جلسه اول

جداسازی بخش اصلی فرایندهای شیمیایی است.

روشهای جداسازی

۱) تماس مستقیم دو فاز محلول (عملیات واحد I و II)

۲) تماس مستقیم دو فاز نا محلول (یا به طور نسبی محلول)

۳) جداسازی به کمک غشاء (تماس غیر مستقیم)

تماس مستقیم دو فاز نا محلول

فازها: جامد - مایع - گاز

۱) گاز-گاز: به دلیل صادق نبودن فرض تماس نا محلول در انتقال جرم از بررسی سیستم گاز-گاز صرفنظر می‌کنیم

۲) گاز-مایع:

۳) گاز-جامد

۴) مایع-مایع

۵) مایع-جامد

۶) جامد-جامد: به دلیل شدت انتقال جرم بسیار پایین از بررسی سیستم جامد-جامد نیز صرفنظر می‌کنیم.

فرآیندهای گاز-مایع

I) فرآیندهایی که همه اجزاء در هر دو فاز وجود دارند

Distillation

• تقطیر (Distillation)

اساس جداسازی اختلاف فراریت اجزاء است

همه اجزاء متناسب با فراریت نسبی شان در هر دو فاز حضور دارند.

Gas	Liq
A	A = H_2O
B	B = الکل

II) فرآیندهایی که یک جزء مشترک بین دو فاز وجود دارد. absorption/stripping و Evapration و Humidification / Dehumidification

• جذب (Absorption) و دفع (stripping)

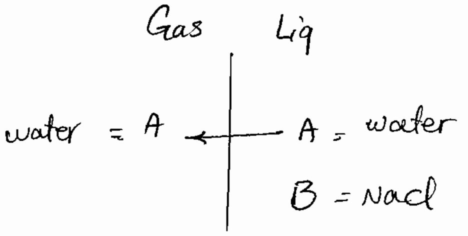
	Gas	Liq
H_2S = A	(A)	جذب →
natural gas = B	← دفع	(A)

C = ethanol amine

جذب H_2S و CO_2 ($\underbrace{H_2S \text{ و } CO_2}_{\text{گاز ترش}}$) توسط محلول آمین: فرایند اصلی واحدهای شیرین سازی گاز است.

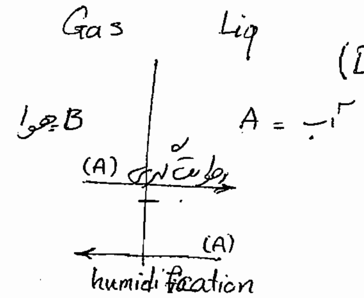
• تبخیر (Evapration)

فاز بخار تک جزئی است.



تبخیر حالت خاصی از تقطیر است که اختلاف نقاط جوش اجزاء بسیار زیاد است طوری که فاز گاز تک جزئی است. یکی از کاربردهای فرایند تبخیر شیرین سازی آب دریاست (water Desalination).

کاربرد دیگر تهیه کنسانتره هاست.



• رطوبت زنی (Humidification) و رطوبت گیری (Dehumidification)

تا زمانی که هوا اشباع شود انتقال جزء A به گاز انجام می‌شود

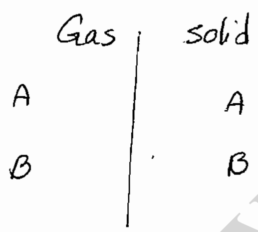
کاربرد: برج های خنک کننده ـ کولر آبی

در خشک کن ها فرایند رطوبت سازی برای فاز گاز و فرایند خشک کردن برای فاز جامد اتفاق می‌افتد.

فرایندهای گاز ـ جامد

I) همه اجزاء در هر دو فاز وجود دارند.

sublimation

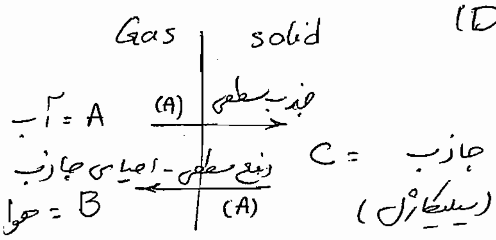


• تصعید (sublimation)

در فرایندهای صنعتی واحدی که تصعید همه اجزاء اتفاق بیفتد وجود ندارد

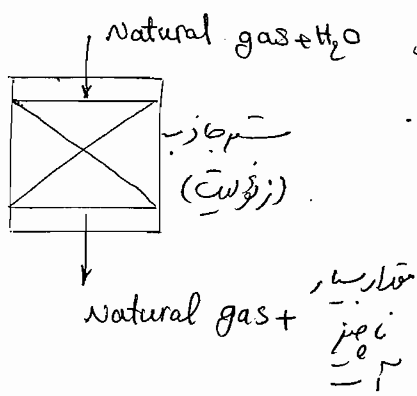
II) فرایندهایی که یک جزء مشترک بین دو فاز وجود دارد Drying و Adsorption / Desorption

• جذب سطحی (Adsorption) و دفع سطحی (Desorption)



(ویژگی مهم جاذب سطح ویژه بالای آن است)

در جذب سطحی یک جزء از سیال روی سطح جامد که جاذب است، جذب می‌شود.



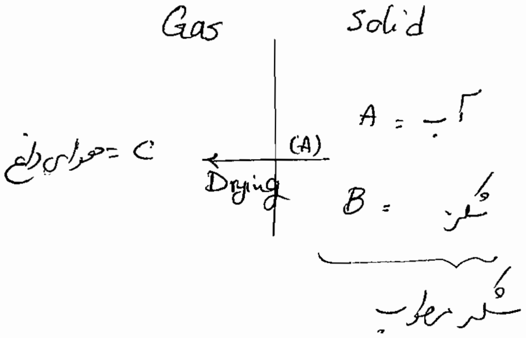
نکته: جذب سطحی قادر است مقادیر کمی از جزء A را جذب کند

⊛ جذب در دماهای پایین و دفع در دماهای بالا انجام می‌شود.

کاربردها: نم‌گیرها

نم زدایی از گاز طبیعی برای جلوگیری از تولید هیدرات

نم زدایی از هوا برای تولید هوای ابزار دقیق



• خشک کردن (Drying)

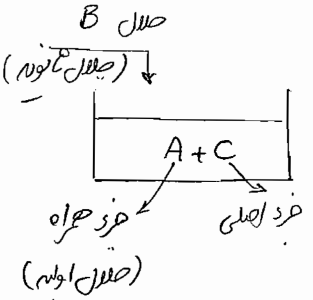
در خشک کردن انتقال از توده جامد به گاز است

اما در نوع سطحی انتقال از سطح جامد به گاز است.

در هر فرایندی که محصول جامد خشک داشته باشیم

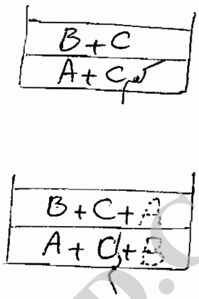
فرایند Drying را داریم.

فرآیندهای مایع - مایع   Extraction



Liquid Extraction

استخراج با مایع



استخراج با حلال غیر قابل امتزاج با جزء همراه (A و B کاملاً نامحلولند)

استخراج با حلال امتزاج پذیر نسبی با جزء همراه (A و B به طور جزئی درهم حل می‌شوند)

محلول دو جزئی داریم که به دلایلی مثل: ۱- وجود آزئوتروپ

۲- حساسیت نسبت به دما

۳- اختلاف فراریت ناچیز (نزدیکی نقاط جوش اجزاء)

امکان استفاده از تقطیر برای جداسازی وجود ندارد.

سوال: چرا برای انتخاب روش مناسب جداسازی تقطیر نسبت به استخراج دارای ارجحیت است؟

چون تقطیر فرآیند مستقیم و استخراج فرآیند غیر مستقیم است.

فرآیندها

مستقیم: نیاز به افزودن جزء جدید ندارند عموماً با گرفتن و دادن حرارت جداسازی میسر است.

Distillation - Evapration - Humidification

Dehumidification - sublimation - crystalization

استخراج فوق بحرانی (جداسازی به کمک تغییر در شرایط عملیاتی)

غیر مستقیم: نیاز به افزودن جزء سومی برای جداسازی دو جزء مورد نظر وجود دارد.

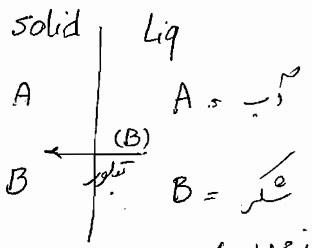
Extraction - تبلور با جزء اضافی

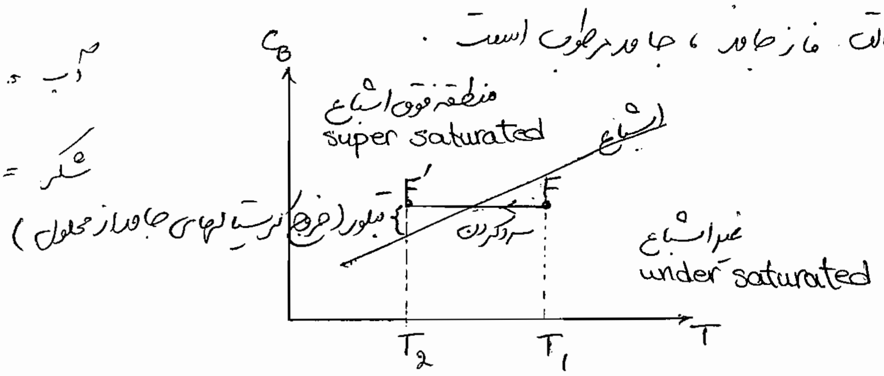
فرآیندهای مایع - جامد

crystalization

I) همه اجزاء در هر دو فاز وجود دارند .

• تبلور : در این حالت فاز جامد ، جامد در حلول است .



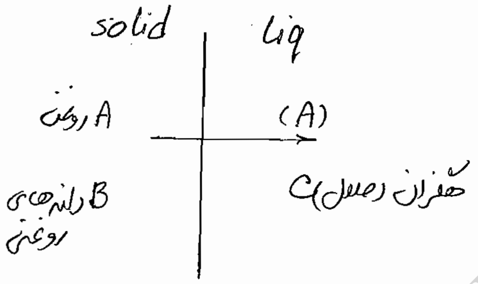


در تبلور سرد کردن را ما انجام می دهیم و وقتی به منطقه فوق اشباع رسید عمل تبلور خود به خود انجام می شود .

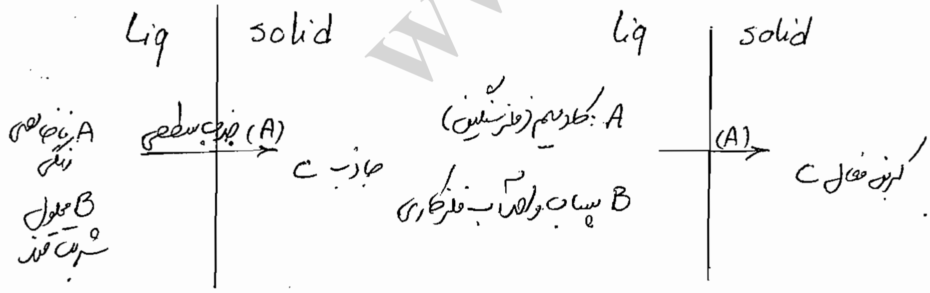
* تبلور با جزء اضافی : ماده ای به محلول اضافه می شود که حلالیتش بیشتر از جزء حل شده اول است و چون ما دو جزء در حلال حل شده ، جزء حل شده اولیه مجبور به تبلور می شود .

II) یک جزء مشترک بین دو فاز وجود دارد Adsorption و Leaching

• Leaching (حل کردن ماده ای در حلال خاص)



• جذب سطحی (Adsorption)



جذب سطحی روی سطح جامد انجام می شود .

نمونه هایی از فرآیند Leaching :

A	B	C
روغن	دانه روغنی	هگزان
شکر	چغندر قند	آب
رنگ	برگ چای	آب
طلا	سنگ معدن طلا	محلول سیانید
مس	سنگ معدن مس	اسید سولفوریک

unit operation

1) Distillation

2) absorption / stripping

3) Evapration

4) Humidification / Dehumidification

5) Adsorption / Desorption

6) Drying

7) Extraction

8) Crystilazation

9) Leaching

تمام این واحدها در موارد زیر وجه اشتراک دارند

۱- تماس مستقیم فازها

۲- نامحلول بودن فازها .

۳- جداسازی در اثر انتقال جرم

روشهای جداسازی → جداسازی توام با انتقال جرم

روشهای جداسازی → جداسازی به کمک روشهای مکانیکی (مثل فیلتراسیون)

انتقال جرم

علت انتقال یک جزء بین دو فاز چیست ؟

وجود اختلاف پتانسیل شیمیایی برای آن جزء در دو فاز

$$\mu_A^{\alpha} \neq \mu_A^{\beta}$$

اگر پتانسیل شیمیایی جزء A در فاز α با پتانسیل شیمیایی جزء A در فاز β متفاوت باشد انتقال جرم روی می دهد .

Liq	Vap
آب ٪50	آب ٪50
الکل ٪50	الکل ٪50

آیا در این سیستم تبادل جرم بین دو فاز انجام می شود ؟

solid	Vap
شکر مرطوب حاوی ٪10 وزنی رطوبت	هوای دارای ٪20 رطوبت نسبی

آیا شکر از هوا رطوبت جذب می کند ؟

آیا هوا از شکر رطوبت می گیرد ؟

یا هیچ انتقالی صورت نمی گیرد ؟

در بحث ترمودینامیک در شرایط تعادل پتانسیل شیمیایی اجزاء در هر دو فاز برابر است لذا :

$$\mu_A^\alpha = \mu_A^\beta \rightarrow N_A = 0$$

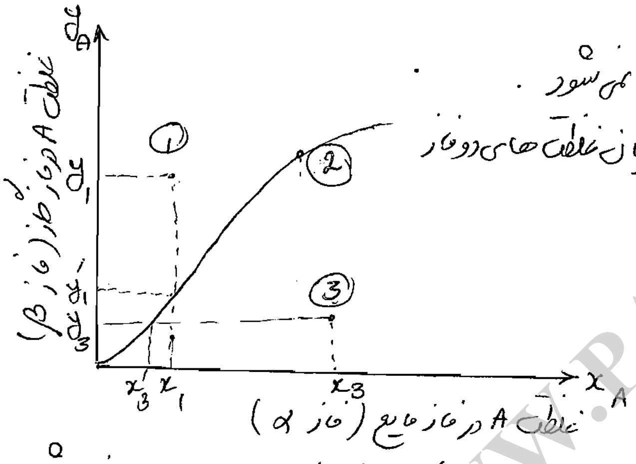
در سیستم : vapor – liquid

$$\mu_A^V = \mu_A^L$$

$$\downarrow$$

$$x_A \cdot \frac{P_A^{sat}}{P_t} = y_A$$

معادله منحنی تعادل بر حسب غلظت : $y_A = \alpha x_A / (1+(\alpha-1)x_A)$



منحنی تعادل مکان هندسی نقاطی است که در آن انتقال جرم انجام نمی شود .

منحنی تعادل یعنی بیان تساوی پتانسیل شیمیایی در قالب رابطه ای میان غلظت های دو فاز

دو فاز بنا به شرایطی که در کنار هم قرار می گیرند طبق منحنی رو به رو یکی از این ۳ حالت را دارند :

نقطه ① : $\mu_A^\alpha < \mu_A^\beta \Rightarrow N_A \neq 0$

انتقال جرم جزء A از فاز β (که غلظت آن y_A است) به فاز α (که غلظت آن x_A است) انجام می شود

نقطه ② : $\mu_A^\alpha = \mu_A^\beta \Rightarrow N_A = 0$

انتقال جرم انجام نمی شود .

نقطه ③ : $\mu_A^\alpha > \mu_A^\beta \Rightarrow N_A \neq 0$

انتقال جرم از فاز α (که غلظت آن x_A است) به فاز β (که غلظت آن y_A است) انجام می شود .

در نقطه ① : $y_1 > y_1'$ $\longrightarrow$ غلظت جزء A در فاز β (یعنی y) از غلظت A در فاز β در حالت تعادل (یعنی y_1') بیشتر است پس انتقال A از فاز β به α است .

در نقطه ② : x_2 و y_2 بر روی منحنی تعادلی $\longrightarrow$ انتقال جرم نداریم

در نقطه ③ : $x_3 > x_3'$ $\longrightarrow$ غلظت جزء A در فاز α (یعنی x_3) از غلظت A در فاز α در حالت تعادل (یعنی x_3') بیشتر است پس انتقال A از فاز α به β است .

* فازی دهنده است که غلظتش از حالت تعادلی بیشتر باشد.

در نتیجه: منحنی تعادل است که مشخص می‌کند انتقال جرم انجام می‌شود یا نه و غلظت به تنهایی مشخص کننده نیست.

مثال:

$y_A = 0.2$
$x_A = 0.1$

در سیستم روبرو انتقال جرم انجام می‌شود یا خیر؟

مثلاً منحنی تعادلی : $y = 2x$

جواب:
مختصات دو فاز دقیقاً روی منحنی تعادل است پس با وجود اختلاف غلظت انتقال جرم انجام نمی‌شود.

مثال:

Liq	vap
A: ٪50 الکل	٪50 الکل
٪50 آب	٪50 آب

در سیستم روبرو انتقال جرم انجام می‌شود یا خیر؟

$\alpha_{AB} = 2 \longrightarrow$ منحنی تعادلی : $y = \frac{2x}{1+x}$

$x_A = 0.5 \longrightarrow$ تعادلی $y_A = \frac{2 \times 0.5}{1+0.5} = 0.67$ ← در شرایط تعادلی :

Liq	vap
٪50 الکل	٪67 الکل
٪50 آب	٪33 آب

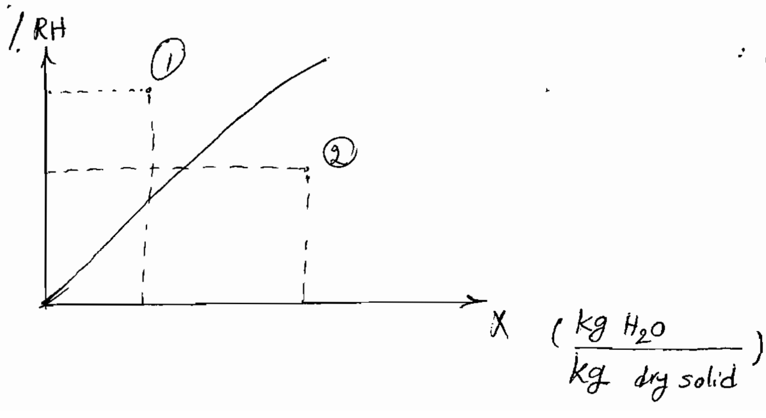
جواب: چون غلظت A در فاز بخار یعنی y_A از غلظت A در فاز بخار در حالت تعادل یعنی $y_{A_{eq}}$ کمتر است پس انتقال جرم از مایع به بخار انجام می‌شود.

پس با وجود تساوی غلظت‌ها انتقال جرم انجام می‌شود.

(*) شرایط سیستم در مقایسه با منحنی تعادلی مشخص کننده است.
فقط در شرایطی که شیب منحنی تعادلی برابر یک باشد تساوی غلظت‌ها همان تساوی پتانسیل شیمیایی خواهد بود.

مثال:

شکر	هوا
+ ٪10 آب (رطوبت جسم)	رطوبت نسبی $\%RH = \%20$



نقطه ①: هوا رطوبتی دارد بیشتر از مقدار تعادلی اش پس شکر از هوا رطوبت می‌گیرد.

نقطه ②: جامد رطوبتی دارد بیشتر از مقدار تعادلی اش پس شکر در کنار هوا خشک می‌شود.

تست شماره ۱۰۴ سال ۸۸:

در بحث Drying تعادل نشانگر کدام مورد است؟

۱- کسر مولی رطوبت هوا با کسر مولی رطوبت در جامد برابر است.

۲- مقدار رطوبت موجود در هوا با مقدار رطوبت موجود در جامد برابر است.

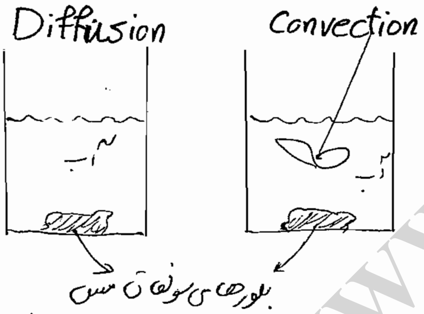
۳- اگر رطوبت موجود در هوا از مقدار رطوبت هوای در تعادل با جامدی معین بیشتر باشد آنگاه جامد می‌تواند از هوا رطوبت جذب کند ✓

۴- ① و ② هر دو

مکانیزم های انتقال جرم

* نفوذ Diffusion
* جابجایی Convection

قدم اول برای حل مسائل تشخیص مکانیزم انتقال جرم است.

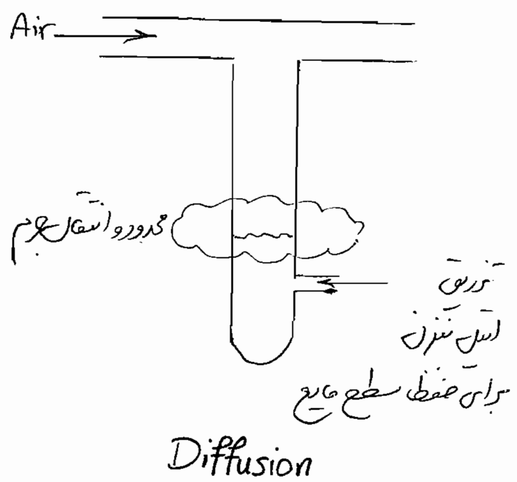


ظرف آبی داریم که داخل ظرف آب بلورهای سولفات مس داریم.

در ظرف دوم همزن هم داریم.

در ظرف اول مکانیزم نفوذ است اما در ظرف دوم مکانیزم انتقال جرم جابجایی است.

تست ۵ سال ۷۹

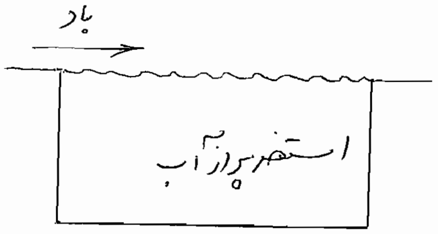


این دستگاه وسیله ای است که برای اندازه گیری ضریب نفوذ استفاده می‌شود.

در این دستگاه مکانیزم انتقال جرم نفوذ است.

درست است که هوا در بالای لوله جریان دارد اما چون محدوده انتقال جرم قسمت نشان داده شده در شکل است و در این قسمت جابجایی هوا وجود ندارد پس مکانیزم نفوذ است.

اگر سطح مایع تا بالای لوله بود مکانیزم جابجایی بود.



convection

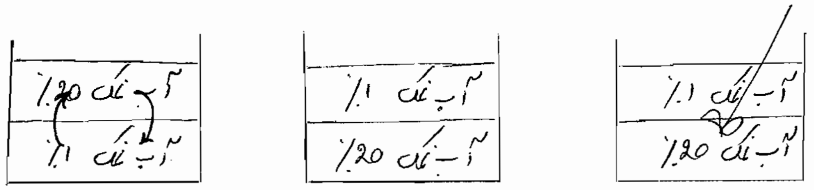
سوال ۲ سال ۸۰ :

مقدار آب تزریق شده در شبانه روز برای حفظ سطح مایع ؟

در این حالت مکانیزم انتقال جرم جابجایی است

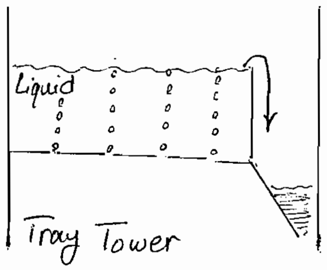
ولی اگر آب کف استخر بود چون باد تماس نزدیک با آب نداشت

مکانیزم نفوذ می‌کند .



Natural convection — Diffusion — Forced convection

به علت اختلاف دانسیته



Tray Tower
convection

در برج سینی دار چون مایع از بالا و گاز از پایین در حال حرکت است

پدیده convection داریم .

حرکتی که باعث convection است حرکت سیالاتی است یعنی نیروی

سیالاتی باعث انتقال جرم شده نه حرکت میکروسکوپی

اختلاف انتقال جرم و حرارت :

* در انتقال جرم در نفوذ هم در حد میکروسکوپی پدیده جابجایی را داریم اما

در انتقال حرارت در هدایت پدیده جابجایی دیده نمی‌شود .

نفوذ مولکولی Diffusion

هدف بدست آوردن شار مطلق انتقال جرم جزء A ناشی از نفوذ است .

شار مطلق ، جابجایی فیزیکی جزء A است نسبت به نقطه مشخصی از فضا (یعنی ناظر بتواند انتقال جزء

A را از نقطه ① به ② ببیند .)

ناظر

$$1 \xrightarrow{v_A} 2$$

v_A سرعت حرکت A ناشی از نفوذ است .

$$\underbrace{N_A}_{\frac{mole\ A}{m^2 \cdot sec}} = \underbrace{C_A}_{\frac{mole\ A}{m^3}} \cdot \underbrace{v_A}_{m/sec} \Rightarrow N_i = v_i \cdot C_i$$

i : جزء دلخواه در مخلوط است .

$$v^* = \frac{\sum c_i v_i}{\sum c_i} = \sum x_i v_i$$

v_i : سرعت ناشی از نفوذ جزء i

v^* : سرعت متوسط مولی ناشی از نفوذ

تست ۲ دانشگاه آزاد سال ۸۰ .

مخلوطی شامل 30٪ ازت و 70٪ اکسیژن داریم. سرعت مطلق ازت $4\ \frac{m}{sec}$ و سرعت متوسط $4.7\ \frac{m}{sec}$ است. سرعت اکسیژن چقدر است ؟

$$v^* = x_A v_A + x_B v_B$$

$$4.7 = 0.3 \times 4 + 0.7 v_B \longrightarrow v_B = 5\ m/sec$$

چون سرعت برداری است اگر گفته شد که مثلاً جزء A به سمت راست و جزء B به سمت چپ حرکت می‌کند باید مثبت و منفی ها را در نظر بگیریم.

مثال : اگر در مخلوط N_2 و O_2 (N_2 30٪ و O_2 70٪) نیتروژن با سرعت $2\ m/sec$ به سمت راست و اکسیژن با سرعت $1\ m/sec$ به سمت چپ حرکت کند ، سرعت متوسط مخلوط چقدر و به چه جهتی است ؟

فرض : راست (+) و چپ (−)

$$v^* = x_A v_A + x_B v_B \Rightarrow v^* = 0.3 \times (+2) + 0.7(1) = -0.1$$

سرعت $0.1\ m/sec$ به سمت چپ .

$$N_A = C_A \cdot v_A$$

$$N_A = C_A v_A - C_A v^* + C_A v^*$$

$$\underbrace{N_A}_{\text{شار مطلق ناشی از نفوذ}} = \underbrace{C_A(v_A - v^*)}_{J_A\ \text{شار نسبی ناشی از نفوذ}} + \underbrace{C_A v^*}_{\text{انتقال جرم ناشی از جابجایی}}$$

این یک اشتباه مصطلح است که $C_A v^*$ را انتقال جرم ناشی از جابجایی می نامند و اگر در کنکور پرسیده شد همین جواب را می دهیم.
اما جواب درست Advection است .

$$\Rightarrow N_A = J_A + C_A v^*$$

قانون اول فیک : $J_A = -D_{AB} \nabla C_A$

فرم اصلی قانون اول فیک : $J_A = -D_{AB} C \nabla x_A$

if $C = cte \Rightarrow J_A = -D_{AB} \nabla C_A$

در گازها : $C = \frac{P_t}{RT}$

پس در گازها اگر دما و فشار کل ثابت باشد می‌توان گفت غلظت مولکولی (C) ثابت است.

در مایعات : $C = \left(\frac{\rho}{M_w}\right)_{av}$

M_w ← جرم مولکولی

در محلول‌ها می‌توان C را ثابت فرض کرد.

نکاتی در مورد ضریب نفوذ مولکولی D_{AB}

(1) $[D_{AB}] : \frac{m^2}{sec}$

D_{AB}: ضریب نفوذ جزء A درون جزء B:

A : نفوذ کننده

B : محیط نفوذ

(2) $D_{AB \to gas} > D_{AB \to liq} > D_{AB \to solid}$

$D_{AB \to gas}$	$D_{AB \to liq}$	$D_{AB \to solid}$
$10^{-5}\ m^2/sec$	$10^{-9}\ m^2/sec$	$10^{-12}\ m^2/sec$
$10^{-1}\ cm^2/sec$	$10^{-5}\ cm^2/sec$	$10^{-8}\ cm^2/sec$

منظور از ضریب نفوذ در گاز یعنی B گاز باشد.

" " " " " " مایع " .

" " " " " " جامد " .

در گازها چون فاصله مولکولها بیشتر است پس عبور یک مولکول از لابلای مولکولهای گاز راحتتر است.

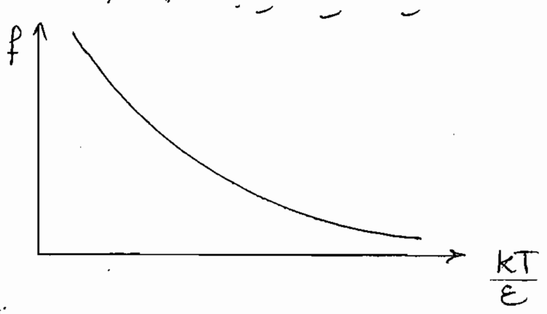
(3) $D_{AB,gas} \sim T_{(°K)}^{3/2} \cdot \frac{1}{P_t} \cdot \frac{1}{f\left(\frac{kT}{\varepsilon}\right)}$

f ← تابع برخورد

$$\frac{D_{AB_2}}{D_{AB_1}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{P_{t_1}}{P_{t_2}}\right) \cdot \left(\frac{f_1}{f_2}\right)$$

اگر $|T_2 - T_1| < 50^\circ C$ باشد آنگاه $\frac{f_1}{f_2} \approx 1$

اگر $|T_2 - T_1| > 50^\circ C$ باشد اثر تابع برخورد هم باید در نظر گرفته شود. در اصل در این شرایط ضریب نفوذ با T با توان بزرگتر از $\frac{3}{2}$ رابطه خواهد داشت.



④ $D_{AB,liq} \sim T(°k) \cdot \frac{1}{\mu} \cdot M_B^{0.5} \cdot \frac{1}{v_A^{0.6}}$

ویسکوزیته محلول — جرم مولکولی حلال — حجم مخصوص A (m^3/kg)

$$\frac{D_{AB2}}{D_{AB1}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)\left(\frac{\mu_1}{\mu_2}\right)\underbrace{\left(\frac{M_{B2}}{M_{B1}}\right)^{0.5}}_{}\underbrace{\left(\frac{v_{A1}}{v_{A2}}\right)^{0.6}}_{}$$

این پارامتر برای وقتی است که حلال تغییر کند.　　این پارامتر برای وقتی است که جزء نفوذکننده تغییر کند.

مثال : $D_{O_2-H_2O} = 1\times10^{-9}\ m^2/sec$　　آب $M_{B_1} = 18$

$D_{O_2-ethanol} = ?$　　اتانول $M_{B_2} = 46$　　C_2H_5OH

سایر شرایط ثابت است.

$$\frac{D_{AB_2}}{D_{AB_1}} = \left(\frac{46}{18}\right)^{0.5} \Rightarrow D_{O_2-ethanol} = 1\times10^{-9}\times\left(\frac{46}{18}\right)^{0.5} = \ldots\ m^2/sec$$

تست ۹۶ سال ۸۷ .　　$T_1 = 300°k \longrightarrow D_{AB} = 2\times10^{-9}\ m^2/sec$

اگر دما را به 330k برسانیم و ویسکوزیته مایع 45٪ کم شود D_{AB} را در این شرایط محاسبه کنید.

(حتی اگر نگوید که فاز مایع است از مقدار ضریب نفوذ باید بفهمیم که فاز مایع است)

$$\frac{D_{AB_2}}{D_{AB_1}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)\left(\frac{\mu_1}{\mu_2}\right) = \left(\frac{330}{300}\right)\left(\frac{\mu_1}{0.55\mu_1}\right)$$

$$D_{AB_2} = 2\times10^{-9}\left(\frac{330}{300}\right)\left(\frac{1}{0.55}\right) = 4\times10^{-9}\ m^2/sec$$

ویسکوزیته 45٪ کاهش یابد $\xrightarrow{\text{یعنی}}$ $\mu_2 = 0.55\mu_1$

⑤

	غلظت	فشار
$D_{AB,liq}$	بستگی دارد	بستگی ندارد
$D_{AB,gas}$	بستگی ندارد	بستگی دارد

ضریب نفوذ در مخلوط

$$D_{Am} = \frac{1}{\sum \frac{y_i'}{D_{Ai}}} \quad \text{if} \quad \begin{array}{l} N_A \neq 0 \\ N_B = N_C = \dots = 0 \\ (N_i = 0 \text{ if } i \neq A) \end{array}$$

y_i' : کسر مولی اجزاء بر مبنای عاری از A است .

مثال : $D_{NH_3-N_2} = 10^{-5}\ m^2/sec$, $D_{NH_3-H_2} = 2\times10^{-5}\ m^2/sec$

← بر اجزای غیر از آمونیاک نفوذ نمی کنند .

Mixture $\begin{cases} N_2 & 70\% \\ H_2 & 20\% \\ NH_3 & 10\% \end{cases}$ $\xrightarrow{\text{کسر مولی را بر مبنای عاری از آمونیاک حساب می کنیم}}$ $N_2 \longrightarrow \frac{70}{90} = \frac{7}{9}$, $H_2 \longrightarrow \frac{20}{90} = \frac{2}{9}$

$$\Rightarrow D_{Am} = \frac{1}{\frac{\frac{7}{9}}{10^{-5}} + \frac{\frac{2}{9}}{2\times10^{-5}}} = \dots\ \frac{m^2}{sec}$$

$$D_{Am} = \frac{1-y_A}{\sum \frac{y_i}{D_{Ai}}} = \frac{1}{\sum \frac{y_i'}{D_{Ai}}}$$

در یک سیستم چند جزئی می خواهیم نشان دهیم $\sum J_i = 0$ است :

$$J_i = c_i(v_i - v^*)$$

$$\left.\begin{array}{l} \sum J_i = \sum c_i v_i - v^* \sum c_i \\ \text{می دانیم} : \ v^* = \frac{\sum c_i v_i}{\sum c_i} \end{array}\right\} \Rightarrow \sum J_i = 0$$

همیشه مجموع شارهای مولی نسبی ناشی از نفوذ صفر است .
در یک سیستم چند جزئی .

Binary System (در سیستم دو جزئی) : $J_A + J_B = 0$

سوال : آیا $\sum j_i$ هم می تواند برابر صفر باشد ؟ (j_i : شار نسبی جرمی ناشی از نفوذ)

$$J_i = \frac{j_i}{M_{wi}}$$

$$\sum J_i = 0 \rightarrow \sum \frac{j_i}{M_{w_i}} = 0$$

درنتیجه اگر جرم مولکولی اجزاء مساوی باشد :

$$\frac{1}{M_{w_i}} \sum j_i = 0 \longrightarrow \sum j_i = 0$$

مخلوط ایزوتوپها بهترین مثال برای برابری جرم مولکولی اجزاء است

سوال : چه رابطه‌ای بین D_{AB} و D_{BA} وجود دارد ؟

$$J_A + J_B = 0 \rightarrow J_A = -J_B \rightarrow -D_{AB}\frac{dC_A}{dz} = -\left(-D_{BA}\frac{dC_B}{dz}\right)$$

$$\left.\begin{array}{l} \text{می‌دانیم} : C_A + C_B = C \\ \text{if} \quad C = \text{ثابت} \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{dC_A}{dz} + \frac{dC_B}{dz} = 0 \Rightarrow \frac{dC_B}{dz} = -\frac{dC_A}{dz}$$

$$\Rightarrow \boxed{D_{AB} = D_{BA}}$$

⊛ رابطه فوق زمانی برقرار است که غلظت مولی کل ثابت باشد .

⊛ شرط برقراری تساوی درصورتی است که نفوذ A در B و B در A در یک فاز یکسان باشد .

$N_A = J_A + C_A v^* \longleftarrow$ میخواهیم صفحه‌ای را جایگزین v^* کنیم تا این رابطه کاربردی شود .

$$N_A = J_A + \frac{C_A}{C} \cdot C v^*$$

$$C v^* = \sum C_i \cdot \frac{\sum C_i v_i}{\sum C_i} = \sum C_i v_i = \sum N_i$$

$\Rightarrow \boxed{N_A = J_A + x_A \cdot \sum N_i} \longleftarrow$ این رابطه یک رابطه پایه برای بدست آوردن روابط بعدی است

برای یک سیستم دو جزئی $\longrightarrow$ $N_A = -D_{AB} \cdot C \cdot \nabla x_A + x_A (N_A + N_B)$

نفوذ در مسائل مربوط به انتقال جرم به ۳ دسته کلی تقسیم می‌شود .

* نفوذ در جزء ساکن :

$$\left.\begin{array}{l} N_A \neq 0 \\ N_B = N_C = \dots = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow \sum N_i = N_A$$

$$\Rightarrow N_A = J_A + x_A N_A \Rightarrow N_A = \frac{J_A}{1 - x_A}$$

$$\Rightarrow N_A = \frac{-D_{AB} \cdot c \cdot \frac{dx_A}{dz}}{1 - x_A}$$

$$N_A = \frac{-D_{AB} \cdot c \cdot \nabla x_A}{1 - x_A}$$

$$N_A = \frac{-D_{AB} \cdot \nabla C_A}{1 - \frac{C_A}{C}}$$

در فرایندهایی مثل خشک کردن - استخراج با حلال غیر قابل امتزاج - عملیات مرطوب سازی - جذب و دفع - جذب و دفع سطحی

فرض انتقال یک جزء در سیال ساکن قابل قبول است .

* نفوذ متقابل با مولهای برابر :

$$N_A = -N_B \rightarrow \sum N_i = 0$$

$$\rightarrow N_A = J_A = -D_{AB} \cdot C \cdot \nabla x_A$$

انتقال متقابل با مولهای برابر در مسائلی مثل اختلاط گازها مطرح می‌شود .

در تقطیر انتقال متقابل انجام می‌شود اما لزوماً این انتقال با مولهای برابر نیست ولی تحت شرایط خاصی که در روش Macabe ذکر می‌شود انتقال متقابل با مولهای برابر هم داریم .

* نفوذ همراه با واکنشهای ناهمگن :

واکنش های غیرهمگن در تمام نقاط سیستم انجام نمی‌شوند بلکه فقط در سطوح و نقاط به خصوصی انجام می‌شود .

مثل واکنشهایی که روی سطوح کاتالیست انجام می‌شوند نه در درون سیال .

$$aA + bB + \dots \longrightarrow rR + sS + \dots$$

$$\frac{N_A}{a} = \frac{N_B}{b} = \cdots\cdots = \frac{N_R}{-r} = \frac{N_S}{-s}$$

$$\Rightarrow N_B = \frac{b}{a} N_A \quad , \quad N_R = \frac{-r}{a} N_A \quad , \quad N_S = \frac{-s}{a} N_A$$

$$\Rightarrow \sum N_i = N_A + N_B + \cdots + N_R + N_S + \cdots$$

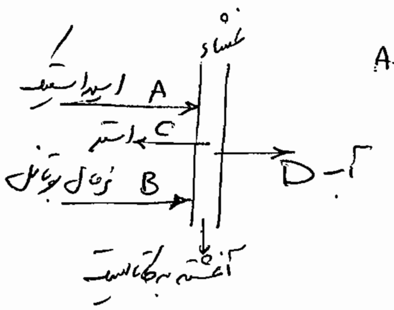
$$\Rightarrow \sum N_i = \left(1 + \frac{b}{a} + \cdots - \frac{r}{a} - \frac{s}{a} - \cdots\right) N_A$$

$$\Rightarrow \sum N_i = \beta N_A$$

β عددی ثابت که تابع معادله استوکیومتری واکنش است .

نکته : در روش فوق در برای محاسبه $\sum N_i$ شار اجزاء جامد برابر صفر منظور می‌شود .

تست ۱۱۴ سال ۸۴ :



$$A + B \longrightarrow C + D$$

در راکتور غشایی A و B به این شکل فرض کرده اند: C و D تولید می‌شوند . واکنش هم کامل در غشاء سریع انجام می‌شود .

$$\frac{N_C}{\sum N_i} = ?$$

هر چند مسأله نفوذ همراه با واکنش ناهمگن است

در این مسأله جزء جامد نداریم اما چون جزء D از سیستم خارج می‌شود (از غشاء عبور می‌کند) پس در سمتی که سیستم چند جزئی را مورد بررسی قرار می‌دهیم فقط A, B, C داریم .

$$\frac{N_A}{1} = \frac{N_B}{1} = \frac{N_C}{-1} = \frac{N_D}{-1}$$

$$\sum N_i = N_A + N_B + N_C$$

$$\frac{N_C}{\sum N_i} = \frac{N_C}{N_A + N_B + N_C} = \frac{N_C}{-N_C - N_C + N_C} = -1$$

فرض های سیستم :

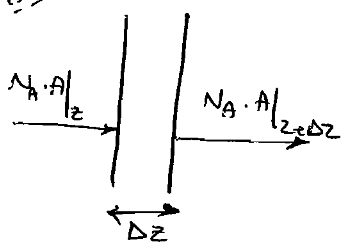
* حالت پایدار (steady state)

* بدون واکنش همگن ($R_A = 0$)

نحوه تغییرات N_A در شرایط فوق و در مختصات های مختلف به چه صورتی است ؟

مختصات کارتزین : ⟵ در مسیر انتقال جرم سطح انتقال ثابت است .

