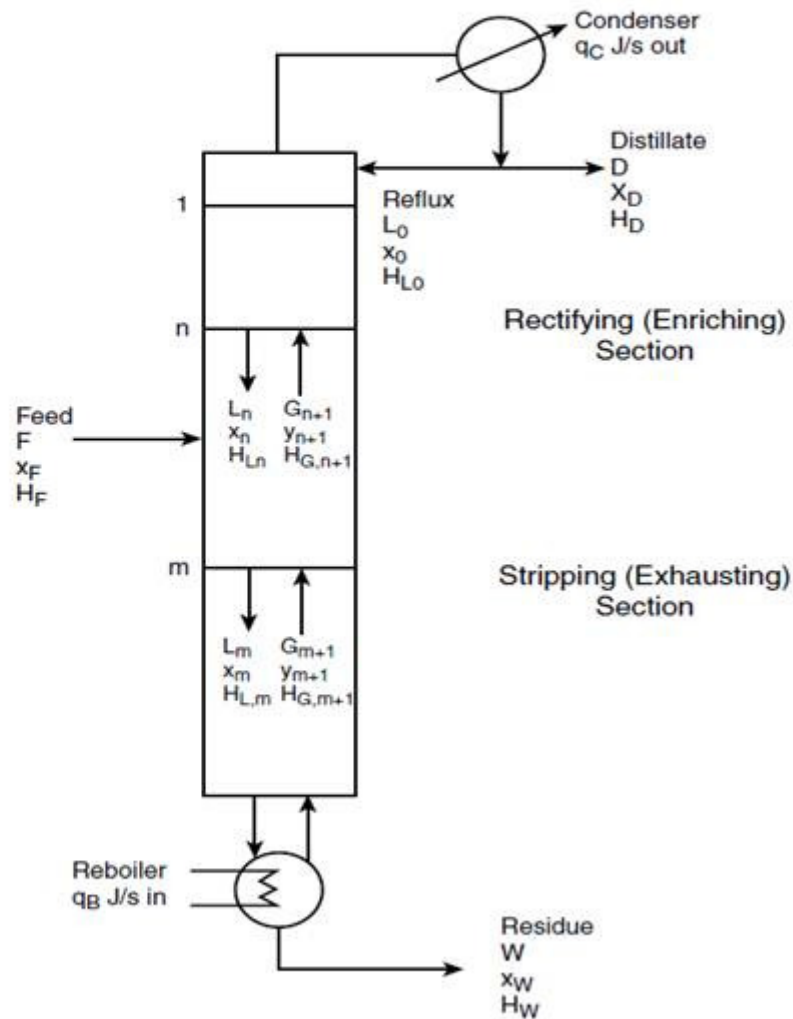


۱-۵-۳- عملیات تقطیر پیوسته



شکل (۱-۱۷): نمای کلی یک برج تقطیر پیوسته

- در قسمت بالای یک برج تقطیر (بالتر از محل ورود خوراک)، اجزای غیرفرار از فاز گاز به فاز مایع منتقل می‌شوند، به همین دلیل به قسمت بالای برج، بخش جذب یا غنی‌سازی (Enriching Section) گفته می‌شود، از آنجاییکه در این قسمت فاز بخار از جزء فرار غنی می‌شود.
- در قسمت پایین برج (پایین خوراک)، اجزای فرار از فاز مایع به فاز گاز منتقل می‌شوند و به این قسمت، بخش دفع یا عاری‌سازی (Stripping Section) گفته می‌شود، زیرا که فاز بخار از جزء فرار عاری می‌گردد.
- در داخل برج تقطیر، کلیه جریانهای بخار در نقطه شبیم و جریانهای مایع در نقطه حباب قرار دارند. همچنین بیشترین دما مربوط به پایین برج و کمترین دما مربوط به بالای برج می‌باشد.
- به محصول خروجی از بالای برج، محصول مقطر (Distillate) و به محصول پایین برج، محصول باقیمانده یا پسماند (Residue) گفته می‌شود.
- محصول مقطر غنی از جزء فرار و محصول پسماند غنی از جزء غیرفرار می‌باشد. بخشی از جریان خروجی از بالای برج در یک کندانسور میعان یافته و به برج برگشت داده می‌شود، به این جریان، جریان برگشتی (Reflux) گفته می‌شود. محصول مقطر ممکن است به حالت مایع، بخار و یا مخلوطی از هر دو باشد ولی جریان برگشتی (Reflux) باید به صورت مایع باشد. جریان برگشتی باعث خلوص بیشتر محصول در بالای برج می‌شود

➤ محاسبات برج معمولاً با شماره‌گذاری سینی‌ها از بالا به پایین انجام می‌گیرد.

