

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، انتروپی 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.



کلمه 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 آهسته سازنده‌ها، از یک فاز به فاز دیگر، به تعادل نزدیک می‌شود، لذا جداسازی هرگز کامل نخواهد بود.

کلمه 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.

کلمه 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.



د) رطوبت زدایی (dehumidification) و مرطوب سازی (humidification): اگر فاز مایع فقط از یک جزء تشکیل شده باشد، ولی فاز گاز دو یا چند سازنده‌ای باشد (که فقط جزء سازنده مایع بتواند نفوذ کند و بقیه اجزا در مایع حل‌نشده باشند)، عمل را بسته به جهت انتقال جزء تشکیل‌دهنده فاز مایع، رطوبت زدایی یا رطوبت گیری می‌گویند. از تماس هوای خشک با آب، بخشی از آب به درون هوا تبخیر خواهد شد (رطوبت دادن هوا)، همچنین در اثر تماس هوای بسیار مرطوب با آب خالص قسمتی از رطوبت هوا میعان خواهد یافت (رطوبت گیری). در هر دو مورد بخار آب از میان هوا نفوذ نموده و این قبیل اعمال جزء عملیات انتقال جرم محسوب می‌گردند.

عملیات مرطوب سازی، تنها حالت استثنایی است که وقتی دو فاز در کنار هم قرار می‌گیرند، بلافاصله تعادل برقرار می‌شود (تعادل مستقل از زمان است).

۳- گاز - جامد: تقسیم‌بندی عملیات این گروه بر اساس تعداد سازنده‌هایی که در هر یک از دو فاز ظاهر می‌شود، انجام می‌گیرد.

الف) تصعید جزء به جزء (fractional sublimation): اگر یک مخلوط جامد متشکل از چند سازنده به طور نسبی تبخیر شود، بدون آن‌که فاز مایعی پدید آید، بخارات حاصله و جامد باقیمانده هر یک حاوی کلیه سازنده‌ها اما با غلظت‌های متفاوتی خواهد گردید، این عمل را تصعید جزء به جزء گویند.

ب) خشک کردن (drying): در این حالت، ممکن است کلیه سازنده‌ها در دو فاز موجود نباشند. مثلاً اگر جامدی که با مایع فرار مرطوب شده باشد، در مجاورت گاز خشک قرار گیرد، رطوبت موجود در آن خارج شده و به درون گاز نفوذ می‌کند. این عمل را خشک کردن و یا گاهی دفع (desorption) می‌نامند. در این عملیات نفوذ از فاز جامد به فاز گاز صورت می‌گیرد. یک مثال معمولی، خشک کردن لباس مرطوب در اثر تماس آن با هوا است. البته desorption فقط از سطح صورت می‌گیرد، در حالی که در drying جزء انتقالی از عمق جامد حرکت کرده و به درون گاز نفوذ می‌کند.

ک) مثال ۴: در فرآیند desorption کدام حالت اتفاق می‌افتد؟

- (۱) نفوذ از گاز به جامد (۲) نفوذ از گاز به مایع (۳) نفوذ از جامد به گاز (۴) نفوذ از جامد به مایع

پاسخ: گزینه «۳» در فرآیند دفع یا desorption، نفوذ از فاز جامد به فاز گاز صورت می‌گیرد. مثل خشک شدن یک جامد مرطوب در مجاورت گاز خشک.

ک) مثال ۵: در یک دستگاه جداسازی، هوای گرم محتوی بخار استون در تماس با قطرات سرد مایع استون قرار می‌گیرد. اسم این فرآیند چیست؟

(مهندسی فرآوری و انتقال گاز - سراسری ۹۰)

- (۱) دفع گاز (۲) رطوبت‌دهی (۳) رطوبت‌زدایی (۴) جذب گاز

پاسخ: گزینه «۳» اگر فاز مایع فقط از یک جزء تشکیل شده باشد ولی فاز گاز دو یا چند سازنده‌ای باشد (که فقط جزء سازنده مایع می‌تواند نفوذ کند) عمل را بسته به جهت انتقال جزء تشکیل‌دهنده فاز مایع، رطوبت‌زدایی و رطوبت‌گیری (رطوبت‌دهی) می‌گویند. در این سؤال بخار استون در هوای گرم و در تماس با قطرات سرد مایع استون، میعان پیدا کرده و از فاز بخار به فاز مایع منتقل می‌شود، در واقع از فاز گاز رطوبت‌زدایی می‌شود. در فرآیند جذب یا دفع، هر دو فاز به صورت محلول بوده و یک سازنده (یا گروهی از سازنده‌ها) بین دو فاز توزیع می‌گردد.

ک) مثال ۶: عملیات drying معادل کدام فرآیند است؟

- (۱) desorption (۲) adsorption (۳) absorption (۴) sublimation

پاسخ: گزینه «۱» اگر جامدی که با مایع فرار مرطوب شده است، در مجاورت گاز خشک قرار گیرد، رطوبت موجود در آن خارج شده و به درون گاز نفوذ می‌کند. این عمل را خشک کردن و یا گاهی دفع (desorption) می‌نامند. adsorption به معنی جذب سطحی، absorption به معنی جذب گاز و sublimation فرآیند تصعید است.

ج) جذب سطحی (adsorption): اگر نفوذ در خلاف جهت فرآیند خشک کردن یعنی از فاز گاز به فاز جامد انجام پذیرد، عمل را جذب سطحی می‌نامند. مثلاً، اگر مخلوطی از هوای مرطوب در معرض سیلیکاژل فعال شده قرار گیرد، بخار آب به درون فاز جامد نفوذ نموده و هوا خشک می‌شود.

د) جذب سطحی جزئی (fractional adsorption): در این حالت، مخلوط گازی ممکن است سازنده‌های مختلفی داشته باشد که هر یک از آنها با مقادیر متفاوتی بر روی جامد جذب شوند. مثالی از این مورد، جذب مخلوط پروپان و پروپیلن بر روی کربن فعال شده است که هر دو جزء جذب شده، ولی میزان جذب آن‌ها متفاوت است.

ک) مثال ۷: کدام فرآیند عکس عمل adsorption است؟

- (۱) absorption (۲) desorption (۳) sublimation (۴) extraction

پاسخ: گزینه «۲» اگر نفوذ در خلاف جهت فرآیند خشک کردن (desorption یا drying)، یعنی از فاز گاز به جامد، صورت گیرد، به آن جذب سطحی یا adsorption گویند.



نکته ۲: هنگامی که فاز گاز، یک بخار خالص است، مانند تصعید یک جامد فرار از یک مخلوط حاوی یک جسم غیر فرار، عمل بیشتر به شدت حرارت دادن به مخلوط بستگی دارد تا به اختلاف غلظت و اساساً از نوع غیر نفوذی خواهد بود.

۴- مایع - مایع: بارزترین نمونه در این حالت، استخراج مایع (Liquid extraction) است. این عملیات عبارت است از جداسازی که در آن‌ها دو فاز مایع نامحلول با یکدیگر تماس داده می‌شوند. یک مثال از این حالت، جداسازی محلول استن از آب توسط تتراکلریدکربن است.

۵- مایع - جامد: مثال‌هایی از این حالت عبارت‌اند از:

الف) تبلور جزء به جزء (fractional crystallization): تبلور، تشکیل ذرات جامد در یک فاز همگن است که در آن کلیه سازنده‌ها در دو فاز در وضعیت متعادل قرار می‌گیرند. جالب‌ترین مثال برای این مورد، روش‌های خاص تصفیه منطقه‌ای (Zone refining)، برای به‌دست آوردن فلزات بسیار خالص و یا نیمه‌هادی می‌باشد.

ب) استخراج با حلال (Leaching): جداسازی انتخابی یک سازنده از یک مخلوط جامد توسط یک حلال مایع را گویند. مثل جداسازی طلا از سنگ معدن آن، توسط محلول‌های سیانید و یا جداسازی روغن از پنبه دانه توسط هگزان. در این حالت نفوذ از جامد به مایع صورت می‌گیرد.

ج) جذب سطحی (adsorption): در این فرآیند نفوذ از مایع به جامد داریم. مثل جداسازی ناخالصی رنگی موجود در محلول‌های شربت قند نیشکر، توسط تماس دادن محلول آن با کربن فعال.

۶- جامد - جامد: در این حالت، چون شدت انتقال جرم درون فازهای جامد، بسیار کند است، هیچ عملیات صنعتی در این گروه قرار نمی‌گیرد.

کلمه مثال ۸: جداسازی طلا از سنگ معدن آن به وسیله محلول سیانید، در کدام عملیات انجام می‌شود؟

crystallization (۱) sublimation (۲) permeation (۳) leaching (۴)

پاسخ: گزینه «۴» برای جداسازی طلا از سنگ معدن آن، از فرآیند Leaching یا استخراج با حلال استفاده می‌شود.

