

Proračun kolone za destilacijsko izdvajanje etanola

Izdvajanje i pročišćavanje
biotehnoloških proizvoda

Seminar 6

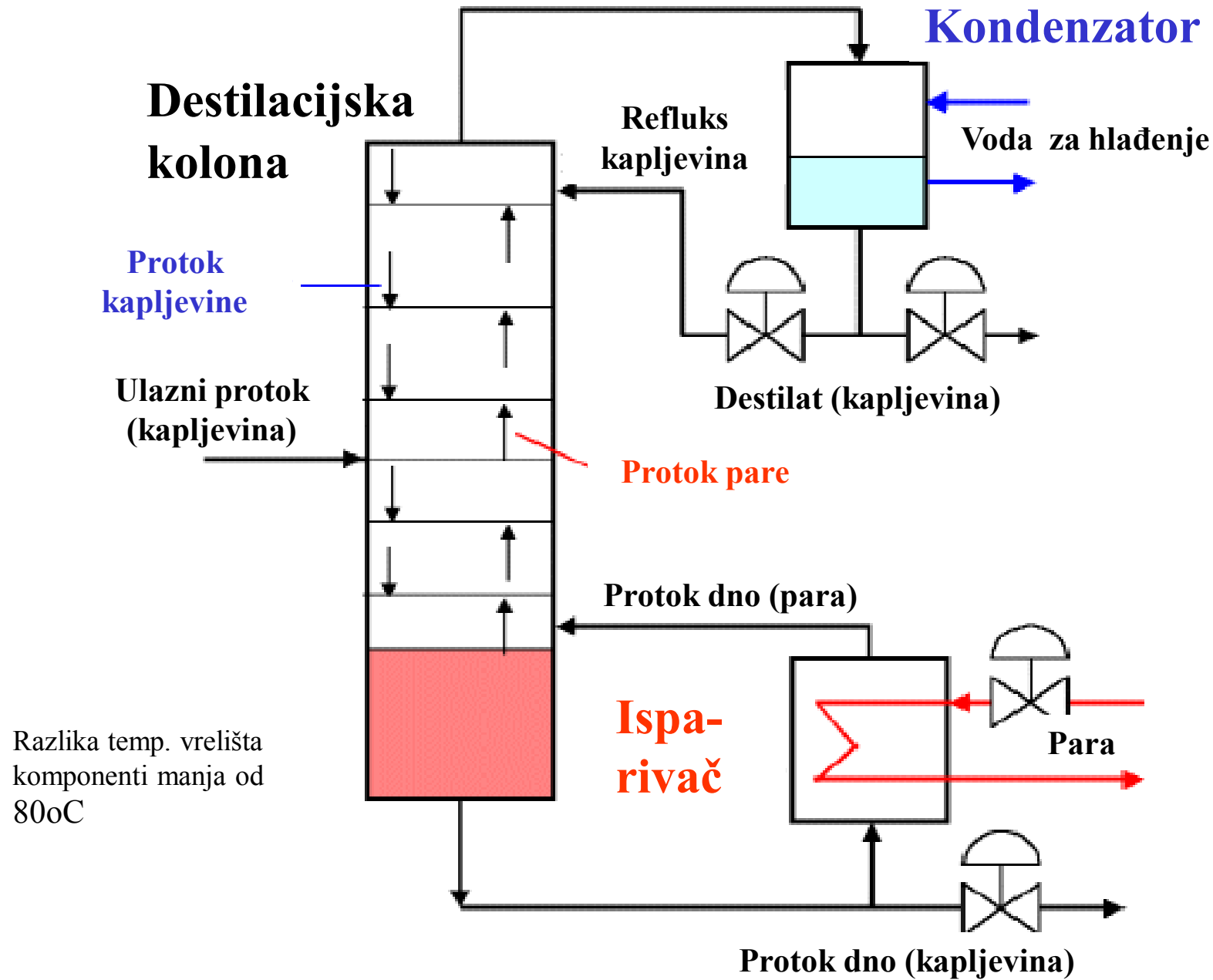
Proračun destilacijske kolone može se podijeliti u četiri osnovne faze:

- Određivanje podataka o ravnoteži para-kapljevina
- Izračunavanje broja idealnih plitica ili jedinica prijenosa
- Određivanje efikasnosti plitice ili punila
- Dimenzioniranje kolone

