

مقدمه

تعدد منابع مختلف آزمونهای کارشناسی ارشد در کنار حجم نسبتاً قابل توجه مباحث مطرح شده در آنها به همراه پراکندگی گسترده موضوعات عنوان شده در آنها موجب می شود تا دانشجویانی که خود را برای شرکت در آزمون کارشناسی ارشد آماده می کنند عموماً با انبوهی از مباحث و مطالب روبرو شوند که استخراج خلاصه ای از نکات کلیدی از میان آنها را ضروری می نماید. وجود چنین مجموعه ای می تواند در گامهای آخر آماده سازی شرکت کنندگان در آزمون سراسری بسیار راهگشا باشد.

براساس همین رویکرد، و در چارچوب برنامه کلی موسسه پارسه برای همراهی با دانشجویان در کلیه مراحل کسب آمادگی جهت نیل به موفقیت در آزمون سراسری، مولف کتاب حاضر بر آن شد تا ضمن فراهم آوردن خلاصه ای از مهمترین نکات درس انتقال جرم و عملیات واحد در قالب مجموعه ای بسیار فشرده، امکان مرور سریع مباحث پر اهمیت و پر تکرار کنکور را میسر سازد. علاوه بر این در فصول پایانی کتاب سعی شده است تا از میان مجموعه سوالات کنکور سالهای گذشته چهل پرسش چهار گزینه ای به گونه ای انتخاب شود که در برگیرنده بیشترین نکات برجسته کنکور باشد. همچنین در انتهای کتاب جدولی ارائه شده است که بیانگر درصد تکرار هریک از سرفصلهای این درس در آزمونهای سالهای اخیر می باشد که به دانشجو کمک می کند تا با میزان اهمیت هریک از این سرفصل ها بیشتر آشنا شود و چنانچه محدودیت زمان مطالعه داشته باشد بتواند از میان آنها موضوعاتی را گزینش کند که شانس موفقیت او را افزایش دهد.

در خاتمه مولف بر خود لازم می داند که از همکاریهای جناب آقای مهندس کاوه عابدین زاده مدیر محترم موسسه آموزش عالی آزاد پارسه، که همواره پیگیر انجام این مهم بوده اند، و نیز از زحمات گروه نشر موسسه در چاپ و ویرایش این کتاب کمال تشکر و قدردانی را بنماید.

با آرزوی موفقیت

محمود میرزازاده

بخش اول

انتقال جرم

۱- مکانیزم‌های انتقال جرم

انتقال جرم بین فازها با دو مکانیزم نفوذ مولکولی و جابه‌جایی انجام می‌شود. در نفوذ مولکولی توده سیال فاقد حرکت است (حرکت به مفهوم سیالاتی) اما در جابه‌جایی، توده سیال دارای حرکت است ($v \neq 0$). عامل اصلی انتقال جرم بین دو فاز وجود اختلاف پتانسیل شیمیایی است اما درون یک فاز وجود اختلاف غلظت به عنوان شرط انتقال جرم کفایت می‌کند.

۲- نفوذ مولکولی در سیالات

شار مطلق انتقال جرم (N_A) عبارت است از تعداد مول‌های جزء A که در واحد زمان و در واحد سطح نسبت به یک ناظر لخت از نقطه‌ای به نقطه دیگر منتقل می‌شود و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$N_A = C_A v_A \quad (1)$$

در معادله فوق سرعت جزء A نسبت به ناظر لخت است. دقت شود که در نفوذ با وجود آنکه حرکت در مقیاس میکروسکوپی وجود ندارد اما در مقیاس مولکولی حرکت اجزاء انجام می‌شود. لذا در معادله بالا v_A همان سرعت ناشی از نفوذ است که در مقیاس مولکولی انجام می‌شود. چون این سرعت‌ها قابل اندازه‌گیری نیستند بنابراین لازم است رابطه فوق در قالب کمیت‌های قابل اندازه‌گیری بازنویسی شود:

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

$$N_A = C_A (v_A - \bar{v}^*) + C_A \bar{v}^* \quad (2)$$

$$N_A = J_A + C_A \bar{v}^* \quad (3)$$

$$J_A = C_A (v_A - \bar{v}^*) \quad (4)$$

$$\bar{v}^* = \frac{\sum C_i v_i}{\sum C_i} = \sum x_i v_i \quad (5)$$

در معادلات بالا، N_A : شار مطلق A، J_A : شار نسبی A ناشی از نفوذ، $C_A \bar{v}^*$: انتقال جرم ناشی از حرکت توده و \bar{v}^* : سرعت متوسط مولی ناشی از نفوذ اجزاء است.

۲-۱- قانون اول فیک و نکات آن

فرم اصلی و بی قید و شرط قانون اول فیک به صورت زیر است:

$$J_A = -CD_{AB} \nabla x_A \quad (6)$$

در صورتی که غلظت مولی کل (C) ثابت باشد به صورت زیر خواهد شد:

$$J_A = -D_{AB} \nabla C_A \quad (7)$$

نکات قانون اول فیک به اختصار عبارتند از:

- ضریب نفوذ A در B (D_{AB}) به حلالیت اجزاء بستگی ندارد.
- ضریب نفوذ در گازها، مایعات و جامدات به ترتیب $10^{-5} \frac{m^2}{s}$ ، $10^{-9} \frac{m^2}{s}$ و $10^{-12} \frac{m^2}{s}$ است. یعنی جزء B گاز، مایع یا جامد باشد.
- ضریب نفوذ در گازها با دما و فشار به صورت زیر رابطه دارد:

$$D_{AB} \sim T^{\frac{3}{2}}, \frac{1}{P_t}, \frac{1}{f} \quad (8)$$

در معادله بالا T دمای مطلق گاز و f تابع برخورد مولکول‌های گاز است. اگر تغییرات دما کمتر از 50°C باشد f اثری بر D_{AB} ندارد و لذا:

$$\frac{D_{AB,2}}{D_{AB,1}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (9)$$

- ضریب نفوذ در مایعات به صورت زیر با دما و ویسکوزیته رابطه دارد:

$$\frac{D_{AB,2}}{D_{AB,1}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right) \left(\frac{\mu_1}{\mu_2}\right) \left(\frac{M_{B2}}{M_{B1}}\right)^{0.5} \left(\frac{v_{A1}}{v_{A2}}\right)^{0.6} \quad (10)$$

در معادله بالا T: دمای مطلق، μ : ویسکوزیته مایع، M_B : جرم مولکولی محیط نفوذ، v_A : حجم ویژه جزء A

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

- ضریب نفوذ در مایعات مستقل از فشار ولی وابسته به غلظت است. اما در گازها ضریب نفوذ به فشار بستگی دارد ولی به غلظت بستگی ندارد.
- اگر $D_{AB} = D_{BA}$ غلظت مولی کل ثابت باشد.
- مجموع شارهای مولی نسبی ناشی از نفوذ اجزاء برابر صفر است. ($\sum j_i = 0$)

۲-۲- معادله اساسی شار انتقال جرم

با توجه به قانون اول فیک، معادله (۳) به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$N_A = -CD_{AB}\nabla x_A + x_A \sum N_i \quad (11)$$

$$x_A = \frac{C_A}{C}, \sum N_i = N_A + N_B \quad (12)$$

۲-۳- اثر مختصات بر N_A

در صورتی که واکنش شیمیایی هموزنی انجام نشود و شرایط انتقال جرم پایدار فرض شود از موازنه کلی جزء می‌توان نتیجه گرفت که نرخ انتقال جزء (G_A) مقداری ثابت است. رابطه G_A با N_A به صورت زیر است:

$$G_A = N_A \cdot A \quad (13)$$

A در معادله فوق سطح انتقال جرم است. با توجه به اینکه در مختصات کارتزین، A ثابت بوده و در مختصات استوانه‌ای و کروی A به ترتیب برابر $A = 2\pi rL$ و $A = 4\pi r^2$ می‌باشد. لذا:

$$N_A = \text{ثابت}, \quad \frac{dN_A}{dz} = 0 \quad \text{کارتزین} \quad (14)$$

$$G_A = N_A (2\pi rL) = \text{ثابت}, \quad \frac{d}{dr}(r N_A) = 0 \quad \text{استوانه} \quad (15)$$

$$G_A = N_A (4\pi r^2) = \text{ثابت}, \quad \frac{d}{dr}(r^2 N_A) = 0 \quad \text{کره} \quad (16)$$

۲-۴- روابط شار در مسائل نفوذ

ترم $\sum N_i$ (در معادله (۱۱)) در مسائل مختلف انتقال جرم به یکی از صورت‌های زیر می‌باشد:

۱- اگر انتقال جرم از نوع نفوذ در جزء ساکن باشد:

$$N_A \neq 0, N_B = 0 \rightarrow \sum N_i = N_A \quad (17)$$

در بسیاری از فرآیندها مثل جذب و دفع، جذب و دفع سطحی، خشک کردن و رطوبت‌سنجی به دلیل آنکه فقط یک جزء بین دو فاز مبادله می‌شود. فرض انتقال در جزء ساکن قابل قبول است. اما در فرآیندی مثل تقطیر که همه اجزاء بین دو فاز مبادله می‌شوند این فرض صادق نیست.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۲- اگر انتقال جرم از نوع نفوذ متقابل با مول‌های برابر باشد، همانند اختلاط گازها:

$$N_A = -N_B \rightarrow \sum N_i = 0 \quad (18)$$

۳- اگر نفوذ توأم با واکنش هتروژن باشد ترم $\sum N_i$ به معادله واکنش بستگی دارد. در این حالت با توجه به معادله واکنش به صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$aA + bB + \dots \rightarrow rR + sS + \dots \quad (19)$$

$$\frac{N_A}{a} = \frac{N_B}{b} = \dots = \frac{N_R}{-r} = \frac{N_S}{-s} = \dots \quad (20)$$

$$\sum N_i = N_A + \frac{b}{a}N_A + \dots - \frac{r}{a}N_A - \frac{s}{a}N_A - \dots = \left(1 + \frac{b}{a} + \dots - \frac{r}{a} - \frac{s}{a} - \dots\right)N_A \quad (21)$$

نکته: در معادله (۲۰) باید شار اجزاء جامد در معادله واکنش برابر صفر قرار داده شود. با توجه به موارد فوق، در مختصات کارتزین

شار انتقال جرم ناشی از نفوذ به یکی از صورت‌های زیر قابل بیان است:

اگر $\sum N_i \neq 0$ باشد:

$$N_A = \frac{N_A}{\sum N_i} \cdot \frac{CD_{AB}}{Z} \cdot \ln \left[\frac{\frac{N_A}{\sum N_i} - \frac{C_{A2}}{C}}{\frac{N_A}{\sum N_i} - \frac{C_{A1}}{C}} \right] \quad (22)$$

اگر $\sum N_i = 0$ باشد:

$$N_A = \frac{CD_{AB}}{Z} \left[\frac{C_{A1}}{C} - \frac{C_{A2}}{C} \right] = \frac{CD_{AB}}{Z} [x_{A1} - x_{A2}] \quad (23)$$

برای سایر مختصات‌ها (استوانه و کره) رابطه شار یا نرخ انتقال جرم از ترکیب معادلات (۱۱)، (۱۵)، (۱۶)، (۱۷)، (۱۸) و (۲۱) به دست می‌آید.

به عنوان مثال نرخ تبادل جرم در یک پوسته استوانه‌ای به شعاع داخلی R_1 و شعاع خارجی R_2 و به طول L که غلظت در سطوح داخلی و خارجی آن به ترتیب C_{A1} و C_{A2} می‌باشد و انتقال جرم از نوع نفوذ در جزء ساکن باشد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sum N_i = N_A \rightarrow N_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dr} + \frac{C_A}{C} N_A$$

$$N_A = \frac{-D_{AB} \frac{dC_A}{dr}}{1 - \frac{C_A}{C}}$$

$$G_A = \left[\frac{-D_{AB} \frac{dC_A}{dr}}{1 - \frac{C_A}{C}} \right] (2\pi r L)$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

$$G_A = \frac{-2\pi L D_{AB} \int_{C_{A1}}^{C_{A2}} \frac{dC_A}{1 - \frac{C_A}{C}}}{\int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r}}$$

$$G_A = \frac{2\pi L D_{AB} C \ln \left[\frac{1 - \frac{C_{A2}}{C}}{1 - \frac{C_{A1}}{C}} \right]}{\ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)}$$

خلاصه نکات روابط شار انتقال جرم:

- در مختصات کارتزین و در نفوذ متقابل پروفایل غلظت خطی است.
- در مختصات کارتزین و در نفوذ در جزء ساکن پروفایل غلظت اکسیپوننسیالی است.
- در معادله شار (۱۱) ترم $\sum N_i x_A$ در محلول‌های رقیق و در مسائل نفوذ متقابل قابل صرفنظر است. در این حالت در مختصات کارتزین پروفایل غلظت به صورت خطی خواهد بود.
- با تعریف متوسط لگاریتمی غلظت B (x_{BM}) روابط لگاریتمی شار مشابه روابط خطی خواهد شد.

$$x_{BM} = \frac{x_{B2} - x_{B1}}{\ln \left(\frac{x_{B2}}{x_{B1}} \right)} \quad (۲۴)$$

در محلول‌های رقیق از A، x_{BM} به سمت یک میل می‌کند.

۲-۵- معادله دیفرانسیل انتقال جرم و قانون دوم نیک

با نوشتن موازنه جزء A در مسائل انتقال جرم، معادله دیفرانسیل بیان‌کننده تغییرات غلظت A بر حسب مکان و زمان به صورت زیر خواهد شد:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + v \cdot \nabla C_A = D_{AB} \nabla^2 C_A + R_A \quad (۲۵)$$

که در معادله بالا، R_A : سرعت واکنش هموزن، $v \cdot \nabla C_A$: انتقال جرم ناشی از حرکت توده سیال و $D_{AB} \nabla^2 C_A$: انتقال جرم ناشی از نفوذ می‌باشد. در معادله بالا اگر واکنش همگن شیمیایی و حرکت توده‌ای سیال نداشته باشیم:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 C_A \quad (۲۶)$$

معادله بالا همان قانون دوم فیک است. مهم‌ترین کاربرد قانون دوم فیک در مسائل نفوذ ناپایدار در جامدات است (مثل فرآیند Drying) مطابق قانون دوم فیک زمان لازم برای یک تحول با مجذور ضخامت متناسب است.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۲-۶- مسئله تصعید گلوله نفتالین

اگر گلوله نفتالینی به شعاع اولیه R_0 داشته باشیم که به درون هوای ساکن تصعید می‌شود شار انتقال جرم و زمان لازم برای تصعید کامل گلوله از معادله‌های زیر به دست می‌آید:

$$N_A = -\frac{dn_A}{A dt} = -\frac{\rho}{M} \frac{dR}{dt}$$

$$N_A = -\frac{D_{AB}}{R_g T} \frac{dP_A}{dr} + \frac{P_A}{P_t} N_A$$

$$N_A = -\frac{D_{AB}}{R_g T} \frac{dP_A}{1 - \frac{P_A}{P_t}}$$

$$G_A = N_A \cdot (4\pi r^2)$$

$$-4\pi D_{AB} \int_{P_A^S}^0 \frac{dP_A}{1 - \frac{P_A}{P_t}}$$

$$G_A = \frac{R_g T \int_R^\infty \frac{dr}{r^2}}$$

$$G_A = \frac{4\pi D_{AB} P_t R}{R_g T} \text{Ln} \frac{1}{1 - \frac{P_A^S}{P_t}}$$

$$t = \frac{\rho R_g T}{2MD_{AB} P_t \text{Ln} \left(\frac{P_t}{P_t - P_A^S} \right)} R_0^2$$

۳- انتقال جرم جابه‌جایی

اگر توده سیال دارای حرکت به مفهوم سیالاتی باشد جابه‌جایی مکانیزم غالب انتقال جرم است. شار انتقال جرم به دو روش قابل محاسبه است. در روش اول از روابطی مشابه روابط نفوذ استفاده می‌شود. (معادلات ۲۲ و ۲۳). در این حالت به جای ترم $\frac{CD_{AB}}{Z}$ در معادلات نفوذ،

از ضریب انتقال جرم F استفاده می‌شود. لذا:

$$N_A = \frac{N_A}{\sum N_i} F \text{Ln} \left[\frac{\frac{N_A}{\sum N_i} - \frac{C_{A2}}{C}}{\frac{N_A}{\sum N_i} - \frac{C_{A1}}{C}} \right] \quad \text{اگر} \quad \sum N_i \neq 0 \quad (27)$$

$$N_A = F \left(\frac{C_{A1}}{C} - \frac{C_{A2}}{C} \right) \quad \text{اگر} \quad \sum N_i = 0 \quad (28)$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

در روش دوم روابط شار انتقال جرم جابه‌جایی به تقلید از روابط انتقال حرارت جابه‌جایی ($q = h \cdot \Delta T$) نوشته می‌شود:

$$\text{نیروی محرکه غلظت} \times \text{ضریب انتقال جرم} = \text{شار انتقال جرم} \quad (29)$$

با توجه به تنوع واحدهای غلظت، ضرایب انتقال جرم نوع k دارای تنوع زیادی هستند:

$$\text{اگر } \sum N_i \neq 0 \text{ باشد:}$$

$$\begin{cases} N_A = k_C \Delta C_A = k_y \Delta y_A = k_G \Delta P_A & \text{برای گازها} \\ N_A = k_L \Delta C_A = k_x \Delta x_A & \text{برای مایعات} \end{cases} \quad (30)$$

$$\text{اگر } \sum N_i = 0 \text{ باشد:}$$

$$\begin{cases} N_A = k'_C \Delta C_A = k'_y \Delta y_A = k'_G \Delta P_A & \text{برای گازها} \\ N_A = k'_L \Delta C_A = k'_x \Delta x_A & \text{برای مایعات} \end{cases} \quad (31)$$

رابطه میان ضرایب انتقال جرم نوع F و k ، k' به صورت زیر است:

$$F = k_G \cdot P_{BM} = k_y \cdot y_{BM} = k_c C_{BM} = k_L \cdot C_{BM} = k_x \cdot x_{BM} \quad (32)$$

$$F = k'_G \cdot P_t = k'_y = k'_c C = k'_L C = k'_x \quad (33)$$

۳-۱- روش‌های محاسبه ضرایب انتقال جرم

برای محاسبه ضرایب انتقال جرم جابه‌جایی نوع F و k چهار روش اصلی وجود دارد که عبارتند از:

- تشابه با حرارت و سیالات (similarity)
- تئوری‌های انتقال جرم
- حل معادلات بقای جرم، مومنتم و پیوستگی
- روابط تجربی در قالب اعداد بی بعد

دو روش اول جزء سر فصل انتقال جرم دوره کارشناسی است.

نکته: ضرایب انتقال جرم نوع F برای شدت‌های زیاد انتقال جرم و ضرایب انتقال جرم نوع k برایش شدت‌های کم انتقال جرم به کار می‌روند.

روابط مربوط به محاسبه ضرایب انتقال جرم جابه‌جایی معمولاً در قالب رابطه‌ای میان اعداد بی‌بعد ارائه می‌شوند:

برای جابه‌جایی اجباری:

$$sh = f(Re, Sc) \quad (34)$$

و برای جابه‌جایی آزاد:

$$sh = f(Gr, Sc) \quad (35)$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

در روابط فوق عدد Sh ، Sc و Re و Gr به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$sh = \frac{FL}{CD_{AB}} = \frac{F}{\frac{CD_{AB}}{L}} = \frac{\text{انتقال جرم جابه‌جایی}}{\text{انتقال جرم ناشی از نفوذ}} \quad (36)$$

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{\text{نیروهای اینرسی}}{\text{نیروهای ویسکوز}} \quad (37)$$

$$Gr = \frac{g \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right) L^3}{\nu^2} = \frac{\text{نیروی شناوری}}{\text{نیروی ویسکوز}} \quad (38)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} = \frac{\text{شدت نفوذ مومنتم}}{\text{شدت نفوذ جرمی}} \quad (39)$$

$$Sc = 0.5 \sim 2 \quad \text{گازها} \quad (40)$$

$$Sc = 100 \sim 50000 \quad \text{مایعات} \quad (41)$$

نکته: عدد اشمیت (Sc) گازها از مرتبه یک و عدد اشمیت مایعات از مرتبه هزار می‌باشد. عدد اشمیت حدود 50000 برای مایعات خیلی ویسکوز می‌باشد.

$$\text{عدد اشمیت مشابه اعداد پراتل} \left(Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k} \right) \text{ و لوئیس} \left(Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} = \frac{Sc}{Pr} \right) \text{ می‌باشد.}$$

۳-۲- تشابه پدیده‌های انتقال جرم، حرارت و سیالات

معادلات بقای جرم، حرارت و مومنتم به صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + v \cdot \nabla C_A = D_{AB} \nabla^2 C_A + R_A \quad (42)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{\rho C_p} + \frac{\Phi}{\rho C_p} \quad (43)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v = \nu \nabla^2 v + g - \frac{1}{\rho} \nabla P \quad (44)$$

از مقایسه معادلات فوق مشاهده می‌شود که ساختار روابط فوق دارای شباهت‌های زیادی است لذا در تحت شرایطی این سه پدیده می‌توانند مشابه هم باشند. شرایط تشابه به اختصار عبارتند از:

$$(Pr = Sc = Le = 1) \quad v = \alpha = D_{AB} \quad -1$$

۲- اگر جریان در هم باشد ضرایب نفوذ چرخانه‌ای باید با هم برابر باشند.

$$E_D = E_H = E_v \quad (45)$$

$$J_A = -(D_{AB} + E_D) \frac{\partial C_A}{\partial Z} \quad (46)$$

یادداشت:

.....

$$q = -(\alpha + E_H) \frac{\partial(\rho C_P T)}{\partial Z} \quad (47)$$

$$\tau = -(\nu + E_\gamma) \frac{\partial(\rho v)}{\partial Z} \quad (48)$$

نکته : ضرایب نفوذ چرخانه‌ای تابع مسیرند در حالی که D_{AB} (ضریب نفوذ مولکولی) از خواص فیزیکی سیستم به شمار می‌رود.

نکته : در عمل E_D و E_H با هم برابرند اما با E_v مساوی نیستند.

$$E_D = E_H \neq E_\gamma \quad (\text{در عمل}) \quad (49)$$

لذا هر چند معادله (۴۵) از شروط تشابه است اما در عمل در جریان در هم به دلیل معادله (۴۹) تشابه با سیالات توأم با خطا خواهد بود.

۳- شرایط مرزی مسئله هم‌نوع باشند (هر دو نوع اول، هر دو نوع دوم یا هر دو نوع سوم باشند)

۴- اعداد Re در هر سه پدیده برابر باشند.

۵- شکل هندسی در هر سه پدیده مشابه باشند.

۶- تلفات ویسکوز (Φ) ، تولید گرما (\dot{q}) ، واکنش شیمیایی (R_A) ، گرادیان فشار (∇P) و شتاب جاذبه در راستای حرکت (g) نداشته باشیم.

۷- شدت انتقال جرم تا حد امکان کم باشد.

نتیجه: در صورتی شرایط ۷ گانه فوق برقرار باشد بی بعد پروفایل‌های سرعت $\left(\frac{u}{u_\infty}\right)$ و دما $\left(\frac{T-T_w}{T_\infty-T_w}\right)$ و غلظت $\left(\frac{C_A-C_{Aw}}{C_{A\infty}-C_{Aw}}\right)$ هم منطبق خواهند بود.

در شرایط تشابه کاربردی چون هدف انطباق پروفایل‌های سرعت، دما و غلظت نیست بلکه هدف محاسبه ضرایب اصطکاک (C_f) ، انتقال حرارت (h) و انتقال جرم (k یا f) به کمک هم است لذا ضرورتی ندارد بندهای ۱ و ۴ از شروط هفت‌گانه بالا حتماً صادق باشند. نحوه محاسبه ضرایب انتقال جرم از تشابه با حرارت بدین صورت است که در رابطه مربوط به محاسبه h به جای Nu از sh و به جای pr عدد اشمیت را جایگزین می‌کنیم. مثلاً اگر معادله Nu به صورت زیر باشد

$$Nu = 0.332 Re^{0.5} Pr^{\frac{1}{3}}$$

معادله sh به صورت زیر خواهد شد:

$$sh = 0.332 Re^{0.5} Sc^{\frac{1}{3}}$$

محاسبه ضرایب انتقال جرم و حرارت از تشابه با سیالات به کمک آنالوژی رینولدز کلبرن انجام می‌شود.

$$J_D = St_D \cdot Sc^{\frac{2}{3}} = \frac{C_f}{2} \quad (50)$$

$$J_H = St_H \cdot Pr^{\frac{2}{3}} = \frac{C_f}{2} \quad (51)$$

$$J_D = J_H = \frac{C_f}{2} \quad (52)$$

یادداشت:

.....

در معادلات فوق St_D و St_H اعداد استانتون جرمی و حرارتی هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$St_D = \frac{Sh}{Re.Sc} = \frac{F}{Cu}, St_H = \frac{Nu}{Re.Pr} = \frac{h}{\rho u C_p} \quad (53)$$

نکات مهم این آنالوژی به اختصار عبارتند از:

۱- C_f در این آنالوژی فقط اصطکاک سطحی را شامل می‌شود لذا در مسائلی که اصطکاک شکلی داریم (جریان از روی سطوح منحنی)

این آنالوژی صادق نیست. در این حالت $J_D = J_H \neq \frac{C_f}{2}$

۲- مطابق این آنالوژی ضرایب h ، k ، C_f با هم رابطه مستقیم دارند و هر چه اصطکاک بیشتر باشد ضرایب انتقال جرم و حرارت هم بیشتر خواهند بود.

۳- این آنالوژی در جریان آرام لوله صادق نیست.

