درس عملیات واحد ۱

فهرست مطالب

- تعادل بخار-مایع
- تقطیر:

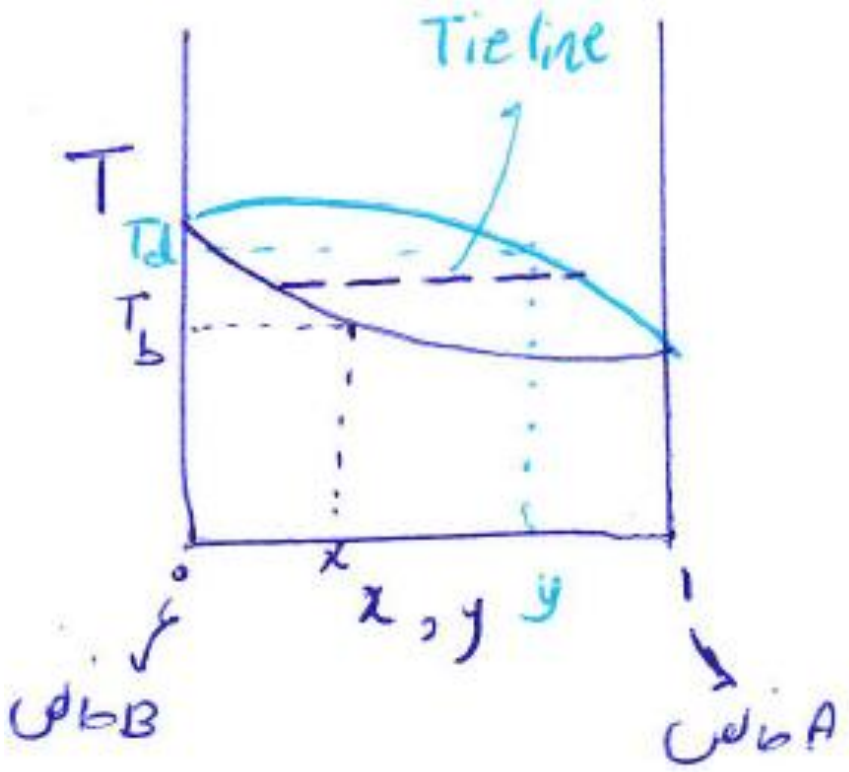
  تقطیر تعادلی

  تقطیر دیفرانسیلی

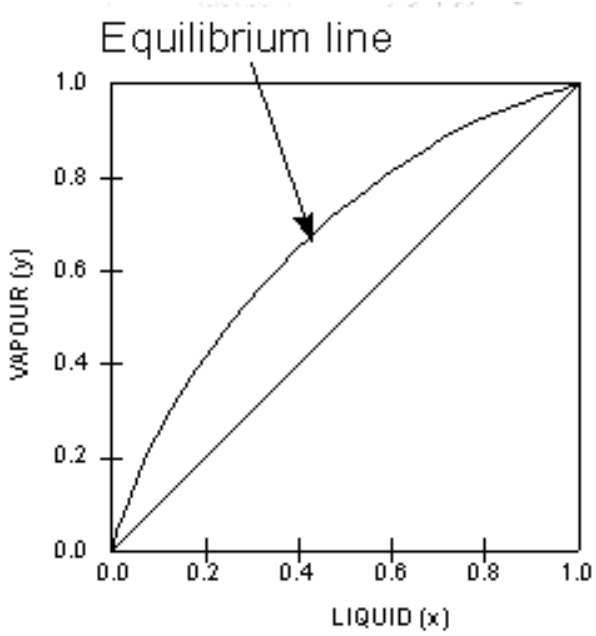
  تقطیر مداوم
- استخراج مایع-مایع
- استخراج جامد-مایع

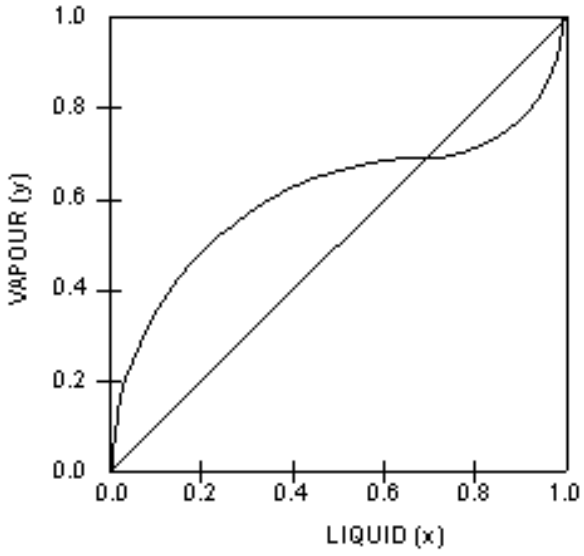
منحنی های تعادلی

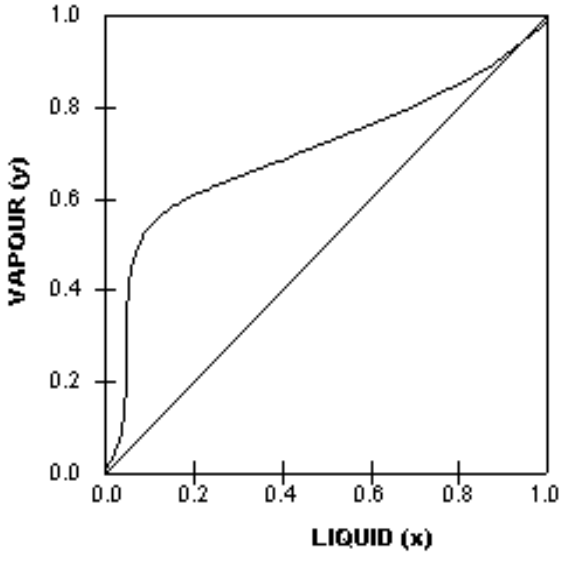
- منحنی T-xy

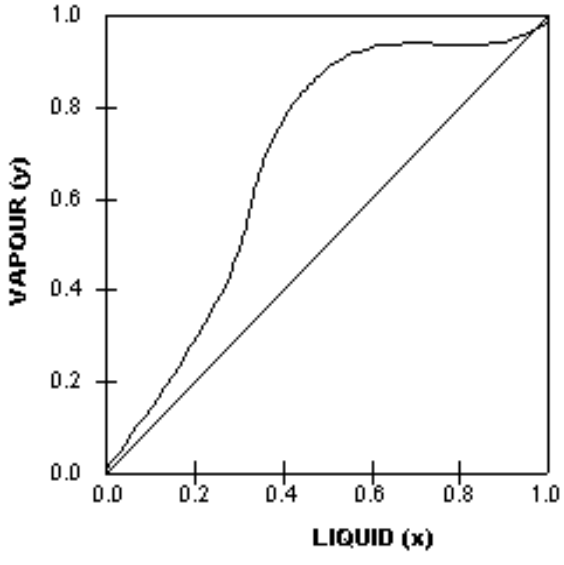


- منحنی y-x در فشار ثابت









روش رسم نمودارهای y-x و T-xy

- با استفاده از داده های تجربی
- با استفاده از قوانین رائولت و دالتون

$$\left.\begin{aligned} p_A &= p_A^*.x_A \\ p_B &= p_B^*.x_B \end{aligned}\right\} \Rightarrow p_t = p_A + p_B = p_A^*.x_A + p_B^*.(1-x_A)$$

$$x_A = \frac{p_t - p_B^*}{p_A^* - p_B^*} \quad (1)$$

$$y_A = \frac{p_A}{p_t} = \frac{p_A^*.x_A}{p_t} \quad (2)$$

برای استفاده از معادلات فوق به ترتیب زیر عمل می گردد:

۱) تعیین دمای جباب ماده A و B به کمک معادله آنتوان و قراردادن فشار اشباع برابر فشار کل در هر معادله مربوط به ماده خالص

۲) انتخاب دما در محدوده دمای جباب مواد خالص و قرار دادن در معادلات فشار بخار ماده A و B

۳) تعیین مقادیر x و y به کمک روابط ۱ و ۲

روش رسم نمودارهای T-xy و y-x

- با استفاده از ضریب فراریت (فاکتور جداسازی)

$$\alpha_{AB} = \frac{\frac{y_A}{y_B}}{\frac{x_A}{x_B}} \Rightarrow \quad \alpha_{AB} = \frac{\frac{p_A / p_t}{p_B / p_t}}{\frac{p_A / p_A^*}{p_B / p_B^*}} = \frac{p_A^*}{p_B^*}$$

ضریب فراریت تابع فشار بخار و فشار بخار تابع دما می باشد. با توجه به تغییرات دما در طول برج انتظار می رود این پارامتر تغییر کند. اگر تغییرات ضریب فراریت کم باشد از متوسط حسابی و اگر زیاد باسد از متوسط هندسی آن برای کل برج استفاده می شود.

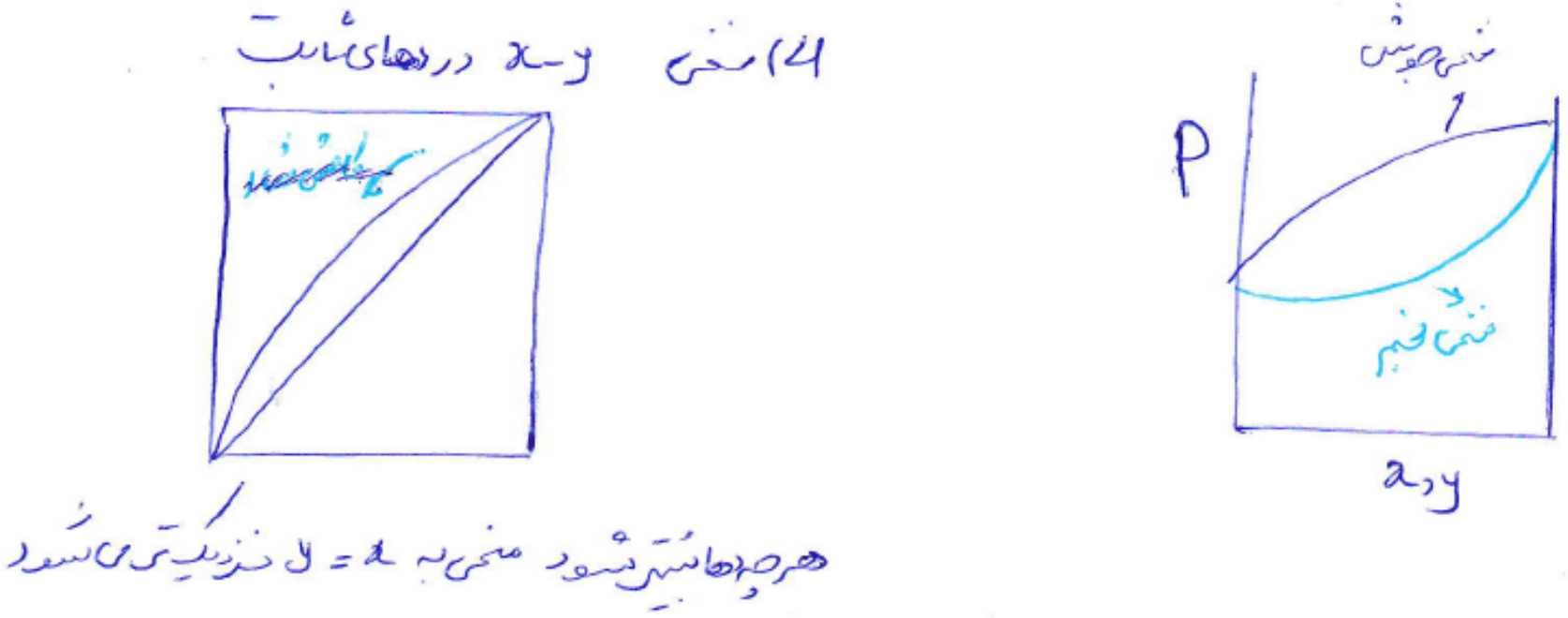
هر چه مقدار ضریب فراریت بزرگتر باشد جداسازی راحت تر است.

$$p_t = p_A + p_B \Rightarrow \frac{p_A^*.x_A}{y_A} = p_A^*.x_A + p_B^*.(1-x_A)$$

$$\frac{p_A^*.x_A}{p_B^* y_A} = \frac{p_A^*}{p_B^*}.x_A + (1-x_A)$$

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

منحنی تعادلی p-xy



- در فرایند تقطیر مداوم عمدتا تغییر فشار کم و تغییر دما زیاد است. منحنی های T-xy در فشار ثابت کاربردی تر می باشند.

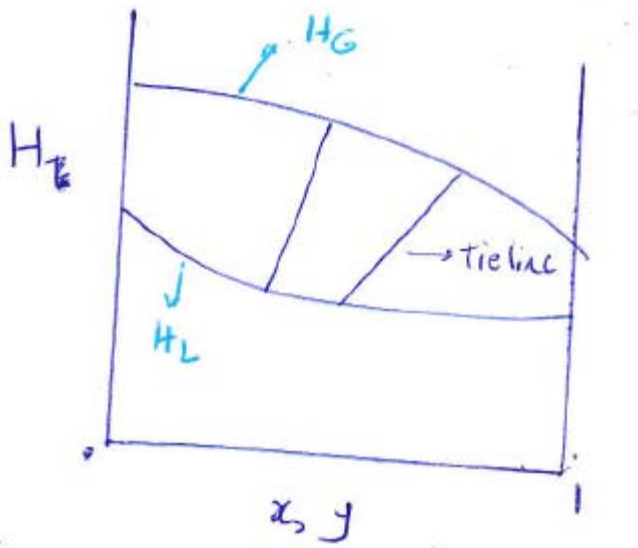
منحنی تعادل H-xy

$$H_L = C_L M_{ave}\left(T_L - T_0\right) + \Delta H_s$$

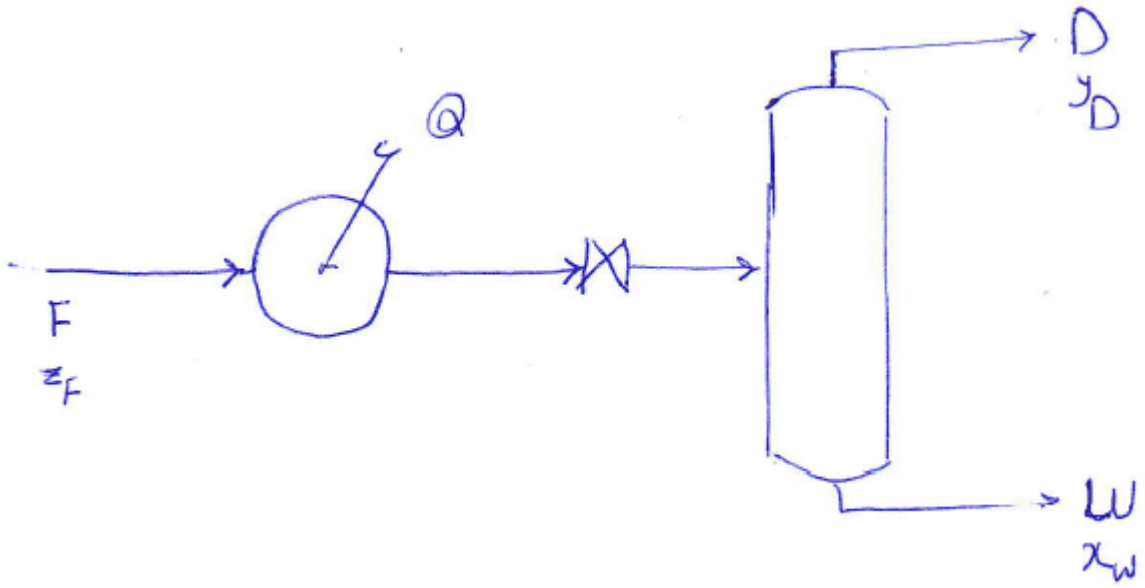
$$C_L = \sum x_i C_{Li}$$

$$M_{ave} = \sum x_i M_i$$

$$H_G = y[\,C_{L,\mathrm{A}} M_{\mathrm{A}}(t_G - t_0) + \lambda_{\mathrm{A}} M_{\mathrm{A}}\,] + (1-y)[\,C_{L,\mathrm{B}} M_{\mathrm{B}}(t_G - t_0) + \lambda_{\mathrm{B}} M_{\mathrm{B}}\,]$$



تقطیر تعادلی (تبخیر ناگهانی)



خط عملیاتی در تبخیر ناگهانی

$$\left.\begin{aligned} F &= D + W \\ z_F F &= D y_D + W x_w \end{aligned}\right\} \Rightarrow \frac{y_D - z_F}{x_w - z_F} = -\frac{W}{D}$$