در این درس، برای بررسی مسائل برج تقطیر، علائم زیر در نظر گرفته شده است:

y : کسر مولی جزء فرار در فاز بخار

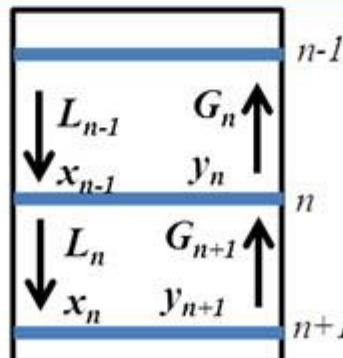
x : کسر مولی جزء فرار در فاز مایع

G : شدت جریان مولی بخار ($mole/time$)

L : شدت جریان مولی مایع ($mole/time$)

F : شدت جریان مولی خوراک که می‌تواند به صورت مایع یا بخار یا دوفازی باشد. ($mole/time$)

با توجه به اینکه نامگذاری از بالا به پایین انجام می‌شود، بالای سینی n ام، سینی $(n-1)$ ام و پایین آن سینی $(n+1)$ ام قرار دارد.



شکل (۱۸-۱): نامگذاری علائم برای سینی‌های برج تقطیر

در طراحی برج‌های تقطیر سینی‌دار، معلومات و مجهولات عبارتند از:

| معلومات | مجهولات |
|---------------------------------|---------------------------------|
| F : شدت جریان خوراک | D : شدت جریان محصول مقطر |
| z_f : غلظت خوراک | W : شدت جریان محصول باقیمانده |
| H_F : حالت ترمودینامیکی خوراک | D_T : قطر برج |
| داده‌های تعادلی | H_T : ارتفاع برج |
| x_D : خلوص محصول مقطر | N_T : تعداد مراحل (سینی‌ها) |
| x_W : خلوص محصول باقیمانده | N_F : محل سینی خوراک |
| R : نسبت جریان برگشتی | Q_c : بار حرارتی کندانسور |
| | Q_b : بار حرارتی ریبویلر |

۱-۵-۳- موازنه جرم برای محاسبه دبی و خلوص محصولات در برج تقطیر

$$F = D + W$$

$$Fz_f = Dx_D + Wx_W$$

۱-۵-۳-۲- محاسبه بار حرارتی کندانسور (Q_C)

بخار خروجی از بالای برج هنگامی که وارد کندانسور می‌شود، ممکن است به طور کامل یا جزئی به مایع تبدیل شود، در قسمت بالای برج، جریانی که از کندانسور خارج می‌شود، به دو بخش تقسیم می‌شود، قسمتی به عنوان محصول مقطر گرفته می‌شود که می‌تواند برحسب نوع کندانسور، به صورت مایع یا بخار باشد، قسمت دیگر آن جریان برگشتی نامیده می‌شود که همیشه به صورت مایع است.

یک پارامتر بسیار مهم در محاسبات برج تقطیر، **نسبت جریان برگشتی یا رفلاکس** می‌باشد که به صورت "نسبت مولی جریان برگشتی به محصول مقطر خروجی" تعریف می‌شود:

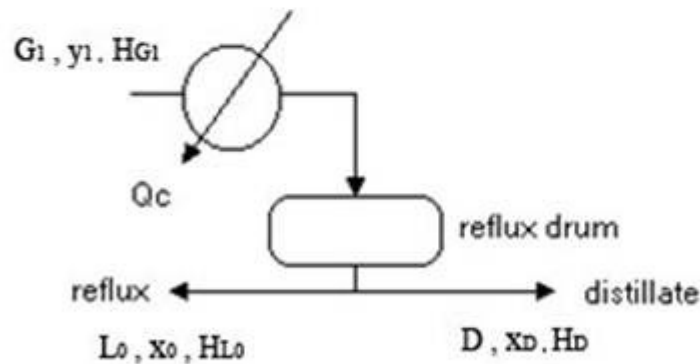
$$R = \frac{L_0}{D}$$

به طور کلی کندانسورها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

1. کندانسور کامل (Total Condenser)

2. کندانسور جزئی یا پاره‌ای (Partial Condenser)

الف: محاسبه بار حرارتی کندانسور کامل (Q_c):