المانی از سیال را در نظر می‌گیریم



$$In - out + gen = Acc$$

$$N_A \cdot A\Big|_z - N_A \cdot A\Big|_{z+\Delta z} + \underbrace{0}_{\text{واکنش همگون نداریم}} = \underbrace{0}_{\text{حالت پایا}}$$

$$\xrightarrow[\Delta z \to 0]{\text{رابطه را به } \Delta z \text{ تقسیم می‌کنیم}} \quad -\frac{d}{dz}(N_A \cdot A) = 0$$

$A =$ ثابت

$$\Rightarrow \frac{dN_A}{dz} = 0 \Rightarrow N_A = \text{ثابت}$$

$$\underset{rate}{G_A} = \underset{Flux}{N_A} \cdot A$$

مختصات استوانه‌ای :

$$N_A \cdot A\Big|_r - N_A \cdot A\Big|_{r+\Delta r} + 0 = 0$$

$$A = 2\pi r L$$

$$\xrightarrow[\Delta r \to 0]{\div \Delta r} \frac{d}{dr}(N_A \cdot 2\pi r L) = 0$$

$$\frac{d}{dr}(r \cdot N_A) = 0 \longleftarrow$$ (این معادله تست ۱۱۳ سال ۸۶ است)

$r \cdot N_A =$ ثابت

$$N_A \cdot (2\pi r L) = \underset{\text{عددی ثابت}}{G_A} = \text{نرخ انتقال جرم}$$

مختصات کروی : به روش مشابه ⟵ $G_A = N_A \cdot A =$ ثابت

$$A = 4\pi r^2$$

$$\Rightarrow N_A \cdot 4\pi r^2 = G_A = \text{ثابت} \xrightarrow{r^2 N_A = \text{ثابت}} \frac{d}{dr}(r^2 N_A) = 0$$

در شرایط: حالت پایدار و بدون واکنش همگن

نتیجه:

مختصات کارتزین : $N_A =$ ثابت

مختصات استوانه‌ای : $N_A \cdot 2\pi r L =$ ثابت

مختصات کروی : $N_A \cdot 4\pi r^2 =$ ثابت

$$N_A = J_A + x_A \sum N_i$$

- $N_A =$ ثابت
- $N_A \cdot 2\pi r L =$ ثابت
- $N_A \cdot 4\pi r^2 =$ ثابت

- $\sum N_i = N_A$
- $\sum N_i = 0$
- $\sum N_i = \beta N_A$

ترکیب حالات فوق در کل منجر به ۹ معادله برای N_A می‌شود.

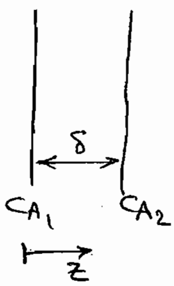
پس برای حل هر مسأله‌ای ۲ مورد را باید مورد بررسی قرار دهیم. اول اینکه کدام حالت از نفوذ در جزء ساکن، نفوذ متقابل با مول‌های برابر یا نفوذ همراه با واکنش همگن است و اینکه در چه مختصاتی است.

* نفوذ در جزء ساکن در مختصات کارتزین:

$$\sum N_i = N_A$$

$$N_A = -D_{AB}\frac{dC_A}{dz} + \frac{C_A}{C}N_A$$

$$\rightarrow N_A = \frac{-D_{AB}\dfrac{dC_A}{dz}}{1-\dfrac{C_A}{C}} \xrightarrow{N_A = \text{ثابت}} N_A = \frac{-D_{AB}\displaystyle\int_{C_{A_1}}^{C_{A_2}}\frac{dC_A}{1-\frac{C_A}{C}}}{\displaystyle\int_0^{\delta} dz}$$



$$\rightarrow \boxed{N_A = \frac{D_{AB}\cdot C}{\delta}\cdot \ln\frac{1-\frac{C_{A_2}}{C}}{1-\frac{C_{A_1}}{C}}} \quad \text{معادله } (1)$$

- کارتزین (N_A ثابت)
- نفوذ در جزء ساکن
- حالت پایدار
- بدون واکنش همگن

غلظت A در فاز گاز به شکل های C_A ، y_A ، P_I نشان داده می شود و غلظت کل $C = \frac{P_t}{RT}$ است .
" " " مایع " " C_A ، x_A " " " " " " $C = \left(\frac{\rho}{M}\right)_{av}$ " ،

هدف : محاسبه پروفایل غلظت در نفوذ در فرم ساکن

انتگرال گیری در فاصله ۰ تا z (C_{A_1} تا C_A)

$$N_A = \frac{-D_{AB}\int_{C_{A_1}}^{C_A} \frac{dC_A}{1-\frac{C_A}{C}}}{\int_0^z dz} \Rightarrow N_A = \frac{D_{AB}\cdot C}{z}\cdot Ln\left(\frac{1-\frac{C_A}{C}}{1-\frac{C_{A_1}}{C}}\right)$$

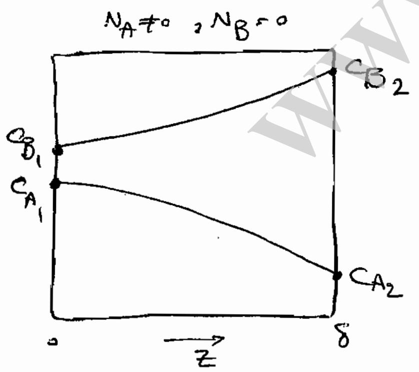
معادله ②

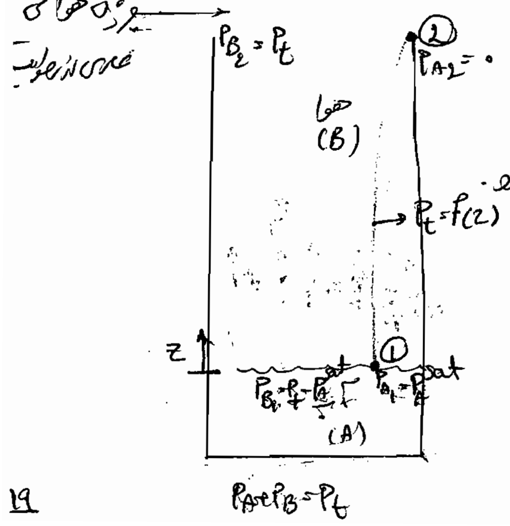
$$\longrightarrow \frac{1-C_A/C}{1-\frac{C_{A1}}{C}} = \exp\left(\frac{N_A}{D_{AB}\cdot C}\cdot z\right)$$

C_A تابعی اکسپوننسیالی از z است .

$$\xrightarrow{① = ②} \frac{D_{AB}C}{z} Ln \frac{1-\frac{C_A}{C}}{1-\frac{C_{A1}}{C}} = \frac{D_{AB}\cdot C}{\delta} Ln \frac{1-\frac{C_{A2}}{C}}{1-\frac{C_{A1}}{C}}$$

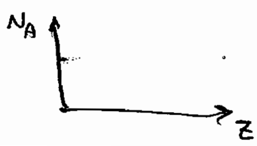
$$\Rightarrow \left[\frac{1-\frac{C_A}{C}}{1-\frac{C_{A_1}}{C}}\right] = \left[\frac{1-\frac{C_{A2}}{C}}{1-\frac{C_{A_1}}{C}}\right]^{\frac{z}{\delta}}$$





مسأله : می خواهیم پروفایل غلظت را روی شکل نشان دهیم .
تبخیر آب در هوا مسأله ای از نفوذ در فرم ساکن است چون هوا درون آب حل نمی شود .
یعنی سطح مشترک (نقطه ①) هوا اشباع از آب است ← $P_{A1} = P_A^{sat}$
نقطه ② $P_{A2} = 0$ (چون هوا عاری از رطوبت است)

$$\longrightarrow N_A = \text{ثابت} \rightarrow \frac{dN_A}{dz} = 0 \rightarrow$$

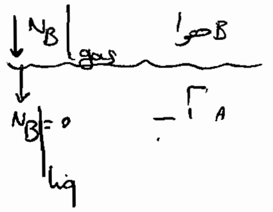


در این مسئله چون هوا در آب نامحلول است:

$$N_B = 0$$

$$N_B = C_B v_B \rightarrow v_B = 0$$

پس در مقیاس مولکولی جزء A یعنی آب از پایین به بالا در حال حرکت است اما هوا ساکن است.



$$N_B|_{liq} = 0 \xrightarrow{N_B|_{liq} = N_B|_{gas}} N_B = 0$$

$$\nabla C_B \neq 0 \quad \text{یا} \quad \nabla P_B \neq 0 \Longrightarrow J_B \neq 0$$

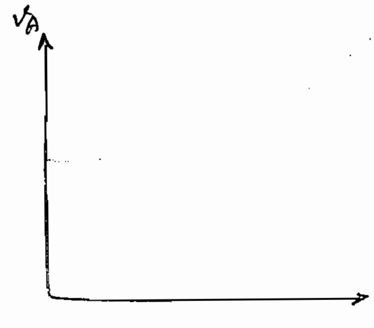
در این مسئله N_B صفر است اما چون برای جزء B گرادیان غلظت داریم. پس $J_B \neq 0$ است

$$N_B = J_B + C_B v^* \rightarrow J_B = -C_B v^*$$

چون v_A رو به سمت بالاست و v_B صفر است پس v^* و $C_B v^*$ به سمت بالاست پس J_B به سمت پایین است.

چون $C_B v^*$ به سمت بالاست و C_B عدد + است پس v^* رو به سمت بالاست پس $C_A v^*$ به سمت بالا و J_A هم به سمت بالا خواهد بود.

شار نسبی ناشی از نفوذ (J) و حرکت توده‌ای می‌تواند هم‌جهت یا غیرهم‌جهت باشد. در مسئله حاضر برای جزء B این پارامترها ناهمسو و برای جزء A همسو هستند.

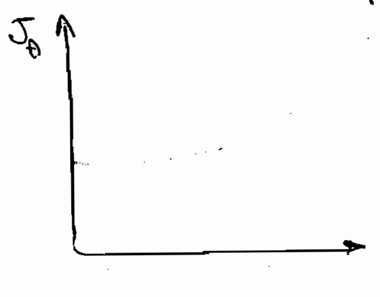


$$N_A = C_A v_A$$

N_A: در کل مسیر ثابت

C_A: به صورت اکسپوننسیالی کم می‌شود (در جهت انتقال)

v_A: به صورت اکسپوننسیالی زیاد می‌شود



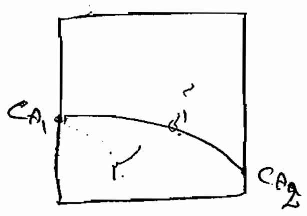
$$J_A = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z}$$

در جهت z شیب پروفایل غلظت زیاد می‌شود و چون C_A تابعی اکسپوننسیالی از z است $\frac{\partial C_A}{\partial z}$ هم تابعی اکسپوننسیالی از z است.

$$v^* = \frac{C_A v_A + C_B v_B}{C}$$

$$v_B = 0 \longrightarrow v^* = \frac{C_A v_A}{C} = \frac{N_A}{C} = \frac{\text{ثابت}}{\text{ثابت}} = \text{ثابت}$$

می‌خواهیم به این سوال جواب دهیم که چرا در جهت انتقال شیب باید زیاد شود یعنی چرا پروفایل غلظت نمودار آبی است نه نمودار سبز:



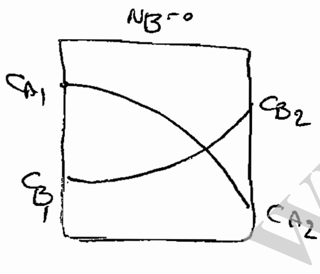
$$\underbrace{N_A}_{\text{ثابت}} = -D_{AB}\frac{dC_A}{dz} + \underbrace{\frac{C_A}{C} N_A}$$

در جهت انتقال C_A روند نزولی دارد

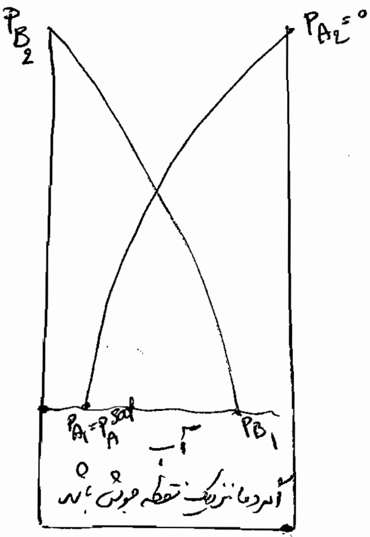
پس $\frac{C_A}{C} N_A$ هم روند نزولی دارد

چون جمع دو جمله مقداری ثابتی است لذا گرادیان غلظت باید روندی صعودی داشته باشد.

سوال: آیا در مسأله نفوذ در جزء ساکن امکان تلاقی پروفایل‌های غلظت A و B وجود دارد؟

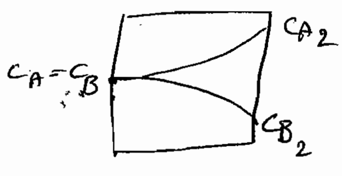


تلاقی به لحاظ تئوری مشکلی ایجاد نمی‌کند چون انتقال ربطی به تساوی غلظت A و B ندارد بلکه بستگی به غلظت‌های اولیه و ثانویه دارد.



در تبخیر مایع به درون گاز در دماهای بالا پروفایل‌های غلظت می‌توانند تلاقی داشته باشند.

در دمایی که فشار بخار A برابر نصف فشار کل باشد شروع تلاقی پروفایل‌هاست



$T > T_{min}$ شرط تلاقی در تبخیر مایع

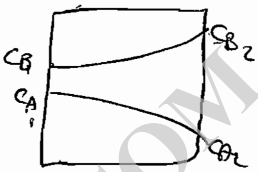
$$T_{min} = T(\text{when } P_A^{sat} = \tfrac{1}{2} P_t)$$

درسیستمی مثل جذب و دفع امکان تلاقی پروفایل های غلظت وجود ندارد چون در این فرایندها جزء نفوذ کننده (A) جزء رقیق است

این مسئله به این دلیل است که در فرایندهایی مثل جذب و دفع اساس بر جداسازی جزء رقیق است برای اینکه میزان انتقال جرم در دستگاه کمتر باشد و در نتیجه ابعاد دستگاه کوچکتر باشد.

در تقطیر: تلاقی پروفایل که خط سوری امکان پذیر است در شکل تقطیر در نزدیکی نقطه جوش اما از نظر فرآیندهای جداسازی انتقال جرم امکان پذیر است چون اساس جداسازی بر مبنای جدا کردن جزء رقیق است

نکته: در پروفایل ها همیشه منحنی پایین نشان دهنده جزء نفوذ کننده است.



* نفوذ متقابل در مختصات کارتزین:

$$\sum N_i = N_A + N_B = 0 \longrightarrow N_A = -D_{AB}\frac{dC_A}{dz} + 0$$

$$N_A = \frac{-D_{AB}\int_{C_{A_1}}^{C_{A_2}} dC_A}{\int_0^{\delta} dz} \longrightarrow N_A = \frac{D_{AB}}{\delta}\left(C_{A_1} - C_{A_2}\right) \qquad (1)$$

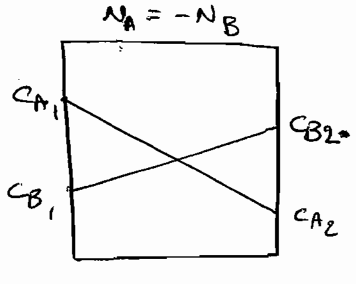
انتگرال از ۰ تا z :

$$N_A = \frac{D_{AB}}{z}\left(C_{A_1} - C_A\right) \qquad (2)$$

$$\longrightarrow C_A = C_{A_1} - \frac{N_A}{D_{AB}} z \longrightarrow$$ C_A تابعی خطی از z است.

$$\xrightarrow{(1)=(2)} \frac{D_{AB}}{\delta}\left(C_{A_1} - C_{A_2}\right) = \frac{D_{AB}}{z}\left(C_{A_1} - C_A\right)$$

$$\longrightarrow \frac{C_{A_1} - C_A}{C_{A_1} - C_{A_2}} = \frac{z}{\delta}$$



برای بدست آوردن مختصات نقطه تلاقی روی پروفایل غلظت :

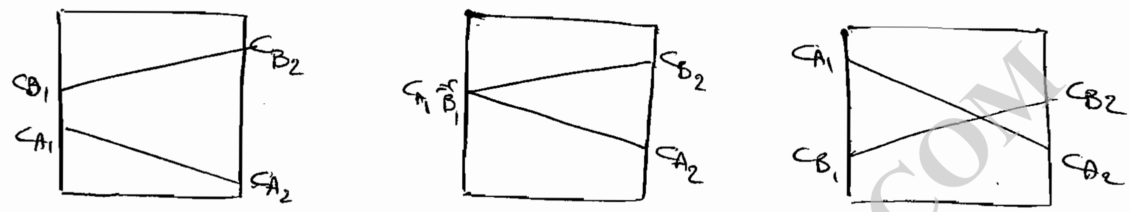
$$C_A = C_B$$

$$C_{A_1} - \frac{N_A}{D_{AB}} z = C_{B_1} - \frac{N_B}{D_{BA}} z$$

$$\xrightarrow{N_B = -N_A \,,\, D_{AB} = D_{BA}} \quad z_{\text{نقطه تلاقی پروفایل غلظت A و B}} = \frac{C_{A_1} - C_{B_1}}{\frac{2N_A}{D_{AB}}}$$

با معلوم بودن برای

پس برای پروفایل های غلظت در نفوذ متقابل در مختصات کارتزین حالات زیر امکان پذیر است .



$C_{A_1} < C_{B_1}$ $C_{A_1} = C_{B_1}$ $C_{A_1} > C_{B_1}$

* نفوذ توام با واکنش ناهمگن در مختصات کارتزین :

$$\sum N_i = \beta N_A$$

$$\left.\begin{array}{l} \text{if } N_A = cte \\ \beta = cte \end{array}\right\} \longrightarrow \sum N_i = cte$$

داریم

حالت اول : $\beta \neq 0$ یا $\sum N_i \neq 0$

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

$$\Rightarrow \int_0^{\delta} dz = \int_{C_{A_1}}^{C_{A_2}} \frac{-D_{AB}\, dC_A}{N_A - \frac{C_A}{C} \sum N_i} \longrightarrow \delta = \frac{D_{AB} \cdot C}{\sum N_i} \, Ln \, \frac{N_A - \frac{C_{A_2}}{C} \sum N_i}{N_A - \frac{C_{A_1}}{C} \sum N_i}$$

طرفین معادله را در $\frac{N_A}{\delta}$ ضرب می کنیم .

$$N_A = \frac{N_A}{\sum N_i} \cdot \frac{D_{AB} \cdot C}{\delta} \cdot Ln \, \frac{\frac{N_A}{\sum N_i} - \frac{C_{A_2}}{C}}{\frac{N_A}{\sum N_i} - \frac{C_{A_1}}{C}} \qquad (1)$$

با انتگرال گیری در فاصله 0 تا z :

$$N_A = \frac{N_A}{\sum N_i} \cdot \frac{D_{AB} \cdot C}{z} \cdot Ln \, \frac{\frac{N_A}{\sum N_i} - \frac{C_A}{C}}{\frac{N_A}{\sum N_i} - \frac{C_{A_1}}{C}} \qquad (2)$$

در نتیجه C_A تابعی اکسپوننسیالی از z است.

$$\textcircled{1}=\textcircled{2} \longrightarrow \left[\frac{\frac{N_A}{\sum N_i}-\frac{C_A}{C}}{\frac{N_A}{\sum N_i}-\frac{C_{A_1}}{C}}\right]=\left[\frac{\frac{N_A}{\sum N_i}-\frac{C_{A_2}}{C}}{\frac{N_A}{\sum N_i}-\frac{C_{A_1}}{C}}\right]^{z/\delta}$$

حالت دوم : $\beta=0$ یا $\sum N_i=0$

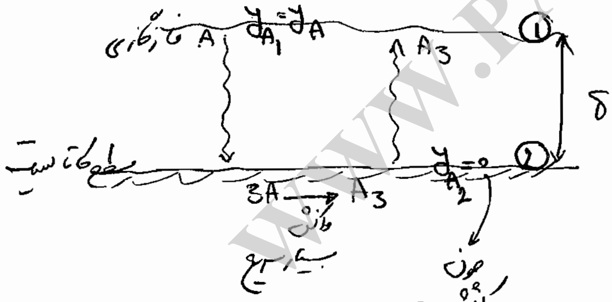
$$N_A=-D_{AB}\frac{dC_A}{dz}$$

$$N_A=\frac{D_{AB}}{\delta}(C_{A_1}-C_{A_2}) \longrightarrow C=C_{A_1}-\frac{N_A}{D_{AB}}z$$

مشابه روابط نفوز متقابل

$$\frac{C_{A_1}-C_A}{C_{A_1}-C_{A_2}}=\frac{z}{\delta}$$

کل مسائل انتقال جرم در مختصات کارتزین به دو دسته کلی تقسیم می‌شود $\sum N_i=0$ یا $\sum N_i\neq 0$



چون واکنش بسیار سریع است $y_{A_2}=0$ است یعنی تا A به سطح کاتالیست می‌رسد تبدیل به A_3 می‌شود و در سطح ② A وجود ندارد.

سوال ۱۰۷ سال ۸۶ :

$$3A \longrightarrow A_3$$

$$\frac{N_A}{3}=\frac{N_{A_3}}{-1}$$

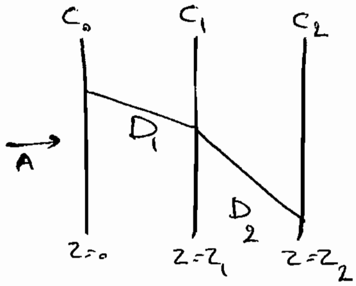
$$\frac{N_A}{\sum N_i}=\frac{N_A}{N_A-\frac{1}{3}N_A}=\frac{3}{2}$$

$$N_A=\frac{3}{2}\cdot\frac{D_{AB}\cdot C}{\delta}\cdot Ln\frac{\frac{3}{2}-0}{\frac{3}{2}-y_A}$$

$$C=\frac{P_t}{RT} \xrightarrow{\text{پس از ساده سازی}} N_A=-\frac{3}{2}\frac{D_{AB}\cdot P_t}{RT\delta}Ln\left(1-\frac{2}{3}y_A\right)$$

توزیع غلظت : $\left[\frac{\frac{3}{2}-y_A}{\frac{3}{2}-y_{A_1}}\right]=\left[\frac{\frac{3}{2}-0}{\frac{3}{2}-y_{A_1}}\right]^{z/\delta}$

سوال ۹۶ سال ۸۹ :



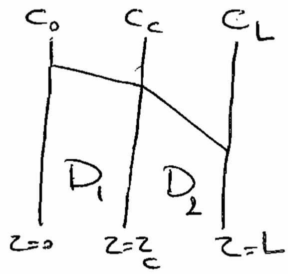
اگر D_{AB} و z هردو دو برابر شود N_A چه تغییری می کند .

$$N_A = \frac{D_{AB}}{\delta}\left(C_{A_1} - C_{A_2}\right)$$

اگر D_{AB} و δ دو برابر شوند N_A ثابت می ماند .

(چون پروفایل های غلظت خطی است نتیجه می گیریم نفوذ متقابل بوده است)

تست ۱ سال ۸۲ :



$N_A = ?$

① لایه $\quad N_A = \frac{D_1}{z_c}\cdot(C_0 - C_c) \longrightarrow N_A \cdot z_c = D_1(C_0 - C_c)$

② لایه $\quad N_A = \frac{D_2}{L - z_c}(C_c - C_L) \longrightarrow N_A(L - z_c) = D_2(C_c - C_L)$

رابطه ها را با هم جمع می کنیم

$$N_A = \frac{C_0 - C_L}{\frac{z_c}{D_1} + \frac{L - z_c}{D_2}}$$

در این روش مقاومتها را به شکل سری هستند با هم جمع کرده ایم .

$$N_A = \frac{D_1(C_0 - C_c) + D_2(C_c - C_L)}{L}$$

هر دو رابطه صحیح است به ② شکل مختلف

جمع بندی

در مختصات کارتزین :

$$\begin{cases} N_A = \frac{N_A}{\sum N_i}\cdot\frac{D_{AB}\cdot C}{\delta}\cdot \mathrm{Ln}\left[\frac{\frac{N_A}{\sum N_i} - \frac{C_{A2}}{C_A}}{\frac{N_A}{\sum N_i} - \frac{C_{A1}}{C_A}}\right], \quad \text{if } \sum N_i \neq 0 \\ \underline{L} \\ N_A = \frac{D_{AB}}{\delta}\left(C_{A_1} - C_{A_2}\right), \quad \text{if } \sum N_i = 0 \end{cases}$$

پروفایل غلظت اکسپوننشیالی

پروفایل غلظت خطی

بررسی روابط N_A در مختصات استوانه ای :

* استوانه ای - نفوذ در جزء ساکن :

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

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

در مختصات استوانه ای

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

rate انتقال جرم

$$\rightarrow G_A = \frac{2\pi L \cdot D_{AB} \cdot C}{Ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \cdot Ln \frac{1-\frac{C_{A2}}{C}}{1-\frac{C_{A1}}{C}} \qquad (1)$$

شار انتقال جرم

$$\Rightarrow N_A = \frac{G_A}{2\pi r L} = \frac{D_{AB} \cdot C}{r \cdot Ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \cdot Ln \frac{1-\frac{C_{A2}}{C}}{1-\frac{C_{A1}}{C}}$$

در نتیجه N_A تابعی از شعاع است .

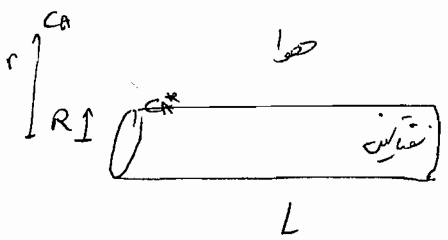
انتگرال گیری از r تا R_1

$$\Rightarrow G_A = \frac{2\pi L \cdot D_{AB} \cdot C}{Ln\left(\frac{r}{R_1}\right)} \cdot Ln \frac{1-\frac{C_A}{C}}{1-\frac{C_{A1}}{C}} \qquad (2)$$

$$(1) = (2) \longrightarrow \left[\frac{1-\frac{C_A}{C}}{1-\frac{C_{A1}}{C}}\right] = \left[\frac{1-\frac{C_{A2}}{C}}{1-\frac{C_{A1}}{C}}\right]^{\frac{Ln\left(\frac{r}{R_1}\right)}{Ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}}$$

پروفایل غلظت

تست ۹۷ سال ۸۸ :



مساله نفوذ در جزء ساکن است چون هوا درون نفتالین نفوذ نمی کند .

تصعید در دمای پایین

جرم مولکولی

$$\text{rate جرمی} \quad \dot{m}_A = G_A \cdot M_A$$

C_A^* : غلظت در سطح استوانه

$$N_A = -D_{AB}\frac{dc_A}{dr} + \frac{c_A}{c}\cdot N_A$$

چون تصعید در دمای پایین است پس فشار بخار کم است پس فرض محلول رقیق صادق است :

T کم باشد $\longrightarrow$ P_A کم $\longrightarrow \frac{c_A}{c} \longrightarrow 0$

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

$G_A = N_A \cdot 2\pi r L$ ثابت

$$G_A = \frac{-2\pi L D_{AB}\int_{c_A^*}^{c_A} dc_A}{\int_R^r \frac{dr}{r}} \longrightarrow \dot{m}_A = \frac{2\pi L D_{AB} M_A (c_A - c_A^*)}{\ln\left(\frac{r}{R}\right)}$$

در هوشی ساکن درون هوا

* نفوذ در مختصات کروی و نفوذ در جزء ساکن :

$$\Sigma N_i = N_A$$

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

$$N_A = \frac{-D_{AB}\frac{dc_A}{dr}}{1-\frac{c_A}{c}}$$

$G_A = 4\pi r^2 \cdot N_A$ ثابت $\longrightarrow$ $G_A = \dfrac{-4\pi D_{AB}\int_{c_{A1}}^{c_{A2}}\frac{dc_A}{1-\frac{c_A}{c}}}{\int_{R_1}^{R_2}\frac{dr}{r^2}}$

$$\Rightarrow G_A = \frac{4\pi D_{AB}\cdot C\cdot \ln\left(\frac{1-c_{A2}/c}{1-c_{A1}/c}\right)}{\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}}$$

هوای ساکن

سوال ۹۹ سال ۸۹ :

نفتالین

R_0

وقتی گفته می‌شود سرعت تصعید به اندازه‌ای کم است دو علت دارد

① فرض حالت پایا صادق باشد

② برای ساده کردن روابط تا به جای لگاریتمی بودن به صورت خطی ظاهر شوند

پس اگر چنین فرضی مطرح شد و در گزینه‌ها هم روابط لگاریتمی را داشتیم هم روابط خطی پس منظور از سوال گزینه

سرعت تصعید کم این است که روابط را خطی در نظر بگیریم.

$$G_A = 4\pi r^2 N_A$$

چون شرایط مرزی‌ها بر حسب x_A است ما هم از ابتدا روابط را بر حسب x_A می‌نویسیم.

$$N_A = -D_{AB} \cdot C \cdot \frac{dx_A}{dr} + x_A N_A$$

$$N_A = \frac{-D_{AB} \cdot C \cdot \frac{dx_A}{dr}}{1 - x_A}$$

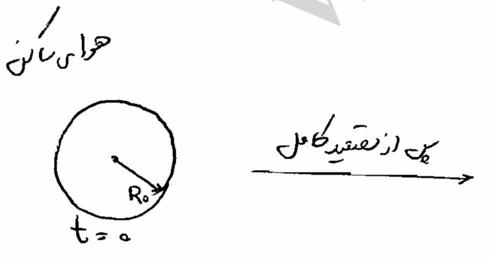
$$G_A = \frac{-4\pi D_{AB} \cdot C \cdot \int_{x_{AS}}^{0} \frac{dx_A}{1-x_A}}{\int_{R_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2}}$$

$$\left.\begin{array}{ll} R_1 = R_0 & x_1 = x_{AS} \\ R_2 = \infty & x_2 = 0 \\ C = \frac{P_t}{RT} & \end{array}\right\} \Rightarrow G_A = \frac{4\pi D_{AB} \cdot P_t \cdot R_0}{RT} Ln\left(\frac{1-0}{1-x_{AS}}\right)$$

شرط مرزی (۲)

نکته: همیشه در تمام روابط شار انتقال جرم D_{AB} باید به صورت کسر باشد.

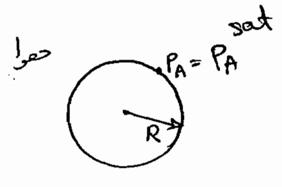
مسأله محاسبه زمان تصعید گلوله نفتالین به درون هوای ساکن اطراف آن:



$r = 0$

$t_{final} = ?$

در لحظه دلخواه t در میانه فرآیند:



می‌خواهیم نفوذ نفتالین در هوا را مورد بررسی قرار دهیم

$$r = R \xrightarrow[\text{درون هوا}]{t} r = \infty$$

در فاصله ∞ P_A صفر است.

$$G_A = \frac{4\pi D_{AB} \cdot P_T}{R_g T \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{\infty}\right)} Ln\left[\frac{1-0}{1-\frac{P_A^{sat}}{P_t}}\right]$$

ثابت گازها

$$G_A = \frac{4\pi D_{AB} \cdot R\, P_t}{R_g \cdot T} \, Ln \, \frac{P_t}{P_t - P_A^{sat}}$$ (1)

این معادله با فرض سرعت کم تبخیر نفتالین
به گونه ای که تغییر شعاع با زمان ناچیز باشد
یعنی زمان steady state بودن تقریبا معتبر باشد .

$$N_A = \frac{G_A}{4\pi r^2}$$

$$N_A = \frac{D_{AB} \cdot P_t \cdot R}{R_g T r^2} \cdot Ln\left(\frac{P_t}{P_t - P_A^{sat}}\right)$$

در سطح گلوله نفتالین $r = R$

$$N_A = \frac{D_{AB} \cdot P_t}{R_g T \cdot R} \cdot Ln\left(\frac{P_t}{P_t - P_A^{sat}}\right)$$ (2)

تا اینجا محاسبه کردیم نفتالین با چه سرعتی تبخیر می شود

هدف بعدی: محاسبه شار با در نظر گرفتن کاهش قطر گلوله نفتالین با زمان . (محاسبه فاز جامد)

$$N_A = -\frac{dn_A}{A \cdot dt}$$

$$n_A = \frac{m_A}{M_w} \rightarrow \frac{dn_A}{dt} = \frac{1}{M_w} \cdot \frac{dm_A}{dt}$$

$$m_A = \underbrace{\rho}_{\text{دانسیته نفتالین}} \cdot V$$

$$\frac{dm_A}{dt} = \rho \cdot \frac{dV}{dt} = \rho \, \frac{4\pi R^2 \, dR}{dt}$$

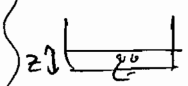
$$\rightarrow \frac{dn_A}{dt} = \frac{\rho}{M_w} \cdot 4\pi R^2 \cdot \frac{dR}{dt}$$

$$\rightarrow N_A = -\frac{1}{A} \, \frac{dn_A}{dt} \xrightarrow{A = 4\pi r^2} N_A = -\frac{\rho}{M_w} \cdot \frac{dR}{dt}$$ (3)

این رابطه به شدت وابسته به این مسئله
مهم
معادله مهمی است

سال ۸۳ سوال ۲۱ صفحه ۳۶۴
سال ۸۱ سوال ۱ " ۳۱۷
نمونه های سوال از معادله (3)

مثلا برای کاهش ارتفاع سطح مایع در اثر تبخیر



$$N_A = -\frac{\rho}{M} \frac{dz}{dt}$$

مایع

اصل بقای جرم در سطح مشترک جامد-گاز : معادله (2) معادله (3)

$$A \cdot N_A = N_A \cdot A$$

$$\rightarrow -\frac{\rho}{M} \cdot \frac{dR}{dt} = \frac{D_{AB} P_t}{R_g T R} Ln \frac{P_t}{P_t - P_A^{sat}}$$

$$\Rightarrow \int_0^{t_{final}} dt = -\frac{\rho R_g T}{M_w \cdot D_{AB}\, P_t \, Ln \dfrac{P_t}{P_t - P_A^{sat}}} \int_{R_0}^{0} R\, dR$$

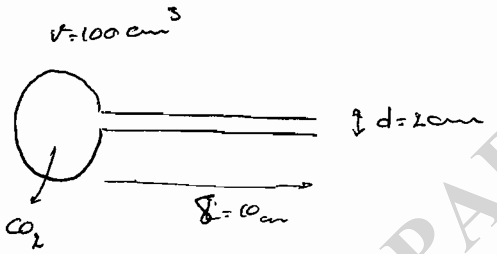
$$\Rightarrow t_{final} = \frac{\rho R_g T}{2 D_{AB} \cdot P_t \cdot M_w \cdot Ln \dfrac{P_t}{P_t - P_A^{sat}}} \cdot R_0^2$$

$$\Rightarrow \quad t_{final} \sim R_0^2$$

مثلاً اگر شعاع گلوله نصف شود زمان $\frac{1}{4}$ می شود.

$$t_{final} \sim \frac{1}{D_{AB}}$$

تست ۱۰۰ سال ۸۸ :



در اصل این مسئله steady state نیست اما چون لوله مویین فرض شده پس سرعت انتقال جرم کم است پس حالت شبه پایدار در نظر میگیریم.

$M_w = 40$

$Ln\, 1.5 = 0.4$

$D_{CO_2-air} = 3.33 \times 10^{-5}\ m^2/sec$

نفوذ متقابل در مختصات کارتزین : چون نفوذ در راستای لوله است نه در راستای شعاع لوله.

غلظت CO_2 در توده هوا

$$N_A = \frac{D_{AB}}{\delta}(C_A - 0)$$

تجمع = ورودی − خروجی

$$V \cdot \frac{dC_A}{dt} = -N_A \cdot \frac{\pi d^2}{4} = -\frac{D_{AB}}{\delta} \cdot C_A \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

تغییرات CO_2 در ظرف $= \frac{d}{dt}(V$

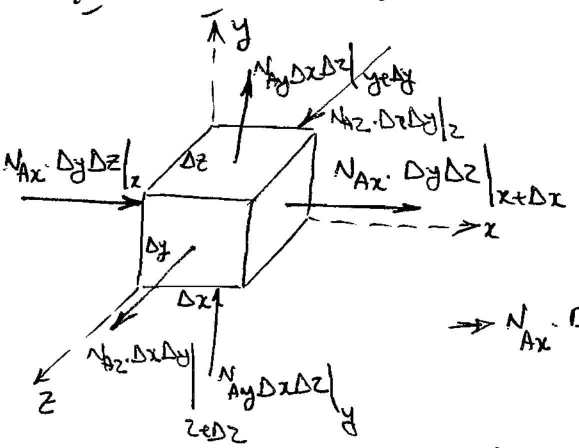
$$\Rightarrow -\frac{4V\delta}{D_{AB}\pi d^2} \int_{C_{A0}}^{C_A = \frac{2}{3}C_{A0}} \frac{dC_A}{C_A} = \int_0^{t_{final}} dt$$

$$\Rightarrow t_{final} = -\frac{4V\delta}{D_{AB}\pi d^2} \cdot Ln \frac{\frac{2}{3}C_{A0}}{C_{A0}} = \frac{4\pi\delta}{D_{AB}\pi d^2}\, Ln \frac{3}{2} = \frac{4 \times 100 \times 10^{-6} \times 0.1 \times 0.4}{3 \times 3.33 \times 10^{-5} \times (0.02)^2} = 400\ sec$$

جلسه سوم

معادله اساسی بیلان جرم در سیستم‌های Diffusion – convection

در مسایلی که فقط از نوع نفوذ هستند با قید شرط‌هایی می‌توانیم از روابطی که در اینجا بدست می‌آوریم استفاده کنیم.



تجمع   تولید   خروجی   ورودی

$$In - out + Gen = Acc$$

$$N_{Ax}\Delta y\Delta z\big|_x - N_{Ax}\Delta y\Delta z\big|_{x+\Delta x}$$

$$N_{Ay}\Delta x\Delta z\big|_y - N_{Ay}\Delta x\Delta z\big|_{y+\Delta y} + R_A\,\Delta x\Delta y\Delta z = \Delta x\Delta y\Delta z\,\frac{\partial C_A}{\partial t}$$

$$N_{Az}\Delta x\Delta y\big|_z - N_{Az}\Delta x\Delta y\big|_{z+\Delta z}$$

R_A: سرعت واکنش همگن $\frac{mol\ A}{m^3.sec}$

طرفین معادله‌های فوق را بر $\Delta x\Delta y\Delta z$ تقسیم می‌کنیم در شرایطی که:
$\Delta x \to 0$
$\Delta y \to 0$
$\Delta z \to 0$

$$-\left[\frac{\partial N_{Ax}}{\partial x} + \frac{\partial N_{Ay}}{\partial y} + \frac{\partial N_{Az}}{\partial z}\right] + R_A = \frac{\partial C_A}{\partial t}$$

$$N_A = \underbrace{J_A + C_A v^*}_{\text{Diffussion}} + \underbrace{C_A v}_{\text{convection}}$$

v: سرعت سیال است.

در سیستم‌های Diffussion-convection می‌توان $v \gg v^*$ در نظر گرفت پس می‌توان رابطه فوق را به شکل زیر در نظر گرفت:

$$N_A = J_A + C_A v$$

اگر در این رابطه v را صفر قرار دهیم نمی‌توانیم فرض کنیم که چون convection نداریم پس رابطه برای حالت Diffussion قابل استفاده است چون ترم $C_A v^*$ از رابطه حذف شده است.

$$N_{A_{x,y,z}} = J_{A_{x,y,z}} + C_A v_{x,y,z}$$

$$\Rightarrow -\underbrace{\left[\frac{\partial J_{Ax}}{\partial x} + \frac{\partial J_{Ay}}{\partial y} + \frac{\partial J_{Az}}{\partial z}\right]}_{(I)} - \underbrace{\left[\frac{\partial (C_A v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (C_A v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (C_A v_z)}{\partial z}\right]}_{(II)} + R_A = \frac{\partial C_A}{\partial t}$$

$$(I) = \vec{\nabla} \cdot \vec{J_A}$$

می دانیم : $J_A = -D_{AB} \nabla C_A$

$$\nabla J_A = -D_{AB} \nabla^2 C_A$$

$$\Rightarrow (I) = -D_{AB}\left[\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2}\right]$$

$$(II) = C_A \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + C_A \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_y \frac{\partial C_A}{\partial y} + C_A \frac{\partial v_z}{\partial z} + v_z \frac{\partial C_A}{\partial z}$$

$$= \underbrace{C_A\left[\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right]}_{(III)} + \left[v_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + v_y \frac{\partial C_A}{\partial y} + v_z \frac{\partial C_A}{\partial z}\right]$$

معادله پیوستگی جزء معادله اصل بقای جرم کلی است پس ترم تولید ندارد چون ماده نه تولید می شود نه از بین می رود.

معادله پیوستگی (اصل بقای جرم کلی) $\longrightarrow \dfrac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \rho + \rho \, \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0$

$$\xrightarrow[\text{سیال تراکم ناپذیر}]{\text{if } \rho = cte} \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \Rightarrow \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \Rightarrow (III) = 0$$

این تساوی صفر نیازی به شرط حالت پایدار ندارد و فقط شرط $\rho = cte$ را در نظر می گیریم

$$\Rightarrow (II) = v_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + v_y \frac{\partial C_A}{\partial y} + v_z \frac{\partial C_A}{\partial z} = \vec{v} \cdot \vec{\nabla} C_A$$

$$\rightarrow \underbrace{D_{AB}\left[\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2}\right]}_{\text{Diffussion}}+\underbrace{R_A}_{\substack{\text{Hemogenous}\\ \text{chemical}\\ \text{Reaction}}}=\underbrace{\frac{\partial C_A}{\partial t}}_{\text{un steady state}}+\underbrace{\left[v_x\frac{\partial C_A}{\partial x}+v_y\frac{\partial C_A}{\partial y}+v_z\frac{\partial C_A}{\partial z}\right]}_{\text{convection}}$$

$$\Rightarrow D_{AB}\nabla^2 C_A + R_A = \frac{\partial C_A}{\partial t}+\vec{v}\cdot\vec{\nabla}C_A$$

در مختصات کارتزین : $\nabla^2(\ )=\frac{\partial^2(\ )}{\partial x^2}+\frac{\partial^2(\ )}{\partial y^2}+\frac{\partial^2(\ )}{\partial z^2}$

در مختصات استوانه : $\nabla^2(\ )=\frac{1}{r}\frac{\partial}{r}\left(r\frac{\partial(\ )}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2(\ )}{\partial\theta^2}+\frac{\partial^2(\ )}{\partial z^2}$

در مختصات کروی : $\nabla^2(\ )=\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial(\ )}{\partial r}\right)+\frac{1}{r}\ \cdots\ +\ \cdots$

نکته : معادله اصل بقای جرم فوق فقط در موارد زیر قابل استفاده است :

۱- سیستم های Diffussion_convection

۲- سیستم های نفوذ به شرط آنکه ترم $C_A v^*$ ناچیز باشد یعنی :

$C_A v^* = 0$

الف) نفوذ متقابل

ب) محلول بسیار رقیق $\longrightarrow$ $C_A v^*$ بسیار کوچک

ج) نفوذ با واکنش ناهمگن با $\beta = 0$

مثال : • مختصات کارتزین

• یک بعدی (در جهت z)

• فقط نفوذ

• واکنش همگن نداریم

• حالت پایدار

$$\frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2}=0 \longrightarrow \underbrace{C_A = az+b}_{\text{خطی}} \Longleftarrow$$

که همان جواب حالات نفوذ متقابل ، نفوذ با واکنش ناهمگن با $\beta=0$ و نفوذ در محلول های رقیق است .