۴- این آنالوژی در مسائل شار ثابت صادق نیست.

۳-۳- تئوری‌های انتقال جرم

یکی دیگر از روش‌های محاسبه ضرایب انتقال جرم استفاده از تئوری‌های انتقال جرم است. در ذیل خلاصه نکات این تئوری‌ها ارائه شده است:

۱- تئوری فیلمی (film)

- برای سطوح جامد - سیال به کار می‌رود. (سطح انتقال جرم آرام است)
- انتقال جرم پایدار فرض می‌شود.
- زمان تماس دو فاز طولانی است.
- ضخامت لایه انتقال جرم بسیار کم باشد.
- پروفایل غلظت خطی است.
- در این تئوری ضریب انتقال جرم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F = \frac{D_{ABC}}{Z_F} \quad (54)$$

۲- تئوری رسوخ (Penetration)

- سطح انتقال جرم آشفته است.
- زمان تماس دو فاز کوتاه است.
- مسیر نفوذ طولانی است.
- شرایط ناپایدار است (به علت زمان تماس کم)
- برای سطوح گاز - مایع استفاده می‌شود.
- در این تئوری ضریب انتقال جرم از معادله زیر به دست می‌آید:

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

$$k_L = 2\sqrt{\frac{D_{AB}}{\pi\theta}} \quad (55)$$

θ : زمان توقف المان‌های سیال در مجاور فصل مشترک است.

۳- تئوری نوشوندگی سطح (Surface Renewal)

- فرضیات این تئوری مشابه تئوری رسوخ است. فقط زمان توقف المان‌های سیال یکسان فرض نمی‌شود.
- در این تئوری ضریب انتقال جرم از معادله زیر به دست می‌آید:

$$k_L = \sqrt{D_{AB}S} \quad (56)$$

S در معادله بالا سرعت نوشندگی سطح است که با θ نسبت عکس دارد.

۴- تئوری اصلاحی دابینز (ادغام تئوری فیلمی و نوشوندگی)

- این تئوری ادغام تئوری فیلمی و نوشوندگی است.
- ضریب انتقال جرم در این تئوری از معادله زیر به دست می‌آید:

$$k_L = \sqrt{D_{AB}S} \coth\left(\sqrt{\frac{SZ_b^2}{D_{AB}}}\right) \quad (57)$$

- مطابق این تئوری k_L متناسب با D_{AB}^n است که n بین 0.5 تا 1 است.

- هنگامی که $\sqrt{\frac{SZ_b^2}{D_{AB}}}$ عدد کوچکی باشد (Z_b کم، S کم و D_{AB} بزرگ) نتایج این تئوری مشابه تئوری فیلمی است و هنگامی

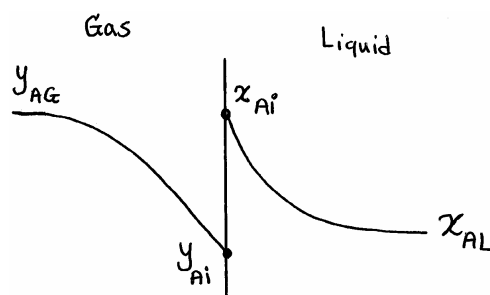
که $\sqrt{\frac{SZ_b^2}{D_{AB}}}$ عدد بزرگی باشد نتایج این تئوری مشابه تئوری نوشوندگی است.

۴- انتقال جرم بین فازها

آنچه تاکنون مورد بررسی قرار گرفت انتقال جرم درون تک‌فاز بود اما در عملیات انتقال جرم با انتقال اجزاء بین فازها سر و کار داریم که در ادامه به مفاهیم انتقال بین فازها، مقاومت‌های هر فاز، ضرایب کلی و محلی انتقال جرم و نیروی محرکه پرداخته خواهد شد.

۴-۱- انتقال جرم محلی بین دو فاز

در شکل زیر پروفایل غلظت در جذب یک گاز به درون مایع نشان داده شده است:



یادداشت:

.....

.....

.....

.....

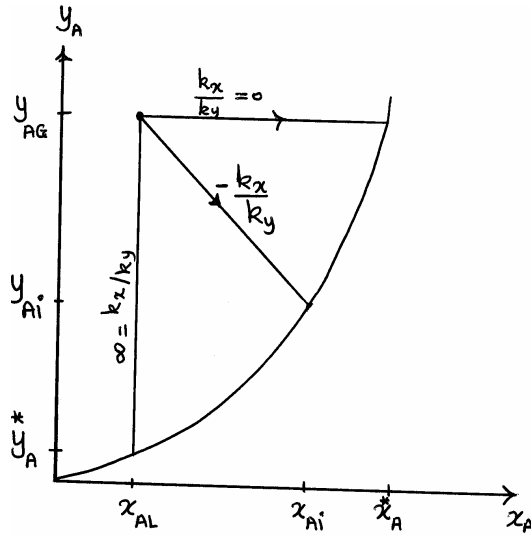
x_{AL} و y_{AG} غلظت جزء A در توده گاز و مایع بوده و x_{Ai} و y_{Ai} غلظت جزء A در فصل مشترک مایع و گاز می‌باشد. شار انتقال جرم برای سیستم فوق به صورت زیر قابل بیان است:

$$N_A = k_y (y_{AG} - y_{Ai}) = k_x (x_{Ai} - x_{AL}) \quad (58)$$

که معادله خط نیروی محرکه از معادله فوق به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{y_{AG} - y_{Ai}}{x_{AL} - x_{Ai}} = -\frac{k_x}{k_y} \quad (59)$$

در شکل زیر معادله خط نیروی محرکه نشان داده شده است.



مطابق شکل بالا در صورتی که تمام مقاومت در فاز مایع باشد نیروی محرکه در فاز مایع برابر $x_A^* - x_{AL}$ خواهد بود و در صورتی که تمام مقاومت در فاز گاز باشد نیروی محرکه در فاز گاز برابر $y_{AG} - y_A^*$ خواهد بود. در این حالات روابط شار انتقال جرم بر حسب ضرایب کلی انتقال جرم بر مبنای فاز گاز (K_y) و مایع (K_x) به صورت زیر خواهد شد:

$$N_A = K_x (x_A^* - x_{AL}) = K_y (y_{AG} - y_A^*) \quad (60)$$

رابطه میان ضرایب کلی و محلی انتقال جرم به صورت زیر قابل بیان است:

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x} \quad (61)$$

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{k_x} + \frac{1}{mk_y} \quad (62)$$

m در معادلات بالا شیب منحنی تعادل است.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

معادله (۵۸) به کمک ضرایب انتقال جرم نوع F هم قابل بیان است که در این صورت:

$$N_A = \frac{N_A}{\sum N_i} F_G \ln \left[\frac{\frac{N_A}{\sum N_i} - y_{Ai}}{\frac{N_A}{\sum N_i} - y_{AG}} \right] \quad (63)$$

$$N_A = \frac{N_A}{\sum N_i} F_L \ln \left[\frac{\frac{N_A}{\sum N_i} - x_{AL}}{\frac{N_A}{\sum N_i} - x_{Ai}} \right] \quad (64)$$

معادلات بالا برای حالت $\sum N_i \neq 0$ صادق است در این حالت معادله نیروی محرکه غیر خطی بوده و به صورت زیر قابل بیان است:

$$\left[\frac{\frac{N_A}{\sum N_i} - y_{Ai}}{\frac{N_A}{\sum N_i} - y_{AG}} \right] = \left[\frac{\frac{N_A}{\sum N_i} - x_{AL}}{\frac{N_A}{\sum N_i} - x_{Ai}} \right]^{\frac{F_L}{F_G}} \quad (65)$$

$$N_A = F_G (y_{AG} - y_{Ai}) \quad (66)$$

$$N_A = F_L (x_{Ai} - x_{AL}) \quad (67)$$

$$\frac{y_{AG} - y_{Ai}}{x_{AL} - x_{Ai}} = -\frac{F_L}{F_G} \quad (\text{اگر } \sum N_i = 0 \text{ باشد}) \quad (68)$$

مشابه معادلات (۶۱) و (۶۲) در صورتی که $\sum N_i = 0$ باشد رابطه بین ضرایب کلی و محلی نوع F قابل ارائه به صورت زیر است:

$$\frac{1}{F_{oG}} = \frac{1}{F_G} + \frac{m}{F_L} \quad (69)$$

$$\frac{1}{F_{oL}} = \frac{1}{F_L} + \frac{1}{mF_G} \quad (70)$$

۴-۳- تعیین سهم مقاومت هر فاز در مقابل انتقال جرم

سهم فازهای گاز و مایع از مقاومت کلی در مقابل انتقال جرم در قالب روابط زیر بیان می‌شود:

$$\text{درصد مقاومت فاز گاز} = \frac{\frac{1}{k_y}}{\frac{1}{K_y}} \times 100 = \frac{1}{1 + \frac{mk_y}{k_x}} \times 100 \quad (71)$$

$$\text{درصد مقاومت فاز مایع} = \frac{\frac{1}{k_x}}{\frac{1}{K_x}} \times 100 = \frac{1}{1 + \frac{k_x}{mk_y}} \times 100 \quad (72)$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

روابط فوق نشان می‌دهد که مقاومت هر فاز تابع دو عامل m (شیب منحنی تعادل) و $\frac{k_x}{k_y}$ می‌باشد.

نکات بحث مقاومت‌ها به اختصار عبارتند از:

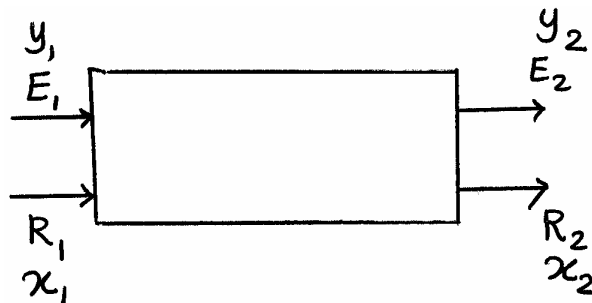
- در حالتی که $k_x \approx k_y$ باشد مقاومت فقط تابع m است. لذا اگر m زیاد باشد فاز مایع کنترل‌کننده انتقال جرم است و اگر m کم باشد فاز گاز کنترل‌کننده انتقال جرم است.
- از تقسیم معادلات (۷۲) و (۷۱) بر هم نسبت مقاومت مایع به گاز به دست می‌آید:

$$\text{نسبت مقاومت مایع به گاز} = \frac{mk_y}{k_x} \quad (۷۳)$$

- اگر در مسئله‌ای هم m و هم نسبت $\frac{k_x}{k_y}$ معلوم باشد درصد مقاومت هر فاز به طور دقیق قابل تعیین است. در این نوع از مسائل مقایسه کمی به مقایسه کیفی ارجح است.
- رابطه $K_x = mK_y$ همواره صادق است اما معادله $k_x = mk_y$ فقط در صورتی که مقاومت دو فاز برابر باشد صادق است.

۴-۴- انتقال جرم در جریان همسو (co-current)

مطابق شکل زیر انتقال جزء A بین دو فاز E (فاز سبک) و فاز R (فاز سنگین) نشان داده شده است.



از موازنه جرم برای فرآیند همسوی فوق معادله خط کار این جریان به دست می‌آید:

$$\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = -\frac{R_s}{E_s} \quad (۷۴)$$

$$X = \frac{x}{1-x}, Y = \frac{y}{1-y} \quad (۷۵)$$

R_s و E_s در معادلات بالا شدت جریان اجزاء غیر نفوذی فازهای R و E می‌باشند.

$$R_s = R_1(1-x_1) = R_2(1-x_2) \quad (۷۶)$$

$$E_s = E_1(1-y_1) = E_2(1-y_2) \quad (۷۷)$$

در شکل زیر معادله خط کار فوق رسم شده است:

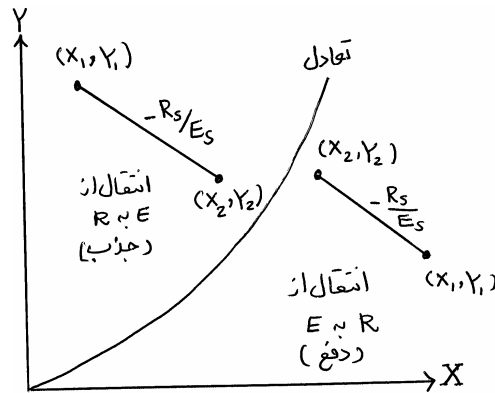
یادداشت:

.....

.....

.....

.....

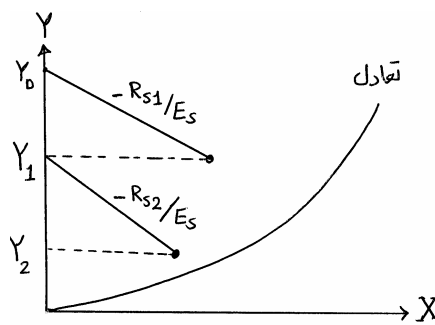
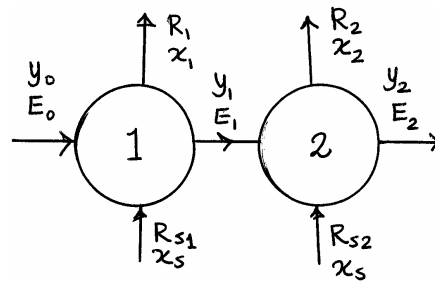


نکته: فرآیندهای ناپیوسته (Batch) به عنوان یک فرآیند همسو محسوب می‌شوند که در آنها (X_1, Y_1) غلظت‌ها در ابتدای فرآیند و (X_2, Y_2) غلظت‌های دو فاز در انتهای فرآیند می‌باشند.

در فرآیند همسو نیروی محرکه در طول فرآیند کاهش می‌یابد و این فرآیند حداکثر یک مرحله تعادلی می‌تواند باشد.

۴-۵- انتقال جرم در جریان متقاطع (Cross-current)

معادلات خط کار در جریان‌های متقاطع مشابه جریان همسو می‌باشد. در شکل‌های زیر شماتیک جریان و خطوط کار برای فرآیند متقاطع دو مرحله‌ای که در آن انتقال از E به R انجام می‌شود نشان داده شده است.



در شکل فوق $x_s = 0$ فرض شده است و مراحل غیر تعادلی‌اند. کل مقدار حلال مصرفی در هر دو مرحله از معادله زیر به دست می‌آید:

$$R_{s1} + R_{s2} = -E_s \left[\frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_s} + \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_s} \right] \quad (78)$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

در صورتی که منحنی تعادل خطی باشد ($Y = mX$)، مراحل تعادلی باشند و حلال خالص باشد با مشتق گرفتن از معادله فوق نسبت به Y_1 شرایطی را که در آن مجموع حلال مصرفی در هر دو مرحله حداقل باشد به صورت زیر به دست می‌آید:

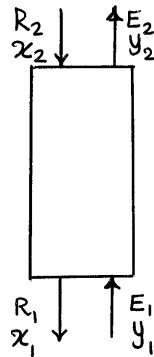
$$Y_1 = \sqrt{Y_0 Y_2} \quad (79)$$

$$R_{s1} = R_{s2} = E_s \left[\frac{\sqrt{Y_0 Y_2} - Y_0}{\frac{\sqrt{Y_0 Y_2}}{m}} \right] \quad (80)$$

اشکال و روابط مشابهی برای حالت انتقال از R به E (دفع) قابل ارائه است.

۴-۶- انتقال جرم در جریان ناهمسو (counter current)

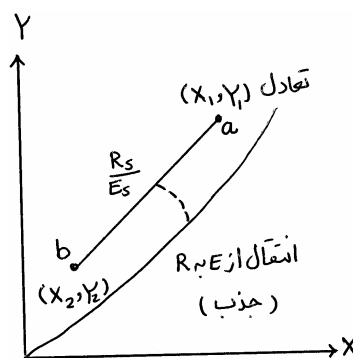
در شکل زیر شماتیک جریان ناهمسو ارائه شده است.



در این سیستم معادله خط کار به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{R_s}{E_s} \quad (81)$$

در شکل‌های زیر معادلات خطوط کار، تعادل و نیروی محرکه در جریان ناهمسو برای دو حالت انتقال از E به R (جذب) و انتقال از R به E (دفع) ارائه شده است.



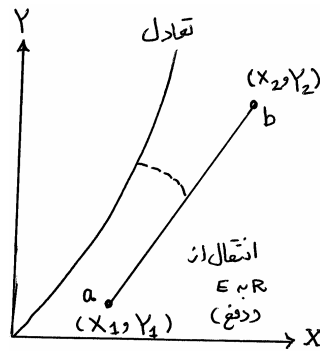
یادداشت:

.....

.....

.....

.....



در اشکال فوق خطچین نشان دهنده منحنی نیروی محرکه در موضعی خاص از برج بوده و نقاط a و b به ترتیب پایین و بالای برج را نشان می دهند.

نکته: اگر خط کار فوق در صفحه xy (کوچک) رسم می شد به صورت منحنی در می آمد.

در جریان ناهمسو یک نیروی محرکه قابل قبول در سرتاسر دستگاه وجود دارد. مزیت دیگر این فرآیند چند مرحله ای بودن آن است. محاسبه حداقل حلال در جریان ناهمسو در فرآیند جذب (انتقال از E به R) از معادله زیر و با فرض تلاقی خط کار و منحنی تعادل امکان پذیر است. در این حالت مایع خروجی از پایین برج (X_1) در تعادل با گاز ورودی فرض می شود:

$$R_{s_{\min}} = -E_s \left(\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_{1eq}} \right) \quad (82)$$

در معادله بالا X_{1eq} در تعادل با Y_1 فرض می شود (مثلاً $X_{1eq} = \frac{Y_1}{m}$) در حالتی که انتقال از R به E انجام می شود. حداقل حلال از معادله زیر به دست می آید. در این حالت گاز خروجی از بالای برج (Y_2) در تعادل با مایع ورودی فرض می شود:

$$E_{s_{\min}} = \frac{-R_s}{\left[\frac{Y_{2eq} - Y_1}{X_2 - X_1} \right]} \quad (83)$$

در معادله بالا Y_{2eq} در تعادل با X_2 فرض می شود (مثلاً $y_{2eq} = mX_2$)

۴-۷- محاسبه عده مراحل تئوری در جریان ناهمسو

در جریان ناهمسو و تحت شرایط ذیل:

- فقط یک جزء بین دو فاز مبادله شود.
- خطوط تعادل و تبادل هر دو خطی باشند.

از معادله کرمسر عده سینی های تئوری قابل محاسبه هستند:

$$N_p = f \left[Y_{N_p+1}, Y_1, X_0, m, A \right] \quad (84)$$

$$N_p = f \left[Y_{N_p+1}, X_0, X_{N_p}, m, S \right] \quad (85)$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

معادلات ۸۴ و ۸۵ معادله کرمسر برای حالات انتقال از E به R (جذب) و انتقال از R به E (دفع) می‌باشد. X_0 و X_{N_p} غلظت A در مایع در بالا و پایین برج می‌باشند و Y_{N_p+1} و Y_1 غلظت A در گاز ورودی و خروجی می‌باشد.

$$A = \frac{R_s}{E_s} = \frac{\text{شیب خط کار}}{\text{شیب خط تعادل}} \quad (۸۶)$$

$$S = \frac{m}{R_s} = \frac{\text{شیب خط تعادل}}{\text{شیب خط کار}} \quad (۸۷)$$

در جذب با افزایش فاکتور جذب (A) (دور شدن خطوط تبادل و تعادل از هم) عده مراحل تئوری کاهش می‌یابد. در دفع با افزایش فاکتور دفع (S) عده مراحل تئوری کاهش می‌یابد.

در حالتی که فاکتور جذب برابر یک باشد ($A=1$)، خطوط تبادل و تعادل موازی‌اند و نیروی محرکه در طول برج ثابت می‌ماند.

نکته: از معادله کرمسر برای محاسبه عده مراحل در فرآیندی مثل تقطیر نمی‌توان استفاده کرد چون در تقطیر فرض انتقال یک جزء بین دو فاز معتبر نیست.

۵- دستگاه‌های گاز مایع

دستگاه‌های گاز - مایع به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند. دستگاه‌هایی که در آنها گاز پراکنده می‌شود و دستگاه‌هایی که در آنها مایع پراکنده می‌شود. دستگاه‌هایی که در آنها گاز پراکنده می‌شود عبارتند از:

۱- برج‌های سینی‌دار (Tray Tower)

۲- مخازن مولد حباب

۳- مخازن همزن‌دار

و دستگاه‌هایی که در آنها مایع پراکنده می‌شود عبارتند از:

۱- شستشودهنده و انتوری

۲- برج‌های دیواره مرطوب (Wetted Wall Tower)

۳- برج‌های پاششی (Spray Tower)

۴- برج‌های پر شده

در ادامه خلاصه نکات مهم هر یک از این دستگاه‌ها ارائه می‌شود.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۵-۱- مخازن مولد حباب

در این مخازن گاز پس از عبور از یک دستگاه مولد حباب (spurger) به صورت حباب در می‌آید. مهم‌ترین کاربرد این دستگاه‌ها در فرآیندهایی است که:

- در فاز مایع جزء جامد داریم.

- یک واکنش شیمیایی بین گاز و مایع انجام می‌شود.

مثل هوادهی فرماتورها، کلرینه کردن خمیر کاغذ، کربناسیون دوغاب آهک و هیدروژناسیون روغن نباتی. سطح ویژه انتقال جرم (سطح به ازای واحد حجم) در این دستگاه‌ها از معادله زیر به دست می‌آید:

$$a = \frac{6\Phi_G}{d_p} \quad (۸۸)$$

که در معادله بالا $a \left(\frac{m^2}{m^3} \right)$: سطح ویژه، Φ_G : ماندگی گاز در مایع (یا کسری از حجم که توسط گاز اشغال شده است) و d_p : قطر حباب‌های گاز است.

در این دستگاه مقاومت اصلی در مقابل انتقال جرم در فاز مایع است (چون گاز پراکنده شده است).

۵-۲- مخازن همزن دار

کاربرد مخازن همزن دار مشابه مخازن مولد حباب است. فقط در این دستگاه برای ایجاد اختلاط مناسب در فاز مایع از همزن استفاده می‌شود. هر چند همزن مقاومت فیلمی مایع را کاهش می‌دهد اما دلیل اصلی استفاده از همزن همان ایجاد اختلاط مناسب است.

توان همزن مورد استفاده در این مخازن در قالب رابطه زیر که بین اعداد بی‌بعد سیستم نوشته شده، ارائه می‌شود:

$$P_o = f(Re, We, Fr) \quad (۸۹)$$

که در معادله بالا P_o : عدد توان $\left(P_o = \frac{P}{\rho N^3 d^5} \right)$ ، Re : عدد رینولدز $\left(Re = \frac{\rho N d^2}{\mu} \right)$ ، Fr : عدد فرود $\left(Fr = \frac{d N^2}{g} \right)$ ، We : عدد

و بر $\left(We = \frac{\rho N^2 d^2 \cdot d_p}{\sigma} \right)$ می‌باشد. همچنین P ، N و d به ترتیب توان همزن، دور همزن و قطر همزن می‌باشند.

نکته: توان همزن زمانی به عدد فرود (Fr) بستگی دارد که در مخزن پدیده vortex داشته باشیم. بنابراین در مخازن مجهز به بافل این عدد نقشی در محاسبه توان همزن ندارد.

نکته: عدد We زمانی در محاسبه توان همزن نقش دارد که اختلاط دو فازی در مخزن انجام شود. (مثل اختلاط گاز - مایع)

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

نکته: در جریان آرام عدد توان با عدد رینولدز نسبت عکس دارد $\left(P_0 \sim \frac{1}{Re}\right)$ ولی در جریان در هم عدد توان مستقل از Re است. تزریق گاز به درون مخزن باعث کاهش توان مورد نیاز برای اختلاط می‌شود.

۳-۵- برج‌های سینی‌دار

در این برج‌ها گاز از طریق روزنه‌های ایجاد شده روی سینی به صورت حباب درون فاز مایع پراکنده می‌شود. در این برج‌ها Weir (بند) باعث ایجاد عمق مناسب روی سینی می‌شود. مایع پس از طی سینی از روی بند به درون Down Comer وارد می‌شود. از انتقال جرم بین گاز و مایع درون مجرای ریزش مایع در مقایسه با انتقال جرم روی سینی صرف‌نظر می‌شود. چون جریان‌های گاز و مایع خروجی از سینی تقریباً به حالت تعادلی نزدیک هستند. سینی‌ها برج به صورت شیب‌دار نصب می‌شوند تا مایع روی سینی به خوبی حرکت کند. ازدیاد بیش از حد این شیب باعث توزیع نایکنواخت حباب‌های گاز در مایع می‌شود. ماندگی گاز در مایع در برج‌های سینی‌دار حدود 5-15% حجمی است. فاصله منافذ روی سینی حدود 2 تا 3 برابر قطر این منافذ است. این امر برای ایجاد سطح انتقال جرم تا حد امکان زیاد و نیز جلوگیری از به هم چسبیدن حباب‌های گاز است. پدیده‌های نامطلوب در برج‌های سینی‌دار به شرح ذیل هستند:

۱- پدیده ماندگی (Entrainment)

ماندگی عبارت است از مقدار مایعی که توسط گاز از سینی‌های زیرین به سینی‌های فوقانی حمل می‌شود. ماندگی در تمام دستگاه‌هایی گاز - مایع اتفاق می‌افتد. وقوع پدیده ماندگی باعث کاهش نیروی محرکه در برج و لذا کاهش راندمان سینی می‌شود.

۲- پدیده انسداد (priming)

این پدیده حالت حاد پدیده ماندگی است که در آن به علت کف‌زا بودن محلول ماندگی مایع در گاز بسیار قابل توجه است. در این حالت هم به علت کاهش نیروی محرکه راندمان سینی کم می‌شود.