(آزاد ۸۶)

کلمه مثال ۹: کدام فرآیند زیر یک نمونه leaching به شمار می‌رود؟

- ۱) استخراج نمک از آب دریا یا تبخیر آب
- ۲) حذف ناخالصی محلول نیشکر با کربن فعال
- ۳) استخراج روغن زیتون از دانه زیتون با حلال هگزان
- ۴) استخراج تتراکلرید کربن از استون با آب

پاسخ: گزینه «۳» برای جداسازی روغن از دانه‌های روغنی از فرآیند leaching استفاده می‌شود.

(آزاد ۸۲)

کلمه مثال ۱۰: کدام یک از فرآیندهای زیر برای گرفتن روغن نباتی از دانه‌های روغنی به کار می‌رود؟

۱) Filtration (فیلتراسیون) ۲) Liquid extraction (استخراج مایع)
۳) leaching (لیچینگ) ۴) evaporation (تبخیر)

پاسخ: گزینه «۳» از فرآیند leaching (استخراج جامد) برای جداسازی دانه‌های روغنی استفاده می‌شود.

کلمه مثال ۱۱: در کدام یک از فرآیندهای انتقال جرم، هم انتقال از فاز گاز به جامد و هم از مایع به جامد می‌تواند وجود داشته باشد؟

۱) drying ۲) adsorption ۳) dehumidification ۴) absorption

پاسخ: گزینه «۲» در فرآیند جذب سطحی هم انتقال از فاز گاز به جامد داریم، مثل نفوذ بخار آب از درون هوا روی سیلیکاژل فعال شده و هم انتقال از فاز مایع به جامد اتفاق می‌افتد، مثل جداسازی ناخالصی رنگی موجود در محلول‌های شربت قند نیشکر توسط تماس دادن محلول آن با محلول کربن فعال.

کلمه مثال ۱۲: برای تهیه فلزات نیمه‌هادی، کدام فرآیند انتقال جرم، به کار گرفته می‌شود؟

۱) crystallization ۲) leaching ۳) sublimation ۴) stripping

پاسخ: گزینه «۱» از فرآیند تبلور برای تهیه فلزات نیمه‌هادی یا بسیار خالص استفاده می‌شود.

جداسازی فازها با استفاده از غشاء

غشاهای مختلف، بسته به نوع عمل جداسازی، به طرق مختلف کار می‌کنند. نقش کلی آن‌ها، جلوگیری از مخلوط شدن دو فاز مختلف در یکدیگر است. همچنین وجود آن‌ها باعث جلوگیری از جریان عادی هیدرودینامیکی و جابه‌جایی اجسام درون یکدیگر، از طریق نفوذ می‌شود. وجود غشاء باعث جداسازی مواد از یکدیگر در اثر کنترل راه عبور سازنده‌ها از یک سو به سوی دیگر غشاء می‌گردد.

در مورد غشاءها، سه حالت پیش می‌آید:

۱- گاز - گاز:

فرآیند نفوذ (Diffusion): غشاء مورد استفاده در این فرآیند دارای تخلخل بسیار ریز است و جداسازی براساس اختلاف در جرم مولکولی اجزاء است و سازنده‌های مختلف با شدت‌های گوناگونی که بستگی به جرم مولکولی آن‌ها دارد، از درون غشاء عبور خواهند کرد. مثل جداسازی ایزوتوپ‌های اورانیوم. فرآیند تراوش (Permeation): در این فرآیند غشاء دارای تخلخل نیست. گاز هنگام عبور از غشاء، ابتدا درون آن حل شده و سپس نفوذ می‌نماید. بنابراین جداسازی بر اساس اختلاف حلالیت است. مثل جداسازی هلیوم از گاز طبیعی با استفاده از غشاهای پلیمری فلور و کربن.

۲- گاز - مایع:

این عملیات براساس تراوشی اجسام از غشاء است. مثل جداسازی آب و الکل توسط غشایی غیرمتخلخل که قدرت حل کردن الکل را دارد و الکل پس از عبور از غشاء، در سمت دیگر آن تبخیر خواهد شد.

۳) مایع - مایع: مثال‌های این حالت عبارت‌اند از:

الف) دیالیز: جداسازی یک جسم بلوری از یک محلول کلئیدی با استفاده از یک حلال مایع و غشایی که بتواند فقط بلورهای حل شده در حلال فوق را عبور دهد، انجام می‌پذیرد که این عمل، دیالیز نامیده می‌شود. مثل جداسازی ناخالصی‌های کلئیدی شربت قند چغندر، با استفاده از حلال آب و یک غشاء نیمه‌تراوا. دیالیز جزء به جزء برای جداسازی دو جسم بلوری از یک مخلوط مایع مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن اختلاف تراوشی اجسام از غشاء، جداسازی را امکان‌پذیر می‌سازد.

ب) الکترو دیالیز: اگر یک نیروی محرکه الکتریکی که سبب نفوذ ذرات باردار از غشاء می‌گردد، اعمال شود، فرآیند را الکترو دیالیز گویند.

ج) اسمز: اگر حلالی را از محلولی که در آن است، با استفاده از غشایی که فقط بتواند حلال را از خود عبور دهد، جدا کنند، فرآیند را اسمز می‌گویند. بدیهی است که با استفاده از فشار مخالف و غالب بر فشار اسمزی می‌توان جریان حلال را معکوس نمود و حلال و حل شونده بدین ترتیب با عمل اسمز معکوس از یکدیگر جدا خواهند شد و این یکی از فرآیندهای متداول در شیرین کردن آب دریاست.

ک) مثال ۱۳: نفوذ، یکی از روش‌های جداسازی فازها با استفاده از غشاء است. کدام گزینه در رابطه با این روش غلط است؟

- ۱) اساس جداسازی در اختلاف جرم مولکولی است. (۲) غشاء به کار رفته دارای تخلخل است. (۳) ایزوتوپ‌های اورانیوم را می‌توان با این روش جدا نمود. (۴) جداسازی بر اساس اختلاف حلالیت است.

پاسخ: گزینه «۴» در فرآیند غشایی بر مبنای نفوذ، غشاء مورد استفاده دارای تخلخل بسیار ریز است و جداسازی بر اساس اختلاف در جرم مولکولی اجزاء می‌باشد. در فرآیند دیگر که به آن تراوش گفته می‌شود، غشاء غیر متخلخل بوده و جداسازی بر اساس اختلاف حلالیت اجزاء می‌باشد.

ک) مثال ۱۴: کدام یک از فرآیندهای زیر براساس اختلاف تراوشی اجزاء انجام می‌گیرد؟

- ۱) اسمز معکوس (۲) الکترو دیالیز (۳) دیالیز (۴) سانتریفیوژ

پاسخ: گزینه «۳» فرآیند اسمز معکوس براساس اختلاف فشار وارده، الکترو دیالیز براساس نیروی الکتریکی وارده، سانتریفیوژ براساس اختلاف جرم مولکولی اجزاء و دیالیز براساس اختلاف تراوشی اجزاء است.

ک) مثال ۱۵: در فرآیند دیالیز انتقال از درون غشاء از به اتفاق می‌افتد. (مهندسی فرآوری و انتقال گاز - سراسری ۹۰)

- ۱) حلال، محلول، حلال (۲) حلال، حلال، محلول (۳) ماده حل شده، حلال، محلول (۴) ماده حل شده، محلول، حلال

پاسخ: گزینه «۴» دیالیز جزء فرآیندهای مایع - مایع جداسازی فازها با استفاده از غشاء است. در این فرآیند جداسازی یک جسم بلوری (ماده حل شده) از یک محلول کلئیدی با استفاده از یک حلال مایع و غشایی که بتواند فقط بلورهای حل شده در حلال فوق را عبور دهد، انجام می‌پذیرد. مثل جداسازی ناخالصی‌های کلئیدی شربت قند چغندر، با استفاده از حلال آب و یک غشاء نیمه تراوا.

تماس مستقیم فازهای محلول

به علت مشکلاتی که در حفظ گرادیان غلظت در صورت مخلوط نشدن سیالات وجود دارد، این عملیات در شمار اعمالی که موارد استفاده صنعتی داشته باشند، قرار نمی‌گیرند، نمونه‌های نادری از این نوع عبارت‌اند از:

۱- نفوذ حرارتی (thermal diffusion): در این فرآیند، گرادیان غلظت در یکی از فازهای گاز یا مایع در اثر به وجود آمدن اختلاف درجه حرارت در سیستم حاصل می‌شود و بدین ترتیب جداسازی نسبی سازنده‌ها امکان‌پذیر می‌گردد. مثل جداسازی ^3He از ^4He (ایزوتوپ‌های هلیوم).