قانون دوم فیک :

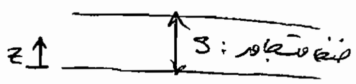
فرضیات:
۱) ترم جابجایی نداشته باشیم
۲) واکنش شیمیایی هم نداشته باشیم

$$D_{AB} \cdot \nabla^2 C_A = \frac{\partial C_A}{\partial t} \xrightarrow{\text{شکل دیگر}} -\vec{\nabla} J_A = \frac{\partial C_A}{\partial t}$$

$$D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} = \frac{\partial C_A}{\partial t}$$ در شرایط یک بعدی

کاربرد قانون دوم فیک :

نفوذ در جامدات شکل پیچیده Drying (در حالت falling rate)

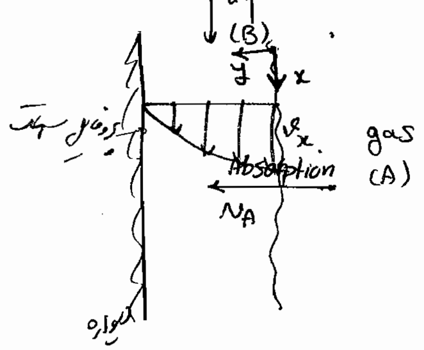


$$\frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \approx \frac{\Delta C_A}{S^2}, \quad \frac{\partial C_A}{\partial t} \approx \frac{\Delta C_A}{t} \Rightarrow D_{AB} \cdot \frac{\Delta C_A}{S^2} \approx \frac{\Delta C_A}{t}$$

$$\Rightarrow t \approx \frac{S^2}{D_{AB}}$$

زمان لازم برای خشک کردن با مجذور ضخامت متناسب است (در حالت falling rate)

مثال: Falling Film



معادله دیفرانسیل بیان کننده تغییرات غلظت A در فاز مایع
در حالت پایدار
هیچ واکنشی در حین جذب A به درون مایع انجام نمی‌شود.

$$\underbrace{D_{AB} \left[\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} \right]} = \underbrace{v_x \frac{\partial C_A}{\partial x}}$$

سوال: آیا این دو جمله به یک اندازه اهمیت دارند؟

شرط صرفنظر نمودن از نفوذ در قیاس با جابجایی :

$$v_x \frac{\partial C_A}{\partial x} \gg D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2}$$

آنالیز مرتبه مقداری : $u_\infty \frac{\Delta C_A}{L} \gg D_{AB} \frac{\Delta C_A}{L^2}$

طول دیواره

$$\vec{Pe} = \frac{u_\infty L}{D_{AB}} \gg 1$$

عدد پکله

درصورتی می توان از ترم نفوذ در یک راستا در مقایسه با ترم جابجایی صرفنظر نمود که عدد پکله عدد بزرگتر باشد .
مثلاً اگر $Pe = 100$ باشد می توان از نفوذ صرفنظر کرد .

if $Pe \gg 1$: پس در مساله مثلاً داریم :

$$D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} = v_x \frac{\partial C_A}{\partial x}$$

$\vec{v} \neq 0$ سرعت به مفهوم سیالاتی داریم . جابجایی : Convection

روشهای محاسبه N_A در جابجایی :
۱) حفظ ساختار روابط نفوذ :
۲) استفاده از روابط مشابه روابط محاسبه ی انتقال حرارت جابجایی :

حرارت : $q = h \times \Delta T$ ⟶ N_A = (ضریب انتقال جرم) × (نیرو محرکه انتقال)

h : ضریب انتقال حرارت جابجایی ، ΔT : نیرو محرکه انتقال گرما

ضریب انتقال جرم : k_c ، k_y ، ...
نیرو محرکه انتقال : ΔC_A ، Δy_A ، ...

حفظ ساختار روابط نفوذ :

نفوذ

$\sum N_i \neq 0 \longrightarrow N_A = \frac{N_A}{\sum N_i} \frac{D_{AB} \cdot C}{\delta} \ln \left(\frac{N_A / \sum N_i - C_{A2}}{N_A / \sum N_i - C_{A1}} \right)$

ضخامت فیلم نفوذ

$\sum N_i = 0 \longrightarrow N_A = \frac{D_{AB} \cdot C}{\delta} \left(\frac{C_{A1}}{C} - \frac{C_{A2}}{C} \right)$

در این حالت از همان روابط نفوذ استفاده می‌کنیم فقط $\frac{D_{AB} \cdot C}{\delta}$ را با F جایگزین می‌کنیم.

جایگزینی

$$\xrightarrow{\sum N_i \neq 0} N_A = \frac{N_A}{\sum N_i} \cdot F \cdot Ln\left(\frac{\frac{N_A}{\sum N_i} - C_{A_2}}{\frac{N_A}{\sum N_i} - C_{A_1}}\right)$$

$$\xrightarrow{\sum N_i = 0} N_A = F\left(\frac{C_{A_1}}{C} - \frac{C_{A_2}}{C}\right)$$

مسأله اصلی محاسبه ضرایب انتقال جرم از نوع F و K است.

روشهای محاسبه ضرایب انتقال جرم F و K :

۱) حل معادلات تفاضلی : پیوستگی - مومنتم - جرم ⟵ ارائه نتایج در قالب اعداد بی‌بعد مثل $Sh, Sc, Re, \dots$

۲) استفاده از تشابه با حرارت و سیالات

۳ - استفاده از معادلات تجربی (کارهای آزمایشگاهی و بعد ارائه نتایج در قالب اعداد بی‌بعد)

۴ - استفاده از تئوری های انتقال جرم ⟵ تئوری فیلم

Penetration

....

رابطه میان ضرایب انتقال جرم :

	$\sum N_i \neq 0$	$\sum N_i = 0$
gas :	$k_c \cdot \Delta C_A$	$k'_c \cdot \Delta C_A$
	$k_y \cdot \Delta y_A$	$k'_y \cdot \Delta y_A$
	$k_G \cdot \Delta P_A$	$k'_G \cdot \Delta P_A$
liq :	$k_L \cdot \Delta C_A$	$k'_L \cdot \Delta C_A$
	$k_x \cdot \Delta x$	$k'_x \cdot \Delta x_A$

$$\sum N_i = N_A$$

* انتقال در جزء ساکن :

رابطه F و k_G ؟

$$\left.\begin{aligned} N_A &= F \cdot \ln \frac{1-\frac{P_{A_2}}{P_t}}{1-\frac{P_{A_1}}{P_t}} \\ N_A &= k_G\left(P_{A_1}-P_{A_2}\right) \end{aligned}\right\} \Rightarrow F = k_G \cdot \frac{P_{A_1}-P_{A_2}}{\ln \frac{P_t-P_{A_2}}{P_t-P_{A_1}}}$$

$$P_t = P_A + P_B \Rightarrow P_t - P_A = P_B$$

$$P_t - P_{A_1} = P_{B_1} \quad , \quad P_t - P_{A_2} = P_{B_2}$$

$$\Rightarrow F = k_G \cdot \frac{P_{B_2}-P_{B_1}}{\ln \frac{P_{B_2}}{P_{B_1}}}$$

$$P_{BM} = \frac{P_{B_2}-P_{B_1}}{\ln \frac{P_{B_2}}{P_{B_1}}}$$

$$C_{BM} = \frac{C_{B_2}-C_{B_1}}{\ln \frac{C_{B_2}}{C_{B_1}}}$$

$$x_{BM} = \frac{x_{B_2}-x_{B_1}}{\ln \frac{x_{B_2}}{x_{B_1}}}$$

نکته : در محلول‌های رقیق از A $(x_A \longrightarrow 0)$

آنگاه

$$x_{BM} \longrightarrow 1$$

$$C_{BM} = x_{BM} \cdot C \longrightarrow C$$

$$P_{BM} = y_{BM} \cdot P_t \longrightarrow P_t$$

* صورت کلی در حالت $\sum N_i = N_A$:

گاز $F = k_G \cdot P_{BM} = k_c \cdot C_{BM} = k_y \cdot y_{BM}$

مایع $F = k_L \cdot C_{BM} = k_x \cdot x_{BM}$

رابطه k_c و k_G ؟

$$k_c \cdot C_{BM} = k_G \cdot P_{BM}$$

$C_{BM} \rightarrow y_{BM} C$, $P_{BM} \rightarrow y_{BM} \cdot P_t$

$$k_c \cdot C = k_G \cdot P_t \xrightarrow{C = \frac{P_t}{RT}} k_c = k_G \cdot RT$$

یا

$$k_c (C_{A_1} - C_{A_2}) = k_G (P_{A_1} - P_{A_2}) \xrightarrow{C_A = \frac{P_A}{RT}} k_c = k_G \cdot RT$$

* نفوذ متقابل : $\sum N_i = 0$

مثال : رابطه F با k'_G ؟

$$\left.\begin{aligned} N_A &= k'_G (P_{A_1} - P_{A_2}) \\ N_A &= F \left(\frac{P_{A1}}{P_t} - \frac{P_{A2}}{P_t} \right) \end{aligned}\right\} \longrightarrow F = k'_G \cdot P_t$$

در حالت کلی برای حالت $\sum N_i = 0$:

ضریب انتقال فاز گاز

گازی

$$F_G = k'_G \cdot P_t = k'_c \cdot C = k'_y$$

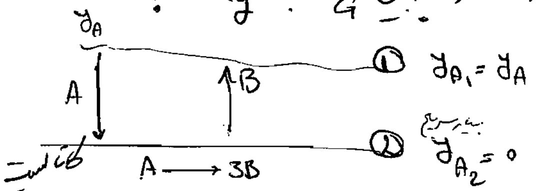
مایع

$$F_L = k'_L \cdot C = k'_x$$

ضریب انتقال فاز مایع

تست 108 سال 85 :

ذره A - واکنش هتروژن کاتالیستی بسیار سریع $A \longrightarrow 3B$ - رابطه بین F_G با k_y ؟



غلظت A در توده گاز را y_A در نظر می‌گیریم :

$$N_A = k_y (y_{A_1} - y_{A_2}) = k_y \cdot y_A \quad \text{I}$$

$$\frac{N_A}{1} = \frac{N_B}{-3}$$

$$\rightarrow \frac{N_A}{N_t} = \frac{N_A}{N_A + N_B} = \frac{N_A}{N_A - 3N_A} = \frac{-1}{2}$$

$$N_A = -\frac{1}{2} \cdot F_G \cdot Ln \frac{-\frac{1}{2} - 0}{-\frac{1}{2} - y_A}$$

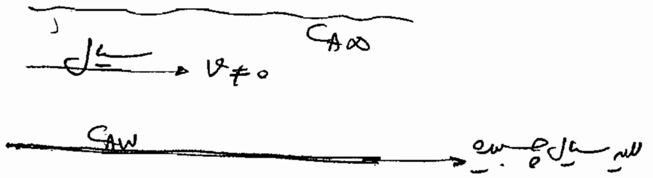
$$N_A = -\frac{1}{2} F_G \cdot \ln\left(\frac{1}{1+2y_A}\right)$$

$$\Rightarrow N_A = \frac{1}{2} F_G \cdot \ln(1+2y_A) \qquad \text{(II)}$$

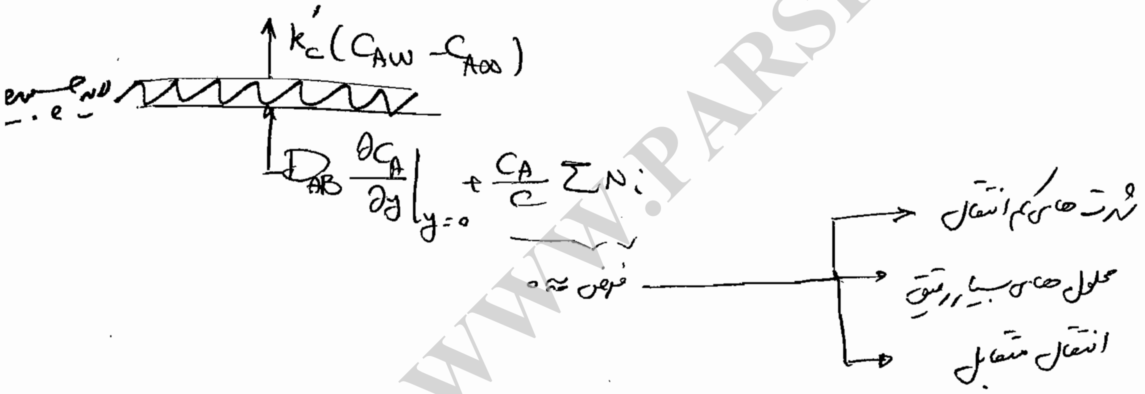
$$\text{(I)} = \text{(II)} \longrightarrow \quad F_G = k_y \cdot \frac{2y_A}{\ln(1+2y_A)}$$

محاسبه ضرایب انتقال جرم از حل معادلات حاکم :

(روش بر اساس بی بعد در انتقال جرم)



درون لایه چسبیده به علت سکون سیال انتقال جرم فقط با مکانیزم نفوذ انجام می شود .



$$k'_c = \frac{-D_{AB}\left.\frac{\partial C_A}{\partial y}\right|_{y=0}}{C_{AW}-C_{A\infty}} \qquad (*)$$

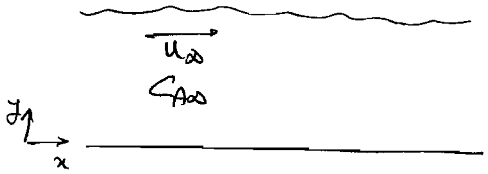
مراحل محاسبه k'_c به روش تئوری :

۱ـ نوشتن معادلات پیوستگی ، مومنتم و جرم

۲ـ حل معادله مومنتم به منظور یافتن پروفایل سرعت

۳ـ حل معادله جرم به منظور یافتن پروفایل غلظت

۴ـ محاسبه k'_c از معادله (*)



معادله مومنتم : $v_x \dfrac{\partial v_x}{\partial x} = \nu \dfrac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} - \dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial P}{\partial x}$

معادله جرم : $v_x \dfrac{\partial C_A}{\partial x} = D_{AB} \dfrac{\partial^2 C_A}{\partial y^2}$ (بزرگ Pe)

$$k'_c = \frac{-D_{AB} \left.\dfrac{\partial C_A}{\partial y}\right|_{y=0}}{C_{AW} - C_{A\infty}}$$

$$Pe = \frac{u_\infty L}{D_{AB}}$$

$D_{AB} \xrightarrow{gas} 10^{-5}$

$D_{AB} \xrightarrow{liq} 10^{-9}$ تا

پس معمولا Pe عدد بزرگی هست.

$$\bar{x} = \frac{x}{L}$$

$$\bar{y} = \frac{y}{L}$$

$$\bar{C}_A = \frac{C_A - C_{AW}}{C_{A\infty} - C_{AW}}$$

$$\bar{v}_x = \frac{v_x}{u_\infty}$$

$$\bar{P} = \frac{P}{\rho u_\infty^2}$$

با کمک این عبارات بی بعد معادلات بالا را بی بعد می کنیم.

$$k'_c = \frac{-D_{AB} \dfrac{(C_{A\infty} - C_{AW})\, \partial \bar{C}_A}{L\, \partial \bar{y}}}{C_{AW} - C_{A\infty}}$$

$$k'_c = \frac{D_{AB}}{L} \cdot \left.\frac{\partial \bar{C}_A}{\partial \bar{y}}\right|_{\bar{y}=0} \rightarrow \frac{k'_c \cdot L}{D_{AB}} = \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial \bar{y}}$$

شروود Sh

$$k'_c = \frac{N_A}{DC_A} = \frac{\dfrac{mol}{m^2 \cdot s}}{\dfrac{mol}{m^3}} = \frac{m}{sec}$$

$$\frac{k'_c \cdot L}{D_{AB}} = \frac{m/sec \cdot m}{\dfrac{m^2}{sec}} =$$ بی بعد

$$\bar{v}_x \cdot \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} = \frac{1}{\underbrace{\left(\frac{u_\infty \cdot L}{\nu}\right)}_{Re}} \cdot \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial y^2} - \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}}$$

$$\bar{v}_x \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial \bar{x}} = \frac{1}{\underbrace{\left(\frac{u_\infty L}{\nu}\right)}_{Re}\underbrace{\left(\frac{\nu}{D_{AB}}\right)}_{Sc}} \cdot \frac{\partial^2 \bar{C}_A}{\partial y^2}$$

در جابجایی حداقل سه عدد بی بعد Sh ، Re و Sc را داریم که :

$$Sh = f(Re, Sc)$$

forced convection : $Sh = f(Re, Sc)$

Natural convection : $Sh = f(Gr_D, Sc)$

Mass : Gr_D , Pe_D , St_D , J_D

Heat : Gr_H , Pe_H , St_H , J_H

بررسی اعداد بی بعد در جابجایی :

عدد شروود : Sh

$$Sh = \frac{F}{D_{AB} \cdot \frac{C}{L}} = \frac{F.L}{D_{AB} \cdot C}$$

$$F = k'_c \cdot C \longrightarrow Sh = \frac{k'_c \cdot L}{D_{AB}}$$

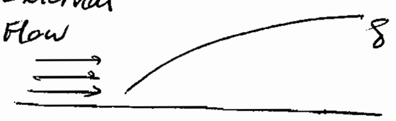
شروود در جرم نقشی را ایفا می کند که Nu (ناسلت) در حرارت چنین نقشی را ایفا می کند .

$$Nu = \frac{hL}{k} = \frac{h}{k/L} \quad \begin{matrix} \leftarrow \text{نیرو convection} \\ \leftarrow \text{نیرو هدایت} \end{matrix}$$

$$Sh = \frac{k'_c \cdot L}{D_{AB}} = \frac{F}{D_{AB}\, C/L} \quad \begin{matrix} \leftarrow \text{نیرو convection} \\ \leftarrow \text{نیرو Difussion} \end{matrix}$$

جریان‌های خارجی

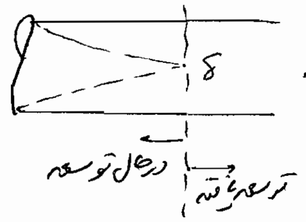
External Flow



$\Rightarrow L =$ طول در مسیر جریان

جریان‌های داخلی

Internal Flow



$\Rightarrow L = D_H$ قطر هیدرولیکی

ضریب متوسط انتقال حرارت $\quad \bar{h} = \dfrac{\int_0^L h\,dx}{\int_0^L dx}$

جرم 〃 〃 〃 $\quad \bar{F} = \dfrac{\int_0^L F\,dx}{\int_0^L dx}$

$$\Rightarrow \quad \overline{Sh} = \frac{\bar{F}\,.\,L}{C\,.\,D_{AB}} \neq \frac{\int_0^L Sh\,dx}{\int_0^L dx}$$

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}\,L}{k}$$

$$\text{if} \begin{cases} \bar{h} = 2\,h_{x=L} \\ \bar{F} = 2\,F_{x=L} \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} \overline{Nu} = 2\,Nu_{x=L} \\ \overline{Sh} = 2\,Sh_{x=L} \end{cases}$$

حالت کلی :

$$\text{if} \begin{cases} Nu \sim x^n \\ Sh \sim x^n \end{cases} \xrightarrow{\text{then}} \begin{cases} \bar{h} = \frac{1}{n}\,h_{x=L} \\ \bar{F} = \frac{1}{n}\,F_{x=L} \end{cases}$$

و ایضاً برای $\overline{Nu}, \overline{Sh}$

مثال: جریان آرام از روی صفحه افقی

$$Sh_x = 0.332\ Re_x^{1/2} \cdot Sc^{1/3}$$

$$Sh_x \rightarrow \frac{F \cdot x}{C D_{AB}} \qquad Re_x \rightarrow \frac{\rho u_\infty \cdot x}{\mu}$$

$$\Rightarrow \quad Sh \sim x^{1/2}$$

$$\overline{F} = 2 F_{x=L}$$

$$\overline{Sh} = 2 Sh_{x=L}$$

۲- عدد رینولدز : Re

External Flow :

$$Re = \frac{\rho u_\infty \cdot L}{\mu}$$

طول صفحه

Internal Flow :

$$Re = \frac{\rho \overline{u} \cdot D_H}{\mu}$$

سرعت متوسط

قطر هیدرولیکی

رینولدز به لحاظ مفهومی : $Re = \dfrac{\text{نیروهای اینرسی}}{\text{نیروهای ویسکوز}}$

رینولدز شاخص تعیین رژیم جریان سیال از حیث آرامی و درهمی

۳- عدد گراشف : Gr_D

$$Gr_D = \frac{g \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right) \cdot L^3}{\nu^2}$$

$$Gr_H = \frac{g \cdot \beta\ \Delta T \cdot L^3}{\nu^2} \quad , \quad \beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P \quad \text{ضریب انبساط حجمی}$$

نیروهایی که باعث حرکت می‌شود

گراشف = $\dfrac{\text{نیروهای شناوری}}{\text{نیروهای ویسکوز}}$

نیروهایی که در برابر حرکت مقاومت می‌کنند

عملاً گراشف در جابجایی آزاد همان نقشی را ایفا می‌کند که Re در جابجایی اجباری دارد یعنی همان نقش تعیین رژیم جریان

۴- عدد اشمیت : Sc :

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} = \frac{\text{شدت نفوذ مومنتم}}{\text{" " جرمی}}$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}}$$

gas : $Sc = \frac{\mu}{\rho . D_{AB}}$

هوا : $\frac{0.01^{cp} \times 10^{-3} \frac{kg/m.s}{cp}}{1 \ kg/m^3 \times 10^{-5} \ m^2/sec} \Rightarrow Sc_{gass} \cong 1$

پس برای گازها :

$$0.5 < Sc_{\text{گازها}} < 2$$

نکته : μ و ρ ویسکوزیته وابسته به نوع سیال است نه جزء نفوذ کننده

liq : $Sc = \frac{1^{cp} \times 10^{-3} \frac{kg/m.s}{cp}}{10^3 \ kg/m^3 \times 10^{-9} \ m^2/sec} \cong 10^3$ Sc در مایعات از مرتبه 1000 است

مثلاً آب

پس برای مایعات :

$$100 < Sc_{\text{مایعات}} < 50,000$$

Scهای خیلی بزرگ مربوط به مایعات ویسکوز است .

محدوده تغییرات ویسکوزیته مایعات خیلی بیشتر از محدوده تغییرات دانسیته است .

تست 110 حل 86 :

انتقال جرم بین دو فاز :

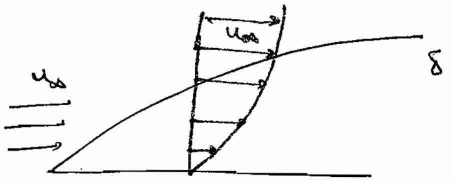
فاز اول : $Sc_1 = 1000 \longrightarrow$ فاز مایع

فاز دوم : $Sc_2 = 2200 \longrightarrow$ فاز مایع

پس عملیات استخراج است

نکته اگر Sc یکی از فازها در حدود یک بود پس انتقال جرم بین فاز گاز - مایع برقرار می شود .

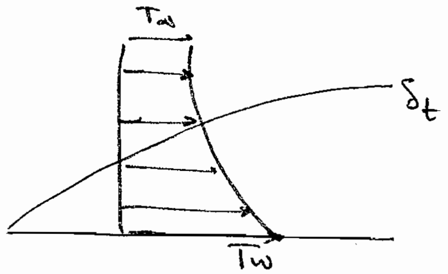
نقش اشمیت در جرم مثل نقش پرانتل در حرارت است .

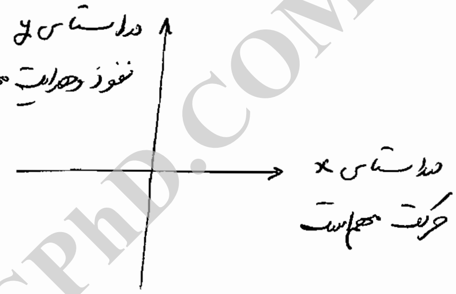


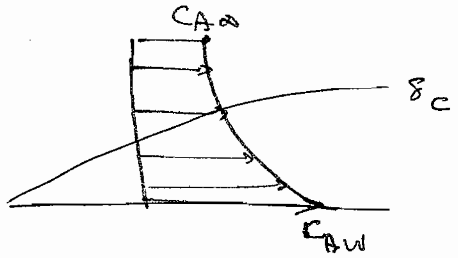
لایه مرزی مومنتوم : لایه‌ای که درون آن گرادیان سرعت داریم

« « حرارتی : « « « « « « دما «

« « جرمی : « « « « « « غلظت « .







در حرارت و سیالات : $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$

لایه مرزی حرارتی   لایه مرزی

$$Pr > 1 \Rightarrow \nu > \alpha \longrightarrow \delta > \delta_t$$

$$Pr = 1 \rightarrow \nu = \alpha \longrightarrow \delta = \delta_t$$

$$Pr < 1 \longrightarrow \nu < \alpha \longrightarrow \delta < \delta_t$$

در سیالات و جرم : $Sc = \frac{\nu}{D_{AB}}$

$$Sc > 1 \longrightarrow \nu > D_{AB} \longrightarrow \delta > \delta_c$$

$$Sc = 1 \longrightarrow \nu = D_{AB} \longrightarrow \delta = \delta_c$$

$$Sc < 1 \longrightarrow \nu < D_{AB} \longrightarrow \delta < \delta_c$$

انتقال حرارت
وانتقال جرم
همزمان
(رطوبت سنجی)

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} = \frac{Sc}{Pr} = \frac{Pe_D}{Pe_H}$$

$$Le > 1 \longrightarrow \alpha > D_{AB} \longrightarrow \delta_t > \delta_c$$

$$Le = 1 \longrightarrow \alpha = D_{AB} \longrightarrow \delta_t = \delta_c$$

$$Le < 1 \longrightarrow \alpha < D_{AB} \longrightarrow \delta_t < \delta_c$$

نکته : Sc برخلاف Pr نمی‌تواند دارای مقادیر بسیار کوچکی باشد یعنی مثلاً $Sc = 0.01$ غیر ممکن است درحالیکه در حرارت $Pr = 0.01$ (Pr های خیلی کوچک) مربوط به فلزات مایع می‌شوند(که K بالایی داشتند) ولی در جرم با توجه به تعریف $Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}}$ و توجه به اینکه بزرگترین مقادیر D_{AB} از مرتبه $10^{-5} \frac{m^2}{sec}$ است لذا نباید انتظار اعداد Sc خیلی کوچک داشت.

تست ۹۸ سال 89

عدد اشمیت در مایعات با افزایش دما ...... (کاهش) می‌یابد چون ضریب نفوذ ...... (افزایش) و ویسکوزیته ...... (کاهش) می‌یابد

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \qquad T\uparrow \Rightarrow \mu\downarrow$$

$$D_{AB} \sim T \rightarrow T\uparrow \Rightarrow D_{AB}\uparrow$$

$T\uparrow \Rightarrow \rho\downarrow$ در مایعات ناچیز است

هیچکدام از گزینه‌ها درست نبوده .

$$\frac{\delta}{\delta_t} = Pr^{+1/3}$$

$$\frac{\delta}{\delta_c} = Sc^{+1/3}$$

$$\frac{\delta_t}{\delta_c} = Le^{+1/3}$$

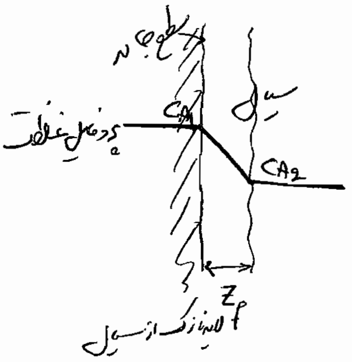
جلسه چهارم

تئوری های انتقال جرم

۱) تئوری فیلمی — Film Theory

برای انتقال جرم هایی که در فصل مشترک سیال و جامد انجام می شود.

انتقال جرم درون یک لایه نازک نزدیک فصل مشترک انجام می شود.



شرایط steady state است.

معادله جرم جزئی :

$$\underbrace{\frac{\partial C_A}{\partial t}}_{\text{حالت پایدار}} + \underbrace{\vec{v}\cdot\vec{\nabla} C_A}_{\text{در نزدیکی سطح جامد سرعت صفر است}} = D_{AB}\,\nabla^2 C_A + \underbrace{R_A}_{\text{واکنش شیمیایی نداریم}}$$

$$\Rightarrow \nabla^2 C_A = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} = 0 \Rightarrow C_A = az + b$$

پس پروفیل غلظت در لایه نازک که انتقال جرم انجام می شود به صورت خطی است.

* مقدار ماده موجود در لایه در مقایسه با آنچه که عبور می کند ناچیز است پس فرض محلول رقیق برقرار است.

شرایط مرزی : $\left| \begin{array}{l} z=0 \\ C_A = C_{A_1} \end{array} \right.$, $\left| \begin{array}{l} z=z_f \\ C_A = C_{A_2} \end{array} \right.$ $\Rightarrow C_A = \frac{C_{A_2}-C_{A_1}}{z_f}\, z + C_{A_1}$

$$N_A = -D_{AB}\frac{\partial C_A}{\partial z}\Big|_{z=0} + \underbrace{\cancel{\frac{C_A}{C}\sum N_i}}_{\text{بسیار ناچیز}}$$

convection : $N_A = k_L\,(C_{A_1}-C_{A_2})$

$$\rightarrow k_L = \frac{-D_{AB}\,\frac{\partial C_A}{\partial z}\Big|_{z=0}}{C_{A_1}-C_{A_2}} = \frac{-D_{AB}\cdot\frac{C_{A_2}-C_{A_1}}{z_f}}{C_{A_1}-C_{A_2}}$$

$$\rightarrow k_L = \frac{D_{AB}}{z_f}$$

$$\rightarrow k_L \sim D_{AB}$$

طبق تئوری فیلم

$$F = \frac{D_{AB}\cdot c}{z_f}$$

این رابطه، رابطه اصلی و برای به دست آوردن رابطه F و k_L و .... از این رابطه استفاده می کنیم.

می‌دانیم : $F = k_L C_{BM} = k_L \cdot x_{BM} \cdot C$

و $F = \dfrac{D_{AB} \cdot C}{z_F}$ $\rightarrow k_L = \dfrac{D_{AB}}{z_F \cdot x_{BM}}$

در محلول رقیق از A :

$x_{BM} \rightarrow 1$

$C_{BM} \rightarrow C$

$P_{BM} \rightarrow P_t$

در حالی که در رابطه تئوری فیلمی $k_L = \dfrac{D_{AB}}{z_F}$ است پس درگلور :

تست ۹۶ سال ۸۸ :

$F = \dfrac{C D_{AB}}{z_f}$

$F = k_c \cdot C_{BM} = k_c \cdot \dfrac{P_{BM}}{RT}$ $\longrightarrow k_c = \dfrac{D_{AB} \cdot P_t}{P_{BM} \cdot \delta}$ گزینه ۲

$C = \dfrac{P_t}{RT}$ و $z_f = \delta$

از طرفی : در تئوری فیلمی چون محلول رقیق است :

$P_{BM} \rightarrow P_t \longrightarrow k_c = \dfrac{D_{AB}}{\delta}$ گزینه ۴

برای اینکه درگلور به چنین مشکلی مواجه نشوم حالت کلی F را در نظر می‌گیریم .

عدد شروود طبق تئوری فیلمی برابر است با :

$Sh = \dfrac{F \cdot L}{C \cdot D_{AB}}$

L : بعد مشخصه یا همان پارامتر هندسی مسأله است .

$F = \dfrac{C \cdot D_{AB}}{z_f}$ $\longrightarrow Sh = \dfrac{L}{z_F}$

در لوله‌ها : $Sh = \dfrac{D}{z_f}$ ← قطر لوله

مثال : جریان آرام درون لوله + تئوری فیلمی :

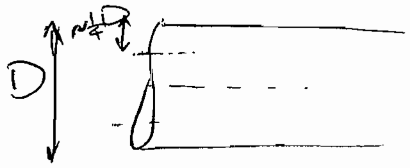
(همان طور که $Nu_{\text{آرام}} = 3.66$)

$$Sh_{\text{جریان آرام}} = 3.66$$

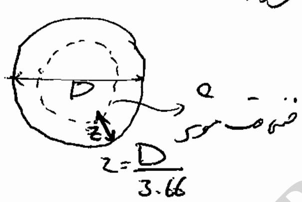
$$\rightarrow \frac{F.D}{C.D_{AB}} = 3.66$$

اگر در این لوله تئوری فیلمی صادق باشد ضخامت مؤثر فیلم را محاسبه کنید :

$$Sh = \frac{L}{z_f} \longrightarrow 3.66 = \frac{D}{z_f} \rightarrow z_f = \frac{D}{3.66}$$



پس ضخامت مؤثر حدود $\frac{1}{4}$ قطر لوله است.



یا : $\frac{F.D}{C.D_{AB}} = 3.66$ ، $F = \frac{C.D_{AB}}{z_f}$ $\longrightarrow z_f = \frac{D}{3.66}$

$\boxed{Sh = 1}$ برای تئوری فیلمی اشتباه است.

مثال : جریان آرام مایع از روی صفحه افقی

$Re = 10^4$ ($Re < 5\times10^5$ جریان آرام)

$Sc = 1000$

$L = 1\ m$

محاسبه کنید : الف) عدد Sh . ب) اگر تئوری فیلمی را صادق بدانیم ضخامت مؤثر لایه را محاسبه کنید.

$$Sh = 0.332 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Sc^{\frac{1}{3}}$$

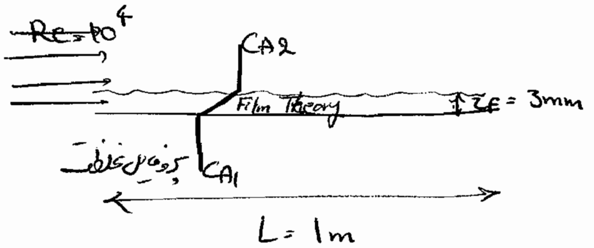
(جریان آرام روی صفحه افقی : $Nu = 0.332\ Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$)

$$Sh = 0.332\ (10^4)^{1/2}\ (1000)^{1/3} = 332$$

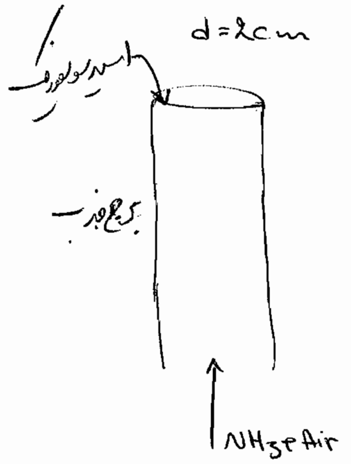
$$\frac{FL}{C \cdot D_{AB}} = 332$$

طبق تئوری فیلمی $F = \dfrac{C\,D_{AB}}{z_f}$

$$\rightarrow \frac{L}{z_f} = 332 \rightarrow z_f = \frac{L}{332} = \frac{1\,m}{332} \simeq 0.003\,m = 3\,mm$$



کنکور پتروشیمی 84 تست شماره 20 :



نسبت قطر لوله به ضخامت فیلم گازی:

$$\frac{D}{z_f} = 15.5$$

$$D_{NH_3-Air} = 0.23\ \frac{cm^2}{sec}$$

$$Sh = ?$$

حل :

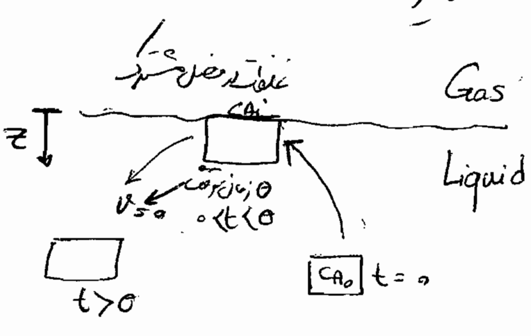
$$Sh = \frac{F \cdot D}{C \cdot D_{AB}}$$

طبق تئوری فیلمی $F = \dfrac{C \cdot D_{AB}}{z_f}$

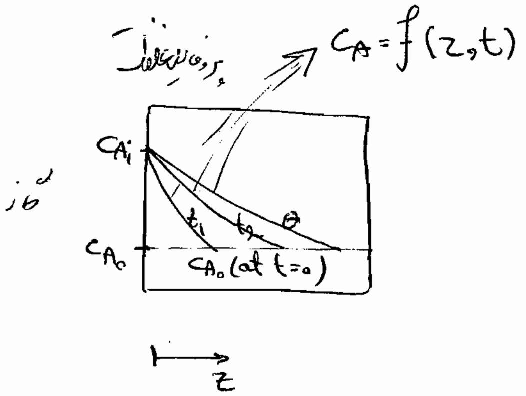
$$\rightarrow Sh = \frac{D}{z_f} = 15.5$$

۲) تئوری نفوذ — Penetration Theory

در سیستم‌های انتقال جرم بین گاز و مایع مورد استفاده قرار می‌گیرد.



برای ساده‌سازی‌ها: یک المان از فاز مایع در نظر می‌گیریم با غلظت C_{A_0} در لحظه $t = 0$. حال این المان حرکت می‌کند به سمت سطح مشترک. این المان در سطح مشترک به اندازه زمان θ توقف می‌کند سپس در سطح مشترک سهم خواسته بعد از زمان θ بازگشت مجدد به فاز مایع



الان را ۹۵ چگونه مورد بررسی قرار می دهیم :

پس تئوری رسوخ unsteady state است .

نتیجه معادله بقای جرم :

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB}\frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2}$$

$$C_A(z, t=0) = C_{A_0}$$

$$C_A(z=0, t) = C_{A_i}$$

$$C_A(z=\infty, t) = C_{A_0}$$

در فاصله بی‌اندازه خیلی دور از سطح مشترک غلظت برابر غلظت اولیه است . فرصت تماس محدود است لذا تغییرات غلظت در سراسر مایع اتفاق نمی‌افتد .

حل فرضی : $\eta = a z^m t^n$

$$\frac{C_A - C_{A_i}}{C_{A_0} - C_{A_i}} = \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D_{AB}t}}\right)$$

می‌دانیم : $\operatorname{erf}(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\eta} e^{-\eta^2}\,d\eta$

$$\operatorname{erf}(0) = 0$$
$$\operatorname{erf}(\infty) = 1$$

$$N_A = -D_{AB}\left.\frac{\partial C_A}{\partial z}\right|_{z=0} \longrightarrow$$

این رابطه گویای این مسئله است که یا محلول رقیق است یا انتقال جزء متقابل است یا سرعت صفر است .

شار لحظه‌ای :

$$\rightarrow N_A = (C_{A_i} - C_{A_0})\sqrt{\frac{D_{AB}}{\pi t}}$$

$$\rightarrow N_{A_{av}} = \frac{\int_0^{\theta} N_A\,dt}{\int_0^{\theta} dt} \longrightarrow \boxed{N_{A_{av}} = 2(C_{A_i} - C_{A_0})\sqrt{\frac{D_{AB}}{\pi\theta}}}$$

شار انتقال حاصل از تئوری رسوخ

$$\rightarrow \bar{k}_L = 2\sqrt{\frac{D_{AB}}{\pi\theta}}$$

$$k_L \sim D_{AB}^{0.5}$$

$$k_L \sim \frac{1}{\sqrt{\theta}}$$

شرایط استفاده از تئوری رسوخ

در تئوری رسوخ : یا مسیر انتقال طولانی یا زمان توقف کوتاه است

$C_A(z=\infty, t) = C_{A_0}$ اولیه

تست ۹۷ و ۸۷ :

$k_L = 2\times10^{-3}\ \frac{m}{sec}$ (برای CO_2)

$k_L = ?$ برای آرگون

$D_{CO_2-H_2O} = 1.46\times10^{-9}\ m^2/sec$

$D_{Argon-H_2O} = 5.84\times10^{-9}\ m^2/sec$

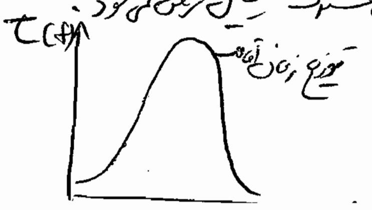
چون جذب در آب با اتیانول است و مسیر انتقال طولانی است پس از تئوری رسوخ استفاده می‌کنیم.

$$k_L \sim D_{AB}^{0.5} \rightarrow \frac{k_{L\,Arg}}{k_{L\,CO_2}} = \sqrt{\frac{D_{Arg-H_2O}}{D_{CO_2-H_2O}}} = 2\times10^{-3}\sqrt{\frac{5.84\times10^{-9}}{1.46\times10^{-9}}} = 4\times10^{-3}\ \frac{m}{sec}$$

۳) تئوری نوشوندگی surface Renewal

همان تئوری رسوخ است با این تفاوت که :

در این تئوری برخلاف تئوری رسوخ زمان توقف المان‌های سیال در مجاورت فصل مشترک یکسان فرض نمی‌شود.



این نمودار می‌گوید که تعداد المان‌هایی که در فصل مشترک توقف نمی‌کنند یا می‌کم توقف می‌کنند صفر است.

$$N_A = \int_0^{\infty} N_A(t) \cdot \tau(t) \cdot dt$$

$$\rightarrow k_L = \sqrt{D_{AB} \cdot S}$$

S: سرعت نوشوندگی (تجدید سطح) . $S \sim \frac{1}{\theta}$

$$\rightarrow \boxed{k_L \sim D_{AB}^{0.5}}$$

۴) تئوری اصلاحی دانکنز: (غلط مصطلح: ادغام تئوری لایه و نوشوندگی)

$$k_L = \sqrt{D_{AB} \cdot S} \cdot \coth \sqrt{\frac{S \cdot z_b^2}{D_{AB}}} \longrightarrow \text{عدد بی‌بعد}$$

$$C_A(z=\infty, t) = C_{A_0} \longleftarrow \text{(در تئوری نفوذ و نوشوندگی)}$$

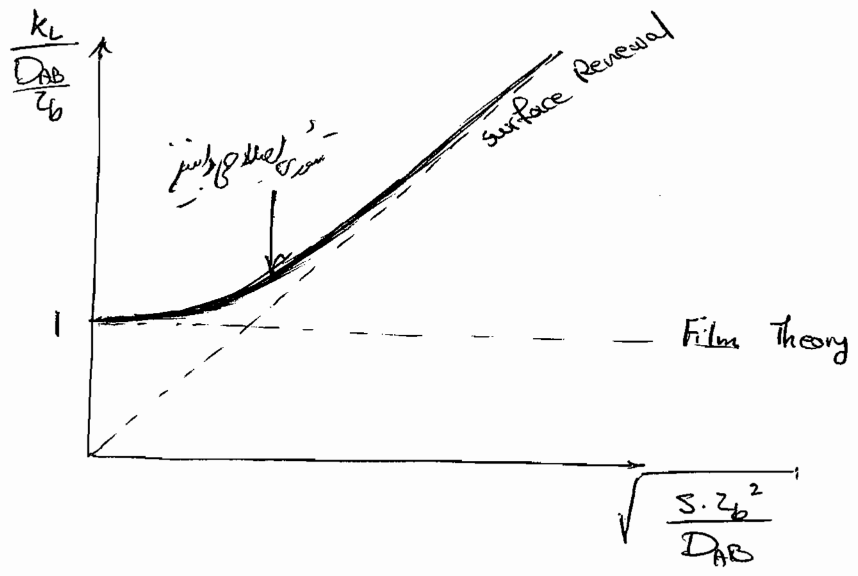
$$\Big\downarrow \text{اصلاحی دانکنز}$$

$$C_A(z=z_b, t) = C_{A_0}$$

این تئوری در شرایط بین تئوری لایه‌ای و نوشوندگی به کار می‌رود که z نه به سمت صفر میل می‌کند نه به سمت ∞ .

