

انتقال جرم



مدرس‌ان شریف

فصل اول

«عملیات انتقال جرم»

درسنامه: روش‌های انتقال جرم



مقدمه

عملیات انتقال جرم به وسیله انتقال یک ماده به داخل ماده دیگر در مقیاس مولکولی مشخص می‌شود. مثلاً، وقتی آب از درون یک استخر به درون جریان هوایی که بر روی سطح آن در حرکت است، تبخیر گردد، مولکول‌های آب از میان مولکول‌های هوای روی سطح به درون توده هوا نفوذ کرده و از آنجا بیرون برده می‌شوند. این عمل جابه‌جا شدن مولکول‌ها، یک جابه‌جایی کلی نیست، مثلاً نمی‌توان آن را با تلمبه کردن یک مایع که در آن به دلیل اختلاف فشار موجود، تمام مایع منتقل می‌شود، مقایسه نمود. مثال دیگر از فرآیند انتقال جرم، پخش شدن جوهر در یک ظرف آب است. در دمای صفر مطلق به دلیل اینکه حرکت مولکول‌ها متوقف می‌گردد، انتقال جرم صورت نمی‌گیرد.

انتقال جرم می‌تواند موجب حرکت و تغییر مرکز جرم شود. برای مثال اگر جعبه‌ای را در نظر بگیریم که توسط صفحه‌ای به دو قسمت تقسیم شده است و در یک طرف آن گاز A و در طرف دیگر آن گاز B به نسبتی قرار گرفته‌اند که جعبه در حالت تراز است، اگر صفحه جداکننده برداشته شود، مولکول‌های دو طرف در هم نفوذ کرده و پس از مدتی جعبه از حالت تراز خارج می‌گردد. این امر نشان‌دهنده تغییر در مرکز جرم سیستم می‌باشد.

نکته ۱: با انتقال مولکول‌ها در یک سیستم، انرژی افزایش می‌یابد که این عامل باعث کاهش در انرژی سیستم می‌گردد ($\Delta G = \Delta H - T\Delta S$). نیروی محرکه انتقال جرم، اختلاف پتانسیل شیمیایی است. عوامل دیگر، مثل اختلاف غلظت، اختلاف دما، اختلاف فشار و اختلاف پتانسیل الکتریکی نیز می‌تواند نیروی محرکه انتقال جرم باشد، ولی در نهایت هر یک از عوامل موجب ایجاد اختلاف پتانسیل شیمیایی و در نتیجه انتقال جرم خواهد شد. به طور کلی در بسیاری از عملیات‌های مهندسی شیمی، هدف، جداسازی اجزای یک محلول یا مخلوط از یکدیگر و یا دستیابی به یک ماده خاص از ترکیب یا مخلوط دو یا چند جزء می‌باشد. آنچه به عنوان عملیات جداسازی مورد نظر است، می‌تواند شامل جدا کردن اجزای یک مخلوط با استفاده از یک سری عملیات مکانیکی از قبیل صاف کردن (Filtration) یک مخلوط معلق و جدا نمودن جزء جامد از مایع و یا جداسازی اجزای مختلف و خردشده یک مخلوط با اندازه‌های مختلف از طریق غربال نمودن و یا جداسازی ذرات جامد آسیاب‌شده با استفاده از اختلاف جرم ویژه (دانسیتته) آنها باشد. جداسازی می‌تواند جدا کردن اجزای یک محلول (یا مخلوط همگن) به مواد خاص تشکیل‌دهنده آن باشد. این عملیات می‌تواند همراه و یا بدون انجام واکنش شیمیایی صورت گیرد که همواره با تغییر در اجزای محلول اولیه و همراه با انتقال جرم است.

روش‌های مکانیکی

روش‌های مکانیکی در جداسازی، به ۴ دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

- ۱- صاف کردن (Filtration): اساس کار این روش، اختلاف فازهای تشکیل‌دهنده می‌باشد. بنابراین، این روش برای مخلوط‌های دو یا چندفازی، مانند جدا کردن جامد از مایع، استفاده می‌شود.
- ۲- غربال کردن (Screening): اساس کار این روش، اختلاف اندازه ذرات است. برای این جداسازی از انواع الک‌ها با مش‌های متفاوت استفاده می‌شود.
- ۳- Aspiration: اساس این روش، تفاوت در دانسیته اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط است. برای مثال در جدا کردن کاه از گندم یا جو، از دمیدن هوا، استفاده می‌شود.
- ۴- شناورسازی (Floatation): اساس این روش نیز، بر مبنای اختلاف دانسیته اجزاء است.



کج مثال ۱: کدام گزینه صحیح نمی‌باشد؟

(۱) شاخصه اصلی انتقال جرم، حرکت در مقیاس مولکولی است.

(۲) در دمای ثابت، انتقال جرم، باعث افزایش انرژی سیستم می‌گردد.

(۳) انتقال جرم، در هر دمایی امکان‌پذیر نیست.

(۴) عامل اصلی در فرآیند انتقال جرم بین دو نقطه، اختلاف پتانسیل شیمیایی بین آن دو نقطه است.

پاسخ: گزینه «۲» طبق رابطه $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ ، در دمای ثابت، به دلیل اینکه آنتالپی (ΔH) تغییر نمی‌کند تنها عاملی که موجب تغییر در انرژی سیستم (ΔG) می‌گردد، آنتروپی است. با توجه به اینکه پدیده انتقال جرم از طریق افزایش بی‌نظمی، موجب افزایش آنتروپی سیستم می‌گردد، پس این پدیده، انرژی آزاد گیبس سیستم را کاهش می‌دهد.

تقسیم‌بندی عملیات انتقال جرم

فرآیندهای انتقال جرم: فرآیندهایی که توسط آن‌ها، نیروی محرکه انتقال جرم، در یک محلول ایجاد می‌شود. در عملیات انتقال جرم هیچ‌یک از دو فاز در حال تعادل، حاوی تنها یک جزء نخواهد بود (البته یک مورد استثنا برای عملیات مرطوب‌سازی وجود خواهد داشت). همچنین وقتی دو فاز با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند، بلافاصله به تعادل نمی‌رسند (تابع زمان است). سیستم به مرور زمان در اثر نفوذ آهسته‌سازنده‌ها، از یک فاز به فاز دیگر، به تعادل نزدیک می‌شود، لذا جداسازی هرگز کامل نخواهد بود.

کج مثال ۲: کدام گزینه جزء ویژگی‌های فرآیند انتقال جرم محسوب نمی‌شود؟

(۱) در مقیاس میکروسکوپی انجام می‌شود.

(۲) سیستمی که در آن انتقال جرم رخ می‌دهد، پس از مدتی به تعادل می‌رسد.

(۳) پس از آنکه فازها به تعادل رسیدند، تنها شامل یک جزء هستند.

(۴) فرآیند انتقال جرم سریع نیست و تابع زمان می‌باشد.

پاسخ: گزینه «۳» فرآیند انتقال جرم در مقیاس مولکولی (میکروسکوپی) صورت می‌گیرد. وقتی دو فاز، در مجاورت هم قرار گیرند، انتقال جرم میان آنها صورت گرفته، تا به تعادل با یکدیگر برسند و هر فاز شامل اجزای نفوذکننده خواهد بود و خالص نمی‌باشد.

تقسیم‌بندی عملیات انتقال جرم براساس نحوه تماس و محلول یا نامحلول بودن فازها:

(الف) تماس مستقیم دو فاز نامحلول در یکدیگر (ب) تماس مستقیم دو فاز محلول در یکدیگر (ج) تماس غیرمستقیم دو فاز توسط غشاء

تماس مستقیم دو فاز نامحلول در یکدیگر

وجود سه فاز مختلف گاز، مایع و جامد، امکان مجاور شدن دو فاز را با یکدیگر، به شش صورت فراهم می‌کند.

۱- گاز-گاز: به جز در موارد بسیار استثنائی، تمام گازها به طور کامل با یکدیگر مخلوط می‌شوند و تشکیل یک فاز را می‌دهند، بنابراین در این گروه، فرآیندهای متداول در صنعت انجام‌پذیر نیست.

۲- گاز-مایع: این حالت، فرآیندهای زیر را شامل می‌شود:

(الف) تقطیر جزء به جزء Fractional Distillation (تقطیر): اگر کلیه سازنده‌های یک سیستم در حال تعادل، بین دو فاز توزیع شوند، عمل را تقطیر می‌نامند. در عمل تقطیر، فاز گاز در اثر حرارت دادن فاز مایع تولید می‌شود. برعکس می‌توان در اثر سرد کردن فاز گاز، فاز مایعی را از آن تولید نمود. در این فرآیند، اساس جداسازی اختلاف در نقطه جوش اجزا است.

(ب) جذب گاز (gas absorption): در این عملیات، هر دو فاز به صورت محلول بوده و یک سازنده (یا گروهی از سازنده‌ها) بین دو فاز توزیع می‌گردد و انتقال جرم از فاز گاز به مایع صورت می‌گیرد. مثل مجاورت مخلوطی از هوا و آمونیاک با آب.

(ج) دفع گاز (stripping): عکس عمل جذب است، یعنی جهت انتقال جرم از فاز مایع به فاز گاز است. تفاوت میان فرآیند جذب و دفع، فقط مربوط به جهت انتقال نفوذکننده است.

کج مثال ۳: تفاوت اصلی فرآیند جذب و دفع گاز مربوط به چیست؟

(۱) توزیع اجزاء میان فازها

(۲) نوع اجزای توزیع‌شونده میان دو فاز

(۳) جهت انتقال اجزای نفوذکننده

(۴) مدت زمان تماس میان فازها

پاسخ: گزینه «۳» تفاوت میان فرآیند جذب و دفع گاز، فقط مربوط به جهت انتقال اجزای نفوذکننده است.



مدرس‌ان شریف

فصل دوم

«نفوذ مولکولی»

درسنامه (۱): قوانین فیک



تعاریف و مفاهیم

در یک سیستم دو فازی که در حالت تعادل نباشد، مانند لایه‌ای از مخلوط آمونیاک و هوا در تماس با لایه‌ای از آب، به تدریج در اثر نفوذ مولکولی آمونیاک بین دو فاز، حالت تعادل بین دو فاز ایجاد خواهد شد و در انتها غلظت هر یک از سازنده‌ها در سرتاسر هر فاز به مقدار ثابتی رسیده ولی مقدار آن در دو فاز متفاوت خواهد بود. از طرف دیگر، پتانسیل شیمیایی آمونیاک (و یا ضریب فعالیت آن، در صورتی که مبنای یکسانی برای هر دو فاز در نظر گرفته شود) در فاز هوا با پتانسیل شیمیایی آن در فاز آب برابر خواهد شد و برابری پتانسیل شیمیایی باعث توقف عمل نفوذ خواهد گردید. بنابراین نیروی محرکه واقعی برای نفوذ، ضریب فعالیت یا پتانسیل شیمیایی می‌باشد و نه غلظت.

- نفوذ مولکولی در اثر حرکت مولکول‌های یک جسم و به علت وجود انرژی حرارتی انجام می‌گیرد.

- نفوذ مولکولی پدیده بسیار کندی است که می‌توان با کاهش فشار که سبب کاهش تعداد برخوردها می‌شود و افزایش درجه حرارت که سرعت مولکولی را زیادتر می‌کند، سرعت عمل را افزایش داد. برخوردهای مولکولی دلیل کند بودن نفوذ مولکولی را توجیه می‌کند.

- عمل هم زدن مکانیکی سبب می‌شود که به جای مولکول‌ها، گردانه‌ها (eddy) با حرکت سریع خود به صورت نامنظم، جرم را منتقل کنند. این روش نفوذ متلاطم یا گردانه‌ای نامیده می‌شود.

- مکانیسم انتقال جرم در سیالات ساکن و یا سیالاتی که جریان آرام دارند، از طریق نفوذ مولکولی و در جریان‌های متلاطم به طریقه گردانه‌ای است. درون هر گردانه، انتقال از طریق نفوذ مولکولی انجام می‌پذیرد.

انواع غلظت

غلظت جرمی برابر است با نسبت جرم به حجم و غلظت مولی برابر با نسبت تعداد مول به حجم می‌باشد که روابط آن در جدول زیر آمده است.

غلظت	کل محلول (یا یک جزئی)	محلول چند جزئی
جرمی (چگالی جرمی)	$\rho = \frac{m}{V_T} = \sum \rho_i$	$\rho_i = \frac{m_i}{V_T}$
مولی (چگالی مولی)	$C = \frac{n}{V_T} = \sum C_i$	$C_i = \frac{n_i}{V_T}$

n : تعداد مول کل

m : جرم کل

m_i : جرم جزء i

n_i : تعداد مول جزء i

V_T : حجم کل

$$\omega_i = \frac{\rho_i}{\rho} = \frac{\rho_i}{\sum \rho_i} = \frac{m_i}{m} \quad , \quad x_i = \frac{C_i}{C} = \frac{C_i}{\sum C_i} = \frac{n_i}{n}$$

$$x_i = \frac{\omega_i}{\sum \frac{\omega_i}{M_i}}$$

$$\omega_i = \frac{x_i M_i}{\sum x_i M_i}$$

رابطه میان کسر مولی و کسر جرمی:

$$M_i = \text{جرم مولکولی جزء } i$$



کج مثال ۱: یک مخلوط سه جزئی، به حجم ۲۰ میلی لیتر، شامل ۵ گرم جزء A، ۵ گرم جزء B و ۱۰ گرم جزء C می باشد. غلظت جرمی هر یک از اجزاء (ρ_i) و همچنین کسر جرمی آن‌ها (w_i) برابر کدام گزینه است؟

$$(1) \quad w_C = 0/48, w_B = 0/23, w_A = 0/29, \rho_C = 0/2, \rho_B = 0/25, \rho_A = 0/4$$

$$(2) \quad w_C = 0/5, w_B = 0/25, w_A = 0/25, \rho_C = 0/5, \rho_B = 0/25, \rho_A = 0/25$$

$$(3) \quad w_C = 0/45, w_B = 0/25, w_A = 0/3, \rho_C = 0/48, \rho_B = 0/29, \rho_A = 0/23$$

$$(4) \quad w_C = 0/23, w_B = 0/29, w_A = 0/48, \rho_C = 0/2, \rho_B = 0/4, \rho_A = 0/25$$

پاسخ: گزینه «۲» غلظت جرمی اجزای A، B و C را به ترتیب با ρ_A, ρ_B, ρ_C و کسر جرمی آن‌ها را با w_A, w_B, w_C نشان می دهیم. بنابراین

$$\rho_A = \frac{m_A}{V_T} = \frac{5}{20} = 0/25 \frac{\text{gr}}{\text{ml}}, \quad \rho_B = \frac{m_B}{V_T} = \frac{5}{20} = 0/25 \frac{\text{gr}}{\text{ml}}, \quad \rho_C = \frac{m_C}{V_T} = \frac{10}{20} = 0/5 \frac{\text{gr}}{\text{ml}}$$

خواهیم داشت:

$$m = 10 + 5 + 5 = 20 \text{ gr}$$

برای محاسبه کسر جرمی لازم است جرم کل مخلوط را داشته باشیم که برابر است با:

$$w_A = \frac{m_A}{m} = \frac{5}{20} = 0/25, \quad w_B = \frac{m_B}{m} = \frac{5}{20} = 0/25, \quad w_C = \frac{m_C}{m} = \frac{10}{20} = 0/5$$

کج مثال ۲: در یک مخلوط دو جزئی، ۵ مول جزء A با جرم مولکولی ۲۴ و ۱۰ مول جزء B با جرم مولکولی ۱۵، موجود می باشد. درصدهای جرمی، اجزای A و B به ترتیب برابر است با (از راست به چپ):

$$(4) \quad \frac{4}{9}, \frac{5}{9}$$

$$(3) \quad \frac{5}{9}, \frac{4}{9}$$

$$(2) \quad \frac{1}{3}, \frac{2}{3}$$

$$(1) \quad \frac{2}{3}, \frac{1}{3}$$

$$n = 5 + 10 = 15 \text{ mol} = \text{تعداد مول کل}$$

پاسخ: گزینه «۳» ابتدا کسر مولی (x_i) هر جزء را حساب می کنیم:

$$x_A = \frac{5}{15} = \frac{1}{3}, \quad x_B = \frac{10}{15} = \frac{2}{3}$$

$$w_A = \frac{x_A M_A}{x_A M_A + x_B M_B} = \frac{\frac{1}{3}(24)}{\frac{1}{3}(24) + \frac{2}{3}(15)} = \frac{4}{9}$$

با توجه به رابطه میان کسر مولی و کسر جرمی اجزاء خواهیم داشت:

$$w_B = \frac{x_B M_B}{x_B M_B + x_A M_A} = \frac{\frac{2}{3}(15)}{\frac{2}{3}(15) + \frac{1}{3}(24)} = \frac{5}{9}$$

سرعت متوسط جرمی (mass average velocity): این سرعت برابر با سرعت مرکز جرم کل محلول است که به وسیله لوله پیتوت قابل اندازه گیری می باشد که با توجه به رابطه زیر، حساب می شود:

$$\vec{V} = \sum \omega_i \vec{V}_i$$

$$V_i = \text{سرعت جزء } i$$

سرعت متوسط جرمی نشان می دهد که در اثر گرادیان غلظت مرکز ثقل محلول با چه سرعتی تغییر می کند.

سرعت متوسط مولی (molar average Velocity): سرعتی است که اگر ناظر با آن سرعت، در یک محلول حرکت کند، تعداد مول‌های دو طرف ناظر تغییر نمی کند (ممکن است جرم تغییر کند) و طبق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\vec{U}_m = \vec{V}^* = \sum x_i \vec{V}_i$$

هرچه اختلاف جرم مولکولی اجزاء کمتر باشد، اختلاف سرعت متوسط مولی و سرعت متوسط جرمی کمتر می شود.