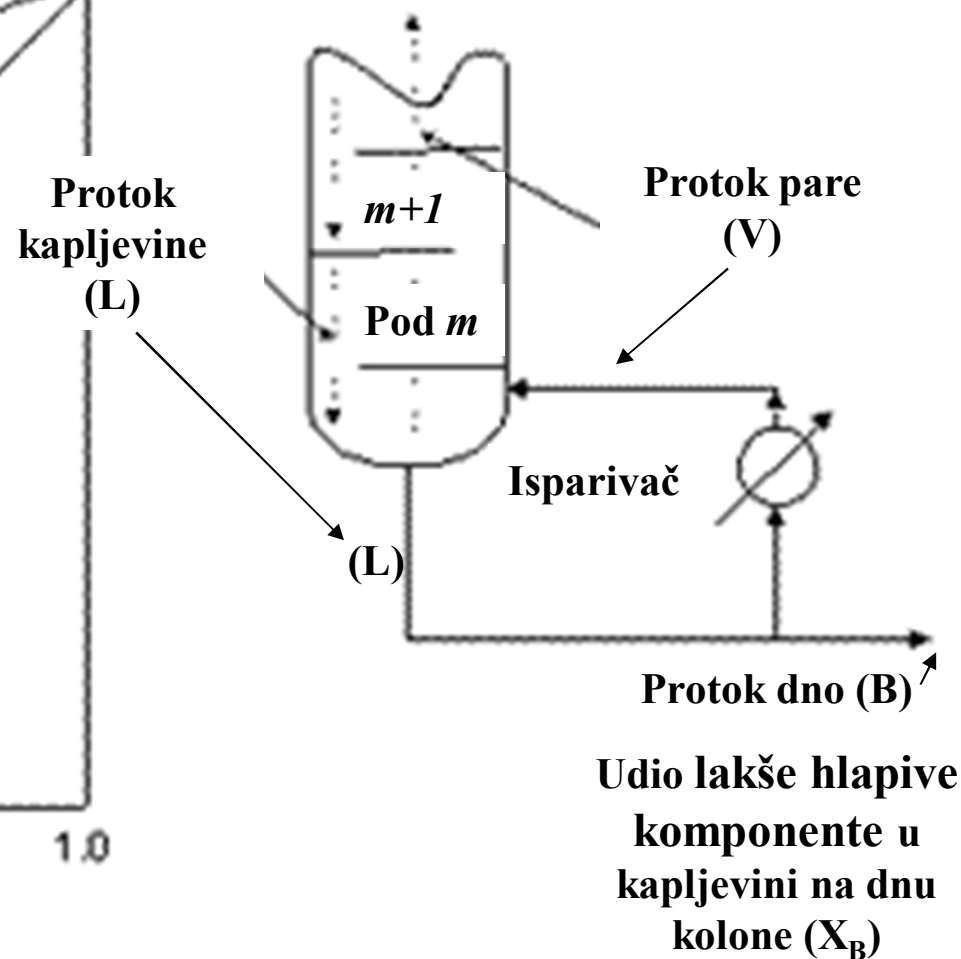
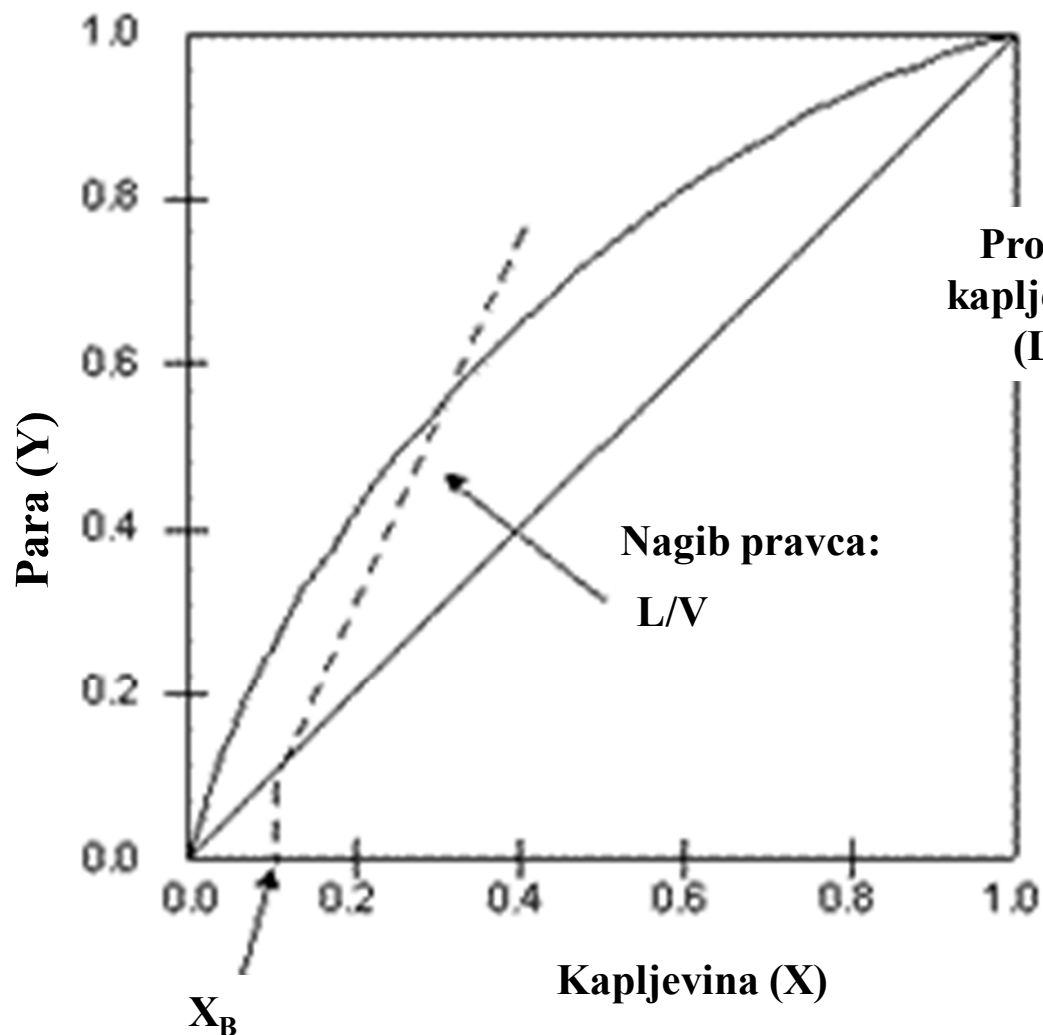
Brzi postupci za proračun koriste se za:

- Preliminarno izračunavanje troškova
- Parametrijsko određivanje radnih veličina
- Grubo razdvajanje komponenti
- Za proračun destilacije idealnih smijesa

Fizička slika-Kontinuirani destilacijski proces (rektifikacija)



Radni pravac dna kolone (sekcija stripiranje)