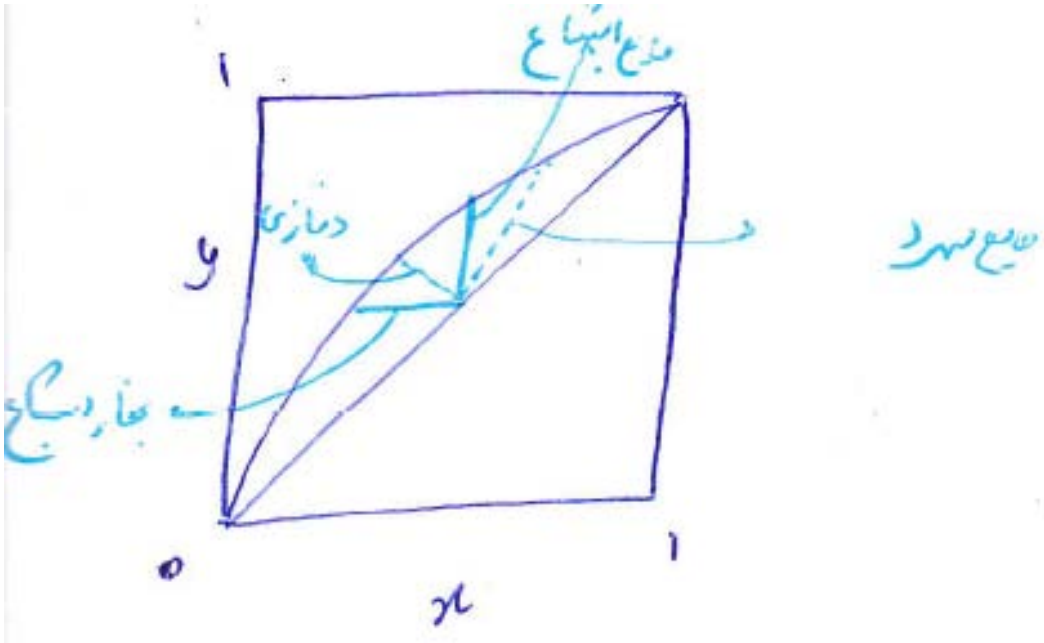
$$y_D = \frac{\alpha . x_w}{1 + (\alpha - 1).x_w}$$

- محصول برج تبخیر ناگهانی

بخار اشباع

مایع اشباع

دوفازی



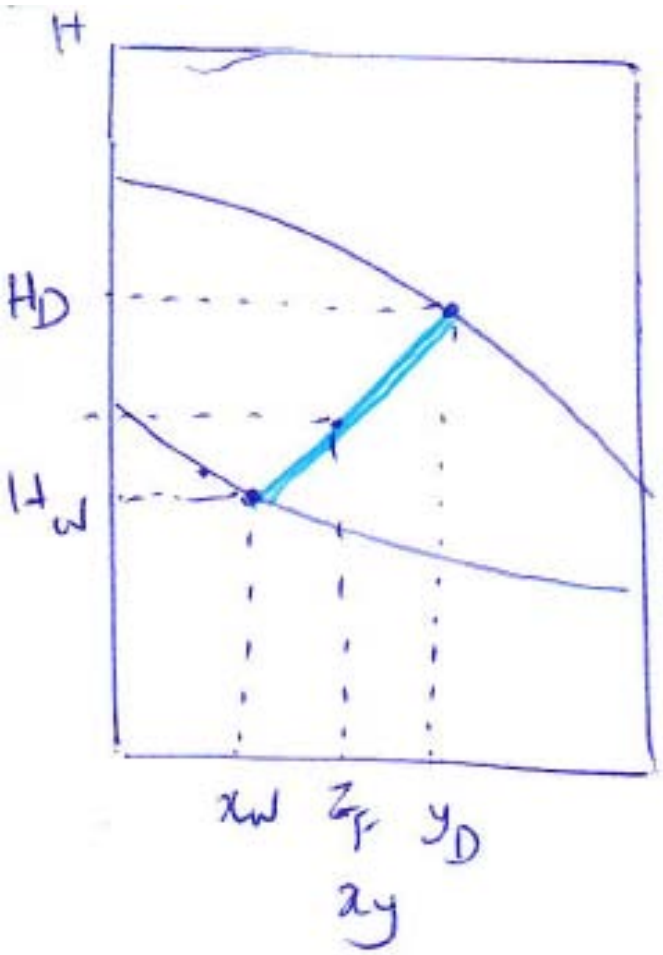
نکته: در صورتی که خط عملیاتی در منطقه مایع سرد یا بخار فوق اشباع قرار گیرد یعنی شیر فشار شکن یا هیتر به درستی عمل نکرده است و نمی توان از این برج انتظار محصول مطلوب داشت.

محاسبات تبخیر ناگهانی به کمک منحنی H-xy

$$\frac{z_F - y_D}{z_F - x_w} = -\frac{W}{D}$$

$$H_F F + Q = D H_D + W H_w$$

$$\frac{H_F + \frac{Q}{F} - H_D}{H_F + \frac{Q}{F} - H_w} = -\frac{W}{D} \Rightarrow \frac{z_F - y_D}{H_F + \frac{Q}{F} - H_D} = \frac{z_F - x_w}{H_F + \frac{Q}{F} - H_w}$$



- رسم منحنی H-xy
- W و D روی یک خط ربط هستند.

تبخیر ناگهانی در سیستم چند جزئی

$$F = D + W$$

$$z_{F,i}F = Dy_{D,i} + Wx_{w,i}$$

$$\sum x_{w,i} = \sum \frac{\left(1+\frac{W}{D}\right)z_{F,i}}{K_i + \frac{W}{D}} = 1, \quad K_i = \frac{y_{D,i}}{x_{w,i}}$$

معمولاً در مسائل تبخیرناپذیر یا $\frac{W}{D}$ معلوم است. حال به بررسی نحوه حل مدل های مختلف مسائل تبخیر ناپذیر می پردازیم:

الف) فرض P_t و $\frac{W}{D}$ معلوم:

حدس T ⟵ محاسبه K_iها ⟵ $\sum x_{iW} = 1$ ⟶ (yes) $y_{D_i} = \checkmark$

$K_i = \frac{P_i^*}{P_t}$

(بهترین حدس بین فاصله اشباع و نقطه شبنم نقطه باغلظت خوراک)

(NO) ↓

اگر $\sum x_{wi} > 1$ ← دمای حدسی باید کاهش یابد و بالعکس

ب) اگر P_t ، T معلوم باشد:

حدس $\frac{W}{D}$ ⟵ محاسبه K_iها ⟵ $\sum x_{wi} = 1$ بدست آمد ⟶ (yes) $y_{D_i} = \checkmark$

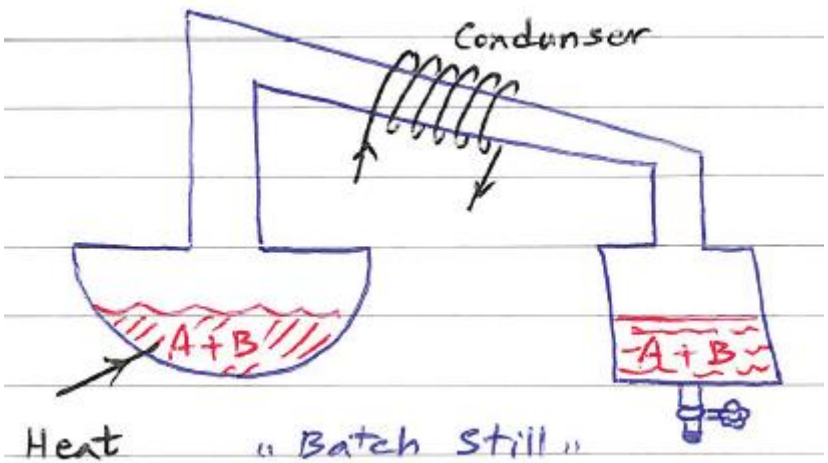
(NO) ↓

عددی بین ۰ تا ۵

- تمرین: مخلوط دو جزئی ایده آل حاوی ۵۰٪ A، و ۵۰ ٪ جزء B در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد و فشار ۱ اتمسفر به صورت بخار اشباع وارد برج تقطیر می شود. در صورتی که فشار بخار اجزاء به ترتیب ۱۰۵۰ و ٤٩٤ میلیمتر جیوه باشد مطلوبست تعیین مقادیر بخار و مایع خروجی از بالا و پایین برج برای ۱۰۰ کیلوگرم مول از خوراک.

درس عملیات واحد ۱

تقطیر دیفرانسیلی



	Total material	Component A
Moles in	0	0
Moles out	dD	y^*dD
Moles accumulated	dL	$d(Lx) = Ldx + xdL$
In—out = accumulation	$0 - dD = dL$	$0 - y^*dD = Ldx + xdL$

معادله رایلی

$$y^*dL = Ldx + xdL$$

$$\int_W^F \frac{dL}{L} = \ln\frac{F}{W} = \int_{x_W}^{x_F} \frac{dx}{y^* - x}$$

$$\ln \frac{F}{W} = \int_{x_W}^{x_F} \frac{dx}{y^* - x}$$

$$y = \frac{\alpha . x}{1 + (\alpha - 1).x}$$

$$\ln \frac{F}{W} = \frac{1}{\alpha - 1} \ln \frac{x_F(1 - x_W)}{x_W(1 - x_F)} + \ln \frac{1 - x_W}{1 - x_F}$$

Illustration 9.6 Suppose the liquid of Illustration 9.4 [50 mol % *n*-heptane (A), 50 mol % *n*-octane (B)] were subjected to a differential distillation at atmospheric pressure, with 60 mol % of the liquid distilled. Compute the composition of the composited distillate and the residue.

SOLUTION *Basis*: $F = 100$ mol. $x_F = 0.50$, $D = 60$ mol, $W = 40$ mol. Eq. (9.42):

$$\ln \frac{100}{40} = 0.916 = \int_{x_W}^{0.50} \frac{dx}{y^* - x}$$

The equilibrium data are given in Illustrations 9.1 and 9.4. From these, the following are calculated:

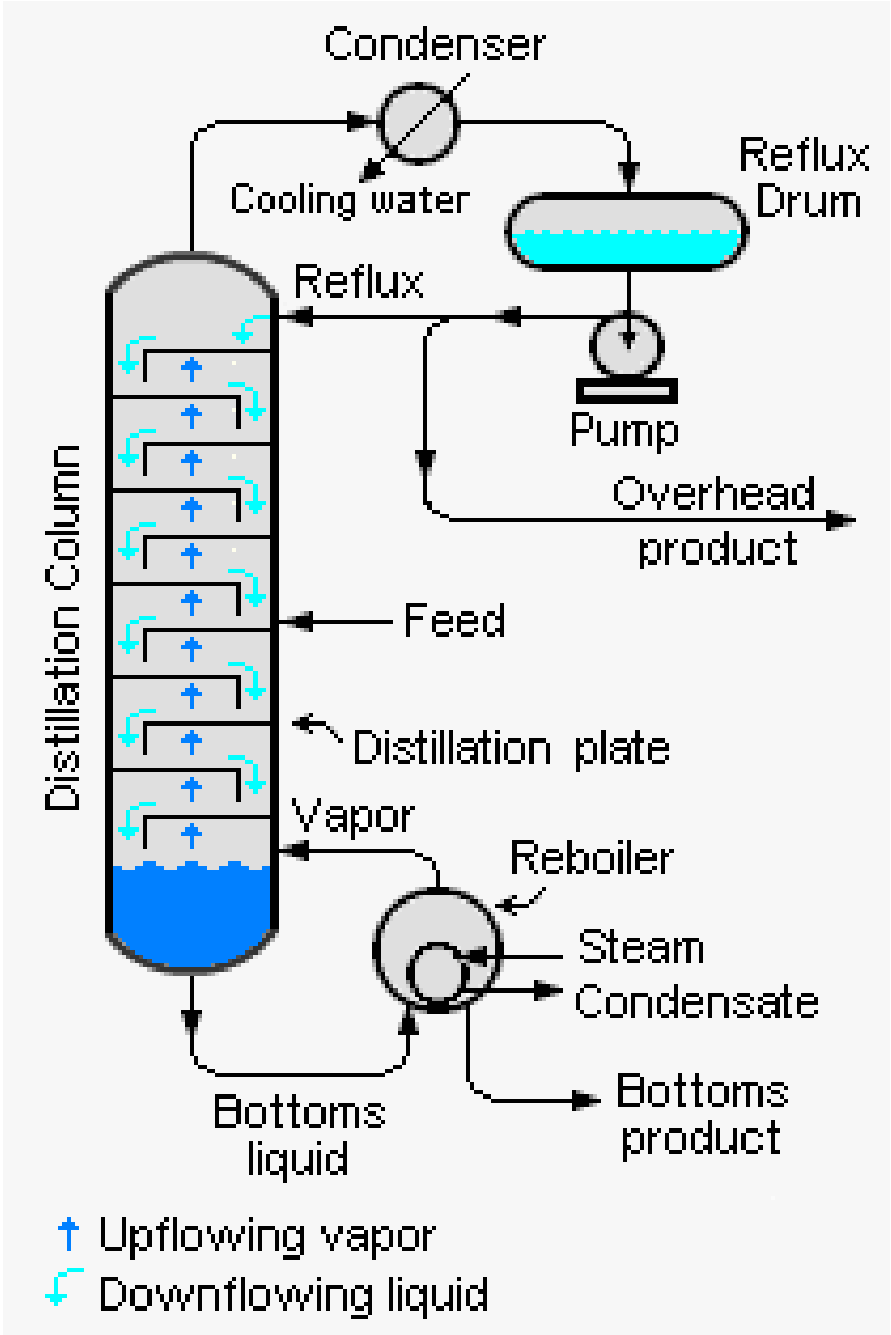
x	0.50	0.46	0.42	0.38	0.34	0.32
y^*	0.689	0.648	0.608	0.567	0.523	0.497
$1/(y^* - x)$	5.29	5.32	5.32	5.35	5.50	5.65

x as abscissa is plotted against $1/(y^* - x)$ as ordinate, and the area under the curve obtained beginning at $x_F = 0.50$. When the area equals 0.916, integration is stopped; this occurs at $x_W = 0.33$ mole fraction heptane in the residue. The composited distillate composition is obtained through Eq. (9.43),