تعریف شار یا فلاکس (Flux): شار نسبت کمیت بر زمان بر واحد سطح است:

$$\text{شار} = \frac{\text{کمیت}}{\text{(زمان) (سطح)}}$$

$$\begin{cases} \tau = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot a}{A} = \frac{m \cdot V}{A \cdot t} \\ F = ma, \quad a = \frac{V}{t} \end{cases}$$

برای مثال تنش نیرو به ازای سطح یا فلاکس انتقال ممنوم است.

$$V = \text{سرعت}; \quad a = \text{شتاب}; \quad m = \text{جرم}; \quad A = \text{سطح}; \quad t = \text{زمان}$$

هرگاه در مخلوطی، غلظت اجزای آن یکنواخت نباشد، نفوذ مولکولی سبب رساندن آن به حالت یکنواخت خواهد شد و مواد از محلی که دارای غلظت بالاتری است به مکانی که غلظت آن کمتر است حرکت خواهند نمود. به منظور بیان کمی این شدت، مقیاس مشخصی لازم است که به آن شدت نفوذ مولکولی می‌گویند. شدت نفوذ مولکولی را می‌توان بر حسب شار مولی (molar flux) یا مول بر زمان بر سطح نشان داد که این سطح در جهت عمود بر جهت نفوذ تعیین می‌شود. در محلول‌های غیر یکنواخت حتی اگر دو جزئی باشند، هر دو سازنده نفوذ خواهند کرد و لذا برای نشان دادن حرکت هر جزء دو نوع شار خواهیم داشت: شار مولی نسبت به محل مشخصی از فضا یا نسبت به مختصات ساکن که آن را با N نشان می‌دهند و شار یک سازنده نسبت به سرعت مولی متوسط کلیه سازنده‌های دیگر یا شار نسبت به مختصات متحرک که با J نشان داده می‌شود. در صورتی که شار نسبت به مختصات ساکن، جرمی بوده یعنی برابر جرم بر زمان بر سطح باشد با n نشان داده می‌شود و شار جرمی نسبت به مختصات متحرک با j نشان داده می‌شود. بنابراین فلاکس باید نسبت به سطح باشد. این سطح می‌تواند ساکن یا متحرک بوده و انتخاب نوع سطح نباید در جواب اثری داشته باشد.

$$V_i = \text{سرعت جزء } i$$

$$n_i = \rho_i V_i = \text{فلاکس جرمی جزء } i$$

$$N_i = C_i V_i = \text{فلاکس مولی جزء } i$$

فلاکس نسبت به مختصات ساکن:

این دو رابطه را می‌توان به صورت زیر مرتب کرد:

$$n_i = \rho_i V_i = \rho_i V + \rho_i (V_i - V)$$

$$N_i = C_i V_i = C_i U_m + C_i (V_i - U_m)$$

$$U_m = \sum x_i V_i = \frac{V_1 C_1 + V_2 C_2 + \dots}{C_1 + C_2 + \dots} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{از ترکیب این دو رابطه داریم:} \\ \boxed{N_i = x_i (N_1 + N_2 + \dots) + J_i = x_i N_T + J_i} \end{array} \right.$$

در این روابط $(V_i - V)$ بیانگر سرعت نفوذ جزء i نسبت به سرعت متوسط مولی مخلوط می‌باشد. N_i نشان دهنده کل انتقال جرم جزء i یا فلاکس مولی جزء i است. عبارت $x_i N_T$ بیانگر انتقال جرم جزء i در اثر حرکت توده‌ای یا در اثر سرعت سیال یا انتقال جرم جابجایی می‌باشد. همچنین عبارت $C_i (V_i - U_m)$ بیانگر انتقال جرم جزء i در اثر نفوذ مولکولی است که آن را با J_i نشان می‌دهند. در واقع J_i ، فلاکس مولی جزء i نسبت به ناظری است که با سرعت متوسط مولی U_m حرکت می‌کند یا به عبارت دیگر فلاکس نسبت به مختصات متحرک است. بنابراین در یک سیستم، فرآیند انتقال جرم می‌تواند همزمان شامل نفوذ مولکولی و حرکت توده‌ای سیال و یا هر یک از این دو باشد. مثال زیر روشن‌کننده تفاوت این دو حرکت می‌باشد:

فرض کنیم ناظری نسبت به یک محور مختصات ثابت و مشخص، حرکت ماهی‌های یک رودخانه‌ی جاری را بررسی می‌کند. اگر فرض شود ماهی‌ها ثابت هستند و تنها به خاطر سرعت جریان آب حرکت می‌کنند، به آن حرکت توده‌ای گفته می‌شود. این حرکت می‌تواند در یک سیال ساکن یا موضعی از جریان آرام، ناشی از اختلاف چگالی بین دو نقطه و یا جابجایی طبیعی، صورت گیرد. حال فرض کنیم، تعدادی از ماهی‌ها، در اثر شنا در جهت حرکت توده سیال یا در خلاف جهت حرکت توده سیال، از محور خاص عبور نمایند. به این حرکت ماهی در اثر شنا، نفوذ مولکولی گویند که می‌تواند هم سو و یا خلاف جهت حرکت توده‌ای باشد، در نتیجه می‌توان نوشت:

نفوذ مولکولی همیشه از نقطه‌ای با غلظت بیشتر به نقطه‌ای با غلظت کمتر (در اصل از پتانسیل شیمیایی بیشتر به پتانسیل کمتر) رخ می‌دهد (بنابراین پدیده‌ای خود بخودی است). در صورتی که حرکت توده‌ای می‌تواند هم جهت یا خلاف جهت آن باشد. برای مثال حلالیت کریستال آبدار $A(6H_2O)$ را درون ظرفی محتوی آب خالص در نظر می‌گیریم. در اثر حل شدن این کریستال در آب خالص، به ازای هر مول کریستال، یک مول A و ۶ مول آب وارد لایه فصل مشترک کریستال و آب می‌شود. غلظت A در فصل مشترک برابر حلالیت آن در آب است که آن را با x^* نشان می‌دهیم. با توجه به اینکه غلظت A در نقاط دور از فصل مشترک (در توده آب) صفر است، بنابراین نفوذ مولکولی آن از فصل مشترک به توده مایع صورت می‌گیرد. همچنین حرکت توده‌ای این جزء از سطح کریستال به سمت توده سیال است. در مورد آب، به دلیل این که غلظت آن در فصل مشترک برابر $x^* - 1$ و در نقاط دور از فصل مشترک برابر یک است، پس نفوذ مولکولی از سمت توده سیال به فصل مشترک می‌باشد، در حالی که حرکت توده‌ای از فصل مشترک به سمت توده سیال رخ می‌دهد. بنابراین در این مثال، برای جزء A ، حرکت توده‌ای و نفوذ مولکولی هم جهت هستند ولی برای آب خلاف جهت هم می‌باشند.

نکته ۱: فلاکس یک کمیت اسکالر، یک کمیت برداری است (مانند جرم)، و فلاکس یک کمیت برداری، یک تنسور است.



مدرسین شریف

فصل سوم

«ضرایب انتقال جرم»

مقدمه

وقتی سیالی که جریان آن به حالت متلاطم است از روی یک سطح جامد بگذرد، در ناحیه‌ای که بلافاصله پس از سطح جامد قرار دارد، جریان به صورت آرام درمی‌آید. با افزایش فاصله از سطح جامد، رفتار جریان به تدریج تغییر می‌کند و به وضعیت متلاطم نزدیک‌تر می‌شود تا در نواحی دور از سطح، جریان به حالت کاملاً متلاطم مبدل گردد. در ناحیه متلاطم اجزای سیال دیگر به صورت منظمی که در جریان آرام مشاهده می‌شود، حرکت نمی‌کنند. بلکه برعکس، قسمت نسبتاً بزرگی از سیال که از قطعاتی به نام گردانه (eddy) تشکیل شده با سرعت زیاد از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر مکان می‌دهد. این گردانه‌ها به همراه خود، مواد حل شده را حمل می‌کنند و بنابراین حرکت آن‌ها به میزان قابل توجهی شدت انتقال جرم را افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه حرکت گردانه‌ها سریع است، در نتیجه شدت انتقال جرم در ناحیه متلاطم به مراتب از آنچه در اثر نفوذ مولکولی در لایه‌های مختلف سیال در حرکت آرام صورت می‌گیرد، سریع‌تر خواهد بود. به دلیل حرکت سریع گردانه‌ها، گرادیان غلظت موجود در ناحیه متلاطم، کوچک‌تر از این کمیت در ناحیه آرام است. در ناحیه متلاطم عامل کنترل کننده انتقال جرم، نفوذ گردانه‌ای (eddy diffusion) می‌باشد. با توجه به مطالب ذکر شده، رابطه شار نفوذی در ناحیه

متلاطم را به صورت مقابل می‌توان نوشت:

$$J_A = -(D_{AB} + \varepsilon_D) \frac{dC_A}{dz}$$

ε_D ضریب نفوذ گردانه‌ای نام دارد که یک خاصیت جریان است، ولی D_{AB} خاصیت سیال است. در نقاط دور از سطح، ε_D بزرگ است و در نقاط نزدیک به سطح کم می‌شود. در واقع هر چه از سطح دورتر شویم، با توجه به اختلاطی که در محیط رخ می‌دهد، غلظت‌ها یکنواخت شده و مکانیزم انتقال جرم از نفوذ مولکولی به انتقال جرم جابه‌جایی، تغییر می‌کند. به $(D + \varepsilon_D)$ ضریب نفوذ جرمی کل گفته می‌شود.

کج مثال ۱: سیالی روی یک صفحه تخت جریان دارد. در مورد این جریان کدام گزینه غلط است؟

- ۱) در نزدیکی سطح صفحه، نفوذ مولکولی کنترل کننده انتقال جرم است.
- ۲) در نقاط دور از سطح، نفوذ گردانه‌ای عامل کنترل کننده انتقال جرم است.
- ۳) هر چه از سطح دورتر شویم، ε_D کاهش و D_{AB} افزایش می‌یابد.
- ۴) مقدار D_{AB} در سطح و در نقاط دور از سطح ثابت است.

پاسخ: گزینه «۳» در نقاط دور از سطح، تلاطم جریان بیشتر شده و در نتیجه ضریب نفوذ گردانه‌ای که یک خاصیت جریان است افزایش می‌یابد. ولی ضریب نفوذ مولکولی (D_{AB}) یک خاصیت سیال است و با حرکت از روی سطح، در صورتی که دما و یا غلظت تغییر نکند، ثابت است.

کج مثال ۲: در انتقال جرم در جریان مغشوش سیالات (Turbulent flow)، نسبت کل ضریب نفوذ به ضریب نفوذ مولکولی $(\frac{D + \varepsilon_D}{D})$ به کدام صورت

صحیح است؟ (ε_D ضریب نفوذ eddy و D ضریب نفوذ مولکولی است.)

$$\frac{D + \varepsilon_D}{D} = 1 + \text{Sh} \frac{\varepsilon_D}{k} \quad (۲)$$

$$\frac{D + \varepsilon_D}{D} = 1 + \text{Sc} \frac{\varepsilon_D}{\nu} \quad (۱)$$

$$\frac{D + \varepsilon_D}{D} = 1 + \frac{\varepsilon_D}{\nu} \quad (۴)$$

$$\frac{D + \varepsilon_D}{D} = 1 \quad (۳)$$



✓ پاسخ: گزینه «۱» عدد بی‌بعد اشمیت برابر است با: $Sc = \frac{v}{D}$. با ساده کردن نسبت داده شده و تغییر در آن خواهیم داشت:

$$\frac{D + \varepsilon_D}{D} = 1 + \frac{\varepsilon_D}{D} = 1 + \frac{v}{D} \frac{\varepsilon_D}{v} = 1 + Sc \frac{\varepsilon_D}{v}$$

v ویسکوزیته سینماتیکی یا ضریب نفوذ ممنوم است.

✓ مثال ۳: رابطه مقدار کل شار جزء A برای یک سیستم یک بعدی در حالت کلی از رابطه $J_A = -(D_{AB} + \varepsilon_D) \frac{dC_A}{dz}$ پیدا می‌شود. کدام یک از

گزینه‌های زیر درست است؟

(۱) ε_D بستگی به مکان دارد.

(۲) D_{AB} و ε_D همواره مقدار ثابتی هستند.

(۳) D_{AB} و ε_D بستگی به مکان دارند.

✓ پاسخ: گزینه «۱» در جریان متلاطم، با فاصله گرفتن از سطح، مقدار ε_D زیاد می‌شود بنابراین این مقدار تابعی از مکان است. ولی D_{AB} خاصیت سیال است.

✓ مثال ۴: در مورد نفوذ مولکولی (D_{AB}) و نفوذ چرخانه‌ای (E_D)، کدام گزینه صحیح‌تر است؟

(مهندسی شیمی - بهداشت، ایمنی و محیط زیست - سراسری ۹۶)

(۱) مقادیر E_D و D_{AB} بستگی به موقعیت سیال دارند.

(۲) مقدار D_{AB} بستگی به موقعیت سیال دارد.

(۳) مقدار E_D بستگی به موقعیت سیال دارد.

(۴) E_D و D_{AB} مقادیر ثابتی هستند.

✓ پاسخ: گزینه «۳» به $(D_{AB} + E_D)$ ضریب نفوذ جرمی کل گفته می‌شود. E_D ضریب نفوذ گردانه‌ای نام دارد که یک خاصیت جریان است. ولی D_{AB} خاصیت سیال است. در نقاط دور از سطح، E_D بزرگ است و در نقاط نزدیک به سطح کم می‌شود. در واقع هرچه از سطح دورتر شویم، با توجه به اختلافی که در محیط رخ می‌دهد، غلظت‌ها یکنواخت شده و مکانیزم انتقال جرم از نفوذ مولکولی به انتقال جرم جابه‌جایی تغییر می‌کند. بنابراین E_D به موقعیت سیال بستگی دارد.

✓ مثال ۵: در یک فرآیند جذب گاز مقاومت فیلم مایع در برابر انتقال ۵ برابر مقاومت فیلم گاز است. با ثابت بودن بقیه پارامترها اگر ضخامت فیلم مایع

(مهندسی پلیمر - سراسری ۹۳)

را دو برابر کنیم سرعت جذب چقدر تغییر می‌کند؟

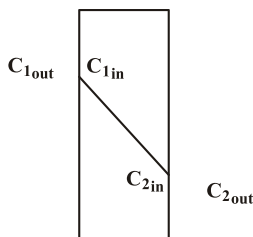
(۱) یک چهارم می‌شود.

(۲) نصف می‌شود.

(۳) دو برابر می‌شود.

(۴) چهار برابر می‌شود.

✓ پاسخ: گزینه «۲»



$$C_{yi} = bC_{1out}$$

$$\text{شار} = \frac{b_p D_{AB} R_G T (p_{1out} - p_{2out})}{L p_{1out}}$$

می‌بینیم شار با ضخامت نسبت عکس دارد و دو برابر کردن ضخامت فیلم شار آن را نصف خواهد کرد.

✓ مثال ۶: در صورت وجود تلاطم در جریان، ضریب نفوذ انتقال جرم به چه صورت است؟

(۱) ε_D و انتقال جرم داخل گردانه‌ها به صورت نفوذ مولکولی است.

(۲) ε_D و انتقال جرم داخل گردانه‌ها صورت نمی‌گیرد.

(۳) $\varepsilon_D + D_{AB}$ و انتقال جرم داخل گردانه‌ها به صورت نفوذ مولکولی است.

(۴) $\varepsilon_D + D_{AB}$ و انتقال جرم داخل گردانه‌ها به صورت نفوذ گردانه‌ای است.

✓ پاسخ: گزینه «۳» در صورت وجود جریان متلاطم، علاوه بر نفوذ مولکولی، انتقال جرم توسط گردانه‌ها نیز اتفاق می‌افتد. بنابراین ضریب نفوذ انتقال جرم، مجموع ضریب نفوذ مولکولی (D_{AB}) و ضریب نفوذ گردانه‌ای (ε_D) می‌باشد. داخل گردانه‌ها نیز انتقال جرم به صورت نفوذ مولکولی رخ می‌دهد.

درسنامه (۱): انواع ضرایب انتقال جرم



ضریب انتقال جرم نوع F

مکانیزم جریان سیال در حالت متلاطم که شامل حرکت گردانه‌هاست، تاکنون به درستی شناخته نشده است. بنابراین، طبیعی است که شدت انتقال جرم در بین نواحی مختلف، از سطح تا ناحیه‌ی متلاطم، با همان روشی که در مورد نفوذ مولکولی بیان شد، توجیه شود. رابطه کلی برای شار مولی جزء A به صورت روبرو است:

$$N_A = \frac{N_A}{N_A + N_B} \frac{CD_{AB}}{Z} \ln \frac{\frac{N_A}{N_A + N_B} - \frac{C_{A_2}}{C}}{\frac{N_A}{N_A + N_B} - \frac{C_{A_1}}{C}}$$

در این رابطه، جمله $\frac{D_{ABC}}{Z}$ از مشخصات نفوذ مولکولی است که با کمیت F که یک ضریب انتقال جرم می‌باشد، جایگزین می‌شود. بنابراین رابطه N_A خواهد بود:

$$N_A = \frac{N_A}{N_A + N_B} F \ln \frac{\frac{N_A}{N_A + N_B} - \frac{C_{A_2}}{C}}{\frac{N_A}{N_A + N_B} - \frac{C_{A_1}}{C}}$$

کمیت F یک ضریب انتقال جرم محلی است که برای یک موضع مشخص واقع بر سطح مرزی فازها به دست می‌آید. با توجه به اینکه مقدار F بستگی به نحوه جریان موضعی سیال دارد که در سراسر سطح متغیر می‌باشد، بعضی اوقات از یک مقدار متوسط F_{av} و مقادیر ثابتی جهت C_{A_2} و C_{A_1} که تغییرات F در تعیین آنها لحاظ شده است، در معادله بالا استفاده می‌شود. رابطه فوق را می‌توان برای یک لایه گاز یا یک لایه مایع نوشت. در این صورت مقادیر F ضرایب انتقال جرم فیلم گاز (F_G) یا فیلم مایع (F_L) در حالت عمومی نامیده می‌شود که رابطه آنها به صورت زیر خواهد بود:

$$F_G = \frac{D_{AB}}{z_G} \left(\frac{P_t}{RT} \right), \quad F_L = \frac{D_{AB}}{z_L} \left(\frac{\rho}{M} \right)_{av}$$

ضریب انتقال جرم نوع K

در انتقال حرارت داریم: (نیروی محرکه یا تفاضل دما) \times (ضریب انتقال حرارت) = $q'' = h(T_1 - T_2)$ = شار حرارتی
به طور مشابه برای انتقال جرم می‌توانیم بنویسیم: (نیروی محرکه یا تفاضل غلظت‌ها) \times (ضریب انتقال جرم) = N_A = شار انتقال جرم
با توجه به این که غلظت را با واحدهای مختلفی می‌توان بیان کرد، بنابراین ضرایب جرم مختلفی خواهیم داشت:

$$\left(\frac{N_A}{N_A + N_B} = 1 \right) N_B = 0 \quad \text{حالت (۱)}$$

$$N_A = \begin{cases} k_G (P_{A_1} - P_{A_2}) = k_y (y_{A_1} - y_{A_2}) = k_c (C_{A_1} - C_{A_2}) = F_G \ln \frac{1 - y_{A_2}}{1 - y_{A_1}} & \text{برای گاز:} \\ k_x (x_{A_1} - x_{A_2}) = k_L (C_{A_1} - C_{A_2}) = F_L \ln \frac{1 - x_{A_2}}{1 - x_{A_1}} & \text{برای مایع:} \end{cases}$$

$$\left(\frac{N_A}{N_A + N_B} = \infty \right) N_A + N_B = 0 \quad \text{حالت (۲)}$$

$$N_A = \begin{cases} k'_G (P_{A_1} - P_{A_2}) = k'_y (y_{A_1} - y_{A_2}) = k'_c (C_{A_1} - C_{A_2}) = F_G (y_{A_1} - y_{A_2}) & \text{برای گاز:} \\ k'_x (x_{A_1} - x_{A_2}) = k'_L (C_{A_1} - C_{A_2}) = F_L (x_{A_1} - x_{A_2}) & \text{برای مایع:} \end{cases}$$

$$F, k_y, k_x [=] \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \quad k_L, k_c [=] \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad k_G [=] \frac{\text{kmol}}{\text{N} \cdot \text{s}}$$

واحد ضرایب انتقال جرم مختلف:



مدرسارن شریف

فصل چهارم

«انتقال جرم بین فازها»

مقدمه

در فصول قبل، انتقال جرم را فقط در یک فاز منفرد در نظر می‌گرفتیم. اما در اغلب فرآیندهای انتقال جرم، دو فاز غیر محلول در یکدیگر را به منظور انتقال مواد موجود در بین آن‌ها، در تماس با هم قرار می‌دهند. در ادامه انتقال جرم مربوط به دو فاز را بررسی می‌کنیم. شدت نفوذ در هر فاز به گرادیان غلظت موجود در آن بستگی دارد. به علاوه وجود گرادیان غلظت در یک سیستم دو فازی، مبین انحراف از حالت تعادل بین فازها است که در صورت برقراری حالت تعادل، گرادیان غلظت در داخل هر فاز و در نتیجه شدت نفوذ به صفر خواهد رسید.

درسنامه (I): فازهای انتقال جرم

تعادل

هر گاه ماده‌ای بین دو فاز غیر قابل انحلال در یکدیگر توزیع شود، یک تعادل پویا بین دو فاز برقرار خواهد شد و دیگر غلظت موجود در هر فاز تغییر نمی‌کند و برای ناظری که نمی‌تواند حرکت مولکول‌ها را مشاهده کند، عمل نفوذ ظاهراً متوقف شده است. در مورد هر سیستم مشخص، حالت تعادل ویژه‌ای وجود خواهد داشت و هر سیستم دارای منحنی توزیع تعادل (منحنی تعادل) مخصوص به خود است. این منحنی بستگی به مقدار اولیه مواد نداشته و تنها تابع شرایط اعمال شده بر سیستم مثل دما و فشار است. در حالت تعادل، غلظت‌ها در دو فاز با یکدیگر یکسان نیستند، بلکه پتانسیل شیمیایی جزء منتقل شونده میان دو فاز یکسان است. همان‌طور که در فصل‌های قبل ذکر شد، تنها تساوی پتانسیل‌های شیمیایی و نه برابری غلظت‌ها، باعث توقف شدت کلی انتقال حل شونده می‌شود. در تمام سیستم‌هایی که شامل توزیع مواد بین دو فاز غیر محلول است، اصول زیر صدق می‌کند:

- ۱- دما و فشار معین، یک دسته روابط تعادلی موجود است که می‌توان آن‌ها را به صورت ترسیمی و در قالب منحنی توزیع تعادلی برای هر یک از سازندگان پخش شده، نشان داد. این منحنی‌ها از رسم غلظت‌های تعادلی هر ماده در دو فاز بر حسب یکدیگر حاصل می‌شوند.
- ۲- در یک سیستم تعادلی، نفوذ کلی سازندگان در بین فازها وجود ندارد، یعنی مجموع جبری شارهای نفوذی هر سازنده در بین فازها برابر صفر است.
- ۳- در یک سیستم غیر تعادلی، نفوذ سازندگان در بین فازها به منظور رساندن سیستم به یک حالت تعادل انجام می‌گیرد. اگر زمان به اندازه کافی باشد، غلظت‌های تعادلی حاصل خواهند شد.

در بعضی از موارد، منحنی تعادل به صورت خطی می‌باشد که در این موارد، قانون راولت و یا هنری حاکم است (برای سیستم گاز - مایع).

