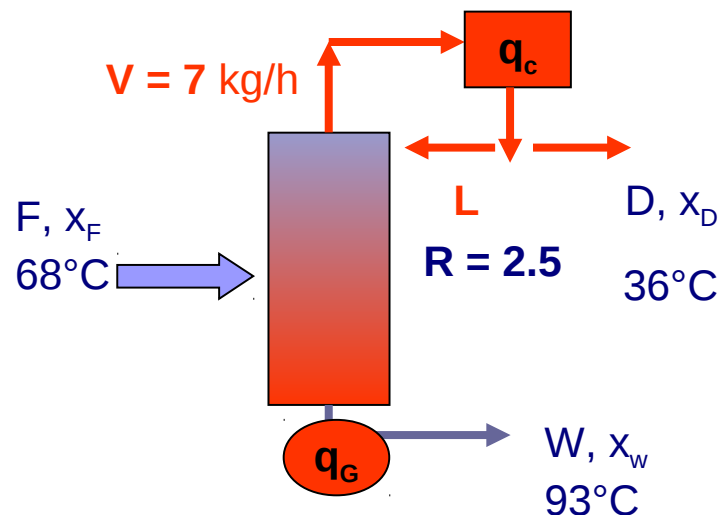
$$W = F - D = 6.5 - 2 = 4.5 \text{ kg/h}$$

Za izračun sestav moramo molske deleže pretvorit v utežne:

$$X_{Fut.} = \frac{X_i \cdot M_i}{\sum X_i \cdot M_i} = \frac{32 \cdot 0.22}{(32 \cdot 0.22 + 18 \cdot 0.78)} = 0.334$$

$$X_{Dut.} = \frac{32 \cdot 0.95}{(32 \cdot 0.95 + 18 \cdot 0.05)} = 0.971$$

$$x_{wut.} = \frac{F \cdot x_F - D \cdot x_D}{W} = \frac{6.55 \cdot 0.334 - 2 \cdot 0.971}{4.5} = 0.05$$



Entalpije posameznih tokov: $h = \sum c_{pi} \cdot x_i \cdot T$ (°C)

$$h_F = (0.334 \cdot 2.84 + 0.666 \cdot 4.19) \cdot 68 = 254.25 \text{ KJ/kg}$$

$$h_D = (0.971 \cdot 2.58 + 0.027 \cdot 4.18) \cdot 36 = 94.55 \text{ KJ/kg}$$

$$h_W = (0.05 \cdot 3.08 + 0.95 \cdot 4.2) \cdot 93 = 385.39 \text{ KJ/kg}$$