اگر $z \rightarrow 0$: تئوری دانکنز ⟶ تئوری فیلم

$z \rightarrow \infty$: " ⟶ تئوری نوشوندگی



if $\dfrac{S \cdot z_b^2}{D_{AB}} \longrightarrow 0 \Longrightarrow$ Film Theory

$$\begin{cases} z_b \longrightarrow 0 \\ S \longrightarrow 0 \quad (\theta \longrightarrow \infty) \text{ steady state} \\ D_{AB} \longrightarrow \infty \end{cases} \longrightarrow k_L \sim D_{AB}^{1}$$

$k_L = \sqrt{D_{AB} \cdot S} \longleftarrow$ تئوری نفوذی

if $\dfrac{S z_b^2}{D_{AB}} \longrightarrow \infty \Longrightarrow$ surface Renewal Theory

$$\begin{cases} z_b \longrightarrow \infty \\ S \longrightarrow \infty \quad (\theta \longrightarrow 0) \\ D_{AB} \longrightarrow 0 \end{cases}$$

$k_L = \sqrt{D_{AB} \cdot S}$

$k_L \sim D_{AB}^{0.5}$

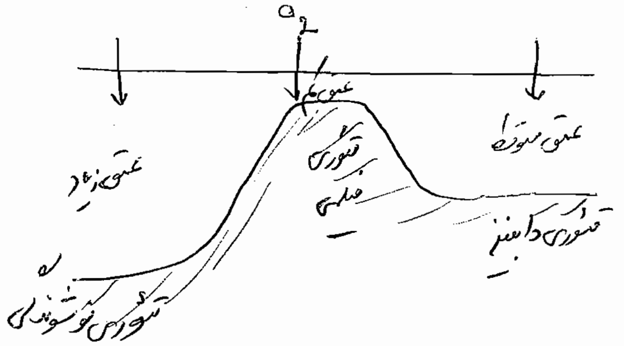
$k_L \sim D_{AB}^{0.5 \to 1}$ در تئوری اصلاحی داریم

مقایسه تئوری های مختلف :

$k_L \sim D_{AB}^{n}$

$n=1$	Film Theory	
$n=0.5$	penetration	"
$n=0.5$	surface Renewal	"
$n=0.5 \to 1$	Dobbins	"
$n=0 \to 0.7 \text{ یا } 0.8$	Experimental	"

مثال: جذب O_2 در آب رودخانه



برای جریان آرام روی صفحه:

$$Sh = 0.332\, Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3}$$

$$Sh = \frac{F.L}{C.D_{AB}} \qquad Re = \frac{\rho u_\infty L}{\mu} \qquad Sc = \mu / \rho D_{AB}$$

$$\Rightarrow F \sim D_{AB}^{2/3}$$

تشابه Similarity

• مبانی تئوری تشابه:

طرح S.S.

$$\overbrace{\vec{v}\cdot\vec{\nabla} C_A}^{\text{convection}} = \overbrace{D_{AB}\nabla^2 C_A}^{\text{Diffusion}} + R_A$$

انتقال جرم: $\vec{v}\cdot\vec{\nabla} C_A = D_{AB}\nabla^2 C_A + R_A$

انتقال حرارت: $\vec{v}\cdot\vec{\nabla} T = \alpha \nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{\rho c_p} + \frac{\Phi}{\rho c_p}$

انتقال مومنتم: $\vec{v}\cdot\vec{\nabla}\vec{v} = \nu \nabla^2\vec{v} + \vec{g} - \frac{1}{\rho}\vec{\nabla} P$

نتیجه: مکانیزم های انتقال و ساختار معادلات تقریباً در پدیده های جرم، حرارت و مومنتم دارای شباهت های فراوانی هستند.

• شرایط تشابه:

۱) $R_A = 0$ ، $\dot{q} = \Phi = 0$ ، و در راستای حرکت g مؤلفه نداشته باشد و $\nabla P = 0$

نتیجه: در مسأله فیلم ریزان از تشابه با سیالات نمی‌توان استفاده کرد به علت وجود g اما تشابه به حرارت و جرم ممکن است برقرار باشد.

معادلات فوق را بی‌بعد می‌کنیم :

$$\bar{C} = \frac{C_A - C_{AW}}{C_{A\infty} - C_{AW}}$$

$$\bar{T} = \frac{T - T_W}{T_\infty - T_W}$$

$$\bar{v} = \frac{v - v_W}{v_\infty - v_W} = \frac{v}{v_\infty}$$

$$\bar{x} = \frac{x}{L} \quad , \quad \bar{y} = \frac{y}{L}$$

$$\bar{v} \cdot \nabla \bar{T} = \frac{1}{Re\, Pr} \cdot \nabla^2 \bar{T}$$

$$\bar{v} \cdot \nabla \bar{C} = \frac{1}{Re\, Sc} \cdot \nabla^2 \bar{C}$$

$$\bar{v} \cdot \nabla \bar{v} = \frac{1}{Re} \cdot \nabla^2 \bar{v}$$

۲) عدد رینولدز در هر سه پدیده برابر باشد .

۳) $Pr = Sc = 1 \quad (Le = 1)$ یا $\nu = \alpha = D_{AB}$

۴) ضرایب eddy هر سه پدیده باید برابر باشند که در جریان درهم مطرح می‌شوند $\varepsilon_D = \varepsilon_H = \varepsilon_V$

Laminar Flow	Turbulent Flow
$J_A = -D_{AB} \dfrac{dC_A}{dz}$	$J_A = -(D_{AB} + \varepsilon_D) \dfrac{dC_A}{dz}$
$q = -k \dfrac{dT}{dz} = -\underbrace{\dfrac{k}{\rho c_p}}_{\alpha} \cdot \dfrac{d\rho c_p T}{dz}$	$q = -(\alpha + \varepsilon_H) \dfrac{d\rho c_p T}{dz}$
$\tau = -\mu \dfrac{du}{dz} = -\underbrace{\dfrac{\mu}{\rho}}_{\nu} \cdot \dfrac{d\rho u}{dz}$	$\tau = -(\nu + \varepsilon_V) \dfrac{d\rho u}{dz}$

$C_A : \dfrac{\text{مقدار جزء A}}{\text{حجم}}$

$\rho c_p T : \dfrac{\text{انرژی}}{\text{حجم}}$

$\rho u : \dfrac{\text{مومنتم}}{\text{حجم}}$

 ⟶ خوشه شکل

توده از مولکولها

(eddy)

D_{AB} : خاصیت فیزیکی سیستم چند جزئی که به مسیر جریان بستگی ندارد.

ε_D : به مسیر انتقال بستگی دارد.

سوال: تست 26 صفحه 68 به کتاب مراجعه شود.

سیال →

جریان درهم — ε_D مهم

حالت گذرا — ε_D و D_{AB} مهم

جریان آرام — D_{AB} مهم

نکته: در عمل در جریان درهم : $\varepsilon_D = \varepsilon_H \neq \varepsilon_V$

نتیجه: در جریان درهم دقت تشابه با سیالات کاهش پیدا می‌کند.

۵) تشابه هندسی: هم شکل یکسان باشد مثلاً مقایسه هر دو در لوله باشد یا هر دو روی صفحه باشد و در زمانی مثلاً در لوله برای هر دو نسبت قطر به طول لوله یکسان باشد.

۶) شرایط مرزی با بعد ← هم نوع

شرایط مرزی بی بعد ← یکسان

at $y=0$ ⟶ $C_A = C_{AW}$ یا $\overline{C}_A = 0$

$T = T_w$, $\overline{T} = 0$

$u = 0$, $\overline{u} = 0$

↓ از لحاظ ریاضی هر سه نوع اول اند ; ↓ یکسان

نکته: h و F این که از تشابه با سیالات بدست می‌آیند به ترتیب h حالت دمای ثابت دیواره و F حالت غلظت ثابت دیواره می‌شود. به عبارتی h و F شار ثابت نیست.

در حالت شار حرارتی ثابت در دیواره یا شار جرمی ثابت در دیواره نمی‌توان سراغ تشابه با سیالات رفت چون در سیالات شرط مرزی در دیواره همیشه نوع اول است $(u=0)$

۷) شدت انتقال جرم تا حد امکان کم باشد تا تأثیری بر پروفایل های سرعت نگذارد.

انتقال حرارت →
انتقال جرم →
انتقال مومنتم →

شرایط کاملاً مشابه تکرار هستند → پروفایل های بی بعد غلظت سرعت و دما در هم منطبق هستند.

$$\bar{C}_A = \bar{T} = \bar{V}$$

$$\delta_c = \delta_t = \delta$$

• شرایط تشابه کاربردی

مشکلات تشابه تئوری:

1) $\nu = \alpha = D_{AB}$ در حالات بسیار خاص در بعضی از گازها برقرار است. پس فقط در تعداد به خصوصی از گازها و تحت شرایط خاص می‌توان از تشابه تئوری استفاده کرد که واقعاً بسیار محدود کننده است.

2) لزوم تساوی Re ها است.

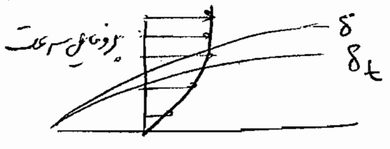
در تشابه کاربردی: الف) لزوم به تساوی Re ها نیست فقط کافی است رژیم های جریان مشابه باشند یعنی هر دو درهم یا هر دو آرام باشند.

ب) لزوم به تساوی ν و α و D_{AB} یا به عبارتی لزوم به $Pr = Sc = Le = 1$ نیست یعنی محدودیت نوع سیال برداشته می‌شود.

محدوده های Pr و Sc و Le باید مشابه باشند.

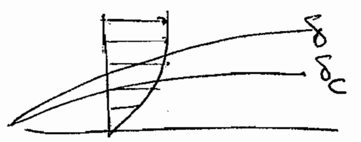
مثال:

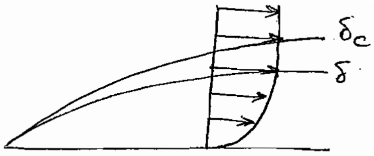
$$Nu = 0.332\, Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (Pr > 1)$$



تشابه کاربردی ↓

$$Sh = 0.332\, Re^{1/2}\, Sc^{1/3} \quad (\text{باید } Sc > 1)$$





اگر $Sc < 1$ باشد :

پس درون لایه مرزی جرمی دو نوع پروفایل سرعت داریم لذا در این حالت نمی‌توان از تشابه با حالت $Pr < 1$ استفاده نمود

در تشابه کالبرن :

دیگر پروفایل‌های بی‌بعد سرعت، غلظت و دما بر هم منطبق نخواهند بود اما می‌توان c_f و h و F را به کمک هم محاسبه نمود.

• نحوه محاسبه F به کمک تشابه با حرارت و سیالات

۱) تشابه با حرارت : در روابط Nu کافیست Nu را به Sh تبدیل کنیم و Pr را به Sc.

مثلاً : $Nu = 0.332 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$ جریان آرام صفحه افقی

$$\downarrow$$

$Sh = 0.332 \; Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3}$ " " " "

۲) تشابه با سیالات : آنالوژی رینولدز - کالبرن

$$J_D = J_H = \frac{c_f}{2}$$

$$J_D = St_D \cdot Sc^{2/3} \quad , \quad St_D = \frac{Sh}{Re \cdot Sc} = \frac{F}{c \cdot u} = \frac{k_c'}{u} = \cdots$$

$$J_H = St_H \cdot Pr^{2/3} \quad , \quad St_H = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} = \frac{h}{\rho u c_p}$$

نکاتی در رابطه با آنالوژی رینولدز - کالبرن

ضریب اصطکاک

$$St_D \cdot Sc^{2/3} = \frac{c_f}{2}$$

$$\downarrow$$

$$\frac{F}{cu} \cdot Sc^{2/3} = \frac{c_f}{2}$$

پس F به کمک c_f از طریق معادله زیر محاسبه می‌شود.

نکته : در سطحی که زبر باشد انتقال حرارت بهتر از سطح صیقلی انجام می‌شود.

$F \sim c_f$

$h \sim c_f$

۱) $J_D = J_H = \frac{c_f}{2}$ تعریف آنالوژی رینولدز - کالبرن

۲) $F, h \sim c_f$

۳) این آنالوژی در جریان آرام درون لوله صادق نیست.

$Sh = 3.66$ برای جریان آرام $\longleftarrow$ از حل معادله تفاضلی

$$c_f = \frac{16}{Re}$$

از آنالوژی رینولدز-کالبرن ⟶ $\frac{Sh}{Re.Sc}\cdot Sc^{2/3} = \frac{\frac{16}{Re}}{2}$

طبق آنالوژی $Sh = 8\,Sc^{1/3} \neq 3.66$

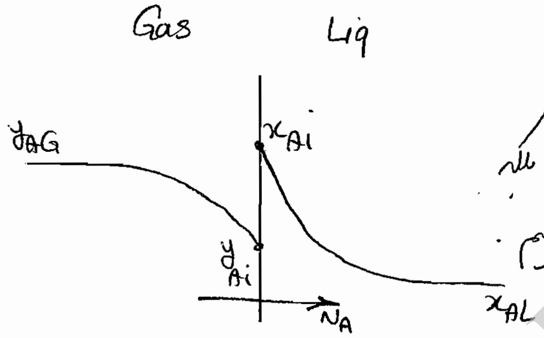
4) در مسائل شار ثابت در دیواره نمی‌توان از آنالوژی با سیالات استفاده کرد (به دلیل هم نوع نبودن شرایط مرزی)

5) در جریان از روی سطوح منحنی که علاوه بر اصطکاک سطحی (Skin Friction)، اصطکاک شکلی (Form Drag) هم دارند نمی‌توان از آنالوژی استفاده کرد.

$J_D = J_H = \frac{C_f}{2}$ و C_f باید فقط اصطکاک سطحی باشد

→ جریان از روی سطوح منحنی $J_D = J_H \neq \frac{C_f}{2}$

تست ۱۰۸ سال ۸۲ : ج



انتقال جرم بین فازها :

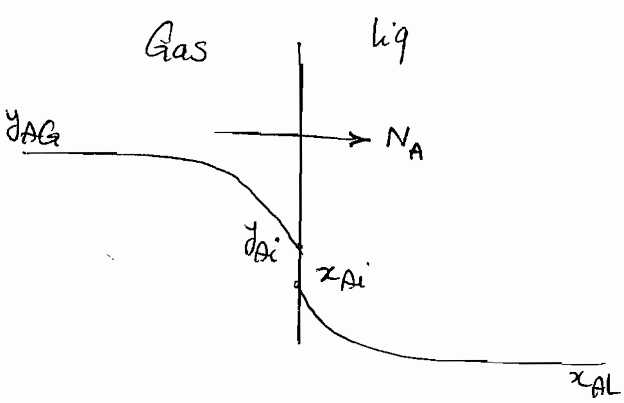
برای تعیین جهت انتقال جرم نمی‌توان y_{AG} را با x_{AL} مقایسه کنیم بلکه y_{AG} را با y_{Ai} (مقدار تعادلی‌اش) و x_{AL} را با x_{Ai} مقایسه می‌کنیم.

با توجه به مقادیر تعادلی می‌فهمیم انتقال از گاز به مایع است و در معادله تعادل ($y = mx$) $m<1$ است

$y_{Ai} < x_{Ai}$

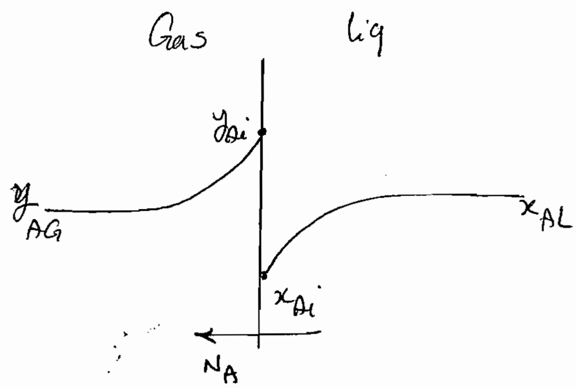
$N_A = k_y(y_{AG} - y_{Ai})$

$N_A = k_x(x_{Ai} - x_{AL})$ → $\frac{y_{AG}-y_{Ai}}{x_{AL}-x_{Ai}} = -\frac{k_x}{k_y}$ معادله خط نیرو محرکه



انتقال جرم از گاز به مایع

$y_{Ai} > x_{Ai} \rightarrow y = mx \longrightarrow m > 1$



انتقال از مایع به گاز

$y_{Ai} > x_{Ai} \rightarrow y = mx \longrightarrow m > 1$

جلسه پنجم

سوال: آیا معادله زیر تنها فرم معادله نیرو محرکه است؟

$$\frac{y_{AG}-y_{Ai}}{x_{AL}-x_{Ai}} = -\frac{k_x}{k_y}$$

معادله نیرو محرکه در حالت $\Sigma N_i \neq 0$ با استفاده از ضرایب نوع k

جواب خیر است.

مسائل انتقال جرم را به دو دسته تقسیم می کنیم:

* $\Sigma N_i \neq 0$

$$N_A = \frac{N_A}{\Sigma N_i} \cdot F_G \cdot \ln \frac{\frac{N_A}{\Sigma N_i} - y_{Ai}}{\frac{N_A}{\Sigma N_i} - y_{AG}} \qquad \text{I}$$

روابط را با فرض انتقال از گاز به مایع نوشته ایم:

$y_{AG} > y_{Ai}$

غلظت بیشتر را در مخرج می نویسیم.

$$N_A = \frac{N_A}{\Sigma N_i} \cdot F_L \cdot \ln \frac{\frac{N_A}{\Sigma N_i} - x_{AL}}{\frac{N_A}{\Sigma N_i} - x_{Ai}} \qquad \text{II}$$

$x_{Ai} > x_{AL}$

$$\text{I} = \text{II} \longrightarrow \left[\frac{\frac{N_A}{\Sigma N_i} - y_{Ai}}{\frac{N_A}{\Sigma N_i} - y_{AG}}\right] = \left[\frac{\frac{N_A}{\Sigma N_i} - x_{AL}}{\frac{N_A}{\Sigma N_i} - x_{Ai}}\right]^{F_L/F_G}$$

این معادله، معادله خط نیرو محرکه در حالت $\Sigma N_i \neq 0$

با استفاده از ضرایب نوع F

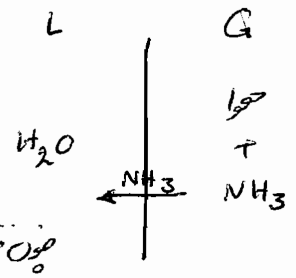
تست 109 سال 86: دقیقاً همین رابطه سوال کنکور بوده.

تست 112 سال 85:

آمونیاک از مخلوط آمونیاک و هوا توسط آب جذب می شود

$y_{AG} = 0.6$ $\quad F_G = 1.8 \times 10^{-3}$ $\;\mathrm{kmol/m^2.s}$

$x_{AL} = 0.04$ $\quad F_L = 1.2 \times 10^{-3}$ "



$\frac{N_A}{\Sigma N_i} = 1$ چون فقط آمونیاک در گاز نفوذ می کند

$$\rightarrow \left[\frac{1-y_{Ai}}{1-0.6}\right] = \left[\frac{1-0.04}{1-x_{Ai}}\right]^{\frac{1.2}{1.8}} \rightarrow \frac{1-y_{Ai}}{0.4} = \left[\frac{0.96}{1-x_{Ai}}\right]^{2/3}$$

در حالت $\sum N_i \neq 0$:

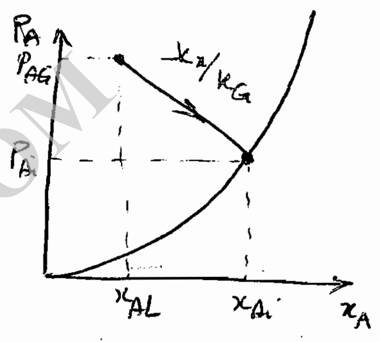
* اگر از ضرایب نوع F استفاده شود معادله نیرو محرکه غیر خطی است اما در ضرایب نوع k معادله نیرو محرکه خطی است.

$$N_A = k_G\,(P_{AG} - P_{Ai})$$

بعلت انتقال از گاز به مایع

$$N_A = k_x\,(x_{Ai} - x_{AL})$$

$$\rightarrow \frac{P_{AG} - P_{Ai}}{x_{AL} - x_{Ai}} = -\frac{k_x}{k_G} \xrightarrow{\text{فرض}}$$



تست ۱۰۱ سال ۸۹ :

$y_{Ai} = 0.01$

$x_{Ai} = 0.08$

$x_{AL} = 0.1$

$y_{AG} = 0.2$

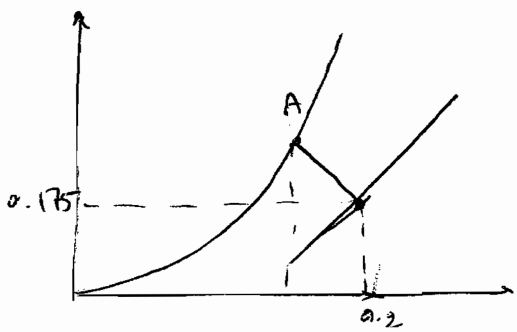
$k_x/k_y = ?$

$$\frac{y_{AG} - y_{Ai}}{x_{AL} - x_{Ai}} = \frac{0.2 - 0.01}{0.1 - 0.08} = -\frac{k_x}{k_y}$$

$$\rightarrow \frac{k_x}{k_y} = -9.5$$

تست غلط بوده هم جواب ها غلط بوده هم اگر $y_{AG} > y_{Ai}$ است باید $x_{Ai} > x_{AL}$ باشد که نیست.

تست ۱۰۰ سال ۸۹ :



$A(0.225\ ,\ 0.175)$

مختصات نقطه A با توجه به شکل غلط است پس A را به صورت زیر در نظر می گیریم:
$A(0.175\ ,\ 0.225)$

$$\frac{0.175-0.225}{0.2-0.175} = -\frac{k_x}{k_y} \Longrightarrow \frac{k_x}{k_y} = 2$$

تست 102 سال 88 :

$N_B = 0 \longrightarrow$ انتقال محیط ساکن $\longrightarrow \frac{N_A}{\sum N_i} = 1$

$F_L = F_G$

$y_{AG} = 0.8$

$x_{AL} = 0.2$

$y_{Ai} = x_{Ai}$ [illegible]

$$\left[\frac{1-y_{Ai}}{1-0.8}\right] = \left[\frac{1-0.2}{1-x_{Ai}}\right]^1$$

$$\frac{1-y_{Ai}}{0.2} = \frac{0.8}{1-y_{Ai}} \longrightarrow y_{Ai} = 0.6 = x_{Ai}$$

$* \ \sum N_i = 0$

استفاده از ضرایب نوع k :

$N_A = k'_y (y_{AG} - y_{Ai})$

$N_A = k'_x (x_{Ai} - x_{AL})$

$$\longrightarrow \boxed{\frac{y_{AG}-y_{Ai}}{x_{AL}-x_{Ai}} = -\frac{k'_x}{k'_y}}$$

معادله نیرو محرکه در حالت $\sum N_i = 0$

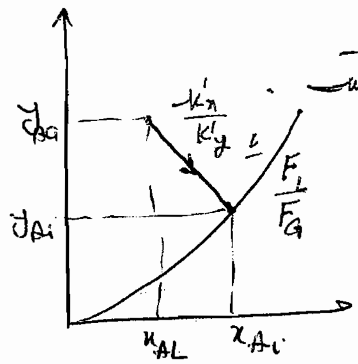
استفاده از ضرایب نوع F :

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

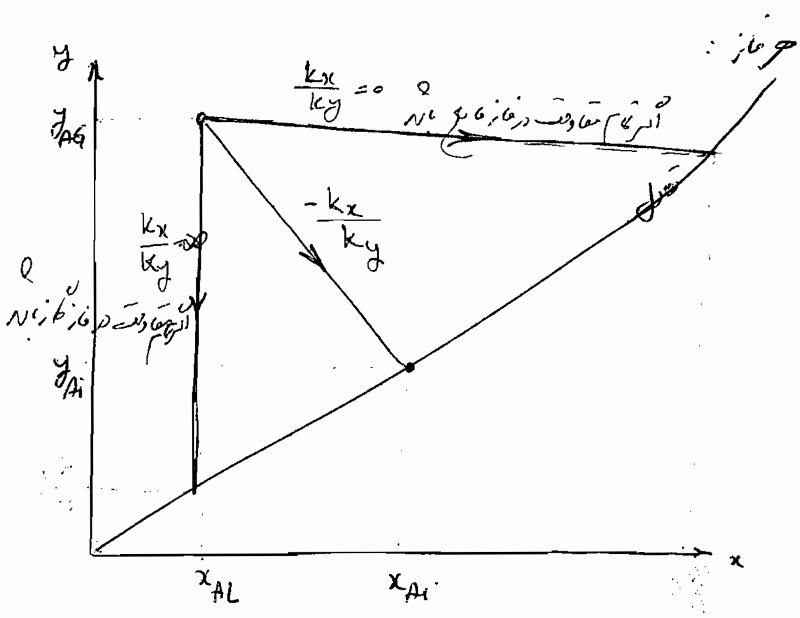
$N_A = F_L (x_{Ai} - x_{AL})$

$$\longrightarrow \boxed{\frac{y_{AG}-y_{Ai}}{x_{AL}-x_{Ai}} = -\frac{F_L}{F_G}}$$

معادله نیرو محرکه در حالت $\sum N_i = 0$ با استفاده از ضرایب نوع F خطی است.



ضرایب کلی انتقال جرم و تعیین سهم مقاومت هر فاز :



* هرچه خط معادله نیروی محرکه بالای منحنی تعادلی باشد انتقال از فازی که روی محور عمودی است به فازی که روی محور افقی است سهم بیشتری انجام می‌شود.

دو حالت حدی :

① فرض کنید تمام مقاومت در مقابل انتقال جرم در فاز گاز باشد :

h : $\frac{1}{h}$ مقاومت

k_x : $\frac{1}{k_x}$ مقاومت

k_y : $\frac{1}{k_y}$ "

$$k_y \to 0 \Rightarrow \frac{1}{k_y} \to \infty \Rightarrow \frac{k_x}{k_y} \to \infty$$

② فرض کنید تمام مقاومت در مقابل انتقال جرم در فاز مایع باشد :

$$k_x \to 0 \Rightarrow \frac{k_x}{k_y} \to 0$$

بیشترین نیروی محرکه ممکن در فاز گاز

نیروی محرکه در حالتیکه تمام مقاومت در فاز گاز باشد

$$N_A = K_y \overbrace{(y_{AG} - y_A^*)}$$

K_y : ضریب کلی انتقال جرم بر مبنای فاز گاز

K_x : " " " " " " " مایع

$$N_A = K_x \underbrace{(x_A^* - x_{AL})}$$

نیروی محرکه در حالتیکه تمام مقاومت در فاز مایع باشد

استفاده از ضرایب کلی انتقال جرم که از روابط تجربی و آزمایشگاهی (منطبق) به ضرایب محلی ارجحیت دارد.

نکته:

$K \not< k$

ما وی برای حالتی است که واقعا تمام مقاومت

در یک فاز باشد.

روابط، وقتی انتقال از فاز گاز به مایع نوشته شده:

$$N_A = \frac{N_A}{\sum N_i} \cdot \underset{\substack{\downarrow \\ \text{overall} \\ \text{کلی}}}{F_{OG}} \cdot \ln \frac{\frac{N_A}{\sum N_i} - y_A^*}{\frac{N_A}{\sum N_i} - y_{AG}}$$

$$N_A = \frac{N_A}{\sum N_i} \cdot F_{OL} \cdot \ln \frac{\frac{N_A}{\sum N_i} - x_{AL}}{\frac{N_A}{\sum N_i} - x_A^*}$$

$\sum N_i \neq 0$

$$N_A = F_{OG}(y_{AG} - y_A^*)$$

$$N_A = F_{OL}(x_A^* - x_{AL})$$

$\sum N_i = 0$

یافتن رابطه بین ضرایب کلی و ضرایب محلی :

$$y_{AG} - y_A^* = y_{AG} - y_{Ai} + y_{Ai} - y_A^*$$

با فرض معادله تعادلی : $y = mx$

$$\frac{N_A}{K_y} = \frac{N_A}{k_y} + m\underbrace{(x_{Ai} - x_{AL})}_{\frac{N_A}{k_x}}$$

$$\rightarrow \boxed{\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}}$$

$$\boxed{\frac{1}{K_x} = \frac{1}{k_x} + \frac{1}{mk_y}}$$

رابطه بین ضرایب کلی و محلی نوع F :

$\Sigma N_i \neq 0 \longrightarrow$ رابطه غیر خطی (قابل صرفنظر کردن نیست)

$$\Sigma N_i = 0 \longrightarrow \begin{cases} \dfrac{1}{F_{OG}} = \dfrac{1}{F_G} + \dfrac{m}{F_L} \\ \dfrac{1}{F_{OL}} = \dfrac{1}{F_L} + \dfrac{1}{mF_G} \end{cases}$$

این روابط به صورت ذیل قابل استفاده است :

1. $\Sigma N_i = 0$
2. محلول های بسیار رقیق $\frac{C_A}{C} \to 0 \to \Sigma N_i \approx 0$

روابط تعادلی در شرایطی که رابطه بر حسب فشار باشد :

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_x}$$

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{k_x} + \frac{1}{Hk_G}$$

$P_{Ai} = H x_{Ai}$ قانون هنری

ثابت هنری

تعیین سهم مقاومت دو فاز :

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

اگر تمام مقاومت در فاز گاز باشد

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

$$\text{نسبت مقاومت مایع به گاز} = \frac{\frac{100}{1+\frac{k_x}{mk_y}}}{\frac{100}{1+\frac{mk_y}{k_x}}} = \frac{mk_y}{k_x}$$

نشان دهید :

الف) $K_x = m K_y$ (همواره)

ب) $k_x = m k_y$ (اگر مقاومت دو فاز برابر باشد)

$$\frac{K_x}{K_y} = \frac{\frac{1}{K_y}}{\frac{1}{K_x}} = \frac{\frac{1}{k_y}+\frac{m}{k_x}}{\frac{1}{k_x}+\frac{1}{mk_y}} = \frac{\frac{k_x+mk_y}{k_xk_y}}{\frac{mk_y+k_x}{k_xk_y}} = m$$

اگر مقاومت دو فاز برابر باشد $\longrightarrow \frac{mk_y}{k_x} = 1 \longrightarrow k_x = m k_y$

تست 13، سال 77، page 92 :

$P_t = 1.2$ atm

$(1 \text{ atm} = 10^5 \text{ pa})$

$K_G = 8 \times 10^{-10}$ kmol/m^2.s.pa

مقاومت هر دو فاز برابر است

$k_y = ?$

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_x}$$

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}$$

اما از هر سه رابطه K_G و K_y به k_G و k_y نیاز داریم .

(*) به طور کلی رابطه بین ضرایب محلی نوع F و k مشابه رابطه میان ضرایب کلی F و K است .

$$F_G = k_G \cdot P_{BM} \xrightarrow{\text{به همین شکل}} F_{OG} = K_G \cdot P_{BM}$$

توضیح $\left(F = k_G \cdot P_{BM} = k_y \cdot y_{BM} = \cdots \Rightarrow k_G \cdot P_t \cdot y_{BM} = k_y \cdot y_{BM} \Rightarrow k_G \cdot P_t = k_y \right)$

چون $k_G \cdot P_t = k_y \longrightarrow K_G \cdot P_t = K_y$ (I)

مقاومت دو فاز برابر $\Rightarrow \frac{m k_y}{k_x} = 1 \Rightarrow \frac{m}{k_x} = \frac{1}{k_y}$

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x} = \frac{1}{k_y} + \frac{1}{k_y} = \frac{2}{k_y} \Rightarrow k_y = 2K_y \quad (II)$$

$$I, II \longrightarrow k_y = 2K_G \cdot P_t = 2 \times 8 \times 10^{-10} \frac{kmol}{m^2 . s . Pa} \times 1.2 \times 10^5 \; Pa$$

$$k_y = 19.2 \times 10^{-5} \; \frac{Kmol}{m^2 . s}$$

نحوه برخورد با مسائل مقاومت :

1) مقایسه کیفی است

در این گونه مسائل از m و $\frac{k_x}{k_y}$ فقط یکی داده می شود.

I) $\frac{k_x}{k_y}$ معلوم $\xrightarrow{m \approx 1}$

- عمده مقاومت در فاز گاز : $\frac{k_x}{k_y}$ عدد بزرگی است (بزرگتر از یک)
- عمده مقاومت در فاز مایع : $\frac{k_x}{k_y}$ عدد کوچکی است

II) m معلوم $\xrightarrow{\frac{k_x}{k_y} \approx 1}$

- m عدد بزرگی باشد : مثلاً $y = 50x$ پس عمده مقاومت در فاز مایع است. (فاز مایع کنترل کننده انتقال جرم است)
- m عدد کوچکی باشد : مثلاً $y = 0.01x$ پس عمده مقاومت در فاز گاز است

2) مقایسه کمی است $\longrightarrow$ در این گونه مسائل m و $\frac{k_x}{k_y}$ باید معلوم باشد.

مثال : در انتقال جرم میان دو فاز مایع و گاز $y = 51x$ و $k_x = k_y$ در این صورت :

الف) مقاومت در فاز مایع است.

ب) " " " گاز "

ج) " دو فاز برابر است.

د) " مایع 51 برابر گاز است. ✓

مقایسه کمی است : $\longrightarrow$ $\frac{m k_y}{k_x} = 51$

هم گزینه الف درست است هم گزینه د اما چون گزینه د هم مشخص کرده مقاومت بیشتر در فاز مایع است و هم نسبت مقاومت فاز مایع به گاز را بیان کرده پس جواب کامل تری است.

مثال: در انتقال جرم میان دو فاز مایع، $y = 51x$، در اینصورت:

الف) عمده مقاومت در فاز گاز است

ب) " " " " مایع "

ج) " " " " " اگر $k_x \approx k_y$

د) مقاومت مایع 51 برابر مقاومت گاز است.

$$\text{عمده مقاومت در فاز مایع} \xrightarrow{k_x \approx k_y} \text{عدد بزرگی } m \longrightarrow \text{مقایسه کنیم است}$$

اولویت با گزینه ج است اما اگر چنین گزینه‌ای موجود نباشد گزینه ب درست است.

مثال: در انتقال جرم میان دو فاز مایع و گاز، $k_x = 0.1$ و $k_y = 1$:

الف) فاز مایع محدود کننده در مقابل انتقال جرم است.

ب) مقاومت هر دو فاز یکسان است.

ج) 10٪ کل مقاومت کل در فاز مایع است.

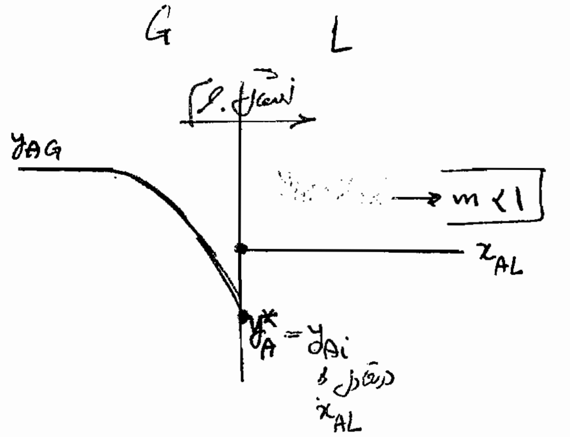
د) فاز گاز محدود کننده انتقال جرم است.

$$\text{مقاومت در فاز مایع} \longrightarrow \frac{k_x}{k_y} = 0.1 \longrightarrow \text{مقایسه کنیم است}$$

چون گزینه ب و ج جواب کمی داده پس جواب نیستند.

تشخیص فاز کنترل کننده انتقال جرم از روی پروفایل غلظت:

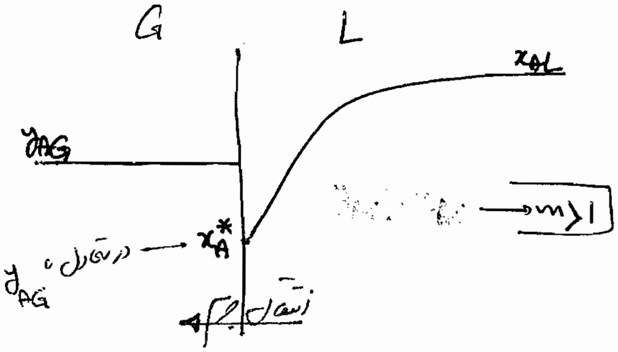
این بحث را با توجه به چند پروفایل غلظت مورد بررسی قرار می‌دهیم.



$\Delta x = \frac{N_A}{k_x}$, $\Delta x_A \to 0$ } $\Rightarrow k_x \to \infty \Rightarrow$ مقاومت در فاز گاز است

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \cancel{\frac{m}{k_x}}^{\,0}$$

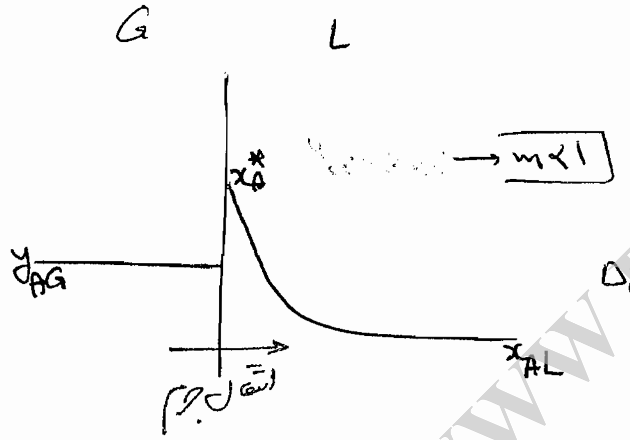
$\Rightarrow K_y \approx k_y$



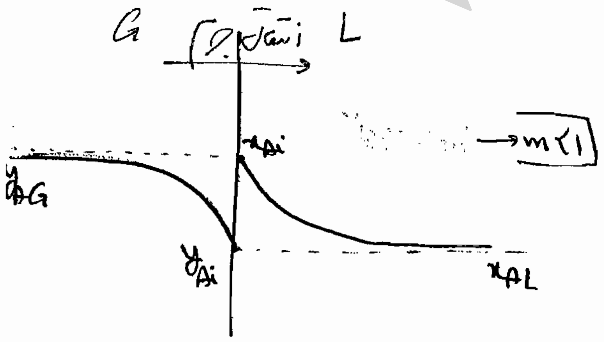
$\Delta y_A \to 0 \to k_y \to \infty \to$ مقاومت در فاز مایع

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{k_x} + \frac{1}{mk_y} \to 0$$

$\Rightarrow K_x \approx k_x$



$\Delta y_A \to 0 \Rightarrow k_y \to \infty \to$ مقاومت در فاز مایع



$\Delta y_A \approx \Delta x_A \longrightarrow k_y \approx k_x$, $m<1$ } $\longrightarrow$ عمده مقاومت در فاز گاز است.

اگر محدوده Δx و Δy یکسان نباشد باید صورت آنها را بدانیم تا بتوانیم اظهار نظر کنیم.

مثال: $y_{Ai}=0.4$ ، $y_{AG}=0.6$

$x_{AL}=0.1$ و $x_{Ai}=0.2$

الف) $\frac{k_x}{k_y}$ ؟

ب) نسبت مقاومت مایع به گاز یا درصد مقاومت هر فاز.

$$-\frac{k_x}{k_y}=\frac{0.6-0.4}{0.1-0.2} \longrightarrow \frac{k_x}{k_y}=2$$

$$m=\frac{y_{Ai}}{x_i}=\frac{0.4}{0.2}=2$$

نسبت مقاومت مایع به گاز $= m\cdot\frac{k_y}{k_x}=2\cdot\frac{1}{2}=1 \longrightarrow$ مقاومت هر دو فاز برابر است

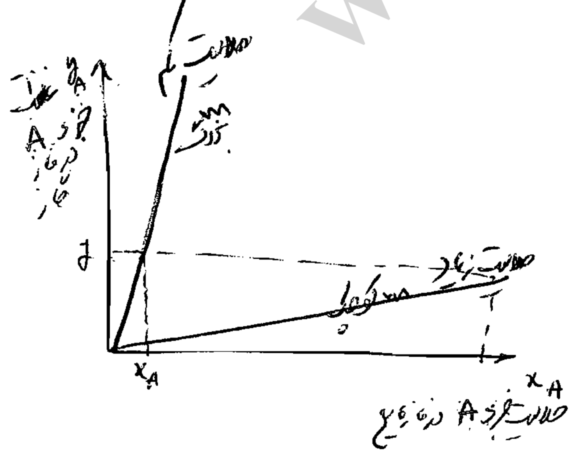
(50% - 50%)

تست 107 سال 85:

H_2S در آب خالص جذب می‌شود (در برج سینی‌دار)

ضریب کلی انتقال جرم K_y تابع چه عواملی است.

نکته: H_2S و CO_2 که به گازهای ترش معروف‌اند به سختی در آب حل می‌شوند (حلال اصلی این ترکیبات محلول‌های آمینی می‌باشند)



چون حلالیت H_2S در آب کم است پس شیب منحنی تعادلی $(m>1)$ بزرگ است.

$$\frac{1}{K_y}=\frac{1}{k_y}+\frac{m}{k_x} \longrightarrow K_y \simeq \frac{k_x}{m}$$

m عدد بزرگی است

تابع حلالیت و حلالیت تابع دما است.

یعنی K_y تابعی از k_x و m است.

کنترل‌کننده K_y تابع ضریب انتقال جرم فاز مایع و درجه حرارت سیستم.