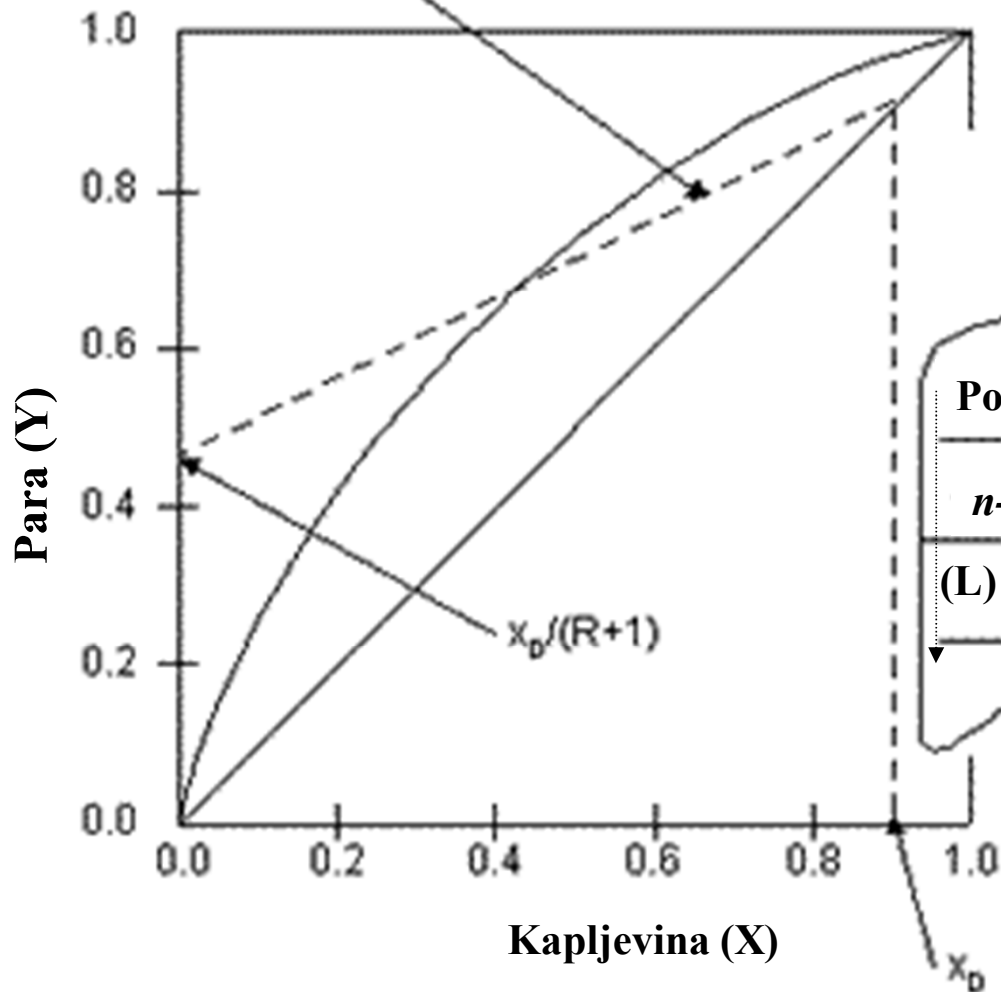


Iz materijalne bilance etanola za m -ti pod (pliticu) sekcija stripiranje (dno kolone) dobije se:

$$y_m = \frac{L}{V} x_{m+1} - \frac{B}{V} x_B$$

Radni pravac vrha kolone (sekcija rektifikacije)

Nagib pravca: $R/(R+1)$



Protok pare
(V)

Kondenzator

Refluks
(L)

Destilat (D)
 X_D

Udio lakše hlapive
komponente na vrhu
kolone (X_D)

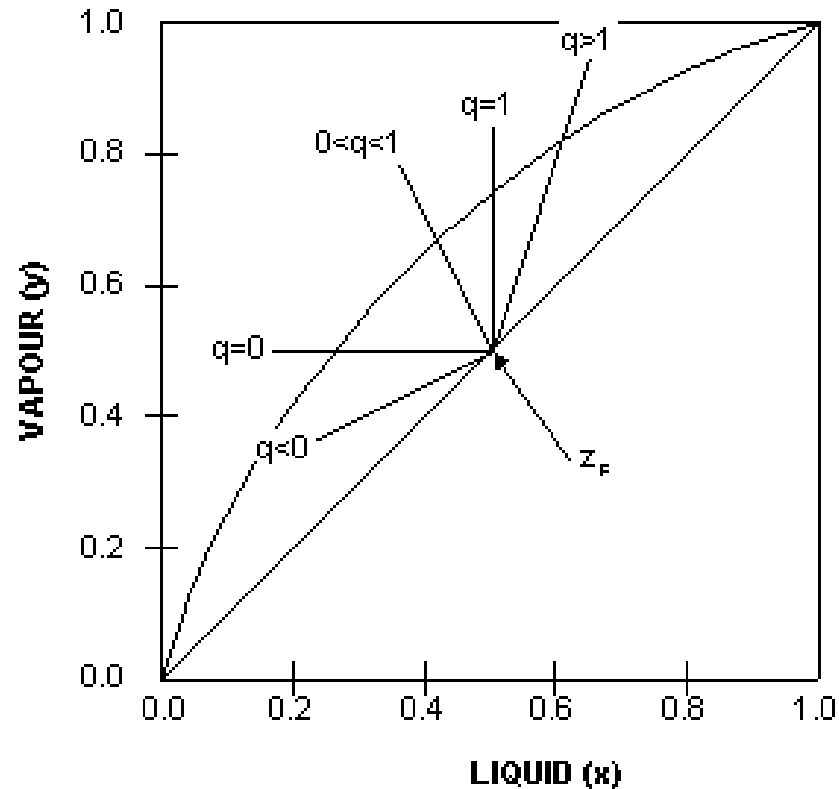
R-refluksni omjer;