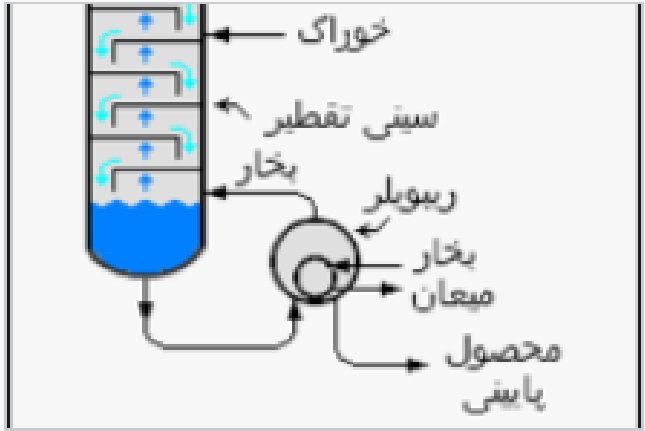
$$100(0.50) = 60y_{D,\,av} + 40(0.33)$$

$$y_{D,\,av} = 0.614 \text{ mole fraction heptane}$$

تقطیر مداوم



شمایی از بخش غنی‌سازی یک واحد تقطیر

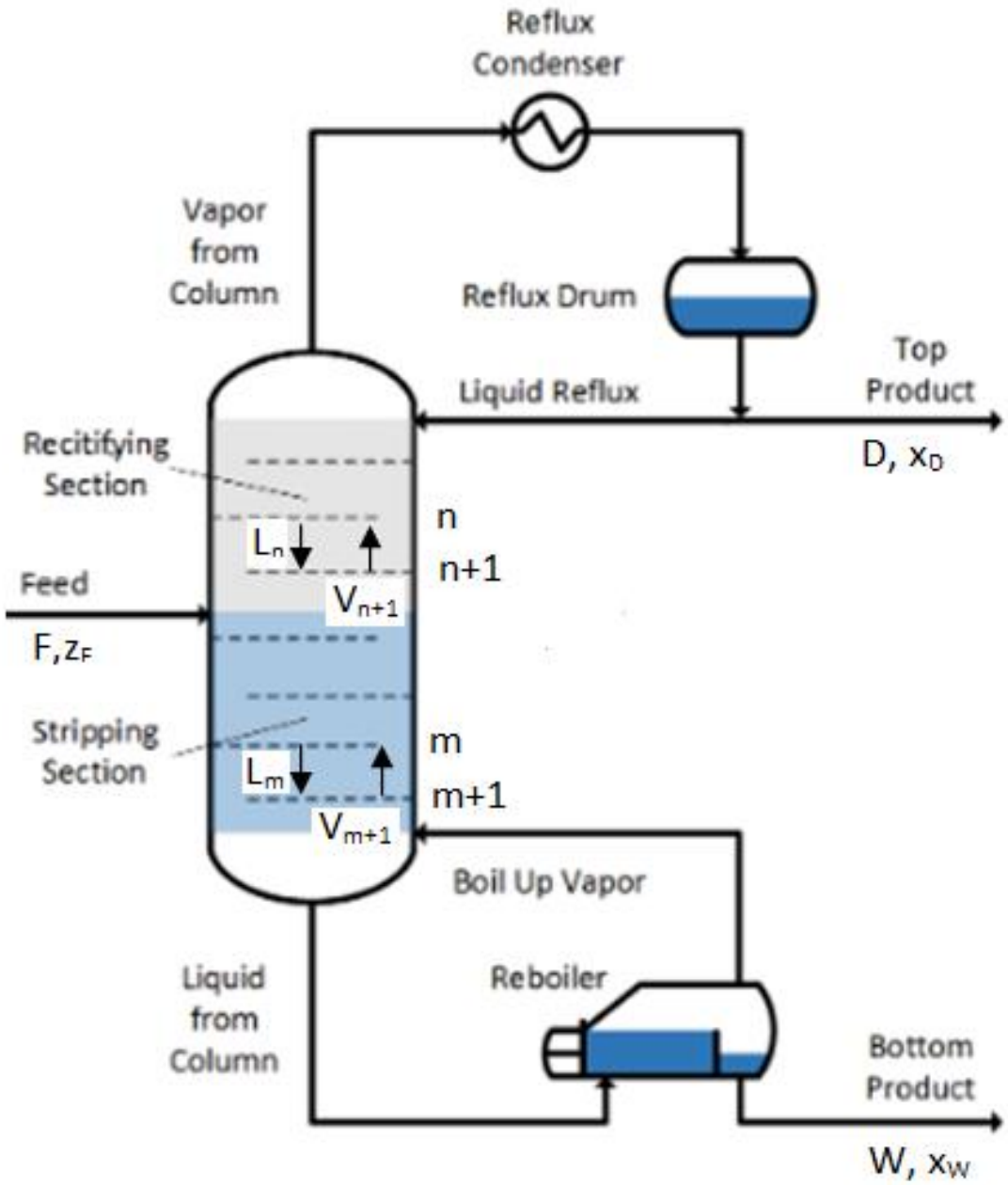


شمایی از بخش عاری‌سازی یک واحد تقطیر

تقطیر مداوم

کندانسور کامل

کندانسور جزئی

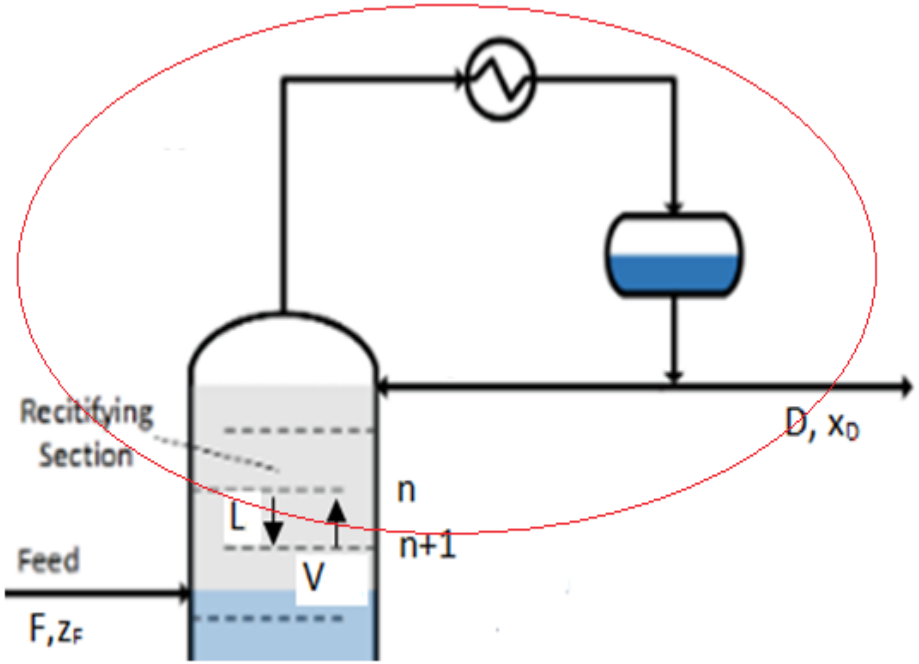


محاسبات تقطیر مداوم برای سیستم دو جزئی: ۱) روش مک کیب ۲) روش پانچون ساواریت

- روش مک کیب:

فرضیات: اگر گرمای نهان تبخیر جزء سبک و سنگین تقریباً با هم برابر باشد یک مول از ماده سبک تبخیر شده و یک مول از مایع سنگین کندانس می شود. در نتیجه دبی گاز و مایع در طول مسیر از سینی به سینی تغییر نکرده و برابر هستند. بنابراین L و V در بالای برج ثابت و همچنین L و V در پایین برج نیز ثابت هستند.

تعیین خطوط تبادل (عملیاتی) بالا و پایین برج



- خط تبادل بالای برج:

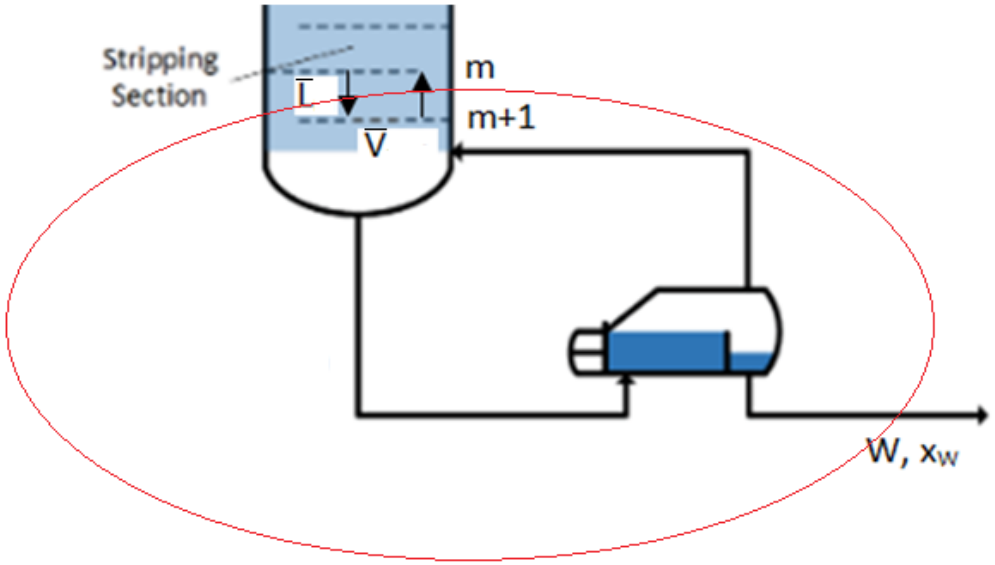
$$V = L + D$$

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

$$V y_{n+1} = L x_n + D x_D \longrightarrow y_{n+1} = \frac{L}{V} x_n + \frac{D}{V} x_D$$

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

- خط تبادل پایین برج:



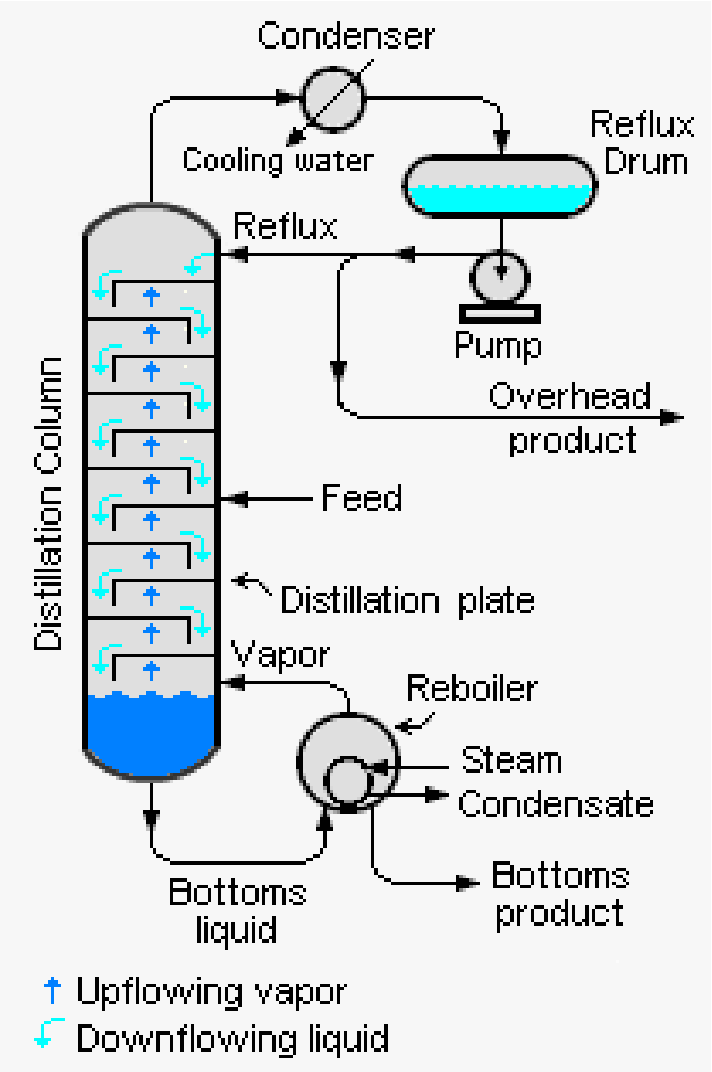
$$\bar{L} = \bar{V} + W$$

$$y_{m+1} = \frac{\bar{L}}{\bar{L} - W} x_m - \frac{W}{\bar{L} - W} x_w$$

خط خوراک: جایی که غلظت خوراک را به ما نشان می دهد به عبارتی بالا و پایین برج را از هم جدا می کند.

- f: تعداد مول هایی که به ازای هر مول خوراک به بخار بالای برج افزوده می شود.
- q: تعداد مول هایی که به ازای هر مول خوراک به مایع پایین برج افزوده می شود.

$$f + q = 1$$



- اگر خوراک در نقطه حباب وارد شود:
- اگر خوراک در نقطه شبنم وارد شود:
- اگر خوراک مایع سرد وارد شود:
- اگر خوراک بخار مافوق اشباع وارد شود:
- اگر خوراک دو فازی وارد شود:
- نتیجه گیری کلی:

$$\bar{L} = L + F(1-f) \quad (1)$$

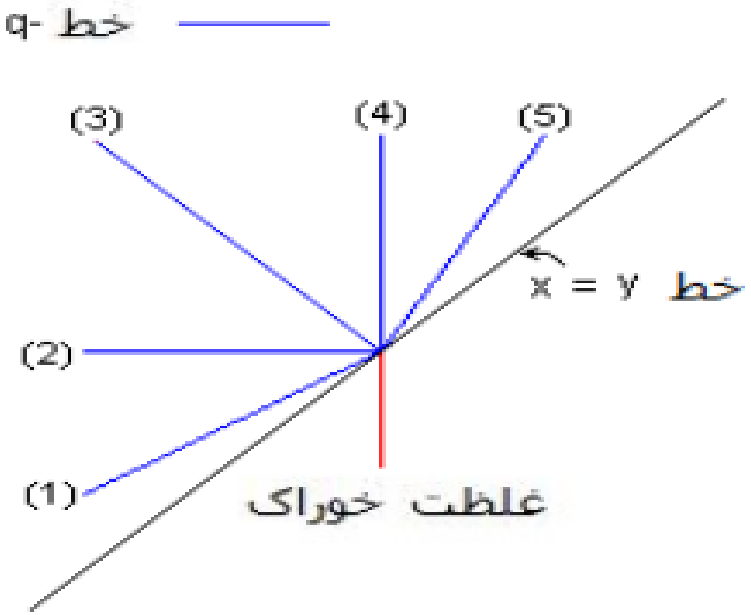
$$V = \bar{V} + Ff \quad (2)$$

$$Fz_F = Dx_D + Wx_W \quad (4)$$

$$fFy = -(1-f)Fx + Fz_F \quad (5)$$

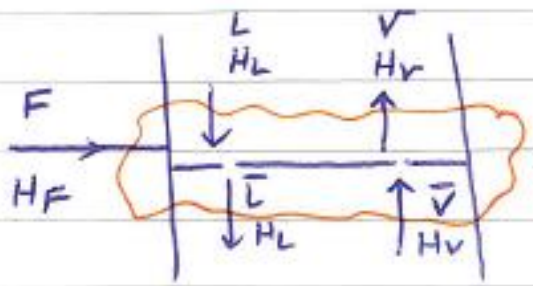
$$f-line: \quad y = -\frac{(1-f)}{f}x + \frac{x_F}{f}$$

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



(1) بخار مافوق داغ
(2) بخار اشباع
(3) حالت دو فازی
(4) مایع اشباع
(5) مایع سرد

تعیین q با توجه به اطلاعات آنتالپی



* فرض: تأثیر گرمای دما و فشار بر آنتالپی هر جریان ناچیز است

با نوشتن موازنه جرم به دنبال یافتن رابطه‌ای برای سینی و جریان‌ها هستیم:

$$F + L + \bar{V} = \bar{L} + V \quad (I)$$

$$F H_F + L H_L + \bar{V} H_V = \bar{L} H_L + V H_V$$

$$F H_F + (\bar{V} - V) H_V = (\bar{L} - L) H_L$$

$$(I) \Rightarrow \bar{L} - L = F$$

$$\frac{\bar{L} - L}{F} = \frac{H_V - H_F}{H_V - H_L} = q$$

* نکته: $\bar{L} - L = Fq$ مربوط به سینی

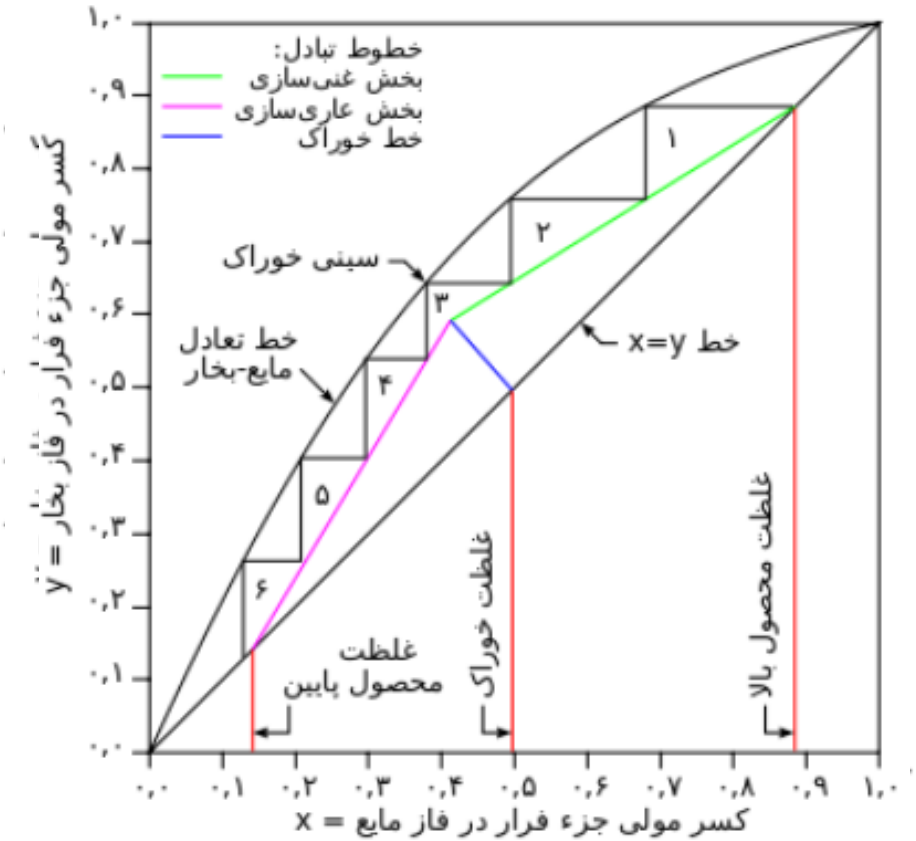
$\bar{V} - V = F(q-1)$ خوراک تفاوت زیادی

q: حرارت لازم جهت تبخیر یک مول خوراک / حرارت نهان تبخیر خوراک

q: اگر خوراک ندارد چون شرایط بیرون برج را در اختیار نمی‌دانیم

تعیین تعداد سینی های برج تقطیر به کمک روش مک کیب

۱) رسم منحنی تعادل y برحسب x با توجه به داده های تعادلی یا معادلات موجود



۲) رسم خط عملیاتی بالای برج

۳) رسم خط خوراک

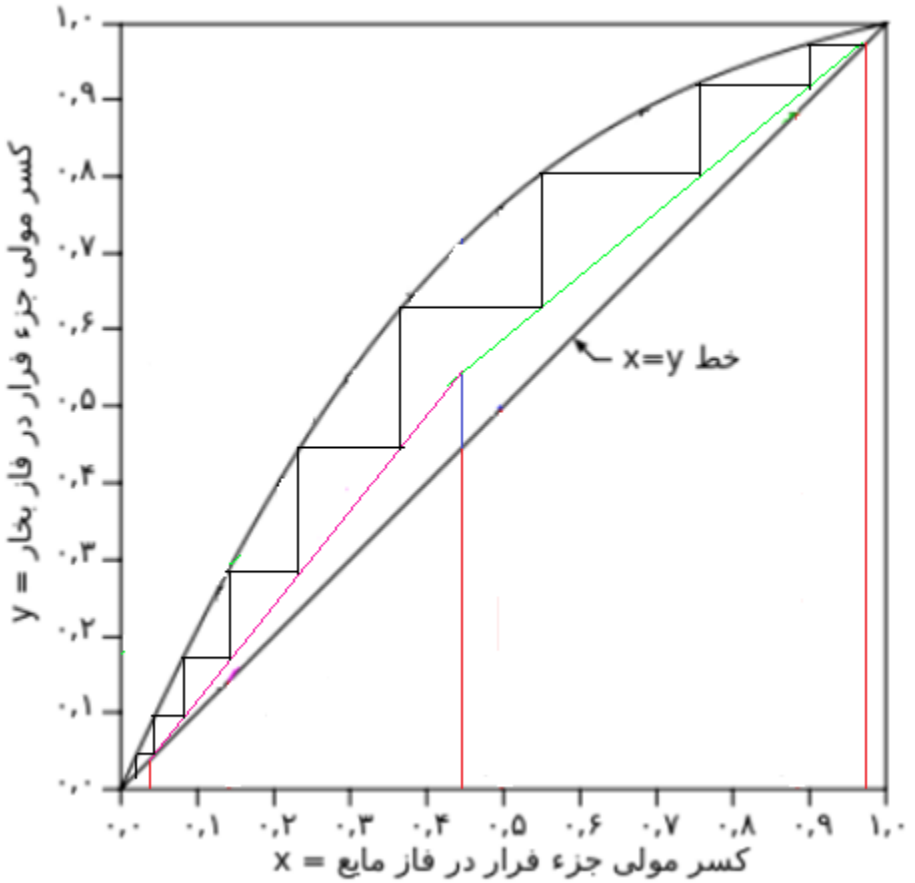
۴) رسم خط عملیاتی پایین برج

۵) تعیین تعداد مراحل با رسم پلکار

مثال: برج تقطیر مقدار ۳۰۰۰۰ پوند بر ساعت مخلوط ٪۴۰ بنزن و ٪۶۰ تولوئن را تفکیک می کند. فشار اتمسفری است . محصول بالا و پایین برج به ترتیب ٪ ۹۷ بنزن و ٪ ۳ بنزن دارد. نسبت برگشتی ۴/۵، حرارت تبخیر مولی بنزن، تولوئن و خوراک مساوی و برابر ۷۶۷۵ کالری بر گرم مول می باشد، مطلوبست محاسبه: الف) سرعت مولی محصول بالا و پایین برج، ب) تعداد مراحل تئوری اگر خوراک در نقطه حباب باشد.