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{k_x} + \frac{1}{mk_y} \Bigg\} \longrightarrow \frac{1}{K_x} = \frac{1}{k_x} \longrightarrow K_x \approx k_x$$

m عدد بزرگی

سهم مقاومت هر فاز $= f\left(m \,,\, \dfrac{k_x}{k_y}\right)$

m ← پارامتر ترمودینامیکی (m تابع شرایط عملیاتی است T و P)

$\dfrac{k_x}{k_y}$ → ضریب انتقال $= f($ Re , Sc , خواص فیزیکی و هندسه مسئله $)$

Re: شدت و رژیم جریان

خواص فیزیکی: μ, ρ, D_{AB}, …

نحوه تماس دو فاز :

1) co_current جریان همسو

2) cross current جریان ناهمسو

3) counter current جریان متقاطع

R : شدت جریان فاز سنگین

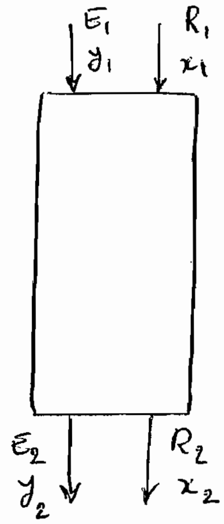
E : 〃 〃 〃 سبک

x : غلظت جزء منتقل شونده در فاز R

y : 〃 〃 〃 〃 〃 E

Gas_Liq Abs strip	E R	فاز گاز فاز مایع
Gas_solid Ads / Des Drying	E R	گاز جامد
Liq_solid leaching Ads / Des	E R	مایع جامد
Liq_Liq استخراج	E = Extract فاز استخراج R = Raffinate فاز باقیمانده	

co_current :



صرف نظر از شرایط unit نقاط ورودی و خروجی را در نظر می گیریم . (اصل تعادل جرم)

Input = output

$$\Rightarrow E_1 y_1 + R_1 x_1 = E_2 y_2 + R_2 x_2$$ (در شرایط S.S و بدون واکنش)

فرض: یک جزء بین دو فاز مبادله می‌شود.

$N_A \neq 0$

$N_B = N_C = \dots = 0$

لذا معادلاتی که بر این اساس بدست آمد در فرآیندی مثل تقطیر صادق نخواهد بود چون در تقطیر انتقال متقابل داریم.

لذا روابطی که از این فرض به بعد به دست می‌آید برای فرآیندهایی چون

- جذب و دفع گازی
- جذب و دفع سطحی
- خشک کردن
- رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی
- استخراج با حلال غیر قابل امتزاج
- استخراج از جامدات

قابل استفاده و استناد است.

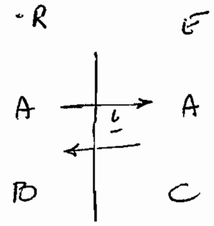
$$R_1(1-x_1) = R_2(1-x_2) = R_S$$ شدت جریان جزء غیرمنتقل شونده در فاز R

$$E_1(1-y_1) = E_2(1-y_2) = E_S$$ " " " " " " E " "

$$\Rightarrow \frac{E_S}{1-y_1}\cdot y_1 + \frac{R_S}{1-x_1}\cdot x_1 = \frac{E_S}{1-y_2}\cdot y_2 + \frac{R_S}{1-x_2}\cdot x_2$$

$$X = \frac{x}{1-x}$$

$$Y = \frac{y}{1-y}$$



$x = \frac{A}{A+B} \longrightarrow X = \frac{A}{B}$ $\frac{\text{جزء منتقل شونده}}{\text{جزء غیر منتقل شونده}}$

$y = \frac{A}{A+C} \longrightarrow Y = \frac{A}{C}$

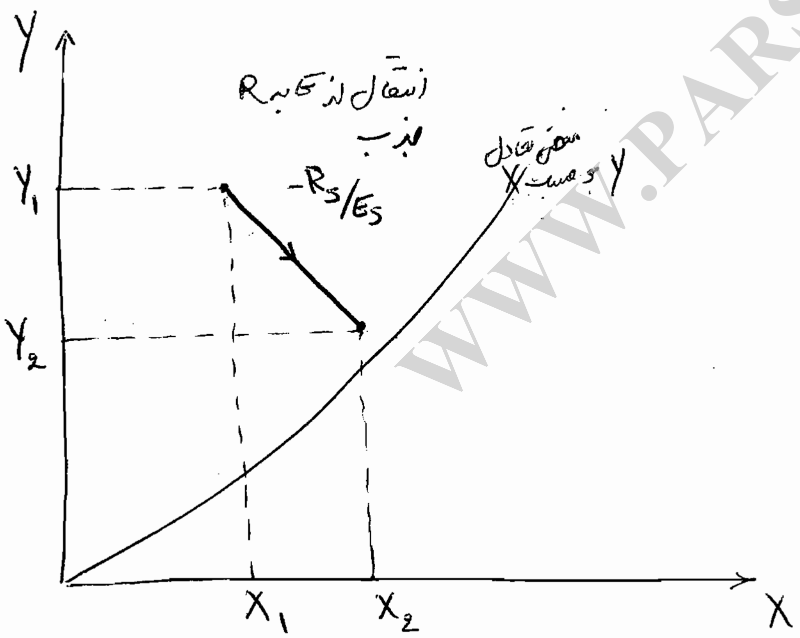
حسن استفاده از X و Y این است که مخرج این کسرها یعنی B و C همیشه مقدار ثابت است.

$$\Longrightarrow E_S Y_1 + R_S X_1 = E_S Y_2 + R_S X_2$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = -\frac{R_S}{E_S}}$$

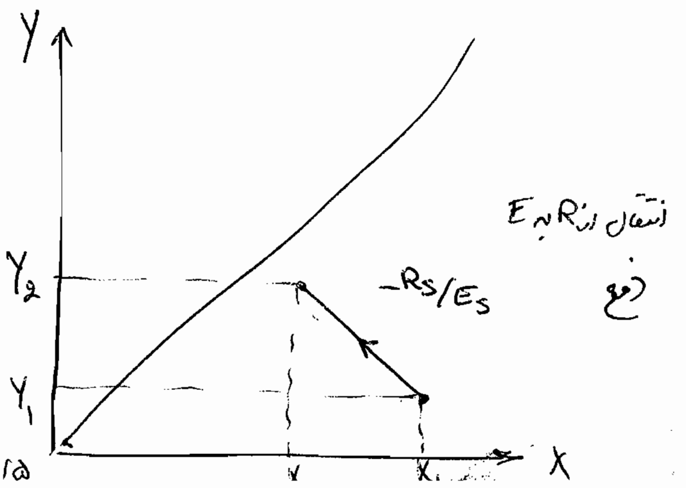
معادله خط کار یا خط تبادل
operating line

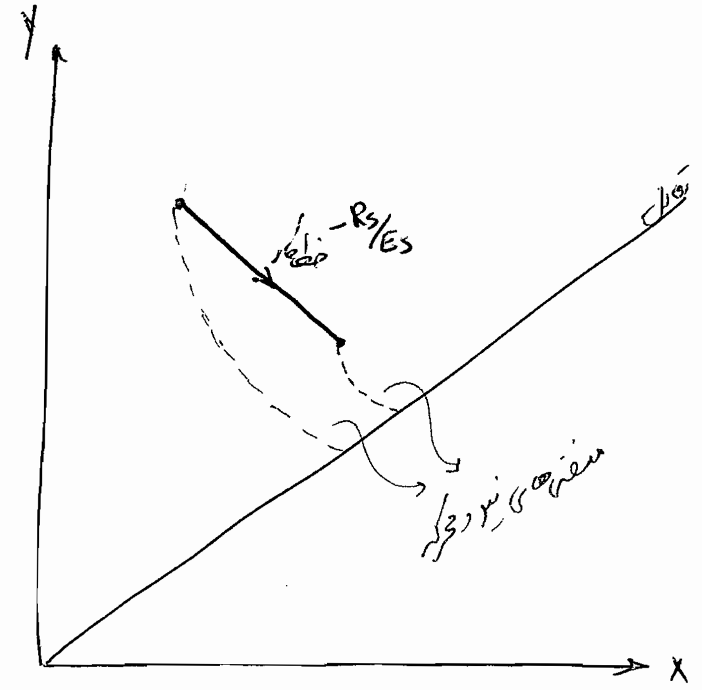
هر معادله‌ای که از موازنه جرم و یا انرژی حول دستگاه به دست آید معادله خط کار یا operating line نامیده می‌شود.



انتهای خط کار نزدیک روی منحنی تعادل نیست. چون رسیدن به تعادل نیاز به زمان طولانی و سطح کافی دارد.
حداکثر جداسازی زمانی است که انتهای خط کار روی منحنی تعادلی باشد.

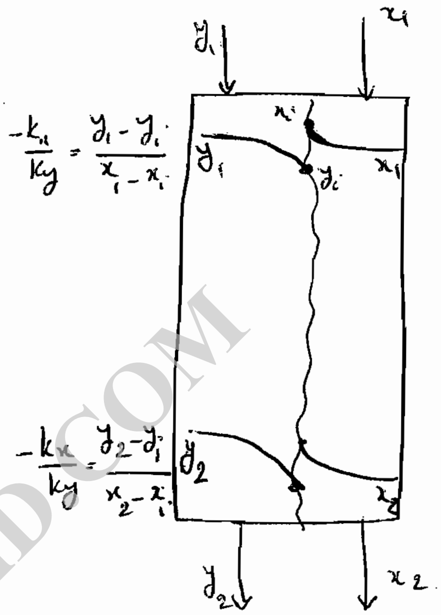
اگر منحنی تعادل Y بر حسب X خطی باشد آنگاه منحنی y بر حسب x غیرخطی است و برعکس

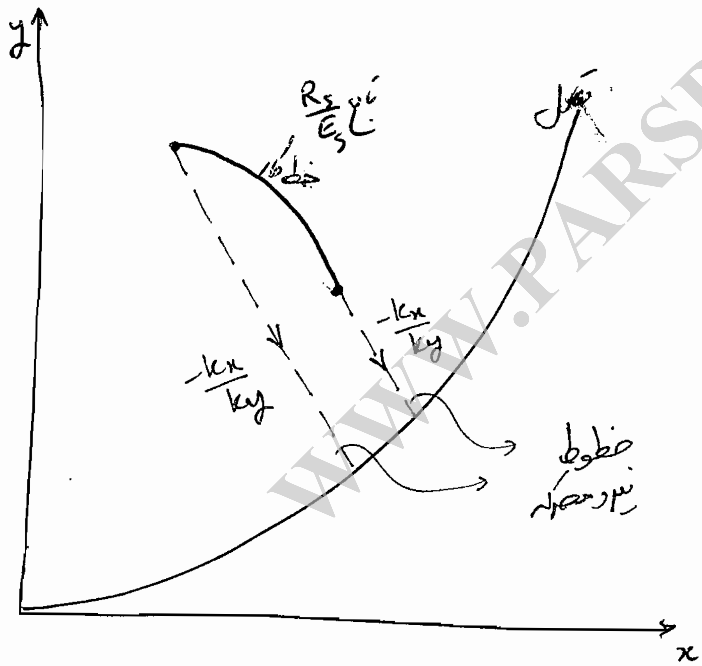




y_1 یعنی y_{AG} در نقطه ①

x_1 " " x_{AL} " " ①





نکته: در جریان همسو نیروی محرکه در طول دستگاه کاهش می‌یابد.

فرایندهای Batch مانند جریان همسو در نظر می‌گیرند که در آنجا x_1 و y_1 غلظت در شروع فرایند است و x_2 و y_2 غلظت در خاتمه فرایند است.

تست 127 سال 86 :

$V = 20\ lit$
هوای مرطوب
$30^{\circ}C\ ,\ 1\ atm$
فشار بخار جزئی $P_A = 60\ mm\text{-}Hg$
$50\ gr$ Silicagel

Batch (ناپیوسته) → Co-current

$$\rightarrow \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = -\frac{R_S}{E_S}$$

شیب خط کار $-\frac{R_S}{E_S}$ است پس گزینه‌هایی که جواب + دارند غلط هستند.

$$\text{شیب خط کار} = -\frac{R_S}{E_S}$$

$R_S \rightarrow$ غیر نفوذی فاز جامد

$E_S \rightarrow$ غیر نفوذی فاز گاز

تعداد مول $n = \frac{PV}{RT} \rightarrow$ جرم $m = \frac{PV.M_W}{RT}$

$H_2O = A$
$Air = B$

$R_S = 50\ gr$

$E_S =$ جرم هوای عاری از رطوبت $= \frac{P_B \cdot V \cdot M_B}{R_g \cdot T}$

$$E_S = \frac{\frac{(760-60)}{760}\ atm \times 10^5 \frac{Pa}{atm} \times 20\ lit \times 10^{-3} \frac{m^3}{lit} \times 29 \frac{gr}{mol}}{8.314 \frac{J}{mol.^{\circ}k} \cdot 303^{\circ}k} \approx 25\ gr$$

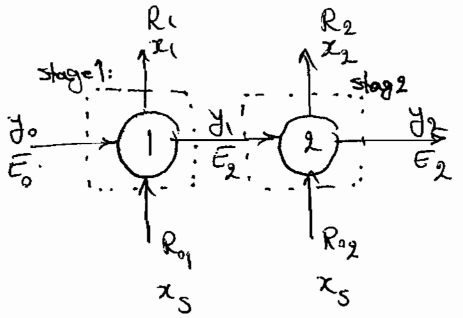
$\rightarrow$ شیب خط کار $= -\frac{50}{25} = -2.5 \longrightarrow -2.15$ نزدیک‌ترین گزینه

$$R = 8.314 \frac{J}{mol.k} = 8.314 \frac{Pa.m^3}{grmole.k} = 8314 \frac{Pa.m^3}{kmole.k}$$

جلسه ششم

cross_current

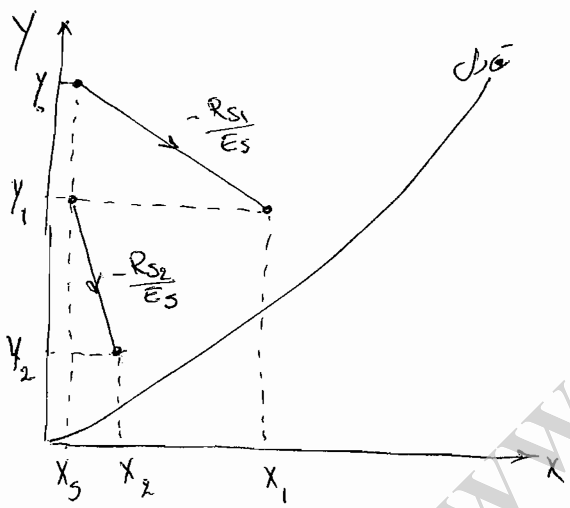
جریان متقاطع



غالباً در مسائل x_s صفر است یا نزدیک به صفر است.

$$\text{stage 1}: \quad \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_S} = -\frac{R_{S_1}}{E_S}$$

$$\text{stage 2}: \quad \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_S} = -\frac{R_{S_2}}{E_S}$$



فرض: فقط یک جزء بین دو فاز منتقل می‌شود.

انتهای خط کار می‌تواند روی منحنی تعادل باشد.

با چند مرحله‌ای کردن نیروی محرکه جهت انتقال جرم افزایش می‌یابد.

حالت خاص:

* منحنی تعادلی خطی است $(Y = mX)$
* مراحل را تعادلی فرض کنید (حداکثر جداسازی قابل انجام در یک مرحله) (یعنی انتهای خط کار روی منحنی تعادلی است)
* حلال (جاذب) را خالص فرض کنید. $(X_S = 0)$

سوال: حداقل میزان حلال (جاذب) مصرفی در چه شرایطی حاصل می‌شود؟

میزان حلال (جاذب):

$$\sum R_{S_i} = R_{S1} + R_{S2} = -E_S \left[\frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_S} + \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_S} \right]$$

برای محاسبه حداقل حلال (جاذب) برای یک جداسازی معین

وقتی می‌گوئیم جداسازی معین یعنی E_0 و Y_0 و Y_2 معلوم هستند $\xrightarrow{\text{پس}}$ $E_S = E_0(1-y_0)$ هم معلوم است

$$\Rightarrow \sum R_{S_i} = -E_S \left[\frac{Y_1 - Y_0}{\frac{Y_1}{m} - 0} + \frac{Y_2 - Y_1}{\frac{Y_2}{m} - 0} \right]$$

در رابطه فوق تمام مقادیر معلوم هستند به جز Y_1 پس از رابطه نسبت به Y_1 مشتق می‌گیریم و برابر صفر قرار می‌دهیم

تا مقدار بهینه Y_1 برای حداقل شدن حلال مصرفی:

$$\frac{\partial \sum R_{S_i}}{\partial Y_1} = 0 \longrightarrow \boxed{Y_1 = \sqrt{Y_0 Y_2}}$$

* اگر غلظت مرحله میانی واسطه هندسی هر مرحله قبل و بعدش باشد حداقل حلال مورد نیاز است.

$$\boxed{\begin{aligned} \Rightarrow R_{S_1} &= -E_S \left[\frac{\sqrt{Y_0 Y_2} - Y_0}{\frac{\sqrt{Y_0 Y_2}}{m}} \right] \quad \text{I} \\ R_{S_2} &= -E_S \left[\frac{Y_2 - \sqrt{Y_0 Y_2}}{\frac{Y_2}{m}} \right] \quad \text{II} \end{aligned}}$$

$$\xrightarrow{\text{I در } \times \frac{\sqrt{Y_0 Y_2}}{\sqrt{Y_0 Y_2}}} R_{S_1} = -E_S \left[\frac{Y_0 Y_2 - Y_0\sqrt{Y_0 Y_2}}{\frac{Y_0 Y_2}{m}} \right] = -E_S \left[\frac{Y_2 - \sqrt{Y_0 Y_2}}{\frac{Y_2}{m}} \right] = R_{S_2}$$

* پس در شرایط حداقل مصرف حلال، حلال مصرفی در مرحله اول و دوم برابر است.

حلال: فاز گیرنده (دریافت کننده جزء)

خوراک: فاز دهنده

* درصد جداسازی:

درصد جداسازی بر مبنای فاز دهنده محاسبه می‌شود.

خوراک

$$\text{درصد جداسازی} = \frac{\text{مقدار جزء جدا شده}}{\text{مقدار جزء ورودی}} \times 100$$

درصد جداسازی در مرحله I مثال بالا:

$$\eta_1 = \frac{E_0 y_0 - E_1 y_1}{E_0 y_0} \times 100 = \boxed{\frac{Y_0 - Y_1}{Y_0} \times 100}$$

$\frac{E_S}{1-y_0}$ $\frac{E_S}{1-y_1}$ $\frac{E_S}{1-y_0}$

درصد جداسازی ۲

II $\eta_2 = \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1} \times 100$

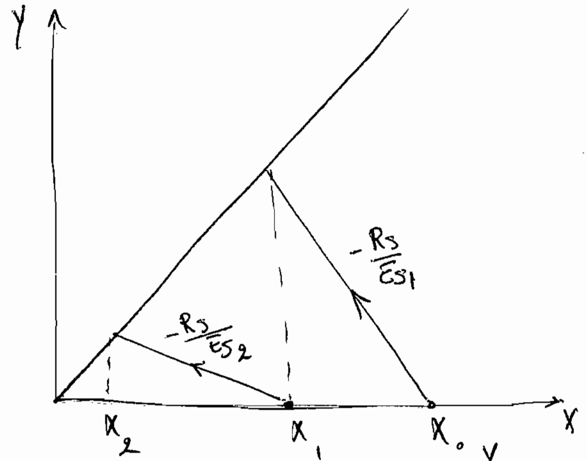
$\Rightarrow$ درصد جداسازی کل : $\eta = \frac{Y_0 - Y_2}{Y_0} \times 100$

کسر جداسازی: درصد جداسازی تقسیم بر ۱۰۰

$$\eta_t = \eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \eta_2 = 1 - (1-\eta_1)(1-\eta_2)$$

کسر جداسازی
$(0 \rightarrow 1)$

مثال: در مورد خطوط کار نشان داده شده در شکل می‌توان گفت :



دو مرحله‌ای cross-current

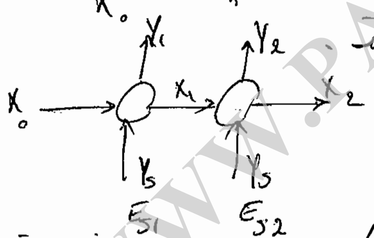
* انتقال از فاز R به فاز E
خوراک حلال

* حلال خالص $(Y_S = 0)$

* هر دو مرحله تعادلی

* میزان حلال مصرفی در مرحله ۲ از مرحله ۱ بیشتر است

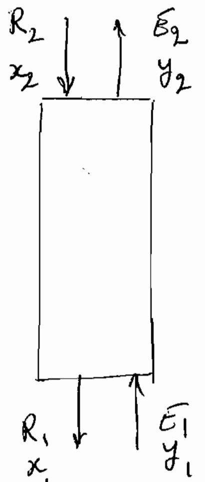
* شماتیک انتقال به این شکل است :



* فقط یک جزء بین دو فاز مبادله شده است چون خط کار در صفحه XY رسم شده است .

توضیح (*) : در اینجا چون معادله خط کار زیر منحنی تعادلی است پس فاز E حلال است

و هرچه شیب خط $\frac{R_S}{E_S}$ بیشتر شود یعنی E_S آن مرحله کمتر است یعنی حلال آن مرحله کمتر است .



به علت steady و عدم تجمع و واکنش شیمیایی

Input = output

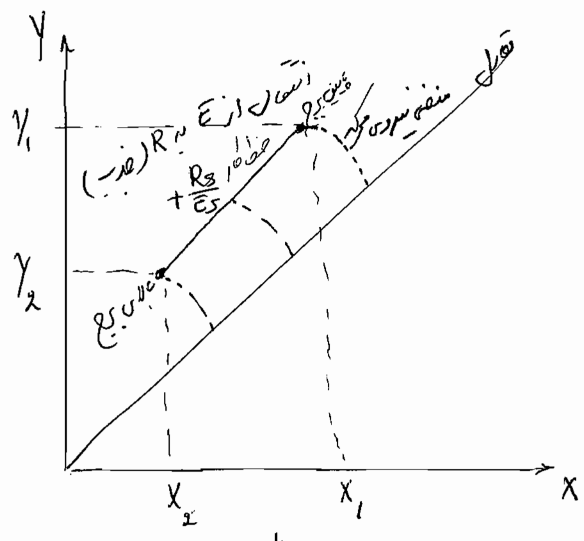
جریان ناهمسو

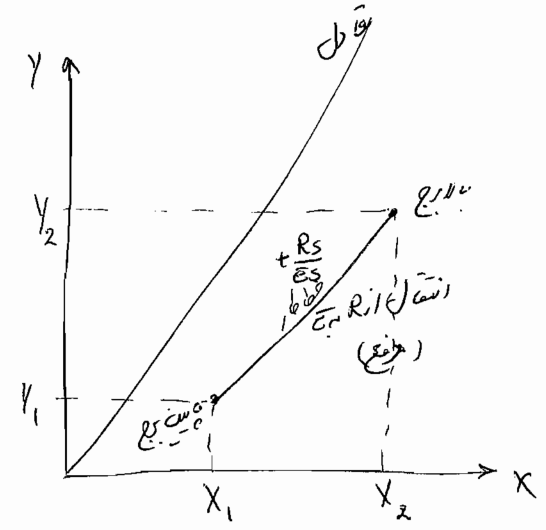
$$E_1 y_1 + R_2 x_2 = E_2 y_2 + R_1 x_1$$

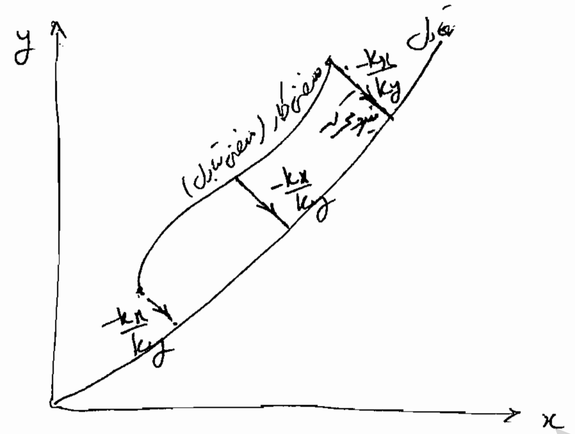
وقتی فقط یک جزء منتقل شود : $E_1 = \frac{E_S}{1-y_1}$

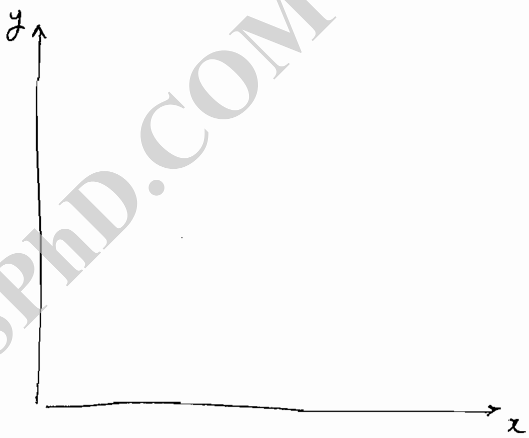
$$R_2 = \frac{S}{1-x_2} \quad , \quad R_1 = \frac{R_S}{1-x_1} \quad , \quad E_2 = \frac{E_S}{1-y_2}$$

$$\Rightarrow \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = + \frac{R_S}{E_S}$$

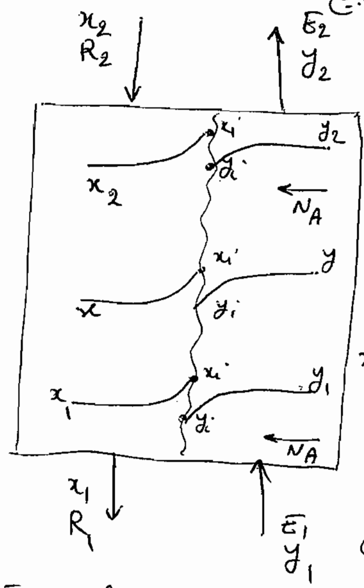








اگر منحنی خط کار در صفحه XY خطی باشد در صفحه xy منحنی است و برعکس



معادله نیرو محرکه در بالای برج

$$\frac{y_2-y_i}{x_2-x_i}=\frac{-k_x}{k_y}$$

$y_2 > y > y_1$

$x_2 > x > x_1$

$$\frac{y-y_i}{x-x_i}=-\frac{k_x}{k_y}$$

معادله نیرو محرکه در وسط برج

وقتی که x_i بالاتر از y_i باشد یعنی بیشتر

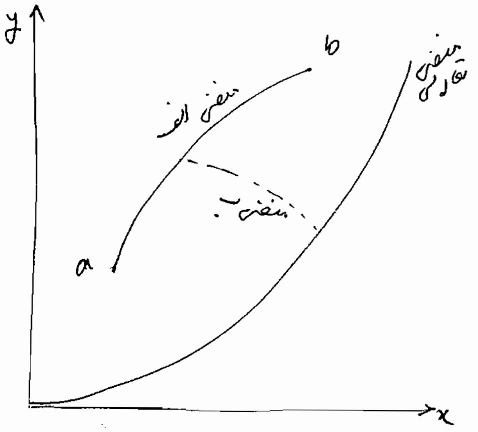
شکلی به معادله منحنی تعادلی دارد.

نکته مهم این است که $y_1 , y_2 > y_i$

و x_2 و $x_1 < x_i$

$$\frac{y_1-y_i}{x_1-x_i} = -\frac{k_x}{k_y}$$ معادله نیرو محرکه در ته برج

تست ۹۹ سال 88 :



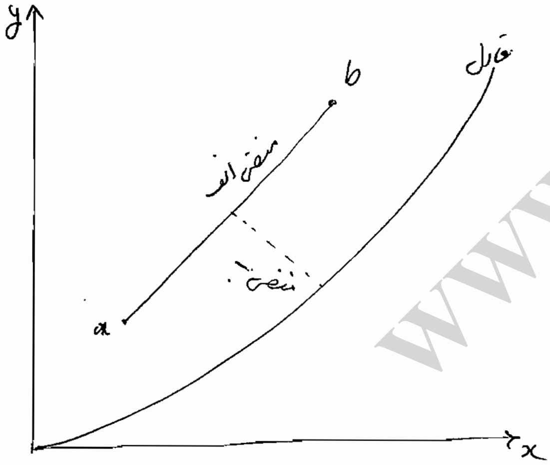
جواب تست را به حالت کلی می‌دهیم (تمام مشترک‌ها)

با توجه به شکل می‌توان گفت :

* نا همسو (چون شیب منحنی الف مثبت است)
* انتقال از E به R (جذب)
* منحنی الف خط کار یا operating یا تبادل است.
* منحنی ب نیروی محرکه driving Force در موضعی خاص.
* نقطه a بالای برج
* نقطه b پایین برج
* معادله نیروی محرکه برحسب ضرایب انتقال نوع F ارائه شده است.
* منحنی الف غیر خطی است پس در صفحه XY خطی خواهد بود پس یک جزء منتقل می‌شود $\sum N_i = N_A$

$b =$ ورودی $\xrightarrow{\text{که از پایین وارد می‌شود}}$ y خروجی $>$ y ورودی ⟵ جذب

(در صفحه xy معادله نیروی محرکه خط است اگر برحسب k_y و k_x باشد و منحنی است اگر برحسب F است.)



مثال :

با توجه به شکل می‌توان گفت :

* نا همسو
* انتقال از E به R (جذب)
* منحنی الف تبادل یا خط کار است
* منحنی ب نیرو محرکه است.
* a بالای برج
* b پایین برج

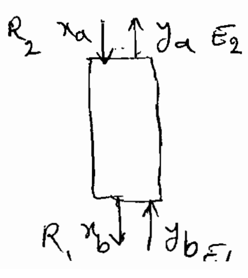
* منحنی ب نیروی محرکه در موضعی خاص برحسب ضرایب انتقال جرم نوع F یا k است

توضیح انتهای صفحه *

مسئله اصلی : چرا منحنی تبادل (operating) در صفحه xy خط است ؟

$$\frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} = +\frac{R}{E}$$

* در شکل فوق دبی جریان‌های R و E ثابت است.



خروجی = ورودی

$$E_1 y_b + R_2 x_a = E_2 y_a + R_1 x_b$$

$$\Rightarrow E_1 y_b - E_2 y_a = R_1 x_b - R_2 x_a \xrightarrow{\text{چون}} \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} = \frac{R}{E}$$

$E_1 = E_2 = E$ و $R_1 = R_2 = R$

حال سوال این است : در چه مسائلی شدت جزءهای کل دو فاز ثابت است ؟

در این مسأله انتقال متقابل با مولهای برابر داریم . $\sum N_i = 0$

* اگر یک جزء بین دو فاز مبادله شود : $\sum N_i = N_A$

تبادل در XY خطی است

تبادل در xy غیر خطی است .

* اگر انتقال متقابل با مولهای برابر دو جزء داشته باشیم : $\sum N_i = 0$

تبادل در XY غیر خطی است .

تبادل در xy خطی است .

* توضیح : در نفوذ متقابل $\sum N_i = 0$ $\longrightarrow$ $\dfrac{y_{AG} - y_{Ai}}{x_{AL} - x_{Ai}} = -\dfrac{F_L}{F_G}$

جریان ناهمسو مزیت مهمش این است که همواره در طول دستگاه ناهمسو یک نیروی محرکه قابل قبولی وجود دارد بر خلاف جریان همسو که در ابتدای دستگاه نیروی محرکه قابل توجهی وجود دارد و هرچه به انتهای دستگاه می‌رسیم نیروی محرکه کم می‌شود .

مزیت دیگر جریان ناهمسو چند مرحله‌ای بودنش است یعنی در طول دستگاه می‌توانیم به چند مرحله تعادلی برسیم .

چند مرحله‌ای بودن امکان دستیابی به مقادیر جداسازی بالاتری را فراهم می‌کند . در حالی که جریان همسو حداکثر می‌تواند یک مرحله تعادلی باشد .

Input (Y_1) , output (Y_2)

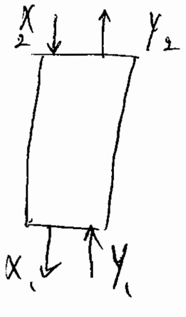
$$\text{درصد جداسازی} = \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1} \times 100$$

انتقال از E به R پس y مهم است

Input (X_2) , output (X_1)

$$\text{درصد جداسازی} = \frac{X_2 - X_1}{X_2} \times 100$$

انتقال از R به E پس x مهم است

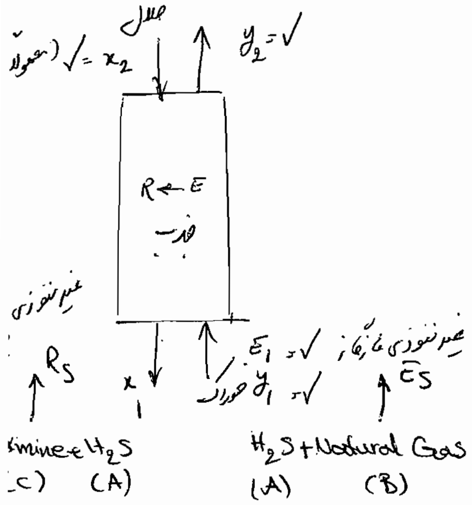


$$\rightarrow \quad \text{درصد جداسازی} = \frac{Y_{\text{ورودی}} - Y_{\text{خروجی}}}{Y_{\text{ورودی}}} \times 100 = \frac{X_{\text{ورودی}} - X_{\text{خروجی}}}{X_{\text{ورودی}}} \times 100$$

دو مسئله اصلی در جریان ناهمسو

۱) محاسبه حداقل حلال مورد نیاز در جریان ناهمسو :

۲) تعداد مراحل تئوری برای جداسازی معین .



برای محاسبه حداقل حلال مورد نیاز در جریان ناهمسو

الف) جذب

برای طراحی باید E_1 و y_1 و y_2 و x_2 معلوم باشد .

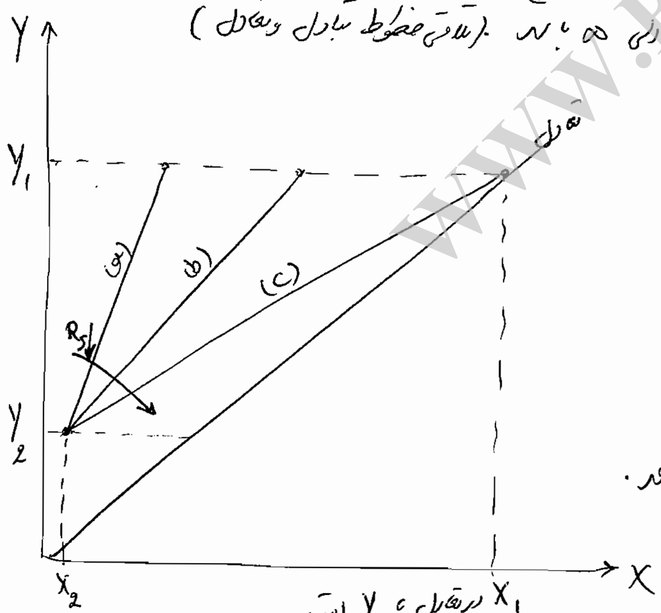
سوال $R_{S_{min}} = ?$

$R_{2min} = ?$

معلومات مسئله	مجهولات
E_1	$R_{S_{min}} =$
y_1	x
y_2	
x_2	

داده های تعادلی (m شیب منحنی تعادلی معلوم)

کمترین مقدار حلال زمانی بدست می آید که تعداد مراحل تعادلی ∞ باشد. (تلاقی خطوط تبادل و تعادل) چون نیروی محرکه صفر می شود .



X_{1eq} در تعادل با Y_1 است .

هر سه خط (a) و (b) و (c) ما را به میزان جذب مطلوب می رسانند از منحنی (a) به منحنی (c)

شیب خط کاری یعنی $\frac{R_S}{E_S}$ در حال کاهش است پس R_S در حال کاهش است پس منحنی (c) کمترین R_S را می خواهد .

شیب خط (c) $= \frac{R_S}{E_S}\Big|_{min}$

$$\frac{R_{S\,min}}{E_S} = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_{1eq}} \Bigg\} \longrightarrow R_{S\,min}$$

بدست می آید .

چون X_{1eq} در تعادل با Y_1 است از داده های تعادلی X_{1eq} بدست می آید

مثال: در یک برج جذب ناهمسو $100\ \frac{mol}{hr}$ از خوراکی حاوی هوا به همراه 12% مولی CO_2 با آب خالص به عنوان حلال تماس داده می‌شود تا 90% CO_2 ورودی جدا شود. اگر معادله تعادل به فرم $Y=2X$ باشد محاسبه کنید: الف) حداقل مولهای آب خالص ورودی به ازای هر مول هوای خالص ورودی

ب) حداقل شدت جریان آب خالص ورودی

ج) حداقل مولهای آب خالص ورودی به ازای هر مول خوراک گاز ورودی

د) کسر مولی CO_2 در آب خروجی

A: CO_2 جزء منتقل شونده

B: هوای خالص $= E_S$

C: آب خالص $= R_S$

تمرین (الف) $\frac{R_{S\,min}}{E_S}$ را می‌خواهد

" (ب) $R_{S\,min}$ را می‌خواهد

" " $\frac{R_{S\,min}}{E_1}$ (ج)

حل

(معادله خط کار را می‌نویسیم) $\frac{\bar{R}_S}{\bar{E}_S} = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$

$$\rightarrow \left.\frac{R_S}{E_S}\right|_{min} = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_{1eq}} = \frac{Y_2 - Y_1}{0 - \frac{Y_1}{2}}$$

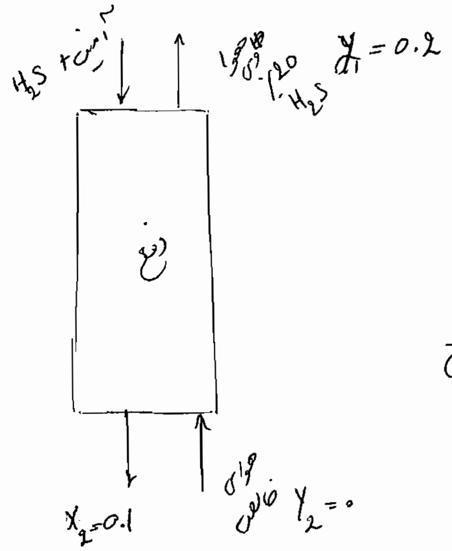
درصد جداسازی 90% است $\Rightarrow \frac{Y_{ورودی} - Y_{خروجی}}{Y_{ورودی}} \times 100 = 90 \rightarrow \underset{خروجی}{Y_2} = 0.1 \underset{ورودی}{Y_1}$

$$\Rightarrow \left.\frac{R_S}{E_S}\right|_{min} = \frac{0.1\,Y_1 - Y_1}{-\frac{Y_1}{2}} = 1.8$$

$$R_{S\,min} = \left.\frac{R_S}{E_S}\right|_{min} \times E_S = 1.8 \times \underbrace{100 \times (1-0.12)}_{E_1(1-y_1) = E_S} = \dots\ \frac{mol}{hr}$$

$$\frac{R_{S\,min}}{E_1} = \frac{R_{S\,min}}{E_S/(1-y_1)} = \left.\frac{R_S}{E_S}\right|_{min} \times (1-y_1) = 1.8\,(1-0.12) = \dots\ \frac{mol}{hr}$$

تست 103 سال 89 :



منحنی تعادل : $Y = X$

حداکثر $\frac{L}{G} = ?$

$$\frac{L}{G} = \frac{R_S}{E_S} = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

$Y_2 \to 0$ ، $Y_1 \to \frac{0.2}{1-0.2} = 0.25$ ، $X_2 \to 0.1$ ، $X_1 \to ?$

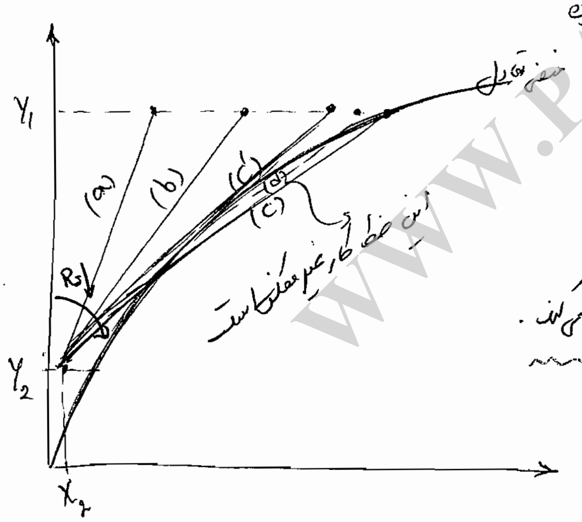
در دفع برای بدست آوردن حداقل حلال یا حداکثر شیب : گاز خروجی در تعادل با مایع ورودی ⟵ Y_1 و X_1 در تعادل اند.

$$X_1 = Y_1 = \frac{0.2}{1-0.2} = 0.25$$

$$\Rightarrow \frac{L}{G} = \frac{0 - 0.25}{0.1 - 0.25} = \frac{25}{15} = \frac{5}{3}$$

حالات خاص در مسئله محاسبه حداقل حلال :

در منحنی c و d مشکل اینجاست که خط کار منحنی تعادلی را قطع کرده و ادامه یافته است.

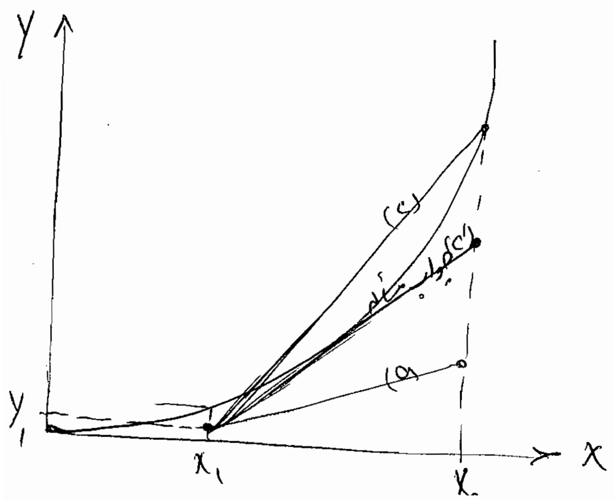


همه منحنی های c و d و c' چون خط کار با منحنی تعادلی تلاقی کرده $N=\infty$ است اما

حداقل حلال حداکثر مقدار حلالی است که در عین حال $N=\infty$ می کند.

$$R_{S_{c'}} > R_{S_d} > R_{S_c}$$

در دفع این مشکل وقتی پیش می آید که تقعر منحنی رو به بالا است :

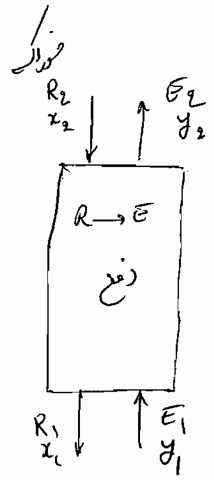


$$\text{شیب خط } c' = \left.\frac{R_S}{E_S}\right|_{max} \longrightarrow E_{S_{min}} \checkmark$$

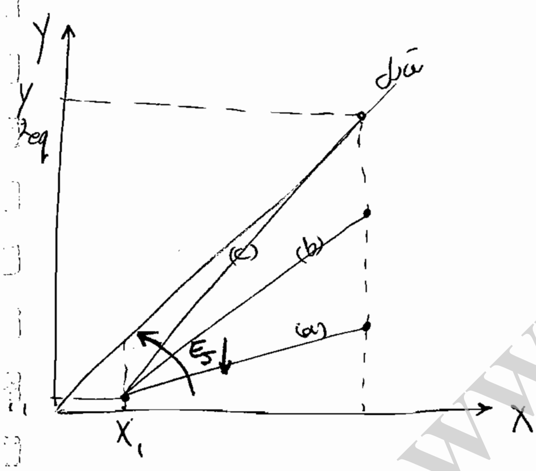
$$X_1 = \frac{Y_1}{2} = \frac{\frac{0.12}{1-0.12}}{2} = \dots \checkmark$$

$$x_1 = \frac{X_1}{1+X_1} = \dots \checkmark$$

ب) دفع :



معلومات	مجهولات
R_2	E_{1min} یا E_{Smin}
x_2	
x_1	y_2
y_1	
m (داده‌های تعادلی)	



شیب خط $\frac{R_S}{E_S}$ است.