۳- پدیده مخروطی شدن (coning)

در این پدیده گاز با سرعت از درون مایع عبور می‌کند و به جای آنکه درون فاز مایع پراکنده شود، درون این فاز ایجاد مجرا نموده و بدون ایجاد تماس مناسب سینی را ترک می‌کند.

۴- پدیده طغیان (Flooding)

طغیان یک اشکال مکانیکی است که در آن به علت عدم تناسب سطح مقطع برج با فلوریت‌های عبوری افت فشار گاز در سینی بالا می‌رود. افزایش افت فشار باعث بالا رفتن سطح مایع درون Down Comer می‌شود. در حالت حاد مایع از درون Down Comer به سینی فوقانی بازگردانده می‌شود. این پدیده باعث کاهش قابل توجه راندمان سینی می‌شود.

۵- پدیده چکه (Weeping)

در این حالت به علت سرعت کم گاز بخشی از مایع از درون منافذ سینی چکه می‌کند.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۶- پدیده بارش (Dumping)

در این پدیده به دلیل سرعت خیلی کم گاز بارش پیوسته مایع از درون منافذ اتفاق می‌افتد.

افت فشار در برج‌های سینی‌دار حدود 0.1Psi به ازای هر سینی است. در برج‌های سینی‌دار نسبت حداکثر به حداقل شدت جریان عبوری از سینی Turn down Ratio گفته می‌شود. این نسبت برای سینی‌های فنجان‌ی (Bubble Cap) در حدود (10 ~ 12) و برای سینی‌های دریچه‌ای (Valve Tray) در حدود (5 ~ 6) و برای سینی‌های مشبک (Sieve Tray) در حدود (2 ~ 3) است. هر چه این نسبت بزرگتر باشد انعطاف‌پذیری فرآیندی برج بالاتر است.
راندمان سینی مطابق معادله زیر بیان می‌شود:

$$E_{oG} = 1 - \exp\left[-\frac{k_y a h_L}{G'}\right] \quad (90)$$

که در معادله بالا a : سطح ویژه حباب‌ها، h_L : عمق مایع روی سینی و G' : شدت جریان ظاهری گاز (نسبت دبی گاز به سطح مقطع کل برج) است.

مطابق معادله فوق با افزایش سطح حباب‌ها و افزایش عمق مایع روی سینی، راندمان سینی افزایش می‌یابد. به طور کلی هر عاملی که زمان تماس با سطح تماس فازها را افزایش دهد موجب افزایش راندمان می‌شود.

نکته: راندمان مورفری تنها راندمانی است که می‌تواند از 100% بیشتر باشد. این امر به دلیل تعریف خاص راندمان مورفری است و به معنی انجام انتقال جرم فراتر از شرایط تعادلی نیست.

نوع ساده‌تری از راندمان به صورت نسبت عده سینی‌های تئوری به عده سینی‌های واقعی بیان می‌شود.

۵-۴- شستشودهنده وانتوری

در این دستگاه مایع پراکنده می‌شود کاربرد این دستگاه زمانی است که در فاز مایع جزء جامد داشته باشیم و علاوه بر وجود واکنش شیمیایی بین گاز و مایع افت فشار کم گاز هم مورد نظر باشد. (مثل حذف SO_2 از گازهای خروجی توسط دوغاب آهک، وقتی افت فشار کم گاز مورد نظر باشد)

۵-۵- برج‌های دیواره مرطوب

در این برج‌ها مایع به صورت فیلم از جداره برج جریان می‌یابد و در مرکز برج گاز جریان دارد. رابطه نرخ و شار تبادل جرم در این برج به صورت زیر است:

$$G_A = \bar{N}_A \cdot \pi D H \quad (91)$$

که D و H به ترتیب قطر و ارتفاع این برج می‌باشد.

در این برج‌ها سطح انتقال جرم به دقت قابل اندازه‌گیری است (مناسب فعالیت‌های تحقیقاتی) و افت فشار گاز نیز کم است. خنک‌سازی مایع در این برج از بقیه دستگاه‌های گاز مایع آسان‌تر است لذا مهم‌ترین کاربرد این دستگاه‌ها در فرآیندهای جذب گرم‌زای توأم با واکنش شیمیایی است (مثل جذب اسید کلریدریک) و مهم‌ترین مشکل این دستگاه‌ها توزیع یکنواخت مایع به صورت فیلم است.

یادداشت:

.....

۵-۶- برج‌های پاششی

در این دستگاه‌ها مهم‌ترین مشکل حفظ سطح انتقال جرم ایجاد شده توسط قطرات مایع در ارتفاع زیاد است. به همین دلیل در این دستگاه‌ها نمی‌توان به عده مراحل تئوری بالایی دست یافت. لذا این دستگاه‌ها برای فرآیندهایی مثل تقطیر و جذب و دفع که به مراحل تئوری بالایی نیاز دارند مناسب نیست.

مهم‌ترین کاربرد این دستگاه‌ها در فرآیند خشک کردن مواد غذایی و دارویی حساس به دماست. که این دستگاه‌ها به دلیل زمان اقامت کم دارای مزیت می‌باشند.

۵-۷- برج‌های پر شده

در این برج‌ها توسط پرکن‌های جامدی که درون برج قرار گرفته‌اند سطح تماس بالای مایع و گاز ایجاد می‌شود. مایع سطح پرکن‌ها را مرطوب نموده و به صورت فیلم نازکی شکل پرکن را به خود می‌گیرد. سطح ویژه پرکن‌ها از معادله زیر به دست می‌آید:

$$a = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_p} \quad (92)$$

در معادله بالا ε : تخلخل بستر و d_p : قطر پرکن‌ها می‌باشد. پرکن‌ها دارای شکل‌های مختلفی همانند حلقه‌های راشیگ، لسینگ، زین اسی و پال می‌باشند. حلقه‌های راشیگ ساده‌ترین پرکن‌ها هستند و کم‌ترین سطح ویژه را در مقایسه با سایر پرکن‌ها دارند.

نکته: در جذب و دفع و تقطیر، جنس پرکن باید به گونه‌ای باشد که سطح آن به خوبی توسط فاز پراکنده (مایع) مرطوب شود. اما در استخراج که هر دو فاز مایع هستند سطح پرکن باید به گونه‌ای باشد که به خوبی توسط فاز پیوسته مرطوب شود.

پرکن‌ها به دو صورت تصادفی و منظم می‌توانند در برج نصب شوند. در چیدمان منظم پرکن‌ها افت فشار کمتر بوده ولی هزینه‌های نصب پرکن بیشتر است. در برج‌ها برای جلوگیری از کانالیز شدن جریان و توزیع مناسب مایع روی سطح پرکن‌ها از توزیع‌کننده‌های مایع باید استفاده شود. به ازای هر 6 الی 7 متر ارتفاع برج توزیع مجدد مایع باید انجام شود. برای پیش‌گیری از کانالیزه شدن جریان و کشیده شدن جریان مایع به سمت دیواره‌ها لازم است قطر پرکن‌ها حداقل از $\frac{1}{8}$ قطر برج کمتر باشد. هر چند در عمل توصیه می‌شود قطر پرکن‌ها بین $\frac{1}{10}$ تا $\frac{1}{15}$ قطر برج باشد.

نکته: برای بازیابی قطرات مایع همراه گاز در برج‌های پر شده، معمولاً از یک بستر خشک به ارتفاع حدود یک متر در بالای محل ورود مایع استفاده می‌شود.

افت فشار در بسترهای پر شده حدود $200 \sim 400 \frac{\text{pa}}{\text{m}}$ برای برج‌های جذب و دفع و حدود $400 \sim 600 \frac{\text{pa}}{\text{m}}$ برای برج‌های تقطیر اتمسفریک می‌باشد. در فرآیندهای تحت خلاء این افت فشار به حدود $40 \sim 8 \frac{\text{pa}}{\text{m}}$ می‌رسد که مقدار بسیار کوچکی است به همین دلیل این برج‌ها برای فرآیندهای تحت خلاء توصیه می‌شوند.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

در برج‌های پر شده موجودی مایع درون بستر (Liquid Hold Up) به دو صورت موجودی مایع ساکن (Static Liquid Hold Up) و موجودی مایع متحرک (Dynamic Liquid Hold Up) می‌باشد.

$$\Phi_{Lt} = \Phi_{Ls} + \Phi_{Lo} \quad (93)$$

Φ_{Ls} ، Φ_{Lo} و Φ_{Lt} به ترتیب موجودی مایع کلی، ساکن و دینامیک بستر است.

نکته: در فرآیندهایی که مقاومت در هر دو فاز مایع و گاز توزیع شده (مثل جذب و دفع و تقطیر) باید موجودی مایع ساکن برج به حداقل رسانده شود. این کار با چیدمان منظم پرکن‌ها و کار در ناحیه Loading امکان‌پذیر است. اما در فرآیندهایی که مقاومتی در فاز مایع وجود ندارد (مثل تبخیر یا میعان مایع خالص به درون گاز) استاتیکی یا دینامیکی بودن موجودی مایع اهمیتی ندارد.

۸-۱- مقایسه برج‌های پر شده و سینی‌دار

- ۱- افت فشار در برج پر شده کمتر از برج‌های سینی‌دار است.
- ۲- موجودی مایع در برج‌های سینی‌دار بیشتر از برج‌های پر شده است.
- ۳- $\frac{L}{G}$ در سینی‌دار کمتر از پر شده است.
- ۴- خنک‌سازی مایع در سینی‌دار بهتر از پر شده انجام می‌شود اما دیواره مرطوب از هر دوی اینها بهتر است.
- ۵- گرفتن جریان جانبی در سینی‌دار آسانتر از پر شده انجام می‌شود.
- ۶- برج‌های پر شده برای محلول‌های کف‌زا مناسب‌تر هستند.
- ۷- در صورتی که جزء جامد در فاز مایع حضور داشته باشد هیچکدام از این برج‌ها مناسب نیستند.
- ۸- تمیز کردن برج‌های سینی‌دار آسانتر از پر شده است.
- ۹- در برج‌هایی که نوسانات شدید دمایی وجود داشته باشد پرکن‌های سرامیکی، گرافیتی یا پلاستیکی شکسته می‌شوند یا تغییر شکل می‌دهند. لذا در این حالت مناسب است از برج سینی‌دار یا برج پر شده با پرکن فلزی استفاده شود.
- ۱۰- برای سیالات خورنده برج پر شده مناسب‌تر است.
- ۱۱- وزن برج پر شده کمتر از سینی‌دار است.
- ۱۲- در صورتی که پرکن‌های مورد استفاده از شکل‌های خیلی خاص نباشند هزینه برج‌های پر شده کمتر از سینی‌دار است.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

بخش دوم

عملیات واحد ۱

۶- فرآیند جذب و دفع گازی

انتقال یک جزء از گاز به مایع را جذب (Absorption) می‌گویند. انتقال یک جزء از مایع به گاز دفع (Stripping) نامیده می‌شود.

نکته : جذب در دمای پایین و فشار بالا بهتر انجام می‌شود در حالی که دفع در دمای بالا و فشار پایین بهتر انجام می‌شود.

جذب فرآیندی گرمازاست در حالی که دفع فرآیندی گرماگیر است. در برج جذب اگر خنک‌سازی مایع انجام نشود از بالا به پایین برج دما افزایش می‌یابد و لذا نیروی محرکه انتقال جرم کاهش می‌یابد. از این رو سرعت انتقال جرم در پایین برج به علت نزدیک شدن خطوط تعادل و تبادل به هم، کم می‌شود. به همین دلیل عده سینی‌ها و ارتفاع یک برج جذب غیر همدمما بیشتر از یک برج جذب همدمماست.

نکته : الگوی تماس ناهمسو بهترین الگوی جریان در فرآیندهای جذب و دفع است. اما اگر جذب توأم با واکنش سریع باشد فرآیند همسو ارجح به فرآیند ناهمسو است.

۶-۱- محاسبه ارتفاع برج‌های جذب و دفع دیفرانسیلی

$$Z = H_{tG} \cdot N_{tG} \quad (94)$$

$$H_{tG} = \frac{G'}{F_G \cdot a} \quad (95)$$

$$N_{tG} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{(1-y)_{iM}}{(1-y)(y-y_i)} dy \quad (96)$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

$$\approx \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y-y_i} + \frac{1}{2} \text{Ln} \frac{1-y_2}{1-y_1}$$

$$\approx \frac{y_1 - y_2}{(y - y_i)_M}$$

در معادلات فوق H_{tG} : ارتفاع معادل یک واحد تئوری (یا HETP) است و N_{tG} : عدد واحدهای انتقال است و Z : ارتفاع برج دیفرانسیلی است.

نکته: هر چه سطح ویژه پرکن بیشتر باشد HETP (ارتفاع معادل یک واحد تئوری) آن کوچکتر خواهد بود. حلقه‌های راشیگ دارای بزرگ‌ترین مقدار HETP بین همه پرکن‌ها هستند چون کمترین سطح ویژه را دارند.

عدد واحدهای انتقال (N_{tG}) به فاکتور جذب (نسبت شیب خط‌کار به شیب خط تعادل) و میزان جداسازی موردنظر ($y_1 - y_2$) دارد. در معادلات فوق y_1 و y_2 به ترتیب کسر مولی جزء منتقل شونده در ورودی و خروجی دستگاه است.

نکته: در یک برج جذب توأم با واکنش شیمیایی سریع که در آن گاز با کسر مولی y_a وارد و با کسر مولی y_b خارج می‌شود عدد واحدهای انتقال به صورت زیر قابل محاسبه است (غلظت در فصل مشترک گاز و مایع به علت واکنش سریع صفر فرض می‌شود).

$$N_{tG} = \frac{(y_a - y_b)}{(y_a - 0) - (y_b - 0)} = \text{Ln} \left(\frac{y_a}{y_b} \right) \quad (97)$$

$$\text{Ln} \frac{y_a - 0}{y_b - 0}$$

معادله (۹۴) در صورت استفاده از ضرائب انتقال جرم فاز مایع یا ضرائب کلی انتقال جرم به صورت‌های زیر هم قابل بازنویسی است:

$$Z = H_{tL} \cdot N_{tL} \quad , \quad H_{tL} = \frac{L'}{F_L \cdot a} \quad (98)$$

$$Z = H_{tOG} \cdot N_{tOG} \quad , \quad H_{tOG} = \frac{G'}{F_{OG} \cdot a} \quad (99)$$

$$Z = H_{tOL} \cdot N_{tOL} \quad , \quad H_{tOL} = \frac{L'}{F_{OL} \cdot a} \quad (100)$$

در برج‌های پر شده HETP (یا H_{tG} یا H_{tL} ...) ارتفاعی از برج پر شده است که در آن جداسازی معادل یک واحد تئوری انجام می‌شود. شار انتقال جرم در یک مقطع خاص از یک برج دیفرانسیلی به صورت زیر قابل بیان است:

$$N_A = \mp \frac{d(Gy)}{A \cdot adZ} = \mp \frac{d(G'y)}{adZ} = \mp \frac{G'dy}{(1-y)adZ} \quad (101)$$

در معادله بالا G : شدت جریان گاز، G' : شدت جریان ظاهری گاز $\left(G' = \frac{G}{A} \right)$ ، A : سطح مقطع برج، a : سطح ویژه و y : کسر مولی جزء منتقل شونده در گاز است.

علامت (-) یا (+) در معادله بالا به ترتیب برای جذب و دفع استفاده می‌شود.

یادداشت:

.....

۷- تقطیر

در تقطیر جداسازی براساس اختلاف نقاط جوش اجزاء انجام می‌شود. تقطیر در دسته فرآیندهای مستقیم قرار می‌گیرد چرا که برای جداسازی اجزاء صرفاً از گرفتن و دادن گرما استفاده می‌شود.

۷-۱- تعادلات بخار مایع در تقطیر

برای محلول‌های ایده‌آل که فاز مایع آنها از قانون راولت پیروی می‌کند می‌توان نوشت:

$$P_A = x_A P_A^{\text{sat}} \quad (102)$$

$$P_B = x_B P_B^{\text{sat}} \quad (103)$$

$$P_t = P_A + P_B \quad (104)$$

در معادلات بالا P_A و P_B فشار بخار A و B در محلول هستند و P_A^{sat} و P_B^{sat} فشار بخار A و B به صورت خالص می‌باشد. از معادلات فوق داریم:

$$x_A = \frac{P_t - P_B^{\text{sat}}}{P_A^{\text{sat}} - P_B^{\text{sat}}} \quad (105)$$

برای محلول‌های ایده‌آل با فرض آنکه فاز بخار هم از قانون گازهای ایده‌آل پیروی کند (قانون دالتون) می‌توان نوشت:

$$y_A = \frac{P_A}{P_t} = \frac{x_A P_A^{\text{sat}}}{P_t} \quad (106)$$

$$y_B = \frac{P_B}{P_t} = \frac{x_B P_B^{\text{sat}}}{P_t} \quad (107)$$

روابط تعادلی بخار - مایع به کمک k-value ها هم قابل نوشتن است:

$$k_A = \frac{y_A}{x_A} \quad (108)$$

$$k_B = \frac{y_B}{x_B} \quad (109)$$

$$y_A + y_B = 1 \quad (110)$$

$$x_A = \frac{1 - k_B}{k_A - k_B} \quad (111)$$

برای محلول‌های ایده‌آل:

$$k_A = \frac{x_A P_A^{\text{sat}} / P_t}{x_A} = \frac{P_A^{\text{sat}}}{P_t} \quad (112)$$

با توجه به معادله بالا k-value تابعی است از دما (رابطه مستقیم) و فشار (رابطه عکس) و نوع ماده. هر چه k یک ماده بیشتر باشد آن ماده فرارتر است. روابط تعادلی بخار مایع بر حسب ضریب فراریت نسبی (α_{AB}) هم قابل بیان است:

$$\alpha_{AB} = \frac{\left(\frac{y_A}{y_B}\right)}{\left(\frac{x_A}{x_B}\right)} \quad (113)$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

برای محلول‌های ایده‌آل:

$$\alpha_{AB} = \frac{P_A^{sat}}{P_B^{sat}} \quad (114)$$

در صورتی که α ثابت باشد معادله منحنی تعادل به صورت زیر قابل ارائه است:

$$y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x} \quad (115)$$

هم‌چنین α معیاری است برای تعیین درجه دشواری یا سهولت جداسازی به کمک تقطیر:

$\alpha < 1.1$	تقطیر ممکن نیست
$1.1 < \alpha < 3.5$	تقطیر دشوار است
$3.5 < \alpha < 10$	تقطیر آسان است
$10 < \alpha$	تبخیر

۷-۲- محاسبه دمای حباب و شبنم

اگر مایعی با غلظت Z_F (از جزء فرار) حرارت داده شود در دمای حباب (Bubble Point) اولین حباب بخار ظاهر می‌شود. این بخار در تعادل با مایعی با غلظت Z_F است لذا در نقطه حباب می‌توان نوشت:

$$\sum Z_{iF} k_i = 1 \quad (116)$$

Z_{iF} : کسر مولی جزء i در خوراک اولیه است. در صورتی که محلول ایده‌آل باشد می‌توان نوشت:

$$\sum Z_{iF} \frac{P_i^{sat}}{P_t} = 1 \quad (117)$$

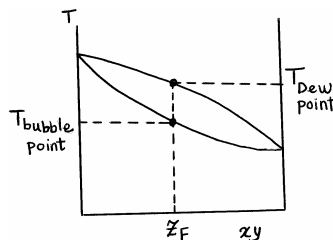
دمای شبنم دمایی است که اگر خوراکی را سرد کنیم در این دما اولین قطره مایع حاصل می‌شود. اگر کسر مولی جزء فرار در خوراک Z_F باشد اولین قطره مایع حاصله در تعادل با این بخار با غلظت Z_F خواهد بود. در نقطه شبنم می‌توان نوشت:

$$\sum \frac{Z_{iF}}{k_i} = 1 \quad (118)$$

در صورتی که محلول ایده‌آل باشد می‌توان نوشت:

$$\sum \frac{Z_{iF}}{\frac{P_i^{sat}}{P_t}} = 1 \quad (119)$$

در شکل زیر دمای حباب و دمای شبنم به صورت شماتیک نشان داده شده است.



یادداشت:

.....

.....

.....

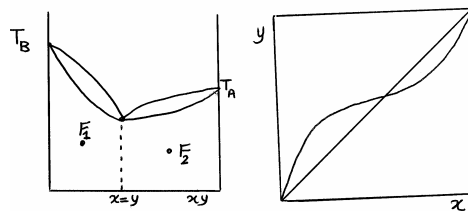
.....

همان طور که از نمودار فوق ملاحظه می‌شود، دمای جوش محلول بین دمای حباب و دمای شبنم است. با توجه به شکل فوق و نیز معادلات (۱۱۶) و (۱۱۸) می‌توان نوشت:

- مخلوط به صورت مایع سرد است. اگر $\sum Z_{iF}k_i < 1$
- مخلوط در دمای حباب است. اگر $\sum Z_{iF}k_i = 1$
- مخلوط دو فازی است. اگر $\sum Z_{iF}k_i > 1$ & $\sum \frac{Z_{iF}}{k_i} > 1$
- مخلوط در دمای شبنم است. اگر $\sum \frac{Z_{iF}}{k_i} = 1$
- مخلوط به صورت سوپرهیت است. اگر $\sum \frac{Z_{iF}}{k_i} < 1$

۳-۷- بررسی تقطیر در سیستم‌های آزنوتروپی

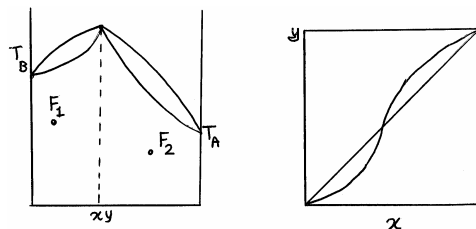
محلول آزنوتروپی رفتاری همانند ماده خالص دارد و به جای محدود جوش دارای نقطه جوش است. در شکل زیر دیاگرام‌های xy و $T-xy$ سیستم دارای آزنوتروپ می‌نیمم جوش (ماکزیمم فشار) نشان داده شده است:



با توجه به شکل فوق محلول آزنوتروپی دارای کمترین نقطه جوش است. هم‌چنین اگر خوراک دارای غلظتی کمتر از محلول آزنوتروپی باشد (F_1) محصولات بالا و پایین برج به ترتیب محلول آزنوتروپی و محلول غنی از B خواهد بود. اگر خوراک دارای غلظتی بیش از غلظت محلول آزنوتروپی باشد (F_2) محصولات بالاسری و پایین سری این برج به ترتیب محلول آزنوتروپی و محلول غنی از A خواهد بود. اگر خوراک دارای غلظتی دقیقاً برابر غلظت محلول آزنوتروپی باشد تقطیر انجام‌پذیر نخواهد بود.

سیستم اتانول و آب یک مثال از سیستم‌های آزنوتروپ از نوع می‌نیمم جوش است که در فشار اتمسفری در غلظت $x = y = 0.9$ (مولی) دارای آزنوتروپ است. بنابراین اگر خوراکی از آب و الکل دارای غلظتی بیش از 90 درصد مولی الکل باشد (مثلاً $Z_F = 0.96$) محصولات این برج به ترتیب محلول آزنوتروپ 90 درصد الکل و 10 درصد آب در بالای برج و محصول غنی از الکل در پایین برج (الکل تقریباً خالص) خواهد بود.

در شکل‌های زیر دیاگرام‌های xy و $T-xy$ سیستم آزنوتروپ ماکزیمم جوش (می‌نیمم فشار) نشان داده شده است.



یادداشت:

.....

.....

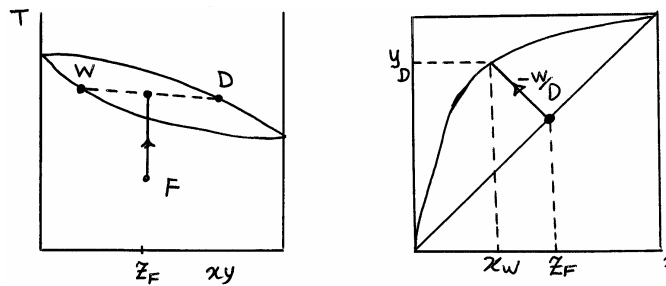
.....

.....

در سیستم فوق اگر خوراک در موقعیت F_1 باشد محصولات بالا و پایین برج به ترتیب محصول غنی از B و محلول آزنوتروپی خواهد بود. و در صورتی که خوراک در موقعیت F_2 باشد محصولات برج به ترتیب محصول غنی از A (در بالای برج) و محلول آزنوتروپی (در پایین برج) خواهد بود.

۷-۴- تقطیر ناگهانی (Flash)

در شکل‌های زیر مسیر تحول Flash در دیاگرام‌های xy و $T-xy$ نشان داده شده است.