حل:

$$\frac{x_D}{R+1} = \frac{0.974}{5.5} = 0.18$$

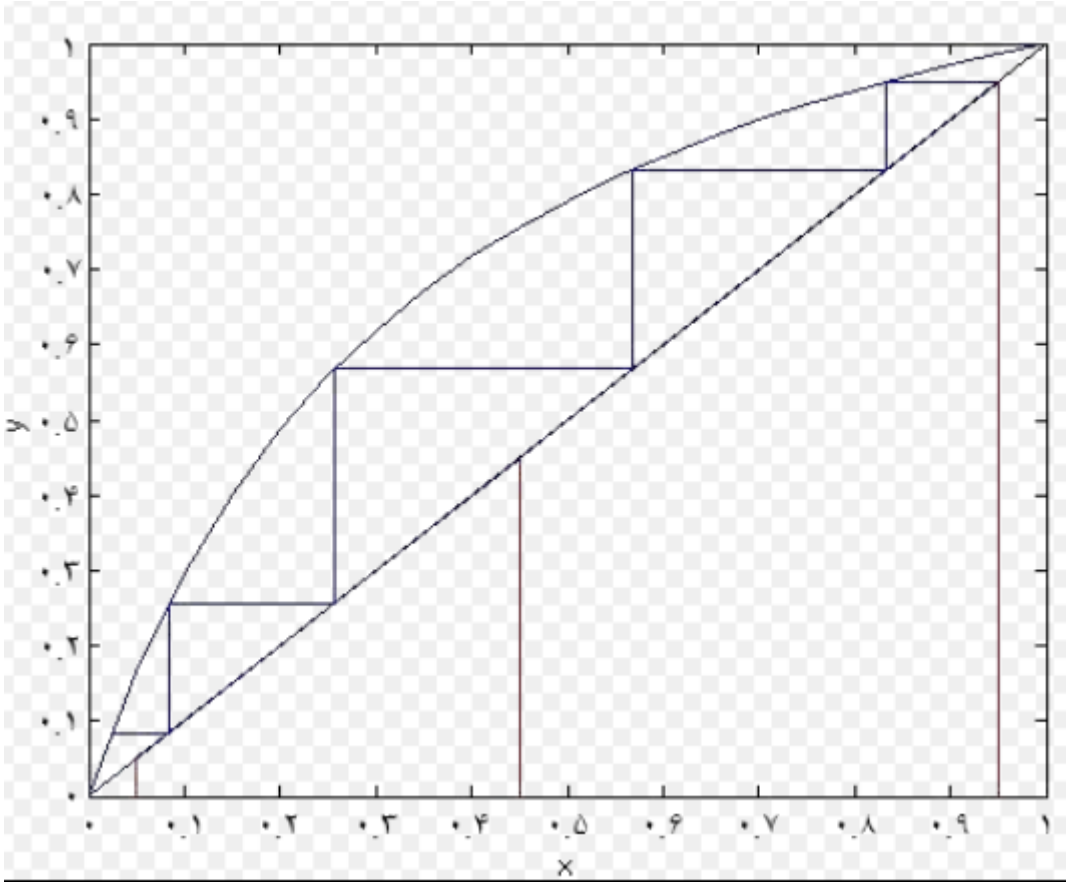


تمرین

مخلوط از بنزن و تولوئن شامل 40٪ مولی بنزن لازم است تفکیک شده تا محصولاتی با 90٪ و 10٪ مولی بنزن بدست آید. خوراک در نقطه حباب وارد برج شده از کندانسور کامل استفاده شده و نسبت مایع برگشتی 3 است با بدست آوردن معادلات تعادلی برج تعداد سینی ایده آل مورد نیاز و محل ورود خوراک را مشخص کنید. بخار خوراک 70٪ در فشار 1bar موجود است و α تقریباً ثابت و $q = 2.5$ ؟

تعیین تعداد مراحل مینیمم

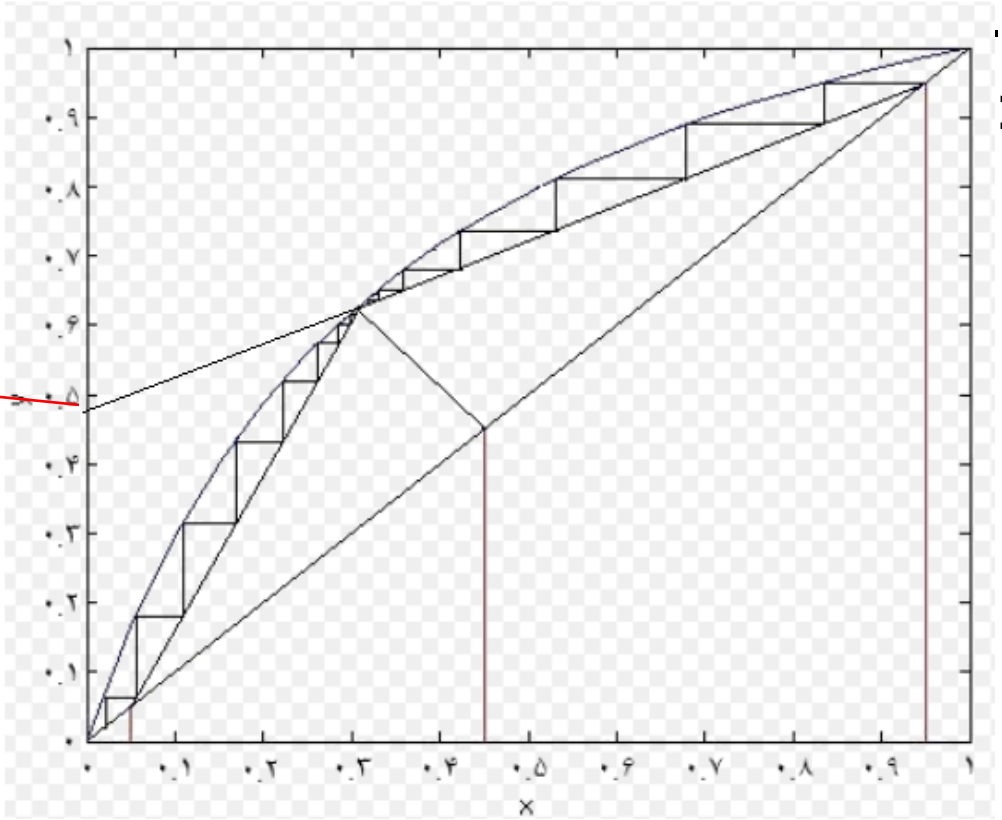
- تعداد مراحل مینیمم زمانی به دست می آید که نسبت برگشتی به سمت بی نهایت میل کند.



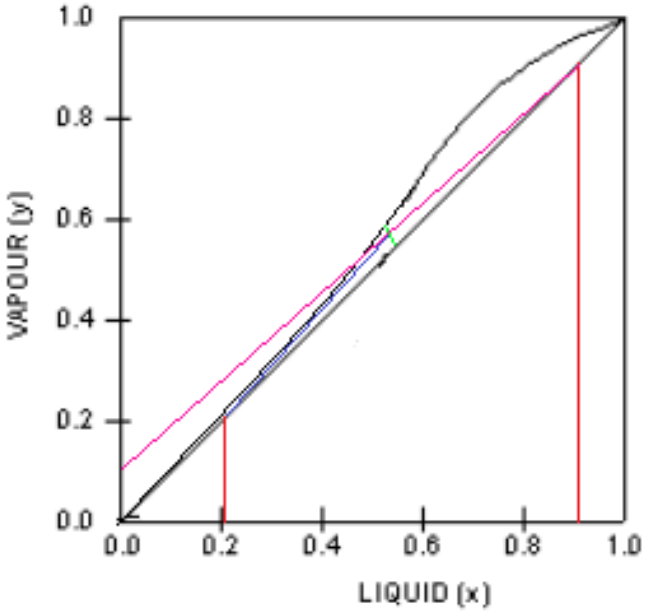
تعیین نسبت برگشتی مینیمم

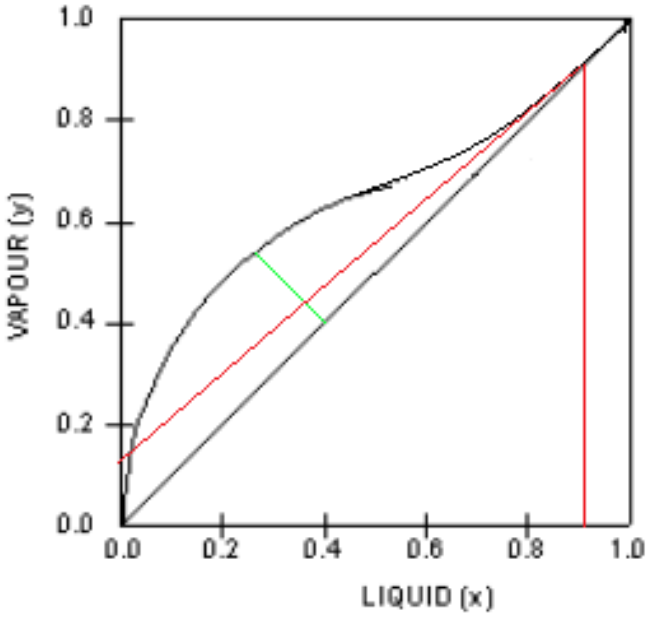
- یکی از راه های نسبت مایع برگشتی تعیین نسبت مینیمم و ضرب آن در یک ضریب مشخص می باشد. در واقع نسبت برگشتی مینیمم معادل تعداد مراحل بی نهایت است.
- روش ترسیمی:

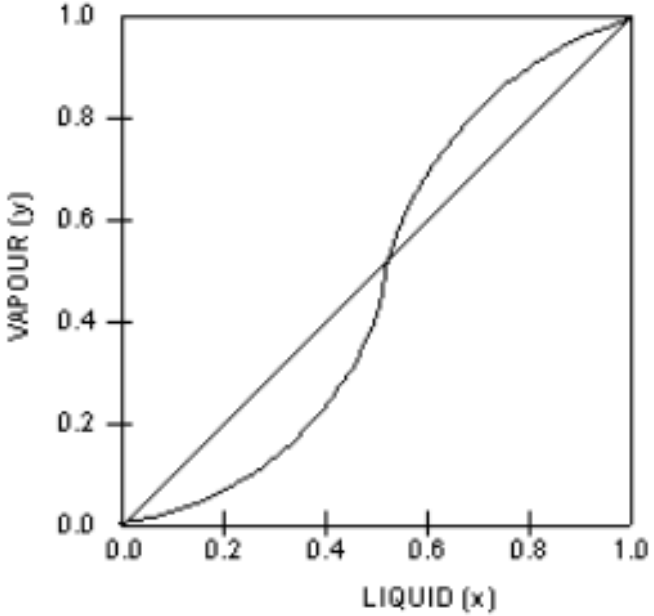
$$\frac{x_D}{R_{\min}+1}$$



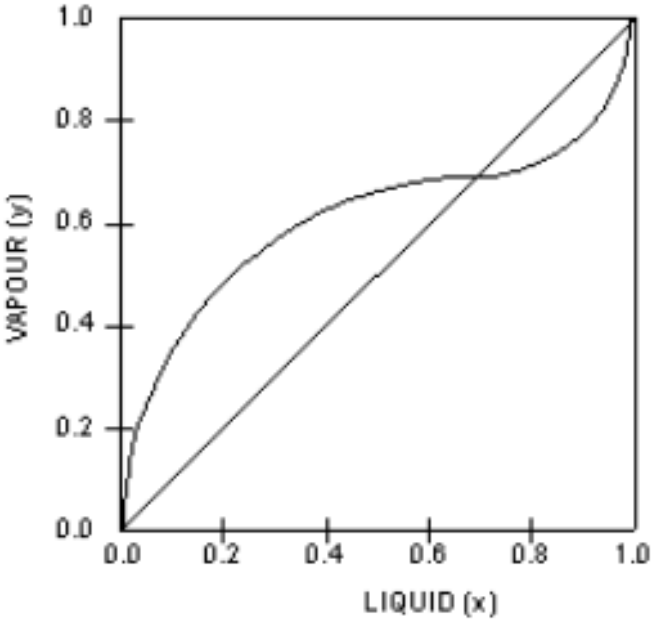
روش ترسیمی







Maximum Boiling Point



Minimum Boiling Point

روش محاسباتی تعیین نسبت برگشتی مینیمم

- با توجه به روش ترسیمی برای منحنی تعادل مرسوم خط تبادل بالای برج، خط خوراک و منحنی تعادل یک نقطه تلاقی دارند. به این ترتیب داریم:

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

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

$$x = \frac{x_D(q-1) + z_F(R+1)}{R+q} \qquad (1)$$

$$y = \frac{RZ_F + qx_D}{R+q} \qquad (2)$$

$$y = \frac{\alpha x}{1+(\alpha-1)x} \qquad (3)$$

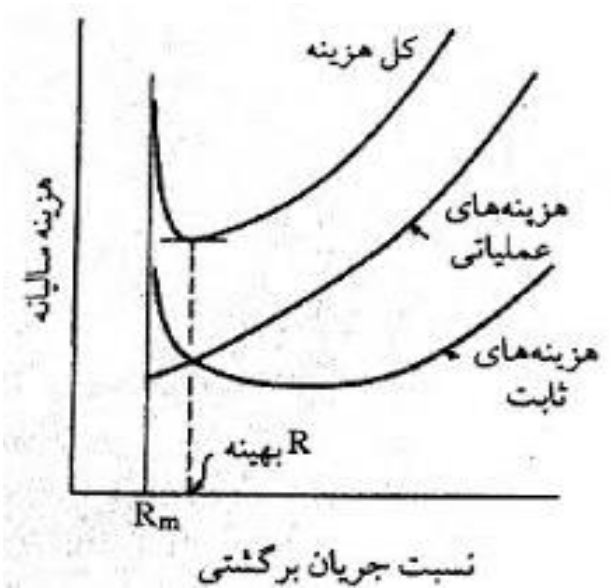
$$1,2 \rightarrow 3 \Rightarrow \quad \frac{R_{\min} z_F + qx_D}{R_{\min}(1-z_F) + q(1-x_D)} = \frac{\alpha\left[x_D(q-1) + z_F(R_{\min}+1)\right]}{(R_{\min}+1)(1-z_F)}$$

- اگر خوراک به صورت مایع اشباع باشد، رابطه محاسبه نسبت برگشتی مینیمم با قراردادن q=1 به صورت زیر است:

- اگر خوراک به صورت مایع اشباع باشد، رابطه محاسبه نسبت برگشتی مینیمم با قراردادن q=0 به صورت زیر است:

- معمولا

$$R = (1.2\ to\ 2.5)R_{\min}$$



تعیین N_{min} به کمک معادله Fenske

- با فرض کندانسور کامل تعداد مراحل N_P+1 می باشد.

$$for\ N_P+1: \quad \alpha_{N_P+1} = \frac{\frac{y_{N_p+1}}{1-y_{N_P+1}}}{\frac{x_w}{1-x_w}} \quad \Rightarrow \frac{y_{N_p+1}}{1-y_{N_P+1}} = \alpha_{N_P+1}\left(\frac{x_w}{1-x_w}\right)$$

$$for\ N_P: \quad \frac{y_{N_p}}{1-y_{N_P}} = \alpha_{N_P}\left(\frac{x_{N_P}}{1-x_{N_P}}\right)$$

- از آنجا که برای تعیین تعداد مراحل مینیمم خط عملیاتی با خط $y=x$ برابر است و y_{NP+1} و x_{NP} یک نقطه روی خط عملیاتی را نشان می دهند پس این دو کسر مولی با هم برابر هستند بنابراین می توان نوشت:

$$\frac{y_{N_p}}{1-y_{N_P}} = \alpha_{N_P}\left(\frac{y_{N_P}}{1-y_{N_P}}\right) \quad or \quad \frac{y_{N_p}}{1-y_{N_P}} = \alpha_{N_P}\alpha_{N_P+1}\left(\frac{x_w}{1-x_w}\right)$$