۲- نفوذ جارویی (sweep diffusion): اگر یک بخار قابل میعان مانند بخار آب را از درون یک مخلوط گاز عبور دهند، می‌تواند ترجیحاً یکی از سازنده‌های مخلوط گاز را با خود خارج سازد. این عمل نفوذ جارویی (sweep diffusion) نام دارد. اگر دو منطقه از یک فاز گاز که دارای غلظت‌های متفاوتی هستند، با استفاده از غربالی که منافذ نسبتاً درشت داشته باشد، جدا شوند، فرآیند را atmolysis گویند.



۳- سانتریفیوژ: در این عملیات، اجزای یک مخلوط گازی را تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز قرار می‌دهند. به خاطر اختلاف جرم مولکولی اجزاء، نیروی وارده بر آن‌ها کمی متفاوت بوده و در نتیجه مولکول‌های سنگین و سبک از هم جدا می‌شوند، مثل جداسازی ایزوتوپ‌های اورانیوم.

کج مثال ۱۶: نفوذ حرارتی، جزء کدام دسته از عملیات انتقال جرم قرار می‌گیرد؟

- (۱) تماس مستقیم دو فاز نامحلول در یکدیگر
(۲) تماس مستقیم فازهای محلول
(۳) کشش سطحی
(۴) فرآیند غشایی

پاسخ: گزینه «۲» نفوذ حرارتی مربوط به تماس مستقیم فازهای محلول است که در آن، گرادیان غلظت در یکی از فازهای گاز یا مایع در اثر ایجاد اختلاف درجه حرارت، حاصل می‌شود.

کج مثال ۱۷: در کدام یک از فرآیندهای زیر، فاز گازی وجود ندارد؟

- (۱) atmolysis (۲) thermal diffusion (۳) sweep diffusion (۴) dialysis

پاسخ: گزینه «۴» در فرآیند دیالیز، تماس مایع - مایع وجود دارد.

استفاده از کشش سطحی

چهارمین مورد در تقسیم‌بندی عملیات انتقال جرم، استفاده از کشش سطحی است. مثالی از این حالت، فرآیند جداسازی با ایجاد کف است. در این فرآیند، با دمیدن هوا به درون محلول، سطح وسیعی از کف ایجاد شده که با جمع‌آوری آن می‌توان جسم حل شده را تغلیظ نمود. این فرآیند متفاوت از فرآیند شناورسازی است.

کج مثال ۱۸: در فرآیند Foam separation، از کدام عامل استفاده می‌شود؟

- (۱) اختلاف دما (۲) هم زدن مکانیکی (۳) اختلاف جرم مولکولی اجزاء (۴) کشش سطحی

پاسخ: گزینه «۴» در فرآیند Foam separation یا جداسازی با ایجاد کف، از خاصیت کشش سطحی استفاده می‌گردد.

کج مثال ۱۹: کدام یک از فرآیندهای زیر جزء فرآیندهای انتقال جرم قرار نمی‌گیرد؟

- (۱) خشک شدن لباس (۲) جوشاندن آب نمک (۳) تبلور (۴) جذب سطحی

پاسخ: گزینه «۲» وقتی آب نمک را بجوشانند، جداسازی کامل آب و نمک حاصل خواهد شد. همچنین دو فاز بلافاصله به تعادل با هم می‌رسند، یعنی تعادل تابع زمان نیست.

کج مثال ۲۰: کدام مورد در فرآیندهای انتقال جرم صحیح است؟

- (۱) در فرآیند stripping، انتقال جرم از فاز گاز به فاز مایع صورت می‌گیرد.
(۲) در عمل تقطیر، فاز گاز به صورت مستقل وارد سیستم می‌شود.
(۳) فرآیند اسمز معکوس، یک فرآیند خود به خود است.
(۴) در فرآیند Humidification تعادل میان فازها مستقل از زمان است.

پاسخ: گزینه «۴» در فرآیند دفع گازی یا stripping جهت انتقال جرم از فاز مایع به فاز گاز است. در عملیات تقطیر، فاز گاز در اثر حرارت دادن فاز مایع تولید می‌شود. در فرآیند اسمز معکوس، با استفاده از فشار مخالف و غالب بر فشار اسمزی می‌توان جریان حلال را معکوس نمود، پس یک فرآیند غیر خود به خودی است.

عملیات مستقیم و غیرمستقیم

بسته به نوع مجاور نمودن دو فاز، عملیات انتقال جرم را به دو نوع مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌کنند.

(الف) عملیات مستقیم: در این عملیات، در اثر افزایش یا کاهش حرارت، دو فاز از یک فاز اولیه به دست می‌آیند. مثل تقطیر جزئی، تبلور جزئی و نوعی از استخراج جزئی.

(ب) عملیات غیرمستقیم: در این عملیات یک جسم خارجی به سیستم افزوده می‌شود. مثل جذب گاز، دفع گاز، خشک کردن، استخراج از جامدات و انواع خاص تبلور جزئی.

ویژگی خاص عملیات مستقیم آن است که محصولات به طور مستقیم و عاری از مواد افزودنی به دست می‌آیند، بنابراین، در شرایطی که بتوان از آنها استفاده نمود، ارجح هستند. اگر محصولات به صورت خالص مورد نیاز باشند، معایب اعمال غیر مستقیم بسیار بوده و استفاده از آن‌ها چندان توصیه نمی‌شود، زیرا هزینه‌های بازیابی مجدد جسم افزوده شده به سیستم مطرح است و جداسازی ماده اضافه شده به سیستم به ندرت به طور کامل انجام می‌گیرد. افزایش یک ماده خارجی به سیستم، همچنین ممکن است مسائل مربوط به خوردگی دستگاه‌ها را هم تشدید کند. بدیهی است که عملیات غیر مستقیم زمانی بر عملیات مستقیم ترجیح داده می‌شود که جداسازی مستقیم امکان‌پذیر نباشد و یا هزینه‌های جداسازی غیر مستقیم کمتر باشد. در صورتی که ماده جدا شده به صورت خالص مورد نیاز نباشد، بسیاری از معایب عملیات غیر مستقیم از بین می‌رود.

کلمه مثال ۲۱: در عملیات مستقیم

- (۱) جسم خارجی به سیستم افزوده می‌شود، مثل فرآیند جذب
 (۲) جسم خارجی به سیستم افزوده می‌شود، مثل فرآیند تقطیر
 (۳) دو فاز از یک فاز اولیه به دست می‌آید، مثل فرآیند جذب
 (۴) دو فاز از یک فاز اولیه به دست می‌آید، مثل فرآیند تقطیر

پاسخ: گزینه «۴» در عملیات مستقیم، در اثر افزایش یا کاهش حرارت، دو فاز از یک فاز اولیه ایجاد می‌شود. مثل فرآیند تقطیر و تبلور جزئی. فرآیندهای جذب و دفع گازی، خشک کردن و استخراج از جامدات، مربوط به فرآیند غیرمستقیم هستند، زیرا به منظور جداسازی فازها، یک جسم خارجی به سیستم افزوده می‌شود.

اعمال ناپایا

در این عملیات در هر نقطه‌ای از دستگاه، غلظت‌ها با زمان تغییر می‌کنند. حالت ناپایا ممکن است در اثر تغییرات مواد حاصله در خوراک، شدت جریان‌ها و یا تغییر دما و فشار، ایجاد شود. فرآیند ناپیوسته (Batch) و نیمه پیوسته (SemiBatch) جزء اعمال ناپایا محسوب می‌گردد.

اعمال پایا

در این عملیات در هر نقطه‌ای از دستگاه، غلظت‌ها با گذشت زمان ثابت باقی می‌مانند، بنابراین لازم است شدت جریان‌های مداوم و ثابتی به درون و خارج سیستم وجود داشته باشد. همچنین باید رژیم جریان، غلظت اجزاء در جریان‌های خوراک و فشار و درجه حرارت ثابت باشد. عملیات پیوسته (Continuous) جزء عملیات پایا می‌باشد.

کلمه مثال ۲۲: کدام گزینه صحیح است؟

- (۱) فرآیند Batch جزء اعمال پایا می‌باشد.
 (۲) در فرآیند پایا، غلظت مواد با زمان تغییر می‌کند.
 (۳) در فرآیند ناپایا، غلظت مواد ثابت می‌ماند.
 (۴) در فرآیند پایا، دما و فشار فرآیند ثابت می‌باشد.