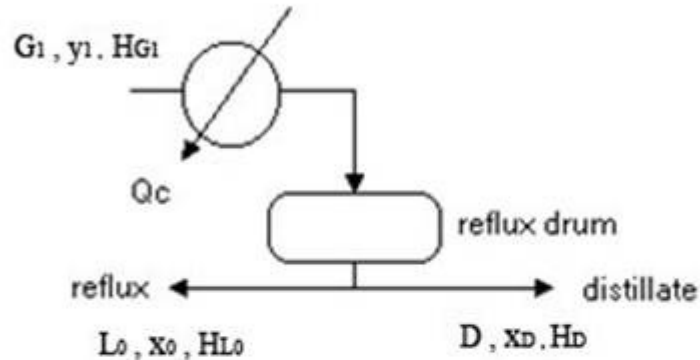
شکل (۱-۱۹): کندانسور کامل

در این نوع کندانسور تمام بخار ورودی به کندانسور به مایع تبدیل شده و بنابراین محصول مقطر و جریان برگشتی هر دو به صورت مایع بوده و دارای آنتالپی یکسانی می‌باشند،

$$H_{L_0} = H_D : \text{یعنی}$$

همچنین ترکیب درصد اجزاء در بخار ورودی به کندانسور، محصول مقطر و جریان برگشتی یکسان خواهند بود
($y_1 = x_D = x_0$).

موازنه جرم کلی حول کندانسور:



$$G_1 = D + L_0 = D + RD = D(R + 1)$$

موازنه انرژی برای کندانسور:

$$G_1 H_{G_1} = D H_D + L_0 H_{L_0} + Q_c$$

$$D(R + 1) H_{G_1} = R D H_{L_0} + Q_c + D H_D \quad (H_D = H_{L_0})$$

$$D(R + 1) H_{G_1} = R D H_{L_0} + Q_c + D H_{L_0}$$

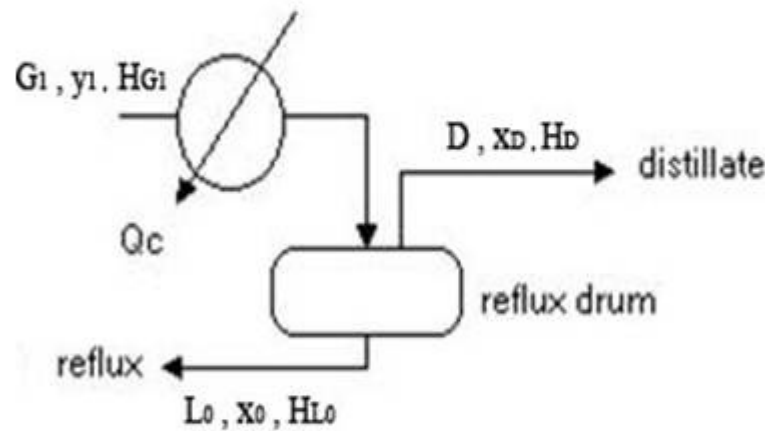
$$D(R + 1) H_{G_1} = D(R + 1) H_{L_0} + Q_c$$

در نتیجه بار حرارتی برای کندانسور کامل برابر است با:

$$Q_c = D(R + 1)(H_{G_1} - H_{L_0}) = D(R + 1)\lambda$$

ب): محاسبه بار حرارتی کندانسور جزئی (Q_c):

در این نوع کندانسور، در اثر سرمایش بخار ورودی به کندانسور بخشی از آن مایع شده و بخشی از آن به صورت بخار باقی می ماند. قسمت مایع شده ی جریان ورودی به کندانسور به صورت جریان برگشتی به برج فرستاده می شود و بخار باقی مانده به عنوان محصول تقطیر از کندانسور خارج می گردد. در این حالت، جریان مایع برگشتی با محصول مقطر خروجی از کندانسور در حال تعادل می باشد، یعنی اگر کندانسور جزئی یک مرحله تعادلی به شمار می آید ولی کندانسور کامل اینگونه نیست. در کندانسور جزئی آنتالپی محصول مقطر و بخار ورودی به کندانسور یکسان می باشند، یعنی $H_D = H_{G_1}$ است.