$R=L/D$ -kvocjent refluksa i destilata

Iz materijalne bilance za n-ti pod (pliticu) sekcija rektifikacije (vrh kolone) dobije se:

$$y_n = \frac{L}{V} x_{n-1} + \frac{D}{V} x_D \quad \text{ILI} \quad y_n = \frac{R}{R+1} x_{n-1} + \frac{1}{R+1} x_D$$

q-pravac:



Nagib q-pravca određen je stanjem pojne smjese:

$q = 0$ (zasićena para)

$q = 1$ (kapljevina na tem. vrelišta)

$0 < q < 1$ (dvije faze)

$q > 1$ (pothlađena kapljevina)

$q < 0$ (pregrijana para)

$$y = \frac{q}{1-q}x + \frac{1}{1-q}x_F$$

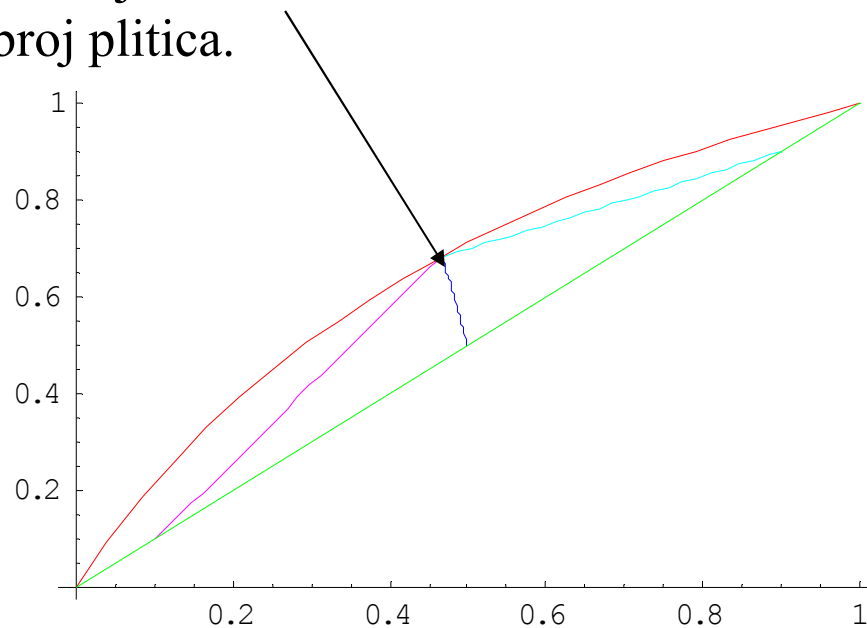
q- toplinsko stanje pojne smjese

$z_f = x_f$ -udio lakše hlapive komponente u pojnoj smjesi

Numerički: Minimalni refleksni omjer (R_{\min}):

$$\frac{R_{\min}}{R_{\min} + 1} = \frac{x_D - y_F}{x_D - x_F}$$

Grafički: Uvjet za R_{\min} je da: sjecište radnih pravaca leži na sjecištu q -pravca i ravnotežnoj krivulji. Za rad kolone uz minimalni refleksni omjer potreban je beskonačan broj plitica.



Drugi granični slučaj je kad radni pravci padnu na diagonalu (kolona radi s totalnim refleksom, potreban je minimalni broj plitica).

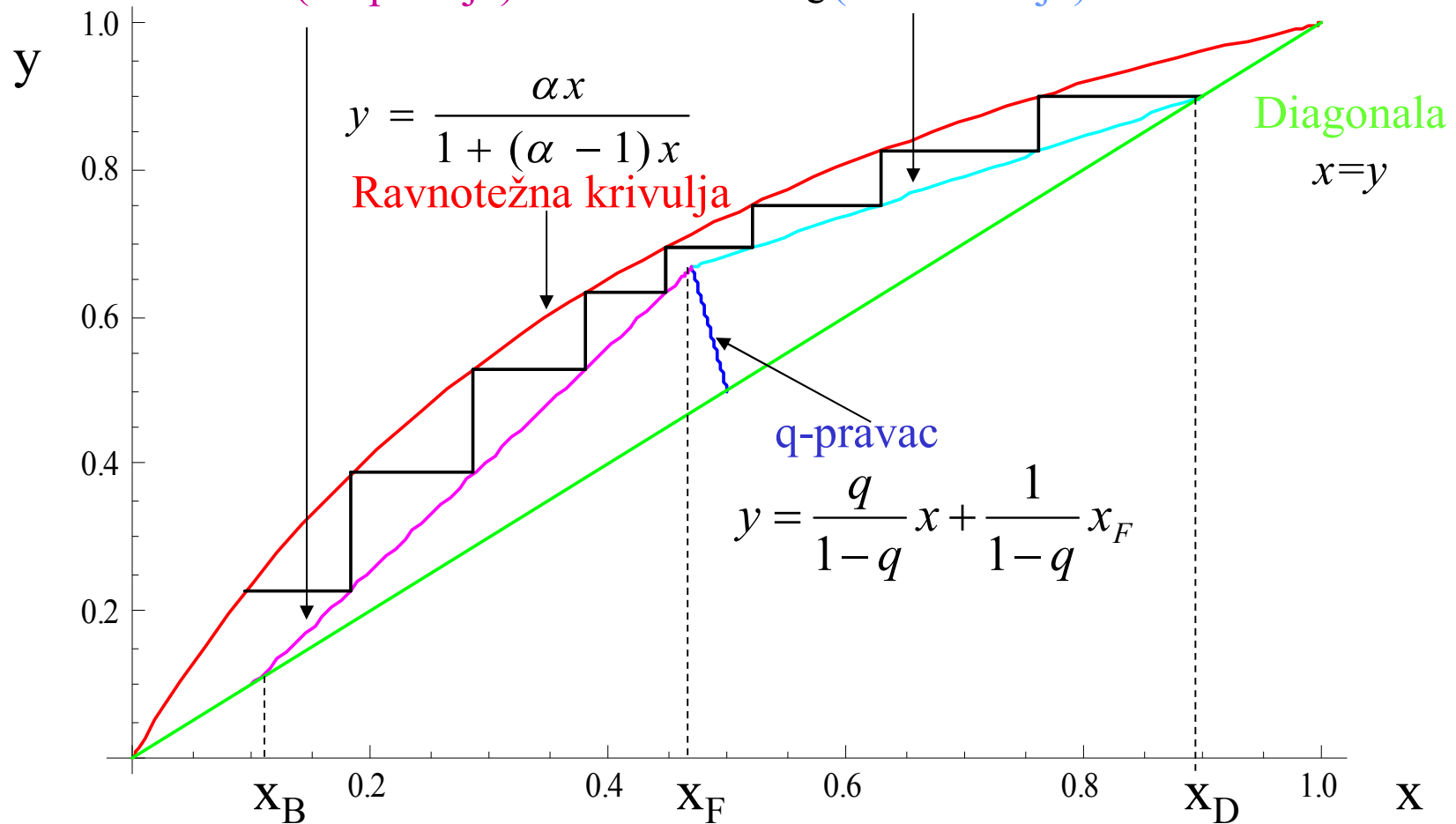
Za realni sustav odnos refluksnih omjera je 1,2-1,5 puta veći od R_{\min}