قانون هنری: این قانون، برای حالتی است که حلالیت جزء حل شونده (جزء A)، در مایع کم است.

P_A = فشار جزء A در فاز گاز ، x_A = کسر مولی جزء A در فاز مایع (حلالیت) ، y_A = کسر مولی جزء A در فاز گاز ، H = ثابت هنری

$$P_A = Hx_A \quad ; \quad P_A = y_A P_t \Rightarrow y_A = \frac{H}{P_t} x_A$$

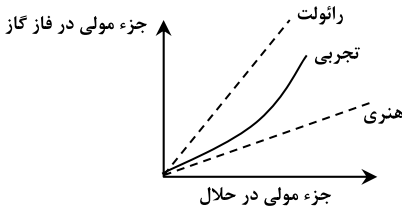
قانون راولت: این قانون برای حالتی است که اجزای مشابه در هم مخلوط شده باشند و در واقع برای حلالیت بالای جزء A می‌باشد.

$$P_A = x_A P_A^*$$



$P_A = P_A^*$ = فشار بخار جزء A در دمای سیستم

$$P_A = y_A P_t \Rightarrow y_A = \frac{P_A^*}{P_t} x_A$$



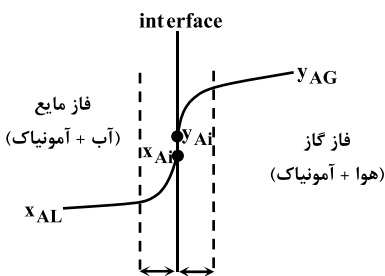
برای بسیاری از گازها قانون هنری تا متوسطی از غلظت حل شونده در فاز مایع (در حدود ۶ درصد) صادق است. انتظار می‌رود بسیاری از گازها تا فشار ۵ اتمسفر و در صورت حلالیت کم حل شونده در مایع، از قانون هنری تبعیت نمایند. معمولاً گازهایی از نوع بخار (که زیر دمای بحرانی خود هستند) تا فشاری در حد ۵۰ درصد نقطه اشباع در دمای خاص از قانون هنری تبعیت می‌کنند و این در صورتی است که در فاز مایع، واکنش شیمیایی رخ ندهد. در شکل مقابل منحنی تعادل در سه حالت تجربی، قانون رأولت و قانون هنری در دمای معین نشان داده شده است.

نفوذ بین فازها

انحراف از حالت تعادل، نیروی محرکه لازم را جهت نفوذ فراهم می‌کند. بسیاری از فرآیندهای انتقال جرم، به صورت پایا و با جریان‌های دائم و بدون تغییر فازهایی که با یکدیگر در تماس هستند و تحت شرایطی که غلظت‌ها در هر نقطه از دستگاه مورد استفاده، تغییراتی با زمان ندارند، انجام می‌گیرند. جذب یک گاز محلول نظیر آمونیاک (ماده A) را از مخلوط هوا و آمونیاک در آب که به عنوان جاذب در نظر گرفته می‌شود، در یکی از ساده‌ترین دستگاه‌ها یعنی برج جداره مرطوب، بررسی می‌کنیم. مخلوط آمونیاک و هوا از پایین برج وارد شده و به طرف بالای برج جریان می‌یابد، در حالی که آب از قسمت بالای برج به صورت لایه‌ای روی سطح جانبی داخل برج، به سمت پایین جاری می‌شود. ترکیب نسبی حل شونده موجود در مخلوط گاز، در هنگام حرکت این مخلوط به طرف بالای برج به تدریج کاهش می‌یابد، در حالی که آب، آمونیاک را در خود حل کرده و از انتهای برج، به شکل یک محلول آبدار آمونیاک، خارج می‌شود. در شرایط پایا، غلظت‌های مواد در هر نقطه از داخل دستگاه، با گذشت زمان بدون تغییر می‌مانند.

انتقال جرم محلی بین دو فاز

برای بررسی انتقال جرم بین دو فاز، نقطه‌ای از یک برج جذب را که در آن جذب گاز آمونیاک (جزء A) از مخلوط هوا و آمونیاک توسط آب به عنوان جاذب صورت می‌گیرد، در نظر می‌گیریم. با توجه به اینکه حل شونده (آمونیاک) از فاز گاز به داخل مایع نفوذ می‌کند، باید یک گرادیان غلظت در جهت انتقال ماده در داخل هر فاز موجود باشد، این مطلب را می‌توان به صورت ترسیمی و بر حسب فاصله نفوذ در هر فاز، مطابق شکل زیر نشان داد:



مقاومت در برابر انتقال جرم

y_{AG} = کسر مولی جزء A در توده (Bulk) فاز گاز، آن را با $y_{A\infty}$ یا y_{Ab} نیز نشان می‌دهند.

y_{Ai} = کسر مولی جزء A در سطح مشترک (interface) مربوط به فاز گاز

x_{AL} = کسر مولی جزء A در توده (Bulk) فاز مایع، آن را با $x_{A\infty}$ یا x_{Ab} نیز نشان می‌دهند.

x_{Ai} = کسر مولی جزء A در سطح مشترک مربوط به فاز مایع

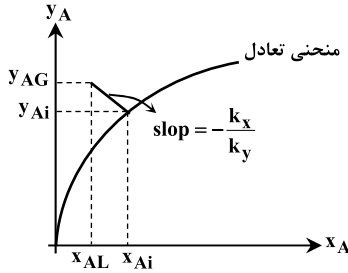
این شکل قسمتی از دو فاز در حال تماس با یکدیگر را نشان می‌دهد. فرض می‌شود که واکنش شیمیایی صورت نگیرد. غلظت A بر حسب جزء مولی در توده گاز y_{AG} است که در سطح مشترک به y_{Ai} کاهش می‌یابد. در فاز مایع، غلظت از x_{Ai} در سطح مشترک تا x_{AL} در توده مایع سقوط می‌کند. واضح است که غلظت‌های توده‌ای y_{AG} و x_{AL} مقادیر تعادلی نمی‌باشند، زیرا در غیر این صورت نفوذ حل شونده صورت نخواهد گرفت. همچنین غلظت‌های اخیر را نمی‌توان مستقیماً و همراه با یک ضریب انتقال جرم، به منظور تعیین شدت نفوذ بین فازها به کار برد. زیرا این غلظت‌ها به شکل‌های متفاوتی به پتانسیل شیمیایی که در حقیقت نیروی محرکه‌ی واقعی انتقال جرم است، وابسته‌اند.

برای حل این شکل، لوئیس و وایتمن فرض کرده‌اند که مقاومت‌های نفوذی تنها در داخل فازهای سیال قرار دارند. به این ترتیب مقاومتی در برابر انتقال جزء حل شونده در اطراف سطح مشترکی که فازها را از هم جدا کرده است، وجود ندارد و در نتیجه غلظت‌های y_{Ai} و x_{Ai} ، مقادیر تعادلی هستند که به وسیله منحنی توزیع تعادلی سیستم داده می‌شوند. این نظریه به اشتباه، «تئوری دو فیلمی» نام گرفته است زیرا هیچ نوع ارتباطی با تئوری فیلمی در فصل قبیل ندارد. نام مناسب برای آن، «تئوری دو مقاومتی» است. به صورت تئوری نشان داده شده است که انحراف از حالت تعادل تنها در مواردی که شدت نفوذ بسیار زیاد فرض شود، به طوری که نفوذ از آنچه که در موارد عملی قابل انتظار است، بیشتر باشد، امکان‌پذیر است.

در سطح مشترک، شرط تعادل دو فاز را داریم. در این سطح، مقاومت در برابر انتقال جرم صفر است. تنها در صورتی مقاومت وجود دارد که ضخامت آن زیاد باشد.

اگر انتقال ماده به صورت پایا انجام شود، سرعت رسیدن A از فاز گاز به سطح مشترک برابر با سرعت نفوذ آن به توده مایع خواهد شد، به نحوی که انباشتگی و یا کاهش A در سطح مشترک اتفاق نخواهد افتاد. بنابراین می‌توان شار نفوذی A را بر حسب ضرایب انتقال جرم و نیز اختلاف غلظت در هر فاز نوشت. بنابراین اگر k_x و k_y ، ضرایب انتقال جرم محلی به ترتیب در فاز مایع و فاز گاز باشند، می‌توان نوشت:

$$N_A = k_y (y_{AG} - y_{Ai}) = k_x (x_{Ai} - x_{AL}) \Rightarrow \frac{y_{AG} - y_{Ai}}{x_{AL} - x_{Ai}} = -\frac{k_x}{k_y} \quad \text{معادله خط نیروی محرکه:}$$



این رابطه، معادله خطی با شیب $-\frac{k_x}{k_y}$ است که دارای دو مجهول x_{Ai} و y_{Ai} می‌باشد. با داشتن منحنی تعادل y_A بر حسب x_A ، این مقادیر مجهول به دست می‌آیند.

اختلاف بین y ها و x ها را نیروی محرکه برای انتقال ماده می‌نامند.

در صورتی که نقطه توده (Bulk) (x_{AL}, y_{AG}) بالای منحنی تعادل باشد، انتقال جرم از فاز گاز به مایع بوده و در حقیقت فرآیند جذب است و برعکس وقتی که این نقطه زیر منحنی تعادل باشد، انتقال جرم از فاز مایع به گاز صورت می‌گیرد (فرآیند دفع). برای حالت‌های دیگر انتقال جرم نیز می‌توان معادله خط را به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \text{بر حسب فشار جزئی در فاز گاز: } -\frac{k_x}{k_G} &= \frac{P_{AG} - P_{Ai}}{x_{AL} - x_{Ai}} \\ \text{بر حسب غلظت در دو فاز: } -\frac{k_L}{k_C} &= \frac{C_{AG} - C_{AGi}}{C_{AL} - C_{ALi}} \end{aligned}$$

به k_x, k_y, k_G, k_C, k_L ، ضرایب محلی (موضعی، منفرد) انتقال جرم (در فاز مربوطه) گفته می‌شود.

مثال ۱: منحنی تعادل دو فاز گاز و مایع به صورت $P_A = 4 \cdot x_A$ (بر حسب بار) داده شده است. در یک نقطه از برج فشار جزئی گاز A برابر است با $P_{Ab} = 0.3 \text{ bar}$ و کسر مولی A در فاز مایع برابر با $x_{Ab} = 0.07$ می‌باشد، اگر $k_x = 1/2 \times 10^{-3} \frac{\text{kmole}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$

$k_G = 1/47 \times 10^{-3} \frac{\text{kmole}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{bar}}$ را داشته باشیم، فشار تعادلی در فصل مشترک گاز مایع چند بار است؟

۰/۴۵۰ (۴)

۰/۲۹۹ (۳)

۰/۳۵۱ (۲)

۰/۳۰۵ (۱)

پاسخ: گزینه «۳» با نوشتن شار مولی A در فاز مایع بر حسب کسر مولی (x_A) و در فاز گاز بر حسب فشار جزئی (P_A) خواهیم داشت:

$$N_A = k_G (P_{Ab} - P_{Ai}) = k_x (x_{Ai} - x_{Ab}) \Rightarrow -\frac{k_x}{k_G} = \frac{P_{Ab} - P_{Ai}}{x_{Ab} - x_{Ai}} \Rightarrow -\frac{1/2 \times 10^{-3}}{1/47 \times 10^{-3}} = \frac{0.3 - P_{Ai}}{0.07 - \frac{P_{Ai}}{4}} \Rightarrow P_{Ai} = 0.299$$

مثال ۲: در یک سیستم انتقال جرم، ضریب انتقال جرم محلی در فاز مایع $3/5 \times 10^{-4} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ و در فاز گاز $7 \times 10^{-4} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ می‌باشد. در صورتی که

فشار کل 1 atm بوده و قانون هنری در مورد این سیستم صادق باشد، مقدار ثابت هنری برای این سیستم چقدر است؟

$$(x_{Ai} = 0.01, x_{AL} = 0.001, y_{AG} = 0.02)$$

۲ (۴)

۱ (۳)

۱/۵ (۲)

۱/۵۵ (۱)

پاسخ: گزینه «۱» طبق قانون هنری $y_A = \frac{H}{P_t} x_A$ می‌باشد. با توجه به اینکه $P_t = 1 \text{ atm}$ است خواهیم داشت:

$$y_A = H x_A$$



مدرسان شریف

فصل پنجم

«دستگاه‌های تماس‌دهنده گاز - مایع»

فرآیندهایی نظیر رطوبت دادن، رطوبت زدایی، جذب و دفع گازها، تقطیر و انواع مختلف آن دارای وجه تشابه مشترکی هستند. به این ترتیب که در تمام این فرآیندها، یک فاز گاز و یک فاز مایع در تماس با یکدیگر قرار گرفته و انتقال جرم بین دو فاز صورت می‌پذیرد. در عمل رطوبت دادن، فاز مایع یک جسم خالص است و گرادیان غلظت و نفوذ فقط در فاز گاز برقرار می‌شود. در جذب گاز، گرادیان غلظت در هر دو فاز مایع و گاز موجود بوده و انتقال حداقل یک سازنده در هر دو فاز صورت می‌پذیرد. در فرآیند تقطیر، تمام سازنده‌های دو فاز بین آن دو فاز انتقال می‌یابد. در اکثر فرآیندهای مذکور، ارتباط بسیار نزدیکی بین پدیده‌های انتقال جرم و حرارت وجود دارد. در تبخیر و یا میعان یک جسم، اثرات حرارت‌های نهان تبخیر و برخی اوقات اثرات گرمای انحلال در نظر گرفته می‌شود. در تقطیر، در اثر تبادل حرارت، فاز جدیدی از فاز اولیه به وجود می‌آید و انتقال جرم بین دو فاز صورت می‌گیرد. بنابراین مقادیر و اثرات مربوط به حرارت‌های مختلف بایستی در نظر گرفته شوند. در کلیه فرآیندهای فوق، دستگاه مورد استفاده می‌بایست تماس لازم را بین گاز و مایع به خوبی برقرار نموده و از لحاظ اقتصادی نیز مناسب باشد. عموماً، دستگاه‌های مورد استفاده در این فرآیندها، از یک دسته اصول مشترک کلی پیروی می‌کنند و غالباً دستگاهی که در یکی از این فرآیندها به کار می‌رود، در دیگری نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. انواع اصلی این دستگاه‌ها برای تمام عملیات این گروه می‌توانند به کار گرفته شوند، بنابراین بحث را با بررسی دستگاه‌ها شروع می‌کنیم.

هدف از به کار بردن دستگاه‌هایی که در عملیات گاز - مایع استفاده می‌شوند، تماس کافی بین دو سیال و در نتیجه انتقال سازنده‌ها از یک فاز به فاز دیگر است. شدت انتقال جرم مستقیماً به سطح تماس دو فاز و نحوه و درجه پراکنده شدن یک سیال در دیگری وابسته است.

این دستگاه‌ها، بر حسب اینکه کدام فاز پراکنده می‌شوند، به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- دستگاه‌هایی که در آن‌ها گاز پراکنده می‌شود.

۲- دستگاه‌هایی که در آن‌ها مایع پراکنده می‌شود.

اصولاً فازی که پخش می‌شود کنترل‌کننده مقاومت در برابر انتقال جرم است، به جز در مخازن مولد حباب که هدف از پخش گاز این امر نمی‌باشد.

مثال ۱: در کدام یک از فرآیندهای انتقال جرم، اختلاف غلظت و نفوذ فقط در یک فاز رخ می‌دهد؟

- (۱) تقطیر (۲) جذب گاز (۳) استخراج (۴) رطوبت‌گیری

پاسخ: گزینه «۴» در فرآیند رطوبت‌گیری، فاز مایع، یک جسم خالص است و گرادیان غلظت و نفوذ تنها در فاز گاز برقرار می‌شود.

مثال ۲: منظور اصلی از به کار بردن دستگاه‌های گاز - مایع، کدام است؟

- (۱) تماس کافی بین دو سیال (۲) افزایش شدت انتقال جرم
(۳) چند مرحله‌ای کردن فرآیند (۴) بررسی عملیات انتقال جرم

پاسخ: گزینه «۱» هدف از به کار بردن دستگاه‌هایی که در عملیات گاز - مایع استفاده می‌شوند، تماس کافی بین دو سیال و در نتیجه انتقال سازنده‌ها از یک فاز به فاز دیگر است.



درسنامه (۱): دستگاههایی که در آن‌ها گاز پراکنده می‌شود

در این دستگاه‌ها، فاز گاز به صورت حباب و یا کف در فاز مایع پراکنده می‌شود. در این گروه، مخازنی که در آنها حباب گاز ایجاد می‌شود و یا مخازن مجهز به هم‌زن و انواع برج‌های سینی‌دار را می‌توان نام برد. برج‌های سینی‌دار مهم‌ترین دستگاه‌های این گروه محسوب می‌شوند زیرا که در آن‌ها جریان‌های متقابل و تماس چند مرحله‌ای برقرار می‌شود. مجاور کننده‌های مخزنی مجهز به هم‌زن که دستگاه‌های بسیار ساده‌ای هستند نیز کاربردهای فراوانی دارند. اگر استفاده از سیستم چند مرحله‌ای ضروری نباشد، می‌توان گاز را به صورت حباب‌هایی در مخازن مجهز به هم‌زن، در مایع پراکنده نموده و گاز و مایع را با یکدیگر تماس داد. این روش به خصوص هنگامی که یک واکنش شیمیایی بین گاز و یکی از اجزای سازنده فاز مایع مورد نظر باشد، بسیار مطلوب است. کربن‌اسیون دوغاب آهک، کلرینه کردن خمیر کاغذ، هیدروژناسیون روغن‌های نباتی، هوادهی مخمرها، نظیر تولید پنی‌سیلین، تهیه اسید سیتریک از چغندر قند از طریق میکروارگانیزم‌ها و نیز هوادهی لجن‌های فعال به منظور اکسیداسیون بیولوژیکی، مثال‌هایی از این دسته‌اند. در مواردی که افت فشار گاز بایستی کوچک باشد، مانند جذب دی‌اکسید سولفور از گازهای سوختی به وسیله دوغاب آهک، عمدتاً از وانتوری استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- برج‌های سینی‌دار ۲- مخازن هم‌زن دار ۳- برج‌های حبابی ۴- دستگاه‌های گریز از مرکز

در این بین، برج‌های سینی‌دار، مهم‌ترین دستگاه‌ها به شمار می‌روند.

کج مثال ۳: در مورد هیدروژناسیون روغن نباتی، کدام مورد صحیح است؟

- (۱) فاز مایع در فاز گاز پراکنده می‌شود.
 (۲) فاز گاز در فاز مایع پراکنده می‌شود.
 (۳) استفاده از فرآیند چند مرحله‌ای ضروری است.
 (۴) برای تماس دو فاز نیاز به مخازن هم‌زن دار نمی‌باشد.

پاسخ: گزینه «۲» اگر استفاده از سیستم چند مرحله‌ای ضروری نباشد، می‌توان گاز را به صورت حباب‌هایی در مخازن مجهز به هم‌زن، در مایع پراکنده نمود مثل فرآیند هیدروژناسیون روغن نباتی.

کج مثال ۴: دستگاه‌های گریز از مرکز جزء کدام دسته از دستگاه‌های مربوط به عملیات انتقال جرم می‌باشند؟

- (۱) دستگاه‌هایی که در آنها گاز پراکنده می‌شود.
 (۲) دستگاه‌هایی که در آنها فاز مایع پراکنده می‌شود.
 (۳) دستگاه‌های دارای سینی‌های جداسازی
 (۴) دستگاه‌هایی که در آنها فاز مایع و گاز هر دو می‌توانند پراکنده شوند.

پاسخ: گزینه «۱» برج‌های سینی‌دار، مخازن هم‌زن دار، برج‌های حبابی و دستگاه‌های گریز از مرکز، شامل مواردی هستند که در آنها فاز گاز پراکنده می‌شود.

کج مثال ۵: در سیستم تماس دهنده گاز - مایع، وقتی که فاز مایع پراکنده بوده و حلالیت گاز در مایع زیاد باشد کدام یک از دستگاه‌های زیر مناسب‌تر است؟

(آزاد ۸۰)

- (۱) برج‌های پر شده (Packed) (۲) ستون‌های سینی دار (Plate) (۳) مخازن هم‌زن دار (۴) برج‌های پاشنده (Spray)

پاسخ: گزینه «۴» ستون‌های سینی دار و مخازن هم‌زن دار، جزء دستگاه‌هایی هستند که در آن‌ها گاز به صورت فاز پراکنده در می‌آید. در برج‌های پر شده و برج‌های پاشنده، مایع به صورت فاز پراکنده در می‌آید. و در صورتی که حلالیت گاز در مایع زیاد باشد، برج‌های پاشنده مناسب‌تر است.