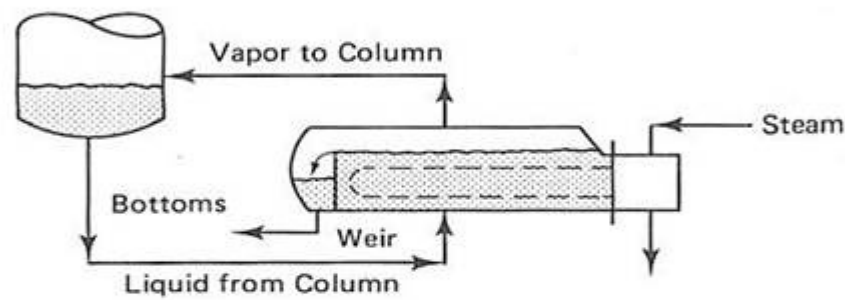


شکل (۱-۲۰): کندانسور جزئی

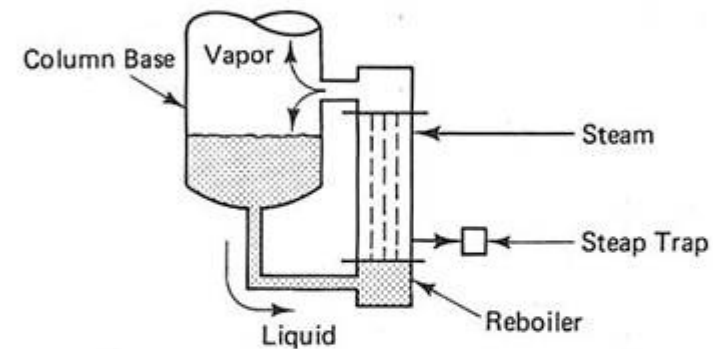
بار حرارتی برای کندانسور جزئی برابر است با: $Q_c = RD(H_{G_1} - H_{L_0}) = \lambda RD$

۱-۴-۳- محاسبه بار حرارتی ریبویلر (Q_B)

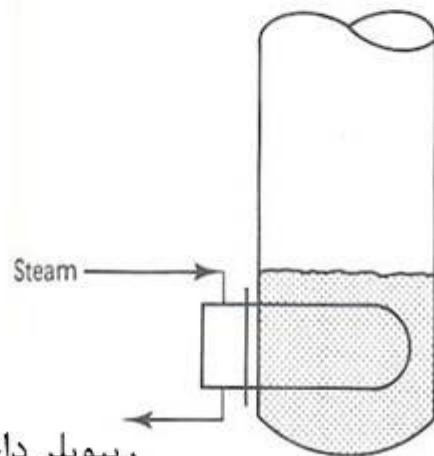
مبدل‌های حرارتی لازم جهت انتقال گرما و تولید بخار در پایین برج تقطیر به اشکال مختلفی نصب می‌شوند



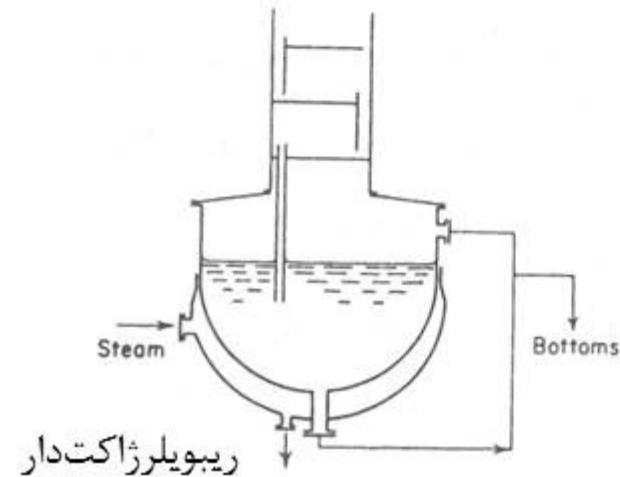
ریبویلر کتری



ترموسیفون‌های حرارتی



ریبویلر داخلی



ریبویلر ژاکت‌دار

اگر فرض شود که برج تقطیر دارای خوراک ورودی، کندانسور کامل و یک ریبویلر باشد،

$$FH_F + Q_B = DH_D + WH_W + Q_C$$

در نتیجه بار حرارتی ریبویلر برابر است با:

$$Q_B = DH_D + WH_W + Q_C - FH_F$$

ذکر این نکته ضروری است که در محاسبه‌ی بار حرارتی کندانسور و ریبویلر، از اتلاف حرارتی سیستم صرف نظر شده است

۱-۵-۳-۴- محاسبه‌ی ارتفاع برج تقطیر

(فاصله بین سینی‌ها) × (تعداد سینی‌های مورد نیاز) = ارتفاع برج

در محاسبات مربوط به تعیین تعداد سینی‌های برج تقطیر فرض می‌شود که سینی‌ها ایده‌آل هستند و جریان‌های مایع و بخار خروجی از هر سینی با یکدیگر در تعادل می‌باشند.