پاسخ: گزینه «۴» در فرآیند پایا، در هر نقطه‌ای از دستگاه، غلظت‌ها با گذشت زمان ثابت باقی می‌مانند. لازمه این کار ثابت نگه داشتن شدت جریان‌ها، غلظت اجزاء در جریان خوراک، دما و فشار فرآیند است.

عملیات مرحله‌ای (stage – wise)

چنانچه دو فاز نامحلول را در تماس با یکدیگر قرار دهیم، مواد مختلف در دو فاز توزیع متفاوتی خواهند داشت و اگر تنها فازها را به روش مکانیکی از یکدیگر جدا کنیم، این عمل را انتقال جرم در یک مرحله می‌نامند و دستگاه به کار رفته در عمل، یک مرحله (واحد) نامیده می‌شود. مثلاً قیف جدا کننده آزمایشگاهی که برای استخراج به کار می‌رود، یک مرحله انتقال جرم است. عملیات مرحله‌ای را می‌توان به صورت مداوم (پایا) و یا به صورت ناپیوسته انجام داد.

عملیات تماس پیوسته (تماس دیفرانسیلی)

در این عملیات فازها به صورت مداوم در دستگاه با یکدیگر تماس حاصل می‌نمایند و این برخلاف عملیات مرحله‌ای است که در آن‌ها، در هر مرحله جداسازی فازها از یکدیگر انجام می‌شود. طبیعت این روش باعث می‌شود که عمل نیمه پیوسته یا پایا باشد و بنابراین جداسازی در این قبیل عملیات ممکن است معادل کسری از یک واحد ایده‌آل و یا چند واحد ایده‌آل شود. بدیهی است که امکان رسیدن دو فاز به حالت تعادل در هیچ محلی از دستگاه وجود ندارد. در واقع اگر تعادل در هر محلی از سیستم برقرار گردد، بدین معنی است که سیستم معادل با بی‌نهایت مرحله تعادلی عمل می‌کند.

تفاوت اساسی بین عملیات مرحله‌ای و تماس مداوم را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

در عملیات مرحله‌ای، انتقال جرم میان دو فاز سبب می‌شود که اختلاف غلظت بین آن‌ها کاهش یابد و اگر زمان تماس افزایش یابد، تعادل بین دو فاز برقرار خواهد شد و پس از برقراری تعادل، نفوذ بین دو فاز متوقف خواهد گردید. در این حالت شدت نفوذ و زمان، تعیین کننده بازده هر مرحله خواهد بود. در عملیات تماس پیوسته، دو فاز همواره دور از حالت تعادل بوده و نفوذ بین فازها به طور مرتب و در سرتاسر دستگاه انجام می‌گیرد. انتخاب یکی از این دو روش، تا حدودی بستگی به بازده مرحله‌ای خواهد داشت. در صورتی که بازده مرحله‌ای زیاد باشد، واحد نسبتاً ارزان و قابل اطمینان‌تری ضروری بوده و استفاده از عملیات مرحله‌ای مطلوب‌تر است. از طرف دیگر، در صورت کم بودن بازده مرحله‌ای، روش تماس پیوسته از لحاظ اقتصادی و اطمینان کاری مورد توجه خواهد بود.

کلمه مثال ۲۳: در فرآیند با تماس دیفرانسیلی

- (۱) تماس فازها به صورت لحظه‌ای است.
 (۲) هیچ‌گاه تعادل وجود نخواهد داشت.
 (۳) با انتقال جرم، اختلاف غلظت میان فازها کم می‌شود.
 (۴) استفاده از آن همیشه بر فرآیند مرحله‌ای ارجحیت دارد.

پاسخ: گزینه «۲» در فرآیند تماس دیفرانسیلی یا تماس پیوسته، فازها به صورت مداوم در تماس با یکدیگر می‌باشند و فازها همیشه دور از تعادل قرار دارند.



(مهندسی شیمی - بیوتکنولوژی - سراسری ۹۵)

مثال ۲۴: کدام دسته از فرایندهای نام برده شده به عنوان فرایندهای جداسازی مستقیم است؟

- ۱) تقطیر، تبخیر، میعان
- ۲) تصعید، استخراج مایع - مایع
- ۳) تقطیر، تصعید، جذب گاز - مایع
- ۴) رطوبت‌دهی، استخراج جامد - مایع

پاسخ: گزینه «۱» در عملیات مستقیم در اثر افزایش یا کاهش حرارت، دو فاز از یک فاز اولیه به دست می‌آید؛ مثل فرآیند تقطیر، تبخیر و میعان. ولی در عملیات غیرمستقیم یک جسم خارجی به سیستم افزوده می‌شود؛ مثل فرآیند جذب گاز، دفع گاز، خشک کردن، استخراج مایع - مایع، استخراج از جامدات و انواع خاص تبلور جزئی.

اصول طراحی

در طراحی هر واحد مربوط به انتقال جرم، چهار عامل اصلی می‌بایست تعیین گردد که عبارت‌اند از:

- ۱- **تعداد مراحل ایده‌آل:** برای تعیین مراحل ایده‌آل لازم جهت جداسازی مشخصی به صورت عملیات مرحله‌ای و یا معادل آن‌ها در یک عمل تماس پیوسته، دانستن مشخصات تعادلی سیستم و موازنه‌های جرم ضروری خواهد بود.
- ۲- **زمان لازم برای تماس فازها:** در عملیات مرحله‌ای، زمان تماس دو فاز به بازده مرحله‌ای مربوط می‌شود، در حالی که در عملیات تماس پیوسته، زمان تعیین کننده حجم و یا طول دستگاه خواهد بود. به طور کلی زمان تماس را با در نظر گرفتن عوامل مختلف می‌توان تعیین نمود. موازنه مواد، نسبت شدت جریان‌ها را تعیین می‌کند؛ ویژگی‌های تعادل سیستم می‌تواند غلظت‌های نهایی در دو فاز را مشخص نماید و همچنین شدت انتقال جرم بین فازها بستگی به دور بودن سیستم از وضعیت تعادلی خواهد داشت. به علاوه، شدت انتقال جرم بستگی به خواص فیزیکی فازها و رژیم جریان در دستگاه دارد.
- ۳- **شدت جریان‌های مجاز:** تعیین شدت جریان‌های مجاز در اعمال نیمه پیوسته و پایا پیش می‌آید، که به کمک آن‌ها سطح مقطع دستگاه محاسبه می‌شود. با استفاده از مکانیک سیالات، شدت جریان‌های مجاز و به کمک موازنه‌های جرم مقادیر هر یک از جریان‌ها تعیین می‌شوند.
- ۴- **انرژی‌های مورد نیاز:** انرژی‌های حرارتی و مکانیکی در عملیات انتقال جرم مورد استفاده قرار می‌گیرند. انرژی حرارتی جهت ایجاد هر نوع اختلاف درجه حرارت، تولید فازهای جدید (مثلاً تبخیر یک مایع) و همچنین برای تأمین اثرات گرمای انحلال به کار می‌رود. انرژی مکانیکی برای انتقال سیالات و جامدات، پخش کردن مایعات و گازها و همچنین به کار انداختن قسمت‌های متحرک ماشین‌آلات مصرف می‌شود.

مثال ۲۵: به منظور تعیین سطح مقطع دستگاه، از کدام یک از موارد مربوط به اصول طراحی استفاده می‌شود؟

- ۱) شدت جریان‌ها
- ۲) انرژی‌های مورد نیاز
- ۳) مدت زمان تماس میان فازها
- ۴) تعداد مراحل

پاسخ: گزینه «۱» با استفاده از مکانیک سیالات، شدت جریان‌ها محاسبه می‌شود که به کمک این مورد می‌توان سطح مقطع دستگاه را تعیین نمود.

مثال ۲۶: کدام عبارت غلط است؟

- ۱) در انتقال جرم، تعادل وابسته به زمان است.
- ۲) در رطوبت‌زدایی، تماس مستقیم دو فاز نامحلول در یکدیگر را داریم.
- ۳) در جذب سطحی، نفوذ از فاز گاز به فاز جامد صورت می‌گیرد.
- ۴) استخراج مایع - مایع جزء عملیات غیرمستقیم بوده و در آن می‌توان به جداسازی کامل رسید.

پاسخ: گزینه «۴» در فرایندهای انتقال جرم، جداسازی کامل صورت نمی‌گیرد.

مثال ۲۷: کدام مورد مربوط به اصول طراحی هر واحد در عملیات انتقال جرم نمی‌باشد؟

- ۱) تعداد مراحل واقعی
- ۲) تعداد مراحل ایده‌آل
- ۳) زمان تماس فازها
- ۴) شدت جریان مجاز و انرژی‌های مورد نیاز

پاسخ: گزینه «۱» چهار عامل اصلی در طراحی هر واحد مربوط به انتقال جرم عبارت‌اند از: ۱- تعداد مراحل ایده‌آل ۲- زمان لازم برای تماس فازها ۳- شدت جریان‌های مجاز ۴- انرژی‌های مورد نیاز.