مخازن با مولد حباب (ستون‌های تولید حباب)

یک مخزن تولید کننده حباب، دستگاهی است که در آن جریان گاز به صورت حباب‌های ریزی درون مایع پراکنده می‌شود. هدف از پراکنده کردن گاز در مایع در این دستگاه، ایجاد تماس بین دو فاز می‌باشد و به عبارت دیگر این دستگاه وسیله ساده‌ای برای هم زدن دو فاز است، در این موارد هم زدن می‌تواند بسیار ملایم صورت گیرد، مثل فرآیند شستشوی نیتروگلیسیرین با آب و یا بسیار سریع باشد. در صورتی که قطر ظرف کوچک باشد، محل ورود گاز به صورت لوله‌ای بازی که از درون آن گاز وارد می‌شود، در انتهای ظرف قرار می‌گیرد. در مورد مخازنی که قطر آنها از حدود $3/5$ متر بیشتر باشد، بهتر است برای ورود گاز از چند روزنه استفاده گردد تا توزیع گاز به شکل مطلوبی صورت گیرد. در این حالت قطر روزنه‌ها از $1/5$ تا 3 میلی‌متر تغییر خواهد کرد.

قطر حباب‌های گاز

اندازه حباب‌های گاز بستگی به شدت جریان گاز از درون روزنه‌ها، قطر روزنه، خواص فیزیکی گاز و تلاطم فاز مایع دارد. تلاطم فاز مایع فقط در اثر حباب‌های بالا رونده گاز بوده و برای حالتی است که روزنه‌ها افقی و به اندازه لازم از هم دور هستند، به طوری که اثر تداخل حباب‌ها در یکدیگر، در عمل وارد نمی‌شود (روزنه‌ها حداقل حدود $3d_p$ برابر قطر حباب) از یکدیگر فاصله دارند). روابط برای تعیین قطر حباب‌های گازی در سه حالت ارائه شده‌اند:

۱- **شدت جریان‌های بسیار کم گاز:** برای مایعاتی مثل آب، قطر حباب از تساوی نیروی شناوری بر روی حباب که می‌خواهد حباب را از روزنه خارج

$$d_p = \left(\frac{6d_o \sigma g_c}{g \Delta \rho} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{نماید } \left(\frac{\pi}{6} \right) d_p^3 \Delta \rho \frac{g}{g_c}$$

با نیروی حاصل از کشش سطحی که تمایل به حفظ حباب در روزنه را دارد $(\pi d_o \sigma)$ ، محاسبه می‌شود:

در این رابطه، d_o قطر روزنه، σ کشش سطحی و ρ چگالی می‌باشد.

۲- **شدت جریان‌های متوسط گاز:** در این حالت قطر حباب‌ها بزرگ‌تر از حالت قبل است و با این وجود که تقریباً حباب‌های یکنواختی ایجاد می‌شوند،

$$d_p = 0.0287 d_o^{\frac{1}{2}} Re_o^{\frac{1}{4}}$$

ولی این حباب‌ها به شکل زنجیر بوده و مجزا از یکدیگر نیستند. برای سیستم هوا - آب رابطه مقابل ارائه شده است:

$$d_p = \left(\frac{72 \rho_L}{\pi^2 g \Delta \rho} \right)^{\frac{1}{5}} Q_{G_o}^{0.4}$$

در آن d_p و d_o بر حسب متر و $Re_o = \frac{d_o V_o \rho_G}{\mu_G}$ است. برای سایر گازها و مایعات داریم:

در این روابط ρ_L و ρ_G چگالی مایع و گاز، μ_G ویسکوزیته گاز، V_o سرعت از درون یک روزنه و Q_{G_o} شدت جریان حجمی گاز به ازای هر روزنه می‌باشد.

۳- **شدت جریان‌های زیاد گاز:** در این حالت جت‌های گاز از روزنه‌ها خارج شده و در فاصله‌ای از آنها به صورت حباب در می‌آیند. در این حالت، حباب‌ها

نسبت به حالت قبل کوچک‌تر بوده و اندازه آنها یکنواخت نمی‌باشد. برای سیستم هوا - آب و روزنه‌هایی با اندازه‌ای در حدود 0.4 تا $1/6$ میلی‌متر رابطه

$$d_p = 0.071 Re_o^{-0.05}$$

پیشنهاد شده است که d_p بر حسب متر است.

سرعت صعود (سرعت حد) حباب‌های منفرد

زمانی که نیروی شناوری با نیروی مقاوم وارد بر حباب‌ها برابر شود، سرعت حد پایدار آغاز می‌گردد. در

این حالت رابطه سرعت حد با قطر حباب‌ها به صورت شکل مقابل می‌باشد.

منطقه یک ($d_p < 0.7 \text{ mm}$): حباب‌ها کروی شکل بوده و شبیه کره‌های صلب رفتار می‌کنند.

$$V_t = \frac{g d_p^2 \Delta \rho}{18 \mu_L}$$

سرعت صعود حباب‌ها با استفاده از قانون استوک به دست می‌آید:

$$\mu_L = \text{ویسکوزیته مایع} \quad , \quad V_t = \text{سرعت حد}$$

منطقه دو ($0.7 \text{ mm} < d_p < 1.4 \text{ mm}$): در این منطقه، گاز در داخل حباب دارای چرخش است و در این حالت سرعت سطحی مخالف صفر می‌باشد.

در نتیجه، حباب سریع‌تر از کره صلب با قطر برابر با آن، صعود می‌کند. در این حالت V_t را با رسم خط مستقیمی بین نقاط A و B در شکل به دست

می‌آورند.

منطقه سه ($d_p > 1.4 \text{ mm}$), ($1.4 \text{ mm} < d_p < 6 \text{ mm}$): در این ناحیه، حباب‌ها کروی نبوده و هنگام صعود یک مسیر زیگزاگ و یا هزلولی را طی

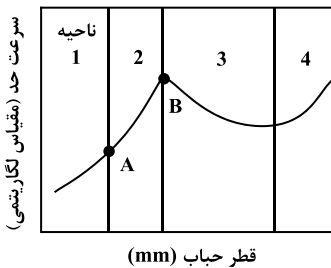
می‌کنند. در منطقه چهار، حباب‌ها، به شکل کلاهک کروی شکل در می‌آیند. در مناطق سه و چهار، در صورتی که ویسکوزیته مایع کم باشد، خواهیم داشت:

$$V_t = \sqrt{\frac{2 \sigma g_c}{d_p \rho_L} + \frac{g d_p}{2}}$$

مجموعه‌ای از حباب‌ها:

رفتار تعدادی از حباب‌ها به صورت یک مجموعه حباب، کاملاً متفاوت با حباب‌های تنها خواهد بود. در این حالت سرعت صعود حباب‌ها کمتر و قطر

حباب‌ها، به خاطر تلاطم مایع، متفاوت است. در این حالت ممکن است حباب‌ها بشکنند و نیز در اثر برخورد با یکدیگر، بهم بیوندند.



ماندگی

ماندگی گاز (ϕ_G)، عبارت است از جزء حجمی مخلوط گاز - مایع موجود در مخزن که توسط گاز اشغال می‌شود. اگر سرعت ظاهری را که عبارت از شدت حجمی گاز تقسیم بر سطح مقطع مخزن است با V_G نشان دهیم، سرعت حقیقی گاز نسبت به دیواره‌های مخزن برابر با $\frac{V_G}{\phi_G}$ خواهد گردید. در صورتی که

فاز مایع هم‌جهت با گاز از پایین به بالا حرکت نماید و سرعت آن نسبت به دیواره‌های مخزن برابر $\frac{V_L}{(1-\phi_G)}$ باشد، سرعت نسبی گاز و مایع و یا سرعت

$$V_S = \frac{V_G}{\phi_G} - \frac{V_L}{1-\phi_G}$$
 لغزش (slip velocity) عبارت است از:

اگر علامت V_L برای مایعی که در خلاف جهت گاز حرکت می‌کند، منفی باشد، این معادله برای تعیین سرعت لغزش یک سیستم با جریان‌های مخالف مایع و گاز نیز می‌تواند استفاده شود.

انتقال جرم

در کلیه سیستم‌های عملی حباب گاز در مایع، مقاومت انتقال جرم در فاز مایع، به شدت کنترل کننده است و نیازی به اطلاع از ضرایب انتقال جرم در فاز گاز نمی‌باشد. در این حالت ضرایب انتقال جرم فاز مایع با ۱۵ درصد تقریب از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Sh_L = \frac{F_L d_p}{CD_L} = 2 + b' Re_G^{0.779} Sc_L^{0.546} \left(\frac{d_p g^{\frac{1}{2}}}{D_L^{\frac{1}{2}}} \right)^{0.116}$$

در این رابطه C غلظت حجمی مولی مایع، D_L ضریب نفوذ در فاز مایع و F_L ضریب انتقال جرم است. مقدار b' برای تک حباب‌های گاز برابر ۰/۰۶۱ و

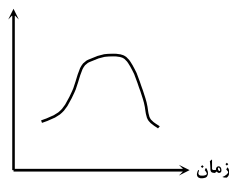
برای مجموعه حباب‌های گاز، ۰/۱۸۷ می‌باشد. عدد رینولدز فاز گاز را با استفاده از سرعت لغزش به دست می‌آورند:

در تک حباب‌های گاز، $\phi_G = 0$ و $V_S = V_t$ است.

مخازن هم‌زن دار

هم زدن مکانیکی مایعات، به منظور پراکنده کردن جامدات، مایعات و گازها در درون مایعات مناسب است. این هم‌زن‌ها می‌توانند تلاطمی با شدت زیاد تولید کنند که نه تنها موجب رسیدن به ضرایب انتقال جرم بالا می‌شود، بلکه برای پراکنده کردن مؤثر مایعات و گازها در یکدیگر نیز ضروری است.

منحنی روبرو تغییرات توان مصرفی هم‌زن را با زمان نشان می‌دهد. ناحیه صعودی مربوط به فاصله زمانی شروع به کار هم‌زن تا رسیدن به دور ثابت است. ناحیه‌ای که توان ثابت است مربوط به حالتی است که دور هم‌زن ثابت شده است و ناحیه نزولی مربوط به زمانی است که گاز به سیستم اضافه می‌شود که با افزایش دبی گاز، توان مصرفی کاهش می‌یابد.



ضرایب انتقال جرم

در مورد مخازن هم‌زن‌دار، تمام مقاومت انتقال جرم در فاز مایع قرار دارد و برای حباب‌های گاز با اندازه‌هایی که در مخازن هم‌زن دیده می‌شود، رابطه زیر

$$Sh_L = 2 + 0.31 Ra^{\frac{1}{3}}$$
 برقرار است:

که در این رابطه عدد ریلی (Rayleigh) به صورت $\frac{d_p \Delta \rho g}{D_L \mu_L}$ می‌باشد. این معادله مشخص می‌سازد که k_L مستقل از توان هم‌زن است، این بدان جهت

است که برای مخلوط‌های گاز - مایع، $\Delta \rho$ به اندازه‌ای بزرگ است که معمولاً g در حرکت حباب بیش از توان هم‌زن در تعیین شدت انتقال جرم، مؤثر واقع می‌شود. چون یک هم‌زن با پره توربینی که با طراحی صحیح ساخته شود، اختلاط بسیار کاملی را ایجاد می‌کند، پس می‌توان غلظت فاز مایع را در سرتاسر ظرف یکنواخت در نظر گرفت.

بنابراین یک مخزن دارای هم‌زن، فاقد امتیازات یک سیستم مداوم با جریان‌های مخالف خواهد بود. اعداد بی‌بعد مهم دیگر که در مخازن هم‌زن‌دار به کار

می‌روند عبارت‌اند از: عدد رینولدز ($Re = \frac{d_i N \rho_L}{\mu_L}$)، عدد فرود ($F_r = d_i \frac{N^2}{g}$)، عدد توان ($P_o = \frac{P g_c}{\rho N^3 d_i^5}$) و همچنین عدد بی‌بعد وبر در مورد

سیستم‌های دو فازی به صورت $we = \rho u^2 \frac{dp}{\sigma g_c}$ می‌باشد. در این روابط d_i قطر پره هم‌زن، N سرعت هم‌زن، P توان پره هم‌زن، u سرعت متوسط و

ρ_L و μ_L به ترتیب دانسیته و ویسکوزیته فاز مایع می‌باشند.

عملیات واحد



مدرسارن شریف

فصل اول

«تقطیر»

مقدمه

تقطیر روشی مستقیم جهت جداسازی سازندگان یک محلول است که براساس توزیع مواد بین فازهای مایع و گاز استوار می‌باشد. بنابراین در مواردی به کار می‌رود که کلیه سازندگان در هر دو فاز موجود باشند.

در این عملیات به جای وارد کردن ماده جدیدی به داخل محلول جهت ایجاد فاز دوم، نظیر آنچه در فرآیندهای جذب و دفع انجام می‌گیرد، فاز جدید از محلول اولیه در اثر تبخیر و میعان حاصل می‌شود.

در فرآیند تقطیر، تفاوت میان فاز جدید و فاز اصلی در میزان گرمای (انرژی) آنهاست. حرارت معمولاً به سادگی داده و یا گرفته می‌شود ولی مسلماً هزینه چنین عملیاتی را باید در نظر گرفت. در فرآیند جذب یا دفع در اثر افزودن یک ماده خارجی به محلول اصلی، محلول جدیدی حاصل می‌شود که به نوبه خود بایستی توسط یکی از فرآیندهای نفوذی، جداسازی شود، مگر آنکه محلول جدید به همان صورت قابل استفاده باشد.

فرآیند تقطیر دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد. در عمل جذب و یا فرآیندهای مشابه، معمولاً یک ماده خارجی به محلول افزوده می‌شود تا فاز جدیدی حاصل گردد. از میان حلال‌های موجود، می‌توان حلالی را برگزید که دارای بیشترین اثر جداسازی باشد. ولی در تقطیر چنین انتخابی وجود ندارد. فاز گازی که در اثر گرما از فاز مایع حاصل می‌شود، مسلماً متشکل از همان اجزایی خواهد بود که در مایع نیز موجود می‌باشد. چون فاز گاز، از نظر شیمیایی شباهت زیادی با فاز مایع دارد، بنابراین تغییرات حاصل در ترکیب نسبی که از توزیع اجزای میان دو فاز ناشی می‌شود، معمولاً چندان زیاد نیست. با این وجود، جداسازی مستقیم و تهیه محصولات خالص بدون نیاز به عملیات بعدی که معمولاً توسط تقطیر امکان‌پذیر است، این فرآیند را به عنوان مهم‌ترین عملیات انتقال جرم درآورده است.

برخلاف فرآیند تبخیر، تقطیر در جداسازی محلول‌هایی به کار می‌رود که کلیه سازندگان آن به میزان قابل توجهی فرار باشند. از جمله محلول‌هایی که سازندگان آن فرار هستند، می‌توان محلول آمونیاک در آب را ذکر کرد. در اثر تماس محلول آمونیاک با هوا که در مایع غیر محلول است، آمونیاک را می‌توان از محلول دفع کرد ولی در این صورت آمونیاک به صورت خالص بدست نمی‌آید، بلکه همراه با بخار آب خواهد بود. اما با اعمال گرما ممکن است قسمتی از محلول را تبخیر و یک فاز بخار به وجود آورد که شامل آب و آمونیاک باشد. چون فاز گاز نسبت به فاز مایع، از آمونیاک غنی‌تر است، به این ترتیب تا حدودی جداسازی انجام گرفته است. بنابراین با فرآیند تقطیر، می‌توان جداسازی را تا حد مطلوب انجام داده و هر دو سازنده محلول را به صورت خالص بدست آورد.

خصوصیات ویژه تقطیر:

۱- Feasible: یعنی انجام این فرآیند در دما، فشار و اندازه منطقی برج، امکان‌پذیر است.

۲- Flexible: انعطاف‌پذیر است، یعنی هم در ظرفیت کم و هم ظرفیت بالا، ممکن است.

۳- No contamination: آلودگی نداریم، چرا که از ماده دیگری در تقطیر استفاده نمی‌شود.

۴- No solid: در تقطیر نه جامد تشکیل می‌شود و نه به جامد احتیاج است.

۵- Multi staging: به راحتی، به صورت چند مرحله‌ای در می‌آید.

نکته ۱: بزرگ‌ترین عیب تقطیر این است که انرژی زیادی احتیاج دارد و اتلاف انرژی در آن زیاد است.

مثال ۱: در عملیات جداسازی، در کدام فرآیند نیاز به حلال نیست؟

(۴) تقطیر

(۳) جذب گاز

(۲) استخراج

(۱) دفع گاز

پاسخ: گزینه «۴» در عملیات تقطیر به جای وارد کردن حلال، فاز دوم در اثر تبخیر و میعان تشکیل می‌شود.

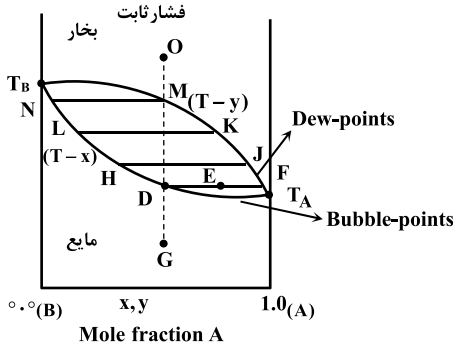


درسنامه (۱): تعادلات بخار - مایع

برای ماده تک جزئی، تعادل توسط منحنی فشار - دما تعیین می‌شود. اما در عمل تقطیر با حداقل دو جزء سروکار داریم. بنابراین به جز فشار (P) و دما (T)، با غلظت اجزاء نیز سروکار داریم. پس نمودار فازی برای سیستم دو جزئی، سه بعدی است. برای تبدیل نمودار سه بعدی به نمودار دو بعدی، یک پارامتر را ثابت می‌گیریم (معمولاً P یا T). معمولاً عمل تقطیر در دما و یا فشار ثابت انجام می‌گیرد.

نکته ۲: افت فشار در طول برج اثر چندانی روی تعادل نمی‌گذارد (مثلاً در هر Sieve tray افت فشار ۴mmHg است). منظور از فشار برج، فشار بالای برج است. فشار پائین برج برابر فشار بالای برج به اضافه افت فشار در طول برج است.

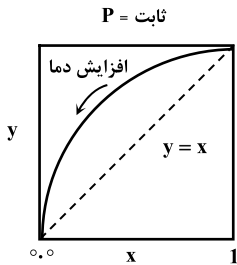
تعادل در فشار ثابت (نمودار T-xy)



محلول مایعی شامل دو جزء A و B با غلظت مشخص G را در نظر می‌گیریم (A جزء فرارتر). اگر به آن حرارت داده شود، اولین حباب بخار در D ظاهر خواهد شد (غنی‌ترین بخار) که دارای ترکیب نسبی نقطه F است. حباب از سازنده فرارتر غنی است و به این دلیل منحنی پایینی را منحنی نقاط حباب - دما (Bubble Points) می‌نامند.

با تبخیر بیشتر محلول، فاز مایع نقصان می‌یابد و مثلاً مخلوطی حاصل می‌شود که فاز مایع آن در نقطه L و فاز بخار در حال تعادل با مایع در نقطه K قرار دارد. البته مقادیر نسبی دو سازنده در کل مخلوط کماکان با نقطه G داده می‌شود. آخرین ذره مایع در M تبخیر می‌شود و دارای ترکیب نسبی نقطه N است. داغ کردن مخلوط در مسیر MO صورت می‌گیرد.

بر خلاف ماده خالص که در فشار ثابت تنها دارای یک نقطه جوش است، یک محلول در یک محدوده دما از نقطه حباب تا نقطه شبنم می‌جوشد. بنابراین برای محلول نقطه جوش معنی ندارد و در طول فرآیند جوش، غلظت در دو فاز تغییر می‌کند.



به خطوطی مثل HJ که ترکیب نسبی تعادلی فازهای بخار و مایع را نشان می‌دهد، خط tie گفته می‌شود. این ترکیب‌های نسبی تعادلی را می‌توان توسط یک نمودار توزیع تعادلی برحسب X و y مطابق شکل روبرو نشان داد. برای رسم این نمودار، دو انتهای خطوط tie را می‌خوانیم. ملاحظه می‌شود که همواره $y > x$ است که بیان‌گر فراریت جزء A است. این منحنی، بیان‌گر منحنی تعادل است.