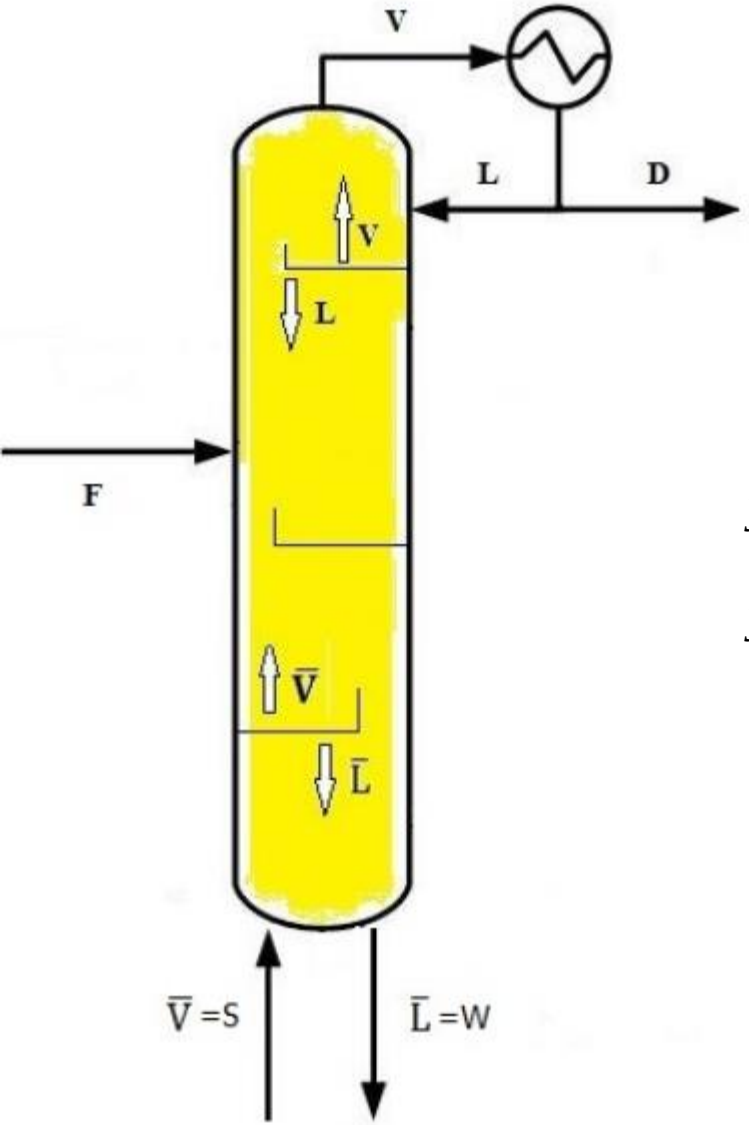
$$\frac{y_1}{1-y_1} = \alpha_1 \ldots \alpha_{N_P}\alpha_{N_P+1}\left(\frac{x_w}{1-x_w}\right) or \frac{x_D}{1-x_D} = \alpha_1 \ldots \alpha_{N_P}\alpha_{N_P+1}\left(\frac{x_w}{1-x_w}\right)$$

$$\alpha_{ave} = \sqrt[N_P+1]{\alpha_1 \ldots \alpha_{N_P} \alpha_{N_P+1}}$$

$$\frac{x_D}{1-x_D} = \left(\alpha_{ave}\right)^{N_p+1}\left(\frac{x_w}{1-x_w}\right)$$

$$N_{p,\min} = \frac{\log\left(\frac{x_D(1-x_w)}{(1-x_D)x_w}\right)}{\log \alpha_{ave}} - 1$$

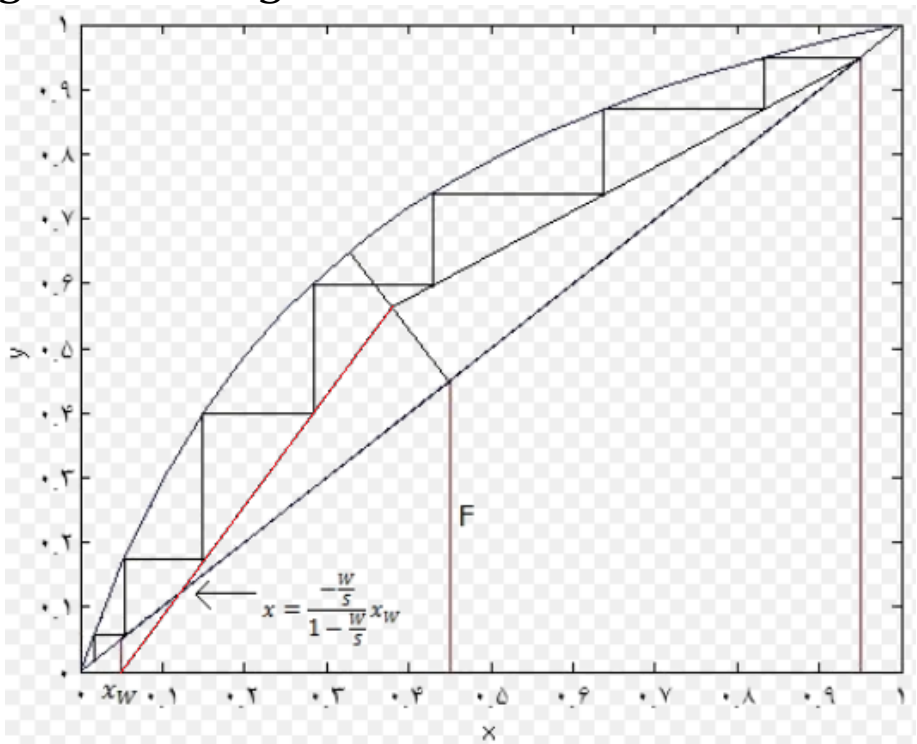
برج تقطیر بخار آب باز



- در مواردی که جزء سنگین آب باشد کاربرد دارد.
- خط تبادل بالای برج و خط خوراک همانند برج تقط معمولی است. اما خط تبادل پایین برج نیاز به تغییر د

$$y_{m+1}\bar{V}_{m+1} + Wx_w = \bar{L}_m x_m + Sx_s$$

$$y = \frac{\bar{L}}{\bar{V}}x - \frac{W}{S}x_w \rightarrow y = \frac{W}{S}\left(x - x_w\right)$$



$$y = x \rightarrow y = \frac{W}{S}\left(x - x_w\right) \Rightarrow x = \frac{Wx_w}{W - S}$$

$$y = 0 \rightarrow x = x_w$$

تمرین: ۱۰۰ مول بر ساعت مخلوط ۴۰ درصد آمونیاک و ۶۰ درصد آب به وسیله برج بخار آب باز تقطیر می شود. به نحوی که محصول بالای برج ۹۸% مولی آمونیاک و محصول پایین برج ۲% مولی آمونیاک داشته باشد. خوراک در زمان ورود به برج ۵۰ % تبخیر شده است. با توجه به داده های تعادلی تعیین کنید میزان حداقل نسبت برگشتی و مقدار بخار آب لازم اگر نسبت برگشتی ۲ برابر نسبت مینیمم باشد

x	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1
y	0.47	0.725	0.89	0.94	0.97	0.99	1

برج با جریان برگشتی سرد

- در جریان برگشتی سرد دمای مایع کمتر از دمای حباب می باشد مقداری از بخار نیز میعان یافته و دمای کل مایع را به دمای حباب می رساند. در این حالت دبی مایعی که به پایین برج می رسد از L_0 بیشتر خواهد بود.

$$n.(\lambda.M)_{ave} = L_0 C_{L0} M_{ave} (T_{bpR} - T_R)$$

$$L = L_0 + \frac{L_0 C_{L0} M_{ave} (T_{bpR} - T_R)}{(\lambda.M)_{ave}}$$

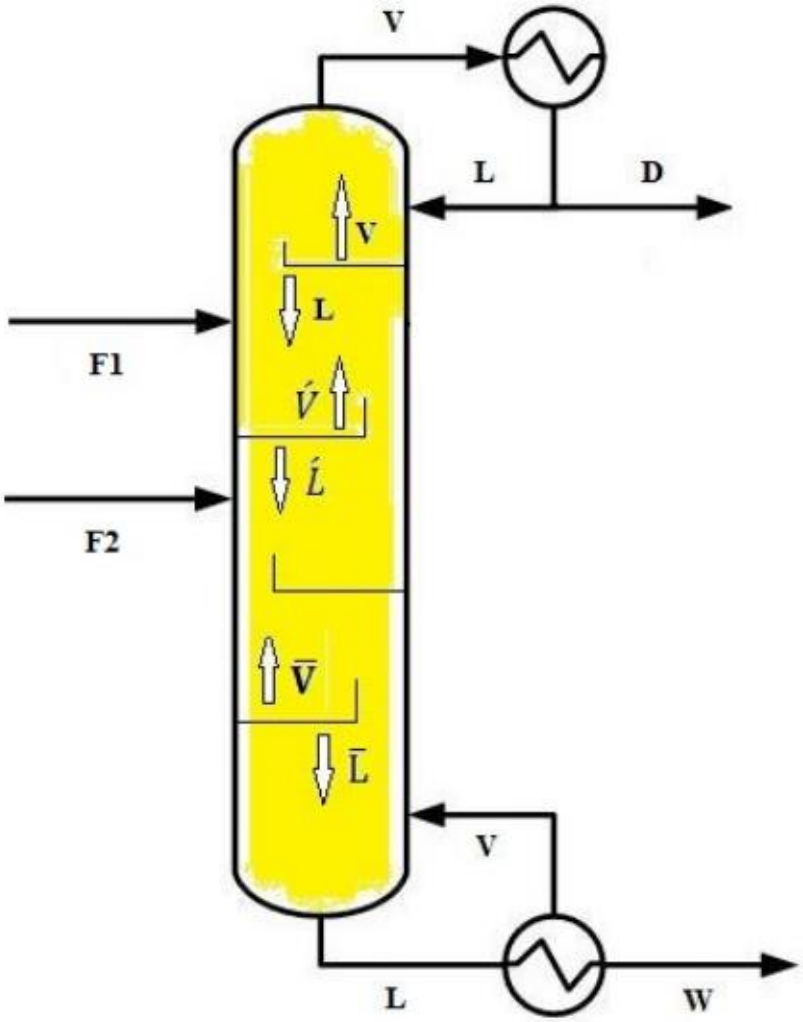
$$(\lambda.M)_{ave} = \lambda_A M_A x_D + \lambda_B M_B (1 - x_D)$$

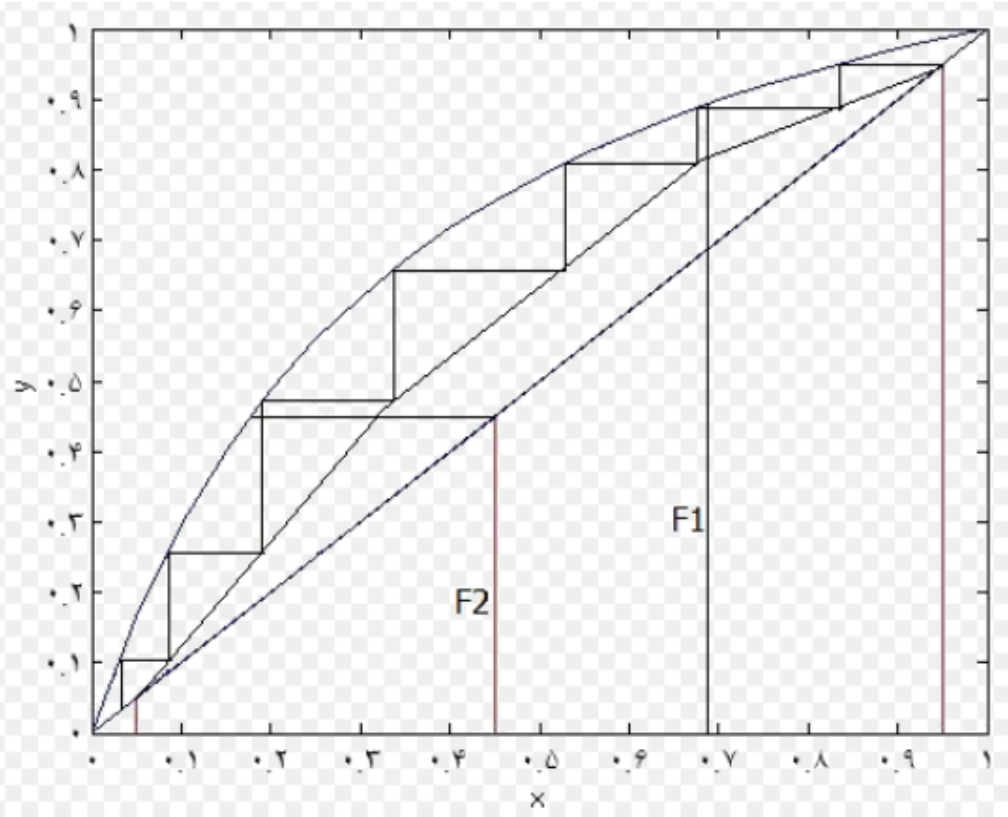
$$R' = R\left(1 + \frac{C_{L0} M_{ave} (T_{bpR} - T_R)}{(\lambda.M)_{ave}}\right), \quad R = \frac{L_0}{D}$$

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

خوراک های چند تایی و جریان های جانبی در برج تقطیر

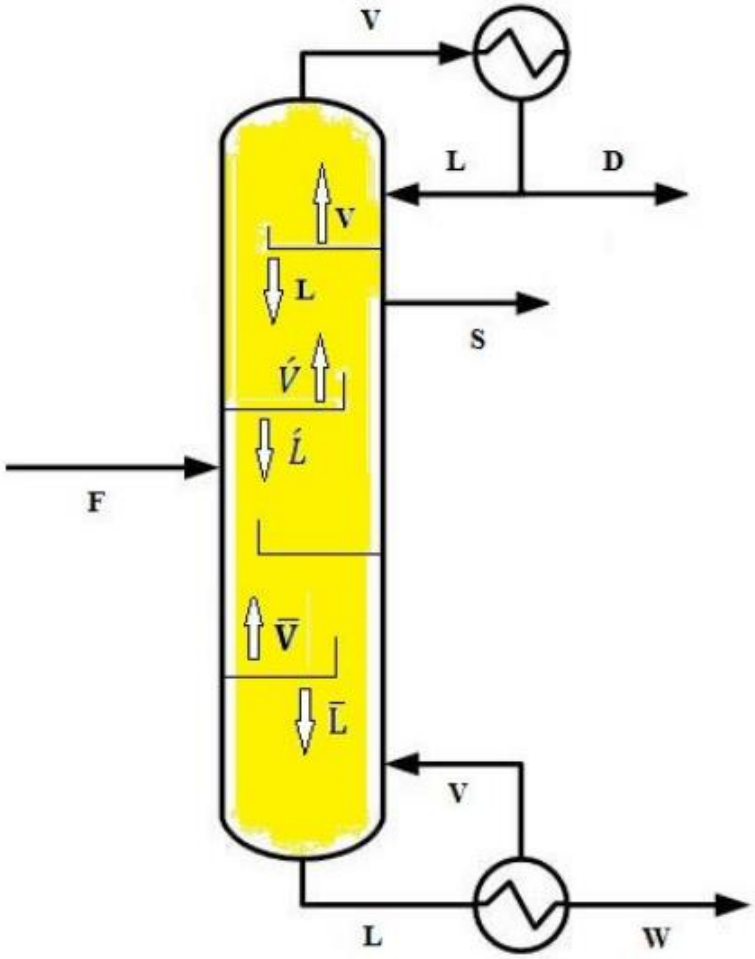
- دو خط خوراک، سه خط تبادل

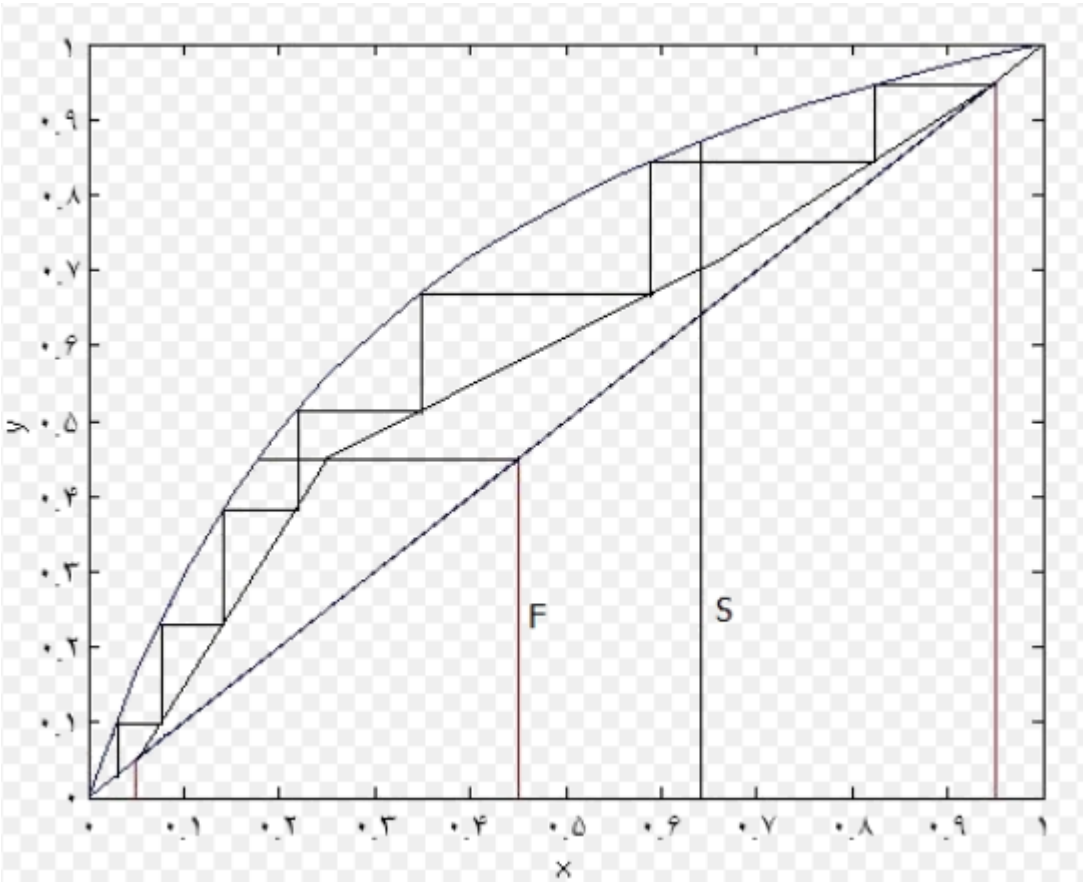




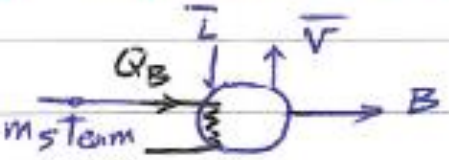
خوراک های چند تایی و جریان های جانبی در برج تقطیر