$$y_m = \frac{L}{V} x_{m+1} - \frac{B}{V} x_B$$

radni pravac donjeg dijela kolone (stripiranje)

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{1}{R+1} x_D$$

radni pravac gornje kolone (rektifikacije)



Popis simbola

x -molni udio lakše hlapive komponente u kapljevini

y -molni udio lakše hlapive komponente u pari

x_B -molni udio lakše hlapive komponente na dnu kolone

x_D - molni udio lakše hlapive komponente na vrhu kolone (destilatu)

x_F - udio lakše hlapive komponente u pojnoj smjesi

F-protok pojne smjese

D-protok destilata

B-protok na dnu

L-protok kapljevine (refluksa)

V-protok pare

R-refluksni omjer

α -relativna hlapivost (kvocjent udjel komponenata u kapljevini i pari; ukazuje na lakoću razdvajanja komponenta destilacijom)

Izračun broja idealnih plitica MaCabe-Thiele postupak (dvokomponentne idealne smjese)

- Relativne hlapljivosti konstantne (α)
- Nema gubitaka topline
- Protoci su konstantni (V,L-kons.)

Primjer 1 i 2: Izračun broja plitica (N) koristeći McCabe-Thiele-ov postupak.

Primjer 1 Treba razdijeliti smjesu etanola i vode molnog sastava 60% etanola (x_F) i 40% vode tako da se dobije destilat sa 95% etanola (x_D), i proizvod dna sa 5% etanola (x_B). Pojna je smjesa na tem. vrenja 89 °C, stoga je vrijednost toplinskog stanja pojene smjese 1 (q -vrijednost). Temperature vrha i dna kolone su 82 i 109 °C. Kolona je opremljena kondenzatorom s potpunim ukapljivanjem.

Primjer 1 (grafički postupak)

Iz termodinamičkih podataka za smjesu relativna hlapljivost lakše hlapive komponente (etanola) na vrhu, dnu i točki pojenja je (Eduard Beer; Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije 1985):

$$\text{Vrh: } 82 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \alpha=2.57$$

$$\text{Dno: } 109 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \alpha= 2.32$$

$$\text{Pojenje: } 89 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \alpha= 2.48$$

Kriterij za konstantnu relativnu hlapljivost :

$$\frac{2.57 - 2.32}{2.57 + 2.32} \leq 0.1 \ln \frac{2.57 + 2.32}{2}$$

$$0.0511 < 0.0894$$

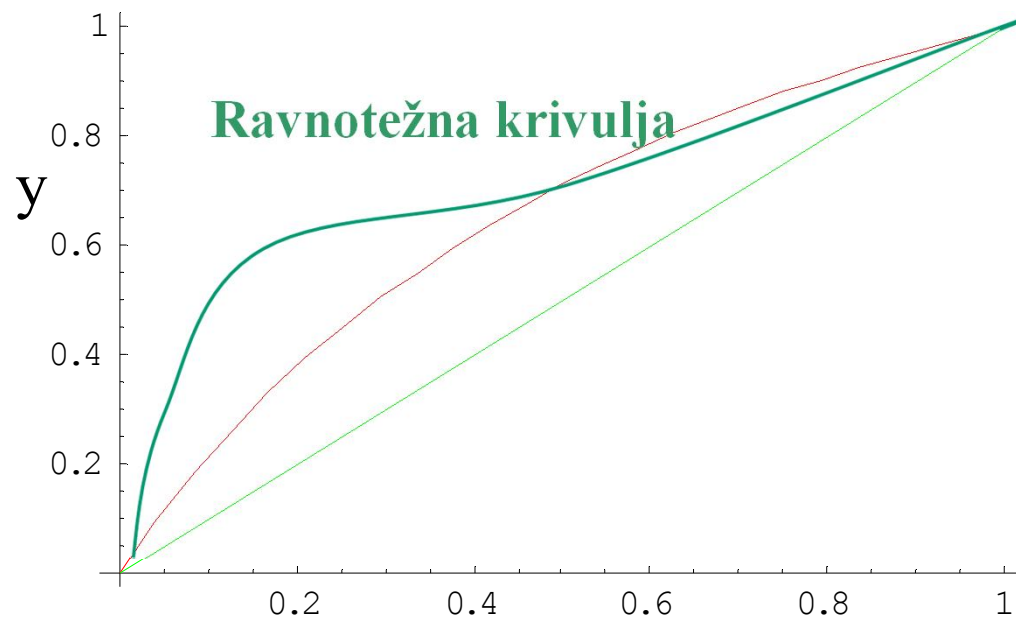
Kriterij je zadovoljen i računamo srednju vrijednost relativne hlapljivosti:

$$\alpha = \sqrt[3]{2.57 \cdot 2.48 \cdot 2.32} = 2.454$$

Ravnotežna krivulja para-kapljevina: $y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x}$