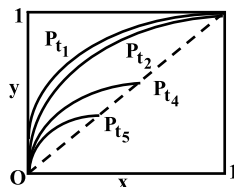
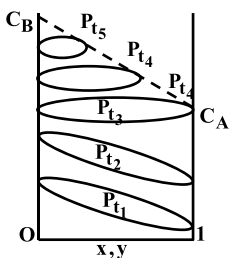
مخلوط‌های مایع و بخار در حال تعادل با یکدیگر دارای فشار و دمای یکسانی می‌باشند. به نحوی که خطوط رابط افقی نظیر DF مخلوط‌های تعادلی در D و F را به یکدیگر ارتباط می‌دهد. تعداد چنین خطوط رابطی در این نمودار بی‌نهایت است. نقطه E مشخص‌کننده یک مخلوط دو فازی متشکل از یک فاز مایع با ترکیب نسبی D و یک فاز بخار با ترکیب نسبی F است و مقادیر نسبی دو فاز به نحوی است که نقطه E مبین کل مخلوط می‌شود.

$$\frac{\text{مول‌های D}}{\text{مول‌های F}} = \frac{\text{پاره‌خط EF}}{\text{پاره‌خط DE}}$$

مقادیر نسبی فازهای در حال تعادل بوسیله طول پاره‌خط‌های واقع بر خط رابط به صورت مقابل تعیین می‌گردد:

نکته ۳: هرچه فشار بیشتر شود دو نقطه Dew-point و Bubble - point به هم نزدیک می‌شوند و جداسازی نیز مشکل می‌شود. همچنین در منحنی xy هرچه فشار افزایش یابد، منحنی تعادل به خط $y = x$ نزدیک‌تر می‌گردد.

در شکل‌های زیر اثر فشار نشان داده شده است.



$$P_{t_5} > P_{t_4} > P_{t_3} > P_{t_2} > P_{t_1}$$



مدرسان شریف

فصل دوم

«استخراج مایع – مایع»

درسنامه (۱): تعاریف



مقدمه

در استخراج مایع - مایع که به آن استخراج با حلال (Solvent Extraction) نیز گفته می‌شود، اجزای یک محلول مایع به وسیله تماس با یک مایع نامحلول دیگر جدا می‌شود. اساس این فرآیند بر حلالیت است. اگر موادی که جزئی از محلول اولیه هستند، به مقدار متفاوتی در دو فاز مایع پخش شوند، جداسازی نسبی حاصل می‌شود که این حالت را می‌توان با چند مجاورسازی، جذب گازی و یا تقطیر بهبود بخشید. برای مثال اگر محلولی از اسید استیک در آب با مایعی مثل اتیل استات مخلوط و به هم زده شود، پس از توقف هم زدن، از هم جدا می‌شوند و می‌توان با سر ریز کردن آن دو را از هم جدا کرد. در این حالت چون نسبت اسید به آب در لایه استری با محلول اولیه و محلول آبکی باقی مانده متفاوت است، عمل جداسازی تا حدودی انجام شده است. این حالت مثالی از مجاور سازی مرحله‌ای است که می‌تواند به صورت مداوم یا ناپیوسته انجام شود. مایع آبکی باقی مانده را می‌توان برای کاهش مقدار اسید، یا دوباره با استر مجاور ساخت و یا در یک سیستم مرحله‌ای با جریان ناهم سو این عمل را انجام داد.

حلالیت در استخراج مثل فراریت در تقطیر است. شرط عملیات استخراج این است که خوراک و حلال به طور نسبی حل پذیر باشند.

در هر عمل استخراج باید حلال بازیابی شود. به دلیل حل پذیری نسبی حلال، دو فاز مایع ایجاد می‌گردد. جداسازی دو فاز مایع باید ممکن باشد یعنی بین دو فاز اختلاف دانسیته وجود داشته باشد.

در عملیات استخراج نیز مثل تقطیر، امکان چند مرحله‌ای شدن و جریان‌های مختلف (هم‌جهت، غیر هم‌جهت و متقاطع) وجود دارد. معمولاً اگر جداسازی به روش تقطیر ممکن نباشد، از روش‌های دیگر مثل استخراج استفاده می‌شود.

موقعی که نمی‌توان از تقطیر استفاده کرد:

- ۱- ضریب فراریت نزدیک به یک باشد.
 - ۲- نقطه جوش اجزاء و گرمای نهان تبخیر بالا باشد.
 - ۳- مواد به حرارت حساس باشند، مثل مواد دارویی و خوراکی.
 - ۴- وجود آزنوتروپ که در این صورت جداسازی محدود می‌شود.
- در عملیات استخراج، محصولی که از حلال غنی است، استخراج شده (Extract) و مایع باقی‌مانده که حل شونده از آن جدا شده است، پس ماند (Raffinate) نامیده می‌شود.



حالت‌های استفاده از عمل استخراج

از عمل استخراج مایع در حالت‌هایی استفاده می‌شود که عمل استخراج به طور مستقیم قابل رقابت با فرآیندهای جداسازی دیگر است و یا تنها روش جداسازی به نظر می‌رسد.

۱- در رقابت با دیگر عملیات انتقال جرم: در این حالت قیمت نسبی اهمیت پیدا می‌کند. تقطیر و تبخیر جزء روش‌های جداسازی مستقیم هستند و محصول به دست آمده تقریباً خالص است. در استخراج، محصول به صورت محصول جدیدی است که اغلب با تقطیر یا تبخیر خالص می‌شود. برای مثال در تقطیر محلول رقیق اسید به سختی از آب جدا می‌شود، ولی با استخراج توسط یک حلال مناسب و سپس عمل تقطیر، به صورت نسبی جدا می‌شود. برای محلول‌های رقیق، وقتی که آب باید از آن جدا شود، عمل استخراج در مقایسه با تقطیر اقتصادی‌تر است. به خصوص که حرارت تبخیر بیشتر حلال‌های آلی خیلی کمتر از آب است. در مواردی که برای جلوگیری از تجزیه حرارتی مواد به دمایی کمتر نیاز داریم، استخراج می‌تواند جایگزین مناسبی برای تقطیر یا تبخیر باشد. برای مثال، می‌توان اسیدهای چربی را که دارای زنجیر طولانی هستند با عمل تقطیر در خلأ از روغن گیاهی جدا کرد، اما نوع اقتصادی‌تر این جداسازی، استخراج با پروپان مایع است.

۲- جایگزینی برای روش‌های شیمیایی: فرآیندهای شیمیایی مواد را مصرف می‌کنند، در نتیجه موضوع دور ریزی محصول جانبی مطرح می‌شود. در استخراج مایع، واکنشی صورت نمی‌گیرد و محصول‌های جانبی نیز به دست نمی‌آید و در نتیجه هزینه آن کمتر است. جداسازی فلزاتی نظیر اورانیوم، وانادیم، هافنیم، زیر کونیوم، تنگستن، مولیبدن مواد حاصل از فرآیندهای تولید انرژی اتمی، توسط استخراج با حلال، اقتصادی‌تر است. با وجود محاسبه، قیمت بازیابی حلال در محاسبات نهایی، حتی برای خالص کردن فلزات کم قیمت نظیر مس و مواد معدنی مثل اسید فسفریک، اسید بوریک و مشابه آنها به شکل اقتصادی‌تر، از روش استخراج مایع استفاده می‌شود.

۳- جداسازی‌هایی که با روش‌های دیگر ممکن نیست: در تقطیر، وقتی که در اثر حرارت دو فاز، مایع و بخار حاصل می‌شوند، الزاماً از مواد مشابهی ساخته شده‌اند و در نتیجه از نظر شیمیایی مشابه هستند. بنابراین جداسازی به علت اختلاف در فشار بخار مواد حاصل شده است. در استخراج مایع، جزء اصلی دو فاز از نظر شیمیایی متفاوت هستند و این امر، جداسازی به صورت شیمیایی را ممکن می‌سازد.

برای مثال هیدروکربن‌های آروماتیک و پارافین را که جرم نزدیکی دارند نمی‌توان با تقطیر جدا کرد (چون فشار بخار آنها خیلی به هم نزدیک است) ولی می‌توان آن‌ها را با استخراج توسط حلال‌هایی مثل دی‌اکسید گوگرد مایع، دی‌اتیلن گلیکول یا سولفولان به راحتی از هم جدا کرد. تقطیر استخراجی برای این حالت مناسب است ولی این عمل استخراج فاز بخار با یک حلال است در حالی که استخراج مایع، استخراج از فاز مایع است. عموماً حلال استفاده شده در دو حالت یکسان است. بعضی از محصولات دارویی، مثل پنسیلین، به صورت مخلوط‌های پیچیده‌ای به دست می‌آیند که در این موارد، استخراج اقتصادی‌ترین روش است.

کلمه مثال ۱: فرآیند استخراج مایع - مایع بر چه اساسی است؟

(۴) اختلاف فشار

(۳) اختلاف دما

(۲) فراریت

(۱) حلالیت

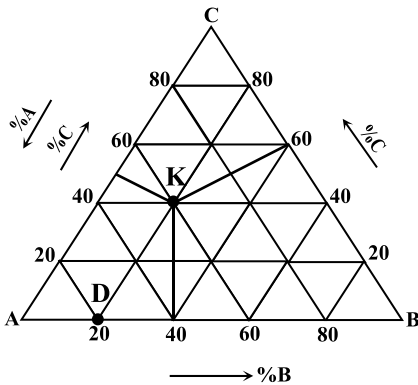
پاسخ: گزینه «۱» عمل تقطیر براساس فراریت و استخراج مایع - مایع براساس حلالیت اجزاء در یکدیگر است.



درسنامه (۲): محاسبات در فرآیند استخراج مایع - مایع



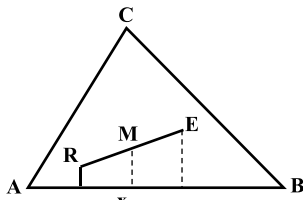
دیگرام مثلثی



در استخراج مایع - مایع، چون سه جزء داریم، از دیگرام مثلثی برای محاسبات استفاده می‌شود. قرارداد: حلال اولیه را با A، جزء حل شده (Solute) را با C و حلال استخراج (Solvent) را با B نشان می‌دهیم. در استخراج، محاسبات بر اساس کسر جرمی است. جزء جرمی C در فاز Extract را با y و جزء جرمی آن در فاز Raffinate را با x نشان می‌دهیم. در واقع خوراک شامل A و C است که هدف جداسازی آنها توسط حلال B می‌باشد. پس B باید انتخاب‌پذیر (Selective) عمل کند و جزء C را نسبت به A بیشتر در خود حل کند. پس در فازها توزیع جزء C را داریم.

در دیگرام مثلثی، جمع فواصل هر نقطه داخل مثلث تا سه ضلع برابر با ارتفاع مثلث است. پس می‌توان ارتفاع مثلث را برابر ۱۰۰٪ غلظت قرار داده و فواصل از سه ضلع را ترکیب درصدهای سه جزء اختیار کرد. هر رأس نشان‌دهنده یکی از مواد به صورت خالص است. در مثلث متساوی الاضلاع، فاصله عمودی از هر نقطه، مثل K، بر ضلع AB، نشان‌دهنده درصد C در مخلوط K است و فاصله تا ضلع AC درصد B و فاصله تا ضلع CB درصد A را نشان می‌دهد. پس $x_K = ۰/۴$ (درصد C) است. هر نقطه که روی اضلاع مثلث قرار داشته باشد، نشان‌دهنده یک مخلوط دو تایی است. به طور مثال نقطه D روی شکل، یک نقطه دو تایی شامل ۸۰ درصد A و ۲۰ درصد B است.

اگر مقدار R کیلوگرم از یک مخلوط در نقطه R به E کیلوگرم از مخلوط در E اضافه شود، مخلوط جدید M روی خط RE حاصل می‌شود، به صورتی که:



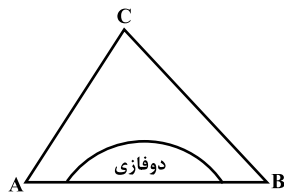
$$\frac{R}{E} = \frac{ME}{MR} = \frac{x_E - x_M}{x_M - x_R}$$

قانون اهرم

$$\begin{cases} M = E + R \\ Mx_M = Rx_R + Ey_E \end{cases}$$

انواع سیستم‌های استخراج

اضافه کردن حلال B به یک مخلوط دو جزئی شامل A و C، ممکن است منجر به یکی از سه حالت زیر شود:



- ۱- یک محلول کاملاً یکنواخت تشکیل شده که در این صورت حلال مناسب نیست (محلول تک فازی).
- ۲- حلال (B) با حلال اولیه (A) کاملاً غیر محلول باشد. این حالت بسیار مناسب بوده و جداسازی راحت است. در این مورد نیازی به دیگرام مثلثی نیست و از مختصات $x'y'$ استفاده می‌شود.
- ۳- یک جفت یا بیش از یک جفت مایع حل‌پذیر نسبی تشکیل شود. این مورد، خود سه حالت دارد: الف) یک جفت به طور نسبی قابل حل باشد و دو جزء دیگر کاملاً حل شود، مثل آب (A)، کلروفرم (B) و استون (C). نمودار چنین سیستمی به صورت مقابل است: بنابراین در این سیستم‌ها، یک جفت (A,B) به طور نسبی حل شده و دو جفت (A,C) و (B,C) به طور کامل حل می‌شوند.



مدرسان شریف

فصل سوم

«استخراج از جامدات (Leaching)»

درسنامه: مفاهیم و محاسبات فرآیند استخراج از جامدات



مقدمه

عمل استخراج از جامد، حل شدن انتخابی یک یا چند جزء از یک مخلوط جامد است که با یک محلول مایع تماس یافته است. صنایع فلزشناسی، بزرگترین استفاده کننده عملیات استخراج از جامد می‌باشند. مفهوم استخراج از جامد، از نفوذ مایع به درون بستر ثابتی از جامدات ریشه می‌گیرد ولی امروزه معانی مختلفی برای این عملیات به کار می‌رود. آب شویی اگرچه مفهوم شستن قلیا از خاکستر چوب را شامل می‌شود، کمتر به عنوان مترادفی برای استخراج از جامد به کار می‌رود. عبارت استخراج هم، با اینکه برای بسیاری از عملیات جداسازی دیگر که از طریق انتقال جرم یا واکنش‌های شیمیایی صورت می‌گیرند، به کار می‌رود، در اینجا نیز بسیاری از مواقع استفاده می‌شود. وقتی که حل شونده‌ای به نسبت زیاد روی سطح جامد نامحلول باشد و فقط با حلال شسته شود، به آن خالص سازی با شستشو یا شستن گفته می‌شود.


در این عملیات فاز جامد، باید به شکل مناسب (مثلاً به صورت ذرات ریز یا در چغندر قند باید به صورت نوارهای باریک) در آید. عوامل مؤثر بر شدت استخراج از جامد:

۱- **اندازه ذرات:** هر چه ریزتر باشند، تماس با حلال بیشتر است و جداسازی راحت‌تر صورت می‌گیرد. ذرات خیلی ریز (fine) باعث تشکیل سوسپانسیون می‌شود که جداسازی بعدی را مشکل می‌سازد.

۲- **حلال:** حلال باید انتخاب پذیری بالایی داشته باشد و بسیار مهم است که ویسکوزیته آن پایین باشد چرا که نفوذ و شدت انتقال جرم بالاتر می‌رود. در اثر وجود جامد در حلال، در طول عملیات، ویسکوزیته حلال زیاد می‌شود.

۳- **دما:** هر چه دما بیشتر باشد، حلالیت افزایش می‌یابد. دمای زیاد موجب تخریب و یا تشکیل آنزیم می‌گردد. دمای زیاد، ضریب نفوذ را بالا می‌برد و ویسکوزیته را هم کاهش می‌دهد.

۴- **هم زدن سیال:** هر چه بیشتر باشد، شدت استخراج بیشتر است البته در اغلب موارد به دلیل آنکه نفوذ در جامد کنترل کننده سرعت استخراج است هم زدن تأثیر چندانی روی این عامل ندارد. هم زدن زیاد ممکن است، سوسپانسیون تشکیل دهد.


نکته ۱: سرعت استخراج با افزایش کشش سطحی بین حلال و حل‌شونده افزایش می‌یابد. 

معمولاً بهتر است عمل استخراج در بالاترین درجه حرارت انجام گیرد، زیرا درجه حرارت بالاتر، باعث حلالیت بیشتر حل شونده در حلال می‌شود و در نتیجه غلظت نهایی در محلول مادر بیشتر می‌شود. در دمای بالاتر، ویسکوزیته مایع کمتر و نفوذپذیری آن بیشتر است که هر دو سبب افزایش سرعت استخراج می‌شوند ولی در بعضی مواد، مانند چغندر قند، درجه حرارت‌های خیلی بالا سبب استخراج حل‌شونده‌های نامطلوب یا تخریب شیمیایی جامد می‌شود.

محاسبات مربوط به فرآیند استخراج از جامدات

فازهای موجود در این فرآیند عبارت‌اند از: ۱- slurry (دوغاب): حاوی جامد

۲- clear Solution (محلول شفاف): حلال + جزء حل شده

نکته ۲: چون جداسازی مایع و جامد به صورت مکانیکی، به طور کامل ممکن نیست، زمان تماس کافی وجود ندارد و همچنین به دلیل پدیده 

جذب سطحی، راندمان leaching، صد درصد نیست.



در تعادل سه جزء وجود دارد:

Solute ، B جزء A ، Solid ، جزء B ، Solvent : جزء A

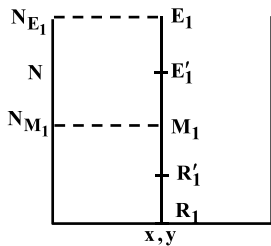
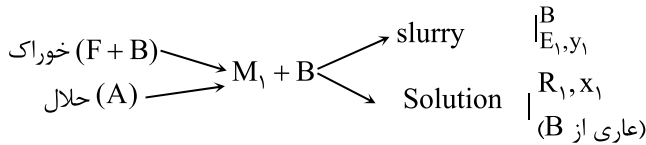
$$\text{Slurry در فاز (E): } y = \frac{\text{kg}(C)}{\text{kg}(A+C)}, N = \frac{\text{kg}(B)}{\text{kg}(A+C)}$$

در اینجا محاسبات بر مبنای عاری از جامد (B-free) انجام می‌شود:

$$\text{در فاز محلول (R): } x = \frac{\text{kg}(C)}{\text{kg}(A+C)}, N = 0$$

فاز دوغاب شامل هر سه جزء A ، B و C است ولی فاز محلول شفاف شامل A و C می‌باشد.

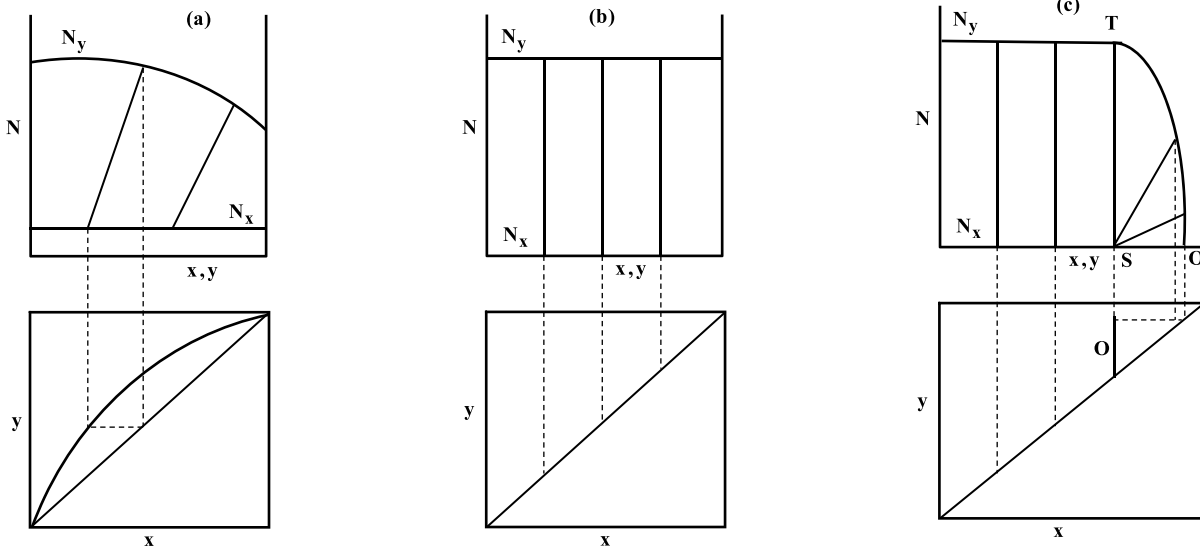
چون محاسبات بر مبنای B-free است، خوراک را به صورت F+B می‌نویسیم:



چون E_1 و R_1 از یک جنس هستند (عاری از B)، در حالت مطلوب $x_1 = y_1$ می‌باشد و خط tie عمودی است. پس در حالت ایده‌آل (راندمان ۱۰۰٪) همیشه tieها عمودی بوده و R_1 دارای $N = 0$ است.