- یک خط خوراک، یک خط جانبی و سه خط تبادل





* Heating & cooling Requirments: نیازهای گرمایش و سرمایش



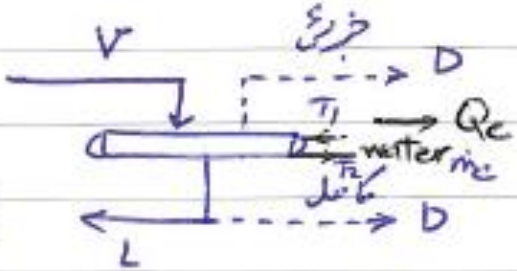
$Q_B = \bar{V}\lambda$ ↓ گرمای نهان تبخیر در شرایط ریبویلر (از خلاصه ردهای ریبویلر استفاده می‌شود)

چون بخار از شیر است پس Q_B

$Q_B = \bar{V}\lambda = \dot{m}_s \lambda_s$ → گرمای نهان تبخیر آب

↓ میزان بخار لازم

(با توجه به فشار بخار آب تعیین می‌شود)



$\frac{Btu}{lb.°F}$ ↑

$\frac{cal}{gr.°C}$ ↑ = 1 = مبنای واحد

$Q_c = \dot{m}_c C_{pc} (T_2 - T_1)$ همچنین

↓ میزان آب سرد مورد نیاز

کامل $\left\{ \begin{array}{l} Q_c = V\lambda' = (L+D)\lambda' \\ Q_c = L\lambda' \end{array} \right.$ جزئی

↓ گرمای نهان در شرایط گذار مورد

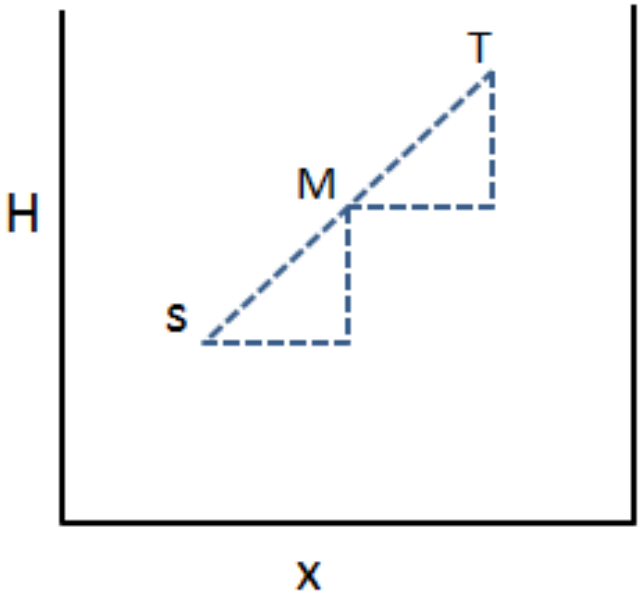
$C_{pc} = 1 \frac{cal}{gr.°C} = 1 \frac{Btu}{lb.°F} = 4.18 \frac{kj}{kg.k}$

منحنی تعادل آنتالپی

$$H_L = C_L(t_L - t_0)M_{av} + \Delta H_S$$

$$H_G = y[C_{L,A}M_A(t_G - t_0) + \lambda_A M_A] + (1 - y)[C_{L,B}M_B(t_G - t_0) + \lambda_B M_B]$$

تفکیک و اختلاط آدیاباتیک



$$T.x_T + S.x_s = M.x_m = (T+S)x_m \Rightarrow \frac{S}{T} = \frac{x_T - x_m}{x_m - x_s} \quad (1)$$

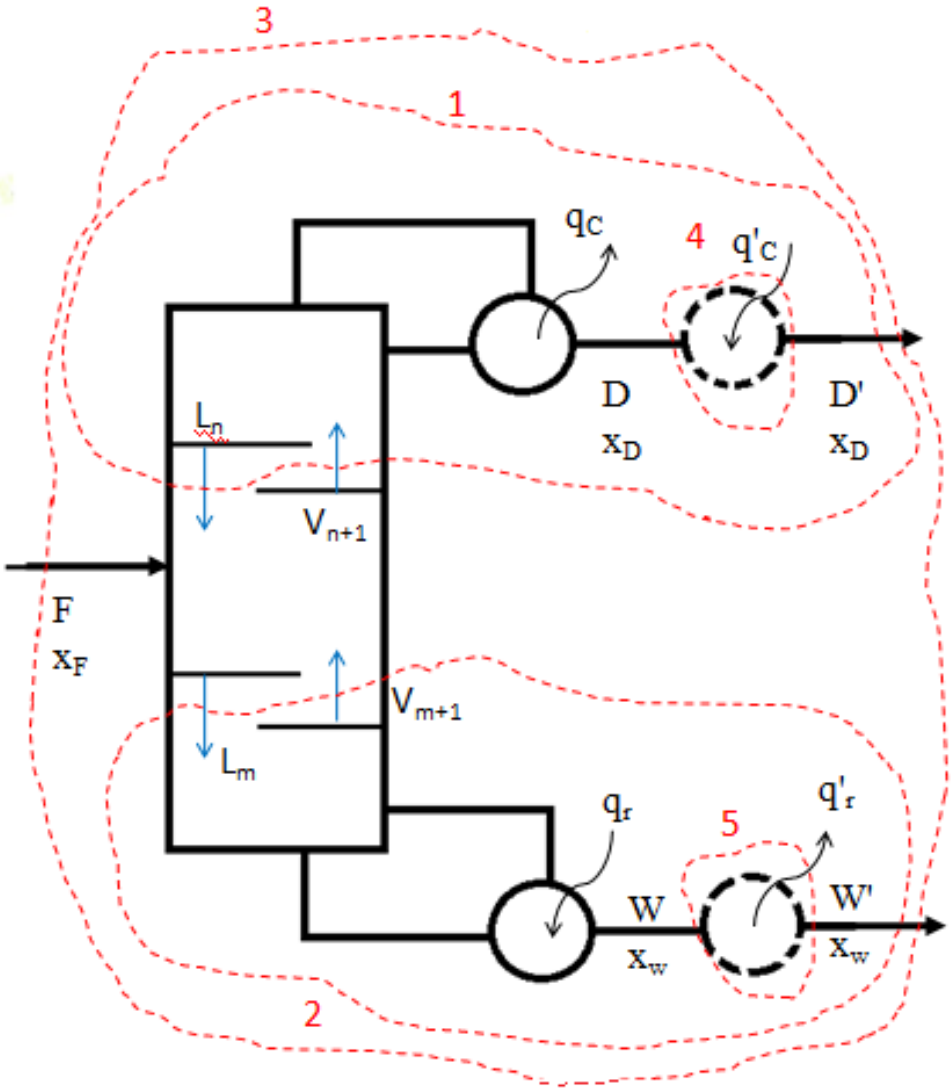
$$T.H_T + S.H_S = M.H_M = (T+S).H_M \Rightarrow \frac{S}{T} = \frac{H_T - H_M}{x_T - x_M} \quad (2)$$

$$(1) = (2) \Rightarrow \frac{H_M - H_S}{x_M - x_S} = \frac{H_T - H_M}{x_T - x_M}$$

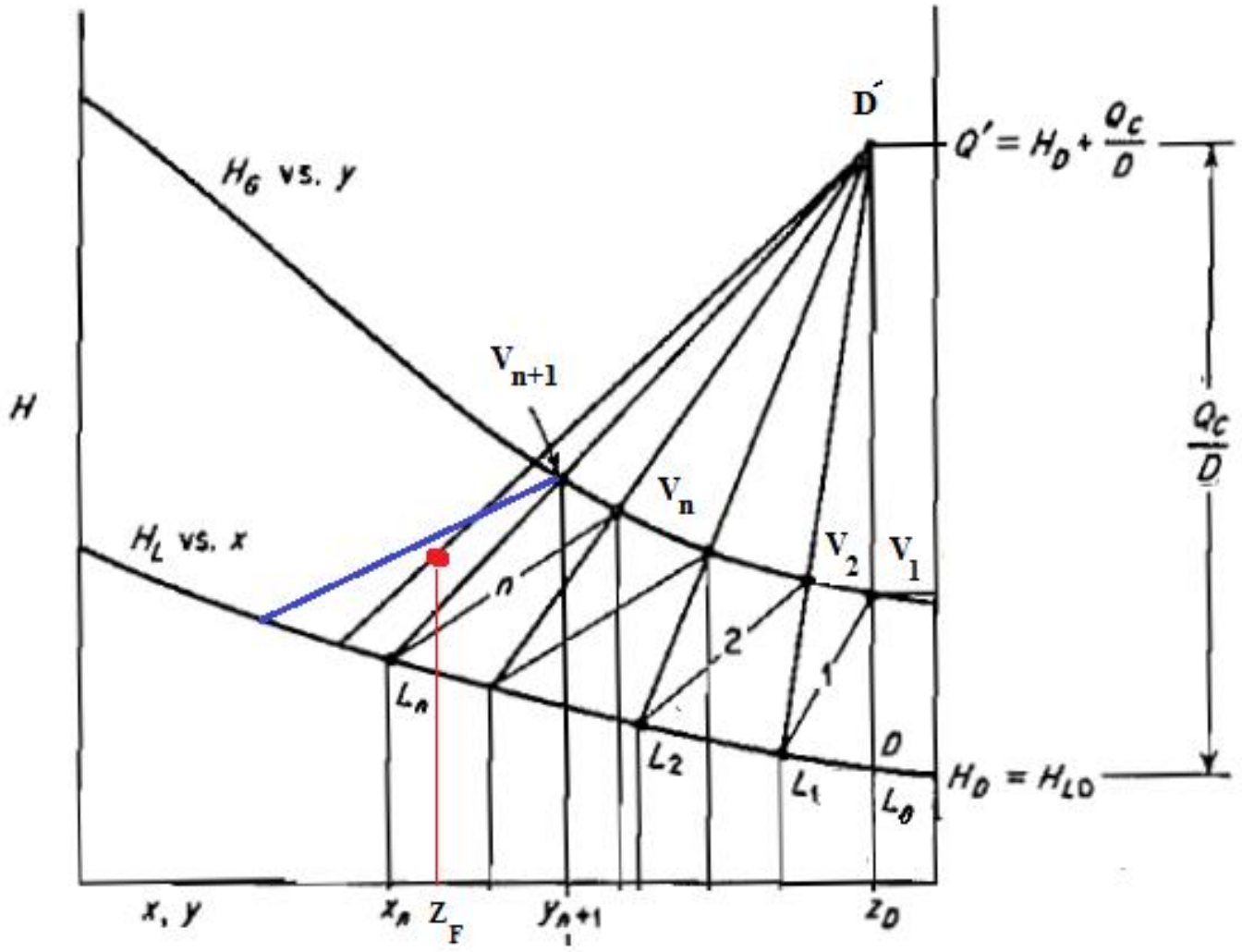
با توجه به معادله فوق سه نقطه S، M و T در یک راستا می باشند.