(x_F, y_F)

x	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
y	0.214	0.380	0.513	0.621	0.710	0.786	0.851	0.908	0.957



x-molni udio lakše hlapive komponente u kapljevini **X**
 y-molni udio lakše hlapive komponente u pari
 α -relativna hlapivost komponente

Minimalni refleksni omjer (R_{\min}):

$$\frac{R_{\min}}{R_{\min} + 1} = \frac{x_D - y_F}{x_D - x_F}$$

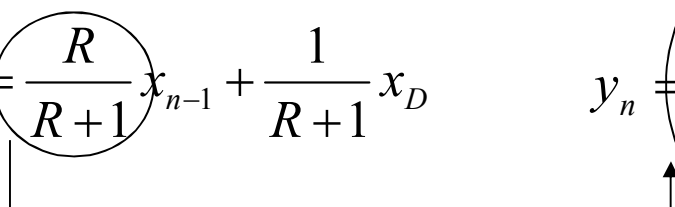
$$\frac{R_{\min}}{R_{\min} + 1} \frac{0.95 - 0.786}{0.95 - 0.60} = 0.469 = \frac{R_{\min}}{R_{\min} + 1}$$

$$R_{\min} = 0.883$$

Koristeći Van Winkle Todda korelaciju procjenjen je optimalni refleksni omjer (R_{opt}):

$$R_{\text{opt}} = R_{\min} \cdot \text{faktor korekcije} = 0.883 \cdot 1.182 = 1.044$$

Radni pravac sekcije rektifikacije (vrh kolone):

$$y_n = \frac{R}{R+1}x_{n-1} + \frac{1}{R+1}x_D \qquad y_n = \frac{L}{V}x_{n-1} + \frac{D}{V}x_D$$


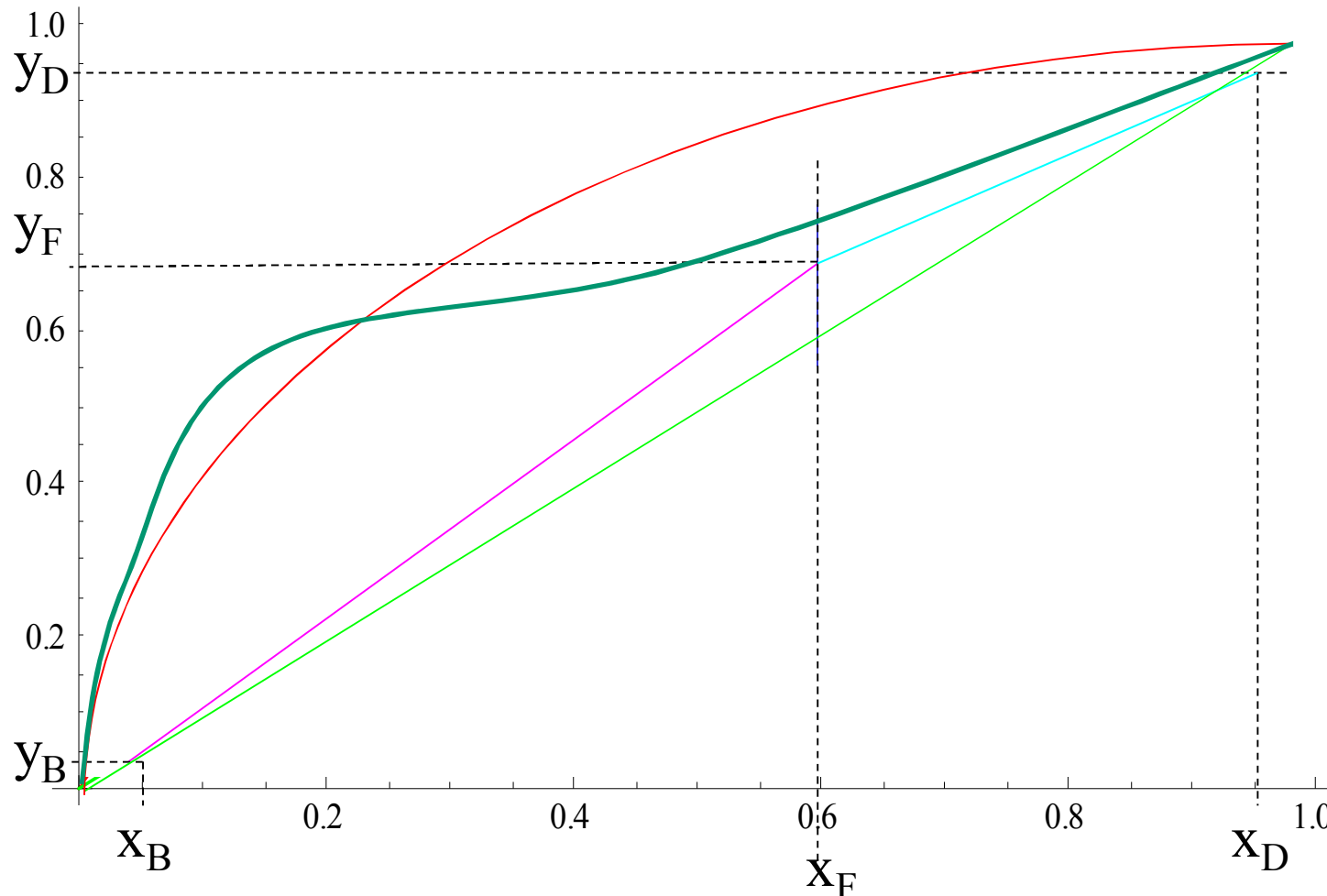
$$\frac{L}{V} = \frac{R}{R+1} = \frac{1.044}{1.044+1} = 0.511$$