E'_1 و R'_1 برای وقتی است که جداسازی مکانیکی مطلوب نباشد و کمی جامد همراه مایع باشد. در حالتی که محلول ایده‌آل نباشد، tieها عمودی نیست.

انواع نمودارهای تعادلی

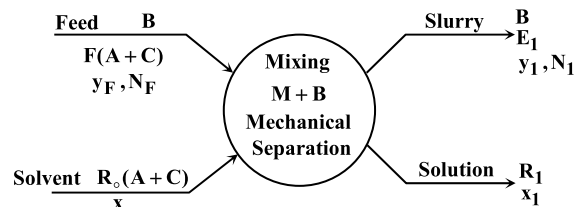


(a): این نمودار مربوط به حالتی است که ۱- زمان تماس کافی نبوده و مقداری از جزء C در جامد باقیمانده است. پس خط tie عمودی نیست و $y \neq x$.
 ۲- جذب سطحی جزء حل شده بر سطح جامد وجود دارد. ۳- جزء حل شده در جامد B حل پذیر است. پس در حالت تعادل، دو فاز غیریکنواخت توزیع پیدا می‌کند.

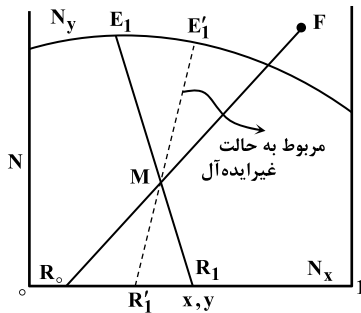
(b): در این حالت همه چیز مطلوب است. tieها عمودی است و هیچ یک از سه پدیده فوق اتفاق نیفتاده است. در این حالت ضریب توزیع برابر یک بوده و N ثابت است. به این شرایط، جریان زیرین ثابت (constant underflow) گفته می‌شود.

(c): مربوط به حالتی است که هیچ محلول شفاف غنی‌تر از S بوجود نمی‌آید. پس tieهای سمت راست TS، در نقطه S همگرا می‌شوند. یعنی در این حالت، حلالیت جزء C در حلال، بیشتر از نقطه S نیست.

استخراج از جامد تک مرحله‌ای (Single Stage leaching)



یک مرحله استخراج یا شستشو را مطابق شکل مقابل در نظر می‌گیریم. دایره نشان‌دهنده کل عملیات از جمله اختلاط جامد و حلال و جداسازی مکانیکی فازهای نامحلول حاصل، به هر روشی است. از آنجایی که در بیشتر موارد، جامد B در حلال حل نمی‌شود و محلول استخراج به صورت مایع شفاف به دست می‌آید، B موجود در جامد استخراج شده، همان است که در جامد استخراج شونده وجود دارد.



با توجه به تعریف N داریم:

$$B = FN_F = E_1 N_1 = M_1 N_{M_1}$$

$$F y_F + R_o x_o = E_1 y_1 + R_1 x_1 \quad \text{با داریم: (جزء C)}$$

$$F(1 - y_F) + R_o(1 - x_o) = E_1(1 - y_1) + R_1(1 - x_1) \quad \text{و از موازنه حلال A داریم:}$$

همچنین موازنه محلول (حلال + حل شونده یا $A + C$) به صورت زیر است:

$$F + R_o = E_1 + R_1 = M_1$$

اختلاط جامد استخراج شونده و حلال، مخلوطی با جرم M_1 را می‌دهد که عاری از B است، به طوری که:

$$N_{M_1} = \frac{B}{F + R_o} = \frac{B}{M_1}, \quad y_{M_1} = \frac{y_F F + R_o x_o}{F + R_o}$$

روابط را می‌توان روی نمودار N_{xy} (مطابق شکل) نشان داد. نقطه F نشان‌دهنده جامد استخراج شونده و R_o نشان‌دهنده حلال است. نقطه M_1 ، مخلوط کلی را نشان می‌دهد که روی خط واصل R_o و F می‌باشد. نقاط E_1 و R_1 ، نشان‌دهنده جریان‌های خروجی، در دو انتهای خط عبوری از M_1 هستند و غلظت آنها را می‌توان از روی نمودار به دست آورد. اگر داده‌های تعادلی نمودار N_{xy} ، بعد از زمان تماس طولانی مایع و جامد، به دست آمده باشند، بی‌نتیجه و ناقص بودن جداسازی مکانیکی مایع و جامد را به تنهایی نشان می‌دهند و در نتیجه در یک مرحله واقعی ممکن است نقص دیگری بر مبنای زمان تماس کوتاه باشد. جریان‌های خروجی را می‌توان با نقاط E'_1 و R'_1 روی نمودار نشان داد و بازه مرحله به صورت $E_{ME} = \frac{y_F - y'_1}{y_F - y_1}$ بیان می‌شود. اگر منحنی تعادلی تحت شرایط زمان تماس یک استخراج واقعی به دست آمده باشد، خط رابط $E_1 R_1$ ، مستقیماً غلظت جریان خروجی را می‌دهد. پس در کل می‌توان گفت دو عامل بر بازه عملیات مؤثر است:

- ۱- زمان تماس ناکافی $\leftarrow y_1 > x_1$
- ۲- زمان ته‌نشینی ناکافی $\leftarrow N_{R_1} \neq 0$

مثال ۱: فرآیند Leaching عبارت است از ...

- ۱) استخراج جامد به کمک گاز
 - ۲) استخراج جامد به کمک حلال
 - ۳) استخراج مایع - مایع
 - ۴) جذب سطحی
- پاسخ: گزینه «۲» Leaching، فرآیند جداسازی انتخابی اجزای یک جامد، توسط حلال مایع است.

مثال ۲: چرا خطوط بست (tie line) در فرآیند Leaching عمودی و به موازات یکدیگرند؟

- ۱) برای اینکه غلظت‌ها در هر مرحله ثابت است.
 - ۲) برای اینکه جسم حل‌شونده به طور کامل حل نمی‌شود.
 - ۳) برای اینکه غلظت جسم حل‌شونده در هر دو فاز یکی است.
 - ۴) برای اینکه منحنی‌های تعادل و تبادل با هم موازی هستند.
- پاسخ: گزینه «۳» زمانی که غلظت جزء حل‌شونده، به طور یکنواخت در هر دو فاز توزیع پیدا کند، خطوط tie عمودی و موازی یکدیگر خواهند بود.

مثال ۳: در نمودارهای تعادلی مربوط به فرآیند Leaching، چه موقع خطوط tie عمودی نیست؟

- ۱) زمان تماس کافی نباشد.
 - ۲) وجود جذب سطحی
 - ۳) جزء حل شده در جامد B حل‌پذیر باشد.
 - ۴) همه موارد صحیح است.
- پاسخ: گزینه «۴» در تمام موارد محلول غیرایده‌آل است و خطوط tie غیرعمودی هستند.

مثال ۴: کدام یک از عوامل زیر، در جهت شدت leaching مطلوب است؟

- ۱) ذرات درشت فاز جامد
 - ۲) گرانیوی بالای محلول
 - ۳) افزایش دما
 - ۴) انتخاب‌پذیری کم حلال
- پاسخ: گزینه «۳» هرچه دما بیشتر باشد، حلالیت افزایش می‌یابد.



مدرسان شریف

فصل چهارم

«عملیات مرطوب سازی»

مقدمه

فرآیندهایی که در مرطوب سازی مطرح است، در نتیجه تماس یک گاز با یک مایع خالص، که گاز در آن نامحلول است، روی می‌دهد. اگرچه چنین تحولاتی را به طور کلی فرآیندهای مرطوب سازی می‌نامند، هدف از اجرای آنها فقط مرطوب کردن گازها نیست، بلکه گاهی اوقات جهت رطوبت زدایی و سرد کردن گازها، اندازه‌گیری بخار موجود در گازها و سرد کردن مایعات نیز به کار می‌روند. ماده‌ای که در این موارد بین فازها انتقال می‌یابد، ماده تشکیل دهنده فاز مایع است که در طی تحول تبخیر شده و یا میعان می‌یابد. در این فصل لفظ بخار به ماده‌ای نظیر A اطلاق می‌شود که در فاز بخار قرار داشته و دمای آن نزدیک به نقطه میعان ماده در تحت فشار موجود باشد. هم‌چنین به ماده B که در ناحیه بخار داغ قرار دارد و از ناحیه میعان بسیار دور است، لفظ گاز تعلق می‌گیرد.

آنتالپی: انرژی داخلی (U) یک ماده، عبارت است از کل انرژی موجود در ماده که در اثر جنبش و استقرار نسبی اتم‌ها و مولکول‌های سازنده آن ماده حاصل می‌شود. مقدار مطلق انرژی داخلی یک ماده نامعلوم است ولی مقادیر نسبی آن را می‌توان از مقایسه با یک حالت تعریف شده اختیاری و استاندارد، محاسبه کرد. مجموع مقادیر انرژی داخلی و حاصل ضرب فشار در حجم یک ماده را، وقتی هر دو کمیت با واحدهای یکسانی بیان شده باشند، آنتالپی آن ماده می‌نامند.

$$H = U + PV$$

درسنامه: تعاریف و مفاهیم

رطوبت مطلق (رطوبت) و رطوبت مطلق مولی

نسبت جرم بخار به جرم گاز را رطوبت مطلق می‌نامند و آن را با Y' یا H نشان می‌دهند. اگر کمیت برحسب مول باشند، نسبت مذکور را رطوبت مطلق مولی گویند و آن را با Y نشان می‌دهند. اگر قانون گاز کامل برقرار باشد، داریم:

$$Y = \frac{y_A}{y_B} = \frac{\bar{P}_A}{\bar{P}_B} = \frac{\bar{P}_A}{P_t - \bar{P}_A} : \frac{\text{moles A}}{\text{moles B}}, Y' = Y \frac{M_A}{M_B} = \frac{\bar{P}_A}{P_t - \bar{P}_A} \frac{M_A}{M_B} : \frac{\text{mass A}}{\text{mass B}}$$

در این روابط M_B و M_A به ترتیب جرم مولکولی ماده A و B، y_A و y_B جزء مولی ماده A و B و \bar{P}_A و \bar{P}_B فشار جزئی اجزای A و B هستند. رطوبت مطلق جرمی، نخستین بار توسط گراونر (Grosvenor) ارائه شد و گاهی اوقات رطوبت گراونر نیز نامیده می‌شود.

کلمه مثال ۱: در مخلوطی از بخار بنزن (A) و گاز نیتروژن (B) در فشار کل ۸۰۰ mmHg و دمای ۶۰°C، فشار جزئی بنزن برابر با ۱۰۰ mmHg می‌باشد.

غلظت بنزن بر حسب رطوبت مطلق و رطوبت مطلق مولی به ترتیب کدام گزینه است؟ $M_B = ۲۸/۰۸$ $M_A = ۷۸/۰۵$

- | | | | |
|-----|--|-----|--|
| (۱) | $\frac{\text{بنزن kg}}{\text{نیتروژن kg}} = \frac{۰/۳۹۸}{۰/۱۴۳}$ | (۲) | $\frac{\text{بنزن kg}}{\text{نیتروژن kg}} = \frac{۰/۱۴۳}{۰/۳۹۸}$ |
| (۳) | $\frac{\text{بنزن kg}}{\text{نیتروژن kg}} = \frac{۰/۳۴۱}{۰/۱۳۴}$ | (۴) | $\frac{\text{بنزن kg}}{\text{نیتروژن kg}} = \frac{۰/۱۳۴}{۰/۳۴۱}$ |



پاسخ: گزینه «۱» با توجه به تعریف رطوبت مطلق مولی و رطوبت مطلق خواهیم داشت.

$$y_A = \frac{\bar{P}_A}{P_t} = \frac{100}{800} = 0/125$$

کسر مولی بنزن

$$y_B = 1 - y_A = 1 - 0/125 = 0/875$$

کسر مولی نیتروژن

$$Y = \frac{y_A}{y_B} = \frac{0/125}{0/875} = 0/143 \frac{\text{mol بنزن}}{\text{mol نیتروژن}}$$

رطوبت مطلق مولی

$$Y' = \frac{y_A M_A}{y_B M_B} = \frac{0/125 \cdot 78/05}{0/875 \cdot 28/08} = 0/398 \frac{\text{kg بنزن}}{\text{kg نیتروژن}}$$

رطوبت مطلق

مخلوط‌های گاز و بخار اشباع، رطوبت مطلق اشباع، رطوبت مطلق مولی اشباع

اگر گاز خشک B که در مایع A نامحلول است، در تماس با مقدار زیادی از آن مایع قرار گیرد، مایع در داخل گاز تبخیر خواهد شد و این عمل آنقدر ادامه خواهد یافت تا فشار جزئی A در مخلوط گاز و بخار، به فشار اشباع آن یعنی فشار بخار A (P_A) در دمای مخلوط برسد. به میزان رطوبت در این حالت، رطوبت مطلق اشباع می‌گویند. تا زمانی که بتوان گاز را غیرمحلول در مایع به حساب آورد، فشار جزئی بخار در مخلوط اشباع، مستقل از جنس گاز و فشار

کل مخلوط خواهد بود (مگر در فشارهای بالا) و تنها به دما و نوع مایع بستگی دارد. ولی رطوبت مطلق مولی اشباع ($Y_S = \frac{P_A}{P_t - P_A}$) علاوه بر دما و نوع

مایع به فشار کل مخلوط، و رطوبت مطلق اشباع ($Y'_S = Y_S \frac{M_A}{M_B}$) علاوه بر متغیرهای فوق به جنس گاز هم وابسته است. Y_S را رطوبت مطلق مولی اشباع و Y'_S (یا H_S) را رطوبت مطلق اشباع گویند.

نکته ۱: هر دو کمیت رطوبت اشباع، در نقطه جوش مایع، تحت فشار کل مخلوط برابر با بی‌نهایت خواهند شد.

با توجه به اینکه وزن مولکولی مایع (M_A) بیشتر از وزن مولکولی گاز (M_B) است، همیشه مقدار رطوبت مطلق اشباع (Y'_S) بزرگ‌تر از رطوبت مطلق مولی اشباع (Y_S) می‌باشد.

از ترکیب دو رابطه رطوبت مطلق مولی اشباع و رطوبت مطلق اشباع، خواهیم داشت:

$$Y'_S = \frac{P_A}{P_t - P_A} \cdot \frac{M_A}{M_B}$$

رابطه رطوبت مطلق مولی (Y) با رطوبت مطلق (Y') نیز $Y' = \frac{\bar{P}_A}{P_t - \bar{P}_A} \cdot \frac{M_A}{M_B}$ می‌باشد. با توجه به اینکه همواره فشار اشباع بخار (P_A) از فشار جزئی آن (\bar{P}_A) بیشتر است ($P_A \geq \bar{P}_A$)، در نتیجه همواره $Y'_S \geq Y'$ می‌باشد.

مثال ۲: گاز دی‌اکسید کربن (B) با بنزن (A) در دمای 50°C و فشار یک اتمسفر به صورت اشباع می‌باشد، رطوبت مطلق برابرست با ...

$$P_A = 0/362 \text{ atm} \left(\frac{\text{بنزن}}{\text{kgCO}_2} \text{ بر حسب} \right)$$

فشار بخار بنزن

۰/۱۶ (۴)

۱/۰۰۶ (۳)

۱/۰۶ (۲)

۱ (۱)

پاسخ: گزینه «۳» با توجه به اینکه مخلوط اشباع است، فشار جزئی بنزن (\bar{P}_A) برابر با فشار بخار تعادلی بنزن (P_A) در دمای 50°C است.

با توجه به تعریف رطوبت مطلق مولی و رطوبت مطلق خواهیم داشت:

$$Y_S = \frac{P_A}{P_t - P_A} = \frac{0/362}{1 - 0/362} = 0/567 \frac{\text{KmolCO}_2}{\text{Kmol بنزن}}$$

$$Y'_S = \frac{M_A}{M_B} Y_S = \frac{78/05}{44/01} (0/567) = 1/006 \frac{\text{kg بنزن}}{\text{kgCO}_2}$$



مدرس‌ان شریف

فصل پنجم

«خشک کردن»

مقدمه

خارج نمودن مایع از یک جسم جامد و یا حتی از یک فاز گازی یا مایع، به خشک کردن موسوم است. این فرآیند را به دو روش مکانیکی و حرارتی انجام می‌دهند. موضوع بحث در اینجا، خشک کردن به روش حرارتی است. یک جامد مرطوب مثل چوب، پارچه یا کاغذ را می‌توان با تبخیر رطوبت آن توسط جریان گاز و یا حتی بدون وجود گاز که حامل بخار است، خشک کرد ولی جداسازی همین رطوبت به روش مکانیکی مثل فشردن یا سانتریفیوژ را نمی‌توان خشک کردن به حساب آورد.

درسنامه (۱): تعاریف و مفاهیم



تعادل

رطوبت موجود در یک محلول مایع یا جامد مرطوب، فشار بخاری اعمال می‌کند که به طبیعت رطوبت، طبیعت جسم جامد و درجه حرارت بستگی دارد. اگر یک جامد مرطوب در معرض جریان گازی که فشار جزئی بخار در آن \bar{P} است، قرار بگیرد، جسم جامد تا جایی رطوبت خود را با تبخیر از دست داده و یا رطوبت می‌گیرد که فشار بخار رطوبت جسم به \bar{P} برسد. بعد از آن گاز و جامد در حال تعادل خواهند بود که به مقدار رطوبت جسم در آن حالت، رطوبت تعادلی در شرایط حاکم، گفته می‌شود.

کج مثال ۱: رطوبت تعادلی به کدام یک از عوامل زیر بستگی ندارد؟

- (۱) طبیعت جسم (۲) طبیعت رطوبت (۳) سرعت هوا (۴) درجه حرارت

پاسخ: گزینه «۳» رطوبت موجود در یک جسم مرطوب به طبیعت رطوبت، طبیعت جسم و درجه حرارت بستگی دارد.

(سراسری ۸۸)

کج مثال ۲: در بحث خشک کردن جامدات، تعادل نشانگر کدام مورد (موارد) است؟

(۱) کسر مولی رطوبت در هوا برابر با کسر مولی رطوبت در جامد است.

(۲) مقدار رطوبت هوا برابر با مقدار رطوبت در جامد است.

(۳) اگر رطوبت هوا بیشتر از مقدار تعادلی رطوبت هوا در حال تعادل با جامد معینی باشد، آنگاه جامد می‌تواند رطوبت هوا را به خود جذب کرده و خیس‌تر شود.

(۴) موارد ۱ و ۲ صحیح می‌باشند.

پاسخ: گزینه «۳» رطوبت موجود در یک محلول مایع یا جامد مرطوب، فشار بخاری اعمال می‌کند که به طبیعت رطوبت، طبیعت جسم جامد و درجه حرارت

بستگی دارد. بنابراین اگر یک جامد مرطوب در معرض یک جریان گاز تازه، که حاوی بخار با فشار جزئی \bar{P} است، قرار بگیرد، جسم جامد تا جایی رطوبت خود را با تبخیر از دست می‌دهد (در صورتی که رطوبت جامد بیشتر از گاز باشد) و یا از گاز رطوبت می‌گیرد (در صورتی که رطوبت گاز بیشتر باشد) که فشار بخار رطوبت جسم به \bar{P} برسد. بعد از آن گاز و جامد در حال تعادل خواهند بود و به مقدار رطوبت جسم در آن حالت رطوبت تعادلی در شرایط حاکم گفته می‌شود.

انواع رطوبت

۱- رطوبت بر مبنای مرطوب (X'): رطوبت یک جامد یا یک محلول را معمولاً بر حسب درصد وزنی رطوبت بیان می‌کنند که آن را بر مبنای مرطوب می‌نامند که برابر است با:

$$\% X' = \frac{\text{کیلوگرم رطوبت}}{\text{کیلوگرم جامد مرطوب}} = 100 \frac{100 \text{ کیلوگرم رطوبت}}{100 \text{ کیلوگرم رطوبت} + \text{کیلوگرم جامد خشک}} = \frac{100X}{1+X}$$

۲- رطوبت بر مبنای خشک (X): این رطوبت به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$X = \frac{\text{کیلوگرم رطوبت}}{\text{کیلوگرم جامد خشک}} = \text{رطوبت بر مبنای خشک} = 100X \text{ درصد رطوبت بر مبنای خشک}$$

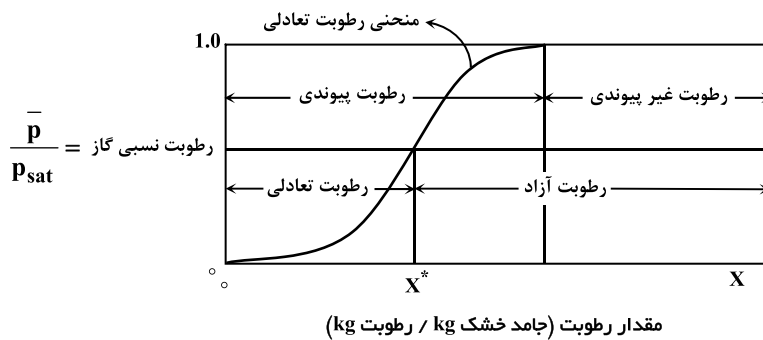
رابطه میان رطوبت بر مبنای خشک (X) و مبنای مرطوب (X') به صورت $X = \frac{X'}{1-X'}$ می‌باشد.