موازنه جرم و انرژی برای یک واحد Flash منجر به معادله خط کار به صورت زیر می‌شود:

$$-\frac{W}{D} = \frac{y_D - Z_F}{x_w - Z_F} = \frac{H_D - \left(H_F + \frac{Q}{F}\right)}{H_w - \left(H_F + \frac{Q}{F}\right)} \quad (120)$$

با توجه به شکل‌های فوق می‌توان گفت:

$$T_{\text{bubble point}} < T_{\text{Flash}} < T_{\text{Dew Point}} \quad (\text{دمای شبنم خوراک}) \quad (121)$$

$$Z_F < y_D < y_M \quad (122)$$

$$x_N < x_w < Z_F \quad (123)$$

y_M : غلظت بخار در تعادل با Z_F است یعنی زمانی که دمای Flash برابر دمای حباب خوراک است $\left(\frac{W}{D} = \infty\right)$. x_N : غلظت مایع در

تعادل با Z_F است. یعنی زمانی که دمای Flash برابر دمای شبنم خوراک است $\left(\frac{W}{D} = 0\right)$. y_M و x_N با توجه به معادله منحنی تعادل

به یکی از صورت‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$y_M = kZ_F \quad \text{یا} \quad y_M = \frac{\alpha Z_F}{1 + (\alpha - 1)Z_F} \quad (124)$$

$$x_N = \frac{Z_F}{k} \quad \text{یا} \quad x_N = \frac{Z_F}{(1 - \alpha)Z_F + \alpha} \quad (125)$$

بنابراین خالص‌ترین بخار در دمای حباب و رقیق‌ترین مایع در دمای شبنم حاصل می‌شود.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۵-۷- تقطیر دیفرانسیلی

اگر F مول از خوراکی با غلظت Z_F وارد یک واحد تقطیر دیفرانسیلی شود تا در انتهای کار W مول مایع در ظرف تقطیر باقی بماند (با غلظت x_w) نتیجه موازنه جرم برای این سیستم در قالب معادله ریله به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\int_F^W \frac{dL}{L} = \int_{Z_F}^{x_w} \frac{dx}{y-x} \quad (126)$$

در صورتی که معادله منحنی تعادل به صورت $y = kx$ باشد حاصل انتگرال فوق به صورت زیر در خواهد آمد:

$$L_n \frac{F}{w} = \frac{1}{k-1} L_n \frac{Z_F}{x_w} \quad (127)$$

و اگر معادله منحنی تعادل به صورت $y = \frac{\alpha x}{1+(\alpha-1)x}$ باشد:

$$\log \frac{FZ_F}{Wx_w} = \alpha \log \frac{F(1-Z_F)}{W(1-x_w)} \quad (128)$$

معادله (128) به صورت زیر و در قالب نسبت مول‌های A و B در خوراک و در ظرف تقطیر نیز قابل ارائه است:

$$\frac{n_{AF}}{n_{AW}} = \left(\frac{n_{BF}}{n_{BW}} \right)^\alpha \quad (129)$$

n_{AF} و n_{AW} عده مول‌های A در خوراک و در ظرف تقطیر است.

غلظت جزء فرار در ظرف جمع‌آوری محصول ($y_{D,av}$) از معادلات زیر به دست می‌آید:

$$F = D + W \quad (130)$$

$$FZ_F = Dy_{D,av} + Wx_w \quad (131)$$

با در نظر گرفتن این نکته که:

$$\frac{\alpha x_w}{1+(\alpha-1)x_w} < y_{D,av} < \frac{\alpha Z_F}{1+(\alpha-1)Z_F} \quad (132)$$

در میعان دیفرانسیلی معادله ریله به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\int_F^D \frac{dv}{v} = \int_{Z_F}^{y_D} \frac{dy}{x-y} \quad (133)$$

۶-۷- تقطیر پیوسته

در شکل زیر شماتیک یک واحد تقطیر پیوسته نشان داده شده است. این واحد مجهز به کندانسور و ریبولر می‌باشد.

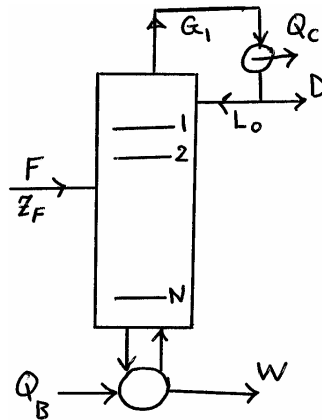
یادداشت:

.....

.....

.....

.....



در کندانسور بخارات خروجی از بالای برج تبدیل به مایع شده و بخشی از آن به عنوان جریان برگشتی (Reflux) به داخل برج بازگردانده می‌شود. این جریان وظیفه تأمین دائمی جریان مایع در برج را به عهده دارد. نسبت دبی مایع برگشتی به برج (L_0) به دبی محصول بالای (D)، نسبت جریان برگشتی $\left(R = \frac{L_0}{D}\right)$ نامیده می‌شود. قسمت فوقانی برج تقطیر مثل یک برج جذب عمل می‌کند که در آن اجزاء غیر فراری که فرصت حضور در بالای برج را یافته‌اند به درون مایع برگشتی (که دارای دمای پایین تری است) جذب می‌شوند. در برج‌های تقطیر پیوسته وظیفه تأمین دائمی بخار در برج برعهده ریپویلر است.

۷-۶-۱- انواع کندانسورها و محاسبه بار حرارتی آن

برج‌های تقطیر دارای دو نوع کندانسور هستند: کندانسور کامل و کندانسور پارشیال. در کندانسور کامل تمام بخار ورودی به کندانسور (G_1) به مایع تبدیل می‌شود. در این کندانسور مایع خروجی از کندانسور در دمای حباب خارج می‌شود:

$$T_{L_0} = T_D = \text{Bubble point at } x_D \quad (134)$$

$$y_1 = x_0 = x_D \quad (135)$$

بار حرارتی کندانسور کامل از معادله زیر به دست می‌آید:

$$Q_c = (R + 1)D(H_{G_1} - H_{L_0}) \quad (136)$$

در کندانسور کامل $H_D = H_{L_0}$ است و این کندانسور به عنوان یک مرحله تعادلی محسوب نمی‌شود.

در کندانسور پارشیال بخشی از بخار ورودی به کندانسور به مایع تبدیل می‌شود. در واقع کندانسور همانند یک واحد میعان ناگهانی (Flash) عمل می‌کند که در آن بخار G_1 با از دست دادن گرما به صورت دو فازی درآمد که بخش مایع آن (L_0) به درون برج بازگردانده می‌شود و بخش بخار آن (D) به عنوان محصول بالای برج محسوب می‌شود. در این کندانسور:

$$-\frac{L_0}{D} = \frac{y_D - y_1}{x_0 - y_1} \quad (\text{مشابه Flash}) \quad (137)$$

یادداشت:

.....

.....

.....

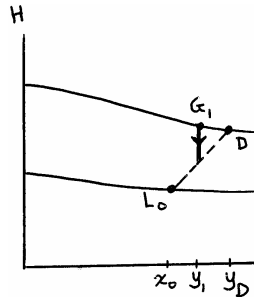
.....

$$T_{L_o} = T_D = \text{Dew Point at } y_D \quad (138)$$

$$H_{L_o} \neq H_D, H_D \approx H_{G_1} \quad (139)$$

$$Q_c = RD(H_{G_1} - H_{L_o}) \quad (140)$$

در شکل زیر مسیر تحول کندانسور پارشیال در صفحه H-xy نشان داده شده است:



همانگونه که ملاحظه می شود کندانسور پارشیال به عنوان یک مرحله تعادلی در محاسبات تقطیر محسوب می شود.

۲-۶-۷- محاسبه بار حرارتی ریویلر

بار حرارتی ریویلر با نوشتن موازنه انرژی برای کل برج به دست می آید:

$$Q_B = DH_D + Q_c + WH_w - FH_F \quad (141)$$

ریویلرها به عنوان یک واحد تعادلی در محاسبات تقطیر محسوب می شوند. البته ریویلر از نوع ترموسیفون از این قاعده مستثنی بوده و به عنوان یک مرحله تعادلی محسوب نمی شود.

۲-۶-۷- روش پونچون- ساواریت

در این روش از دیاگرام های H-xy استفاده می شود. در این روش با نوشتن موازنه های جرم و انرژی برای بالا و پایین برج، مختصات نقاط تفاضل در بالا و پایین خوراک به صورت زیر به دست می آید:

$$\Delta D \begin{cases} x_{\Delta D} = x_D \\ H_{\Delta D} = H_D + \frac{Q_c}{D} \end{cases} \quad (142)$$

$$\Delta W \begin{cases} x_{\Delta W} = x_w \\ H_{\Delta W} = H_w - \frac{Q_B}{W} \end{cases} \quad (143)$$

نقاط F و ΔD و ΔW در صفحه H-xy بر یک استقامتند. رسم خطوط کار در بالای برج به کمک ΔD انجام می شود با رسم خطوط کار و خطوط Tie-Line در روش پونچون عده سینی های تئوری برج و نیز شماره سینی خوراک به دست می آید (مراجعه به کتاب تریبال برای جزئیات بیشتر). هم چنین از روش پونچون و به کمک قانون اهرم شدت جریان های مایع و بخار در سینی های مختلف برج قابل محاسبه است. از آنجایی که نقاط L_n و G_{n+1} در صفحه H-xy بر یک استقامتند لذا با در نظر گرفتن ΔD به عنوان تکیه گاه و استفاده از قانون اهرم می توان نوشت:

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

$$\frac{L_n}{G_{n+1}} = \frac{G_{n+1}\Delta D}{L_n\Delta D} \quad (144)$$

سمت راست معادله فوق نشان‌دهنده نسبت طول پاره‌خط واصل بین G_{n+1} و ΔD به طول پاره‌خط واصل بین L_n و ΔD است.

۷-۶-۳- محاسبه حداقل تعداد سینی‌های تئوری

در حالتی که نسبت جریان برگشتی در برج برابر بی‌نهایت باشد ($R = \infty$) (حالتی که به آن رفلکس کامل هم گفته می‌شود) عده سینی‌های برج حداقل است. در این حالت در روش پونچون نقاط تفاضل برج در $+\infty$ و $-\infty$ قرار می‌گیرند و لذا خطوط کار برج یک دسته خطوط قائم هستند (در صفحه $H-xy$).

معادله Fenske با فرض یک ضریب فرارایت ثابت در طول برج به صورت زیر حداقل عده سینی‌های تئوری برج را محاسبه می‌کند:

$$N_{\min} + 1 = \log \left[\frac{\frac{x_D}{1-x_D} \cdot \frac{1-x_W}{x_W}}{\log \alpha_{av}} \right] \quad (145)$$

در معادله بالا α_{av} متوسط هندسی α در بالا و پایین برج است:

$$\alpha_{av} = \sqrt{\alpha_{\text{top}} \cdot \alpha_{\text{bot}}} \quad (146)$$

همانگونه که از معادله بالا ملاحظه می‌شود N_{\min} فقط تابع x_D ، x_W و α است.

نکته: حداقل عده سینی‌های تئوری برج مستقل از مشخصات خوراک ورودی به برج است.

۷-۶-۴- محاسبه حداقل نسبت جریان برگشتی

در روش پونچون وقتی خط کار و خط Tie بر هم منطبق شوند عده سینی‌های تئوری بی‌نهایت خواهد شد ($N = \infty$). در این حالت نسبت جریان برگشتی در حداقل مقدار خود است (R_{\min}).

لذا برای محاسبه R_{\min} ، خط Tie عبوری از خوراک رسم شده و تلاقی آن با امتداد قائم x_D به دست می‌آید (نقطه ΔD_{\min}). با محاسبه $H_{\Delta D_{\min}}$ از روی شکل و به کمک رابطه مربوط به $H_{\Delta D}$ مقدار R_{\min} از معادله زیر به دست می‌آید:

$$H_{\Delta D_{\min}} = H_D + (R_{\min} + 1)(H_{G_1} - H_{L_0}) \quad (147)$$

در کندانسور کامل با توجه به اینکه $H_D = H_{L_0}$ است:

$$R_{\min} = \frac{H_{\Delta D_{\min}} - H_{G_1}}{H_{G_1} - H_{L_0}} \quad (148)$$

نسبت بهینه جریان برگشتی برج (R_{opt}) از معادله Gilland به دست می‌آید:

$$R_{\text{opt}} = (1.2 \sim 1.5) R_{\min} \quad (149)$$

یادداشت:

.....

نکته : R_{min} برای خوراکی که به صورت مایع سرد است کمترین مقدار و برای خوراکی که به صورت سوپرهیت است بیشترین مقدار را دارد.

نکته : در حالت R_{min} به دلیل تلاقی خط کار و خط تعادل در تعدادی از سینی‌های پشت سر هم در درون برج غلظت‌ها و دماها بدون تغییر می‌ماند که به دلیل توقف انتقال جرم است.

نکته : R_{min} همیشه به کمک Tie-Line عبوری از خوراک به دست نمی‌آید بلکه Tie-Line ای برای محاسبه R_{min} به کار می‌رود که ΔD آن از همه بالاتر و ΔW آن از همه پایین‌تر است.

نکته : R_{min} بزرگترین رفلاکسی است که عده سینی‌ها برج را برابر بی‌نهایت کند.

۷-۶-۵- اثر ازدیاد R بر عملکرد برج

افزایش نسبت جریان برگشتی برج در مرحله طراحی باعث می‌شود که:

- ۱- عده سینی‌های برج کاهش یابد و لذا ارتفاع برج کم شود.
 - ۲- دبی مایع و بخار در برج زیاد شود ($G_1 = (R+1)D$, $L_0 = RD$) و لذا قطر برج زیاد شود.
 - ۳- بار حرارتی کندانسور و ریویولر و لذا سطح حرارتی کندانسور و ریویولر زیاد شود.
- در یک برج در حال کار افزایش R موجب افزایش خلوص محصولات برج می‌شود.

۷-۶-۶- پدیده Cold Reflux

اگر مایع خروجی از کندانسور Subcool باشد، در این صورت این مایع در اولین سینی (در ورود به برج) با تبدیل بخشی از بخارات به مایع، به حالت مایع اشباع بر می‌گردد. مقدار مایعی که در اثر کندانس بخار حاصل می‌شود از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\Delta L = \frac{L_0 \Delta H}{\lambda} = \frac{L_0 C_p \Delta T}{\lambda} \quad (150)$$

ΔL : مایع حاصل از میعان بخار و λ : گرمای نهان تبخیر است.

با کندانس بخشی از بخار، دبی مایع در سینی‌های زیرین افزایش می‌یابد و لذا رفلاکس ظاهری ($R' = \frac{L}{D}$) زیاد می‌شود:

$$R' = \frac{L}{D} = \frac{L_0 + \Delta L}{D} = R \left[1 + \frac{C_p \Delta T}{\lambda} \right] > R \quad (151)$$

با توجه به معادله بالا می‌توان گفت اثرات Cold Reflux مشابه اثرات ازدیاد رفلاکس بر عملکرد برج است که در بخش (۷-۶-۵) مورد بررسی قرار گرفت.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۷-۶-۷- برج‌های دو خوراکه و برج‌های با جریان جانبی و برج‌های Open Steam

اگر برج از بالا به پایین دارای دو خوراک F_1 و F_2 باشد این برج دارای سه نقطه تفاضل است: ΔD (در بالای F_1)، ΔM (بین F_1 و F_2) و ΔW (پایین F_2). مشخصات نقاط ΔD و ΔW مشابه معادلات (۱۴۲) و (۱۴۳) است. اما ΔM با نوشتن موازنه جرم و انرژی به کمک بالا یا پایین برج به یکی از صورت‌های زیر به دست می‌آید:

$$\Delta M \begin{cases} x_{\Delta M} = \frac{Dx_D - F_1 Z_{F1}}{D - F_1} \\ H_{\Delta M} = \frac{DH_D + Q_c - F_1 H_{F1}}{D - F_1} \end{cases} \quad (152)$$

$$\Delta M \begin{cases} x_{\Delta M} = \frac{F_2 Z_{F2} - W x_w}{F_2 - W} \\ H_{\Delta M} = \frac{F_2 H_{F2} + Q_B - W H_w}{F_2 - W} \end{cases} \quad (153)$$

ΔM به دست آمده از هر دو معادله فوق به لحاظ عددی یکسان است. در برج دو خوراکه نقاط F_1 و ΔD و ΔM بر یک استقامتند. همچنین نقاط F_2 و ΔM و ΔW نیز بر یک استقامت خواهند بود.

اگر برج دارای جریان جانبی (S) در بالاتر از محل ورود خوراک باشد علاوه بر نقاط تفاضل ΔD و ΔW در بالا و پایین برج، یک نقطه تفاضل هم بین S و F داریم.

$$\Delta M \begin{cases} x_{\Delta M} = \frac{Dx_D + Sx_s}{D + S} \\ H_{\Delta M} = \frac{DH_D + Q_c + SH_s}{D + S} \end{cases} \quad (154)$$

اگر در یک برج آب جزء سنگین باشد می‌توان ریبولر را حذف نموده و از تزریق مستقیم بخار به درون برج استفاده کرد. در این حالت نقطه تفاضل پایین خوراک به صورت زیر تغییر خواهد کرد.

$$\Delta W \begin{cases} x_{\Delta W} = \frac{Wx_w}{W - S} \\ H_{\Delta W} = \frac{WH_w - SH_s}{W - S} \end{cases} \quad (155)$$

در معادله بالا S شدت جریان بخار (Steam) ورودی به برج است. در این برج نقاط S و W و ΔW بر یک استقامتند. همینطور نقاط F و ΔD و ΔW بر یک استقامتند.

۷-۶-۸- روش مک کیب

در این روش منحنی‌های $H_L - x$ و $H_G - y$ به صورت دو خط موازی فرض می‌شوند. در این روش دبی‌های مولی مایع و بخار در هر ناحیه از برج مقدار ثابتی است (به عبارتی $N_A + N_B = 0$). در بخش بالای خوراک L و G دبی‌های مایع و بخار هستند که به ترتیب برابر RD و $(R+1)D$ هستند. با نوشتن موازنه جرم برای بخش بالای خوراک، معادله خط کار این ناحیه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_D}{R+1} \quad (156)$$

یادداشت:

.....

این خط از نقطه‌ای به مختصات (x_D, x_D) روی خط 45° می‌گذرد. در این روش دی‌های مایع و بخار در پایین خوراک به ترتیب \bar{L} و \bar{G} فرض می‌شود. با نوشتن بیلان جرم برای بخش پایین خوراک، معادله خط کار این ناحیه به دست می‌آید.

$$y = \frac{\bar{L}}{\bar{G}}x - \frac{Wx_w}{\bar{G}} \quad (157)$$

خط کار این ناحیه از نقطه‌ای به مختصات (x_w, x_w) روی خط 45° می‌گذرد.

خطوط کار بالا و پایین خوراک در سینی خوراک با هم تلاقی می‌کنند. با نوشتن موازنه جرم برای سینی خوراک خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \bar{L} &= L + qF \\ \bar{G} &= G + (q-1)F \end{aligned} \quad (158)$$

در معادله بالا q کسری از خوراک است که به صورت مایع اشباع وارد برج می‌شود. معادله خط خوراک از نوشتن بیلان جرم جزئی در سینی خوراک به دست می‌آید:

$$y = \frac{q}{q-1}x - \frac{Z_F}{q-1} \quad (159)$$

که از نقطه‌ای به مختصات (Z_F, Z_F) روی خط 45° می‌گذرد. با نوشتن موازنه انرژی برای سینی خوراک به تعریف جدیدی برای q دست خواهیم یافت:

$$q = \frac{H_G - H_F}{H_G - H_L} = \frac{\text{انرژی لازم برای تبدیل خوراک به بخار اشباع}}{\text{گرمای نهان تبخیر}} \quad (160)$$

مطابق تعریف فوق برای حالات مختلف خوراک خواهیم داشت:

حالت خوراک	H_F	$q = \frac{H_G - H_F}{H_G - H_L}$	شیب خط خوراک = $\frac{q}{q-1}$
مایع سرد	$H_F < H_L$	$q > 1$	$1 < \frac{q}{q-1} < \infty$
مایع اشباع	$H_F = H_L$	$q = 1$	∞
دوفازی	$H_L < H_F < H_G$	$0 < q < 1$	شیب منفی است و $0 < \left \frac{q}{q-1} \right < \infty$
بخار اشباع	$H_F = H_G$	$q = 0$	0
بخار سوپرهیت	$H_F > H_G$	$q < 0$	$0 < \frac{q}{q-1} < 1$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

برای حالات مایع سرد و بخار سوپر هیت q از معادلات زیر به دست می‌آید:

$$q = 1 + \frac{C_p \Delta T}{\lambda} > 1 \quad (161)$$

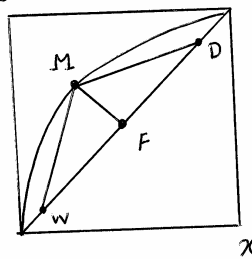
$$q = -\frac{C_p \Delta T}{\lambda} < 0 \quad (162)$$

۹-۶-۷- محاسبه N_{min} در روش مک‌کیب

در حالت N_{min} ، نسبت جریان برگشتی برابر ∞ است لذا خطوط کار برج بر خط 45° منطبق می‌شوند $\left(\frac{R}{R+1} = 1 \right)$ حد $\left(\frac{R}{R \rightarrow \infty} = 1 \right)$ بنابراین N_{min} با رسم پله‌های بین منحنی تعادل و خط 45° به دست می‌آید.

۱۰-۶-۷- محاسبه R_{min} در روش مک‌کیب

برای محاسبه R_{min} در روش مک‌کیب کافی است محل تلاقی خط خوراک و منحنی تعادل را مطابق شکل زیر به دست آوریم (نقطه M) سپس با وصل نمودن نقطه M به نقطه D و محاسبه شیب MD و برابری آن با $\frac{R_{min}}{R_{min} + 1}$ مقدار R_{min} را محاسبه نمود:



مختصات نقطه M از تلاقی معادلات تعادل و خط خوراک به صورت زیر به دست می‌آید:

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

$$y = \frac{q}{q-1} x - \frac{Z_F}{q-1}$$

پس از یافتن مختصات نقطه M از معادله بالا از رابطه زیر R_{min} به دست می‌آید:

$$\text{شیب MD} = \frac{x_D - y_M}{x_D - x_M} = \frac{R_{min}}{R_{min} + 1} \quad (163)$$

با توجه به توضیحات فوق مشخص می‌شود که R_{min} به عوامل زیر بستگی دارد:

$$R_{min} = f(x_D, q, Z_F, \alpha) \quad (164)$$

یادداشت:

.....

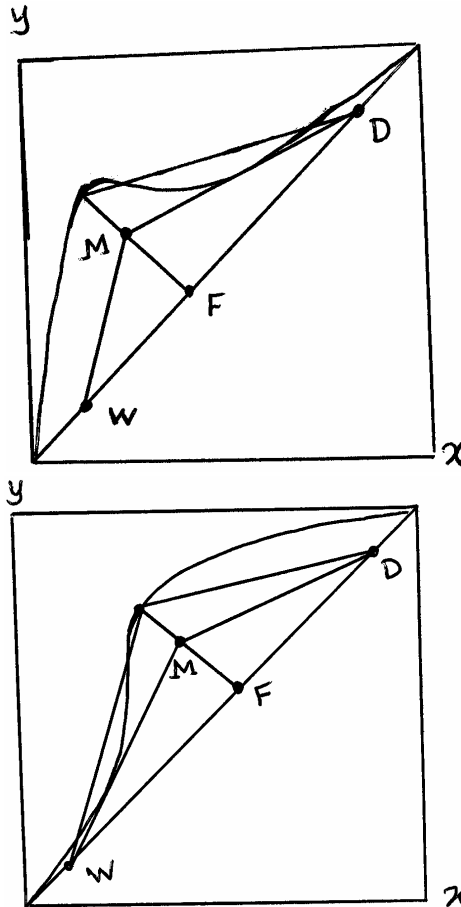
.....

.....

.....

معادله فوق همان معادله Underwood است (مراجعه شود به معادله 133 فصل 9 تریبال).

در صورتی که محلول غیر ایده آل باشد لزوماً همیشه تلاقی خط خوراک و منحنی تعادل منجر به محاسبه R_{min} نمی شود به عنوان مثال در دو شکل زیر ملاحظه می گردد که با رسم خط مماس به طریقی که در شکل نشان داده شده است R_{min} به دست می آید.



۷-۶-۱۱- برج های دو خوراکه، برج های با جریان جانبی و open steam

در برج های دو خوراکه سه خط کار و دو خط خوراک در محاسبات روش McCabe وجود دارد. در ناحیه بالای خوراک F_1 و پایین خوراک F_2 معادلات خط کار مشابه معادلات (۱۵۶) و (۱۵۷) می باشد. در ناحیه بین خوراک F_1 و F_2 یک خط کار جدید وجود دارد که معادله آن با نوشتن موازنه جرم در این ناحیه به صورت زیر به دست می آید:

$$y = \frac{L'}{G'}x + \frac{Dx_D - F_1Z_{F1}}{G'} \quad (165)$$

L' و G' در معادله فوق شدت جریان مایع و بخار در ناحیه بین دو خوراک F_1 و F_2 می باشند. دی های مایع و بخار در سه ناحیه برج (بالای F_1 ، بین F_1 و F_2 و پایین F_2) به صورت زیر محاسبه خواهند شد:

$$F_1 \text{ بالای } \begin{cases} L = RD \\ G = (R+1)D \end{cases}$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

$$F_2 \text{ و } F_1 \text{ بین } \begin{cases} L' = L + q_1 F_1 \\ G' = G + (q_1 - 1) F_1 \end{cases}$$

$$F_2 \text{ پایین } \begin{cases} \bar{L} = L' + q_2 F_2 \\ \bar{G} = G' + (q_2 - 1) F_2 \end{cases}$$

محل تلاقی خط کار ناحیه بین F_1 و F_2 با خط $y = x$ از معادله زیر به دست می‌آید:

$$x = \frac{Dx_D - F_1 Z_{F_1}}{D - F_1} = x_{\Delta M} \quad (166)$$

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود این نقطه همان نقطه تقاضای این ناحیه است. به‌طور کلی: محل تلاقی خط کار هر ناحیه با خط $y = x$ همان مختصات نقطه تقاضای آن ناحیه است.