قانون اهرم : $\frac{S}{T} = \frac{\overline{TM}}{\overline{MS}}$

روش پانچون ساواریت
مخلوط دوجزئی



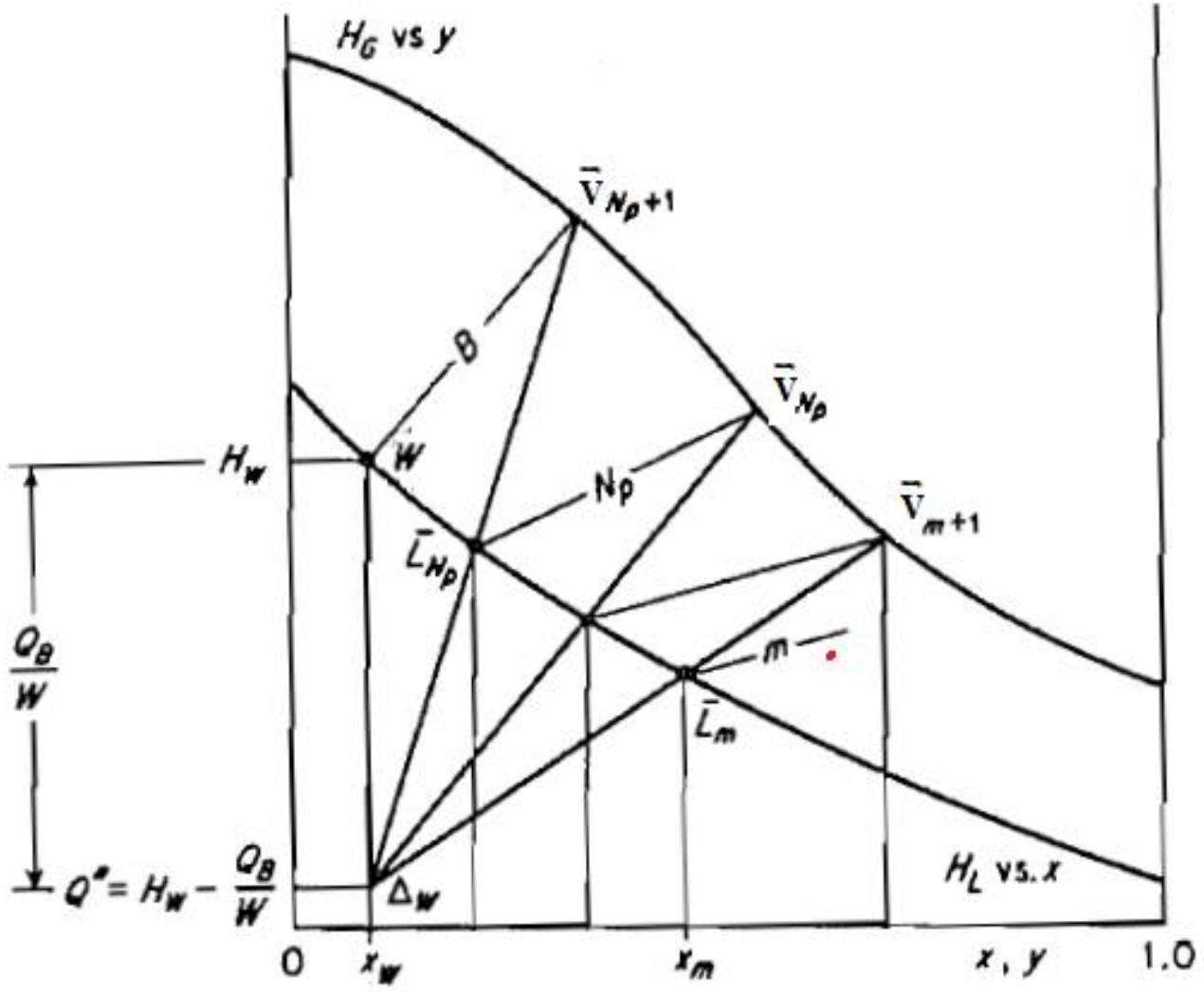
تعداد مراحل بالای برج

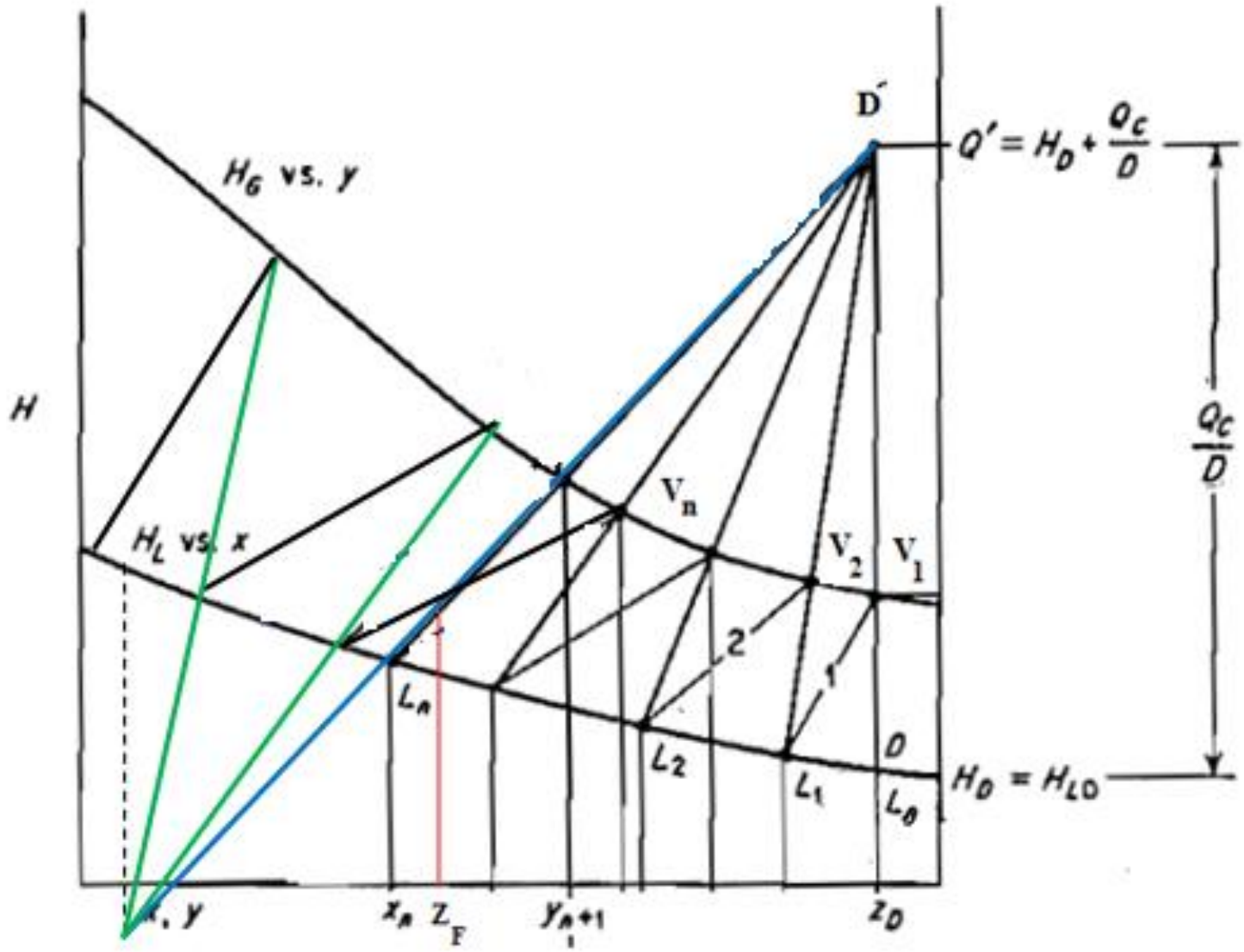


تعیین محل خوراک

- خوراک مایع سرد: برای محاسبه آنتالپی از معادله H_L استفاده می شود.
- خوراک مایع اشباع: برای تعیین محل خوراک از Z_F به منحنی مایع اشباع وصل و نقطه مد نظر مشخص می شود.
- خوراک بخار اشباع: برای تعیین محل خوراک از Z_F به منحنی بخار اشباع وصل و نقطه مد نظر مشخص می شود.
- خوراک بخار سوپرهیت: برای محاسبه آنتالپی از معادله H_G استفاده می شود.
- خوراک دوفازی: از معادله خط خوراک مقادیر y و x محل برخورد خط خوراک با منحنی تعادل تعیین و خط رابط مربوطه رسم می شود. محل تلاقی Z_F با خط رابط نقطه F را نشان می دهد.

تعداد مراحل پایین برج




D´
$Q' = H_D + \frac{Q_c}{D}$
H_G vs. y
H
H_L vs. x
V_n
V_2
V_1
2
1
L_n
L_2
L_1
D
L_D
$H_D = H_{LD}$
$\frac{Q_c}{D}$
x, y
x_n
Z_F
y_{n+1}
z_D

تعیین نسبت برگشتی

- موازنه حول کندانسور

$$V_1 = D + L_0 = D + RD$$

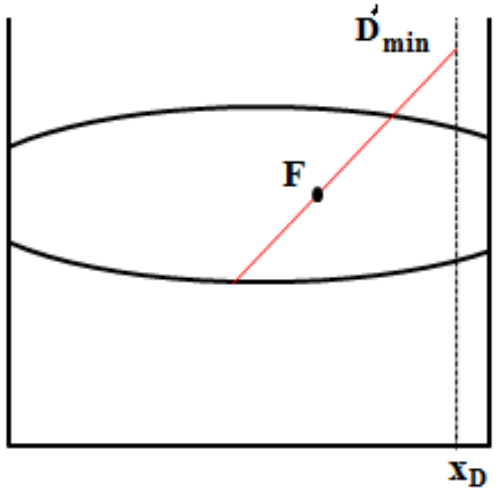
$$V_1 H_{V1} = q_c + DH_D + L_0 H_{L0} = q_c + \left(D + L_0\right)H_D$$

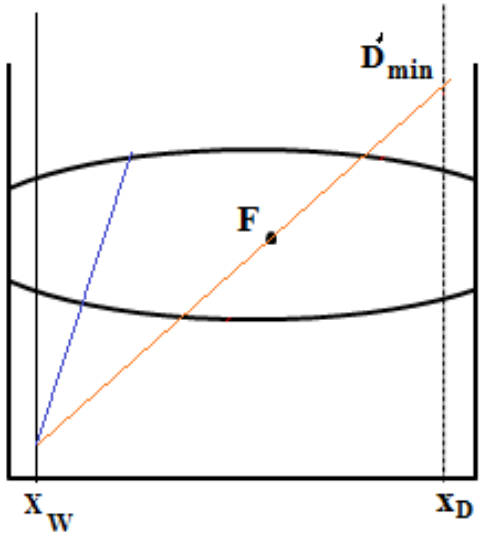
$$\left(R+1\right)DH_{V1} = DH_{D'} - DH_D + \left(R+1\right)DH_D$$

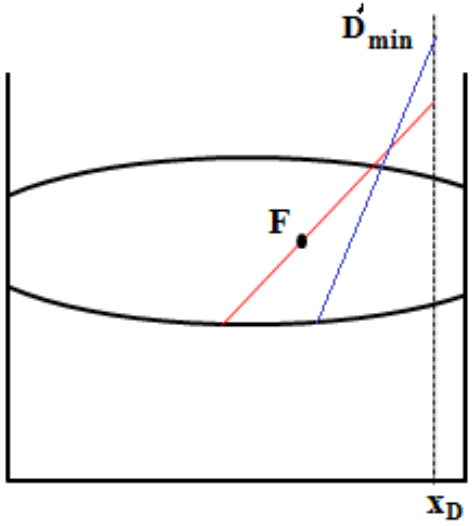
$$R+1 = \frac{H_{D'} - H_D}{H_{V1} - H_D} \Rightarrow R = \frac{H_{D'} - H_{V1}}{H_{V1} - H_D}$$

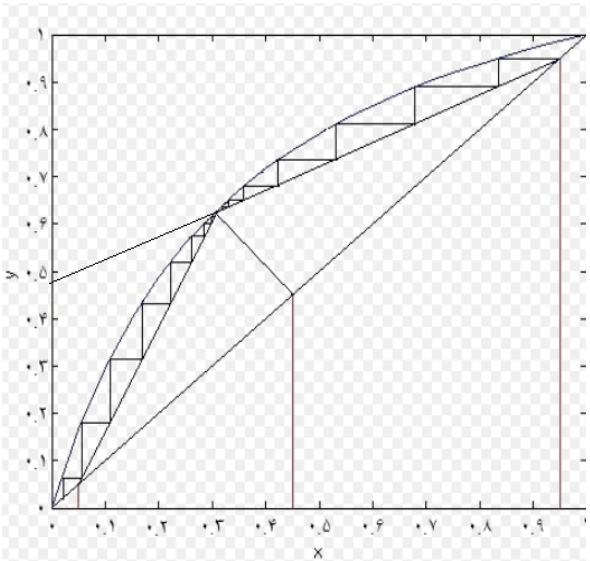
تعداد مراحل مینیمم

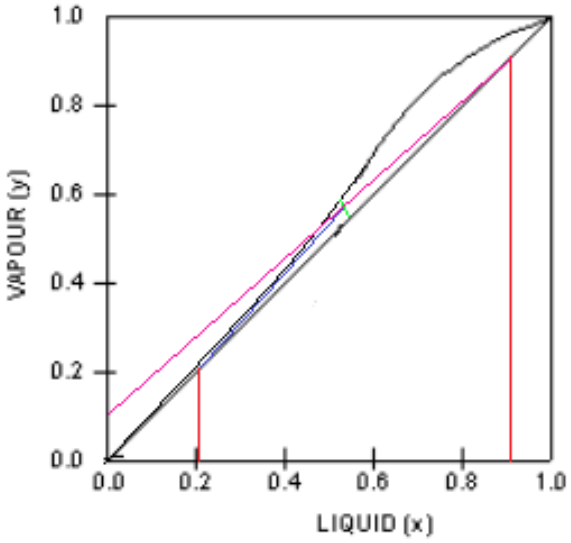
تعیین نسبت برگشتی حداقل

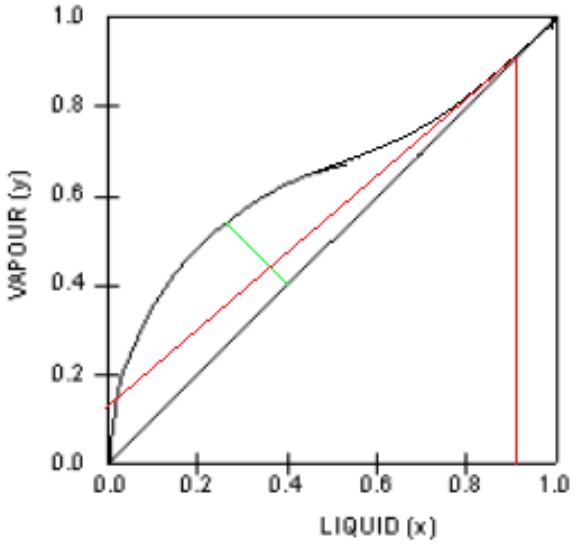












۵۰۰۰ کیلوگرم بر ساعت مخلوط مایع سرد ۵۰% متانول و ۵۰% آب در دمای ۵۸/۳ سانتی گراد وارد برج تقطیر می گردد. درصد ها وزنی هستند. محصول بالای برج ۹۵% بنزن و محصول بنزن ۱% دارند. مطلوبست تعیین : الف) دبی محصول بالا و پایین برج، ب) تعداد مراحل اگر نسبت برگشتی ۱/۵ برابر حداقل باشد. ج) بار حرارتی کندانسور و ریبویلر را به دست آورید، د) مقدار آب مصرفی در کندانسور اگر اختلاف دمای آب ورودی و خروجی ۴۰ درجه فارنهایت باشد. ضریب فراریت ۲/۵ می باشد.

Mol wt methanol = 32.04, mol wt water = 18.02

$$F = \frac{5000(0.50)}{32.04} + \frac{5000(0.50)}{18.02} = 78.0 + 138.8 = 216.8 \text{ kmol/h} \qquad z_F = 0.360$$

$$x_D = \frac{95/32.04}{95/32.04 + 5/18.02} = \frac{2.94}{3.217} = 0.915 \text{ mole fraction methanol}$$

$$x_W = \frac{1/32.04}{1/32.04 + 99/18.02} = \frac{0.0312}{5.53} = 0.00565 \text{ mole fraction methanol}$$

$$\begin{cases} 216.8 = D + W \\ 216.8(0.360) = D(0.915) + W(0.00565) \end{cases} \Rightarrow \begin{aligned} D &= 84.4 \text{ kmol/h} \\ W &= 132.4 \text{ kmol/h} \end{aligned}$$

To compute enthalpies of saturated liquids, consider the case of $x = 0.3$ mole fraction methanol, $M_{av} = 22.2$. The bubble point = 78.3°C, heat capacity = 3852 J/kg · K, and the heat of solution = 3055 kJ evolved/kmol methanol.

$\Delta H_S = -3055(0.3) = -916.5$ kJ/kmol solution. Therefore, Eq. (9.10):

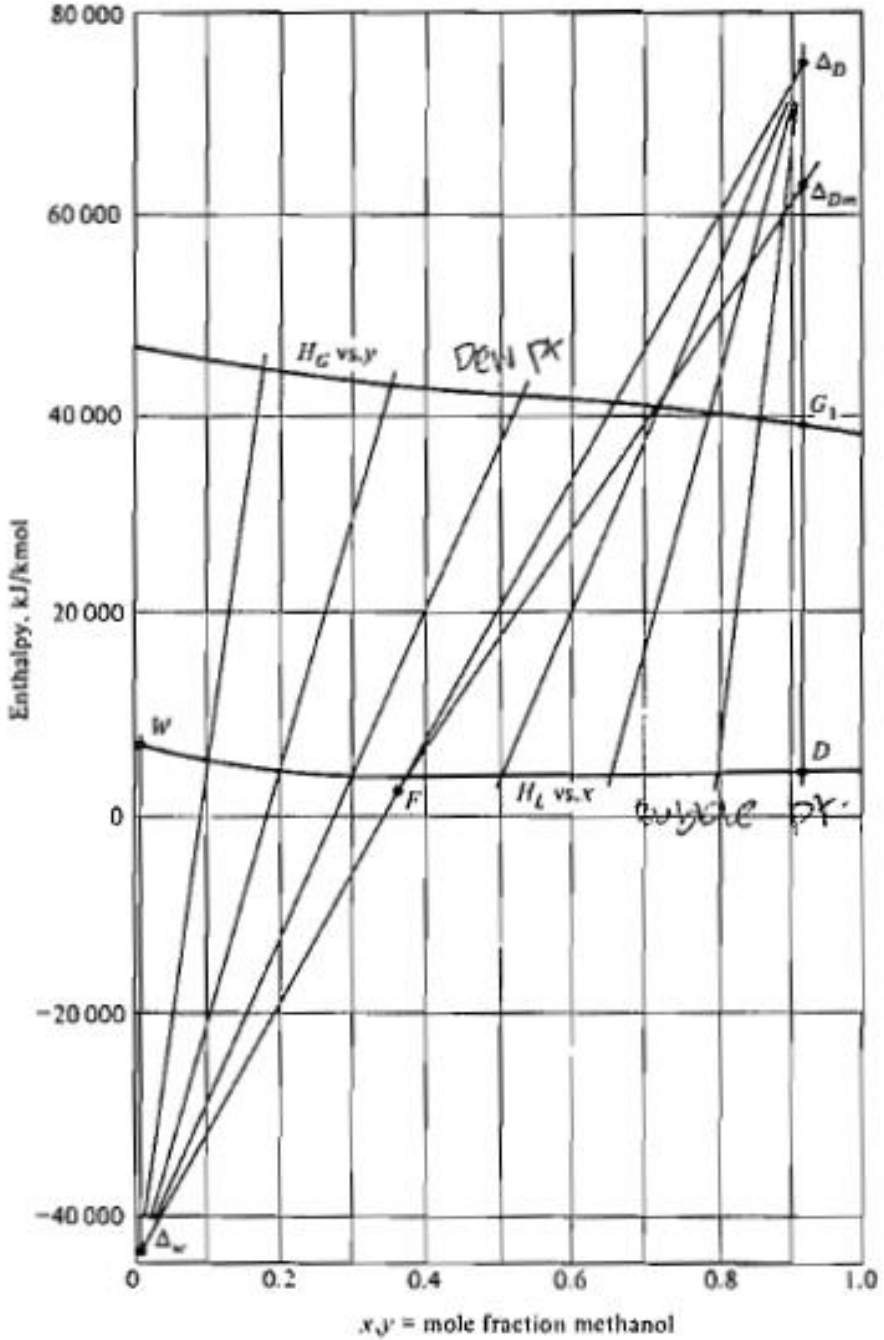
$$H_L = 3.852(78.3 - 19.69)22.2 - 916.5 = 4095 \text{ kJ/kmol}$$

To compute the enthalpy of saturated vapors, consider the case of $y = 0.665$ mole fraction methanol. The dew point is 78.3°C. At this temperature the latent heat of methanol is 1046.7 kJ/kg, that of water is 2314 kJ/kg. The heat capacity of methanol is 2583, of water 2323 J/kg · K. Eq. (9.11):

$$\begin{aligned} H_G &= 0.665[2.583(32.04)(78.3 - 19.69) + 1046.7(32.04)] \\ &\quad + (1 - 0.665)[2.323(18.02)(78.3 - 19.69) + 2314(18.02)] \\ &= 40\,318 \text{ kJ/kmol} \end{aligned}$$

For the feed, $\Delta H_S = -902.5$ kJ/kmol. Heat capacity of the feed 3852 J/kg · K

$H_F = 3.852(58.3 - 19.69)(23.1) - 902.5 = 2533$ kJ/kmol


80 000
60 000
40 000
20 000
0
−20 000
−40 000
Enthalpy, kJ/kmol
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
x,y = mole fraction methanol
Δ_D
Δ_{Dm}
H_G vs.y
G_1
W
F
H_L vs.x
D
Δ_w

تمرین: ۳۰۰۰۰ مول بر ساعت مخلوط ۴۰% بنزن و ۶۰% تولوئن در نقطه حباب وارد برج تقطیر اتمسفریک می گردد. درصد ها وزنی هستند. محصول بالای برج ۹۷% بنزن و محصول بنزن ۲% دارند. مطلوبست تعیین : الف) دبی محصول بالا و پایین برج، ب) تعداد مراحل اگر نسبت برگشتی ۳/۵ باشد. ج) بار حرارتی کندانسور و ریبویلر را به دست آورید، د) مقدار آب مصرفی در کندانسور اگر اختلاف دمای آب ورودی و خروجی ۴۰ درجه فارنهایت باشد. ضریب فراریت ۲/۵ می باشد.