$$0.511 = \frac{x_D - y}{x_D - x_F} = \frac{0.95 - y}{0.95 - 0.60}$$

$$y = 0.771$$

$y=0.771$ je vrijednost y za radni pravac sekcije rektifikacije na q -pravcu. Radni pravac sekcije rektifikacije provlačimo kroz točke $(0.95, 0.95)$ i $(0.60, 0.771)$, a radni pravac sekcije stripiranja kroz točke $(0.05, 0.05)$ i $(0.60, 0.771)$.

Za pojenje na temperaturi vrenja $q=1$, q -pravac je okomit na x -os.

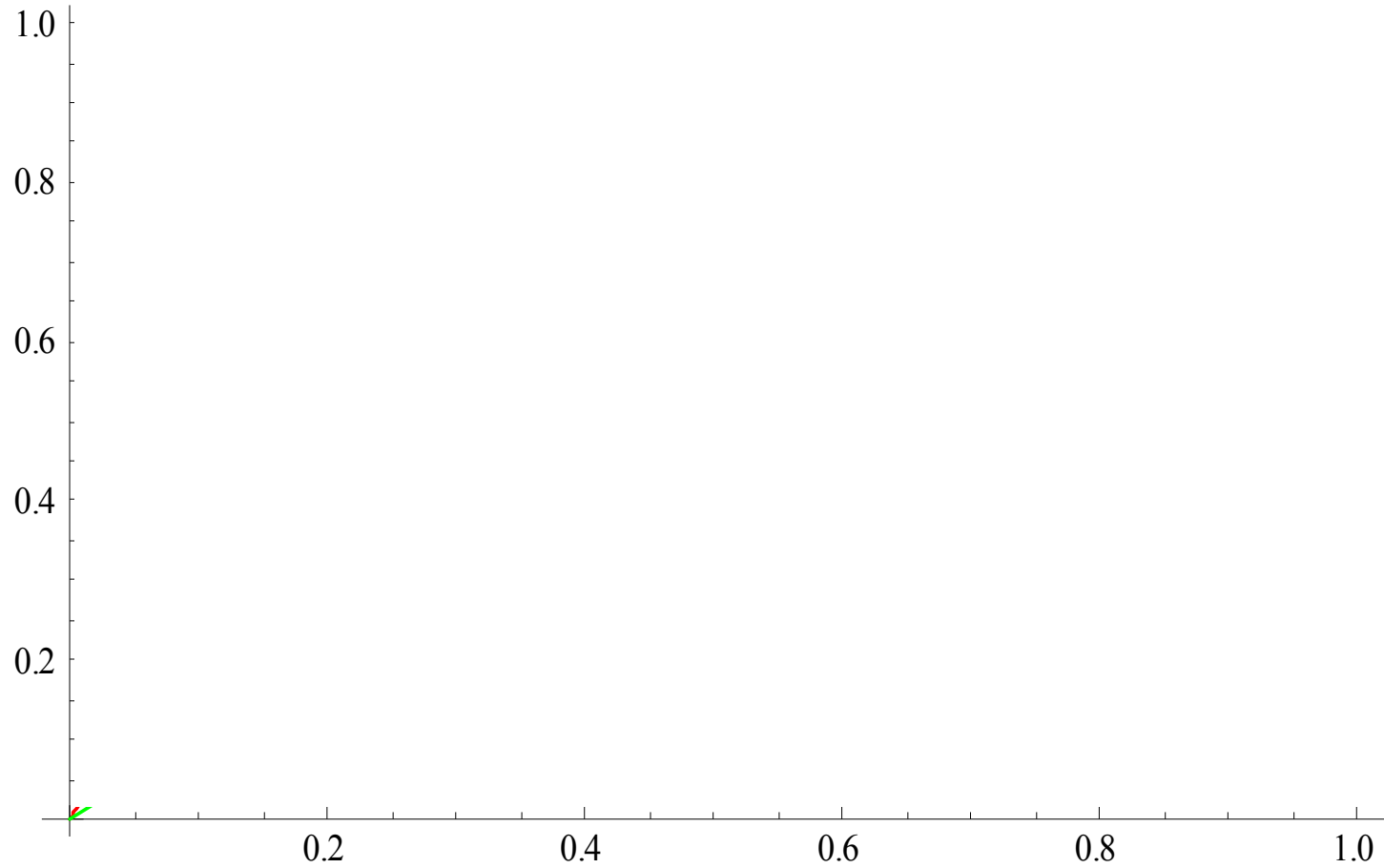


Grafičko rješenje daje 6 plitica u sekciji rektifikacije i 8 plitica u sekciji stripiranja

DZ

- Nacrtajte McCabe-Thiele-ov diagram koristeći podatke iz zadatka 1. (proračun kolone za destilaciju etanola).