در بحث حاضر دو روش برای تعیین تعداد سینی‌های برج تقطیر سینی‌دار ارائه شده است، این روش‌ها عبارتند از:

۱. روش مک‌کیب-تیلی (McCabe-Thiele Method)

۲. روش پانچون ساواریت (Ponchon Savarit Method)

۱-۵-۳-۴-۱- روش مک کیب - تیلی برای محاسبه تعداد سینی‌ها

روش مک کیب - تیلی، روشی ساده، دارای حجم محاسبات پایین و تقریبی بوده و با اینکه از دقت کمتری برخوردار است ولی بسیار مفید می‌باشد، در این روش تنها به داده‌های تعادلی $x-y$ نیاز است. دقت این روش هنگامی که در برج اتلاف حرارتی وجود داشته باشد و یا اختلاف گرمای انحلال اجزاء زیاد باشد، کاهش می‌یابد. برای استفاده از این روش باید فرضیات ساده-کننده‌ی زیر در نظر گرفته می‌شود:

(۱): مهمترین فرض در این روش این است که شدت مولی جریان‌های مولی فاز بخار و مایع در بخش بالای برج با یکدیگر برابر و در بخش پایین برج نیز باهم برابر می‌باشند. یعنی در بخش بالای برج دبی بخار و نیز دبی مایع برای تمامی سینی‌ها یکسان و ثابت می‌باشد، در پایین برج نیز این فرض صادق است، اما دبی بخار در بخش پایین و بالا و نیز دبی مایع در بخش بالا و پایین متفاوت از هم می‌باشند، اما دبی بخار و نیز دبی مایع در هر بخش برای تمامی سینی‌ها مقدار ثابت و مشخصی دارد و در طول آن بخش تغییری در دبی مایع یا بخار به وجود نمی‌آید. به این حالت، اصل سرریزش و تبخیر با مول‌های مساوی و ثابت (*Equimolal Overflow and Vaporization*) می‌گویند. یعنی مقدار بخار خروجی از تمامی سینی‌های یک بخش باهم برابر و مقدار ریزش مایع از این سینی‌ها نیز با یکدیگر برابرند.

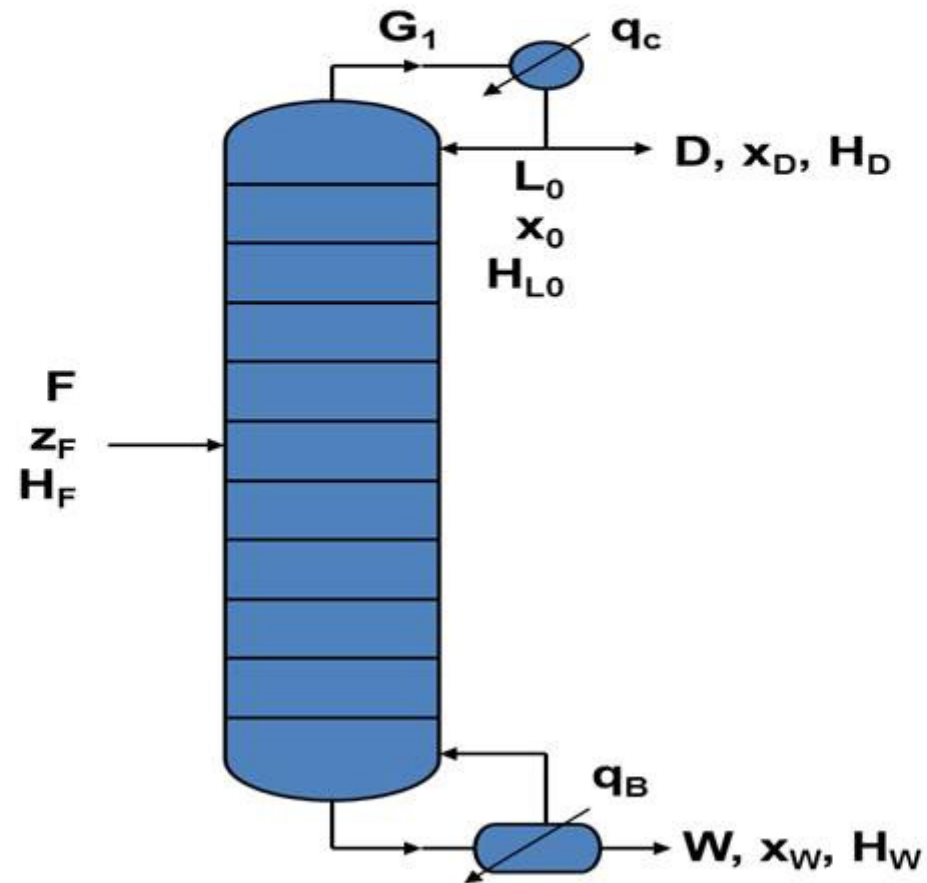
(۲): گرمای نهان تبخیر مولی هر یک از اجزاء برابر است.