توجه: داوطلبانی که بعد از مطالعه کل کتاب نیاز به تست بیشتری برای مرور و تمرین دارند، می‌توانند با مراجعه به سایت www.modaresanesharif.ac.ir بانک تست‌های مربوط به همه فصول کتاب را دانلود نمایند.



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:

$$M_i = \text{جرم مولکولی جزء } i$$

عملیات واحد



مدرس‌ان 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 که 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: 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.

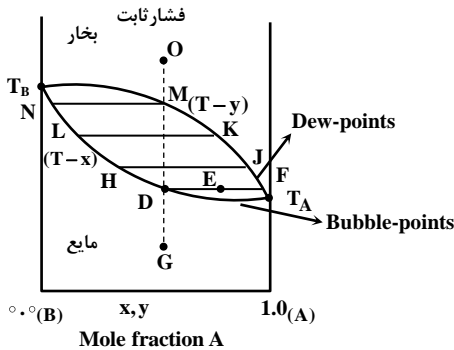


درسنامه (۱): تعادلات بخار - مایع

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)



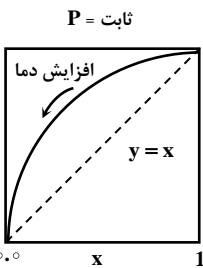
محلول مایعی شامل دو جزء A و B با غلظت مشخص G را در نظر می‌گیریم (A جزء فرارتر). اگر به آن حرارت داده شود، اولین حباب بخار در D ظاهر خواهد شد (غنی‌ترین بخار) که دارای ترکیب نسبی نقطه F است. حباب از سازنده فرارتر غنی است و به این دلیل منحنی پایینی را منحنی نقاط حباب - دما (Bubble Points) می‌نامند.

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 بر حسب 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.

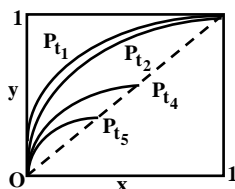
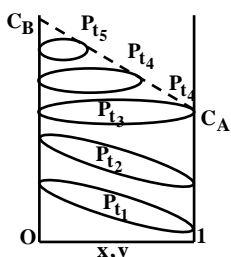
نقطه E مشخص‌کننده یک مخلوط دو فازی متشکل از یک فاز مایع با ترکیب نسبی D و یک فاز بخار با ترکیب نسبی F است و مقادیر نسبی دو فاز به نحوی است که نقطه E مبین کل مخلوط می‌شود.

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

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.



$$P_{t5} > P_{t4} > P_{t3} > P_{t2} > P_{t1}$$

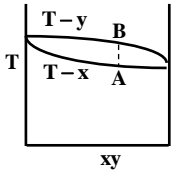
مثال ۲: یک فاز مایع شامل دو ترکیب آب و متانول (۹۶٪ متانول و ۴٪ آب) در نقطه جوش وجود دارد. یک فاز بخار نیز شامل دو ترکیب آب و متانول (۹۶٪ متانول و ۴٪ آب) در نقطه شبنم وجود دارد. فشار کل هر دو فاز یکسان است، چه ارتباطی بین درجه حرارت این دو فاز وجود دارد؟ (درصدها مولی هستند).

(۱) درجه حرارت فاز مایع بیشتر است.

(۲) درجه حرارت هر دو فاز یکسان است.

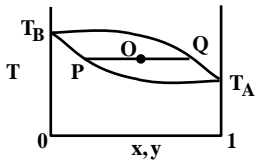
(۳) درجه حرارت فاز بخار بیشتر است.

(۴) براساس اینکه تعداد هر فاز چقدر است، جوابهای بیشتری وجود دارد.



پاسخ: گزینه «۳» با توجه به اینکه فشار هر دو فاز یکسان و ترکیب هر دو مخلوط یکسان است، نمودار $T-xy$ برای این مخلوط، تقریباً به شکل مقابل است. ترکیبی که در نقطه جوش قرار دارد، روی منحنی $T-x$ (نقطه A) و ترکیب دیگر که در نقطه شبنم است، روی منحنی $T-y$ قرار دارد (نقطه B). پس درجه حرارت فاز بخار بیشتر است.

مثال ۳: با توجه به منحنی زیر، در صورتی که تعداد کل مولهای مخلوط، ۱۰ مول باشد، این مخلوط شامل چند مول بخار (V) و چند مول مایع (L) می‌باشد؟ ($\overline{PO} = 3$ ، $\overline{PQ} = 7$)



(۱) $L = 4/3$ ، $V = 5/7$

(۲) $L = 7$ ، $V = 3$

(۳) $L = 3$ ، $V = 7$

(۴) $L = 5/7$ ، $V = 4/3$

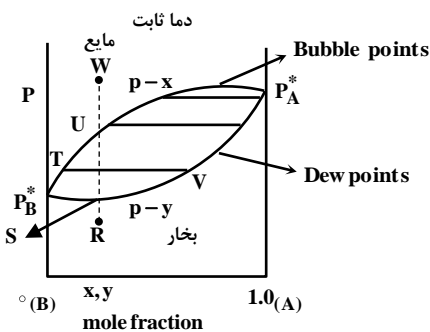
پاسخ: گزینه «۳» نمودار مربوط به منحنی دما - غلظت یک مخلوط دو جزئی در فشار ثابت است. نقطه O مشخص کننده یک مخلوط دو فاز است. متشکل از یک فاز مایع با ترکیب نسبی P و فاز بخار با ترکیب نسبی Q است. مقادیر نسبی فازهای در حال تعادل به وسیله طول پاره‌خطها تعیین می‌گردد:

$$\frac{L}{V} = \frac{\text{مولهای P (فاز مایع)}}{\text{مولهای Q (فاز بخار)}} = \frac{\overline{OQ}}{\overline{PO}} = \frac{7-3}{3} = \frac{4}{3} \Rightarrow L = \frac{4}{3} V$$

$$\begin{cases} L + V = 10 & L = 5/7 \text{ mol} \\ L = \frac{4}{3} V & \Rightarrow V = 4/3 \text{ mol} \end{cases}$$

از طرف دیگر مجموع مایع و بخار، ۱۰ مول است بنابراین خواهیم داشت:

تعادل در دمای ثابت (نمودار P-xy)



این دو منحنی از فشار بخار B خالص (P_B^*) تا فشار بخار A خالص (P_A^*) ادامه داشته و فاقد نقاط حداکثر و یا حداقل می‌باشند. در این منحنی نیز تعداد بی‌نهایت خط tie افقی نظیر TV وجود دارد که مشخصات بخار اشباع در V را به مایع در حال تعادل با آن در T ارتباط می‌دهد. محلولی که در یک ظرف بسته در مشخصات W قرار داشته باشد، به شکل مایع است و اگر فشار ظرف در دمای ثابت کاهش یابد، اولین حباب بخار در U تشکیل خواهد شد. در نقطه S عمل تبخیر به پایان می‌رسد و کاهش بیشتر فشار سبب تشکیل بخار داغ (super heat) در R می‌شود.

فراریت نسبی

در منحنی xy ، هر چه فاصله بین منحنی تعادل و خط $y = x$ بیشتر باشد، اختلاف بین غلظت‌های فاز مایع و بخار بالاتر بوده و جداسازی به وسیله فرآیند تقطیر آسان‌تر خواهد بود. معیار کمی چنین پدیده‌ای ضریب تفکیک و یا در مورد تقطیر فراریت نسبی (α) نامیده می‌شود. این معیار که عبارت از نسبت غلظت‌های A و B در یک فاز به همین نسبت در فاز دوم است، در واقع مبین جدایی پذیری مواد از یکدیگر می‌باشد:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{y}{x}\right)_A}{\left(\frac{y}{x}\right)_B} = \frac{k_A}{k_B}$$

$k =$ ضریب توزیع، این ضریب تابع دما، فشار و نوع ماده است که با افزایش دما و کاهش فشار، زیاد می‌شود.

α معیار جداسازی است. لازمه جداسازی این است که $\alpha > 1$ باشد.

اگر $\alpha = 1$ باشد، جداسازی به کمک تقطیر امکان پذیر نیست.



اگر $\alpha < 1$ باشد، یعنی جای A و B را اشتباه فرض کرده‌ایم. با شرط α ثابت خواهیم داشت:
اگر $\alpha \gg 1$ باشد، آنگاه تقطیر به تبخیر شبیه خواهد بود.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{y}{x}\right)_A}{\left(\frac{y}{x}\right)_B} = \frac{\frac{y}{x}}{\frac{1-y}{1-x}} \Rightarrow y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x}$$

این رابطه ارتباط X و Y را در حالت تعادل بیان می‌کند.