هرچه از منحنی (a) به سمت منحنی (c) می‌رویم $\frac{R_S}{E_S}$ افزایش است پس E_S که میزان حلال مصرفی است کاهش می‌یابد.

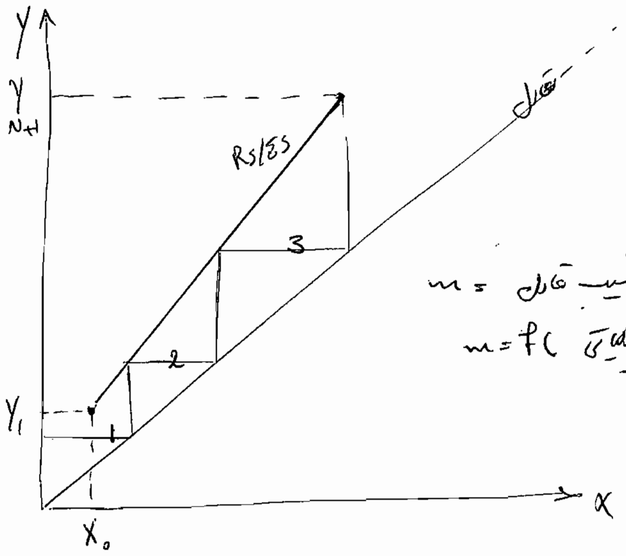
حداقل حلال با منحنی (c) بدست می‌آید.

(حلال مصرفی باید در تعادل با خوراک ورودی باشد)

$$\frac{R_S}{E_S} = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

$$\Rightarrow \left.\frac{R_S}{E_{S_{min}}}\right|_{max} = \frac{Y_{2eq} - Y_1}{X_2 - X_1} \qquad \text{شد} : Y_{2eq} = mX_2$$

پس از این معادله $E_{S_{min}}$ محاسبه می‌شود.



نقطه (X_0 , Y_1) و شیب خط عملیاتی $\frac{R_S}{E_S}$ را داریم
پس خط کار را رسم می‌کنیم.

$m =$ شیب تعادل

$m = f($ شرایط عملیاتی $)$
T, P

$\frac{R_S/E_S}{m} = A$ یا

معادله کرمسر - براون - سودرز $N = f\left[\underset{\text{خوراک}}{Y_{N+1}} , \underset{\text{یا محصول جداسازی}}{Y_1} , \underset{\text{حلال ورودی}}{X_0} , \underset{\text{تعادل}}{m} , \frac{R_S}{E_S}\right]$

برای جذب

$\frac{R_S}{E_S}$: شیب خط کار یا فاکتور جذب

A - فاکتور جذب $= \dfrac{\text{شیب خط کار}}{\text{شیب تعادل}} = \dfrac{R_S/E_S}{m}$

شرایط معادله کرمسر:

✓ ۱- جریان ناهمسو
✓ ۲- تعادل خطی باشد $(Y = mX)$
✓ ۳- تبادل خطی باشد (یک جزء بین دو فاز مبادله شود)

نکته: معادله کرمسر برای واحدهایی مثل تقطیر قابل استفاده نیست چون در تقطیر بیش از یک جزء مبادله می‌شود.

در جذب

اگر $R_S \uparrow$: (افزایش مصرف حلال) یا $(A\uparrow)$ یا (دور شدن تبادل و تعادل از هم) یا (افزایش ورودی محلول)

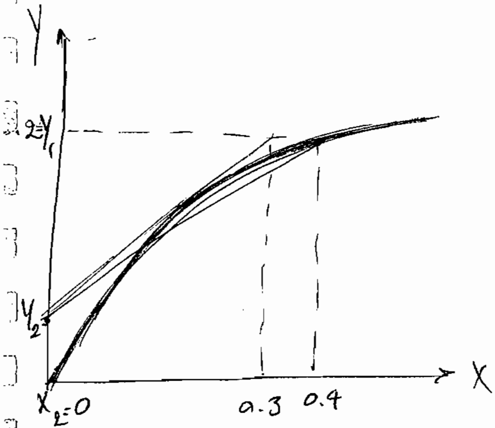
آنگاه $N \downarrow$

مجهولات	معلومات
N	x_0 خوراک
y_1	R_S یا R_0
	x_N یا محصول جداسازی
	y_{N+1} حلال ورودی
	m : داده‌های تعادلی
	E_S یا E_{N+1} حلال

محاسبه تعداد N تئوری در دفع:

از معادله خط کار ⟵ y_1 ✓

مثال :



$$\frac{R_S}{E_S}\Big|_{min} = ?$$

با توجه به شکل : $X_1 = 0.3$

$$\rightarrow \frac{R_S}{E_S}\Big|_{min} = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{0.1 - 0.2}{0 - 0.3} = \frac{1}{3}$$

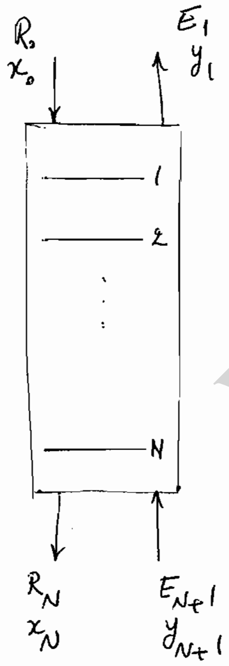
محاسبه تعداد مراحل تئوری :

$N = ?$

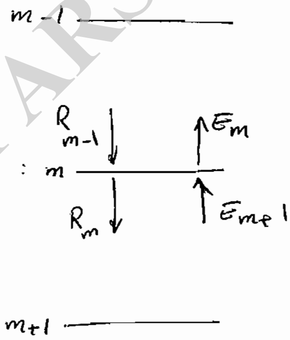
در جذب : $R_{S_{\text{واقعی}}} > R_{S\,min}$

در دفع : $E_{S_{\text{واقعی}}} > E_{S\,min}$

این ها هم باید لحاظ شود.



سینی شماره m :



فرض: از هر مرحله شیء به همان حالت خارج شود.

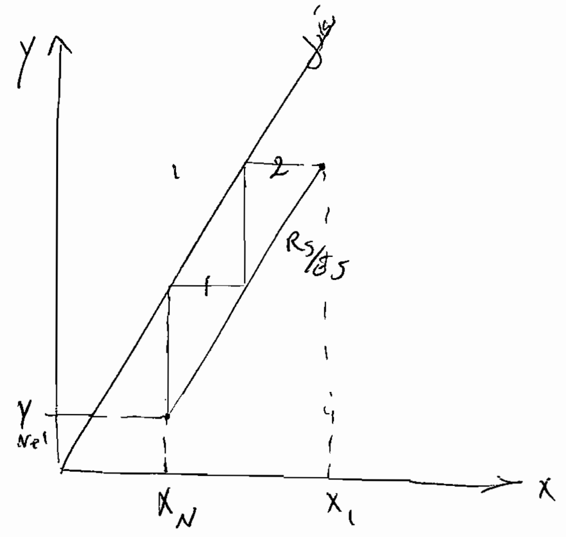
$$+\frac{R_S}{E_S} = \frac{Y_1 - Y_{N+1}}{X_0 - X_N}$$

معادله خط کار
برج ناهمسو

محاسبه N تئوری در جذب :

معلومات	مجهولات
E_S و E_{N+1}	N
ضرایب y_{N+1}	x_N
درصد جداسازی y_1	
مشخصات x_0	
داده های تعادلی	
مقادیر R_S و R_0	

از معادله خط کار، شیب معلوم است، ابتدا X_n و بعد x_n محاسبه می‌شود.



در دفع

$$N_{\text{کرمسر}} = f\left[X_0 ,\ X_N ,\ Y_{N+1} ,\ m ,\ \frac{R_S}{E_S}\right]$$

X_0: خوراک — X_N: یا درصد جداسازی — Y_{N+1}: حلال — $\frac{R_S}{E_S}$: یا S

$$S = \frac{m}{\frac{R_S}{E_S}}$$

$$\boxed{\text{فاکتور دفع} = \frac{1}{A}}$$

در دفع

افزایش حلال : $\uparrow E_S$ یا $\downarrow \frac{R_S}{E_S}$ یا $\uparrow S$ یا دورشدن خطوط تبادل و تعادل یا افزایش نیروی محرکه

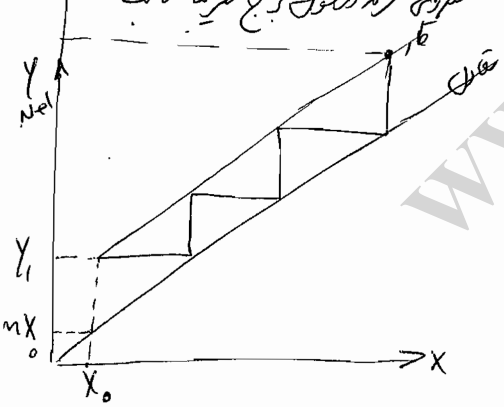
در نتیجه $N \downarrow$

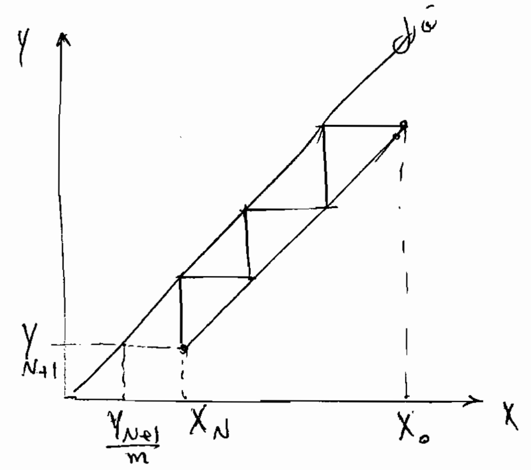
حالت خاص معادله کرمسر :

if $A = 1$ (یا $S = 1$) $\longrightarrow N = \dfrac{\text{تغییر ارتفاع کلی}}{\text{ارتفاع یک پله}}$

یعنی خطوط تبادل و تعادل موازی
نیروی محرکه در طول برج تقریباً ثابت

$$\boxed{N_{\text{جذب}} = \frac{Y_{N+1} - Y_1}{Y_1 - mX_0}}$$





$$N_{\text{دفع}} = \frac{\text{تغییر در عرض کلی}}{\text{عرض یک پله}}$$

$$\boxed{N_{\text{دفع}} = \frac{X_0 - X_N}{X_N - \frac{Y_{N+1}}{m}}}$$

مثال: اگر در مسأله قبل (جذب CO_2 توسط آب) میزان حلال مصرفی ۱۱٪ بیش از مقدار حداقل آن باشد عده مقدار مراحل تئوری را محاسبه کنید. در این حالت غلظت CO_2 در مایع خروجی از پایین برج به چه میزان است؟

در مسأله قبل بدست آمد : $R_{S_{min}} = 1.8\ E_S$

$$R_{S_{\text{واقعی}}} = 1.11\ R_{S_{min}} = 1.11 \times 1.8\ E_S$$

$$\left.\begin{array}{l} \rightarrow \dfrac{R_S}{E_{S_{\text{واقعی}}}} = 2 \\ \text{منحنی تعادل} \quad Y = 2X \end{array}\right\} \longrightarrow A = \frac{2}{2} = 1$$

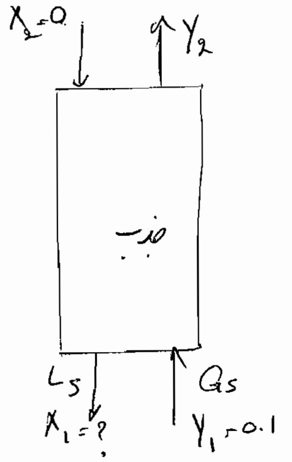
$$Y_{\text{خروجی}} = 0.1\, Y_{\text{ورودی}} \leftarrow \text{۹۰٪ جداسازی}$$

$$N = \frac{Y_{N+1} - Y_1}{Y_1 - mX_0} = \frac{Y_{N+1} - 0.1\,Y_{N+1}}{0.1\,Y_{N+1} - 2\times 0} = 9$$

$$Y_{N+1} = \frac{0.12}{1-0.12} = \cdots \checkmark$$ گاهی Y_{N+1} را می‌خواست

$$\left.\frac{R_S}{E_S}\right|_{\text{واقعی}} = \frac{Y_{N+1} - Y_1}{X_N - X_0} \Rightarrow 2 = \frac{\frac{0.12}{1-0.12} - 0.1\times\frac{0.12}{1-0.12}}{X_N - 0} \Rightarrow X_N = \cdots \checkmark$$

غلظت CO_2 در مایع خروجی



مثال: تست ۱۱۴ سال 86 : (اطلاعات اشتباه است)

تعادل $Y = X^2$

$$\left.\frac{L_S}{G_S}\right|_{min} = \frac{1}{2}\left.\frac{L_S}{G_S}\right|_{\text{واقعی}}$$

$$\Rightarrow \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_{1eq}} = \frac{1}{2}\,\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

$Y_2 = \bigcirc \leftarrow$ ۹۰٪ جذب

$$\Rightarrow X_1 = \frac{1}{2}X_{1eq} = \frac{1}{2}\sqrt{Y_1} = \frac{1}{2}\sqrt{0.1}$$ هیچکدام از گزینه‌ها

$$\xrightarrow[\text{(اشکال تایپی)}]{\text{اگر } Y^2 = X \text{ بود}} X_1 = \frac{1}{2}(0.1)^2 = \frac{1}{200}$$

جلسه هفتم

دستگاههای گاز ـ مایع :

۱) دستگاههایی که در آن ها فاز گاز پراکنده می شود .

۲) " " " " " مایع " " .

* فازی باید پراکنده شود که مقاومت بیشتری دارد .

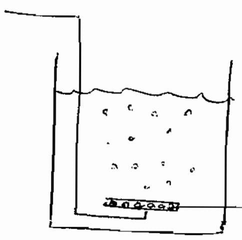
نکته : پس از پراکنده شدن فاز مورد نظر، مقاومت این فاز مقدار کمی خواهد داشت . (کمتر از فاز دیگر)

دستگاههایی که در آن ها فاز گاز پراکنده می شود :
- مخازن مولد حباب
- مخازن همزن دار
- برج های سینی دار

دستگاههایی که در آن ها فاز مایع پراکنده می شود :
- برج های دیواره مرطوب
- برج های پاششی
- شستشو دهنده ونتوری
- برج های پرشده

Gas _ Liquid contactor

۱- مخازن مولد حباب :



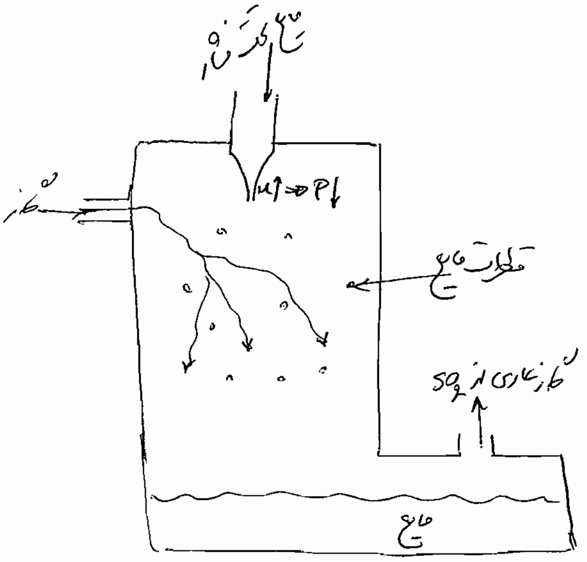
از نظر فاز مایع یک سیستم Batch داریم .
" " continus " .
" " " گاز " "

فاز مایع فاز پیوسته
" گاز " پراکنده

کاربرد : ۱- جزء جامد معلق در فاز مایع داشته باشیم
۲- واکنش بین فاز گاز و مایع داشته باشیم . مثل
- هوادهی فرمانتورها
- کربناسیون دوغاب آهک
- کلرینه کردن خمیر کاغذ
- هیدروژناسیون روغن

استثنا: جذب SO_2 از گازهای خروجی توسط دوغاب آهک

وقتی افت فشار کم گاز مدنظر باشد از venturi Scrubber



: Venturi Scrubber

مایع وقتی با سرعت بالا از نازل خارج می‌شود خلاء ایجاد می‌کند و خلاء باعث جریان گاز به درون محفظه می‌شود.

برمی‌گردیم به بحث مخازن مولد حباب:

به طور کلی ماندگی مایع در گاز است اما در این بحث ماندگی را به شکل ماندگی گاز در مایع تعریف کرده

$0 < \varphi_G < 1$

d_p = قطر حباب‌های گاز

φ_G = ماندگی گاز در مایع
(کسری از حجم که توسط فاز گاز اشغال شده)

V = حجم ظرف

$V\varphi_G$ = حجم گاز

$$n = \frac{V\varphi_G}{\frac{\pi}{6} d_p^3}$$ = تعداد حباب‌های گاز

سطح انتقال جرم

$$A_{\text{mass transfer}} = \left[\frac{V\varphi_G}{\frac{\pi}{6} d_p^3}\right] \cdot \pi d_p^2$$ = تعداد حباب‌ها × سطح یک حباب

$$\frac{A_{\text{mass transfer}}}{V} = \underbrace{a}_{\text{سطح ویژه}} = \frac{6\varphi_G}{d_p}$$

مثال:

$$\left.\begin{array}{l} d_p = 1\ mm \\ \varphi_G = 0.1\ (\%10) \end{array}\right\} \longrightarrow a = \frac{6\times 0.1}{0.001} = 600\ m^2/m^3$$

v_G = سرعت ظاهری گاز = $\frac{\text{دبی گاز}}{\text{سطح مقطع کل}}$

سرعت واقعی گاز = $\frac{\text{سرعت ظاهری}}{\varphi_G} = \frac{v_G}{\varphi_G}$

اگر بخواهیم یک اجرای سیستم هایی که فاز مایع هم حرکت دارد تعمیم دهیم:

V_L = سرعت ظاهری مایع

$\frac{V_L}{1-\varphi_G}$ = سرعت واقعی مایع

سرعت لغزش:

سرعت لغزش slip velocity = V_S = سرعت نسبی فازهای گاز و مایع درون دستگاه

$$V_S = \frac{V_G}{\varphi_G} - \frac{V_L}{1-\varphi_G}$$

مخازن مولد حباب: $V_L = 0$ مایع ساکن است

$$V_S = \frac{V_G}{\varphi_G} \longrightarrow \varphi_G = \frac{V_G}{V_S}$$

در دستگاه های مولد حباب

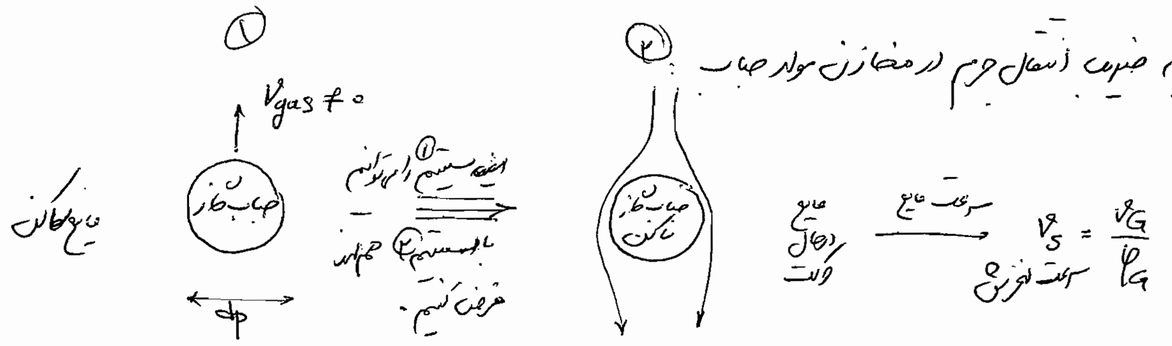
ماندگی گاز در مایع عبارت است از نسبت سرعت ظاهری گاز به سرعت لغزش

با پراکنده کردن گاز هم سطح انتقال جرم را زیاد کرده ایم و هم به دلیل اینکه گاز به شکل حباب های ریز درآمده مسیر انتقال جرم کوتاه تر شده و ضریب انتقال جرم با مسیر نسبت عکس دارد با کم شدن مسیر انتقال جرم، انتقال جرم افزایش می یابد.

محاسبه شار انتقال جرم در مخازن مولد حباب:

چون حرکت نسبی فازهای گاز و مایع را داریم پس انتقال جرم با مکانیزم جابجایی انجام می شود لذا محاسبه N_A مستلزم داشتن k_c یا k_L است.

محاسبه ضریب انتقال جرم در مخازن مولد حباب:



لذا ضریب انتقال جرم را از روابط جریان از روی کره‌ها بدست می‌آوریم.

برای نفوذ خالص سرعت صفر و 2 است.

$$Sh_L = 2 + a \cdot Re_L^m \cdot Sc^n$$

$$\Rightarrow \frac{k_L \cdot d_p}{D_{AB}} = 2 + a\left(\frac{\rho_L \cdot V_s \cdot d_p}{\mu}\right)^m \cdot \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_{AB}}\right)^n$$

تست ۱۱۳ سال ۸۵:

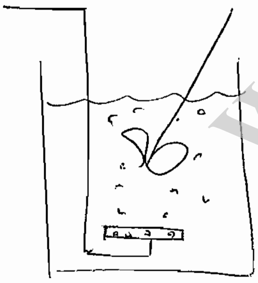
حرکت مایع از روی کره: $Sh = 1.2\, Re^{0.55} \cdot Sc^{0.34}$

در این سیستم می‌توان گفت:

رابطه کلی: $Sh = 2 + a\, Re^m\, Sc^n$

چون از عدد 2 در رابطه صرف‌نظر شده پس: $\underbrace{2}_{\text{نفوذ}} <<< \underbrace{1.2\, Re^{0.55}\, Sc^{0.34}}_{\text{جابجایی}}$

پس از نفوذ در برابر جابجایی صرف‌نظر شده.



۲) مخازن همزن‌دار:

همزن به منظور ایجاد اختلاط مناسب در فاز مایع به کار می‌رود (جلوگیری از به وجود آمدن مناطق خرابی) و به خاطر تلاطمی که ایجاد می‌کند انتقال جرم افزایش می‌یابد.

معمولاً $\frac{d}{D_T}$ بین 0.3-0.5 است.

d = قطر همزن

D_T = قطر مخزن

N = سرعت دوران همزن (rpm یا ...)

P = توان همزن

$$\Rightarrow \underset{\text{عدد توان}}{P_o} = \underbrace{\frac{P}{\rho N^3 d^5}}_{\text{دیمانسیون توان دارد}}$$

$$\text{power} = Q \cdot \overset{\text{فشار}}{\Delta P}$$

$$\Delta P \sim \rho u^2 \qquad \Rightarrow \text{power} \sim \rho u^3 d^2$$

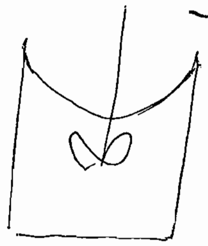
$$Q \sim uA \sim ud^2 \qquad u \sim Nd$$

$$\Rightarrow \text{power} \sim \rho N^3 d^5$$

* $P_0 = f\,[\,Re\,,\ Fr\,,\ We\,]$

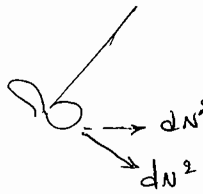
• رینولدز در مخازن همزن دار: $Re = \dfrac{\rho (Nd)\, d}{\mu} \leftarrow Re = \dfrac{\rho N d^2}{\mu} \leftarrow Re = \dfrac{\text{اینرسی}}{\text{ویسکوزیته}}$

• عدد فرود: $Fr = \dfrac{d N^2}{g} \leftarrow Fr = \dfrac{\text{نیروی گریز از مرکز}}{\text{نیروی گرانش}}$



در مخازن همزن دار به دلیل نیروی گریز از مرکز باعث ایجاد انحنا در سطح می‌شود و انحنای سطح در نهایت منجر به vortex (گردابه) می‌شود و همزن خارج از مایع قرار می‌گیرد.

روشهای جلوگیری از vortex:
* نصب بافل
* کج یا زاویه دار نصب کردن همزن



نیروی شعاعی باعث ایجاد vortex می‌شود با کج قرار دادن همزن این نیرو را کم می‌کنیم.

$$dN^2 \cos\theta < dN^2$$

* کار کردن در دورهای کم
* استفاده از ظروف سر بسته

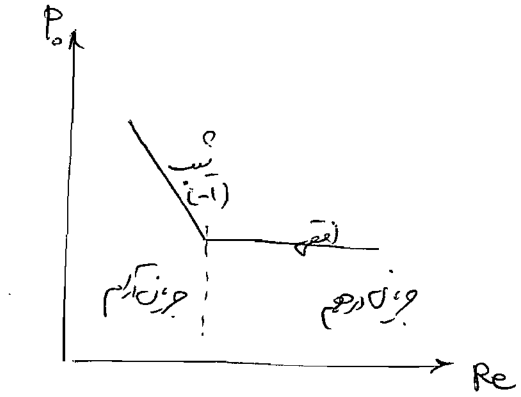
و عدد وبر:

وبر $We = \dfrac{\rho N^2 d^3}{\sigma} = \dfrac{\text{نیروی اینرسی}}{\text{نیروی کشش سطحی}}$

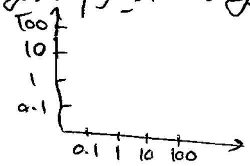
در زمانی اهمیت دارد که اختلاط دو فازی باشد

در مخزن مجهز به بافل که در آن اختلاط تک فاز مایع انجام می‌شود عدد توان فقط تابع عدد Re است.

$$P_0 = f(Re)$$



این صفحه دیاگرام لگاریتمی است.



→ در جریان آرام: $P_0 \sim \frac{1}{Re}$

→ $\frac{P}{\rho N^3 d^5} \sim \frac{1}{\frac{\rho N d^2}{\mu}}$ → $P \sim \mu N^2 d^3$

در جریان آرام

$N\uparrow \rightarrow P\uparrow , P_0\downarrow$

$d\uparrow \rightarrow P\uparrow , P_0\downarrow$

$\mu\uparrow \rightarrow P\downarrow , P_0\downarrow$

نکته: با افزایش دور همزن یا افزایش قطر همزن توان زیاد می‌شود اما عدد توان کاهش می‌یابد.
با کاهش ویسکوزیته عدد Re افزایش می‌یابد. عدد توان و خود توان کاهش می‌یابد.

* در جریان آرام عدد توان مستقل از دانسیته است ولی وابسته به ویسکوزیته است.
در جریان درهم عدد توان تقریباً عدد ثابتی است. در جریان درهم توان مستقل از ویسکوزیته و وابسته به دانسیته است.

جریان درهم: $P_0 \approx$ ثابت → $\frac{P}{\rho N^3 d^5} \approx$ ثابت

سوال: در اختلاط دو فازی در مخزن مجهز به بافل و در جریان درهم عدد توان تابع ... است از:

1) Re　　2) We ✓　　3) Re, Fr, We　　4) Re, We

وجود بافل → عدد توان تابع Fr نیست

جریان درهم → عدد توان تابع Re نیست

دو فازی → عدد توان تابع We هست.

۲۱

$$\frac{P^*}{P}$$

P^* توان همزن در حضور گاز

P توان همزن در عدم حضور گاز

چون گاز وجود دارد دانسیته و ویسکوزیته سیستم کم خواهد بود و $P^* < P$

$$\frac{P^*}{P} = 1 - \beta \cdot \frac{Q_G}{Nd^3}$$

عدد ثابت (β) — دبی گاز تزریق شده (Q_G)

$$\left.\begin{array}{l} Q \sim uA \\ u \sim Nd \\ A \sim d^2 \end{array}\right\} \rightarrow Q \sim Nd^3$$

$\frac{Q}{Nd^3}$ می‌آید

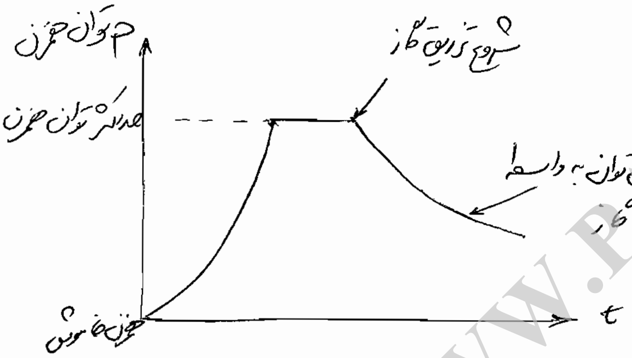
توان همزن در حضور گاز کاهش می‌یابد نسبت به شرایطی که اختلاط تک فازی داریم.

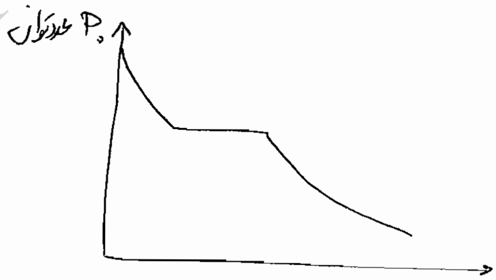
سوال ۹ سال ۸۰ صفحه ۳۰۱ کتاب:

$P \sim N^3$ جریان درهم

$P \sim N^2$ جریان آرام

$\xrightarrow{\text{صرف نظر از رژیم جریان}}$ از لحظه روشن کردن همزن تا رسیدن به حداکثر توان همزن افزایش توان را داریم.





⊛ کاربردهای مخازن همزن دار و مخازن مولد حباب مشابه هم است.

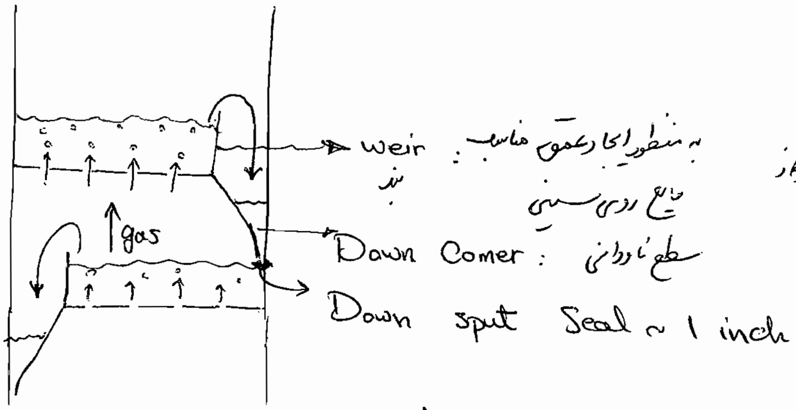
کاربرد مخازن همزن‌دار و مولد حباب:

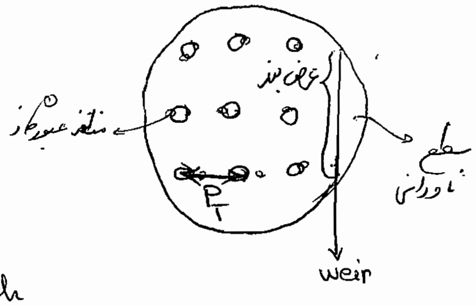
← وجود فاز جامد: وجود فاز جامد باعث گرفتگی منافذ در برج‌های سینی‌دار و گرفتن مسیرهای عبور سیال از درون پرکن‌ها.

← واکنش: به واسطه واکنش نیروی محرکه زیاد است و ضریب انتقال جرم زیاد است ← سطح انتقال جرم کمتری مورد نیاز است.

این دستگاه‌ها در شرایطی که به سطح انتقال جرم کم نیاز باشد مورد استفاده قرار می‌گیرند.

برای دستیابی به ظرفیت های بالاتر و تعداد مراحل تئوری بیشتر در دستگاه هایی که قرار است فاز گاز پراکنده شود به سراغ برج های سینی دار (Tray Tower) می رویم.





ارتفاع بند $H_{weir} \approx 10$ cm

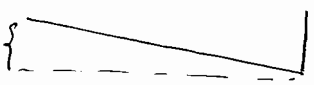
عرض بند $= (0.6 - 0.8)\, D_T$

گام P_T = Pitch = $2-3\, d_o$ ← قطر منفذ

نزدیکی بیش از حد منافذ و کاهش گام باعث می شود تعداد حباب های تولید شده بیشتر شده و سطح انتقال جرم زیاد شده ولی در مقابل این نزدیکی موجب افزایش احتمال برخورد حباب های گاز می شود که این برخورد منجر به از بین رفتن سطح انتقال جرم می شود. دور شدن منافذ از هم و افزایش گام باعث می شود تعداد حباب های ایجاد شده در واحد حجم کم شود (سطح ویژه کم شود) ولی در مقابل احتمال برخورد حباب ها و از بین رفتن سطح انتقال جرم کم می شود.

پس میزان گام (فاصله بین منافذ) $P_T = (2-3)\, d_o$ دارای یک مقدار بهینه است.

سینی های برج را شیب دار می سازند برای آنکه جریان مایع روی سینی به خوبی انجام شود و درون فاز مایع ناحیه مرده ای نداشته باشیم.



اختلاف ارتفاع دو سر سینی $\simeq 6$ mm

شیب هم باید دارای مقدار بهینه باشد نه خیلی زیاد و نه خیلی کم. زیاد بودن شیب سینی ها باعث می شود حرکت مایع به خوبی صورت گیرد ولی اشکال اصلی آن توزیع غیر یکنواخت حباب های گاز (سوال ۵ سال ۸۴ صفحه ۲۷۶ کتاب)

درون down comer هم به علت باقی ماندن تعداد محدودی از حباب های گاز انتقال جرم می تواند انجام شود اما چون جریان های خروجی از سینی نزدیک به شرایط تعادلی هستند لذا از انتقال جرم درون down comer در مقایسه با انتقال جرم روی سینی صرف نظر می شود (سوال ۷ سال ۸۴ صفحه ۲۷۶ کتاب)

پدیده های نامطلوب در برج های سینی دار :

← ۱) ماندگی (ورود مایع در گاز) : Entrainment

به مقدار مایعی گفته می شود که توسط جریان گاز حمل می شود.

$$E \text{ ماندگی مایع در گاز} = \frac{\text{مایع حمل شده توسط گاز}}{\text{کل مایع}}$$

هر جا گازی از درون مایعی جریان داشته باشد قطراتی از مایع توسط گاز حمل می شود (در تمام دستگاههای گاز-مایع) وجود ماندگی باعث می شود نیرو محرکه در طول برج کم شود چون بخشی از مایع را از روی سینی بر می گرداند روی سینی بالایی. در نتیجه راندمان سینی را کم می کند.

راندمان مورفری در عدم حضور ماندگی

راندمان مورفری در حضور ماندگی

$$E_{MGE} = \frac{E_{MG}}{1+E_{MG}\cdot\frac{E}{1-E}}$$

مورفری — گاز — ماندگی

$E\uparrow \rightarrow E_{MGE}\downarrow$

بعضی از عوامل می توانند موجب تشدید پدیده ماندگی شوند:

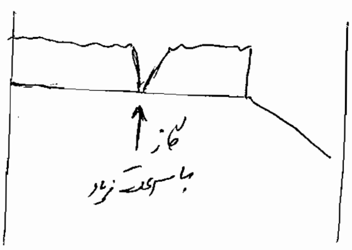
۱) کف زا بودن محلول

۲) سرعت های بالای گاز

← ۲) انسداد: حالت حاد پدیده ماندگی : Priming

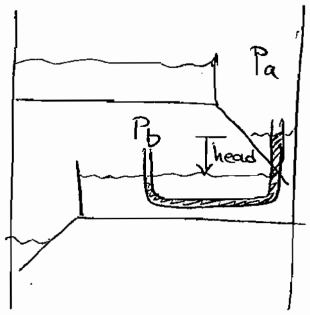
در این حالت راندمان شدیداً کم می شود

← ۳) مخروطی شدن : Coning



به علت سرعت بالای گاز به جای اینکه گاز درون فاز مایع پراکنده شود درون فاز مایع ایجاد مسیر می کند و بدون اینکه تماس مناسبی با فاز مایع داشته باشد سینی را ترک می کند. در این حالت سطح انتقال جرم ایجاد شده توسط گاز به شدت کم شده بنابراین میزان انتقال جرم انجام شده در روی سینی و راندمان سینی کم می شود.

۴) طغیان : Flooding



یک مانومتر فرضی در نظر می‌گیریم:

چون $P_a < P_b$ ⟵ ارتفاع مایع در down comer بالاتر از ارتفاع سینی است.

if $\Delta P_{گاز} \uparrow$ ⟹ سطح مایع در down comer بالا می‌رود.

در یک حالت حاد که افت فشار بیش از حد زیاد شده مایع از درون down comer برمی‌گردد به درون سینی بالایی و نیرو محرکه به شدت کم می‌شود و لذا راندمان به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. با توجه به این توضیحات مشخص می‌شود که پدیده طغیان یک اشکال صرفاً هیدرودینامیکی است در برج که نشان‌دهنده عدم تناسب تطابق و فاصله در نظر گرفته شده بین سینی‌ها با دبی عبوری از سینی است.

- طغیان : در طراحی : قطر از مقدار مورد نیاز کمتر در نظر گرفته شده است.
  در کار : دبی عبور بیش از حد مجاز سینی بوده است.

در هر ۲ مورد فوق افزایش سرعت باعث افزایش ماندگی، انسداد، و خطر طغیان می‌شود.

$$\Delta P_{گاز} \sim \frac{1}{d} u^2 \sim \frac{Q^2}{d^5}$$

اثر افزایش قطر در کاهش ΔP خیلی بیشتر از اثر کاهش دبی است در کاهش ΔP.

برای پیشگیری از طغیان در مرحله طراحی باید اولاً قطر به اندازه کافی بزرگ باشد.

$$\underbrace{t}_{\text{فاصله سینی‌ها}} \geq 2 \underbrace{\sum h_i}_{\text{افت فشار کل گاز در دو طرف سینی برحسب هد مایع}} \quad (\text{ثانیاً})$$

$\sum h_i$ یعنی head منشأهای متفاوتی دارد:

h_w : افت فشار ناشی از عمق مایع روی سینی

h_p : افت فشار گاز در اثر عبور از سینی خشک

h_o : افت فشار ناشی از سایر عوامل (کشش سطحی و ...)

معمولاً : $\underbrace{t}_{\text{فاصله سینی‌ها}} \geq 20 \text{ inch} \simeq 50 \text{ cm}$

برای حذف یا کاهش اثر Flooding در مرحله در حال کار، مناسب ترین روش کم کردن دبی گاز است .

۵) چکه weeping :

اگر سرعت گاز کم شود بخشی از مایع از درون منافذ چکه می‌کند .

۶) بارش Dumping :

درصورتیکه سرعت گاز بیش از حد کم شود بارش پیوسته مایع از درون منافذ اتفاق می‌افتد .
عبور مایع از درون منافذ باعث کاهش عده حباب های تولیدی می شود ولذا سطح انتقال جرم را کم می کند .
و راندمان سینی کاهش می یابد .

$$\underset{\text{weeping}}{G_{min}} < \overset{\text{دبی گاز}}{G} < \underset{\text{Flooding}}{G_{max}}$$

$$\frac{G_{max}}{G_{min}} = \text{Turn down ratio}$$

هرچه این نسبت بزرگتر باشد انعطاف پذیری فرآیند بالاتر است .

این شاخص (Turn down ratio): حدود 10-12 برای سینی های Bubble cap — ΔP زیاد و کارایی در محدوده تغییرات کم، هزینه بالا

حدود 5-6 " " Valve Tray — هزینه متوسط

حدود 2-3 " " Sieve Tray (سینی‌های مشبک) — هزینه کم

سوال ۴ سال ۸۴ :

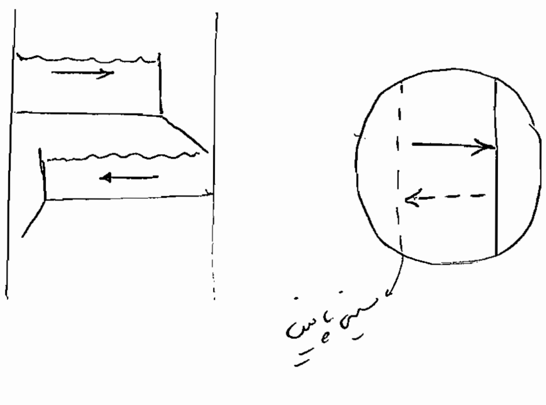
رنج تغییرات شدت جریان زیاد است .

$$\frac{\text{حداقل شدت جریان}}{\text{حداکثر جریان}} = \text{عدد کم}$$

$$\frac{G_{max}}{G_{min}} = \text{عدد بزرگ} \longrightarrow \text{Bubble cap}$$

الگوهای جریان مایع از روی سینی :

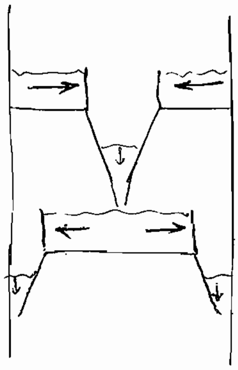
۱)

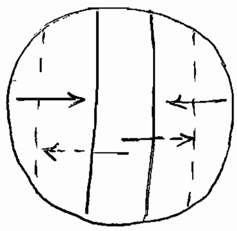


cross flow

$1\,m < D < 3\,m$

متداول ترین و اقتصادی ترین مدل



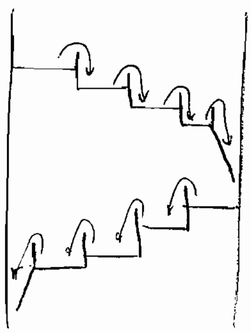


۲) Double split

Two pass

قطرهای زیاد

$3_m < D < 6_m$ در محدوده مربوط به

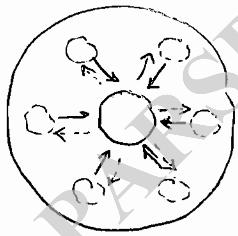


۳) آبشاری Cascade

قطرهای خیلی زیاد

$6_m < D < 9_m$

۴) Radial

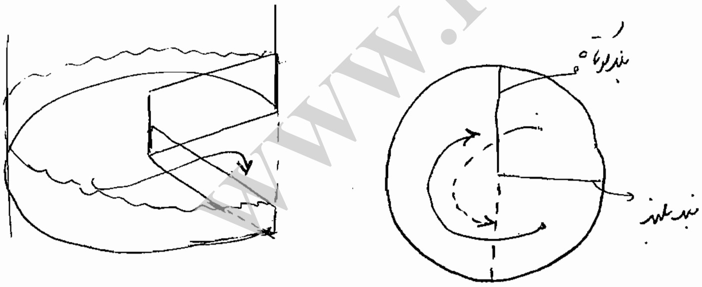


down comer ها به شکل لوله‌ای هستند .