۳- رطوبت تعادلی: مقدار رطوبت یک ماده را وقتی که با فشار بخار در شرایط مربوطه در تعادل است رطوبت تعادلی گویند که با X^* نشان داده می‌شود.

۴- رطوبت پیوندی: رطوبت موجود در جسم را وقتی که فشار بخار تعادلی آن کمتر از فشار بخار مایع خالص در همان درجه حرارت باشد رطوبت پیوندی می‌نامند. این رطوبت شامل مواردی از قبیل رطوبت مربوط به ساختمان داخلی جسم، رطوبت آزاد شده در اثر ترکیب شیمیایی با مواد سلولزی، رطوبت به صورت محلول مایعی از اجزای حل شدنی جامد و یا محلول جامد، رطوبت باقیمانده در حفره‌ها و مجراهای کوچک در جسم و یا هر رطوبتی غیر از آنچه جذب سطحی شده باشد، می‌باشد.

۵- رطوبت غیر پیوندی: رطوبت موجود در جسم وقتی که فشار بخار تعادلی آن برابر فشار بخار مایع خالص در همان درجه حرارت باشد.

۶- رطوبت آزاد: مقدار رطوبت مازاد بر رطوبت تعادلی در یک جسم را رطوبت آزاد گویند که برابر است با $(X - X^*)$. تنها رطوبت آزاد است که می‌تواند تبخیر شود. این رطوبت که در واقع نیروی محرکه انتقال جرم است، به غلظت بخار در گاز بستگی دارد. در نمودار زیر انواع رطوبت نشان داده شده است.



مثال ۳: جامد مرطوبی به وزن ۱۰۰ kg را در یک خشک کن دوار خشک می‌نمایند. بعد از مدت زمان کافی، وزن نمونه به ۹۵ kg کاهش می‌یابد. با فرض ناچیز بودن رطوبت باقی مانده، درصد رطوبت اولیه جسم بر مبنای خشک و مرطوب، به ترتیب کدام است؟

- (۱) ۵٪، ۲۶٪ / (۲) ۴٪، ۷٪ / (۳) ۵٪، ۲۶٪ / (۴) ۷٪، ۴٪ / ۵٪

پاسخ: گزینه «۳» باتوجه به اینکه زمان خشک نمودن جامد، مدت کافی بیان شده است، می‌توان آن را بدون رطوبت در نظر گرفت. میزان رطوبت جسم برابر است با:

$$100 - 95 = 5 \text{ kg} = \text{کیلوگرم رطوبت}$$

با توجه به تعریف رطوبت بر مبنای خشک و مرطوب خواهیم داشت:

$$\text{درصد رطوبت بر مبنای خشک} = \frac{100(\text{کیلوگرم رطوبت})}{95} = \frac{(100)(5)}{95} = 52.6\%$$

$$\text{درصد رطوبت بر مبنای مرطوب} = \frac{100(\text{کیلوگرم رطوبت})}{100} = \frac{(100)(5)}{100} = 5\%$$



کله مثال ۴: جریان گازی با فشار کل 760 میلی‌متر جیوه دارای بخار آب با فشار جزئی 70 میلی‌متر جیوه می‌باشد. این جریان گاز موجب تبخیر رطوبت موجود در چوبی به وزن 20 kg می‌گردد. پس از چند روز، با فرض ثابت ماندن شرایط، درصد رطوبت تعادلی جسم، 20% ، اندازه‌گیری شده است. فشار بخار رطوبت جسم در این حالت کدام است؟

- (۱) 60 mmHg (۲) 70 mmHg (۳) 80 mmHg (۴) 90 mmHg

پاسخ: گزینه «۲» رطوبت تعادلی یک جسم به صورت مقدار رطوبت یک ماده وقتی که فشار بخار رطوبت جسم با فشار جزئی بخار موجود در جریان گاز، برابر گردد، تعریف می‌شود. بنابراین گزینه (۲) صحیح است.

کله مثال ۵: فشار بخار آب در دمای معینی برابر 120 mmHg است. در شرایط یکسان، کدام گزینه می‌تواند فشار بخار رطوبت موجود در یک جسم را برای رطوبت‌های پیوندی و غیر پیوندی نشان دهد؟

- (۱) 120 mmHg ، 130 mmHg (۲) 100 mmHg ، 90 mmHg
(۳) 130 mmHg ، 90 mmHg (۴) 90 mmHg ، 120 mmHg

پاسخ: گزینه «۴» رطوبت پیوندی، رطوبت موجود در جسم است وقتی که فشار بخار تعادلی آن کمتر از فشار بخار مایع خالص در همان درجه حرارت باشد، پس در این شرایط فشار کمتر از 120 mmHg جواب می‌باشد. رطوبت غیر پیوندی نیز زمانی است که فشار بخار تعادلی با فشار بخار مایع خالص در همان درجه حرارت برابر باشد، بنابراین فشار 120 mmHg در این حالت جواب است. پس گزینه (۴) صحیح می‌باشد.

کله مثال ۶: قرار است جامد مرطوبی از 80% رطوبت تا 5% رطوبت (بر مبنای مرطوب) خشک شود. برای 1000 kg از محصول خشک شده، مقدار رطوبت تبخیر شده چقدر است؟

- (۱) 375 kg (۲) 385 kg (۳) 95 kg (۴) 98 kg

پاسخ: گزینه «۱» ابتدا رطوبت اولیه و نهایی را بر مبنای رطوبت خشک (X) حساب می‌کنیم، سپس مقدار جامد خشک را در 1000 kg محصول محاسبه می‌نماییم. رطوبت تبخیر شده، تفاوت رطوبت اولیه و نهایی در مقدار جامد موجود در محصول است.

$$\text{رطوبت اولیه} = \frac{X'_1}{1 - X'_1} = \frac{0/8}{1 - 0/8} = \frac{4 \text{ kg water}}{\text{kg dry solid}}, \quad \text{رطوبت نهایی} = \frac{X'_2}{1 - X'_2} = \frac{0/05}{1 - 0/05} = \frac{0/0527 \text{ kg water}}{\text{kg dry solid}}$$

$$\text{جامد خشک در محصول} = 1000(1 - 0/05) = 950 \text{ kg}, \quad \text{رطوبت تبخیر شده} = 950(4 - 0/0527) = 3750 \text{ kg}$$

کله مثال ۷: یک کیلوگرم از جامد مرطوبی در مدت 500 ثانیه از یک خشک‌کن عبور کرده و 10% از وزن آن کاسته می‌شود. رطوبت مطلق ورودی و

خروجی به ترتیب 20% و 30% است. مقدار هوای مصرفی خشک‌کن چقدر است؟

- (۱) $15/5$ kg (۲) $0/7$ kg (۳) 10 kg (۴) $0/01$ kg

پاسخ: گزینه «۳» مقدار رطوبتی که از جسم کم شده، وارد هوا شده است. بنابراین با نوشتن موازنه جرم برای رطوبت، به ازای یک کیلوگرم از جسم خواهیم داشت:

$$(0/1)(1 \text{ kg}) = m(0/03 - 0/02) \Rightarrow \text{جرم هوای مصرفی} = \frac{0/1}{0/01} = 10 \text{ kg}$$

کله مثال ۸: کدام عبارت غلط است؟

- (۱) رطوبت آزاد حداکثر رطوبتی است که از یک جسم می‌توان گرفت.
(۲) تنها رطوبت آزاد می‌تواند تبخیر شود.
(۳) رطوبت پیوندی، رطوبت موجود در جسم است وقتی که فشار بخار تعادلی بیشتر از فشار بخار مایع خالص در شرایط حاکم باشد.
(۴) رطوبت آزاد به غلظت بخار در گاز بستگی دارد.

پاسخ: گزینه «۳» رطوبت پیوندی، زمانی است که فشار بخار تعادلی کمتر از فشار بخار مایع خالص در درجه حرارت مربوطه باشد.

کجه مثال ۹: رطوبت آزاد برابر است با:

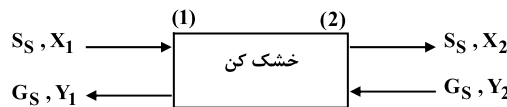
- (۱) اختلاف رطوبت پیوندی و رطوبت غیر پیوندی
- (۲) اختلاف رطوبت پیوندی و رطوبت تعادلی
- (۳) اختلاف رطوبت جسم جامد و رطوبت تعادلی
- (۴) اختلاف رطوبت غیر پیوندی و رطوبت تعادلی

پاسخ: گزینه «۳» مقدار رطوبت مازاد بر رطوبت تعادلی در یک جسم را رطوبت آزاد گویند.

کجه مثال ۱۰: جسم جامدی از ۴۲ تا ۴ درصد رطوبت (بر ۴ اساس تر) در یک خشک کن با هوایی که رطوبت مطلق ورودی و خروجی آن به ترتیب ۰/۰۰۶ و ۰/۰۲۸ می باشد خشک می شود. مقدار هوای خشک لازم به ازای هر کیلوگرم جامد خشک چقدر است؟ (بر حسب کیلوگرم) (سراسری ۸۰)

- (۱) ۴۸
- (۲) ۳۱
- (۳) ۲۳
- (۴) ۱۲

پاسخ: گزینه «۲» شکل تقریبی خشک کن، به صورت زیر است:



موازنه جرم حول خشک کن خواهد بود: $S_S X_1 + G_S Y_2 = S_S X_2 + G_S Y_1$ (I)

در این رابطه X ، رطوبت بر مبنای خشک، یعنی نسبت کیلوگرم مرطوب به کیلوگرم جامد خشک و برابر $\frac{X}{1-X}$ می باشد. X نیز رطوبت بر مبنای مرطوب و برابر کیلوگرم رطوبت به کیلوگرم جامد رطوبت است. همچنین، Y رطوبت مطلق و برابر نسبت جرم بخار به جرم گاز بدون بخار است.

$$X_1 = 0/42 \Rightarrow X_1 = \frac{x_1}{1-x_1} = 0/724 \quad Y_1 = 0/028 \quad ; \quad X_2 = 0/04 \Rightarrow X_2 = \frac{x_2}{1-x_2} = 0/041 \quad Y_2 = 0/006$$

با مرتب کردن رابطه (I)، نسبت کیلوگرم هوای خشک (G_S) به کیلوگرم جامد خشک (S_S) خواهد بود: $\frac{G_S}{S_S} = \frac{X_1 - X_2}{Y_1 - Y_2} = \frac{0/724 - 0/041}{0/028 - 0/006} = 31$

بنابراین به ازای هر کیلوگرم جامد خشک ($S_S = 1 \text{ kg}$)، مقدار هوای خشک لازم خواهد بود: $G_S = 31 S_S = (31)(1 \text{ kg}) = 31 \text{ kg}$

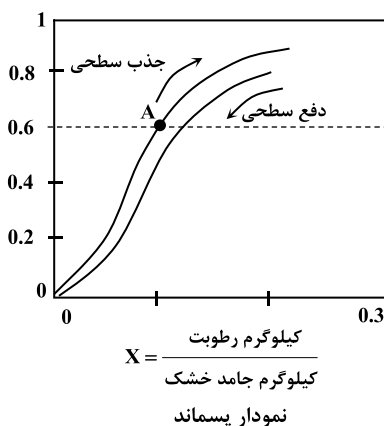
کجه مثال ۱۱: رطوبت آزاد جامد خشک شونده:

(سراسری ۸۳)

- (۱) فقط به نوع ماده بستگی دارد.
- (۲) فقط به شرایط خشک کردن بستگی دارد.
- (۳) به ضخامت ماده و درصد تخلخل آن وابسته است.
- (۴) به ماهیت ماده و سرعت خشک کردن وابسته است.

پاسخ: گزینه «۴» رطوبت آزاد، رطوبت مازاد بر رطوبت تعادلی در جسم و در واقع حداکثر رطوبتی است که می توان از جسم گرفت. این رطوبت به جنس ماده و شدت خشک کردن بستگی دارد.

نمودار پسماند (Hysteresis)



بسیاری از جامدات، بسته به اینکه با رطوبت گیری (جذب سطحی) یا تبخیر (خارج شدن رطوبت) به تعادل برسند، منحنی های متفاوتی مثل شکل مقابل دارند. در عملیات خشک کردن، آنچه اهمیت دارد، تعادل عمل دفع است و برای یک فشار بخار، از میان دو مقدار تعادلی، این مقدار بیشتر است. وقتی جامد خشک در معرض هوای مرطوب قرار بگیرد، رطوبت جذب می کند، یعنی به تعادل در جذب می رسد که گاهی به آن بازیافت (regain) می گویند و دانستن این مقدار در عملیات خشک کردن ارزش عملی دارد. برای مثال، مطابق شکل، اگر بخواهیم جسم خشک شده را در معرض هوا با رطوبت نسبی ۰/۶ قرار دهیم، لازم نیست جامد خشک را به رطوبتی کمتر از مقدار تعادلی معادل با نقطه A برسانیم. اگر لازم است که جامد رطوبت کمتری داشته باشد، بلافاصله قبل از تماس با هوا باید بسته بندی و نگهداری شود.



درسنامه (۲): عملیات خشک کردن



- عملیات خشک کردن را می‌توان به صورت پیوسته (مداوم) و یا ناپیوسته، تقسیم بندی کرد. اگر ماده‌ای که باید خشک شود در مسیر جریان مداوم گاز قرار گیرد تا رطوبت آن تبخیر شود، عملیات ناپیوسته (یا نیمه پیوسته) است و اگر ماده خشک شونده نیز مثل جریان گاز به صورت مداوم از دستگاه عبور کند، عملیات پیوسته خواهد بود. براساس نوع دستگاه و چگونگی فرآیند خشک کردن، دستگاه‌های استفاده شده به سه صورت زیر تقسیم بندی می‌شوند:
- ۱- **روش عملکرد یا به عبارتی ناپیوسته و پیوسته:** در روش ناپیوسته، یا نیمه پیوسته، دستگاه مربوطه به صورت یک چرخه و در شرایط ناپایدار کار می‌کند، خشک‌کن، از ماده مربوطه (که تا زمان خشک شدن در دستگاه می‌ماند) پر می‌شود و سپس دستگاه تخلیه و دوباره بارگیری می‌شود. خشک‌کن‌های مداوم، معمولاً در شرایط پایدار کار می‌کنند.
 - ۲- **روش اعمال حرارت یا دستگاه مستقیم و غیرمستقیم:** در خشک‌کن مستقیم، حرارت از طریق تماس مستقیم گاز با ماده خشک شونده تأمین می‌شود تا عمل تبخیر صورت بگیرد. در خشک‌کن غیر مستقیم، حرارت مستقل از گاز حامل برای خشک کردن اعمال می‌شود. برای مثال، حرارت ممکن است با هدایت از میان دیواره‌ی فلزی که با ماده در تماس است، منتقل شود و یا با قرار دادن ماده تحت تشعشع اشعه مادون قرمز IR و یا حرارت دی‌الکتریک که کمتر متداول هستند، اعمال شود. در روش آخر، حرارت در داخل ماده و با میدان الکتریکی با فرکانس بالا ایجاد می‌شود.
 - ۳- **طبیعت ماده خشک شونده:** ماده خشک شونده می‌تواند سخت مثل چوب یا منعطف مثل پارچه یا کاغذ باشد.

خشک‌کن‌های مستقیم

ساختار این خشک‌کن‌ها تا حد زیادی به طبیعت ماده خشک شونده بستگی دارد. خشک‌کن‌های سینی‌دار، که به آنها خشک‌کن‌های اطاقکی یا ففسه‌ای نیز گفته می‌شود، برای خشک کردن جامداتی به کار می‌روند که باید روی سینی نگهداری شوند. بعد از بارگیری، اطاقک بسته می‌شود و هوایی که با بخار گرم شده است از بین سینی‌ها دمیده می‌شود تا رطوبت را خارج سازد (خشک کردن با جریان متقاطع). اگر مایع تبخیر شونده قابل اشتعال باشد و یا جامد در اثر تماس با اکسیژن از بین برود، می‌توان به جای هوا، از گاز بی‌اثر و حتی بخار فوق اشباع (که ظرفیت حرارتی زیادی دارد) استفاده کرد. در نوع پیشرفته‌تری از خشک‌کن، به نام خشک‌کن واگن‌دار، سینی‌ها روی واگن‌هایی چیده می‌شوند و می‌توانند به داخل و خارج اطاقک حرکت داده شوند. از آنجایی که واگن‌ها می‌توانند بیرون از خشک‌کن بارگیری و تخلیه شوند، اتلاف زمانی بین چرخه‌های خشک کردن وجود ندارد. برای مواد دانه‌ای شکل، جامد به صورت بسترهایی نازک روی غربال‌ها گذاشته می‌شود و هوا یا گازی از میان بسته‌ها عبور می‌کند. در این حالت عمل خشک شدن خیلی سریع انجام می‌گیرد. دستگاه استفاده شده برای این حالت یک خشک‌کن با جریان سراسری است. مواد بلوری و موادی که به طور طبیعی به صورت بلور هستند، مثل سیلیکاژل را می‌توان به این صورت خشک کرد. برای بعضی از مواد خمیری شکل باید قبل از خشک کردن، عملیات شکل دادن ابتدایی روی آنها انجام شود. یکی از مهم‌ترین مسائل هنگام استفاده از خشک‌کن‌های ذکر شده، غیریکنواختی رطوبت در محصول نهایی به دست آمده از بخش‌های مختلف خشک‌کن است و این به علت حرکت غیریکنواخت و نامناسب هوا در داخل خشک‌کن می‌باشد. برای رفع این مشکل می‌توان قسمت‌های ساکن هوا و هوای درون خشک‌کن را در حرارت و رطوبت یکنواخت، نگهداری کرد. به این منظور، باید حجم زیادی از هوا به سینی‌ها دمیده شود و سپس قسمت اعظم (حدود ۸۰ تا ۹۵ درصد) آن را برگشت داد.

خشک‌کن‌های غیرمستقیم

۱- خشک‌کن با محفظه خلأ

خشک‌کن‌های سینی‌داری هستند که اتاقک آنها از چدن یا صفحات فولادی ساخته شده است که با درهای محکمی بسته می‌شوند و در نتیجه در فشارهای زیر اتمسفر نیز می‌توانند کار کنند. هوایی در آنها دیده نمی‌شود و گردش نیز نمی‌کند. نوعی دیگر از این خشک‌کن‌ها، خشک‌کن‌های دوار تحت خلأ می‌باشند که عبارت‌اند از پوسته‌های استوانه‌ای ژاکت دار که به طور افقی قرار می‌گیرند و دوغاب یا خمیر می‌تواند در خلأ خشک شود. این دسته از خشک‌کن‌ها از نظر ساخت و کارکرد گران هستند، بنابراین فقط در مواقع خشک کردن مواد با ارزش استفاده می‌شود. مثلاً برای مواد با ارزش مثل مواد دارویی که برای جلوگیری از صدمه دیدن باید در دمای پایین و در غیاب هوا خشک شوند یا وقتی که رطوبت خروجی دارای ارزش است و یا برای حلال آلی سمی که باید بازیابی شود.

۲- خشک کردن انجمادی (خشک کردن تصعیدی)

موادی مانند مواد غذایی و دارویی که حتی در درجه حرارت‌های معمولی نیز خشک نمی‌شوند، باید به این روش خشک شوند. ماده خشک‌شونده، تحت اثر هوای خیلی سرد منجمد شده و سپس در محفظه خلأ قرار داده می‌شود تا رطوبت در آنجا تصعید و با پمپ خلأ مکانیکی یا انژکتور بخار جت، خارج شود. روش دیگر، انجماد یا تبخیر لحظه‌ای بخشی از رطوبت، در خلأ انجام می‌شود ولی مواد غذایی که در حالت غیر یخ زده، سخت نیستند، ممکن است با این روش از بین بروند. بعضی از مواد غذایی مثل گوشت گاو، ظاهراً مجراهای مویینی دارند که در طی عمل خشک کردن، بخار آب از سطوح یخی به این مجراها نفوذ می‌کند. در حالات دیگر، نفوذ از طریق دیواره‌های سلولزی انجام می‌گیرد. در هر حال یکی از اساسی‌ترین مشکلات، تأمین حرارت لازم برای تصعید است. با کاهش یافتن سطح تصعید، حرارت باید برای عبور از ماده‌ای که هدایت حرارتی کمی دارد، ضخامت بیشتری را طی کند، بنابراین به اختلاف درجه حرارت بیشتری نیاز است که در اثر آن محصول از بین می‌رود. ناچار حرارت باید از سطح پشت، از میان سطحی که جامد روی آن است (سینی یا محفظه) و در طرف مقابل سطح تبخیر قرار دارد، بگذرد. این مسئله باعث افزایش شدت خشک شدن می‌شود. گاهی از روش‌های دیگری نظیر تشعشع حرارتی و حرارت دی الکتریک هم استفاده می‌شود. اما روش دوم پرهزینه است، زیرا ثابت دی الکتریک آب بالاست و حرارت مستقیماً داخل آب آزاد می‌شود. هنوز برای محصولات دانه‌ای از روش خشک کردن با جریان سراسری استفاده می‌شود که به جای پمپ کردن آب، با پمپ خلأ از هوا استفاده می‌شود.