$$H_x = (-23.545x + 84.727)\,\frac{Btu}{Ib}$$

$$H_y = -5y + 237\,\frac{Btu}{Ib}$$

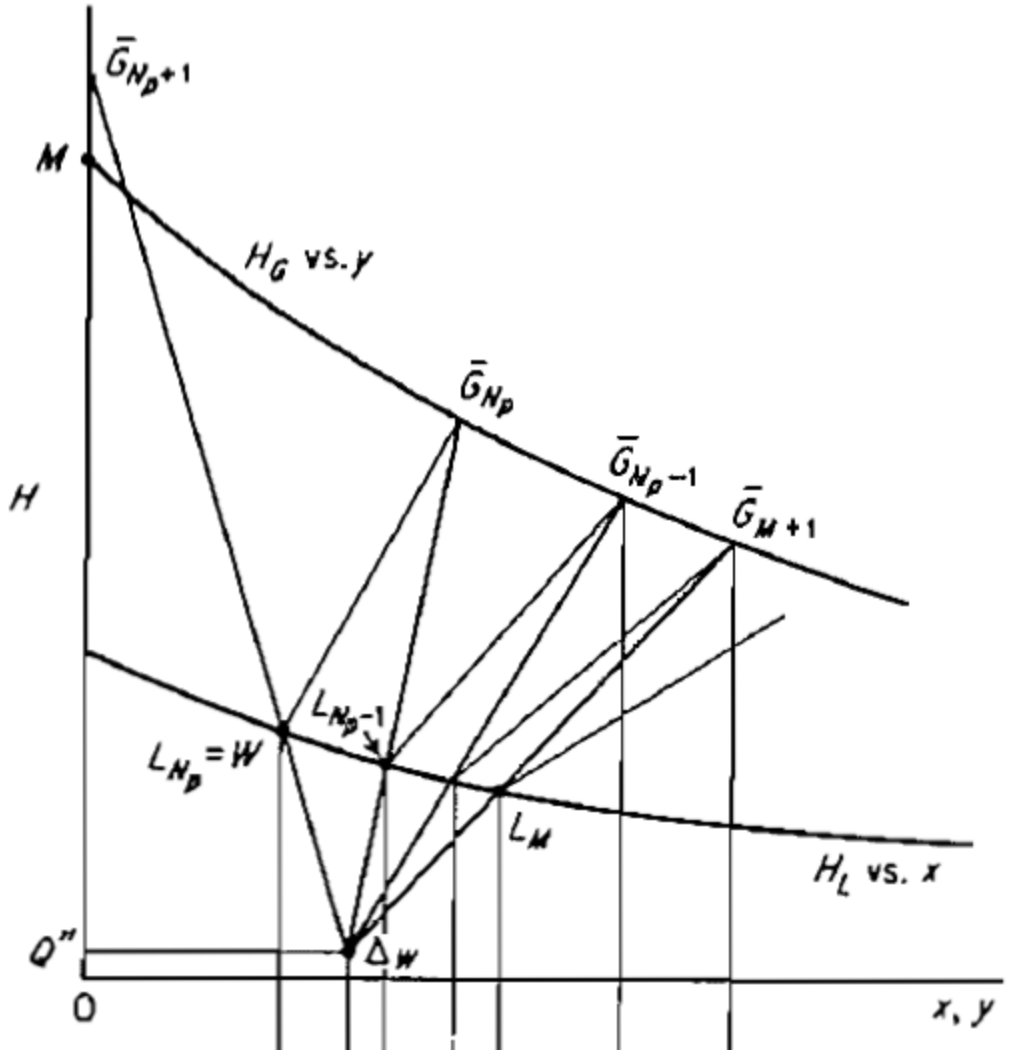
برج تقطیر بخار آب باز

$$\overline{V}_{m+1} + W = S + \overline{L}_m$$

$$\overline{L}_m - \overline{V}_{m+1} = W - S = W'$$

$$WH_W - SH_S = W'.H_{W'}$$

$$H_{W'} = \frac{WH_W - SH_S}{W - S} \qquad x_{w'} = \frac{Wx_w}{W - S}$$


$\bar{G}_{N_p+1}$
M
H_G vs. y
$\bar{G}_{N_p}$
$\bar{G}_{N_p-1}$
$\bar{G}_{M+1}$
H
L_{N_p-1}
$L_{N_p} = W$
L_M
H_L vs. x
Q''
ΔW
0
x, y

برج تقطیر با چندین خوراک

- برای تعیین تعداد مراحل دو روش وجود دارد:

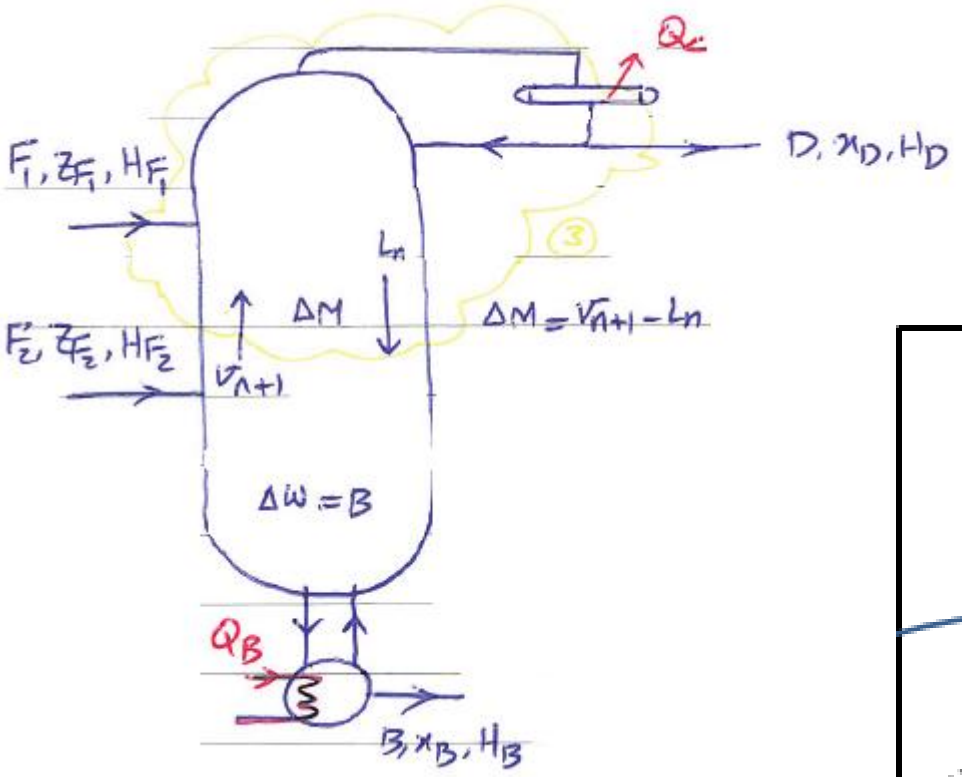
۱) روش تقریبی:

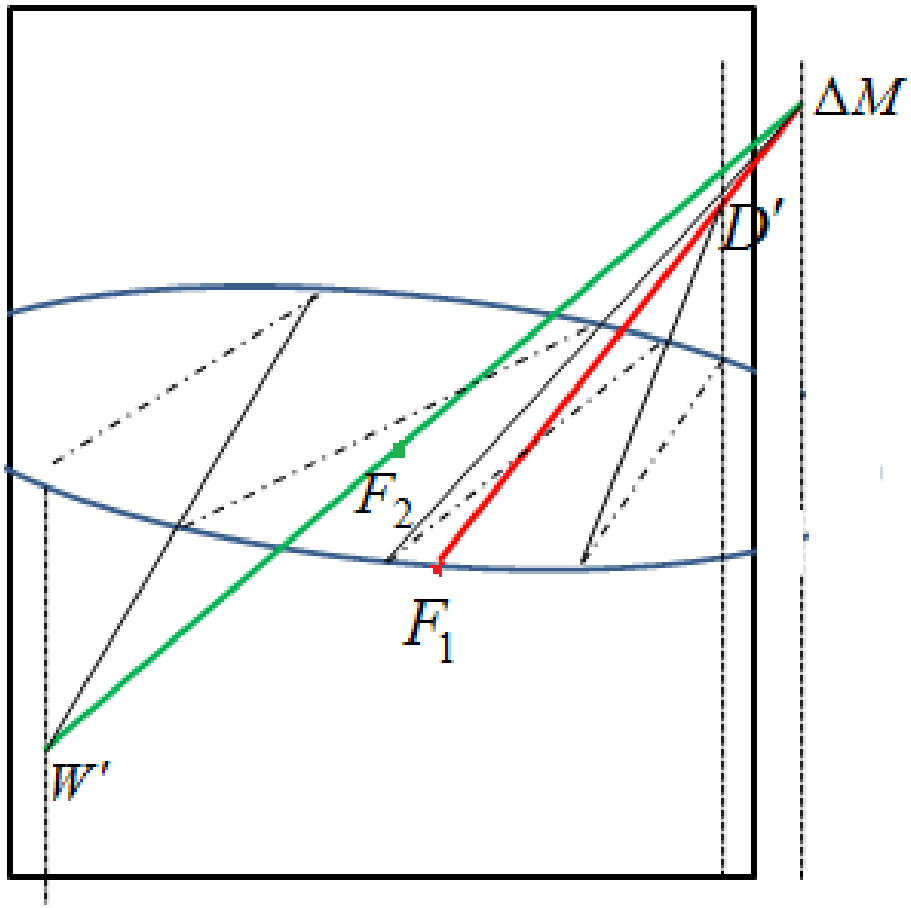
$$F = F_1 + F_2$$

$$Fx_F = F_1 x_{F_1} + F_2 x_{F_2} \Rightarrow x_F = \frac{F_1 x_{F_1} + F_2 x_{F_2}}{F_1 + F_2}$$

$$FH_F = F_1 H_{F_1} + F_2 H_{F_2} \Rightarrow H_F = \frac{F_1 H_{F_1} + F_2 H_{F_2}}{F_1 + F_2}$$

۲) روش دقیق





$$F_1 + V_{n+1} = L_n + D'$$

$$V_{n+1} - L_n = D' - F_1 = \Delta M$$

$$x_{\Delta M} = \frac{D' x_{D'} - F_1 x_{F_1}}{D - F_1}, \quad H_{\Delta M} = \frac{D' H_D + q_c - F_1 H_{F_1}}{D - F_1}$$

برج همراه با افت حرارتی

تقطیر چند جزئی

- جز کلیدی سبک: جزء سبکی که در پایین برج نسبت به بقیه اجزاء سبک بیشتر باشد.
- جز کلیدی سنگین: جزء سنگینی که در بالای برج نسبت به بقیه اجزاء سنگین بیشتر باشد.

- روش های محاسبات برج تقطیر: ۱) روش تقریبی ۲) روش دقیق

روش تقریبی: (N_{min}) معادله Fenske

مخلوط n جزئی شامل دو جزء r و i را در نظر می گیریم.

$$\alpha_{(i-r)_1} = \left(\frac{\frac{y_i}{x_i}}{\frac{y_r}{x_r}} \right)_1 \quad \Rightarrow \left(\frac{y_i}{y_r} \right)_1 = \alpha_{(i-r)_1} \left(\frac{x_i}{x_r} \right)_1 \xrightarrow{for\ N_{\min}} \{ y_i)_1 = x_i)_2 , y_r)_1 = x_r)_2$$

$$\left(\frac{y_i}{y_r} \right)_1 = \left(\frac{x_i}{x_r} \right)_2$$

$$\left(\frac{y_i}{y_r} \right)_2 = \alpha_{(i-r)_2} \left(\frac{x_i}{x_r} \right)_2$$

$$\left(\frac{x_i}{x_r} \right)_1 = \alpha_{(i-r)_1} \left(\frac{x_i}{x_r} \right)_1$$

$$\left(\frac{y_i}{y_r} \right)_1 = \alpha_{(i-r)_1} \alpha_{(i-r)_2} \left(\frac{x_i}{x_r} \right)_1$$

$$\frac{x_{i,D}}{x_{r,D}} = \alpha_{(i-r)_{ave}}{}^{N_{\min}}\left(\frac{x_{i,w}}{x_{r,w}}\right), \quad \frac{Dx_{i,D}}{Dx_{r,D}} = \alpha_{(i-r)_{ave}}{}^{N_{\min}}\left(\frac{Wx_{i,w}}{Wx_{r,w}}\right)$$

تعیین R_{min}

- Underwood eq.

$$\sum_{i=1}^{nc} \frac{\alpha_{i,r} x_B^{(i)}}{\alpha_{i,r} - \phi} = 1 - q$$

$$R_{min} + 1 = \sum_{i=1}^{c} \frac{\alpha_{i,r} x_D^{(i)}}{\alpha_{i,r} - \phi}$$

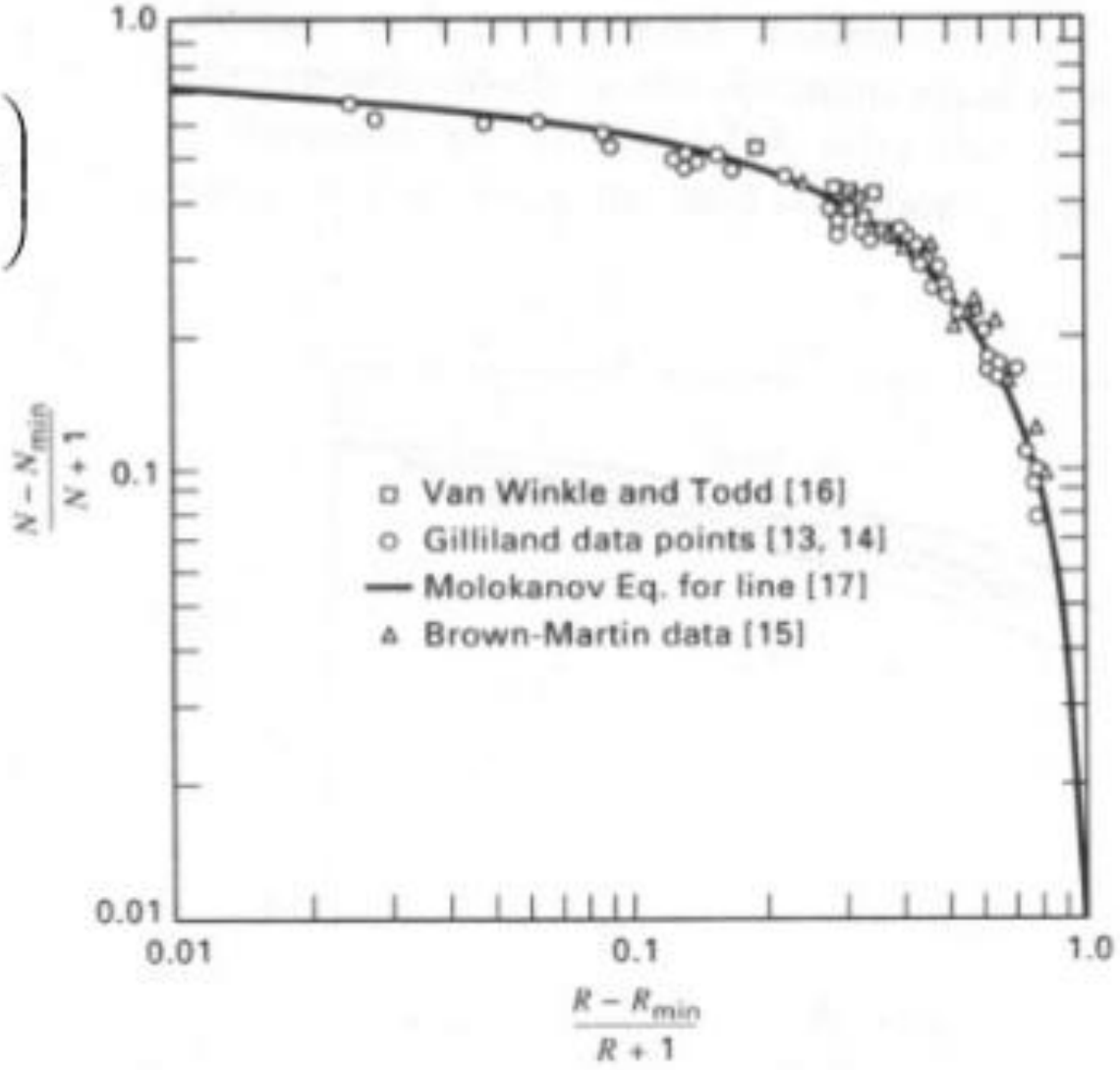
$$\alpha_{hk-hk} < \phi < \alpha_{lk-hk} \rightarrow$$

$$\alpha_{i-hk} < \phi_1 < \alpha_{lk-hk} \rightarrow$$

$$\alpha_{hk-hk} < \phi_2 < \alpha_{i-hk}$$

Gilliland correlation

$$\frac{N - N_{\min}}{N + 1} = f\left(\frac{R_D - R_{Dm}}{R_D + 1}\right)$$



مثال: خوراک مایع اشباعی با مشخصات ارائه شده در ذیل وارد یک برج تقطیر می شود. میزان جزء C و D در محصول بالای برج به ترتیب ۹۰ و ۱۰ درصد خوراک است. تعداد مراحل مینیمم را به دست آورید:

جزء	A	B	C	D	E
α	2.3	0.8	2	1	3
Fx_F	10	5	30	50	5