$3_m < D_T < 6_m$

قطرهای زیاد

در محدوده مربوط به قطرهای بالای قطر این نوع بهتر است .



۵) Reverse flow

قطرهای کم

مسیر طی شده توسط مایع مناسب است با πD

مسیر طی شده توسط مایع $\sim D$ cross الگوی

" " " " $\sim \pi D$ reverse الگوی

محاسبه قطر برج سینی دار :

قطر تعیین کننده معمولاً است در مبنای دبی‌های مجاز گاز محاسبه می‌شود . این بدان معنا نیست که دبی مایع اثری بر قطر ندارد به این دلیل است که چون دانسیته گاز کم است (در مقایسه با مایع) و حجم بالای گاز و طبیعتاً آن جریان گاز در محاسبه قطر اثر بیشتری دارد .

اگر دبی گاز در طول برج تغییر کند دبی بزرگتر مبنای طراحی است. در صورتی که قطر محاسبه شده بر مبنای دبی های گاز در بالا و پایین برج بیش از ۲۰٪ تفاوت داشته باشد اقتصادی است که برج به صورت دو قطری ساخته شود در غیر اینصورت طراحی بر مبنای دبی بزرگتر انجام می شود.

step 1 : اول سرعتی که منجر به شرایط طغیان می شود را محاسبه می کنیم.

سرعت گاز درون برج در حالت طغیان $V_F = C_F \left(\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G}\right)^{0.5}$

ضریب طغیان سینی های مشبک $C_F = \left[\alpha \cdot \log \frac{1}{\frac{L'}{G'}\sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}} + \beta\right]\left(\frac{\sigma}{0.02}\right)^{0.2}$

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_1 t + \alpha_2 \\ \beta = \beta_1 t + \beta_2 \end{cases}$$

α و β توابعی خطی بر حسب t (فاصله سینی ها) می باشند.

$L' = \frac{L}{A_t}$ سطح مقطع

$G' = \frac{G}{A_t}$

$\longrightarrow \frac{L'}{G'} = \frac{L}{G} = \checkmark$

L' و G' شدت جریان ظاهری هستند.

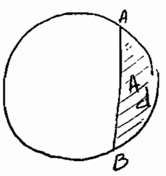
: step 2

سرعت عملیاتی $V = \begin{cases} (0.8 - 0.85)\,V_F & \text{غیر کف زا} \\ (0.7 - 0.75)\,V_F & \text{کف زا} \end{cases}$

: step 3

$V = \frac{G}{A_n}$ سطح نزول / سطح در اختیار گاز $\longrightarrow A_n = \ldots \checkmark$

$A_n = A_t - A_d$ ← سطح ناحیه ناودانی



AB = عرض بند

AB/D_T عرض بند	$\frac{A_d}{A_t} \times 100$
0.6	14%
⋮	⋮
0.8	30%

$\frac{A_d}{A_t}$ مستقل از قطر است و فقط تابع $\frac{AB}{D_T}$ است.

$\frac{A_d}{A_t}$ را با انتخاب نسبت عرض بند به قطر برج داریم.

$$\frac{A_d}{A_t} = \checkmark \qquad A_t - A_d = \checkmark \longrightarrow A_t = \checkmark \xrightarrow{A_t = \frac{\pi}{4} D_T^2} D_T = \checkmark$$

مثال: اگر یک برج سینی‌دار دبی‌های مایع و بخار هردو، دو برابر شوند قطر برج چند برابر می‌شود؟

$$\text{پارامتر جریان} = \frac{L'}{G'} \cdot \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}$$

$L_2 = 2L_1 \,,\, G_2 = 2G_1$

$\Rightarrow \frac{L}{G}\Big|_2 = \frac{L}{G}\Big|_1 \longrightarrow$ پارامتر جریان ثابت $\longrightarrow C_F$ ثابت $\longrightarrow V_F, V$ ثابت

↓ دو برابر شود

$V = \frac{G}{A}$ ثابت باشد ← A دو برابر می‌شود ← قطر $\sqrt{2}$ برابر می‌شود.

مثال: اثر ازدیاد دبی مایع بر قطر:

$L\uparrow \longrightarrow$ پارامتر جریان $\uparrow \longrightarrow C_F\downarrow \longrightarrow V_F\downarrow \longrightarrow V\downarrow \longrightarrow \downarrow V = \frac{G}{A}$ (ثابت G) $\rightarrow A\uparrow \rightarrow D\uparrow$

مثال: اثر کاهش σ بر قطر.

$$\sigma\downarrow \longrightarrow C_F\downarrow \longrightarrow V_F, V\downarrow \longrightarrow A\uparrow \rightarrow D\uparrow$$

اثر فاصله سینی‌ها (سایر عوامل ثابت) ← در یک شرایط عملیاتی مشخص

$$t\uparrow \longrightarrow \alpha, \beta\uparrow \longrightarrow C_F\uparrow \longrightarrow V_F, V\uparrow \longrightarrow A\downarrow \longrightarrow D\downarrow$$

قطر برج D	فاصله مناسب سینی‌ها t
<1m	0.5 m
1~3m	0.6 m
3–6m	0.65 m

در این جدول که در کتاب تریبال آمده مقایسه t ها با قطرهای متفاوت برای شرایط عملیاتی یکسان نیست.

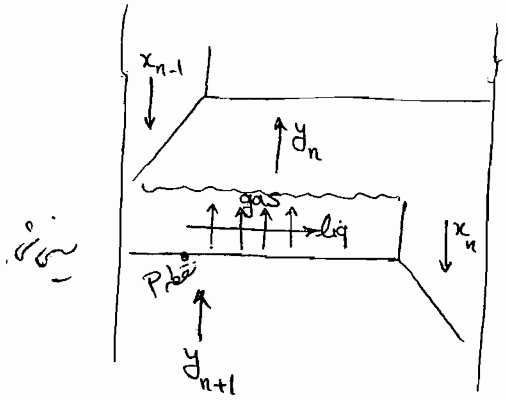
این جدول برای انتخاب حدس اولیه مطلوب برج و تناسب t و D به کار می‌رود.

حدس اول $t = 0.6\,m \xrightarrow{\text{محاسبات}} D_T = 4.5 \xrightarrow{\text{طبق جدول}}$ این قطر، فاصله سینی مناسب ندارد.

حدس دوم $t = 0.65 \longrightarrow D_T = 4.2$ ✓

$$C_{F\,\text{sieve tray}} > C_{F\,\text{valve tray}} > C_{F\,\text{bubble cap}}$$

جلسه هشتم



راندمان برج های سینی دار :

راندمان محلی :

$$\eta_{local} = \frac{\text{انتقال جرم انجام شده}}{\text{حداکثر انتقال جرم ممکن}}$$

* در کل برج counter current است.
  در هر سینی cross current است.

* برج سینی دار در نقطه و کلی : یک برج مرحله ای است
  در هر سینی : مثل یک برج دیفرانسیلی است
  وقتی در طول مسیر انتقال جرم سینی حساب می شود برج را دیفرانسیلی حل می کنیم مثل برج های پر شده

برای تعریف راندمان محلی نقطهٔ خاص P را روی سینی n ام درنظر میگیریم.

در روی یک سینی جریان متقاطع است. ویژگی جریان متقاطع این است که در مسیر جریان نیروی محرکه در حال کاهش است.

نتیجه : میزان انتقال جرم در ابتدای سینی با انتهای سینی متفاوت است.

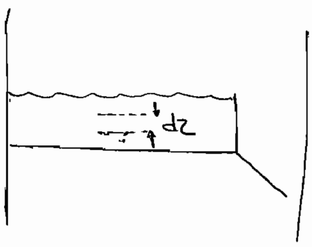
$$\longrightarrow \eta_{local} = \frac{y_{n,P} - y_{n-1,P}}{y^*_{n,P} - y_{n-1,P}}$$

در تعادل با مایع خروجی از نقطه

* راندمان محلی همیشه کمتر ۱۰۰٪ است

چون در هیچ نقطه ای انتقال جرم فراتر از نقطهٔ تعادلی نمی تواند پیش رود.

اشکال این راندمان اینست که نیاز به دانستن غلظت های محلی بر روی سینی ها هستیم لذا به لحاظ کاربردی برآورد آن مشکل است.



با انتگرال گیری دیفرانسیلی از $z=0$ تا $z=h_L$ (h_L عمق مایع روی سینی است)

$$\Rightarrow \eta = 1 - \exp\left(-\frac{a \cdot k_y \cdot h_L}{G'}\right)$$

$$\eta = 1 - e^{-N_{toG}}$$

N_{toG} = تعداد واحد انتقال

$G' = \frac{G}{A}$ شدت جریان ظاهری

(مثل راندمان حرارتی : $\eta = 1 - e^{Ntu}$)

بعداً بدست میآوریم که:

$$Z = H_{toG} \cdot N_{toG}$$

$$\frac{G'}{F_G a} \doteq \frac{G'}{k_y a} \longleftarrow$$

$h_L \uparrow \Rightarrow \eta \uparrow$

سطح ویژه $a \uparrow \Rightarrow \eta \uparrow$

$a = 6\frac{\Phi_G}{d_p}$ ⇒ هرچه حباب‌ها ریزتر شوند $d_p \downarrow$ ⇒ $\eta \uparrow$

ثابت $G' \downarrow \Rightarrow \eta \uparrow$ $\quad G' = \frac{G}{A}$ → اگر G ثابت باشد → در یک دبی ثابت هرچه قطر برج بیشتر باشد راندمان بیشتر

جریان ظاهری

اگر A ثابت باشد → در یک مقطع ثابت هرچه دبی کمتر باشد راندمان بیشتر است

راندمان مورفری :

راندمان مورفری بر مبنای فاز گاز : E_{MG}

E : راندمان — M : مورفری — G : برای فاز گاز

$$E_{MG} = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}$$

y_n^* در تعادل با x_n است.

چون غلظت گاز خروجی از هر نقطه از سینی متفاوت است (به دلیل ماهیت جریان متقاطع) بنابراین x_n مشخصات مایع در انتهایی‌ترین نقطه سینی نشان می‌دهد بنابراین مطرح نمودن یک تعادل گاز با مشخصات y_n (که از اختلاط گازهای خروجی از نقاط مختلف سینی مورد نظر بدست می‌آید) با مایع x_n بی‌معنی است چون این دو جریان عملاً با هم در تماس نیستند.

پس راندمان مورفری به لحاظ تئوری اشکال دارد ولی در صنعت کاربرد دارد.

به همین دلیل است که راندمان مورفری تنها راندمان مورفری است که ممکن است از ۱۰۰٪ بیشتر شود (به دلیل همان اشکال در تعریف تئوری) لازم به ذکر است که بیشتر از ۱۰۰ شدن راندمان مورفری به معنای انجام انتقال جرم فراتر از تعادل نیست بلکه ناشی از اشکال این راندمان در تعریف تئوری است.

رابطه E_{MG} (راندمان مورفری) با (راندمان سینی) E_{OG}

جریان روی سینی :

Mixed Flow : → $E_{MG} = E_{OG}$

(وقتی می‌گوییم روی هر سینی جریان مخلوط است یعنی مایع در تمام نقاط سینی دارای غلظت یکسان باشد. به این حالت، حالت اختلاط کامل گفته می‌شود.

plug Flow : → در طول سینی غلظت تغییر کند

$$\Rightarrow E_{MG} = \frac{L}{mG}\left(e^{\frac{mG}{L} \cdot E_{OG}} - 1\right)$$

راندمان مورفری از راندمان محلی بیشتر است.

درنتیجه در جریان mixed راندمان موردری هم می‌تواند از 100 بیشتر باشد ولی در جریان plug راندمان موردری می‌تواند از 100 بیشتر باشد.

معیار mixed یا plug بودن جریان روی سینی چیست؟ عدد پکله معیار است.

$$Pe_D = \frac{uL}{D_{AB}}$$

$\longrightarrow Pe \to 0 \Rightarrow$ mixed جریان $\longrightarrow \begin{cases} D_{AB} \to \infty \\ u \to 0 \\ L \to 0 \text{ یا } D_T \to 0 \end{cases}$

$\xrightarrow[\text{نفوذ خیلی کم}]{D_{AB} \to 0} Pe \to \infty \Rightarrow$ plug جریان $\longrightarrow \begin{cases} D_{AB} \to 0 \\ u \to \infty \\ L \to \infty \end{cases}$

طول مشخصه قطر برج $L \simeq D_T$

چون معمولاً D_{AB} عدد خیلی کوچکی است پس احتمال plug بودن جریان زیاد است.

$$\text{راندمان جمعی سینی‌ها} = \frac{N_{\text{تئوری}}}{N_{\text{واقعی}}} \longrightarrow N_{\text{واقعی}} = \frac{N_{\text{تئوری}}}{\eta_{\text{راندمان جمعی سینی‌ها}}}$$

این راندمان توسط سازنده سینی ارائه می‌شود.

ΔP در برج‌های سینی‌دار:

افت فشار در برج‌های سینی‌دار به ازای هر سینی 0.1 psi است.

$$\Delta P = 0.1 \ \frac{psi}{Tray}$$

$$\text{if } N = 40 \longrightarrow \Delta P \cong 40 \times 0.1 = 4 \text{ psi}$$

دستگاه‌هایی که در آنها مایع پراکنده می‌شود:

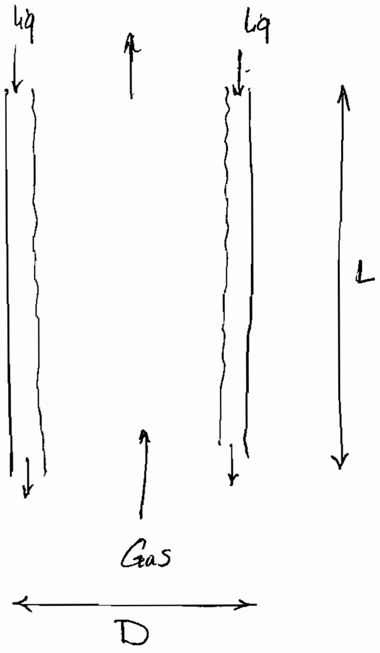
1) شستشو دهنده ونتوری (venturi Scrubber)

2) برج‌های پاششی (spray Tower)

3) دیواره مرطوب (wetted wall Tower)

4) پر شده (packed Tower)

برجهای دیواره مرطوب (wetted wall Tower):



سطح انتقال جرم : $A_{\text{mass Transfer}} = \pi D L$

تست ۸۷ سال 98:

برج دیواره مرطوب

$L = 6.5\ ft$

شار متوسط $\bar{N}_A = 10\ \frac{lbmol}{min \cdot ft^2}$

میزان جذب $G_A = 100\ \frac{lbmol}{min}$

قطر برج $D = ?\ inch$

حل: $G_A = \bar{N}_A \cdot A_{\text{mass Transfer}}$

$$G_A = \bar{N}_A \cdot (\pi D L)$$

$$D = \frac{G_A}{\bar{N}_A \cdot \pi \cdot L} = \frac{100}{10 \times \pi \times 6.5}$$

$$D \simeq 0.5\ ft \simeq 6\ inch$$

سطح ویژه (specific Area):

$$a = \frac{A_{\text{mass Transfer}}}{V}$$

برای برج دیواره مرطوب: $a = \frac{\pi D L}{\frac{\pi D^2}{4} \cdot L} \rightarrow a = \frac{4}{D}$

مثال: $D = 0.2m \rightarrow a = \frac{4}{0.2} = 20\ \frac{m^2}{m^3}$

برای برجهای دیواره مرطوب:

معایب: • سطح ویژه انتقال جرم کم است • میزان انتقال جرم کم است.

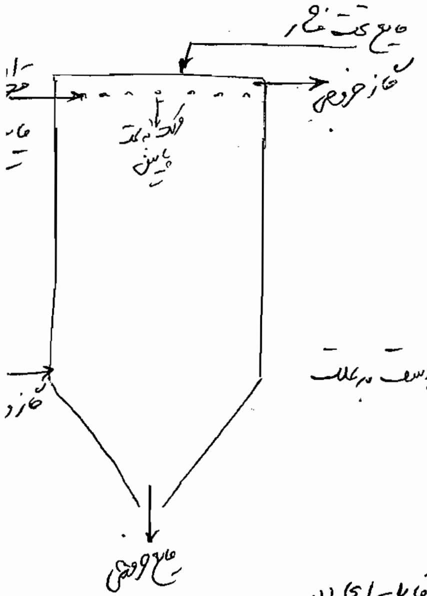
مزایا: • سطح انتقال جرم به دقت قابل اندازه گیری است که باعث می شود برای کارهای آزمایشگاهی و تحقیقاتی مناسب باشد • افت فشار کم است
• سادگی operation • گرفتن و دادن گرما به مایع درون برج از همه دستگاهها آسان تر است (با دو جداره کردن برج)

کاربرد: برج جذب گرمازا توأم با واکنش

گرمازا ⟶ خنک سازی موضوع مهمی است

سطح انتقال جرم مورد نیاز کم است. ⟵ نیرو محرکه زیاد است ⟵ واکنش دارند

مثل جذب جوهر نمک در آب . جذب HCl در آب



برجهای پاششی (spray Tower)

مزایا: ΔP گاز کم است. سطح انتقال جرم بالاست.

معایب: ΔP مایع کم است. حفظ این سطح انتقال جرم بالا در طول برج مشکل است به علت برخورد قطرات با هم و با دیواره (چون کشش روی قطرات ایجاد شده وجود ندارد)

نتیجه: چون در ارتفاع زیاد حفظ سطح انتقال جرم مقدور نیست لذا تعداد مراحل قابل ایجاد در این دستگاه کم است.

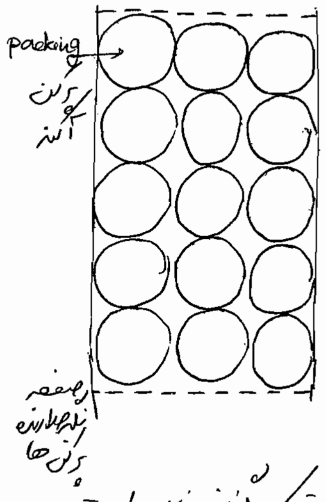
این دستگاه‌ها برای فرایندهایی مثل جذب و دفع یا تقطیر که معمولاً به تعداد مراحل تئوری زیادی نیاز دارند مناسب نیست.

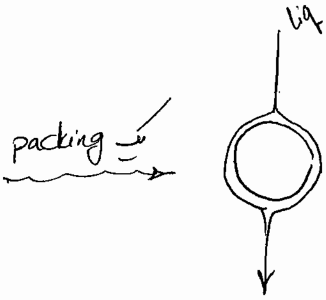
کاربرد: کاربرد اصلی این دستگاه‌ها در فرایندهایی مثل خشک کردن است که به دلیل وجود نیرو محرکه حرارتی (ایجاد شده توسط هوای گرم) نیروی محرکه انتقال جرم هم افزایش یافته و عملاً در چنین فرایندهایی تعداد مراحل کمی مورد نیاز است (۲ تا ۳ مرحله تئوری) بنابراین برج پاششی گزینه مناسبی است برای خشک کردن مواد غذایی و دارویی که در آنجا به علت زمان اقامت کم (t کمتر از 30 ثانیه) این برج دارای مزیت است. (مثل خشک کردن شیر خشک)

برجهای پرشده (برجهای آکنده) (Packed Bed)

در برجهای پرشده به دنبال دو هدف هستیم: ۱- ایجاد سطح انتقال جرم زیاد ۲- حفظ سطح انتقال جرم
۳- هزینه‌های کم برای رسیدن به دو هدف فوق.

در برج پرشده از این خاصیت استفاده می‌شود که مایع شکل ظرف را به خود می‌گیرد پس در این برجها وظیفه ایجاد سطح زیاد به عهده پرکن‌ها است که به اشکال مختلفی ساخته می‌شوند.





نکته: سطح واقعی تماس در برج های پر شده حدود ٪60 سطح جانبی پکینگ ها است.

پکینگ ها:

جنس: استحکام، در برابر خوردگی

خاصیت تر شوندگی سطح پکینگ توسط مایع ← برای مواد آلی پکینگ پلاستیکی گزینه مناسبی است

برای مواد آبی پکینگ سرامیکی " " "

اندازه پکینگ (d_p) اندازه پکینگ ها را معمولاً: $d_p \approx \left(\frac{1}{15} \text{ تا } \frac{1}{10}\right)\frac{D}{T}$

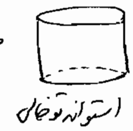
سطح ویژه: $a = \frac{6(1-\epsilon)}{d_p}$ که: ϵ برابر است با تخلخل بستر

$V(1-\epsilon)$ برابر است با حجم پکینگ ها

تعداد پکینگ ها $n = \frac{V(1-\epsilon)}{\frac{\pi}{6} d_p^3}$

$$A_{mass\ Transfer} = \frac{V(1-\epsilon)}{\frac{\pi}{6} d_p^3} \cdot \pi d_p^2 \longrightarrow \frac{A_{mass}}{V} = a = \frac{6(1-\epsilon)}{d_p}$$

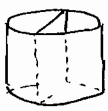
شکل پکینگ: ① حلقه راشیگ: $\frac{L}{D} = 1$



$A = \pi D L \times 2$

← از حجم داخلی استوانه هم بیرون استوانه مایع حرکت می‌کند.

② حلقه لسینگ: سطح انتقال جرم بیشتری نسبت به راشیگ دارد.



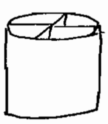
$$A = \pi D L \times 2 + 2\times(DL)$$

$$A = 2DL\,(\pi + 1)$$

$$\frac{L}{D} = 1 \longrightarrow \frac{A_{lessing}}{A_{Rashig}} = \frac{\pi+1}{\pi} \simeq 1.33$$

سطح لسینگ حدود ٪33 بیشتر از راشیگ است.

③ partitionary



④ زین اسبی ← Berl ، Intal

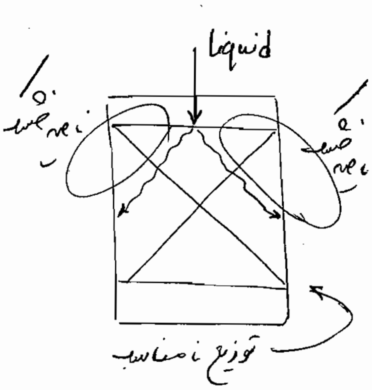
⑤ Pall

حلقه راشیگ کمترین a را دارد .

بالاترین HETP مربوط به کدام پرکن است ؟ راشیگ بالاترین HETP را دارد .

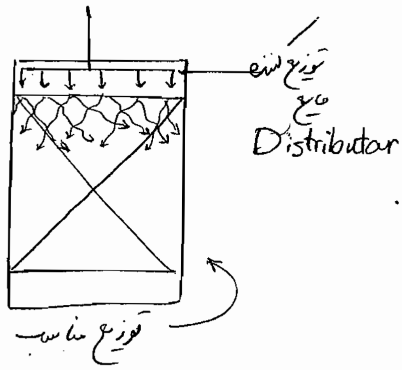
$$HETP = \frac{G'}{F_G \cdot a}$$

a کم (راشیگ) $\longrightarrow$ HETP زیاد



نحوه توزیع مایع در برج‌های پرشده :

برای رفع این مشکل توزیع مایع را از چند نقطه انجام می‌دهیم تا نواحی خشک را به حداقل برسانیم .



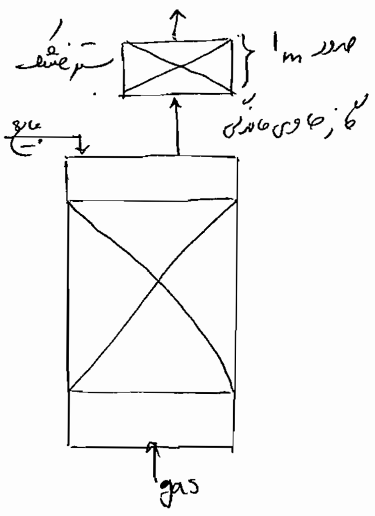
پس از توزیع مایع ، مایع به تدریج به سمت کناره‌ها کشیده می‌شوند چون در کناره دیواره‌ها افت فشار کمتر است .

پس به ازای هر 6-7m ارتفاع برج نیاز به توزیع مجدد مایع داریم .

نحوه چیدن پرکن‌ها در بستر :

۱) چیدن منظم (Regular) → افت فشار کمتر ، سطح موثر انتقال جرم بیشتر ، هزینه بالاتر

۲) چیدن نامنظم (Random) → افت فشار بیشتر ، سطح موثر انتقال جرم کمتر ، هزینه کمتر



نحوه بازیابی قطرات مایع حمل شده با جریان گاز (مانندگی (Entrainment)

از بستر خشک برای بازیابی قطرات مایع استفاده می‌کنیم .

سوال 112 سال ۸۶ همین نکته را پرسیده .

محاسبه قطر برجهای پرشده :

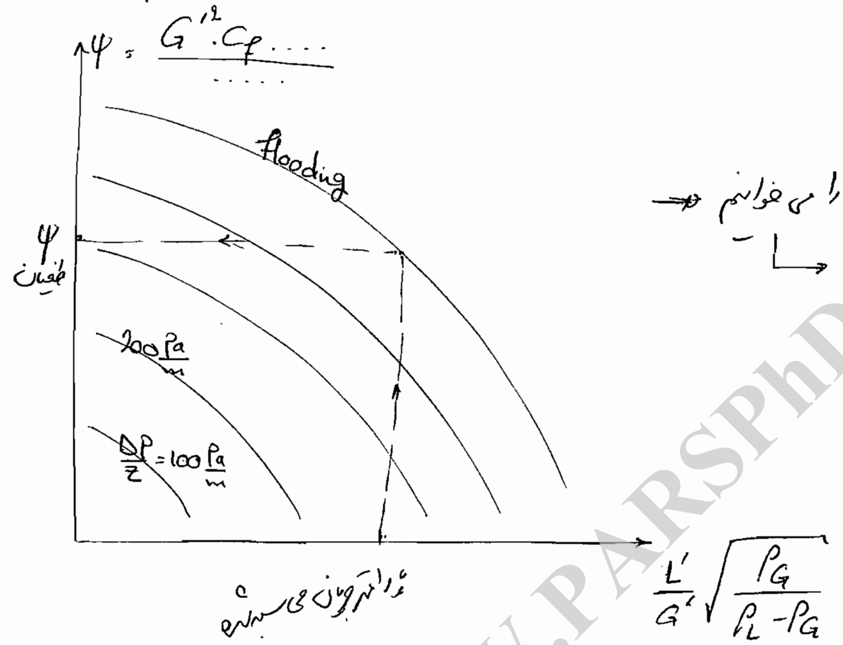
step 1 :

$$\text{پارامتر جریان} = \frac{L'}{G'}\sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L-\rho_G}}$$ ⟶ پارامتر جریان محاسبه می‌شود

می‌دانیم $\frac{L'}{G'} = \frac{L}{G}$

می‌توان ρ_G را در برابر ρ_L صرف‌نظر کرد.

step 2 :



از روی نمودار φ مربوط به طغیان را می‌خوانیم ⟶ $G'^2 \cdot C_f \Big|_{Flooding} = \checkmark$

C_f : ضریب پرکن

↓

C_f از جداول پرکن‌ها استخراج می‌شود.

نکته : هرچه قطر پرکن کوچکتر باشد C_f آن بزرگتر است.

⟶ $G'_f =$ شدت جریان طغیان محاسبه می‌شود

step 3 : $G'_{operating} = 0.7\, G'_{Flooding} \Rightarrow G'_{operating} = \checkmark$

$$G' = \frac{G}{A} \longrightarrow A = \checkmark \longrightarrow D_T = \checkmark$$

مثال : اگر پرکن تغییر کند به نحوی که C_f آن دو برابر شود. در این صورت با فرض ثابت ماندن بقیه پارامترها قطر برج چگونه تغییر می‌کند ؟

C_f که دو برابر شده یعنی ذرات ریزتر شده‌اند.

چون گفته بقیه پارامترها تغییر نمی‌کند ⟵ پارامتر جریان ثابت ⟵ ψ_f ثابت ⟵ $G'^2 \cdot C_f$ ثابت

$$G_2'^2 \cdot C_{f_2} = G_1'^2 \cdot C_{f_1} \Rightarrow \left(\frac{G}{A_2}\right)^2 \cdot C_{f_2} = \left(\frac{G}{A_1}\right)^2 \cdot C_{f_1}$$

$$\rightarrow \frac{A_2}{A_1} = \sqrt{\frac{C_{f_2}}{C_{f_1}}} \rightarrow \frac{\frac{\pi D_2^2}{4}}{\frac{\pi D_1^2}{4}} = \sqrt{\frac{2C_{f_1}}{C_{f_2}}} \rightarrow \frac{D_2}{D_1} = \sqrt[4]{2}$$

پس هرچه پرکن ها ریز شوند قطر برج بیشتر می شود (برای قدرت جریان معین)

در حالت کلی در زمان طراحی پرکن های ریز برای برجهای با قطر کم و پرکن های درشت برای برج های با قطر بزرگ در نظر گرفته می شوند.

اثر ازدیاد دبی مایع به قطر برج :

$L\uparrow \rightarrow$ پارامتر جریان $\uparrow \rightarrow \psi\downarrow \rightarrow G'\downarrow \rightarrow \frac{G}{A}\downarrow \rightarrow A\uparrow \rightarrow D_T\uparrow$

⊛ برای برج در حال کار موثرترین روش برای از بین بردن طغیان کاهش دبی گاز است.

تست ۱ سال ۸۲ بیوتکنولوژی :

برج جذب پرشده .

دبی های گاز و مایع دو برابر شود

قطر چه تغییری می کند ؟

H چه تغییری می کند ؟

نوع برج در مرحله طراحی است چون در مورد تغییرات D و H صحبت کرده.

$L_2 = 2L_1,\ G_2 = 2G_1 \rightarrow \frac{L}{G}$ ثابت $\rightarrow$ پارامتر جریان ثابت

$\rightarrow \psi$ ثابت $\rightarrow G'^2 \cdot C_f$ ثابت $\rightarrow G'$ ثابت

$\rightarrow \frac{G}{A}$ ثابت $\xrightarrow{\text{دو برابر شدن } G}$ A دو برابر می شود $\rightarrow D_2 = \sqrt{2}\, D_1$

قطر $\sqrt{2}$ برابر می شود.

$$Z = H_{tG} \cdot N_{tG} = \frac{G'}{F_G \cdot a} \cdot N_{tG}$$

G' ثابت $\rightarrow H_{tG}$ ثابت

$\frac{L}{G}$ ثابت و m ثابت تعادل $\rightarrow$ A (فاکتور جذب) ثابت $\rightarrow$ N ثابت

$\rightarrow Z$ ثابت

ارتفاع برج ثابت باقی می ماند.

حال می‌خواهیم بدانیم برای یک برج در حال کار اگر L و G دو برابر شوند چه اتفاقی می‌افتد؟

H یا Z ← ثابت

D ← ثابت

C_f ← ثابت

$$\frac{L'}{G'}\sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L-\rho_G}} = \text{پارامتر جریان}$$

ثابت

$$\varphi = \frac{G'^2 \cdot C_f \cdots}{\cdots\cdots} \xrightarrow[G' \text{ دو برابر شده}]{C_f \text{ ثابت}} \varphi \text{ چهار برابر می‌شود} \Rightarrow \varphi_2 = 4\varphi_1$$

از روی نمودار نتیجه می‌گیریم:

۱- افت فشار زیاد می‌شود (ممکن است به حالت طغیان برسیم تا نرسیم)

$$Z = H_{tG} \cdot N_{tG}$$

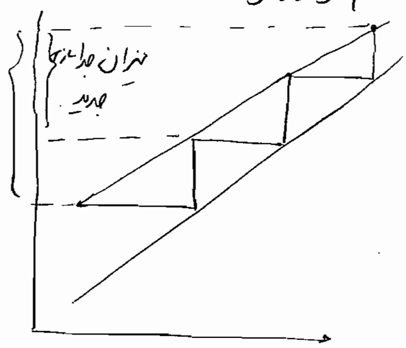
$$\text{ثابت } Z = \frac{G'}{F_G \cdot a} \cdot N_{tG} \xrightarrow{\text{ثابت}}$$

G' دو برابر شده

$F_G \sim G'^{0.6-0.7}$

$\frac{G'}{F_G \cdot a} \sim G'^{0.3-0.4}$ ← H_{tG} افزایش می‌یابد.

۲- میزان جداسازی ⇐ $N_{avilable} \downarrow$ کم خواهد شد.



چون با کم شدن تعداد مراحل جداسازی کم می‌شود.

حال اگر L و G نصف شوند.

الف) در برج در مرحله طراحی D و H چگونه تغییر می‌کند؟ قطر $\frac{1}{\sqrt{2}}$ برابر می‌شود.

H تغییر نمی‌کند.

ب) در برج در حال کار، ΔP و میزان جداسازی چگونه تغییر می‌کند؟ ΔP کاهش می‌یابد

N افزایش می‌یابد پس جداسازی افزایش می‌یابد.

محدوده افت فشار (ΔP) در بسترهای پرشده:

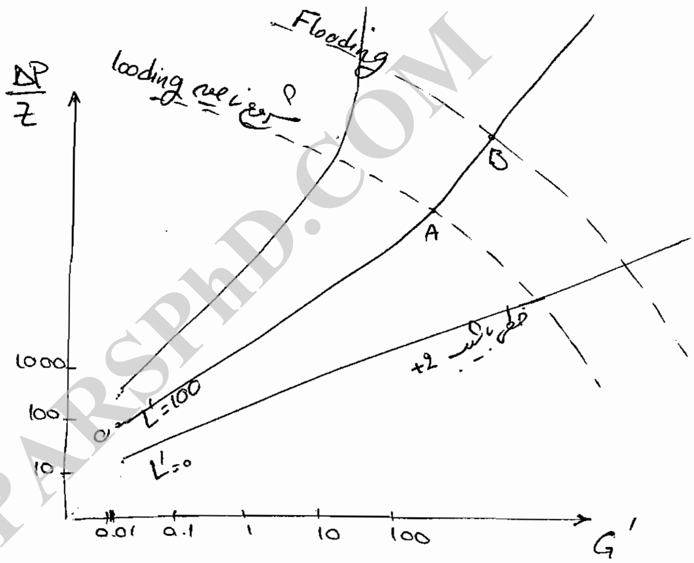
- برجهای جذب و دفع $200-400 \ \frac{Pa}{m}$
- برجهای تقطیر $400-600 \ \frac{Pa}{m}$
- برجهای تحت خلاء $8-40 \ \frac{Pa}{m}$
- ناحیه طغیان $\Delta P > 1200 \ \frac{Pa}{m}$

مناسب ترین برج برای فرایندهای تحت خلاء برج پرشده است.

معادله Ergun در سیالات $\frac{\Delta P}{Z}$ را برای عبور گاز از بستر خشک می دهد.

$$\frac{\Delta P}{Z} = C_D \cdot \frac{G'^2}{\rho_G}$$

C_D ← جنس پکینگ، اندازه پکینگ، شکل پکینگ، تخلخل

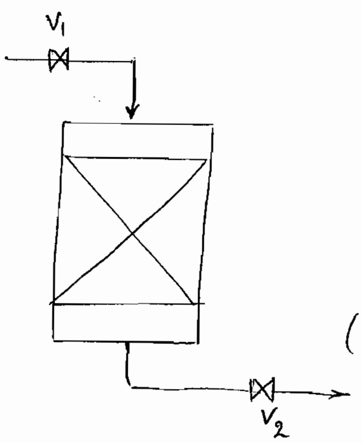


صفحه نمودار لگاریتمی است.

در محدوده 0A با ازدیاد دبی گاز افت فشار هم به تدریج زیاد شده است.

A : در ناحیه loading به علت ازدیاد دبی گاز بستر در آستانه طغیان شدن قرار می گیرد بنابراین مایعات به تله افتاده و ساکن (static hold up موجودی مایع ساکن) به جریان می افتند و لذا دبی مایع به صورت موضعی زیاد می شود که در نتیجه افزایش مضاعف افت فشار را به همراه خواهد داشت.

موجودی مایع بسترهای پرشده: Liquid Hold up



اگر شیرهای 1 و 2 بسته شوند:

کل مایع درون بستر را موجودی کلی مایع (Total liquid Hold up) می نامند ← φ_{LT}

اگر شیر 2 باز شود:

قسمتی از مایع درون بستر خارج می شود که به آن (Dynamic liquid Hold up) موجودی مایع متحرک می گویند ← φ_{LD}

آن بخش از مایع که خارج نمی‌شود و در لابلای پرکن‌ها به تله می‌افتد Static Liquid Hold up گفته می‌شود $\longrightarrow \Phi_{LS}$

$$\Phi_{LT} = \Phi_{LD} + \Phi_{LS}$$

آیا استاتیکی یا دینامیکی بودن Hold up اهمیت دارد؟

* اگر در فرایند مورد نظر مقاومت بین دو فاز توزیع شده باشد (مثل جذب و دفع) در این شرایط مایعی که داخل سیستم ساکن است (Φ_{LS}) با گاز مجاور خود به تعادل می‌رسد (به علت زمان اقامت طولانی) و بنابراین آن بخش از سطح پرکن‌ها که با چنین مایعی مرطوب شده از چرخه انتقال جرم خارج می‌شود و عملا بخشی از سطح موثر انتقال جرم از بین می‌رود. لذا مناسب است در چنین فرایندهایی سهم Hold up استاتیکی به حداقل برسد (با کار کردن در ناحیه loading و استفاده از چیدمان منظم پرکن)

* اگر در فرایند مورد نظر مقاومتی در فاز مایع وجود نداشته باشد (مثل تبخیر یا میعان یک مایع خالص، یا جذب بخار از درون هوا) در این شرایط استاتیکی یا دینامیکی بودن Hold up اهمیتی ندارد. بنابراین می‌توان پایین ناحیه loading هم کار کرد و از چیدمان تصادفی پرکن هم استفاده کرد.

مقایسه برج‌های پرشده و سینی‌دار:

1) قطر: $\longrightarrow$ قطر زیاد: سینی‌دار — مسأله اصلی دشواری توزیع مایع در برج‌های پرشده با قطر بزرگ است.
قطر کم: پرشده

2) $\frac{L}{G}$ $\longrightarrow$ $\frac{L}{G}$ زیاد: پرشده — D وابسته به G است.
$\frac{L}{G}$ کم: سینی‌دار

3) ΔP $\longrightarrow$ ΔP زیاد: سینی‌دار — سوال ۱۱۵ سال ۸۶: نفت طلای: برج پرشده
ΔP کم: پرشده — نکته: سینی‌دار با سینی نوع Leva (سینی بدون weir) هم افت فشار کم است

4) محلول‌های کف‌زا $\longrightarrow$ پرشده مناسب‌تر از سینی‌دار است.
Foaming

5) گرفتن جریان جانبی $\longrightarrow$ سینی‌دار مناسب‌تر از پرشده است.

۶) گرفتگی و دادن گرما : سینی دار بهتر از پرشده است . برج دیواره مرطوب از هر دو بهتر است .

۷) نوسانات شدید حرارتی : سینی دار یا پرشده با پرکن فلزی (پرکن های سرامیکی ، پلاستیکی و شیشه ای مقاومت اندکی در مقابل نوسانات حرارتی دارند)

۸) مواد خورنده : پرشده بهتر از سینی دار است . (آزادی عمل در انتخاب جنس پرکن بیشتر از جنس سینی است)

۹) وجود جامد معلق در مایع : هیچکدام مناسب نیستند . مخازن مولد حباب یا همزن دار توصیه می شود .

۱۰) موجودی مایع در برج : موجودی مایع در برج سینی دار بیش از برج پرشده است . Hold up gas = 5-15% در سینی دار

۱۱) تمیز کردن برج : در سینی دار آسان تر از پرشده است .

۱۲) هزینه : اگر پرکن خاص نباشد (به لحاظ شکل و جنس) هزینه های پرشده از سینی دار عموماً کمتر است
اگر پرکن ها فلزی باشند foundation ضعیف تری برای برج پرشده لازم است .

سوال ۱۰۱ سال ۸۷ : آیتم ۱۰

در برج پرشده : مایع فاز پراکنده و گاز پیوسته است . پیوسته و دیفرانسیلی

در برج سینی دار : " پیوسته و " پراکنده " ناپیوسته و مرحله ای

سوال ۹۸ سال ۸۸ : آیتم های 2 ، 4 و 5 و 10

سوال ۱۰۲ سال ۸۹ :

در کدام حالت افت فشار کمتر است ؟

۱) پرشده منظم ✓

۲) پرشده نامنظم

۳) سینی دار مشبک (Sieve Tray)

۴) سینی دار کلاهکی (Buble cap)

در صورت سینی ها به سبب غلظت ها و مقادیر جداسازی مربوط می شود .

سوال ۱۰۵ سال ۸۹ :

چگونه می توان از عملکرد هیدرودینامیکی برج تقطیر اطمینان حاصل کرد ؟

یکی از نظر سیالاتی : با بررسی ΔP می توان به چنین اطمینانی رسید .

خلاصه :

راندمان مورفری بر اساس فاز مایع : $E_{MR} = \dfrac{x_1 - x_2}{x_1 - x_2^*}$

راندمان مورفری بر اساس فاز گاز : $E_{ME} = \dfrac{y_2 - y_1}{y_2^* - y_1}$

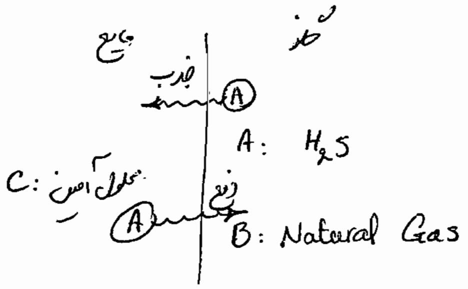
$$E_{ME} = \frac{E_{MR}}{E_{MR}(1-S) + S} \qquad S = \frac{1}{A} \quad , \quad A = \frac{R_S/E_S}{m}$$

و

$$E_{MR} = \frac{S\,E_{ME}}{1 - E_{ME}(1-S)}$$

جلسه نهم

۱- جذب و دفع : Absorption / stripping

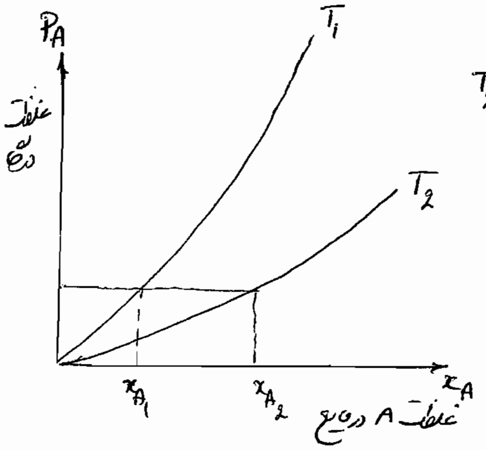


اثر دما و فشار بر جذب و دفع :

دردمای کم و فشار زیاد جذب مناسب است

و برای دفع دمای زیاد و فشار کم مناسب است .