در برج‌های با جریان جانبی یک خط کار جدید هم بین S (جریان جانبی) و F وجود دارد که معادله آن به صورت زیر است:

$$y = \frac{L'}{G'} x + \frac{Dx_D + Sx_S}{G'} \quad (167)$$

در ناحیه بین S و F دبی‌های مایع و بخار با فرض آنکه S به صورت مایع اشباع باشد به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$L' = L - S = RD - S, \quad G' = G = (R + 1)D \quad (168)$$

که با جایگزینی این دبی‌ها در معادله (۱۶۷) خواهیم داشت:

$$y = \frac{R - \frac{S}{D}}{R + 1} x + \frac{x_D + \frac{S}{D} x_S}{R + 1} \quad (169)$$

در برج‌های تقطیر وقتی آب جزء سنگین باشد از open steam استفاده می‌شود. در این حالت در روش مک کیب دو خط کار خواهیم داشت که خط کار بالای خوراک مشابه معادله (۱۵۶) خواهد بود اما خط کار پایین خوراک به صورت زیر خواهد شد:

$$y = \frac{W}{S} (x - x_w) \quad (170)$$

که از نقطه‌ای به مختصات $(x_w, 0)$ می‌گذرد.

۸- استخراج از مایعات

در صورتی که برای جداسازی یک سیستم به یکی از دلایل زیر تقطیر امکان‌پذیر نباشد استخراج گزینه بعدی است:

- ۱- داشتن محلول آزنوتروپی
 - ۲- داشتن ماده حساس به دما
 - ۳- ضریب فراریت نسبی نزدیک به یک باشد.
- در استخراج با افزودن حلال (B) به خوراک (که شامل اجزاء C و A است) دو فاز مایع تشکیل خواهد شد که فاز غنی از حلال را Extract و فاز غنی از همراه را Raffinate گویند. اصولاً حلال‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند:
- ۱- حلال غیر قابل امتزاج با جزء همراه (A)، که در این حالت حلال B فقط C را در خود حل می‌کند و A و B در هم نامحلولند. در این حالت هر دو فاز E و R دو جزئی خواهند بود.

یادداشت:

.....

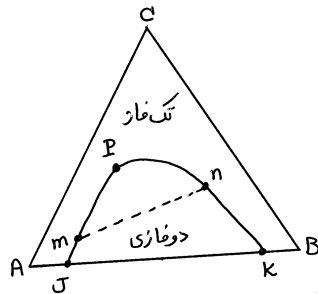
.....

.....

.....

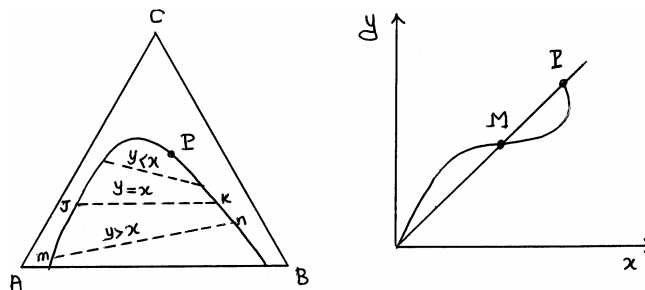
۲- حلال با امتزاج‌پذیری نسبی، که در این حالت حلال B عمدتاً جزء C را در خود حل می‌کند اما خود A و B هم به‌طور جزئی در هم حل می‌شوند. در این صورت هر دو فاز E و R سه جزئی خواهند بود که طبیعتاً برای بررسی تعادلات به دیاگرام مثلثی نیاز خواهیم داشت.

در شکل زیر نمونه‌ای از دیاگرام مثلثی ارائه شده است:



نقطه P در شکل فوق همان نقطه plait است. در نقطه plait:

- ۱- طول Tie Line برابر صفر است.
 - ۲- غلظت اجزاء در هر دو فاز E و R با هم برابر است ($x = y$) و فاکتور استخراج مساوی یک است. ($\beta = 1$)
 - ۳- کشش بین سطحی میان دو فاز به صفر می‌رسد.
- با توجه به شکل فوق می‌توان گفت:
- ۱- A و C کاملاً در هم محلولند. B و C نیز کاملاً در هم محلولند.
 - ۲- A و B به‌طور جزئی در هم حل می‌شوند.
 - ۳- شاخه pmk مشخصات فاز E و شاخه pmj مشخصات فاز R را نشان می‌دهد.
- در شکل زیر هم نمونه دیگری از دیاگرام مثلثی ارائه شده است.



همچنانکه ملاحظه می‌شود شیب Tie-Line در این سیستم از مثبت به منفی تغییر کرده است. Tie-Jk که در منحنی xy با نقطه M نشان داده شده است معرف محلول سولوتروپیک است که در آن $x = y$ است و تفاوت مهم محلول سولوتروپیک با نقطه plait این است که در محلول سولوتروپیک سیستم دوفازی است و علیرغم تساوی x و y (غلظت جزء C در فازهای E و R)، فاکتور استخراج مخالف یک است ($\beta \neq 1$) هم‌چنین طول Tie مخالف صفر بوده و کشش بین سطحی هم مخالف صفر است.

نمونه دیگری از دیاگرام مثلثی در شکل زیر نشان داده شده است که در این سیستم A و B به‌طور جزئی در هم حل می‌شوند و B و C نیز به‌طور جزئی در هم حل می‌شوند ولی A و C به‌طور کامل در هم حل می‌شوند. بنابراین مطابق این شکل و توضیحات فوق حلال B، حلال مناسبی برای استخراج جزء C نیست.

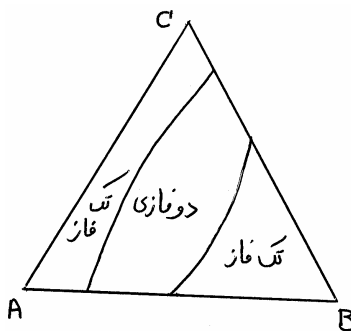
یادداشت:

.....

.....

.....

.....



افزایش دما باعث افزایش حلالیت مواد در هم می‌شود لذا باعث می‌شود سطح ناحیه دو فاز کوچک شود به همین دلیل بهتر است استخراج در دمای پایین انجام شود.

۸-۱- فاکتور استخراج و ضریب توزیع اجزاء بین فازها

در استخراج، فاکتور استخراج (β) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = \frac{\left(\frac{C}{A}\right)_E}{\left(\frac{C}{A}\right)_R} = \frac{\left(\frac{\text{جزء اصلی}}{\text{جزء همراه}}\right)_E}{\left(\frac{\text{جزء اصلی}}{\text{جزء همراه}}\right)_R} \quad (171)$$

ضریب توزیع اجزاء بین فازها (k) نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k = \frac{C_E}{C_R} = \frac{y}{x} \quad (172)$$

شرط انجام پذیری استخراج $\beta > 1$ است.

سؤال: آیا در استخراج می‌توان نوشت:

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

اگر A و B در هم نامحلول باشند (هر دو فاز دو جزئی است) غلظت A در فاز E برابر صفر است. لذا:

$$\beta = \frac{\frac{y}{0}}{1 - x} = \infty \quad (173)$$

چون فازهای E و R دو جزئی هستند لذا غلظت A در فاز R برابر $1 - x$ می‌شود (x : غلظت C در فاز R است).

اگر سیستم سه جزئی باشد (یعنی A و B به طور جزئی در هم حل شوند) در این صورت چون $A_E \neq (1 - y)$ و $A_R \neq (1 - x)$ لذا

$$\beta = \frac{\frac{y}{A_E \neq (1 - y)}}{\frac{x}{A_R \neq (1 - x)}} \rightarrow y \neq \frac{\beta x}{1 + (\beta - 1)x}$$

یادداشت:

.....

.....

.....

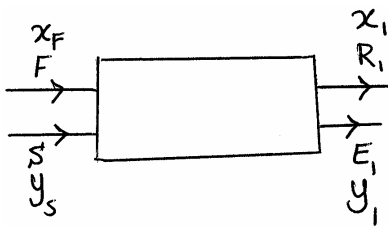
.....

ملاحظه می‌شود که در این حالت هم رابطه $y = \frac{\beta x}{1 + (\beta - 1)x}$ صادق نیست. اما اگر X و Y غلظت جزء C در فازهای R و E و بر مبنای عاری از حلال (B) باشند می‌توان نوشت:

$$\beta = \frac{\frac{Y}{1-Y}}{\frac{X}{1-X}} \rightarrow Y = \frac{\beta X}{1 + (\beta - 1)X} \quad (174)$$

۸-۲- استخراج در جریان همسو

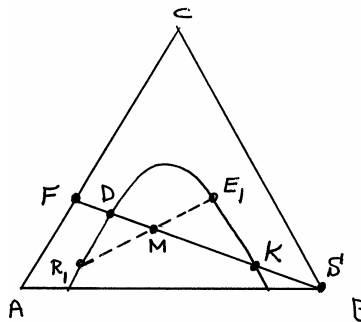
در شکل روبرو شماتیک جریان همسو در فرآیند استخراج نشان داده شده است.



اگر A و B در هم نامحلول باشند سیستم‌های R و E دوجزئی هستند لذا معادله خط کار به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\frac{Y_1 - Y_s}{X_1 - X_F} = - \frac{R_s}{E_s} \quad (175)$$

اما اگر A (جزء همراه) و B (حلال) به طور جزئی در هم حل شوند به دیاگرام مثلثی نیاز خواهیم داشت (چون هر دو فاز سه جزئی هستند) در شکل زیر مسیر تحول جریان همسو در دیاگرام مثلثی نشان داده شده است.



در شکل فوق خط FS مسیر افزودن حلال (S) به خوراک را نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق حداقل حلال برای داشتن سیستم دو فازی در شرایطی به دست خواهد آمد که امولسیون (M) در نقطه D واقع شود لذا طبق قانون اهرم می‌توان نوشت:

$$S_{\min} = F \cdot \frac{\overline{FD}}{\overline{SD}} \quad (176)$$

و به طریق مشابه حداکثر مقدار حلال برای داشتن سیستم دو فازی در حالتی به دست می‌آید که امولسیون (M) در نقطه K باشد:

$$S_{\max} = F \cdot \frac{\overline{FK}}{\overline{SK}} \quad (177)$$

یادداشت:

.....

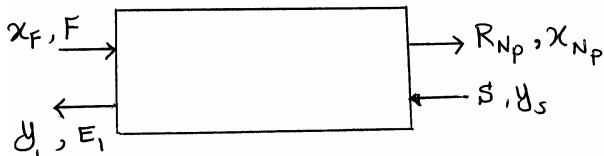
.....

.....

.....

۳-۸- استخراج در جریان ناهمسو

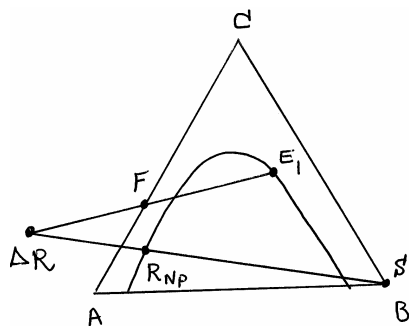
در شکل زیر شماتیک جریان ناهمسو نشان داده شده است:



مجدداً در صورتی که A و B در هم نامحلول باشند فازهای E و R دو جزئی هستند لذا معادله خط کار عبارت خواهد بود از:

$$\frac{Y_1 - Y_s}{X_F - X_{N_p}} = \frac{R_s}{E_s} \quad (178)$$

در صورتی که A و B به طور جزئی در هم حل شوند فازهای E و R سه جزئی بوده و لذا محاسبات در صفحه مختصات مثلثی باید انجام شود. در این حالت با توجه به موازنه جرم یک نقطه تفاضل خواهیم داشت که از تلاقی امتدادهای SR_{N_p} به دست می آید مطابق شکل زیر:



موقعیت نقطه تفاضل ΔR تابع عوامل زیر است:

$$\Delta R \text{ موقعیت} = f[F, x_F, S, y_s, y_1 \text{ یا } x_{N_p}] \quad (179)$$

یعنی موقعیت ΔR تابع شدت و غلظت خوراک، شدت و غلظت حلال و غلظت جزء اصلی در فاز Extract یا Raffinate خروجی است. محاسبه عده مراحل به روشی مشابه روش پونچون در تقطیر به کمک نقطه تفاضل ΔR انجام می شود.

نکته: برای محاسبه حداقل حلال در جریان ناهمسو، از تلاقی Tie-Line و امتداد SR_{N_p} نقطه ΔR_{min} به دست می آید. اگر Tie-Line در سمت چپ دیاگرام مثلثی امتداد SR_{N_p} را قطع کند دورترین محل تلاقی ΔR_{min} است و اگر امتداد SR_{N_p} را در سمت راست دیاگرام مثلثی قطع کند نزدیکترین تلاقی Tie-Line ها با امتداد SR_{N_p} نقطه ΔR_{min} است. لذا واضحاً موقعیت ΔR_{min} به شیب Tie-line هم بستگی دارد (هر چند موقعیت ΔR به شیب Tie-Line وابستگی ندارد).

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۸-۴- دستگاه‌های استخراج

در این قسمت خلاصه‌ای از نکات مهم مربوط به دستگاه‌های استخراج ارائه خواهد شد:

۱- دستگاه‌های Mixer-Settler

- این دستگاه‌ها راندمان بالایی دارند (75 ~ 100%)
- اگر در فاز مایع جزء جامد داشته باشیم مناسب هستند.
- هم به صورت ناپیوسته و هم به صورت پیوسته استفاده می‌شوند در حالت پیوسته حداکثر عده مراحل بین 6 ~ 8 مرحله است.

۲- استخراج‌کننده سانتریفوژی

- وقتی استفاده می‌شوند که اختلاف دانسیته دو فاز کم باشد.
- زمانی استفاده می‌شوند که زمان اقامت کمی مورد نظر باشد (استخراج ویتامین‌ها و پنی‌سیلین)
- در یک ماشین سانتریفوژ به حدود 3 تا 10 مرحله تئوری می‌توان دست یافت.
- تجهیزات گران‌قیمت و پرهزینه‌ای هستند.
- راندمان بالایی دارند.

۳- استخراج‌کننده‌هایی که در آنها یک فاز پراکنده می‌شود.

- در این دسته سه دستگاه اصلی قرار می‌گیرند: برج‌های سینی‌دار، برج‌های پر شده و برج‌های پاششی
- فازی باید پراکنده شود که یا ویسکوزیته بالا یا شدت جریان بالایی داشته باشد.
- فاز پراکنده می‌تواند از بالا و یا از پایین وارد برج شود فقط فاز سبک باید از پایین و فاز سنگین باید از بالا وارد شود.
- بالاترین انتقال جرم در محل تشکیل قطرات انجام می‌شود.
- این دستگاه‌ها زمانی استفاده می‌شوند که کشش بین سطحی کم باشد. (در این حالت پراکندگی به راحتی انجام می‌شود)
- برج‌های پر شده و سینی‌دار در حضور جامد مناسب نیستند.
- مفهوم طغیان در برج پر شده آن است که اگر دبی یک فاز زیاد شود به طوری که فازهای پیوسته و پراکنده از یک طرف خارج شوند.
- در این دستگاه‌ها چون هر دو فاز مایع هستند (نزدیکی دانسیته‌ها) راندمان بسیار پایین است (حدود 24% ~ 6 برای سینی‌دار).
- ارتفاع معادل یک واحد تئوری (HETP) برج‌های پر شده و پاششی هم در حدود (5 ~ 20 ft) و (10 ~ 20 ft) است که مجدداً نشان‌دهنده کارایی پایین این دستگاه‌ها برای استخراج است.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۴- استخراج‌کننده مجهز به همزن (Agitated)

- در این دستگاه‌ها از همزن درون برج استفاده می‌شود. دو نوع اصلی این دستگاه‌ها برج‌های RDC و شیبیل می‌باشد.
- این دستگاه‌ها راندمان بسیار بالایی دارند. (80 ~ 100%)
- برای زمانی که عده مراحل تئوری مورد نیاز زیاد باشد مناسب هستند (مثلاً 40 مرحله)
- برای سیالات خورنده مناسب نیستند.
- اگر سیال ویسکوز باشد برج شیبیل به RDC ارجحیت دارد.

۵- برج‌های ضربانی (pulsed)

- در این برج جریان مایع به صورت ضربانی وارد برج می‌شود.
- یک برج پر شده یا سینی داری که در آن ایجاد ضربان شده باشد دارای راندمانی در حدود 3 برابر برج پر شده یا سینی‌داری است که در آن پالسی ایجاد نشده است.
- این دستگاه‌ها برای سیالات خورنده و رادیواکتیو مناسبند.
- با ازدیاد ضربان‌ها ابتدا راندمان افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

بخش سوم

عملیات واحد ۲

۹- رطوبت سنجی (Humidification)

اگر گاز خشک B در تماس با مایع A قرار گیرد در اثر تبخیر مایع A به درون گاز B، این گاز توسط مایع مرطوب می‌شود تا جایی که این گاز به طور کامل اشباع از رطوبت شود.

۹-۱- تعاریف و اصطلاحات

۱- رطوبت مطلق (Absolute Humidity)

$$Y' = \frac{\text{kg A}}{\text{kg B}} = \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Dry Air}} \quad (180)$$

با ایده‌آل فرض کردن فاز گاز رطوبت مطلق به صورت زیر هم قابل بیان است:

$$Y' = \frac{M_A}{M_B} \cdot \frac{P_A}{P_t - P_A} \quad (181)$$

M_A و M_B جرم مولکولی A و B است.

۲- رطوبت اشباع (Saturated Humidity)

$$Y_s = \frac{M_A}{M_B} \cdot \frac{P_A^{\text{sat}}}{P_t - P_A^{\text{sat}}} \quad (182)$$

P_A^{sat} : فشار بخار اشباع جزء A (که تابع دماست)

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۳- رطوبت نسبی (Relative Humidity)

$$RH\% = \frac{P_A}{P_A^{sat}} \times 100 \quad (183)$$

نسبت فشار بخار به فشار اشباع را رطوبت نسبی گویند.

۴- درصد رطوبت مطلق (Percentage Humidity)

$$\text{درصد رطوبت مطلق} = \frac{Y'}{Y'_s} \times 100 = \frac{P_A}{P_A^{sat}} \cdot \frac{P_t - P_A^{sat}}{P_t - P_A} \times 100 \quad (184)$$

درصد رطوبت مطلق به لحاظ عددی از رطوبت نسبی کوچکتر است.

۵- حجم مرطوب (Humid Volume)

حجمی که توسط یک کیلوگرم هوای خشک (B) و رطوبت همراه آن (A) اشغال شده است را حجم مرطوب گویند. حجم مرطوب با v_H نشان داده می‌شود.

۶- گرمای مرطوب (Humid Volume)

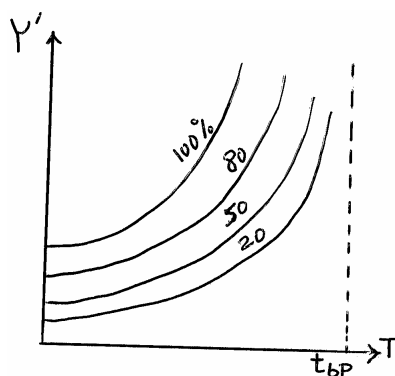
مقدار انرژی لازم برای آنکه دمای یک کیلوگرم هوای خشک (B) و رطوبت همراه آن را یک درجه سانتی‌گراد در فشار ثابت افزایش دهد:

$$C_s = C_B + Y'C_A \quad (185)$$

C_A و C_B ظرفیت گرمایی A (آب) و B (هوا) است.

۹-۲- منحنی رطوبت سنجی

منحنی رطوبت سنجی منحنی است که در آن تغییرات رطوبت مطلق گاز (Y') برحسب دما (T) برای درصدهای مختلف رطوبت نسبی نشان داده شده است. در شکل زیر نمونه‌ای از این منحنی ارائه شده است.



همانگونه که از این شکل ملاحظه می‌شود با افزایش دما گنجایش رطوبت هوا افزایش می‌یابد و در دمای جوش مایع (t_{bp}) رطوبت مطلق اشباع به سمت بی‌نهایت میل می‌کند چون:

$$T = t_{bp} \rightarrow P_A^{sat} = P_t \rightarrow Y'_s = \infty \quad (186)$$

یادداشت:

.....

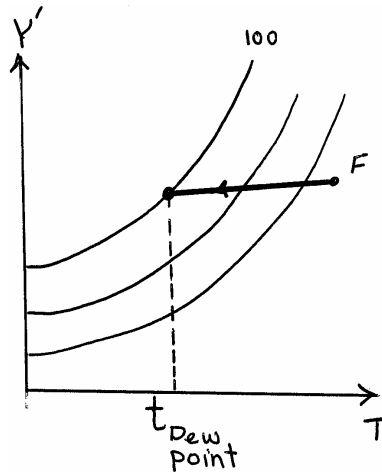
.....

.....

.....

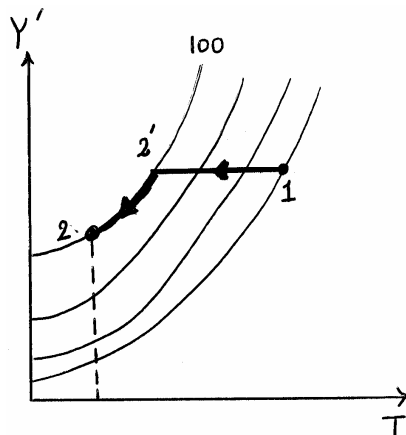
۹-۳- دمای شبنم (Dew Point)

اگر در فشار ثابت یک گاز حاوی رطوبت را سرد کنیم دمایی که در آن رطوبت نسبی هوا برابر 100% خواهد شد دمای شبنم نامیده می‌شود مثلاً در شکل زیر دمای شبنم هوای مرطوب (F) نشان داده شده است:



دمای شبنم مطابق شکل روبرو تابع مقدار رطوبت گاز و نیز فشار کل است. اثر فشار بر دمای شبنم به واسطه اثر این عامل بر منحنی اشباع (100%) در منحنی رطوبت سنجی است (مراجعه شود به معادله Y'_s). به طور کلی با افزایش فشار (کاهش Y'_s) و افزایش رطوبت مطلق گاز، دمای شبنم افزایش می‌یابد.

اگر گازی را تا دمایی کمتر از دمای شبنم آن سرد کنیم مسیر تحول مطابق شکل زیر خواهد بود:



مطابق شکل فوق ملاحظه می‌شود که چون $Y'_2 < Y'_1$ است لذا این هوا بخشی از رطوبت خود را به صورت کندانس مایع از دست داده است. این پدیده در زمستان و در قالب بخار گرفتگی سطح شیشه منازل قابل مشاهده است. بنابراین اگر هوا کنار یک سطح با دمایی کمتر از دمای شبنم گاز قرار گیرد هوا بخشی از رطوبت خود را از دست می‌دهد. اگر یک هوای مرطوب از روی یک بستر جاذب الرطوبه (مثل سیلیکاژل) عبور کند مسیر تحول مطابق شکل زیر است:

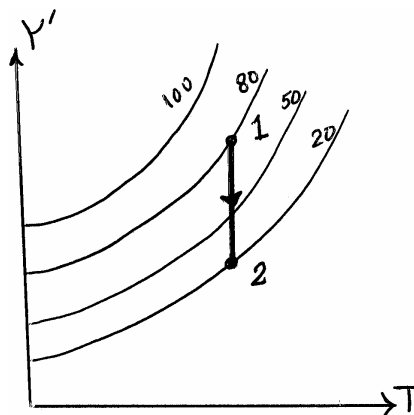
یادداشت:

.....

.....

.....

.....



ملاحظه می‌شود که بدون آنکه دمای گاز تغییر چندانی بکند رطوبت گاز کاهش چشمگیری پیدا می‌کند.

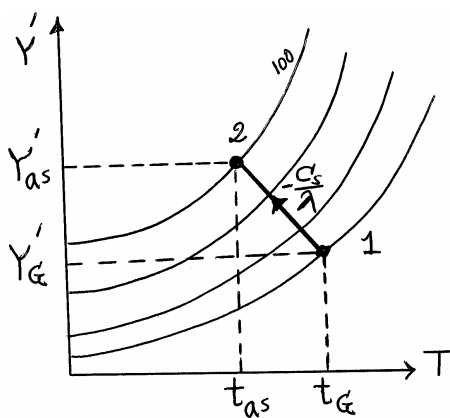
۹-۴- دمای اشباع آدیباتیک

اگر هوایی با رطوبت اولیه Y'_G و دمای t_G در تماس با آب قرار گیرد تا به صورت آدیباتیک اشباع از بخار آب شود در این صورت رطوبت هوا به Y'_{as} و دمای آن به t_{as} (دمای اشباع آدیباتیک) می‌رسد. موازنه انرژی در این حالت به صورت زیر است:

$$C_s(t_G - t_{as}) = (Y'_{as} - Y'_G)\lambda \quad (187)$$

$$Y'_G - Y'_s = -\frac{C_s}{\lambda}(t_G - t_{as}) \quad (188)$$

مسیر تحول فوق روی منحنی رطوبت‌سنجی خطی است با شیب $-\frac{C_s}{\lambda}$ (مطابق شکل زیر)



۹-۵- دمای حباب مرطوب

دماسنجی را در نظر بگیرید که پارچه خشکی دور آن پیچیده شده است و در هوایی با دمای t_G (دمای حباب خشک) قرار گرفته است. اگر پارچه مورد نظر خیس شود و دماسنج را در هوا بچرخانیم مقداری از آب درون پارچه به درون هوا تبخیر می‌شود. تبخیر آب باعث کاهش دمای دماسنج می‌شود، در حالت پایدار این دما به دمای حباب مرطوب هوا می‌رسد (Wet Bulb). موازنه انرژی در حالت پایا به صورت زیر است:

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

$$h_G (t_G - t_w) = K_y (Y'_w - Y'_G) \lambda \quad (189)$$

$$Y'_G - Y'_w = -\frac{h_G}{K_y \lambda} (t_G - t_w) \quad (190)$$

Y'_w : رطوبت در سطح پارچه، Y'_G : رطوبت در توده هوا و λ : نیز گرمای نهان تبخیر آب می‌باشد. ملاحظه می‌شود مسیر این تحول خطی است به شیب $-\frac{h_G}{K_y \lambda}$. از تقسیم نسبت شیب منحنی دمای حباب مرطوب به شیب منحنی اشباع آدیاباتیک پارامتری به دست می‌آید که آن را نسبت رطوبت‌سنجی می‌گویند:

$$\text{نسبت رطوبت سنجی} = \frac{h_G}{K_y C_s} \quad (191)$$

h_G : ضریب انتقال حرارت تابع Re و Pr است و K_y : ضریب انتقال جرم تابع Sc و Re است، لذا نسبت رطوبت سنجی تابع عدد لوئیس خواهد بود:

$$\frac{h_G}{K_y C_s} = Le^{0.567} \quad (192)$$

برای سیستم هوا - بخار آب چون $Le = 1$ است لذا:

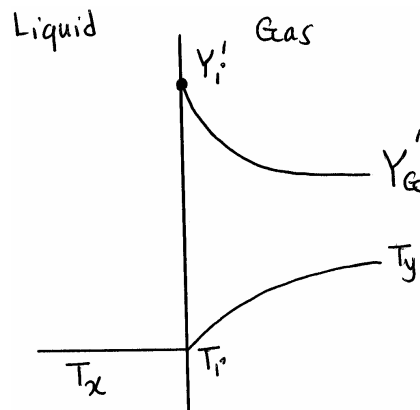
$$\frac{h_G}{K_y C_s} = 1 \rightarrow t_w = t_{as} \quad (193)$$

یعنی برای این سیستم دمای اشباع آدیاباتیک و دمای حباب مرطوب با هم برابر هستند.