نکته ۴: هرچه α بزرگ‌تر باشد جداسازی راحت‌تر است.

معیار جداسازی با تقطیر α (فراریت نسبی) است نه اختلاف نقطه جوش اجزاء. اگر سیستم ایده‌آل باشد، α برابر نسبت فشار بخار جزء A به فشار بخار جزء B خواهد بود. بنابراین در مورد سیستم‌های ایده‌آل، اختلاف فشار بخار اجزاء می‌تواند معیار جداسازی باشد.

$$\left. \begin{array}{l} \text{قانون راولت: } P_A = x_A \cdot P_A^*, P_B = x_B \cdot P_B^* \\ \text{قانون دالتون: } P_A = y_A \cdot P_t, P_B = y_B \cdot P_t \end{array} \right\} \Rightarrow \alpha = \frac{P_A^*}{P_B^*}$$

در مورد سیستم‌های ایده‌آل:

این معادلات نشان می‌دهند که در حالات ایده‌آل منحنی $P-x$ یک خط راست خواهد بود و در حالات انحراف از حالت ایده‌آل، نمودار $P-x$ از این خط مستقیم منحرف می‌شود. ایده‌آل بودن محلول، اثری روی منحنی $P-y$ ندارد.

مثال ۴: در فرآیند تقطیر یک مخلوط دو جزئی، سیستم ایده‌آل فرض می‌شود. در صورتی که فشار بخار جزء A خالص 1000 mmHg و فشار بخار جزء B خالص، 500 mmHg باشد، رابطه تعادلی برای این سیستم کدام است؟

$$y = \frac{3x}{1+2x} \quad (۴) \quad y = \frac{2/16x}{1+3/16x} \quad (۳) \quad y = \frac{2/16x}{1+1/16x} \quad (۲) \quad y = \frac{2x}{1+x} \quad (۱)$$

پاسخ: گزینه «۱» با توجه به اینکه سیستم ایده‌آل فرض شده است، ضریب فراریت به صورت $\alpha = \frac{P_A^*}{P_B^*}$ می‌باشد. بنابراین خواهیم داشت:

$$\alpha = \frac{1000}{500} = 2$$

$$y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x} = \frac{2x}{1+x}$$

فراریت نسبی ثابت است، بنابراین می‌توان نوشت:

مثال ۵: در یک سیستم دوجزئی، هرگاه کسر مولی A در فاز بخار $1/10$ و در فاز مایع در حال تعادل با آن $1/10$ باشد، ضریب فراریت ماده A نسبت به ماده B، کدام یک از مقادیر زیر است؟

$$10 \quad (۴) \quad 9 \quad (۳) \quad 1/1 \quad (۲) \quad 11 \quad (۱)$$

پاسخ: گزینه «۱» با توجه به تعریف ضریب فراریت یا فراریت نسبی برای یک مخلوط دوجزئی، خواهیم داشت:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{y}{x}\right)_A}{\left(\frac{y}{x}\right)_B} = \frac{\frac{y}{x}}{\frac{1-y}{1-x}} = \frac{\frac{1/10}{1/10}}{\frac{1-1/10}{1-1/10}} = 11$$

محلول‌های کامل – قانون راولت

در محلول‌های کامل، فشار جزئی تعادلی هر سازنده (P_i) در دمای ثابت، برابر با حاصل ضرب فشار بخار سازنده خالص (P_i^*) در آن دما، در جزء مولی آن سازنده (x_i) در مایع است که همان قانون راولت می‌باشد:

$$P_A = x_A P_A^* \quad P_B = (1 - x_A) P_B^*$$

در این محلول‌ها، منحنی تعادل بالای خط $y = x$ قرار می‌گیرد.

اگر فاز بخار نیز کامل باشد، قانون دالتون برقرار خواهد بود:

$$\begin{cases} P_t = P_A + P_B \\ P_A = y_A P_t \end{cases}$$

از این به بعد کسر مولی جزء فرارتر (A) را در فازهای مایع و بخار، به ترتیب با X و Y نشان می‌دهیم.

نکته ۵: قانون راولت در مورد سازنده‌ای که غلظت آن در مخلوط زیاد است، صادق می‌باشد.

سیستم‌های غیر ایده آل

این سیستم‌ها دو دسته هستند:

۱- انحراف مثبت از قانون راولت

مخلوطی که فشار کل آن از فشاری که بر اساس روابط محلول‌های کامل محاسبه شود، بزرگ‌تر باشد، به مخلوط دارای انحراف مثبت از قانون راولت موسوم است.

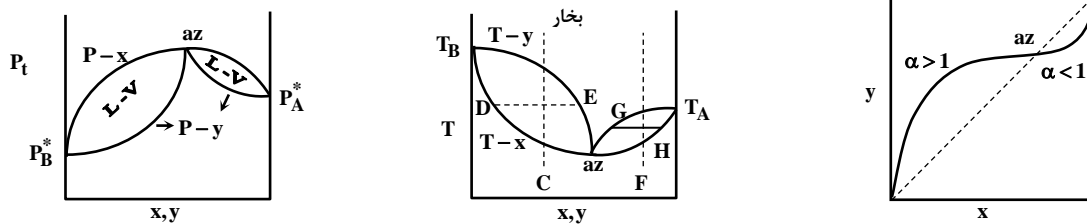
$$P_t > (xP_A^* + (1-x)P_B^*) \Rightarrow P_A > xP_A^*, P_B > (1-x)P_B^*$$

در این حالت منحنی $P_t x$ بالاتر از خط قانون راولت است و منحنی $P_t y$ می‌تواند بالاتر یا پایین‌تر از آن خط قرار گیرد.

حداقل نقطه جوش در مخلوط‌ها (حداکثر فشار)، نقطه آزئوتروپ (هم جوشی):

این حالت وقتی است که انحراف مثبت از قانون راولت زیاد بوده و اختلاف فشار بخار اجزای سازنده کم باشد. در این حالت منحنی‌های فشار کل در دمای ثابت، ممکن است در یک غلظت معین دارای یک نقطه حداکثر باشند. در این حال گفته می‌شود که یک هم جوش (آزئوتروپ) یا مخلوطی با نقطه جوش ثابت تشکیل شده است.

نمودار $T - xy$ ، $P - xy$ و برای چنین سیستم‌هایی به شکل زیر است:



در نمودار $T - xy$ ، در مخلوط‌هایی با ترکیب نسبی کم‌تر از x_{az} (آزئوتروپ)، نظیر C، فاز بخار تعادلی (E) نسبت به فاز مایع (D)، از ماده فرار غنی‌تر است. برعکس در مخلوط‌هایی که ترکیب نسبی آنها بزرگ‌تر از x_{az} باشد، نظیر F، فاز بخار (G) نسبت به فاز مایع (H)، از ماده فرار فقیرتر است.

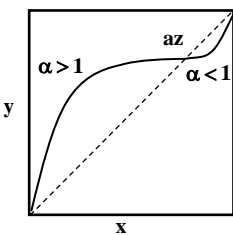
مخلوطی با ترکیب نسبی x_{az} ، دارای بخاری است که ترکیب نسبی آن کاملاً مشابه با فاز مایع در حال تعادل با بخار می‌باشد و لذا در یک دمای ثابت و بدون آنکه تغییری در ترکیب نسبی مخلوط حاصل شود، می‌جوشد.

اگر محلول‌هایی را که دارای مشخصات نقاط D و H باشند، در یک ظرف در باز به جوش آورده و بخارات حاصل را به طور مداوم خارج سازند، دما و ترکیب نسبی مایعات باقیمانده در هر مورد بر روی منحنی تحتانی از نقطه x_{az} دور می‌شوند.

اجزای محلول‌هایی با نقطه آزئوتروپ را نمی‌توان به روش تقطیر معمولی و در فشار مربوط، به طور کامل از یکدیگر جدا کرد، زیرا در این نقطه $y = x$ و $\alpha = 1$ است.

ترکیب نسبی نقطه آزئوتروپ و نیز دمای جوش، با فشار تغییر می‌کند. در بعضی موارد با تغییر فشار، نقطه آزئوتروپ حذف می‌شود.

با توجه به نمودار مقابل داریم:



if $x < x_{az} \Rightarrow y > x \Rightarrow \alpha > 1$

if $x > x_{az} \Rightarrow y < x \Rightarrow \alpha < 1$ فراریت برعکس شده است.

if $x = x_{az} \Rightarrow y = x \Rightarrow \alpha = 1$ مخلوط مثل یک جسم خالص است.