(۳): از گرمای انحلال فاز مایع می‌توان صرف نظر کرد (فاز مایع محلول ایده‌ال در نظر گرفته می‌شود).

(۴): تمامی جریان‌های مایع در دمای حباب و تمامی جریان‌های بخار در دمای شبنم قرار دارند (تمام جریان‌های بخار و مایع به صورت اشباع می‌باشند).

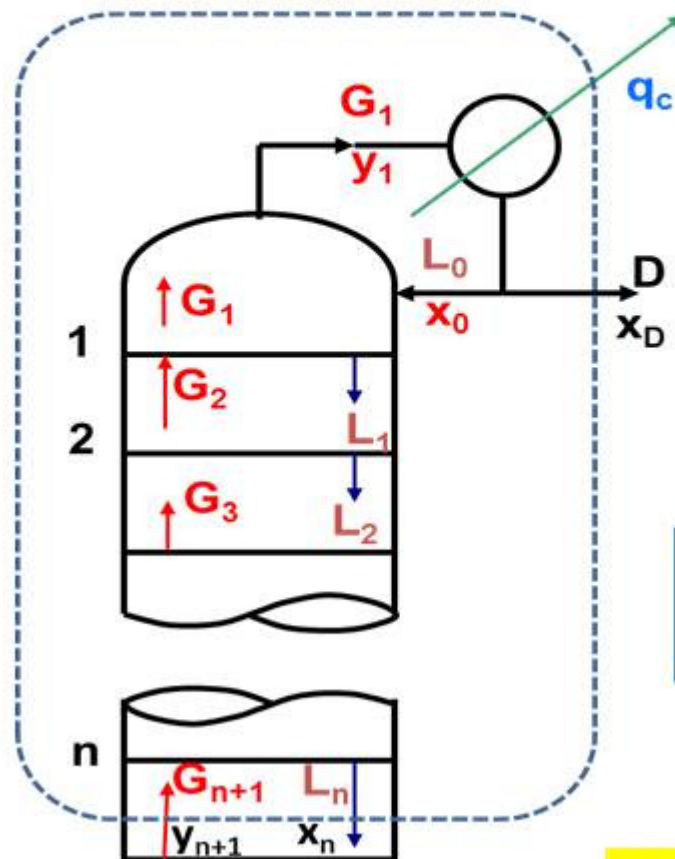
(۵): دیواره برج با محیط اطراف تبادل انرژی ندارد (اتلاف حرارتی بسیار ناچیز است).

ابتدا این روش برای یک برج تقطیر ساده با یک جریان خوراک و دارای کندانسور کامل ارائه می‌شود،



Rectifying Section Operating Line

معادله خط عملیاتی بالای برج یا بخش غنی سازی (ROL)



کندانسور کامل



$$y_1 = x_D = x_0$$

➤ با توجه به اصل سرریزش و تبخیر با مول‌های مساوی و ثابت برای روش مک‌کیب - تیلی، میزان مول مایعی که در واحد زمان از هر سینی رو به پایین سرازیر می‌شود (L) و میزان مول بخاری که در واحد زمان از هر سینی رو به بالا می‌رود (G)، مقادیر ثابتی هستند:

$$L_0 = L_1 = L_2 = \dots = L_{n-1} = L_n = L$$

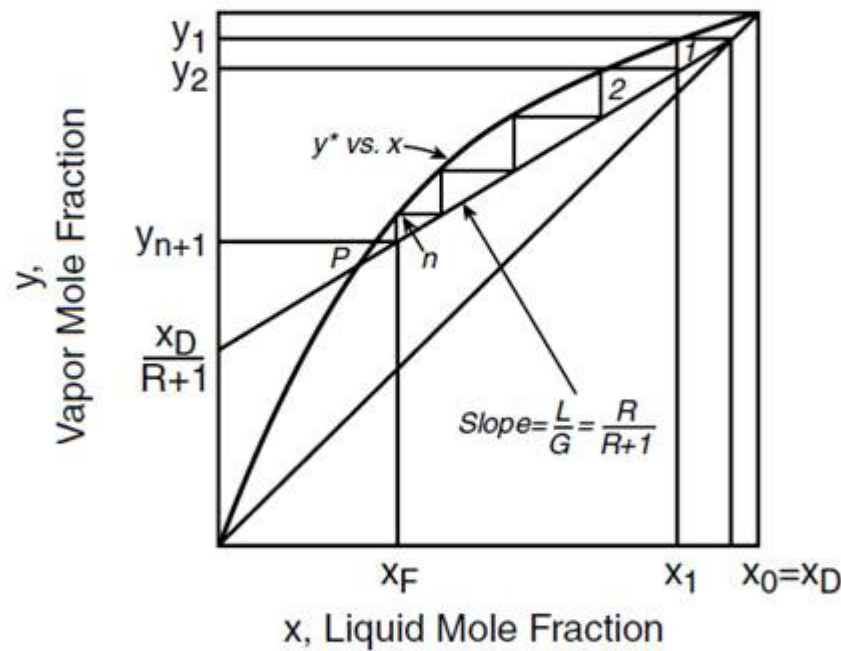
$$G_1 = G_2 = G_3 = \dots = G_n = G_{n+1} = G$$

➤ موازنه‌های جرم کلی و جزئی برای جزء فرار در قسمت بالای برج برای سینی n ام به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$G_{n+1} = L_n + D \Rightarrow G = L + D$$

$$G_{n+1}y_{n+1} = L_nx_n + Dx_D \Rightarrow Gy_{n+1} = Lx_n + Dx_D$$

➤ با تقسیم طرفین رابطه بر G ، معادله خط عملیاتی برای قسمت بالای برج به دست می‌آید که مکان هندسی ترکیب درصد جزء فرار در فازهای بخار و مایع در هر نقطه در بالای برج می‌باشد



$$y_{n+1} = \frac{L}{G} x_n + \frac{Dx_D}{G}$$

$$L_0 = L = RD$$

$$G_1 = G = (R+1)D$$

$$y_{n+1} = \frac{RD}{(R+1)D} x_n + \frac{Dx_D}{(R+1)D}$$

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

شکل (۱-۲۴): خط عملیاتی مربوط به بخش بالای برج

رابطه فوق، معادله خط عملیاتی بالای برج (ROL) می‌باشد که در نمودار $x-y$ دارای شیب $\frac{R}{R+1}$ و عرض از مبدا $\frac{x_D}{R+1}$ می‌باشد. در شکل (۱-۲۴)، خط عملیاتی ROL در نمودار $x-y$ رسم شده است.

Stripping Section Operating Line

معادله خط عملیاتی پایین برج یا بخش عاری سازی (SOL)

- فرض می شود که سینی ها ایده آل هستند و شدت جریان های بخار و مایع در تمام سینی های موجود در این قسمت مقداری ثابت است. ولی این مقادیر الزاماً با شدت جریان های بخار و مایع بخش غنی سازی برابر نیست.

$$\bar{L}_{m-1} = \bar{L}_m = \bar{L}_{m+1} = \dots = \bar{L}$$

$$\bar{G}_m = \bar{G}_{m+1} = \bar{G}_{m+2} = \dots = \bar{G}$$

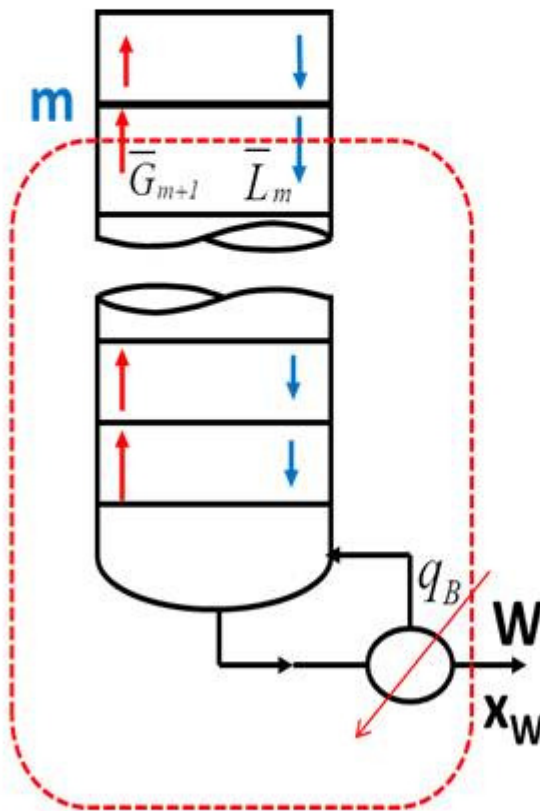
- موازنه های کلی و جزئی جرم برای جزء فرار در قسمت پایین برج برای سینی n ام به صورت زیر نوشته می شود:

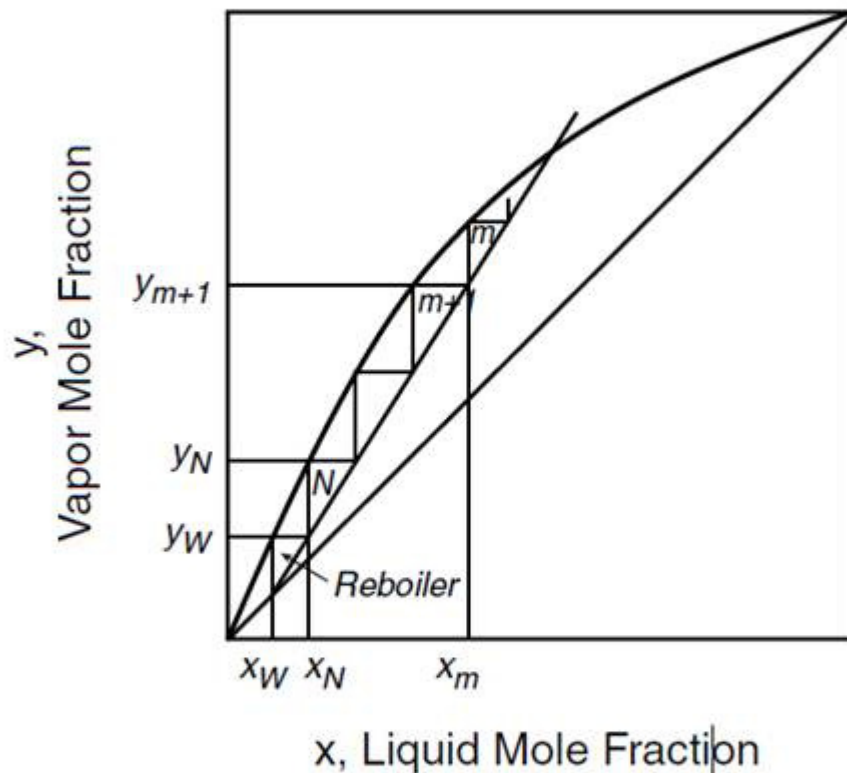
$$\bar{L}_m = \bar{G}_{m+1} + W$$

$$\bar{L}_m x_m = \bar{G}_{m+1} y_{m+1} + W x_w \Rightarrow \bar{L} x_m = \bar{G} y_{m+1} + W x_w$$

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

- رابطه فوق، معادله خط عملیاتی پایین برج (SOL) می باشد، که مکان هندسی ترکیب درصد جزء فرار در فازهای بخار و مایع در هر نقطه در پایین برج می باشد.





شکل (۱-۲۶): خط عملیاتی مربوط به بخش پایین برج

➤ مشاهده می‌گردد معادله خط SOL ، از نقطه $x = y = x_W$ با گذراندن نمودار قطر بر واقع $x = y = x_W$ استفاده از روش پلکانی بین خط عملیاتی SOL و منحنی تعادلی می‌توان تعداد مراحل تعادلی را در قسمت بالای برج بدست آورد.

➤ اگر بخار خروجی از ریبویلر با محصول پسماند در تعادل باشد اولین پله (از پایین) در ترسیمات پلکانی نشان‌دهنده ریبویلر خواهد بود.

➤ اگر خطوط عملیاتی بالا و پایین برج در روی نمودار $x-y$ رسم شوند، همدیگر را در نقطه‌ای قطع می‌کنند که محل ورود خوراک به داخل برج می‌باشد. پس برای خوراک ورودی به برج، به توجه به حالت آن (مایع، بخار یا دوفازی)، نیز یک معادله خط وجود دارد که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.