نکته: هرچه رطوبت نسبی هوا کمتر باشد اختلاف دمای حباب خشک و مرطوب هوا ($t_G - t_w$) بزرگتر است.

۹-۶- کولر آبی

در کولر آبی در اثر تماس هوا با آب، تبخیر آب به دورن هوا انجام می‌شود. در این حالت هوا انرژی لازم برای تبخیر آب را فراهم می‌کند. لذا دمای خود هوا کاهش می‌یابد. در شکل زیر پروفایل رطوبت و دما در سطح تماس مایع و هوا در کولر آبی نشان داده شده است:



عاملی که در کولر آبی باعث خنک شدن هوا می‌شود تبخیر آب به دورن هوا با انرژی هواست ($T_y > T_i$)

یادداشت:

.....

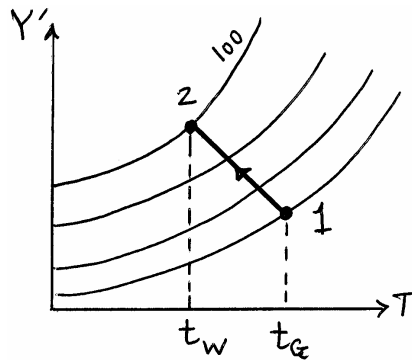
.....

.....

.....

در کولر آبی در حالت تئوری می‌توان هوا را تا دمای حباب مرطوب هوا خنک کرد. لذا پایین‌ترین دمایی که در کولر آبی به آن می‌توان رسید دمای حباب مرطوب هواست. دمای آب چرخشی در کولر آبی تقریباً برابر دمای Wet Bulb هواست چون زمان ماند آب درون کولر زیاد است.

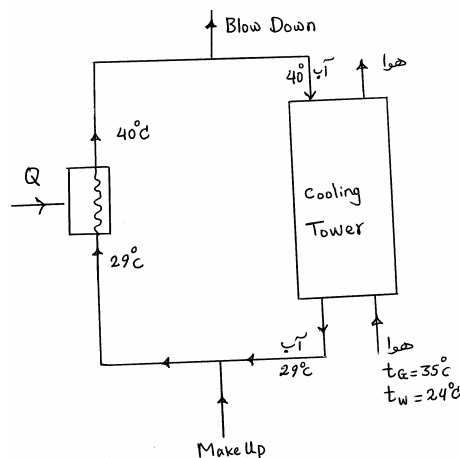
در مناطق شرجی به علت رطوبت نسبی بالای هوا اختلاف بین دمای حباب خشک و مرطوب هوا ناچیز است لذا خنک‌سازی چندانی در کولر آبی انجام نمی‌شود. بنابراین در این مناطق کولر آبی قابل استفاده نیست. مسیر تحول در کولر آبی مطابق شکل زیر است:



همانگونه که ملاحظه می‌شود در حین عبور هوا از کولر آبی دمای هوا کاهش می‌یابد و رطوبت مطلق و نسبی آن هم افزایش می‌یابد.

۹-۷- برج‌های خنک‌کن

در برج خنک‌کن آب برگشتی از شبکه مبدل‌های حرارتی پلنت در اثر تماس با هوا خنک می‌شود. در شکل زیر شماتیک جریان در برج خنک‌کن نشان داده شده است:



در برج خنک‌کن عاملی که باعث خنک شدن آب می‌شود تبخیر آب به درون هوا با انرژی آب است.

$$\text{اختلاف دمای آب خنک خروجی از برج خنک} = \text{دمای حباب مرطوب هوای ورودی} + (2 \sim 5^\circ\text{C}) \quad (194)$$

اختلاف دمای آب خنک خروجی و دمای حباب مرطوب هوای ورودی را اختلاف دمای نزدیکی یا $\Delta T_{\text{Approach}}$ می‌گویند:

$$\Delta T_{\text{Approach}} = 2 \sim 5^\circ\text{C} \quad (195)$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

در شکل فوق چون $t_w = 24^\circ\text{C}$ است لذا آب را می‌توان تا دمایی بین 26 تا 29°C خنک کرد. در سیکل بسته آب درون برج خنک‌کن، به سه دلیل هدر رفت آب در سیکل چرخشی داریم:

۱- هدر رفت آب ناشی از تبخیر آب به درون هوا (E)

۲- قطرات آبی که با جریان هوا حمل می‌شوند (D یا Drift)

۳- به دلیل تغلیظ آب به واسطه تبخیر، غلظت نمک در سیکل مدام در حال افزایش است. برای جلوگیری از ازدیاد بیش از حد نمک

بخشی از آب چرخشی دارای نمک بالا از سیکل خارج شده و به جای آن آب با نمک کم وارد می‌شود (B یا Blow Down)

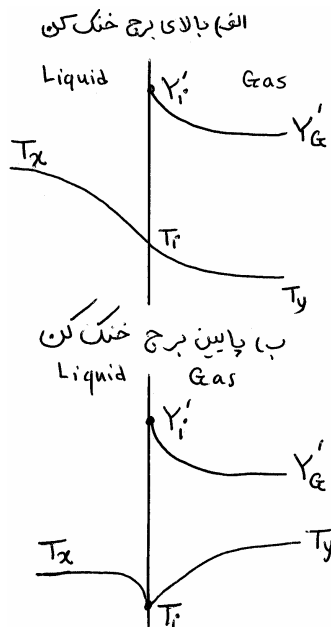
بنابراین آب جبرانی (Make up) باید هدر رفت آب ناشی از هر 3 عامل فوق را جبران نماید:

$$\text{Make up} = E + D + B$$

(۱۹۶)

دبی جریان Make up حدود 2 تا 3 درصد دبی آب چرخشی است. منحنی‌های پروفایل دما و رطوبت در بالا و پایین برج خنک‌کن به

ترتیب در شکل‌های زیر نشان داده شده است:



۱۰- خشک کردن (Drying)

اگر جامد مرطوبی گرما دریافت کند رطوبت همراه آن خارج می‌شود. خشک کردن پدیده توأم انتقال حرارت و انتقال جرم است.

خشک‌کن‌ها از حیث نحوه انتقال حرارت به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

۱- خشک‌کن‌های مستقیم (Direct)

در این خشک‌کن انتقال گرما به جامد مرطوب توسط هوای داغ عبوری از درون خشک‌کن انجام می‌شود و لذا انتقال حرارت با مکانیزم

جابجایی انجام می‌شود. این خشک‌کن‌ها را آدیاباتیک هم می‌گویند چون از بدنه خشک‌کن تبادل گرما انجام نمی‌شود.

۲- خشک‌کن‌های غیر مستقیم (Indirect)

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

رطوبت تعادلی کمترین رطوبتی است که با فرآیند خشک کردن می‌توان به آن دست یافت.

اختلاف رطوبت اولیه جسم (X_1) و رطوبت تعادلی (X^*) را رطوبت آزاد گویند:

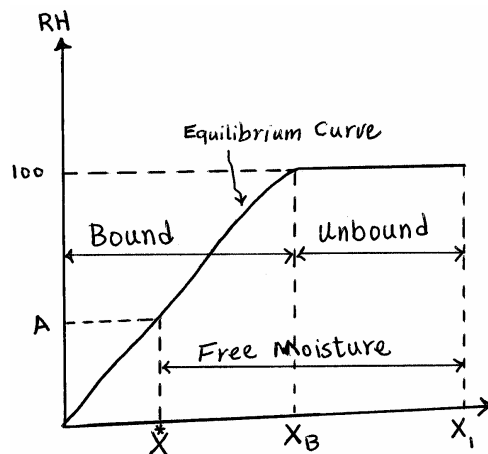
$$\text{Free Moisture} = X_1 - X^* = f \quad (\text{رطوبت نسبی هوا و نوع ماده})$$

۱۰-۱-۲- رطوبت پیوندی (Bound) و غیر پیوندی (unbound)

رطوبت پیوندی (Bound Moisture) رطوبتی است که در آن جامد مرطوب فشار بخاری کمتر از فشار بخار مایع خالص در آن دما ایجاد می‌کند. این رطوبت را رطوبت چسبیده هم می‌گویند. مایع درون الیاف جامد، آب تبلور و به طور کلی مایعی که با جامد پیوندی فیزیکی یا شیمیایی دارد، رطوبت پیوندی محسوب می‌شود.

رطوبت غیر پیوندی (unbound Moisture) رطوبتی است که در آن فشار بخار ایجاد شده توسط جامد مرطوب برابر فشار بخار مایع خالص در همان دماست. آب‌های سطحی و آب درون خلل و فرج جامد رطوبت غیر پیوندی محسوب می‌شود.

مقدار رطوبت موجود در جامد که بیش از رطوبت در تعادل با هوای کاملاً اشباع ($RH = 100\%$) است. رطوبت غیر پیوندی نامیده می‌شود و رطوبت موجود در جامد که کمتر از رطوبت در تعادل با هوای کاملاً اشباع (X_B) است رطوبت پیوندی نامیده می‌شود. در شکل زیر رطوبت پیوندی، غیر پیوندی، تعادلی و آزاد به صورت شماتیک نشان داده شده است. در این شکل A رطوبت نسبی هوای مورد استفاده در خشک‌کن است.



مطابق شکل فوق مرز میان رطوبت پیوندی و غیر پیوندی (X_B) فقط به نوع ماده بستگی دارد و به مشخصات هوای اطراف بستگی ندارد چون X_B همیشه در تعادل با هوای کاملاً اشباع محاسبه می‌شود.

۱۰-۲- مکانیزم‌های خشک شدن

شار ناشی از خشک شدن (N) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$N = -\frac{1}{A} \frac{dm_t}{dt} \quad (198)$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

در معادله بالا m_t : جرم جامد مرطوب و A : سطح در معرض خشک شدن است. اگر L_s جرم جامد خشک و m_w جرم رطوبت همراه آن باشد در این صورت:

$$m_w = m_t - L_s \quad (199)$$

$$X = \frac{m_t - L_s}{L_s} \quad (200)$$

با ترکیب معادلات فوق:

$$N = -\frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad (201)$$

مثال: اگر تیغه جامد باریکی داشته باشیم که نصف ضخامت آن (S) باشد و این تیغه از هر دو وجه در معرض هوا قرار گرفته باشد شار خشک شدن این تیغه را به دست آورید. در صورتی که دانسیته جامد خشک ρ_s باشد.

$$L_s = \rho_s (2SA_0) \quad , \quad A = 2A_0$$

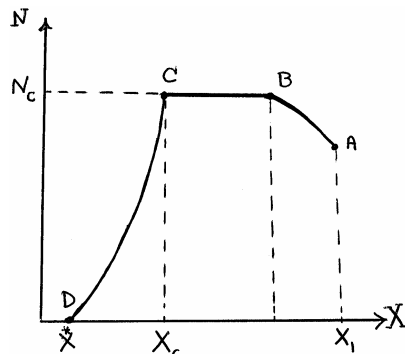
در معادلات بالا A_0 مساحت هر یک از وجوه تیغه است لذا

$$N = -\frac{\rho_s (2SA_0)}{2A_0} \frac{dx}{dt} \rightarrow N = -S\rho_s \frac{dx}{dt}$$

منحنی خشک شدن (Drying Curve) منحنی است که در آن شار خشک شدن (N) بر حسب رطوبت جسم (X) رسم شده باشد.

۱۰-۲-۱- بررسی منحنی خشک شدن و مکانیزم خشک شدن جامدات غیر متخلخل

با توجه به شکل زیر سه ناحیه اصلی در منحنی خشک شدن وجود دارد.



۱- ناحیه تنظیمات دمایی اولیه (AB) در این ناحیه چون جامد سردتر از دمای اشباع سطحی وارد خشک کن شده است لذا در این ناحیه در حین بالا رفتن دمای جامد فشار بخار مایع نیز افزایش پیدا می کند و به همین دلیل شار خشک شدن افزایش می یابد.

۲- ناحیه خشک شدن با سرعت ثابت (BC)

در این ناحیه آب های سطحی جامد تبخیر می شود. مادامی که فیلم مایع روی سطح جامد پیوستگی خود را حفظ کند سرعت خشک شدن ثابت می ماند ($Constant Rate$). در این ناحیه مکانیزم اصلی انتقال حرارت جابجایی است دمای اشباع سطحی برابر دمای حباب مرطوب هوا است البته به شرطی که خشک کن از نوع $Direct$ باشد (تماس مستقیم هوا با جامد) و نیز از هدایت و تابش صرف نظر شود. اگر خشک کن $Indirect$ باشد دمای اشباع سطحی جامد برابر دمای جوش مایع همراه جامد در فشار عملیاتی مورد نظر است.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

در خشک کن Direct در ناحیه سرعت ثابت، N_c از معادله زیر به دست می‌آید.

$$N_c = \frac{h(t_G - t_w)}{\lambda} \quad (202)$$

در معادله بالا t_G : دمای حباب خشک هوا، t_w : دمای حباب مرطوب هوا، h : ضریب انتقال حرارت جابجایی و λ : گرمای نهان تبخیر مایع است. مطابق معادله فوق در ناحیه Constant Rate سرعت خشک شدن تابعی است از h هوا و اختلاف دمای حباب خشک و مرطوب هوا.

در جریان ناآرام هوا به موازات یک سطح تخت:

$$h \sim u_\infty^{0.8} \rightarrow N_c \sim u_\infty^{0.8} \quad (203)$$

اما در جریان هوا از میان یک بستر جامد:

$$h \sim u_\infty^{0.37} \rightarrow N_c \sim u_\infty^{0.37} \quad (204)$$

مطابق معادله (۲۰۲):

$$N_c \sim (t_G - t_w) \quad (205)$$

یعنی هر چه اختلاف دمای حباب خشک و مرطوب هوا بیشتر شود سرعت خشک شدن بیشتر می‌شود. از مبانی رطوبت سنجی می‌دانیم هر چه رطوبت نسبی هوا (RH) کمتر باشد اختلاف دمای حباب خشک و مرطوب آن هم بیشتر است.

نکته: عمده آب تبخیر شده در ناحیه ریت ثابت از نوع رطوبت غیر پیوندی است.

۳- ناحیه خشک شدن با سرعت نزولی (Falling Rate)

در این ناحیه فیلم مایع پیوستگی سطحی خود را از دست می‌دهد و روی سطح جامد لکه‌های خشکی ظاهر می‌شود. در این ناحیه باید رطوبت از درون جامد نفوذ کند تا به سطح برسد. مکانیزم اصلی انتقال حرارت از نوع هدایتی و مکانیزم انتقال جرم از نوع نفوذ است. خشک شدن در ناحیه ریت نزولی از قانون دوم فیک پیروی می‌کند لذا انتظار می‌رود که زمان لازم برای خشک شدن با مجذور ضخامت (S^2) مناسب باشد.

نکته: در این ناحیه سرعت خشک شدن مستقل از سرعت هواست چون مکانیزم انتقال حرارت هدایتی است.

در این ناحیه رطوبت در سطح خشک شده جامد برابر رطوبت تعادلی است و دمای سطح خشک شده جامد برابر دمای حباب خشک هوا (t_G) است.

رطوبتی که در آن مکانیزم خشک شدن عوض می‌شود رطوبت بحرانی (X_c) نامیده می‌شود.

۱۰-۲-۲- بررسی مکانیزم و منحنی خشک شدن در جامدات متخلخل

در شکل زیر نمونه‌ای از منحنی‌های خشک شدن یک جامد متخلخل ارائه شده است. مطابق این شکل چهار ناحیه اصلی در منحنی خشک شدن جامدات متخلخل (porous) وجود دارد:

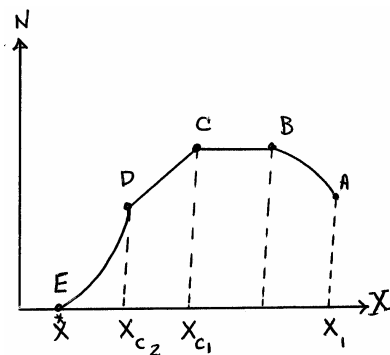
یادداشت:

.....

.....

.....

.....



۱- ناحیه تنظیمات دمایی اولیه (AB) مشابه جامدات غیر متخلخل

۲- ناحیه سرعت ثابت خشک شدن (BC) مشابه جامدات غیر متخلخل

۳- ناحیه موئینگی (Capillary) (CD)

در این ناحیه آب درون لوله‌های موئین جامد خارج می‌شود. در این ناحیه سرعت خشک شدن به ازای واحد سطح مرطوب ثابت می‌ماند. اما سرعت به ازای سطح کل (شامل سطح مرطوب و سطح خشک) کاهش می‌یابد. چون با پیشرفت فرآیند خشک شدن درصد ناحیه خشک افزایش یافته و درصد سطح مرطوب کاهش می‌یابد.

نکته : عوامل اثرگذار بر خشک شدن در ناحیه Capillary مشابه ناحیه Constant Rate فرض می‌شود.

۴- ناحیه ریت نزولی نفوذ (DE)

مشابه ناحیه ریت نزولی نفوذ در جامدات غیر متخلخل است.

۱۰-۳- محاسبه زمان خشک شدن

با توجه به معادله (۲۰۱) زمان لازم برای خشک شدن از معادله زیر به دست می‌آید:

$$t = -\frac{L_s}{A} \int_{X_1}^{X_2} \frac{dx}{N} \quad (206)$$

در ناحیه constant Rate زمان لازم برای خشک شدن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$t = \frac{L_s}{AN_c} (X_1 - X_2) \quad (207)$$

مطابق این معادله زمان لازم برای خشک شدن در ناحیه ریت ثابت به عوامل زیر بستگی دارد:

(۱) زمان متناسب با ضخامت جامد مرطوب است (S)

(۲) زمان متناسب با عکس شدت ثابت خشک شدن (N_c) است لذا:

$$t \sim \frac{1}{N_c} \rightarrow t \sim \frac{1}{h}, t \sim \frac{1}{(t_G - t_w)} \quad (208)$$

بنابراین هر چه سرعت هوا (u_∞) بیشتر شود و اختلاف دمای حباب خشک و مرطوب آن بیشتر شود زمان لازم برای خشک شدن کمتر می‌شود.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

در صورتی که در ناحیه ریت نزولی رابطه N با X خطی فرض شود:

$$N = aX + b \quad (209)$$

$$N = \frac{N_c}{X_c - X^*} (X - X^*) \quad (210)$$

زمان لازم برای خشک شدن در این ناحیه از معادله زیر به دست می‌آید.

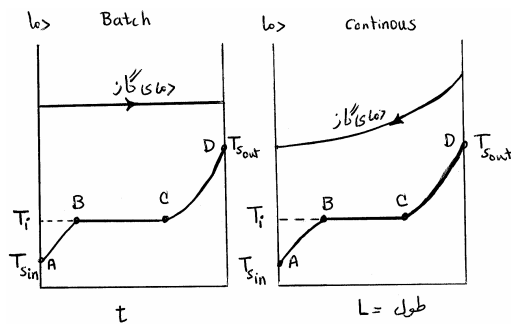
$$t = -\frac{L_s}{A} \int_{X_1}^{X_2} \frac{dx}{\frac{N_c}{X_c - X^*} (X - X^*)} = \frac{L_s}{AN_c} (X_c - X^*) \text{Ln} \frac{X_1 - X^*}{X_2 - X^*} \quad (211)$$

اگر خشک شدن از ناحیه ریت ثابت شروع شود ($X_1 > X_c$) و در ناحیه ریت نزولی به پایان برسد ($X_2 < X_c$) زمان لازم برای خشک شدن از معادله زیر به دست می‌آید:

$$t = \frac{L_s}{AN_c} \left[(X_1 - X_c) + (X_c - X^*) \text{Ln} \frac{X_c - X^*}{X_2 - X^*} \right] \quad (212)$$

۱۰-۴- منحنی‌های توزیع دما در خشک‌کن‌ها

در شکل زیر منحنی‌های توزیع دما در خشک‌کن Batch و در خشک‌کن پیوسته ارائه شده است:



همانگونه که از شکل‌های فوق بر می‌آید در ناحیه Constant Rate (ناحیه BC) دمای جامد مرطوب ثابت می‌ماند چون گرما صرفاً باعث تبخیر آب می‌شود. در ناحیه ریت نزولی و با پدید آمدن لکه‌های خشک در جامد دمای جامد افزایش می‌یابد.

دمای اشباع سطحی در ناحیه ریت ثابت (T_i) در خشک‌های Direct همان دمای حباب مرطوب هواست ولی در خشک‌کن‌های غیر مستقیم (Indirect) برابر دمای جوش مایع در فشار عملیاتی است.

$T_{s,out}$ و $T_{s,in}$ نیز به ترتیب دمای جامد ورودی و خروجی از خشک‌کن است. عده واحدهای انتقال در خشک‌کن Direct از معادله زیر به دست می‌آید.

$$NTU = \text{Ln} \left(\frac{T_{h,in} - T_w}{T_{h,out} - T_w} \right) \quad (213)$$

$T_{h,in}$ و $T_{h,out}$ دمای هوای گرم ورودی و خروجی است و T_w دمای حباب مرطوب هواست.

یادداشت:

.....

.....

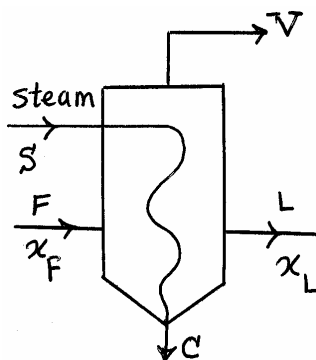
.....

.....

۱۱- تبخیرکننده‌ها (Evaporator)

اگر به محلول جامد در مایعی گرما داده شود حلال آن تبخیر می‌شود اما به علت اختلاف زیاد نقطه جوش مایع و جامد، عملاً جامدی وارد فاز بخار نمی‌شود و فاز گاز فقط شامل بخارات حلال است. تبخیر نیز یک فرآیند توأم انتقال جرم و حرارت است. تبخیر به منظور تغلیظ و کاهش حجم محلول به کار می‌رود که موجب کاهش هزینه‌های حمل و نگهداری محلول می‌شود. فرآیند تبخیر یکی از روش‌های متداول شیرین‌سازی آب دریاست که در آن بخارات حاصله از فرآیند تبخیر پس از چگالش به عنوان محصول آب شیرین جمع‌آوری می‌شوند.

در شکل زیر شماتیک ساده یک تبخیرکننده نشان داده شده است.



در تبخیرکننده‌ها از steam به عنوان سیال گرم‌کننده استفاده می‌شود. x_L و x_F به ترتیب غلظت جامد (کسر وزنی) در خوراک و در مایع تغلیظ شده خروجی می‌باشند. V نیز بخار تولیدی در این تبخیرکننده است. موازنه جرم و انرژی در این تبخیرکننده به صورت زیر است:

$$F = L + V \quad (214)$$

$$Fx_F = Lx_L \quad (215)$$

$$FH_F + S\lambda_s = LH_L + VH_v \quad (216)$$

$$Q = S\lambda_s = u \cdot A \cdot \Delta t \quad (217)$$

در معادلات بالا Q : بار حرارتی تبخیرکننده، u : ضریب کلی انتقال حرارت و Δt : اختلاف دمای Steam و محلول است.

در تبخیرکننده‌ها ظرفیت (Capacity) و اقتصاد (Economy) تبخیرکننده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Capacity} = V \quad (218)$$

$$\text{Economy} = \frac{V}{S} \quad (219)$$

برای ازدیاد اقتصاد تبخیرکننده دو روش اصلی وجود دارد:

- ۱- چند مرحله‌ای کردن تبخیرکننده
- ۲- استفاده از سیستم‌های با تراکم مجدد بخار

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۱۱-۱- تبخیرکننده‌های چند مرحله‌ای

در تبخیرکننده‌های چند مرحله‌ای 4 روش اصلی برای خوراک‌دهی تبخیرکننده وجود دارد:

۱- خوراک‌دهی Forward

در این روش برای انتقال مایع بین مراحل نیاز به پمپ نداریم ولی در مسیر حرکت مایع به علت افزایش غلظت و کاهش دما ویسکوزیته محلول زیاد می‌شود. این روش برای محصولاتی که در حین تغلیظ مشکل ویسکوزیته بالا پیدا می‌کنند مناسب نیست.