یکی از مهم‌ترین مخلوط‌های دارای حداقل نقطه جوش، مخلوط اتانول و آب است که نقطه هم جوش آن در فشار ۱atm، در دمای $78/2^\circ C$ و جزء مولی ۸۹/۴ درصد اتانول ظاهر می‌شود. با کاهش فشار به پایین‌تر از $7^\circ mmHg$ ، این نقطه حذف می‌گردد. روش دیگر برای حذف آزئوتروپ استفاده از بخار فوق داغ به جای آب و یا یک گاز خنثی است.

۲- انحراف منفی از قانون راولت

این حالت وقتی پیش می‌آید که فشار کل یک سیستم در حال تعادل، از فشاری که بر اساس روابط محلول‌های کامل محاسبه می‌شود، کوچک‌تر باشد.

$$P_t < (xP_A^* + (1-x)P_B^*)$$

در این حالت نمودار $P_t x$ از خط قانون راولت پایین‌تر است و نمودار $P_t y$ می‌تواند بالاتر یا پایین‌تر باشد.

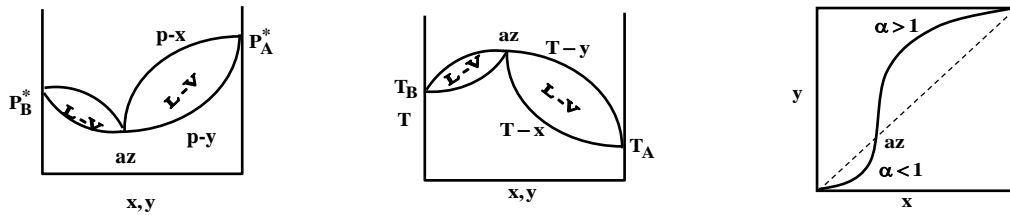
حداکثر نقطه جوش در مخلوط‌ها (حداقل فشار)، نقطه آزئوتروپ (هم جوشی):

این حالت وقتی است که انحراف منفی از قانون راولت زیاد بوده و اختلاف فشار بخار اجزای سازنده کم باشد.

در این حالت، دمای جوش مخلوط، در حداکثر قرار داشته و شرایط هم جوشی برقرار است.



در این حالت نمودارهای $P-xy$ و $T-xy$ به شکل زیر است:



اگر $x < x_{az}$ باشد، چون که آزنوتروپ دیرجوش‌تر از جزء B است، محصول پایین برج آزنوتروپ و بالای برج جزء B است. در حالت $x > x_{az}$ نیز همین‌گونه است. پس همواره محصول پایین برج آزنوتروپ است.

نکته ۶: آزنوتروپ با حداکثر نقطه جوش معمولاً کمتر از نوع حداقل نقطه جوش پیش می‌آید.

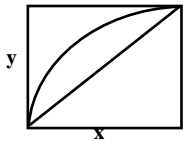
یکی از معروف‌ترین مخلوط‌ها با حداکثر نقطه جوش، مخلوط اسید کلریدریک و آب در فشار ۱ atm، دمای 110°C و غلظت ۱۱/۱ درصد مولی اسید می‌باشد.

مثال ۶: کدام گزینه در رابطه با جداسازی محلول‌های چند جزئی صحیح نیست؟

- (۱) معیار جداسازی نقطه جوش است.
 - (۲) در حالت سیستم ایده‌آل، اختلاف فشار می‌تواند معیار جداسازی باشد.
 - (۳) معیار جداسازی فراریت نسبی است.
 - (۴) در $\alpha = 1$ جداسازی به‌وسیله تقطیر ممکن نیست.
- پاسخ:** گزینه «۱» در مورد محلول‌های چند جزئی، معیار جداسازی فراریت نسبی (α) است نه نقطه جوش.

مثال ۷: منحنی تعادل آب - اتانول (xy) به طور تجربی اندازه‌گیری و مطابق شکل زیر رسم شده است. کدام گزینه در این باره درست است؟

- (۱) این منحنی در فشار بسیار بالا اندازه‌گیری شده است.
- (۲) این منحنی در فشار ثابت اندازه‌گیری شده است.
- (۳) این تصویر اشتباه است.
- (۴) درجه حرارت در این آزمایش ثابت در نظر گرفته شده است.



پاسخ: گزینه «۳» مخلوط اتانول و آب در دمای $78/3^\circ\text{C}$ ، فشار ۱ اتمسفر و در غلظت ۸۹/۴ درصد مولی اتانول، آزنوتروپ تشکیل می‌دهد.

مثال ۸: در یک مخلوط، فشار کل از فشار کلی که براساس روابط محلول‌های کامل محاسبه می‌شود، بزرگ‌تر است. کدام گزینه می‌تواند صحیح باشد؟

- (۱) چنین مخلوطی اصلاً یافت نمی‌شود.
- (۲) در این مخلوط نمودار $P_T y$ پایین‌تر از خط مربوط به قانون راولت قرار می‌گیرد.
- (۳) در این مخلوط نمودار $P_T y$ بالاتر از خط مربوط به قانون راولت قرار می‌گیرد.
- (۴) چنین محلولی را نمی‌شود به روش تقطیر معمولی جدا کرد.

پاسخ: گزینه «۴» این مخلوط می‌تواند دارای آزنوتروپ مثبت باشد (البته می‌تواند آزنوتروپ هم تشکیل ندهد) که در آن نمودار $P_T y$ می‌تواند بالاتر یا پایین‌تر از خط مربوط به قانون راولت قرار گیرد. مخلوط‌های دارای نقطه آزنوتروپ را نمی‌توان به روش تقطیر معمولی جدا کرد.

مثال ۹: کدام گزینه صحیح است؟

- (۱) مخلوط دارای انحراف مثبت از قانون راولت همواره دارای آزنوتروپ با حداقل نقطه جوش است.
- (۲) مخلوط دارای انحراف منفی از قانون راولت همواره دارای آزنوتروپ با حداکثر نقطه جوش است.
- (۳) با تغییر فشار، همواره نقطه آزنوتروپ حذف می‌شود.
- (۴) با تغییر فشار، نقطه آزنوتروپ تغییر می‌کند.

پاسخ: گزینه «۴» در بعضی موارد، با تغییر فشار نقطه آزنوتروپ حذف می‌شود، نه همیشه.

مثال ۱۰: اگر مخلوط ۹۸٪ اتانول و ۲٪ آب به عنوان خوراک ورودی یک برج تقطیر در نظر گرفته شود، محصول پایین این برج کدام یک از جواب‌های زیر است؟ (درصدها مولی هستند).

- (۱) آب خالص
- (۲) ۱۰٪ مولی اتانول و ۹۰٪ مولی آب
- (۳) ۹۰٪ مولی اتانول و ۱۰٪ مولی آب
- (۴) اتانول خالص

پاسخ: گزینه «۳» مخلوط آب و اتانول در جزء مولی ۸۹/۴٪ از اتانول (تقریباً ۹۰٪) تشکیل آزنوتروپ می‌دهد و در نتیجه جداسازی بیشتر صورت نمی‌گیرد. پس محصول پایینی برج با همان ترکیب درصد آزنوتروپ خواهد بود.



کج مثال ۱۱: در خصوص نمودار تعادلی سیستم‌های ایده‌آل که از قانون رانولت پیروی می‌کنند، کدام مورد صحیح است؟ (P فشار کل و P_A^* فشار بخار خالص) (سراسری ۸۹)

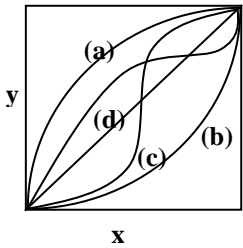
- (۱) Ty خط مستقیم ولی Tx به صورت منحنی می‌باشد.
 (۲) $P_A^* y = Px$ و Py خط مستقیم
 (۳) Tx خط مستقیم ولی Ty به صورت منحنی می‌باشد.
 (۴) $Px = P_A^* x$ و $Py = P_A^* x$ خط مستقیم

پاسخ: گزینه «۴» طبق قانون رانولت داریم: $P_A = xP_A^*$ پس نمودار $P - x$ خطی است. طبق قانون دالتون $P_A = Py$ که P فشار کل است. از ترکیب این دو قانون می‌توان نوشت:

$$y = \frac{P_A^* x}{P} \Rightarrow Py = P_A^* x$$

(مهندسی شیمی - سراسری ۹۲)

کج مثال ۱۲: کدام منحنی، نشانگر آزنوتروپ با نقطه‌ی جوش ماکزیمم است؟



- (۱) a
 (۲) b
 (۳) c
 (۴) d

پاسخ: گزینه «۳» در حالتی که انحراف منفی از قانون رانولت زیاد بوده و اختلاف فشار بخار اجزای سازنده کم باشد، در این حالت دمای جوش مخلوط در حداکثر قرار داشته و شرایط هم‌جوشی برقرار است. در این حالت منحنی C بین کسر مولی اجزاء برقرار است. منحنی d برای حالتی است که حداقل نقطه جوش در مخلوط‌ها را داریم.