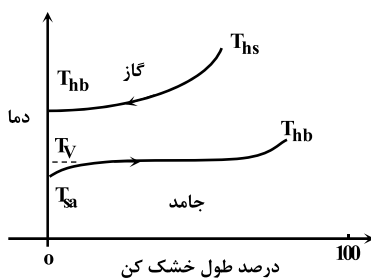
خشک کردن به صورت مداوم (پیوسته)

خشک کردن به صورت مداوم دارای مزایایی است. در این روش، دستگاه لازم، نسبت به مقدار محصول، کوچک است. عملیات به راحتی مطابق روش‌های تولید مواد شیمیایی مداوم و بدون نیاز به توقف انجام می‌گیرد، رطوبت محصول یکنواختی بیشتری دارد و هزینه خشک کردن بر واحد محصول نسبتاً کم است. نوع دستگاه، مانند خشک کردن به صورت ناپیوسته، تا حد زیادی به نوع ماده خشک‌شونده بستگی دارد. در اینجا، حالت مستقیم و غیر مستقیم و گاهی هر دو برای حرارت دادن به کار می‌روند.

در بسیاری از خشک‌کن‌های مستقیم، جسم جامد، در حالی که با جریان گاز متحرک در تماس است، از خشک‌کن عبور می‌کند. گاز و جامد ممکن است جریان‌های موازی یا معکوس داشته باشند و یا گاز از میان مسیر عبور جامد، بگذرد. اگر حرارتی به خشک‌کن وارد و یا از آن خارج نشود، عملکرد به صورت آدیاباتیک است و گاز، حرارت محسوس خود را از دست می‌دهد و در عین حال که رطوبت گرمای نهان را جذب می‌کند و تبخیر می‌شود، گاز نیز سرد می‌شود. گاز را می‌توان با حرارت دادن به خشک‌کن، در دمای ثابتی نگه داشت.

در عملیات آدیاباتیک معکوس، داغ‌ترین گاز با خشک‌ترین جامد در تماس است، بنابراین جامد خروجی تا دمای گاز ورودی گرم می‌شود. این حالت، سریع‌ترین روش خشک کردن است، مخصوصاً در حالی که رطوبت پیوندی وجود دارد، جدا شدن آخرین ذرات رطوبت خیلی مشکل است که با این روش در درجه حرارت‌های بالا، سریع‌تر از بین می‌رود. در این حالت، جامد ممکن است با گرم شدن در درجه حرارت‌های بالا از بین برود. علاوه بر این جامد داغ خروجی مقدار قابل توجهی گرمای محسوس همراه دارد، بنابراین بازده حرارتی خشک‌کن را کاهش می‌دهد.

در عملیات آدیاباتیک موازی، جامد مرطوب با داغ‌ترین گاز در تماس است. تا مدتی که رطوبت غیرپیوندی وجود دارد، جامد فقط تا درجه حرارت حباب مرطوب گاز گرم می‌شود و به این دلیل حتی جامداتی که به گرما حساس هستند نیز می‌توانند در جریان موازی با گاز داغ خشک شوند. هنگام خروج از خشک‌کن، گاز به میزان قابل توجهی سرد می‌شود و جامد خشک شده صدمه‌ای نمی‌بیند. همچنین در حالی که خشک شدن کامل جامد لزومی ندارد، امکان کنترل جامد خروجی، در جریان موازی، بیشتر است که با کنترل مقدار گاز عبوری از خشک‌کن و در نتیجه درجه حرارت و رطوبت گاز خروجی صورت می‌گیرد. به این دلیل، این روش برای جلوگیری از سخت شدن و مشکلات دیگر، که در سیستم ناپیوسته وجود دارد، نیز به کار می‌رود.



در خشک‌های پیوسته، از ابتدا تا انتهای دستگاه، دمای فاز گاز پیوسته تغییر می‌کند. در فاز جامد، با توجه به اینکه در ابتدا جسم کاملاً مرطوب است، وقتی وارد دستگاه می‌شود، در ابتدا دمای آن کمی افزایش می‌یابد و تا زمانی که رطوبت در جسم موجود است، دمای آن در طول دستگاه ثابت می‌ماند و جامد فقط تا درجه حرارت حباب مرطوب گرم می‌شود. در انتهای دستگاه که جسم رطوبت غیرپیوندی خود را از دست می‌دهد، دمای آن افزایش می‌یابد. نمودار تغییر دما در خشک‌کن پیوسته برای جریان متقابلی از گاز و جامد، در شکل مقابل رسم شده است.

با توجه به شکل، دمای گاز در طول خشک‌کن از T_{hs} تا T_{hb} کاهش می‌یابد. در فاز جامد، دمای آن سریعاً از T_{sa} به دمای تبخیری (T_v) رسیده و ثابت می‌شود، چرا که درجه حرارت مرطوب تغییر نمی‌کند. در انتهای دستگاه دما به T_{sb} افزایش می‌یابد.



مدرسان شریف

فصل هفتم

«جذب سطحی»

درسنامه: مفاهیم و محاسبات فرآیند جذب سطحی



مقدمه

جذب سطحی نوعی فرآیند جداسازی است که در آن بعضی از اجزای یک فاز سیال روی یک سطح جامد جذب می‌شوند. از فرآیندهای جداسازی گاز می‌توان بوزدایی و جداسازی ناخالصی‌ها از گازهای صنعتی مثل دی‌اکسید کربن و یا بازیابی حلال‌های پرارزش از مخلوط رقیق آن‌ها با هوا یا گازهای دیگر و جداسازی مخلوطی از هیدروکربن‌های گازی را نام برد. از فرآیندهای جداسازی مایع می‌توان رطوبت‌زدایی بنزین، رنگ‌زدایی محصولات نفتی و محلول‌های آبی قندی، بوزدایی و طعم‌زدایی آب و جداسازی هیدروکربن‌های آروماتیکی و پارافینی را نام برد. جذب سطحی یک پدیده گرمازا می‌باشد. فرآیندهای ذکر شده در بالا، همه از این جهت که در آنها مخلوطی که باید تفکیک شود با یک فاز نامحلول دیگر تماس می‌یابد (مانند جذب جامد) و پخش نامساوی مواد اولیه بین فاز جذب شده روی سطح جامد و توده سیال موجب جداسازی می‌شود، مشابه هستند. تمام روش‌های مفیدی که در مورد تماس سیال‌های نامحلول استفاده می‌شود، در جذب سطحی، قابل استفاده هستند. به این ترتیب جداسازی‌های یک مرحله‌ای ناپیوسته و چند مرحله‌ای مداوم و جداسازی‌های مشابه با جذب و دفع با جریان ناهم سو و تفکیک و استخراج همراه با جریان برگشتی، در این حالت نیز وجود دارند. هم‌چنین به دلیل سخت و ساکن بودن بستری از جاذب جامد، روش‌های نیمه پیوسته، که در مورد دو سیال قابل استفاده نیستند، قابل به کارگیری هستند.

کج مثال ۱: در عملیات جذب سطحی، تماس میان کدام فازها وجود دارد؟

- (۱) جامد - مایع (۲) مایع - گاز (۳) جامد - گاز (۴) موارد (۱) و (۳)

پاسخ: گزینه «۴» در فرآیند جذب سطحی، بعضی از اجزای یک فاز سیال (مایع یا گاز) روی یک سطح جامد، جذب می‌شود.

انواع جذب سطحی

دو نوع پدیده جذب سطحی وجود دارد:

۱- جذب فیزیکی یا جذب وان در والس

جذب فیزیکی یک پدیده برگشت پذیر بوده که حاصل نیروهای جاذبه بین مولکول‌های جاذب و ماده جذب شده است. در این پدیده ماده جذب شده در شبکه کریستالی جامد نفوذ نمی‌کند و در آن حل نمی‌شود، بلکه در سطح جامد باقی می‌ماند. اگر جامد دارای تخلخل و لوله‌های موئین زیادی باشد، ماده جذب شده، در صورتی که جامد را تر کند، به داخل این شکاف‌ها نفوذ نمی‌کند. فشار بخار تعادلی برای سطح مایع مقعر با شعاع انحنا کم از سطح صاف بزرگ، کمتر است، پس جذب سطحی به همان اندازه افزایش می‌یابد. در حالت تعادل، فشار جزئی ماده جذب شده برابر فاز گاز تماس یافته با آن است و با کاهش فشار فاز گازی یا با افزایش دما، گاز جذب شده به راحتی دفع و بدون تغییر شکل، از سطح جدا می‌شود. در این نوع جذب، انرژی آزاد شده در حدود تصعید گاز بوده و اندکی از گرمای نهان تبخیر بیشتر است.

۲- جذب شیمیایی یا جذب سطحی فعال شده

این نوع جذب حاصل فعل و انفعال شیمیایی جامد و ماده جذب شده است. در این نوع جذب، نیروهای چسبندگی معمولاً بیش از آن چیزی است که در جذب فیزیکی وجود دارد. این پدیده برگشت ناپذیر است و با دفع و جداسازی ماده اولیه جذب شده، تغییر شیمیایی در آن مشاهده می‌شود. حرارت آزاد شده در عمل جذب سطحی شیمیایی معمولاً زیاد و در حدود یک واکنش شیمیایی است.



نکته ۱: در دمای کم ممکن است جذب فیزیکی و در دمای زیاد جذب شیمیایی رخ دهد و یا اینکه هر دو همزمان اتفاق بیفتند. ولی با افزایش دما، میزان جذب سطحی در هر دو حالت کم می‌شود.

نکته ۲: به عنوان یک قاعده عمومی بخارات و گازهایی که وزن ملکولی بیشتری و دمای بحرانی کمتر دارند، راحت‌تر جذب می‌شوند.

مثال ۲: در یک برج جذب سطحی که میزان جذب قابل توجه است (گاز - جامد):

(۱) درجه حرارت فاز گاز و جامد، مقداری کاهش می‌یابد.

(۲) درجه حرارت فاز گاز و جامد، مقداری افزایش می‌یابد.

(۳) درجه حرارت فاز گاز کاهش و درجه حرارت فاز جامد افزایش می‌یابد.

(۴) درجه حرارت فاز گاز افزایش و درجه حرارت فاز جامد کاهش می‌یابد.

پاسخ: گزینه «۲» پدیده جذب سطحی، فرآیندی گرمازا می‌باشد. پس موجب افزایش درجه حرارت هر دو فاز می‌شود.

مثال ۳: کدام گزینه غلط است؟

(۱) با کاهش فشار جذب سطحی کم می‌شود.

(۲) با کاهش دما جذب سطحی زیاد می‌شود.

(۳) جذب سطحی یک فرآیند برگشت پذیر است.

(۴) جذب سطحی شیمیایی گرمازاتر است.

پاسخ: گزینه «۳» جذب سطحی در حالت فیزیکی برگشت پذیر و در حالت شیمیایی برگشت ناپذیر است.

طبیعت جاذب

جامدهای جاذب معمولاً به شکل گرانول (دانه‌ای شکل) مصرف می‌شوند و قطر آن‌ها از ۱۲ میلی‌متر تا ۵۰ میکرومتر متغیر است. جامدها باید براساس کاربرد و موقعیت مصرف، بعضی از خواص مهندسی را داشته باشند. خاصیت جذب جامدها یک مسئله دیگر است. جذب یک پدیده عمومی است و تمام جامدها، گازها و بخارات را مقداری جذب می‌کنند. وجود سطح زیاد در واحد جرم برای جاذب‌های مفید، ضروری است. در جذب گازی، سطح واقعی، سطح ذرات گرانول نیست بلکه سطح بزرگ‌تری است که داخل سوراخ‌ها و شکاف‌ها را شامل می‌شود. سوراخ‌ها معمولاً خیلی کوچک هستند و حدود چند مولکول قطر دارند ولی تعداد زیاد آنها، باعث تولید سطح بزرگی برای جذب می‌شود. از جاذب‌هایی که دارای مصرف عمومی می‌باشند، می‌توان خاک رس، خاک فعال شده، بوکسیت، آلومین، ذغال استخوان، ذغال رنگ‌بر، ذغال جاذب گاز، ذغال فعال شده غربال مولکولی، جاذب‌های پلیمری مصنوعی، سیلیکاژل و غربال‌های مولکولی را نام برد.

به عنوان مثال، جاذب‌های خاک رس، خاک فعال شده و بوکسیت در عملیات رنگ‌زدایی از محصولات نفتی به کار برده می‌شوند، همچنین جاذب‌هایی نظیر آلومین و غربال مولکولی در فرآیندهای خشک کردن گازها و مایعات، و بوکسیت و سیلیکاژل در فرآیند خشک کردن گازها، استفاده می‌شوند. همچنین از غربال‌های مولکولی می‌توان برای جداسازی اکسیژن و هیدروژن و خالص‌سازی آنها، استفاده کرد. کربن نیز، برای جداسازی دی‌سولفید کربن (CS_2) و سولفید هیدروژن (H_2S)، به کار می‌رود.

جاذب‌های غربال مولکولی، نه تنها مولکول‌ها را براساس اندازه جدا می‌کنند، بلکه جذب آن‌ها با قطبی بودن مولکول‌ها و درجه غیراشباعی نیز تغییر می‌کند. این مواد در اثر حرارت دادن یا شستن احیاء می‌شوند.

مخلوط‌های بخار و گاز دوتایی که هر دو جزء به طور قابل ملاحظه‌ای جذب می‌شوند

وقتی که هر دو جزء از یک مخلوط گازی یا بخار، به مقدار تقریباً مساوی جذب شوند، مقدار جذب یکی از مخلوط‌ها بستگی به حضور ماده دیگر خواهد داشت. چون این سیستم‌ها، با احتساب جاذب، سه جزئی هستند، اطلاعات تعادلی، مشابه تعادل سه تایی در استخراج مایع - مایع، لازم است. در این حالت بهتر است که جاذب جامد را مشابه با حلال در عملیات استخراج در نظر بگیریم. عمل جذب سطحی به فشار و درجه حرارت بسیار بستگی دارد.

دستگاه جذب سطحی

یک دستگاه جذب سطحی، معمولاً از دو قسمت اصلی تشکیل شده است. ۱- بستر جذب گاز، ۲- سیستم احیاء جاذب. با توجه به اینکه، حرکت رو به بالا و سریع ممکن است ذرات را به حالت سیال تبدیل کند و موجب ساییدگی آن‌ها شود، بنابراین حرکت به سمت پایین ترجیح داده می‌شود. به منظور احیاء جاذب، می‌توان از گاز بی‌اثر داغ استفاده نمود. در مواردی که حلال در آب حل نشود، بخار آب به جای گاز بی‌اثر، ترجیح داده می‌شود. اندازه بستر جذب کننده، با توجه به شدت جریان گاز و زمان چرخه لازم، تعیین می‌شود.



کچھ مثال ۴: فرآیند جذب سطحی معمولاً..... و جهت گاز به سمت..... مناسب تر است.

- (۱) گرمایز، بالا (۲) گرمایز، بالا (۳) گرمایز، پائین (۴) گرمایز، پائین

پاسخ: گزینه «۳» جذب سطحی با آزاد شدن حرارت همراه است که در آن به خاطر جلوگیری از سیالی شدن ذرات جاذب به خاطر حرکت سریع جریان گاز، جهت حرکت گاز به سمت پایین ترجیح داده می‌شود.

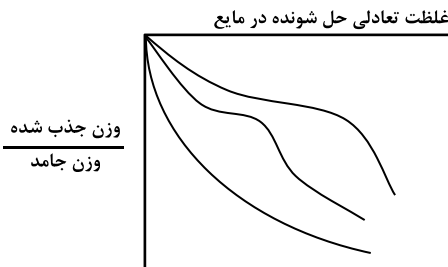
جذب حل‌شونده از محلول رقیق

وقتی که یک جاذب با محلول دو تایی در تماس قرار می‌گیرد، حل‌شونده و حلال هر دو جذب می‌شوند. با توجه به اینکه جذب کلی را نمی‌توان اندازه‌گیری کرد، به جای آن جذب نسبی یا ظاهری حل‌شونده محاسبه می‌شود.

جذب ظاهری حل‌شونده، با صرف‌نظر از تغییر حجم محلول، برابر است با $V(C_0 - C^*)$ که V حجم محلول بر جرم جاذب (فرض بر این است که حجم محلول ثابت است)، C_0 غلظت اولیه حل‌شونده و C^* جرم حل‌شونده بر حجم مایع یا غلظت کاهش یافته تعادلی است. این حالت برای محلول‌های رقیق، زمانی که کسر مقدار جذب شده از حلال اولیه کم است، صادق می‌باشد.

جذب ظاهری برای یک حل‌شونده بستگی به غلظت حل‌شونده، دما، حلال و نوع جذب شدن دارد. با افزایش دما، مقدار جذب برای یک حل‌شونده کاهش می‌یابد و هرچه حلالیت در حلال کمتر باشد، جذب بیشتر می‌شود. این حالت معمولاً برگشت‌پذیر است و منحنی‌های تعادل جذب سطحی (ایزوترم) مشابهی در عملیات جذب و دفع به دست می‌آیند.

در شکل روبه‌رو انواعی از ایزوترم‌های جذب برای محلول‌های رقیق آورده شده است.



معادله فرندلیچ (Freundlich)

در محدوده تغییرات کم غلظت و عملاً برای محلول‌های رقیق، ایزوترم‌های جذب را می‌توان با معادله فرندلیچ بیان کرد:

$$C^* = k[v(C_0 - C^*)]^n$$

که در آن $V(C_0 - C^*)$ جذب ظاهری بر واحد جرم جاذب و k و n ثابت هستند. این معادله را وقتی که جنس واقعی حل‌شونده، شناخته نشده است، می‌توان به کار برد.

در بیشتر موارد این معادله به صورت $Y = mX^n$ استفاده می‌شود که X جرم حل‌شونده بر جرم جاذب، Y جرم حل‌شونده بر جرم حلال در حالت تعادل و m و n ثابت هستند. هرچه n بزرگ‌تر و m کوچک‌تر باشد، مقدار جذب جاذب بیشتر است. n معمولاً بین ۲ تا ۱۰ می‌باشد. برای n کم‌تر از یک جذب ضعیف است.

کچھ مثال ۵: در عمل جذب سطحی (Adsorptin) وقتی یک جزء نفوذکننده، و همراه آن غیر نفوذکننده (Non-Diffusing) باشد، منحنی تعادل

کدام‌یک از سیستم‌های زیر از معادله freundlich پیروی می‌نماید؟

- (۱) سیالات ایده‌ال
 (۲) مخلوط مایعات با انحراف زیاد از حالت ایده‌ال
 (۳) مخلوط‌های مایع که در آن غلظت جذب‌شونده بسیار کوچک است.
 (۴) مخلوط گازها در صورتی که غلظت جذب‌شونده در آن بسیار کوچک باشد.

پاسخ: گزینه «۳» در محدوده تغییرات کم غلظت و عملاً برای محلول‌های رقیق (غلظت کم جذب‌شونده)، ایزوترم‌های جذب (منحنی‌های تعادل) را

می‌توان با معادله فرندلیچ بیان کرد:

$$C^* = K[V(C_0 - C^*)]^n$$

که در آن $V(C_0 - C^*)$ ، جذب ظاهری بر واحد جرم جاذب و K و n هر دو ثابت هستند. همچنین C_0 غلظت حل‌شونده اولیه در مایع و C^* جرم حل‌شونده بر حجم مایع است.



منابع و مراجع

۱- تریبال، رابرت. انتقال جرم، ترجمه: طاهره کاغذچی و مرتضی سهرابی، تهران، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، ویرایش سوم، ۱۳۹۵.

2- Robert E. Treybal, "Mass Transfer", 3th Edition.

3- Mc Cabe, W.L, Smith , J.C. "Unit Operation of chemical Engineering", 4th Edition.

۴- مجموعه سؤالات آزمون‌های سازمان سنجش تا سال ۱۳۹۹