۲- خوراک‌دهی Backward

در این روش خوراک از مرحله آخر وارد می‌شود. لذا در این تبخیرکننده برای انتقال مایع نیاز به پمپ داریم. در جهت حرکت مایع به علت افزایش غلظت ویسکوزیته محلول زیاد می‌شود اما در همین مسیر به علت ازدیاد دما ویسکوزیته محلول کم می‌شود. این روش برای تغلیظ محصولاتی که مشکل ویسکوزیته دارند مناسب است.

۳- خوراک‌دهی Mixed

در این تبخیرکننده در مسیر انتقال محلول درون مراحل تبخیرکننده ترکیبی از الگوی forward و backward اتفاق می‌افتد و بنابراین از مزایا و معایب هر دوی این روش‌ها به صورت نسبی بهره‌مند می‌شود.

استفاده از الگوی جریان مختلط (Mixed) به شدت وابسته به تجربه است اما اگر بتوانیم نشان دهیم نباید جریان از نوع forward و backward باشد می‌توان از تبخیرکننده مختلط استفاده کرد.

مثال: در یک تبخیرکننده خوراک مصرفی سرد است و محصول نهایی غیر ویسکوز است کدام الگوی خوراک‌دهی در این تبخیرکننده مناسب است؟

خوراک سرد باشد نباید وارد مرحله اول شود (forward) چون اختلاف دمای این مرحله و خوراک خیلی بالاست. از طرفی اگر محصول نهایی غیر ویسکوز باشد نیازی به استفاده از الگوی Backward نداریم لذا برای این سیستم استفاده از الگوی تغلیظ مختلط مناسب است.

۴- خوراک‌دهی Parallel

در این روش خوراک بین مراحل تقسیم می‌شود و محصول هر مرحله از آن مرحله خارج می‌شود این روش برای تغلیظ محلول‌هایی که نزدیک به نقطه تبلور هستند مناسب است.

اقتصاد یک تبخیرکننده چند مرحله‌ای به‌طور تقریبی از معادله زیر به دست می‌آید:

$$E \approx 0.9N$$

(۲۲۰)

در معادله بالا N: عدد مراحل است. به عنوان مثال در یک تبخیرکننده سه مرحله‌ای اقتصاد تبخیرکننده تقریباً برابر ۲.۷ است.

عدد مراحل بهینه در محلول‌های رقیق بین ۸ تا ۱۲ مرحله است و در محلول‌های غیررقیق بین ۳ تا ۵ مرحله است.

۱۱-۲- تبخیرکننده با تراکم مجدد بخار

در این روش بخار خروجی از تبخیرکننده پس از عبور از کمپرسور فشرده شده و دمای آن به دمای steam ورودی رسیده و با آن مخلوط می‌شود. اقتصاد یک تبخیرکننده با تراکم مجدد بخار معادل اقتصاد یک تبخیرکننده ۱۰ تا ۱۴ مرحله‌ای است.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

نکته : از این تبخیرکننده‌ها برای تغلیظ مواد رادیواکتیو استفاده می‌شود. در تغلیظ این مواد مهم است سطح آغشته به مواد حداقل باشد.

۱۱-۳- صعود نقطه جوش (BPE)

وجود ناخالصی جامد در محلول باعث صعود نقطه جوش می‌شود. BPE عبارت است از اختلاف نقطه جوش محلول جامد در مایع و نقطه جوش حلال خالص در فشار یکسان:

$$BPE = t - t' \quad (۲۲۱)$$

t: نقطه جوش محلول و t' نقطه جوش آب خالص در فشار مورد نظر است.

نکته : نقطه جوش آب خالص (حلال) فقط تابع فشار است و نقطه جوش محلول هم تابع فشار و هم تابع غلظت جامد در مایع است اما صعود نقطه جوش (BPE) فقط تابع غلظت بوده و مستقل از فشار است.

نکته : بخار خروجی از تبخیرکننده به صورت سوپرهیت است اگر $BPE \neq 0$ باشد اما اگر $BPE = 0$ باشد حالت بخار خروجی از تبخیرکننده به صورت بخار اشباع خواهد بود.

مثال: محلول NaOH در آب در فشار یک اتمسفر در دمای 135°C می‌جوشد اگر فشار کم شود به گونه‌ای که آب خالص در دمای 60°C بجوشد در این فشار محلول فوق در چه دمایی می‌جوشد:

$$BPE = 135 - 100 = 35^\circ\text{C} \quad P_1 = 1\text{atm}$$

$$BPE = 35 = t_2 - 60 \quad P_2 < 1\text{atm}$$

$$t_2 = 95^\circ\text{C}$$

۱۱-۴- نمودار میله‌ای دما در تبخیرکننده چند مرحله‌ای

	Δt_1
$t_1 =$ دمای جوش در مرحله اول	BPE ₁
$t'_1 =$ دمای جوش آب خالص در مرحله اول	Δt_2
$t_2 =$ دمای جوش محلول در مرحله دوم	BPE ₂
$t'_2 =$ دمای جوش آب خالص در مرحله دوم	Δt_3
$t_3 =$ دمای جوش محلول در مرحله سوم	BPE ₃
$t'_3 =$ دمای جوش آب خالص در مرحله سوم	

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

در شکل فوق نمودار میله‌ای دما در یک تبخیرکننده سه مرحله‌ای نشان داده شده است. چون بخار خروجی از هر مرحله سوپرهیت است لذا از دمای بخار (V) به اندازه BPE کم می‌شود تا به دمای اشباع برسد. این بخار پس از رسیدن به دمای اشباع نقش steam برای مرحله بعدی را ایفا می‌کند. با توجه به نمودار فوق:

$$\Delta t = t_s - t'_3 \quad (222)$$

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 \quad (223)$$

$$\Delta t_1 = t_s - t_1 \quad (224)$$

$$\Delta t_2 = t'_1 - t_2 \quad (225)$$

$$\Delta t_3 = t'_2 - t_3 \quad (226)$$

با توجه به این نمودار رابطه Δt موثر و ظاهری مطابق معادله زیر بیان می‌شود:

$$\Delta t = \text{مؤثر} \Delta t - \sum \text{BPE}_i \quad (227)$$

Δt مؤثر به صورت زیر بین مراحل تقسیم می‌شود:

$$\Delta t_1 = \frac{1}{\sum \frac{1}{u_i}} \cdot \Delta t \quad \text{مؤثر} \quad (228)$$

$$\Delta t_2 = \frac{1}{\sum \frac{1}{u_i}} \cdot \Delta t \quad \text{مؤثر} \quad (229)$$

$$\Delta t_3 = \Delta t \quad \text{مؤثر} - (\Delta t_1 + \Delta t_2) \quad (230)$$

u_1 و u_2 و ... ضرایب کلی انتقال حرارت در مراحل مختلف تبخیرکننده است.

۱۱-۵- انواع تبخیرکننده‌ها و کاربردهای آنها

تبخیرکننده‌ها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

۱- تبخیرکننده‌های پوسته و لوله (shell & Tube)

۲- تبخیرکننده‌های همزده (Agitated)

تبخیرکننده‌های پوسته و لوله شامل تبخیرکننده‌های زیر هستند:

۱- تبخیرکننده فیلم ریزان (Falling film)

مایع به صورت فیلم ریزان از جداره داخلی لوله‌های قائم وارد تبخیرکننده می‌شود و steam به عنوان سیال گرم در بیرون لوله جریان دارد. این تبخیرکننده‌ها برای تغلیظ مواد حساس به دما مناسب هستند.

۲- تبخیرکننده‌های با گردش اجباری (Forced Circulation)

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

در این تبخیرکننده‌ها به علت چرخش بخشی از مایع تغلیظ شده محدوده تغلیظ زیاد است ($X_L - X_F =$ بزرگ). این تبخیرکننده‌ها برای تغلیظ محلول‌های ویسکوز مناسب هستند (به علت h بالایی که ایجاد می‌کنند) همچنین از این تبخیرکننده‌ها در تغلیظ مواد خورنده (مثل محلول NaOH) استفاده می‌شود. چون برای تغلیظ مواد خورنده جنس تبخیرکننده از میان فلزات گران قیمت (مثل نیکل، تیتانیوم و ...) انتخاب می‌شود لذا بالا بودن h در این تبخیرکننده‌ها باعث کاهش سطح مورد نیاز در این تبخیرکننده می‌شود که کاهش هزینه‌های خرید تبخیر کننده را در پی دارد.

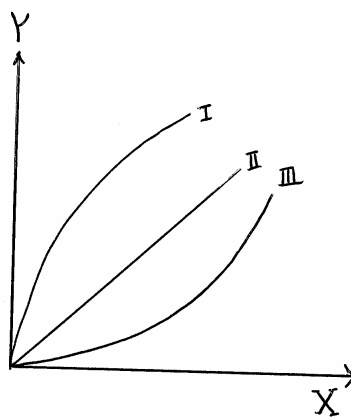
همچنین از این تبخیرکننده‌ها در تغلیظ محلول‌های کفزا هم استفاده می‌شود چون جداکننده مایع و بخار این تبخیرکننده‌ها مجهز به بافل می‌باشد.

در صورتی که ویسکوزیته محلول کم باشد با روش Natural Circulation هم می‌توان به ضریب انتقال حرارت قابل قبولی دست پیدا کرد. تبخیرکننده‌های از نوع همزن دار (Agitated) زمانی استفاده می‌شود که ویسکوزیته محلول خیلی بالا باشد (مثلاً: 1000 سانتی‌پواز). این تبخیرکننده‌ها بالاترین ضریب انتقال را بین همه انواع تبخیرکننده‌ها دارند.

۱۲- جذب سطحی (Adsorption)

در جذب سطحی انتقال یک جزء از فاز سیال (گاز یا مایع) به فاز جامد صورت می‌گیرد. در این فرآیند سیال حاوی مقدار اندکی از حل شونده است اما همین مقدار اندک هم باید جدا شود. مثلاً پساب یک واحد آب فلزکاری حاوی 20 ppm فلز کادمیم (Cd) است اما قوانین زیست محیطی حد مجاز فلزات سنگین در پساب را در حدود کمتر 1 ppm قابل قبول می‌داند لذا همین مقدار اندک کادمیم هم باید جدا شود.

مهم‌ترین ویژگی جذب سطح ویژه بالا و گزینش پذیری بالای آن است. از مهم‌ترین جاذب‌ها می‌توان به زئولیت‌ها، آلومینا، سیلیکاژل و کربن فعال اشاره کرد.



در شکل فوق منحنی‌های تعادلی برای چند جاذب مختلف نشان داده شده است. جاذب خوب جاذبی است که برای یک غلظت معین حل شونده در محلول میزان جذب بالاتری داشته باشد (یعنی در Y ثابت، X بزرگتری داشته باشد). لذا مطابق شکل فوق جاذب III بهتر از جاذب II و جاذب II بهتر از جاذب I است. به بیان دیگر برای دست یافتن به میزان جداسازی معینی، مصرف جاذب III کمتر از جاذب II و I است. و یا با مصرف مقدار معینی از جاذب، جاذب III درصد جداسازی بالاتری را ایجاد می‌کند.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

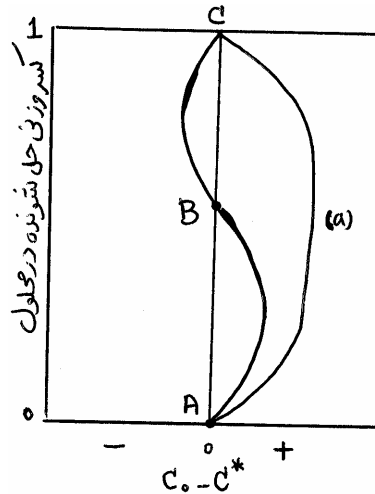
یکی از روابطی که برای بیان تعادل در جذب سطحی محلول‌های رقیق مایع استفاده می‌شود معادله فرنلیچ است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Y = mX^n \quad (۲۳۱)$$

مطابق این معادله جذب خوب جذبی است که n بزرگ و m کوچکی داشته باشد. جذب‌های خوب دارای n در محدوده 2 تا 10 هستند.

۱۲-۱- جذب ظاهری

اگر C_0 غلظت اولیه حل شونده در محلول باشد و C^* غلظت تعادلی حل شونده و پس از انجام جذب باشد، $C_0 - C^*$ جذب ظاهری گفته می‌شود یعنی اختلاف غلظت اولیه و نهایی (پس از جذب) در شکل زیر نمونه‌ای از منحنی جذب ظاهری ارائه شده است. در شکل (a) جذب ظاهری همواره مثبت است اما در شکل ABC در فاصله B تا C جذب ظاهری منفی شده است. یعنی غلظت حل شونده پس از انجام جذب (C^*) از غلظت اولیه آن (C_0) بیشتر شده است این مسئله به دلیل جذب رقابتی بین حلال و حل شونده اتفاق افتاده است. در فاصله BC حلال بیش از حل شونده جذب سطح جذب شده لذا غلظت حل شونده در محلول پس از انجام جذب زیاد شده است.



یادداشت:

.....

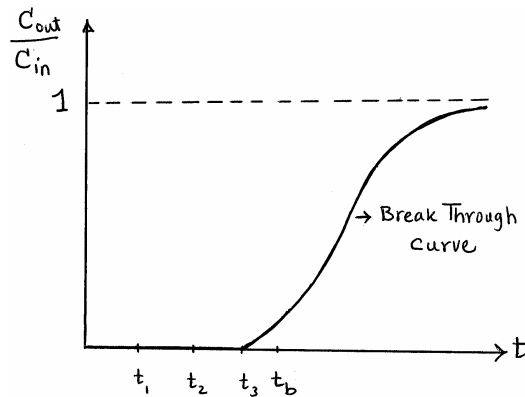
.....

.....

.....

۱۲-۳- جذب سطحی در بسترهای ثابت

در این دستگاه خوراک از میان یک بستر ثابت از جاذب عبور می‌نماید و به تدریج و با گذشت زمان لایه‌های بیشتری از این بستر جاذب اشباع می‌شود تا در نهایت تمام ارتفاع بستر جاذب اشباع شود در این شرایط انتقال جرم متوقف شده و خوراک با غلظتی برابر با غلظت ورودی دستگاه را ترک می‌کند. این بسترها به صورت دابل استفاده می‌شوند که همزمان در یکی جذب سطحی و در دیگری دفع سطحی انجام می‌شود. در شکل زیر تغییرات غلظت خروجی از بستر جاذب با زمان نشان داده شده است:



همان‌گونه که ملاحظه می‌شود تا قبل از زمان t_3 عملاً غلظت حل‌شونده در خروجی در حدود صفر است. اما با گذر زمان و اشباع شدن طول قابل توجهی از بستر غلظت در خروجی افزایش می‌یابد. در نقطه شکست (t_b , Break Point) نسبت غلظت خروجی به ورودی در حدود 0.05 تا 0.1 است. منحنی فوق منحنی Break Through نامیده می‌شود و افزایش ناگهانی غلظت در خروجی موج جذب (Adsorption Wave) نامیده می‌شود.

نکته : زمان شکست با دبی و غلظت خوراک ورودی نسبت عکس دارد (یعنی در دبی‌ها و غلظت‌های بالا زمان اشباع شدن کوتاهتر است)، زمان شکست با طول بستر نسبت مستقیم دارد. (یعنی هر چه طول بستر بیشتر باشد دیرتر اشباع می‌شود). هر چه اندازه ذرات جاذب هم کوچک شود سطح ویژه و به تبع آن ظرفیت جاذب زیاد می‌شود که باعث طولانی شدن زمان اشباع شدن بستر می‌شود.

نکته : به فرآیند دفع سطحی به کمک حلال Elution گفته می‌شود.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

بخش چهارم

۱۳ - ۱ - نمونه سؤالات مهم و کلیدی

۱ - هوای عاری از نفتالین با سرعت ظاهری V_0 از بستر حاوی کره‌های نفتالین به ارتفاع L عبور می‌کند اگر سطح ویژه بستر a و ضریب انتقال جرم k_c باشد. غلظت نفتالین در هوای خروجی تقریباً چه قدر است؟ (فشار بخار نفتالین P^* ، دمای مطلق T و R ثابت عمومی گازهاست.)

$$C_{Aout} = \frac{2P^*}{RT \left(1 + \frac{2V_0}{aLk_c}\right)} \quad (۲)$$

$$C_{Aout} = \frac{P^*}{RT \left(1 + \frac{2V_0}{aLk_c}\right)} \quad (۱)$$

$$C_{Aout} = \frac{2P^*}{RT \left(1 + \frac{V_0}{aLk_c}\right)} \quad (۴)$$

$$C_{Aout} = \frac{P^*}{RT \left(1 + \frac{V_0}{aLk_c}\right)} \quad (۳)$$

۲ - نفتالین به شکل یک استوانه بلند به طول L و شعاع R در هوای ساکن و در دمای نسبتاً پایین تصعید می‌شود. سرعت انتقال جرم

\dot{m}_A برابر است با: (جرم مولکولی $M_A : A$ و غلظت روی سطح استوانه (حد اشباع) C_A^*)

$$\dot{m}_A = \frac{2\pi L M_A D_{AB} (C_A^* - C_A)}{(1 - x_A)(r - R)} \quad (۲)$$

$$\dot{m}_A = \frac{2\pi L M_A D_{AB} (C_A^* - C_A)}{L_n \left(\frac{r}{R}\right)} \quad (۱)$$

$$\dot{m}_A = \frac{2\pi L M_A D_{AB} (C_A^* - C_A)}{(1 - x_A) L_n \left(\frac{r}{R}\right)} \quad (۴)$$

$$\dot{m}_A = \frac{2\pi L M_A D_{AB} (C_A^* - C_A)}{r - R} \quad (۳)$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۳- در $T = 300\text{ k}$ ضریب نفوذ A در B در محلول رقیق A، $D_{AB} = 2 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ است. اگر دمای محول به 330 k افزایش یابد.

ویسکوزیته مایع 45% کاهش می‌یابد. در این دما ضریب نفوذ بر حسب $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ چه قدر است؟

(۱) $2.2 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ (۲) $4 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ (۳) $2.3 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ (۴) $4.9 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

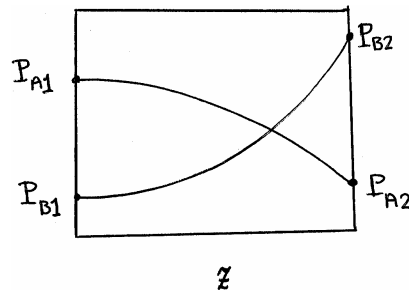
۴- واکنش بسیار سریع $C(g) \rightarrow 3A(g) + B(s)$ در سطح کاتالیست انجام می‌شود در صورتی که غلظت A در توده گاز y_A باشد و

ضخامت فیلم سیال اطراف سطح کاتالیست δ باشد شار انتقال جرم در حالت پایدار برابر است با:

(۱) $N_A = -\frac{3}{2} \frac{D_{AB} P_t}{RT\delta} \ln\left(1 - \frac{2}{3} y_A\right)$ (۲) $N_A = -\frac{2}{3} \frac{D_{AB} P_t}{RT\delta} \ln\left(1 - \frac{2}{3} y_A\right)$

(۳) $N_A = -\frac{3}{2} \frac{D_{AB} P_t}{RT\delta} \ln\left(1 - \frac{2}{3} y_A\right)$ (۴) $N_A = \frac{3}{2} \frac{D_{AB} P_t}{RT\delta} \ln\left(1 - \frac{2}{3} y_A\right)$

۵- پروفایل غلظت اجزاء A و B در نفوذ مولکولی مطابق شکل روبرو است. در مورد این سیستم می‌توان گفت:



(۱) در این سیستم نفوذ متقابل گازهای A و B انجام می‌شود.

(۲) تصعید نفتالین (A) به درون هوا در دمای نسبتاً کم انجام می‌شود.

(۳) تبخیر آب به درون هوا در دمای نسبتاً بالا (نزدیک نقطه جوش) انجام می‌شود.

(۴) تقطیر دو جزئی در فشار نسبتاً پائین انجام شده است.

۶- در تشابه پدیده‌هایی انتقال جرم، حرارت و سیالات کدام گزینه صحیح نیست؟

(۱) در جریان از روی سطوح منحنی نمی‌توان از تشابه با سیالات استفاده کرد.

(۲) در جریان درهم لازم است که در شرایط تشابه $E_D = E_H = E_V$ باشد.

(۳) در حالت شار حرارتی ثابت در دیواره نمی‌توان از تشابه با سیالات استفاده کرد.

(۴) در شدت‌های بالای انتقال جرم، محاسبه ضرائب انتقال جرم از تشابه با خطای کمتری همراه است.

۷- کدام گزینه در مورد تئوری فیلمی صحیح نیست:

(۱) در این تئوری شرایط انتقال جرم پایدار فرض می‌شود.

(۲) ضریب انتقال جرم جابجائی با ضریب نفوذ مولکولی متناسب است.

(۳) زمان تماس دو فاز کوتاه است.

(۴) سطح انتقال جرم آرام است و برای سطوح جامد - سیال استفاده می‌شود.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

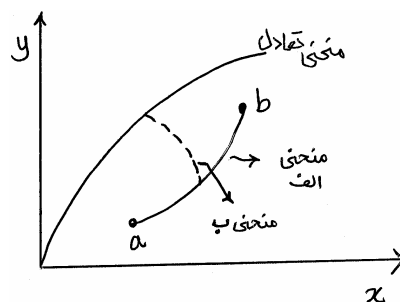
۸ - در یک فرایند انتقال جرم میان دو فاز عدد اشمیت اندازه‌گیری شده برای دو فاز $Sc_1 = 50000$ و $Sc_2 = 0.95$ است. این فرایند:

- (۱) جذب سطحی از یک محلول مایع است.
 (۲) استخراج - مایع - مایع است.
 (۳) جذب گاز A در مایع ویسکوز است.
 (۴) خشک کردن یک جامد حاوی رطوبت بالای مایع است.

۹ - انتقال جزء A از فاز گاز به مایع صورت می‌گیرد به نحوی که انتقال جرم جزء (B) نیز وجود نداشته است. در صورتی که $F_L = F_G$ باشد و $y_{AG} = 0.8$ و $x_{AL} = 0.2$ باشد. آن‌گاه غلظت‌های اجزاء در مجاور فصل مشترک عبارت است (معادله منحنی تعادل را به صورت $y = x$ فرض کنید)

- (۱) $y_{Ai} = x_{Ai} = 0.4$ (۲) $y_{Ai} = x_{Ai} = 0.5$ (۳) $y_{Ai} = x_{Ai} = 0.6$ (۴) $y_{Ai} = x_{Ai} = 0.7$

۱۰ - کدام عبارت در مورد شکل زیر صحیح است؟



- (۱) منحنی الف ستون جذب و b بالای ستون است.
 (۲) منحنی الف ستون دفع و منحنی ب دفع همراه واکنش شیمیایی است.
 (۳) منحنی ستون الف ستون جذب و a بالای ستون است.
 (۴) منحنی الف ستون دفع و منحنی ب منحنی نیروی محرکه در موضعی خاص و b بالای ستون است.

۱۱ - معادله منحنی تعادل در یک فرایند گاز - مایع به صورت $y = 50x$ می‌باشد در این صورت:

- (۱) فاز مایع محدود کننده انتقال جرم است.
 (۲) فاز گاز محدود کننده انتقال جرم است.
 (۳) مقاومت دو فاز برابر است.
 (۴) مقاومت مایع 50 برابر گاز است.

۱۲ - یک صد مول بر ساعت از هوا که حاوی 12 درصد مولی H_2S می‌باشد وارد یک برج جذب ناهمسو می‌شود که در آن 90% از H_2S موجود در گاز ورودی توسط حلال خالص اتانول آمین بازیابی می‌شود. در صورتی که مقدار حلال مصرفی دو برابر مقدار حداقل آن باشد. شدت جریان حلال مصرفی در این برج به ازای هر مول هوای خالص برابر است (معادله تعادل به صورت $Y = 3X$ فرض شود)

- (۱) 2.7 (۲) 5.4 (۳) 1.8 (۴) 3.6

۱۳ - کدام عبارت در مورد ستون‌های پر شده و سینی‌دار صحیح نمی‌باشد؟

- (۱) برای فرایندهای تحت خلأ برج پر شده مناسب‌تر از سینی‌دار است.
 (۲) برای سیالات خورنده برج پر شده مناسب‌تر از سینی‌دار است.
 (۳) گرفتن جریان جانبی از برج سینی‌دار عملی‌تر از برج پر شده است.
 (۴) موجود مایع در برج‌های پر شده بیش از سینی‌دار است.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۱۴ - برای کاهش ماندگی مایع در گاز در ستون پرشده کدام راه حل مناسب تر است؟

- (۱) ازدیاد دبی گاز
(۲) ازدیاد دبی مایع
(۳) استفاده از ارتفاع خشک باز پرکن‌ها در بالای ستون (۴) هیچکدام

۱۵ - برای ازدیاد راندمان سینی در یک فرایند گاز - مایع لازم است:

- (۱) عمق مایع روی سینی زیاد شود
(۲) سطح ویژه حباب‌ها زیاد شود..
(۳) اندازه منافذ سینی درشت تر باشد.
(۴) موارد ۱ و ۲

۱۶ - اگر یک برج سینی‌دار که دارای ۴۰ سینی با راندمان ۵۰ درصد است با یک برج پرشده با $HETP = 0.4 \text{ m}$ جایگزین شود. افت

فشار گاز در این برج چند kpa خواهد شد اگر افت فشار به ازای واحد طول بستر $400 \frac{\text{pa}}{\text{m}}$ باشد؟

- (۱) ۳.۲ کیلو پاسکال (۲) ۴.۶ کیلو پاسکال (۳) ۶.۴ کیلو پاسکال (۴) ۱۲.۸ کیلو پاسکال

۱۷ - خوراک ورودی به یک برج تقطیر حاوی ۹۶ درصد مولی اتانول و ۴ درصد آب است محصولات این برج چه خواهند بود؟

- (۱) الکل خالص و آب خالص
(۲) الکل خالص و مخلوط ۹۰ درصد الکل و ۱۰ درصد آب
(۳) الکل خالص و مخلوط ۹۶ درصد الکل و ۴ درصد آب
(۴) آب خالص و مخلوط ۹۰ درصد الکل و ۱۰ درصد آب

۱۸ - در تقطیر Flash کدام گزینه صحیح است؟

- (۱) اگر تقطیر در دمای شبنم خوراک انجام شود، رقیق‌ترین مایع حاصل می‌شود.
(۲) اگر تقطیر در دمای حباب خوراک انجام شود غنی‌ترین بخار حاصل می‌شود.
(۳) دمای محفظه تقطیر بین دمای جوش خوراک و دمای شبنم خوراک متغیر است.
(۴) کلیه موارد فوق صحیح است.