DZ Seminar 6 IPBP



Primjer 1 (analitički postupak proračuna idealnih plitica)

Sekcija rektifikacije (vrh kolone)

$$y_n = \frac{L}{V} x_{n-1} + \frac{D}{V} x_D$$

$$\frac{L}{V} = 0.511$$

$$R_{opt} = \frac{L}{D} = 1.044$$

R-refluksni omjer;

R=L/D-kvocjent refluksa i destilata

$$61.1/124.83 \cdot 0.95=0.465$$

$$V=63.79/0.511=124.83 \text{ kmol h}^{-1}$$

$$L=61.1 \cdot 1.044=63.79 \text{ kmol h}^{-1}$$

$$y_n=0.511 \cdot x_{n-1}+0.465$$

Materijalna bilanca za 100 kmol h^{-1} smjese-etanol/voda (bilanca lakše hlapljive komponente):

$$100=D+B$$

$$0.6 \cdot 100=0.95 \cdot D + 0.05 \cdot B$$

$$60=0.95 \cdot D+0.05 \cdot (100-D)$$

$$D=61.1 \text{ kmol h}^{-1} \quad B=38.9 \text{ kmol h}^{-1}$$

Za kondenzator s potpunim ukapljivanjem $y_D=x_D=0.95$ iz
 jednadžbe za ravnotežnu krivulju:

$$y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x} \longrightarrow x_1 = \frac{y}{\alpha + (1 - \alpha)y} = 0.8856$$

$$y_2 = 0.511 \cdot x_1 + 0.465 = 0.917$$

$$x_2 = \frac{y_2}{\alpha + (1 - \alpha)y_2} = 0.8182$$

$$y_3 = 0.511 \cdot x_2 + 0.465 = 0.883$$

Postupak se ponavlja dok vrijednost za x ne postane manja
 od vrijednosti x_F , nakon posljednjeg koraka prelazimo na
 propačun broja podova u sekciji stripiranja (dno kolone).

Sekcija stripiranja

$$y_m = \frac{L}{V} x_{m+1} - \frac{B}{V} x_B \longrightarrow y_1 = 1.312 \cdot 0.6 - 0.016 = 0.772$$

$$V = 124.83 \text{ kmol h}^{-1} \quad x_1 = \frac{y_1}{\alpha + (1 - \alpha)y_1} = \frac{0.772}{2.454 * 0.772(1 - 2.454)}$$

$$B = 38.9 \text{ kmol h}^{-1}$$

$$L = B + V = 38.9 + 124.83 = 163.73 \text{ kmol h}^{-1}$$

$$\frac{L}{V} = \frac{163.73}{124.83} = 1.312$$

$$\frac{B}{V} x_B = \frac{38.9}{124.83} 0.05 = 0.016$$

Ponavljajući postupak dok
vrijednost za x ne bude manja
od $x_B = 0.05$

Rješenje: 7 plitica za sekciju rektifikacije i 8 plitica za sekciju stripiranja.

DZ

- Izračunajte analitičkim postupkom molni sastave lakše hlapive komponente (etanola) u svim pliticama destilacijske kolone iz zadatka 1. te odredite broj plitica.

Primjer 2 Srednja vrijednost relativna hlapljivost smjese iznosi 2.45 (α) (primjer 1). Vrijednost toplinskog stanja pojene smjese je 0.85 (q-vrijednost). Molni udio etanola u destilatu je 0.9 (x_D), u pojnoj smjesi 0.5 (x_F) i na dnu 0.1 (x_B).

a) Potrebno je izračunati minimalni refluksni omjer (R_{\min}).

b) Ako je realni refluksni omjer 1.5 puta veći od minimalnog izračunajte broj teorijskih jedinica prijenosa (N).

Riješiti u MATHEMATICI WOLFRAM

Primjer 2 (a)

Ravnotežna krivulja:

$$y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x} \quad \text{With} \left[\{a = 2.45\}, \frac{a - 1}{1 + (a - 1)x} \right] \&$$

x-molni udio u kapljevini

y-molni udio u pari

a=α-relativna hlapivost komponente

q-pravac:

$$y = \frac{q}{1 - q} x + \frac{1}{1 - q} x_F \quad \text{With} \left[\{q = 0.85\}, \frac{q - 1}{q - 1} - \frac{z_f}{q - 1} \right] \&$$

q- toplinsko stanje pojne smjese

z_f=x_f-udio lakše hlapive komponente u pojnoj smjesi

Primjer 2 (a,b)

Radni pravaci

radni pravac donjeg dijela kolone (stripiranje)

$$\mathbf{a)} \quad y_{\text{pinch}} + \frac{(\#1 - x_{\text{pinch}}) (x_b - y_{\text{pinch}})}{x_b - x_{\text{pinch}}} \quad \&$$

radni pravac gornje kolone (rektifikacije)

$$\mathbf{a)} \quad y_{\text{pinch}} + \frac{(\#1 - x_{\text{pinch}}) (x_d - y_{\text{pinch}})}{x_d - x_{\text{pinch}}} \quad \&$$

$$\mathbf{b)} \quad y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{1}{R+1} x_D \quad \text{With} \left[\{R = 1.5143\}, \frac{R \#1}{R+1} + \frac{x_0}{R+1} \right] \quad \&$$

Primjer 3. Koristeći McCabe-Thielov diagram iz primjera 2. (Wolfram mathematica demonstration project "McCabe & Thiele Graphical Method") raspravite utjecaj promjene parametra destilacije (relativnu hlapljivost (α), sastav destilata (x_D), dna (x_B), pojne smjese (x_F) i toplinsko stanju pojne smjese (q) na promjenu broja idealnih plitica (N). Optimalna plitica za pojenje je ona koja leži na sjecištu ravnotežnih pravaca.

<http://demonstrations.wolfram.com/McCabeThieleGraphicalMethod/>