جذب مناسب $\left\{ \begin{array}{l} T \text{ کم} \\ P \text{ زیاد} \end{array} \right.$

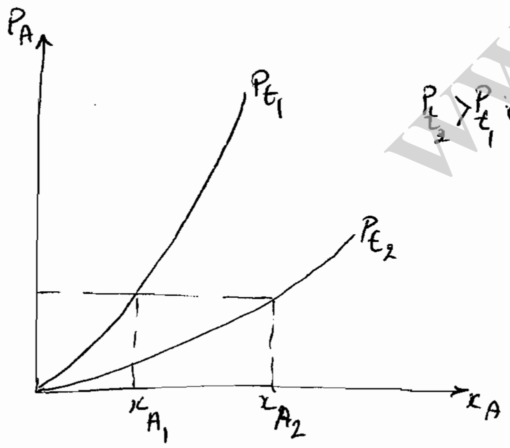


$T_2 < T_1$

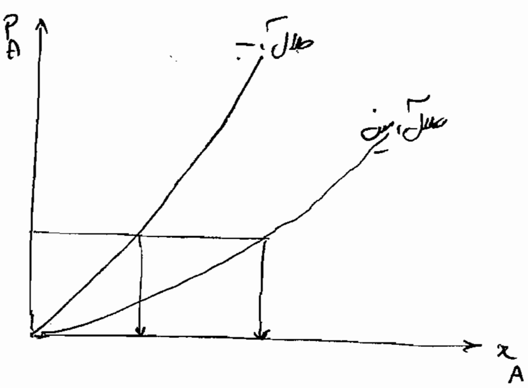
منحنی های جذب :

$T\downarrow \Rightarrow m\downarrow$

شیب کم یعنی جذب بالا



$P_{t_2} > P_{t_1}$ درفشار بالا جذب زیادتر می‌شود



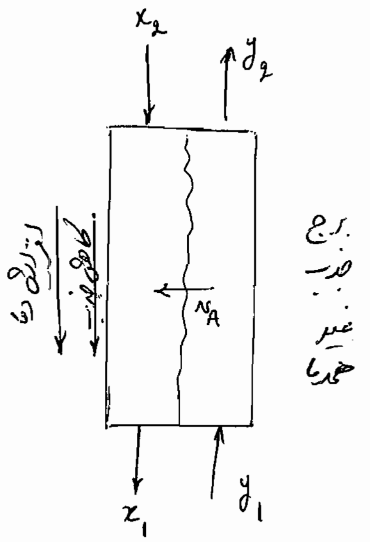
با توجه به شکل آمین در مقایسه با آب حلال مناسب‌تری است برای جذب H_2S

برای جذب بهترین حالت وقتی است که شیب منحنی کمتر باشد .

$y_A = m x_A \longrightarrow x_A = \frac{y_A}{m} \rightarrow$ m کوچکتر $\rightarrow$ x_A بزرگتر $\rightarrow$ جذب بالاتر

جذب فرآیندی گرمازاست.

دفع فرآیندی گرماگیر است.



$y_2 < y_1$

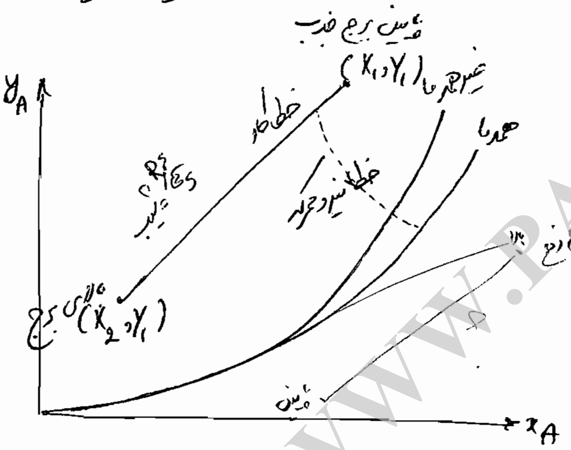
$x_1 > x_2$

بررسی برج های جذب و دفع غیر همدما :

در جذب حلال عمدتاً خالص است ($x_2 = 0$)

از بالا وقتی به سمت پایین برج جذب حرکت می‌کنیم دما افزایش می‌یابد.

از بالا به پایین برج جذب غیر همدما به علت افزایش دما میزان جذب کاهش پیدا می‌کند چون با افزایش دما شیب منحنی تعادل زیاد می‌شود خطوط تعادل و تبادل به هم نزدیک می‌شوند ولذا نیروی محرکه در پایین برج کاهش می‌یابد. کاهش نیروی محرکه باعث می‌شود عده مراحل مورد نیاز افزایش یابد و لذا ارتفاع برج هم زیاد می‌شود.



تعداد مراحل ⟹ $N_{non-Isothermal} > N_{Isothermal}$

$H_{non-Isothermal} > H_{Isothermal}$

نتیجه برج جذب نیاز به خنک کاری دارد.

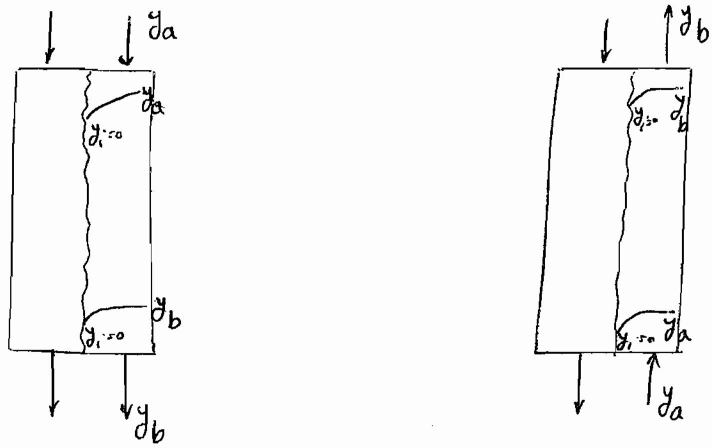
در برج دفع در بالای برج خطوط تبادل و تعادل به هم نزدیک می‌شوند ولذا نیروی محرکه در بالای برج کاهش می‌یابد. بنابراین عده مراحل مورد نیاز و ارتفاع برج افزایش می‌یابد.

طراحی	$N_{Iso\ term} < N_{non\ Iso\ term}$ $H_{Iso\ term} < H_{Non\ Isoterm}$
در حال کار	در N و H یکسان درصد جداسازی حالت غیر همدما کمتر از حالت همدما است.

همسو یا ناهمسو ؟

حالت ناهمسو از جهت دارد نسبت به حالت همسو به جز چند استثنا :

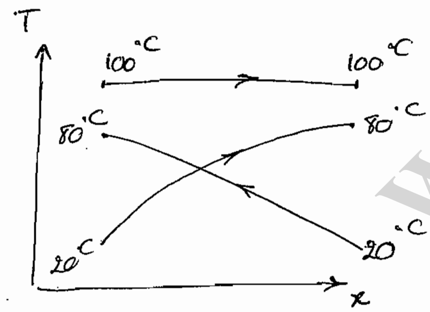
* برج جذب توأم با واکنش سریع :



$$(\Delta y)_{av, co} = \Delta y_{av, counter}$$

متوسط نیروی محرکه در حالت ناهمسو = متوسط نیروی محرکه در حالت همسو

$$\frac{(y_a-0)+(y_b-0)}{2} = \frac{(y_b-0)+(y_a-0)}{2}$$



در انتقال حرارت : در مبدل های حرارتی :

مزیت ناهمسو به همسو متوسط نیروی محرکه بالاتر بود ولی در برج جذب توأم با واکنش سریع نیروی محرکه همسو و ناهمسو برابر است پس در این مسأله تا اینجا جریان همسو و ناهمسو نسبت به هم ارجحیت ندارند .

غیر از مسأله نیروی محرکه آیا جریان ناهمسو مزیتی نسبت به جریان همسو دارد ؟

مزایای همسو نسبت به ناهمسو :

۱) ΔP کمتر است چون وقتی جریان ها همسو هستند در برابر حرکت هم مقاومت نمی کنند :

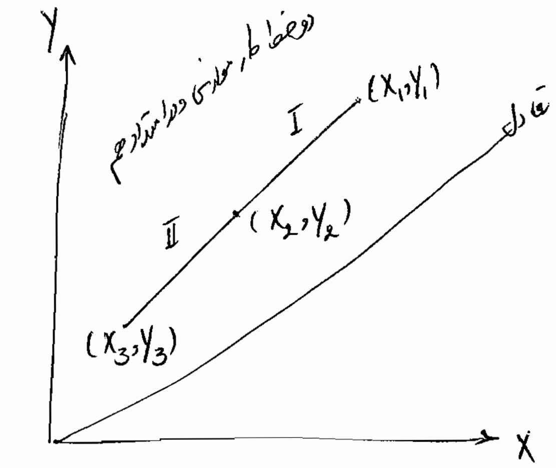
$$power = Q \cdot \Delta P$$

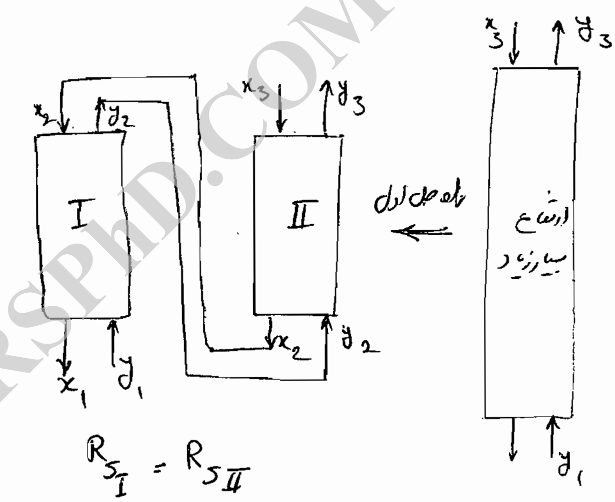
در نتیجه ΔP کمتر ← هزینه کمتر .

۲) در حالت همسو پدیده طغیان بی معنی است.
لذا می‌توان از سرعت های بالاتری گاز استفاده کرد که این مسأله باعث کاهش قطر مورد نیاز برج می‌شود. (Q=UA)
۳) مشکلات کمتر پدیده‌هایی مثل foaming و ماندگی مایع در گاز.

تبصره: در جذب توأم با واکنش چون جریان ناهمسو به لحاظ نیروی محرکه مزیتی نسبت به جریان همسو ندارد با توجه به مزایای موارد، برای جریان همسو استفاده از این الگوی جریان توصیه می‌شود.

* برج های با ارتفاع بلند:

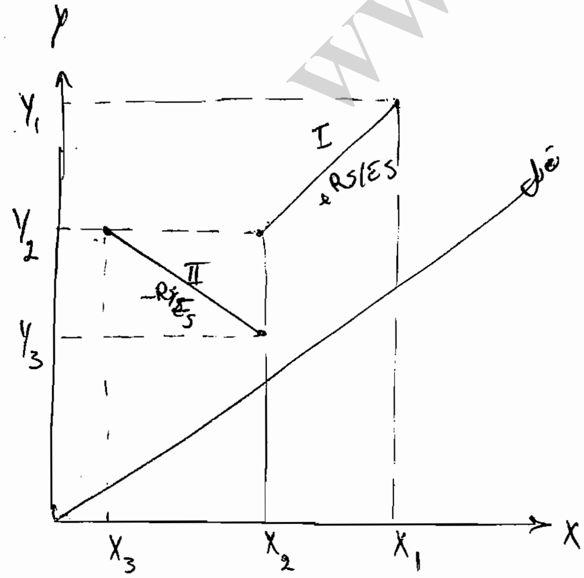


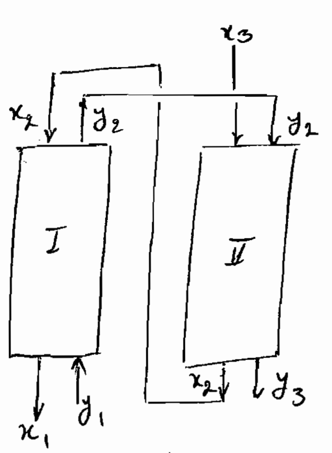


$R_{S_I} = R_{S_{II}}$

$E_{S_I} = E_{S_{II}}$

$(\text{شیب خط کار})_I = (\text{شیب خط کار})_{II}$



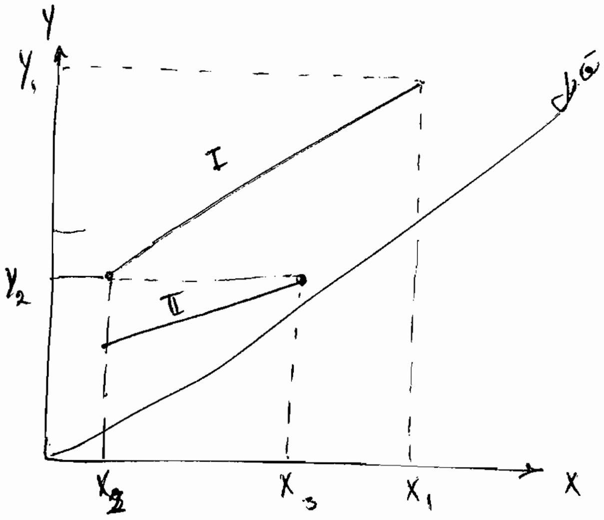


راه حل دوم

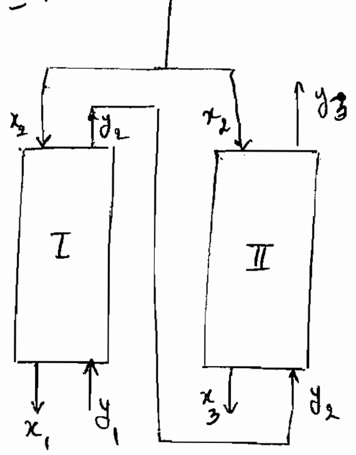
$R_{S_I} = R_{S_{II}}$, $E_{S_I} = E_{S_{II}}$ → $\begin{cases} (\text{شیب})_I = +\frac{R}{E} \\ (\text{شیب})_{II} = -\frac{R}{E} \end{cases}$

در این حالت ممکن است به علت کاهش هزینه‌های لوله کشی فاز گاز (که خطوط با قطر بالایی هستند) ممکن است هزینه کل از حالت دو برج ناهمسو کمتر باشد.

وضعیت خطوط کار در برج زیر رسم کنید :



حلال همیشه تقریبا خالص است



$R_{S_I} \overset{?}{=} R_{S_{II}}$ بستگی به نسبت تقسیم جریان فاز مایع بین دو برج دارد.

$E_{S_I} = E_{S_{II}}$

شیب دو خط هر دو مثبت است، ممکن است برابر نباشند.

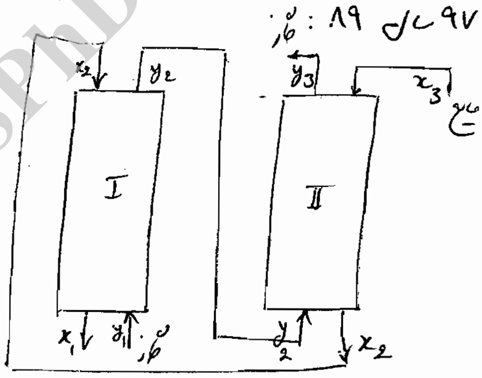
تست ۹۷ سال ۸۹ :

$R_{S_I} = R_{S_{II}}$

$E_{S_I} = E_{S_{II}}$

یک نقطه مشترک

$\rightarrow$ دو خط در امتداد هم

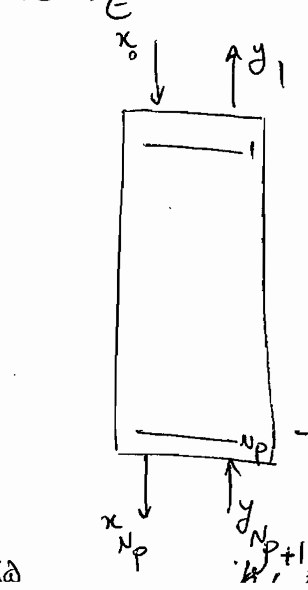


طراحی برج های جذب و دفع :

I) طراحی برج های مرحله‌ای (مثل سینی‌دار)

II) طراحی برج های دیفرانسیلی (مثل پر شده)

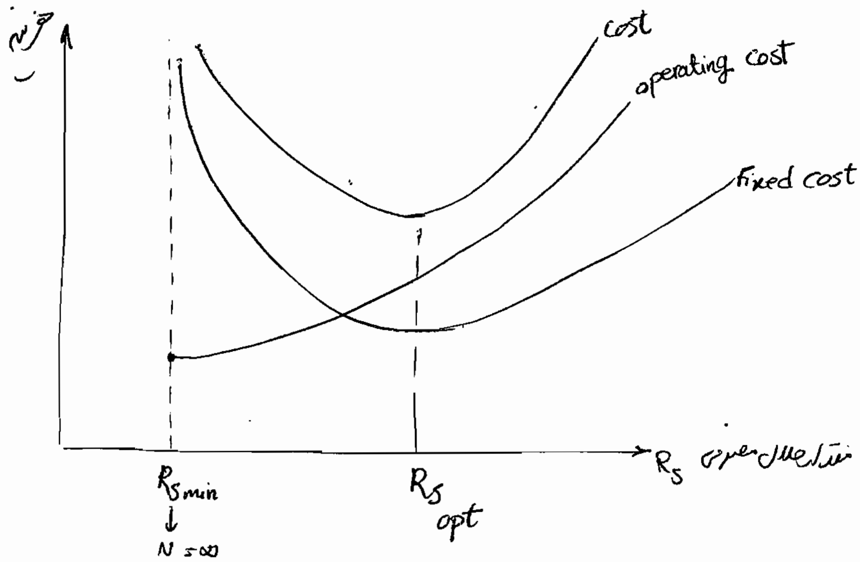
طراحی برج های مرحله‌ای :



برج جذب

معلومات	مجهولات
Y_{N_p+1} غلظت گاز ورودی	$R_{S_{optimum}}$ بهینه حلال مصرفی
Y_1 غلظت گاز خروجی	D_T : قطر برج
درصد جداسازی	N : تعداد سینی‌ها
X_0 غلظت حلال	H : ارتفاع برج
$E_S \leq E_{N_p+1}$ مشخصات خوراک	
$y=mx$ داده‌های تعادلی	

محاسبه مقدار بهینه حلال :



$R_s \uparrow \Rightarrow N \downarrow \Rightarrow H \downarrow \Rightarrow$ Fixed cost $\downarrow$

$\Rightarrow D_T \uparrow \Rightarrow$ Fixed cost $\uparrow$

چون با افزایش R_s تعداد سینی‌ها و ارتفاع کم می‌شود ولی قطر برج زیاد می‌شود پس در منحنی Fixed cost هم نقطه بهینه وجود دارد.

Total cost = operating cost + Fixed cost

نحوه محاسبه $R_{s_{opt}}$:

۱) $\dfrac{\partial \text{ Total cost}}{\partial R_s} = 0 \longrightarrow R_{s_{opt}} = \checkmark$

دقت کن ← ۲) روش تجربی : اگر $1.25 < A < 2$ باشد (فاکتور جذب) $\Rightarrow \dfrac{R_s/E_s}{m} = 1.25 \to 2 \Rightarrow R_{s_{opt}} = \checkmark$

۳) روش تجربی : $R_{s_{opt}} \simeq 1.4 R_{s_{min}}$

محاسبه D_T :

$R_s = \checkmark,\ E_s = \checkmark \rightarrow L = \checkmark,\ G = \checkmark \Rightarrow$ محاسبه قطر از روابط فصل ۶ ترایبال

$$v_f = C_f \left(\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G} \right)^{0.5}$$

$C_f = \dots\dots$

محاسبه N_p :

$R_s = \checkmark,\ E_s = \checkmark \rightarrow \dfrac{R_s}{E_s} = \checkmark$ ، شیب تعادل $m = \checkmark$ $\longrightarrow$ معادله کرمسر $\rightarrow N_p = f$ [غلظت حلال ورودی، غلظت گاز خروجی و غلظت گاز ورودی (مشخصات عملیاتی)، A یا $\dfrac{R_s}{E_s}$ و m]

N_p تئوری $= \checkmark$ ← روش رسم منحنی یا معادله

N_p واقعی $= \dfrac{N_p \text{ تئوری}}{\eta \text{ راندمان}}$ و

$\eta = \checkmark$ بتجربی ← کاتالوگ سینی

$\eta = 1 - e^{-\frac{a k_y \cdot h_L}{G'}}$

$\Rightarrow N_p$ واقعی $= \checkmark$

در محاسبه عده مراحل تئوری نیاز به داشتن ضرایب انتقال جرم نداریم چون مراحل را تعادلی فرض می‌کنیم.

↑ (تست ۱۰۶ سال ۸۵)

ولی عده مراحل واقعی نیازمند داشتن ضرایب انتقال جرم هست چون راندمان وابسته به ضرایب انتقال جرم است.

محاسبه H_T:

$$H_T \approx \underset{\text{واقعی}}{N_p} \times \underset{\text{فاصله سینی‌ها}}{t}$$

مجهولات	معلومات
E_{Sopt}	X_0 مایع ورودی
N_p	X_p مایع خروجی یا درصد جداسازی
D_T	Y_{N_p+1} حلال
H_T	R_S یا R_0
	m

برج دفع مرحله‌ای:

مراحل محاسبات شبیه جذب می‌باشد به خود:

$$S = 0.5 \sim 0.8$$

$$\Downarrow$$

$$E_{S_{opt}} = \checkmark$$

$$S = \frac{m}{R_S/E_S}$$

$$N_p = f(X_0, Y_0, Y_{N_p+1}, m, S)$$

تست ۶ سال ۷۴:

معلومات مسأله:

جذب ناهمسو - حلال خالص $(X_0=0)$ - غلظت جذب‌شونده در گاز ورودی (Y_{N_p+1}) - غلظت در گاز خروجی (Y_1)

تعداد سینی‌ها (N_p).

در اینصورت می‌توان نسبت حلال خالص ورودی به گاز خالص ورودی $\left(\frac{R_S}{E_S}\right)$ و ... را بدست آورد.

۱) حداقل شدت حلال خالص مصرفی $(R_{S_{min}})$

۲) فقط این نسبت

۳) غلظت جذب‌شونده از مایع خروجی از برج

۴) میزان جذب شونده

گفته تعداد سینی‌ها را داریم و معادله کرمسر می‌گوید برای دانستن تعداد سینی‌ها به پارامترهای زیر نیاز داریم:

$$N = f\left(Y_{Np+1},\ \underset{\text{درصد جداسازی}}{Y_1},\ X_0,\ m,\ \underset{A}{\frac{R_s}{E_s}}\right)$$

حال در رابطه فوق تمام ترم‌ها معلومند جز $\frac{R_s}{E_s}$ پس $\frac{R_s}{E_s}$ قابل محاسبه است که خود مسئله گفته.

بررسی گزینه (۱):

$$\frac{Y_{Np+1}-Y_1}{X_{Np}-X_0} = \frac{R_s}{E_s} \rightsquigarrow \frac{Y_{Np+1}-Y_1}{X_{Np}-X_0} = \left.\frac{R_s}{E_s}\right|_{min}$$

در تعادل با Y_{Np+1}

$$X_{Np_{\text{تعادلی}}} = \frac{Y_{Np+1}}{m} \Rightarrow X_{Np_{\text{تعادلی}}} \checkmark \Rightarrow \left.\frac{R_s}{E_s}\right|_{min} \checkmark \Rightarrow$$

حداقل حلال خالص ورودی به ازاء هر مول گاز خالص ورودی قابل محاسبه است. اما:

$$R_{S_{min}} = \left.\frac{R_s}{E_s}\right|_{min} \times E_s \xrightarrow{E_s \text{ معلوم نیست}}$$

نمی‌توان حداقل حلال ورودی ($R_{S_{min}}$) را محاسبه کرد.

$$\frac{R_s}{E_s} = \frac{Y_{Np+1}-Y_1}{X_{Np}-X_0} \Rightarrow X_{Np} = \checkmark$$

غلظت جذب شونده در مایع خروجی از آخرین برج

بررسی گزینه ۲

$$\text{درصد جداسازی} = \frac{Y_{Np+1}-Y_1}{Y_1} \times 100 \Rightarrow$$

درصد جداسازی ✓

بررسی گزینه ۴

$$\text{میزان جذب شونده در مایع خروجی} = R_{Np}\cdot x_{Np} = R_s \cdot X_{Np}$$

چون E_s معلوم نیست R_s را نمی‌توان محاسبه کرد پس میزان جذب شونده در مایع خروجی قابل محاسبه نیست.

پس با این اطلاعات می‌توان پارامترهای زیر را محاسبه نمود:

الف) R/E_s (نسبت حلال خالص به گاز خالص ورودی)

ب) X_{Np} (غلظت جذب شونده در مایع خروجی)

ج) $\left.\frac{R_s}{E_s}\right|_{min}$ (حداقل حلال خالص به ازاء هر مول گاز خالص ورودی)

طراحی برج های دیفرانسیلی :

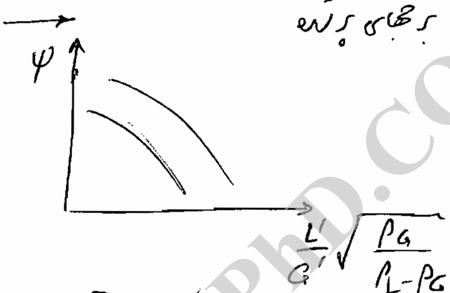
برج جذب

معلومات	مجهولات
$Y_{N_{p+1}}$	$R_{s_{opt}}$ مقدار بهینه حلال مصرفی
درصد جذب یا Y_1	D_T قطر برج
غلظت حلال X_0	H_T ارتفاع برج دیفرانسیلی یا Z
m	
شدت جریان خوراک $E_{N_{p+1}}$ یا E_S	

$$R_{s_{opt}} = \checkmark \leftarrow 1.25 < A < 2$$

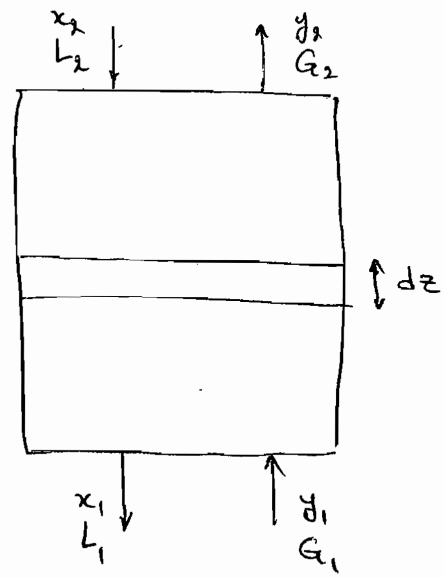
$$\left.\begin{aligned} R_s = \checkmark &\rightarrow L = \checkmark \\ E_s = \checkmark &\rightarrow G = \checkmark \end{aligned}\right\} \rightarrow$$

روابط فصل ۶ برای برجهای پرشده



$$\Rightarrow D_T = \checkmark$$

محاسبه ارتفاع برج های دیفرانسیلی :



$$N_A = -\frac{dn_A}{A_{mass} \cdot dt}$$

$$G : \frac{mol}{sec}$$

$$G \cdot y : \frac{mol\ A}{sec}$$

$d(G \cdot y) = \left(\frac{dn_A}{dt}\right)$ تغییرات مولهای A در واحد زمان

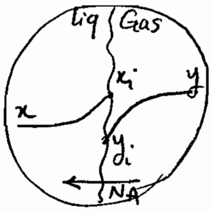
$$\underset{\text{سطح انتقال جرم}}{A_{mass}} = \underset{\substack{\downarrow \\ m^2/m^3}}{a} \cdot \underbrace{A\,dz}_{\text{حجم المان}}$$

سطح انتقال جرم به ازای واحد حجم

$$\left.\begin{aligned} &\Rightarrow N_A = -\frac{d(G \cdot y)}{A \cdot a \cdot dz} \\ &\text{شدت جریان ظاهری} = \frac{G}{A} = G' \end{aligned}\right\} \rightarrow N_A = -\frac{d(G'y)}{a\,dz}$$

معادله شماره ۱

نمایی از فصل مشترک گاز - مایع در ایران



جذب : $\dfrac{N_A}{\sum N_i} = 1$ (در جذب یک جزء مبادله می شود)

شدت انتقال جرم زیاد $N_A = F_G \cdot Ln \dfrac{1-y_i}{1-y}$ ② معادله

شدت انتقال جرم کم $N_A = k_y (y - y_i)$

$G'(1-y) = G'_S =$ ثابت

$$d(G'y) = d\left(\frac{G'_S}{1-y} \cdot y\right) = G'_S \cdot d\left(\frac{y}{1-y}\right) = G'_S \cdot \frac{dy}{(1-y)^2} = \frac{G'dy}{1-y}$$

در معادله ① : $N_A = \dfrac{G'\,dy}{(1-y)\,a\,dZ}$ ③ معادله

از معادلات ② و ③ $\longrightarrow$ $dZ = -\dfrac{G'}{F_G \cdot a} \cdot \dfrac{dy}{(1-y)\ Ln\left(\frac{1-y_i}{1-y}\right)}$

$$\Rightarrow \int_0^Z dZ = \int_{y_1}^{y_2} \frac{-G'}{F_G \cdot a} \cdot \frac{dy}{(1-y)\ Ln\left(\frac{1-y_i}{1-y}\right)} = Z$$

$\dfrac{G'}{F_G \cdot a} = H_{tG}$ (یا HETP) = ارتفاع معادل یک مرحله تئوری = ارتفاع از برج پرشده که کار یک مرحله تئوری را انجام می دهد.

معادل ارتفاع تئوری

سینی

تعداد واحدهای انتقال $N_{tG} = -\displaystyle\int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{1-y\ Ln\left(\frac{1-y_i}{1-y}\right)}$

$$\Rightarrow Z = H_{tG} \cdot N_{tG}$$

تأثیر ضرایب انتقال جرم :

در برج های سینی دار در راندمان برج ظاهر می شود.

در برج های پرشده در ارتفاع معادل یک مرحله تئوری ظاهر می شود.

$$y_{BM} = (1-y)_{iM} = \frac{(1-y_i)-(1-y)}{\ln \frac{1-y_i}{1-y}}$$

$$\Rightarrow \ln \frac{1-y_i}{1-y} = \frac{y-y_i}{(1-y)_{iM}} \qquad \Rightarrow N_{tG} = -\int_{y_1}^{y_2} \frac{(1-y)_{iM}}{(1-y)(y-y_i)}\,dy$$

تقریب : $\quad (1-y)_{iM} \approx \dfrac{(1-y)+(1-y_i)}{2}$

$$N_{tG} = -\frac{1}{2}\int_{y_1}^{y_2} \frac{\overbrace{(1-y)+(1-y)}^{2(1-y)}\overbrace{-(1-y)+(1-y_i)}^{(y-y_i)}}{(1-y)(y-y_i)}\,dy$$

$$N_{tG} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{y-y_i} - \frac{1}{2}\int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{1-y}$$

$$N_{tG} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y-y_i} + \frac{1}{2} \ln \frac{1-y_2}{1-y_1}$$

در محلول‌های رقیق (A اقل)

$$\left.\begin{array}{l} 1-y_2 \approx 1 \\ 1-y_1 \approx 1 \end{array}\right\} \Rightarrow \ln 1 = 0 \qquad \Rightarrow N_{tG} \cong \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y-y_i}$$

$y - y_i =$ نیروی محرکه $\cong$ تقریباً مقدار ثابت

$$\Rightarrow N_{tG} \approx \frac{y_1 - y_2}{(y-y_i)_{av}}$$

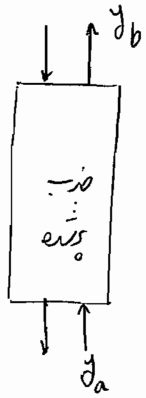
چون نیرو محرکه در طول برج می‌تواند کمی تغییر کند نیرو محرکه average را در رابطه قرار می‌دهیم.

$$N_{tG} = \frac{\text{تغییرات غلظت کلی}}{\text{نیرو محرکه}} = \frac{\text{تغییرات ارتفاع کلی}}{\text{متوسط ارتفاع یک پله}}$$

رابطه ساده N_{tG} :

$$N_{tG} = \frac{y_1 - y_2}{(y-y_i)_M} \qquad (y-y_i)_M \simeq \frac{(y-y_i)_1 + (y-y_i)_2}{2} \simeq \frac{(y-y_i)_1 - (y-y_i)_2}{\ln \frac{(y-y_i)_1}{(y-y_i)_2}}$$

مثال : برج جذب دیفرانسیلی توام با واکنش سریع : (محلول رقیق)



$$N_{tG} = ?$$

$$N_{tG} = \frac{y_a - y_b}{\dfrac{(y_a - 0) - (y_b - 0)}{\ln \dfrac{y_a - 0}{y_b - 0}}} \Rightarrow N_{tG} = \ln \frac{y_a}{y_b}$$

$$\cancel{\Rightarrow N_{tG} =}$$

F_G :

$$Z = H_{tG} \cdot N_{tG}$$

$$H_{tG} = \frac{G'}{F_G \cdot a}$$

$$N_{tG} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{(1-y)_{iM}\, dy}{(1-y)(y-y_i)} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y-y_i} + \frac{1}{2} \ln \frac{1-y_2}{1-y_1}$$

F_{oG} :

$$Z = H_{toG} \cdot N_{toG}$$

$$H_{toG} = \frac{G'}{F_{oG} \cdot a}$$

$$N_{toG} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{(1-y)_{*M}}{(1-y)(y-y^*)} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y-y^*} + \frac{1}{2} \ln \frac{1-y_2}{1-y_1}$$

F_L :

$$Z = H_{tL} \cdot N_{tL}$$

$$H_{tL} = \frac{L'}{F_L \cdot a}$$

$$N_{tL} = -\int_{x_1}^{x_2} \frac{(1-x)_{iM}\, dx}{(1-x)(x_i - x)} = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x_i - x} + \frac{1}{2} \ln \frac{1-x_1}{1-x_2}$$

$$F_G \cdot a = \text{ضریب حجمی انتقال جرم} \quad \left(\frac{mol}{m^3 . sec}\right)$$

F_G: $\frac{mol}{m^2 . sec}$ ، a: $\frac{m^2}{m^3}$

ارتفاع معادل یک واحد تئوری :

$$HETP = H_{tG} = \frac{G'}{F_G . a}$$

$$= H_{tL} = \frac{L'}{F_L . a}$$

$$= H_{toG} = \frac{G'}{F_{oG} . a}$$

$$= H_{toL} = \frac{L'}{F_{oL} . a}$$

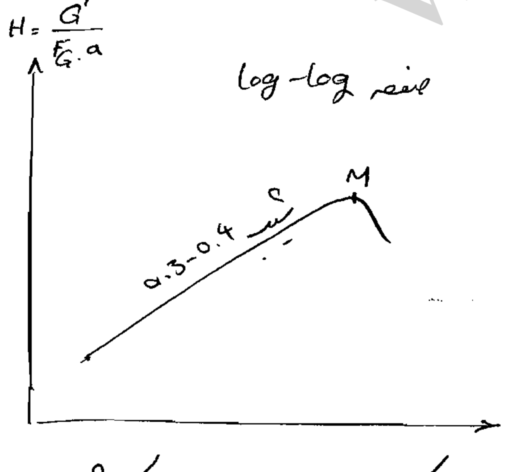
هرچه سطح ویژه پرکن بیشتر باشد HETP آن کوچکتر است و برعکس .

هرچه HETP کمتر باشد بهتر است چون ارتفاع برج کمتر خواهد شد .

بالاترین HETP بین انواع پرکن ها مربوط به حلقه راشیگ می شود که کمترین سطح ویژه را در بین همه پرکن ها دارد .

با وجود تغییر جزئی HETP در طول برج در محاسبه ارتفاع برج مقدار آن را تقریبا ثابت می گیرند .

$$\left.\begin{array}{l} F_G \sim Re^{0.6 \sim 0.7} \\ Re \sim G' \; (= \rho u) \\ F_G \sim G'^{\,0.6 \sim 0.7} \end{array}\right\} \xrightarrow{H_{tG} = \frac{G'}{F_G . a}} H_{tG} \sim G'^{\,0.3 - 0.4}$$



با ازدیاد G' ارتفاع معادل یک واحد تئوری ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می کند .

در نقطه M ناحیه loading شروع می شود در نتیجه به علت به جریان افتادن مایع های ساکن برج سطح موثر انتقال جرم افزایش چشمگیری پیدا می کند و بنابراین H_{tG} کاهش می یابد (Hold up static)

مثال: اگر دبی گاز و مایع هم زمان دو برابر شوند (در یک برج با حشوه پر شده)

الف - اگر این برج در مرحله طراحی باشد قطر و ارتفاع آن چه تغییری می کند ؟

ب - اگر برج در حال کار باشد این تغییر چه تاثیری بر پارامترهای عملیاتی برج دارد ؟

حل الف)

$$\begin{matrix} L_2 = 2L_1 \\ G_2 = 2G_1 \end{matrix} \longrightarrow \frac{L}{G} \text{ ثابت} \longrightarrow \psi_{flooding} \text{ ثابت} \longrightarrow G'^2 c_f \text{ ثابت}$$

ثابت است چون c_f پکن را تغییر نداده ایم $\Rightarrow G'$ ثابت $\xrightarrow[\substack{G_2 = 2G_1 \\ G' \text{ ثابت}}]{G' = \frac{G}{A}}$ A : دو برابر می شود $\longrightarrow$ قطر $\sqrt{2}$ برابر می شود

$$Z = H_{tG} \cdot N_{tG}$$

$$\left.\begin{matrix} H_{tG} = \dfrac{G'}{F_G \cdot a} \\ a = \dfrac{6(1-\epsilon)}{d_p} = \text{ثابت} \quad \text{تابع اندازه پکن ها } a \\ G' \text{ ثابت} \end{matrix}\right\} \rightarrow H_{tG} \text{ ثابت}$$

$\Rightarrow Z$ ثابت

$N_{tG} = f($ غلظت ها، شیب خط کار و شیب منحنی تعادل $) \rightarrow N_{tG}$ ثابت

غلظت ها: ثابت زیرا میزان جداسازی معین است.

شیب منحنی تعادل: m ثابت

شیب خط کار: $\frac{L}{G}$ ثابت

حل ب) برج در حال کار $\longrightarrow$ ثابت Z و ثابت D_T

$$\begin{matrix} L_2 = 2L_1 \\ G_2 = 2G_1 \end{matrix} \longrightarrow$$ ثابت = پارامتر چون $\frac{L}{G}$ — ψ چهار برابر $\longleftarrow \psi \propto G'^2 c_f$

$$\left.\begin{matrix} G' = \frac{G}{A} \\ A \text{ ثابت} \\ G \text{ دو برابر} \end{matrix}\right\} G' \text{ دو برابر}$$

ΔP زیاد می شود

$$\left.\begin{matrix} \dfrac{\Delta P}{Z} = C_D \dfrac{G'^2}{\rho_G} \\ G' \quad \text{2 برابر} \end{matrix}\right\} \longrightarrow$$ ΔP چهار برابر می شود

$$H_{tG} = \frac{G'}{F_G \cdot a} \sim G'^{\,0.3\to0.4}$$

$H_{tG} \sim (\text{۲ برابر})^{0.3-0.4} \longrightarrow H_{tG}$ زیاد می‌شود

عدد واحدهای انتقال در دسترس $N_{tG} = \dfrac{Z}{H_{tG}}$ $\longrightarrow$ N_{tG} در دسترس کم می‌شود $\longrightarrow$ درصد جداسازی کاهش می‌یابد.

$Z =$ ثابت

$H_{tG} \uparrow$

N_{tG} برای رسیدن به همان جداسازی قبلی $=$ ثابت

چون

$$N_{tG} = f(\underbrace{\text{سه غلظت},\ m,\ \tfrac{L}{G}}_{\text{همگی ثابت}})$$

تست ۱۰۲ سال ۸۷ :

برج پرشده - HETP=0.25m - اگر برج سینی داری که 50 سینی با راندمان 20 درصد دارد را با برج پرشده‌ای با پرکن‌های فوق جایگزین کنیم ارتفاع پرکن‌ها را محاسبه کنید: $E_o = 0.2$

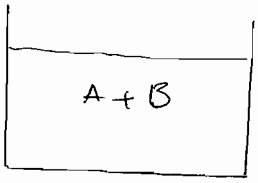
$N_{\text{تئوری}} = 50 \times 0.2 = 10$ تعداد مراحل تئوری

لذا در برج پرشده جایگزین باید 10 مرحله تئوری ایجاد شود. ارتفاع هر مرحله تئوری 0.25 m است.

$Z = 10 \times 0.25 = 2.5\ m$

جلسه دهم

تقطیر   Distillation



محلول چندجزئی ⟵ (اجزای دارای اختلاف نقطه جوش یا اختلاف فراریت دارند)

اگر به محلول چند جزئی گرما دهیم بخشی از A و B به بخار تبدیل می شوند و اگر گرما بگیریم بخشی از بخار تبدیل به مایع می شود.

به دلیل اختلاف فراریت نسبت A و B در فازهای مایع و بخار متفاوت است.

همین مسأله اختلاف فراریت می تواند اساس جداسازی باشد.

در تقطیر، تعادل بخار - مایع داریم.

تعادل بخار - مایع : Vapor_Liquid Equilibria (VLE)

اولین چیزی که در بحث تعادل ها باید مشخص باشد درجه آزادی است :

$$\underset{\text{درجه آزادی}}{f} = 2 + \underset{\text{عده اجزاء}}{N} - \underset{\text{عده فازها}}{\pi} - \underset{\text{عده واکنش های مستقل}}{r} - \underset{\text{عده محدودیت ها}}{S}$$

تعادل بخار - مایع (ماده خالص) : $f = 2 + 1 - 2 - 0 - 0 = 1$ ⟵ استخراج اطلاعات از جدول بخار اشباع نیاز به دانستن یک مشخصه سیستم است.

نقطه سه گانه : $f = 2 + 1 - 3 - 0 - 0 = 0$ ⟵ نقطه سه گانه برای هر ماده یک نقطه منحصر به فرد است.

تعادل بخار - مایع در سیستم دوجزئی (Binary) : $f = 2 + 2 - 2 - 0 - 0 = 2$ ⟵ در سیستم دوجزئی برای مشخص کردن شرایط سیستم به دانستن دو خاصیت مثل دما و فشار نیاز است.

تعادل بخار - مایع دوجزئی در فشار ثابت (تقطیر) : $f = 2 + 2 - 2 - 0 - \underset{\substack{\text{محدودیت} \\ P_t = cte}}{1} = 1$