۱۹ - خوراک ورودی به یک برج تقطیر حاوی ۴۰ درصد جزء فرار است در صورتی که معادلات خطوط کار این برج به صورت

$$y = 2x - 0.1 \text{ و } y = 0.6x + 0.32 \text{ باشد خوراک این برج:}$$

- (۱) خوراک ورودی به این برج حاوی ۵۰ درصد مایع اشباع و ۵۰ درصد بخار اشباع است.
(۲) خوراک به صورت بخار اشباع است.
(۳) خوراک به صورت مایع اشباع است.
(۴) خوراک ورودی به صورت فوق اشباع است.

۲۰ - در یک برج تقطیر در کدام یک از حالات زیر خوراک باید از سینی پایین تری وارد برج شود:

- (۱) مایع اشباع (۲) دوفازی (۳) بخار اشباع (۴) بخار سوپرهیت

۲۱ - حداقل نسبت جریان برگشتی به برج در کدام یک از حالات زیر دارای کمترین مقدار خواهد بود:

- (۱) خوراک ورودی فوق اشباع می‌باشد.
(۲) خوراک ورودی در دمای شبنم وارد شود.
(۳) خوراک ورودی در دمای جوش وارد شود.
(۴) خوراک ورودی سردتر از نقطه جوش وارد شود.

یادداشت:

.....

.....

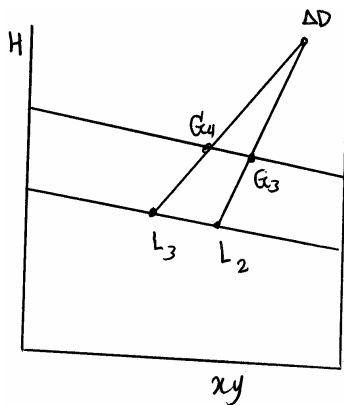
.....

.....

۲۲ - در صورتی که در یک برج تقطیر حالت ترمودینامیکی خوراک از مایع اشباع به بخار اشباع تبدیل شود، حداقل عده سینی‌های این برج چه تغییری می‌کند؟

- (۱) ثابت می‌ماند (۲) افزایش می‌یابد (۳) کاهش می‌یابد (۴) بسته به شرایط هر یک از سه گزینه

۲۳ - در یک برج تقطیر موقعیت نقاط تفاضل در صفحه $H-xy$ مطابق شکل نشان داده شده است. نسبت دبی مایع به بخار بین سینی‌های ۳ و ۴ برابر است با:



$$\overline{L_2 G_3} = 2.5$$

$$1.33 \quad (۱)$$

$$\overline{G_3 \Delta D} = 3$$

$$0.60 \quad (۲)$$

$$\overline{L_3 G_4} = 4$$

$$1.5 \quad (۳)$$

$$G_4 \Delta D = 6$$

$$0.55 \quad (۴)$$

۲۴ - از دیاد نسبت جریان برگشتی در برج تقطیر موجب کاهش کدام یک از موارد زیر می‌شود:

- (۱) قطر برج (۲) سطح حرارتی کندانسور (۳) سطح حرارتی ریویولر (۴) عده سینی‌ها

۲۵ - در یک برج تقطیر open steam در صورتی که بخار ورودی سوپرهیت باشد:

- (۱) در اولین سینی از پایین برج، به حالت نرمال نقطه شبنم باز می‌گردد.
 (۲) دبی بخار در سینی‌های پایین برج بیشتر از دبی بخار ورودی خواهد شد.
 (۳) افت فشار در سینی‌های پایین برج کمتر خواهد شد.
 (۴) موارد ۱ و ۲

۲۶ - در یک برج تقطیر شدت جریان محصول بالای برج (D) و شدت جریان محصول جانبی آن با هم برابر هستند ($S = D$).

در صورتی که محصول بالاسری برج حاوی ۹۵ درصد جزء فرار باشد و محصول جانبی آن حاوی ۶۵ درصد جزء فرار باشند محل تلاقی

خط کار بین S و F با خط $y = x$ برابر است با:

$$0.8 \quad (۴)$$

$$0.75 \quad (۳)$$

$$0.70 \quad (۲)$$

$$0.65 \quad (۱)$$

۲۷ - در مورد نقطه تفاضل در فرایند استخراج ناهمسو کدام گزینه صحیح است؟

- (۱) موقعیت ΔR_{\min} در دیاگرام مثلثی ارتباطی به شیب Tie-Line ندارد.
 (۲) موقعیت ΔR در دیاگرام مثلثی به شیب Tie-Line بستگی دارد.
 (۳) موقعیت ΔR_{\min} حتماً در سمت چپ دیاگرام مثلثی خواهد بود. اگر شیب Tie-Line مثبت باشد.
 (۴) گزینه ۲ و ۳ هر دو صحیح است.

یادداشت:

.....

.....

.....

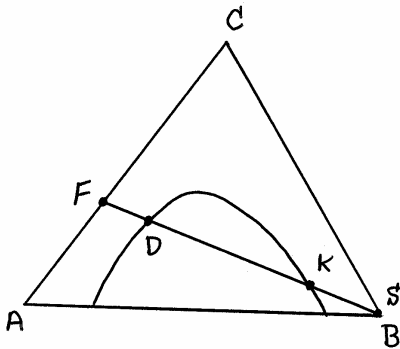
.....

۲۸ - در فرایند استخراج مایع - مایع ارتفاع معادل یک واحد تئوری در کدام یک از دستگاه‌های زیر کمتر است؟

- (۱) برج RDC (۲) برج پاششی (۳) برج سینی‌دار (۴) برج پرشده

۲۹ - خوراکی حاوی 50 درصد جزء C در یک واحد استخراج یک مرحله‌ای با حلال خالص در تماس قرار می‌گیرد. نسبت حداکثر حلال

به حداقل حلال مصرفی در این واحد برابر است با:



$$\overline{FD} = 2$$

$$\overline{DK} = 8$$

$$\overline{KS} = 2$$

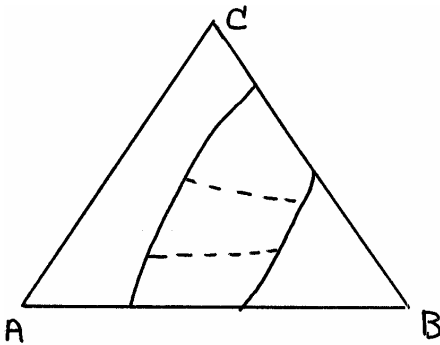
5 (۱)

10 (۲)

15 (۳)

25 (۴)

۳۰ - دیاگرام مثلثی در یک فرایند استخراج مطابق شکل زیر است در مورد این سیستم کدام گزینه صحیح است؟



(۱) A و C در غیاب B به طور جزئی در هم حل می‌شوند.

(۲) B و C در غیاب A به طور کامل در هم حل می‌شوند.

(۳) A و B در غیاب C به طور کامل در هم حل می‌شوند.

(۴) هیچکدام

۳۱ - در برج‌های سینی‌دار وقتی برای استخراج از مایعات استفاده می‌شوند HETP یا ارتفاع معادل یک واحد تئوری گزارش می‌شود این

امر به آن دلیل است که:

(۱) برج سینی‌دار همیشه یک برج دیفرانسیلی است.

(۲) گزارش HETP برای یک برج مرحله‌ای سینی‌دار اشتباه است.

(۳) HETP ارتباطی به دیفرانسیلی یا مرحله‌ای بودن برج ندارد.

(۴) چون در این فرایند در فاصله بین سینی‌ها هم انتقال جرم انجام می‌شود.

یادداشت:

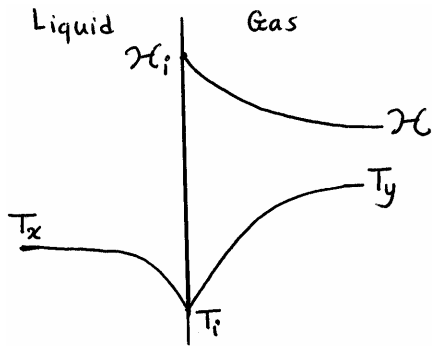
.....

.....

.....

.....

۳۲ - پروفایل دما و غلظت زیر مربوط به کدام دستگاه است؟



(۱) رطوبت‌گیر

(۲) کولر آبی

(۳) برج خنک‌کننده (بخش فوقانی)

(۴) برج خنک‌کن (بخش تحتانی)

۳۳ - عامل خنک‌شدن آب در یک برج خنک‌کن:

(۲) تبخیر آب به درون هوا با انرژی آب

(۱) تبخیر آب به درون هوا با انرژی هوا

(۴) موارد ۱ و ۳

(۳) اختلاف دمای آب و هوا

۳۴ - با عبور هوا از روی یک دسته لوله حاوی بخار داغ کدام یک از مشخصه‌های هوا ثابت می‌ماند؟

(۱) رطوبت نسبی هوا (۲) دمای حباب خشک (۳) دمای حباب مرطوب (۴) رطوبت مطلق هوا

۳۵ - در فرایند خشک شدن در ناحیه Falling Rate (با مکانیزم نفوذ) کدام عامل بر شدت خشک شدن بدون اثر است:

(۱) ضخامت نمونه مرطوب (۲) دمای هوای عبوری (۳) سرعت هوای عبوری (۴) هیچکدام

۳۶ - در فرایند خشک شدن در ناحیه constant Rate عبارت صحیح نمی‌باشد:

(۱) سرعت خشک شدن مستقل از نوع جسم (جامد مرطوب) است.

(۲) رطوبت موجود در جسم به صورت unbound است.

(۳) دمای سطح جسم مرطوب همواره معادل دمای مرطوب هوا است.

(۴) خشک شدن به صورت تبخیر سطحی از یک فیلم پیوسته در سطح جم انجام می‌شود.

۳۷ - در ارتباط با رطوبت پیوندی و غیر پیوندی کدام گزینه صحیح است؟

(۱) جامدی که دارای رطوبت غیر پیوندی است فشار بخاری معادل فشار بخار آب خالص در همان دما ایجاد می‌کند.

(۲) جامدی که دارای رطوبت پیوندی است فشار بخاری کمتر از فشار بخار آب خالص در همان دما ایجاد می‌کند.

(۳) آب تبلور موجود در یک جامد رطوبت پیوندی محسوب می‌شود.

(۴) هر سه مورد

۳۸ - کدام عبارت درباره خشک شدن در ناحیه capillary (مویینگی) صحیح نمی‌باشد؟

(۱) در ناحیه ریت نزولی اتفاق می‌افتد.

(۲) عموماً در اجسام متخلخل مشاهده می‌شود.

(۳) میزان تبخیر نسبت به حالت نفوذ بیشتر است.

(۴) سرعت خشک شدن در این حالت مستقل از سرعت هوای عبوری است.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۳۹- در صورتی که غلظت خروجی از تبخیر کننده زیاد باشد به طوری که امکان پدیده نمکی شدن وجود داشته باشد بهترین راه جلوگیری از آن کدام یک از عوامل زیر می باشد.

(۱) افزایش دبی خوراک (۲) افزایش دمای خوراک (۳) افزایش فشار تبخیرکننده (۴) کاهش فشار تبخیرکننده

۴۰- زمان نقطه شکست در منحنی عبور جذب (Break through) در یک بستر ثابت پر شده از جاذب با کاهش کدام یک از عوامل زیر کاهش می یابد؟

(۱) اندازه ذرات جاذب (۲) دبی خوراک (۳) طول بستر (۴) غلظت جذب شونده در خوراک

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۱۳ - ۲ - پاسخ سئوالات نمونه

۱ - گزینه ۲ درست است.

$$G_A = N_A \cdot A_{\text{mass}}$$

نرخ انتقال جرم:

$$A_{\text{mass}} = ALa$$

سطح انتقال جرم:

$$N_A = K_C \left[\frac{(C_A^* - 0) + (C_A^* - C_{A\text{out}})}{2} \right]$$

شار انتقال جرم:

$$G_A = (V_0 A)(C_{A\text{out}} - 0)$$

نرخ انتقال جرم:

ترم‌های $(C_A^* - 0)$ و $(C_A^* - C_{A\text{out}})$ به ترتیب نیروی محرکه در فاز گاز در ورودی و خروجی دستگاه است و A سطح مقطع برج است. با توجه به معادلات بالا خواهیم داشت:

$$V_0 A C_{A\text{out}} = K_C \left[\frac{2C_A^* - C_{A\text{out}}}{2} \right] ALa$$

$$C_{A\text{out}} = \frac{2C_A^*}{\left[1 + \frac{2V_0}{aLK_C} \right]} = \frac{2P^*}{RT \left[1 + \frac{2V_0}{aLK_C} \right]}$$

۲ - گزینه ۱ درست است.

$$N_A = -D_{AB} \frac{dc_A}{dr} + \frac{C_A}{C} \sum N_i$$

چون تصعید در دمای پائین انجام می‌شود لذا فشار بخار و غلظت در هوا ناچیز خواهد بود.

لذا از ترم $\frac{C_A}{C} \sum N_i$ در معادله بالا صرف‌نظر می‌کنیم:

$$N_A = -D_{AB} \frac{dc_A}{dr}$$

$$\dot{m}_A = N_A \cdot M_A (2\pi rL)$$

$$\dot{m}_A = \frac{2\pi L D_{AB} M_A \int_{C_A^*}^{C_A} dC_A}{\int_R^r \frac{dr}{r}}$$

$$\dot{m}_A = \frac{2\pi L D_{AB} M_A (C_A^* - C_A)}{\text{Ln} \left(\frac{r}{R} \right)}$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۳ - گزینه ۲ درست است.

$$\frac{D_{AB_2}}{D_{AB_1}} = \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{\mu_1}{\mu_2}$$

$$D_{AB_2} = 2 \times 10^{-9} \times \frac{330}{300} \times \frac{\mu_1}{0.55\mu_1} = 4 \times 10^{-9} \frac{m^2}{s}$$

۴ - گزینه ۳ درست است.

$$\frac{N_A}{3} = \frac{N_C}{-1} \quad (N_B = 0, \text{ جزء جامد } B)$$

$$\frac{N_A}{\sum N_i} = \frac{N_A}{N_A - \frac{1}{3}N_A} = \frac{3}{2}$$

از معادله (22) در بخش (۲ - ۴) داریم:

$$N_A = \frac{3 D_{AB} P_t}{2 RT\delta} \ln \left[\frac{\frac{3}{2} - 0}{\frac{3}{2} - y_A} \right]$$

$$N_A = -\frac{3 D_{AB} P_t}{2 RT\delta} \ln \left(1 - \frac{2}{3} y_A \right)$$

۵ - گزینه ۳ درست است.

در دماهای بالا فشار بخار آب بالاتر بوده و لذا تلاقی منحنی‌های غلظت A و B امکان پذیر می‌شود.

۶ - گزینه ۴ درست است.

۷ - گزینه ۳ درست است.

۸ - گزینه ۳ درست است.

Sc = 50000 نشان دهنده فاز مایع ویسکوز است و Sc = 0.95 نشان دهنده فاز گاز است.

۹ - گزینه ۳ درست است.

مطابق معادله (65) و با توجه به اینکه $\frac{N_A}{\sum N_i} = 1$ است خواهیم داشت:

$$\left[\frac{1 - y_{Ai}}{1 - 0.8} \right] = \left[\frac{1 - 0.2}{1 - x_{Ai}} \right]$$

$$(1 - y_{Ai})(1 - x_{Ai}) = 0.16$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

با توجه به اینکه معادله منحنی تعادل به صورت $y = x$ است لذا:

$$(1 - y_{Ai})^2 = 0.16$$

$$y_{Ai} = x_{Ai} = 0.6$$

۱۰ - گزینه ۴ درست است.

۱۱ - گزینه ۱ درست است.

چون در مورد نسبت $\frac{k_x}{k_y}$ اطلاعاتی داده نشده است لذا مقایسه باید کیفی باشد. m (شیب منحنی تعادل) بزرگ، نشان‌دهنده مقاومت بالای فاز مایع است.

۱۲ - گزینه ۲ درست است.

در صورتی که ۹۰٪ بازیابی انجام شود:

$$Y_2 = (1 - 0.9) Y_1 = 0.1 Y_1$$

$$\left. \frac{R_s}{E_s} \right)_{\min} = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_{1eq}}$$

X_{1eq} در تعادل با Y_1 است لذا:

$$\left. \frac{R_s}{E_s} \right)_{\min} = \frac{0.1 Y_1 - Y_1}{0 - \frac{Y_1}{3}} = 2.7$$

$$\left. \frac{R_s}{E_s} \right)_{\text{واقعی}} = 2 \times 2.7 = 5.4$$

۱۳ - گزینه ۴ درست است.

۱۴ - گزینه ۳ درست است.

۱۵ - گزینه ۴ درست است.

۱۶ - گزینه ۱ درست است.

$$N = 40 \times 0.5 = 20 \text{ تنوری}$$

$$Z = 20 \times 0.4 = 8 \text{ m}$$

$$\Delta p = 8 \times 400 = 3200 \text{ pa} = 3.2 \text{ kpa}$$

۱۷ - گزینه ۲ درست است.

مراجعه شود به توضیحات ارائه شده در قسمت (۷-۱)

۱۸ - گزینه ۴ درست است.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۱۹ - گزینه ۱ درست است.

ابتدا محل تلاقی خطوط کار این برج را پیدا می‌کنیم:

$$0.6x + 0.32 = 2x - 0.1 \rightarrow x = 0.3, y = 0.5$$

این نقطه باید در معادله خط خوراک هم صدق کند:

$$0.5 = \frac{q}{q-1}(0.3) - \frac{0.4}{q-1}$$

$$q = 0.5 \rightarrow \text{بخار } 50\% + \text{مایع } 50\%$$

۲۰ - گزینه ۴ درست است.

ترتیب ورود خوراک‌ها به برج از بالا به پایین به ترتیب عبارت‌اند از:

(۱) مایع سرد (۲) مایع اشباع (۳) دوفازی (۴) بخار اشباع (۵) بخار سوپرهیت

۲۱ - گزینه ۴ درست است.

$$R_{\min}(\text{سوپرهیت بخار}) < R_{\min}(\text{بخار اشباع}) < R_{\min}(\text{دوفازی}) < R_{\min}(\text{اشباع مایع}) < R_{\min}(\text{سرد مایع})$$

۲۲ - گزینه ۱ درست است.

حالت خوراک اثری بر N_{\min} ندارد.

۲۳ - گزینه ۲ درست است.

مایع و بخار بین سینی ۳ و ۴ به ترتیب L_3 و G_4 می‌باشد که از قانون اهرم نسبت آنها قابل محاسبه است:

$$\frac{L_3}{G_4} = \frac{\overline{G_4 \Delta D}}{\overline{L_3 \Delta D}} = \frac{6}{4+6} = 0.6$$

۲۴ - گزینه ۴ درست است.

$$R \uparrow \Rightarrow N \downarrow, D_T \uparrow, Q_c \uparrow, Q_B \uparrow$$

۲۵ - گزینه ۴ درست است.

۲۶ - گزینه ۴ درست است.

محل تلاقی خط کار هر ناحیه با خط $y = x$ برابر مختصات نقطه تفاضل آن ناحیه است.

$$\text{تلاقی } x = x_{\Delta M} = \frac{Dx_D + Sx_S}{D+S} = \frac{D \times 0.95 + D \times 0.65}{D+D} = 0.8$$

۲۷ - گزینه ۳ درست است.

موقعیت ΔR_{\min} به شیب Tie Line بستگی دارد ولی موقعیت ΔR به شیب Tie Line بستگی ندارد.

۲۸ - گزینه ۱ درست است.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۲۹ - گزینه ۴ درست است.

$$\frac{S_{\max}}{S_{\min}} = \frac{F \cdot \frac{FK}{SK}}{F \cdot \frac{FD}{SD}} = \frac{\frac{10}{2}}{\frac{2}{10}} = 25$$

۳۰ - گزینه ۴ درست است.

۳۱ - گزینه ۴ درست است.

۳۲ - گزینه ۴ درست است.

۳۳ - گزینه ۲ درست است.

۳۴ - گزینه ۴ درست است.

۳۵ - گزینه ۳ درست است.

چون مکانیزم انتقال حرارت هدایتی است لذا سرعت هوا اثری بر سرعت انتقال گرما و سرعت خشک شدن ندارد.

۳۶ - گزینه ۳ درست است.

در ناحیه constant Rate دمای سطح جسم مرطوب برابر دمای حباب مرطوب است اگر از هدایت و تابش صرف نظر کنیم و خشک کن از نوع Direct باشد. اما اگر خشک کن از نوع Indirect باشد دمای سطح جسم مرطوب برابر دمای جوش مایع در فشار عملیاتی است.

۳۷ - گزینه ۴ درست است.

۳۸ - گزینه ۴ درست است.

مکانیزم خشک شدن در ناحیه مویبگی مشابه ناحیه constant Rate است.

۳۹ - گزینه ۱ درست است.

افزایش دبی خوراک باعث می شود با ثابت نگه داشتن سایر عوامل محلول خروجی از تبخیر کننده رقیق تر خواهد بود و لذا احتمال ایجاد تبلور کم می شود. بالا بردن دمای خوراک باعث می شود بخش بیشتری از انرژی Steam صرف تبخیر محلول می شود و لذا تغلیظ بیشتری انجام می شود که باعث ازدیاد احتمال ایجاد تبلور می شود. افزایش فشار تبخیر کننده باعث ازدیاد نقطه جوش محلول می شود و لذا اختلاف دمای بخار و محلول کم می شود این امر باعث کاهش میزان انتقال حرارت و لذا کاهش میزان تبخیر و تغلیظ محلول می شود و لذا احتمال تبلور کاهش می یابد. اما بهترین راه حل کاهش دبی خوراک است چون کنترل دبی آسانتر از کنترل فشار است.

۴۰ - گزینه ۳ درست است.

کاهش اندازه ذرات جاذب باعث افزایش سطح ویژه شده و لذا ظرفیت جذب جاذب زیاد شده و در نتیجه زمان اشباع شدن بستر افزایش می یابد. کاهش دبی خوراک و غلظت جذب شونده در خوراک ورودی نیز باعث می شود بستر دیرتر اشباع شود. کاهش طول بستر باعث می شود که بستر زودتر اشباع شود.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

بخش پنجم

۱۴ - ۱ - بودجه‌بندی سئوالات کنکور در سال‌های اخیر

در جدول زیر بودجه‌بندی سئوالات کنکور انتقال جرم و عملیات واحد در ۶ سال اخیر به تفکیک ارائه شده است:

موضوع	سال ۸۳	سال ۸۴	سال ۸۵	سال ۸۶	سال ۸۷	سال ۸۸	متوسط ۶ سال اخیر (%)	
							متوسط	اخیر
انتقال جرم	تعریف شار	0	0	3.3	0	5	2.2	5
	نفوذ مولکولی	16.7	6.7	3.3	10	10	9.5	10
	جابجائی	6.7	6.7	16.7	6.7	5	7.8	5
	انتقال جرم بین فازها	6.7	10	10	13.3	0	8.3	10
	دستگاه‌های گاز - مایع	6.7	13.3	0	13.3	20	9.7	5
عملیات واحد 1	جذب و دفع گازی	0	3.3	0	0	0	0.6	0
	تقطیر	33.3	16.7	36.6	20	15	26.1	35
	استخراج	3.3	13.3	3.3	13.3	15	10.6	15
عملیات واحد 2	رطوبت سنجی	6.7	10	6.7	3.3	5	6.1	5
	خشک‌کن‌ها	16.7	6.7	13.3	10	10	11.1	10
	تبخیر	3.3	6.7	6.7	6.7	5	4.7	0
	جذب سطحی	0	6.7	0	3.3	10	3.3	0
	استخراج از جامدات	0	0	0	0	0	0	0
	کریستالیزاسیون	0	0	0	0	0	0	0
	فیلتراسیون	0	0	0	0	0	0	0

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

با توجه به جدول فوق می‌توان گفت:

۱- به طور متوسط 37.5% سئوالات مربوط به انتقال جرم، 37.3% مربوط به عملیات واحد I و 25.2% از سئوالات مربوط به عملیات واحد II است.

۲- مطابق این جدول تقطیر و خشک‌کن دارای اهمیت بیشتری نسبت به سایر یونیت‌ها هستند.

۳- مطابق این جدول از مباحث Leaching (استخراج از جامدات)، تبلور (Crystallization) و فیلتراسیون (Filtration) سئوالاتی در ۶ سال اخیر مطرح نشده است. بنابراین کنار گذاشتن آنها تأثیر چندانی در کاهش نمره داوطلب ندارد.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....