(مهندسی شیمی - سراسری ۹۳)

کج مثال ۱۳: برای یک مخلوط مایع دو تایی با افزایش فشار کل، فراریت نسبی

- (۱) ثابت می‌ماند (۲) افزایش می‌یابد (۳) کاهش می‌یابد (۴) بستگی به سیستم مورد نظر دارد

پاسخ: گزینه «۳» در حالت واقعی فراریت نسبی برابر با نسبت ضریب توزیع (k) جزء A به جزء B یعنی $\alpha = \frac{k_A}{k_B}$ است. این ضریب توزیع تابع دما، فشار و نوع ماده است که با افزایش دما زیاد و با افزایش فشار کم می‌شود. پس با افزایش فشار کل، ضریب توزیع کم و در نتیجه فراریت نسبی کاهش می‌یابد.

کج مثال ۱۴: در صورت تقطیر یک مخلوط رقیق دو جزئی آب و اتانول، غلظت محصول بالای برج به کدام یک نزدیک می‌باشد؟ (در صورت داشتن تعداد کافی سینی)

- (۱) جزء فرارتر (۲) بستگی به غلظت خوراک دارد. (۳) جزء غیر فرارتر (۴) آزنوتروپ

پاسخ: گزینه «۴» یکی از مهم‌ترین مخلوط‌هایی که می‌تواند آزنوتروپ تشکیل دهد، مخلوط اتانول و آب است که نقطه هم‌جوش یا آزنوتروپ آن در فشار یک اتمسفر، دمای $78.3^\circ C$ و جزء مولی $89/4$ درصد اتانول ظاهر می‌شود.

(مهندسی شیمی - سراسری ۹۴)

کج مثال ۱۵: انجام عمل تقطیر مخلوط آب و اسید استیک در فشار اتمسفر چگونه است؟

- (۱) با مشکل نقطه آزنوتروپ مواجه می‌شود.
 (۲) نسبت برگشت کوچکی دارد.
 (۳) نسبت برگشت بزرگی دارد.
 (۴) به انرژی حرارتی کمی احتیاج دارند.

پاسخ: گزینه «۲» این مخلوط آزنوتروپ تشکیل نمی‌دهد، ولی جداسازی آنها توسط تقطیر بسیار سخت است که این به معنی نسبت برگشتی بزرگ می‌باشد.

(مهندسی شیمی - سراسری ۹۴)

کج مثال ۱۶: یک محلول 90% متانول و 10% آب (درصدهای مولی) موجود است. کدام مورد صحیح می‌باشد؟

- (۱) با اضافه کردن مقداری آب خالص به این مخلوط تقطیر آزنوتروپ به هم می‌خورد.
 (۲) برای حذف نقطه آزنوتروپ باید تقطیر در فشار کمتر از اتمسفر انجام شود.
 (۳) تقطیر فشار اتمسفریک این مخلوط می‌تواند منجر به جداسازی کامل گردد و مشکلی ندارد.
 (۴) جداسازی کامل به دلیل نقطه آزنوتروپ در فشار اتمسفریک و روش معمول تقطیر میسر نمی‌باشد.

پاسخ: گزینه «۳» این دو ماده آزنوتروپ تشکیل نمی‌دهند و جداسازی کامل است و مشکلی ندارد.



مثال ۱۷: یک سیستم دو جزئی (A و B) دارای یک نقطه مینیمم در محورهای مختصات فشار بخار بر حسب مول جزئی (Pxy) می‌باشد. در صورتی که خوراکی از این مخلوط در یک برج تقطیر مداوم با تعداد کافی سینی، تقطیر شود، ترکیب محصول پایین برج تقریباً کدام است؟ (مهندسی شیمی - سراسری ۹۴)

(۲) جزء فرارتر (A)

(۱) نقطه آزنوتروپ

(۴) بستگی به ترکیب خوراک ورودی دارد.

(۳) جزء غیرفرارتر (B)

پاسخ: گزینه «۱» در صورتی که در نمودار فشار بخار بر حسب مول جزئی (Pxy) نقطه مینیمم مشاهده شود، نقطه آزنوتروپ داریم. این حالت وقتی است که انحراف منفی از قانون راولت زیاد بوده و اختلاف فشار بخار اجزای سازنده کم باشد. در این حالت، دمای جوش مخلوط در حداکثر قرار داشته و شرایط آزنوتروپ (هم‌جوشی) برقرار است. در این شرایط همواره محصول پایین برج آزنوتروپ و بالای برج جزء B است.

مثال ۱۸: در صورت وجود آزنوتروپ با نقطه ماکزیمم در نمودار فشار بخار (Pxy) یک مخلوط دو جزئی، در غلظت‌های بیش از نقطه آزنوتروپ جریانی برقرار است که دارای:

(۲) فشار بخار بیشتری است.

(۱) نقطه جوش کمتری است.

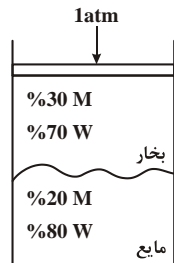
(۴) نقطه جوش کمتر ولی فشار بخار بیشتری است.

(۳) فشار بخار کمتری است.

پاسخ: گزینه «۳» در صورتی که فرض کنیم سیستم ایده‌آل باشد، $\alpha = \frac{P_A^*}{P_B^*}$ است. در غلظت‌های بالاتر از نقطه آزنوتروپ نیز $\alpha < 1$ است، بنابراین

خواهیم داشت: $P_A^* < P_B^* \Rightarrow \frac{P_A^*}{P_B^*} < 1$ ؛ یعنی، فشار بخار جزء فرارتر (A) کمتر از جزء غیرفرار است.

مثال ۱۹: دو فاز مایع و بخار با مشخصات شکل زیر در فشار یک اتمسفر کنار یکدیگر قرار دارند:



(۱) دو فاز در حال تعادل نیستند.

(۲) با این اطلاعات نمی‌توان روی تعادل یا عدم تعادل این دو فاز نتیجه‌گیری نمود.

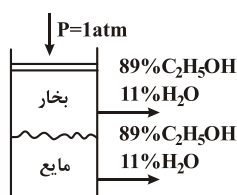
(۳) دو فاز در حال تعادل می‌باشند.

(۴) درجه حرارت دو فاز با یکدیگر مساوی هستند.

پاسخ: گزینه «۲» برای یک ماده تک جزئی، تعادل توسط منحنی فشار-دما تعیین می‌شود، اما برای یک سیستم دو جزئی (مثلاً در فرایند تقطیر) به جز فشار و دما، با غلظت اجزاء نیز سروکار داریم و نمودار تعادلی آن سه‌بعدی است. در مورد این سؤال یک سیستم دو جزئی، (اجزای M و W) در دو حالت بخار و مایع در فشار ثابت یک اتمسفر کنار هم قرار گرفته‌اند. برای این‌که بتوان در مورد تعادلی بودن این سیستم نتیجه‌گیری کرد، نیاز به منحنی دما - غلظت است. بنابراین با اطلاعات داده شده نمی‌توان در مورد تعادل یا عدم تعادل این دو فاز تصمیم‌گیری کرد.

مثال ۲۰: دو فاز مایع و بخار با مشخصات شکل در تماس با یکدیگر قرار گرفته‌اند. درصدها مولی هستند. کدام جواب صحیح است؟

(مهندسی شیمی - سراسری ۹۶)



(۱) به جز انتقال جرم، به دلیل درجه حرارت بالاتر فاز بخار، انتقال حرارت نیز از فاز بخار به فاز مایع انجام می‌شود.

(۲) سیستم از نظر حرارتی در تعادل بوده ولی با انتقال جرم از بخار به مایع تعادل حرارتی نیز به هم می‌خورد.

(۳) اتانول از فاز مایع به سمت فاز بخار و آب از فاز بخار به سمت فاز مایع انتقال می‌یابد.

(۴) دو فاز در تعادل با یکدیگرند.

پاسخ: گزینه «۴» با توجه به این‌که فشار کل هر دو فاز (p = 1 atm) و نیز ترکیب هر دو فاز مایع و بخار یکسان است، بنابراین دو فاز در تعادل با یکدیگر قرار دارند. همچنین در چنین حالتی درجه حرارت فاز بخار بیشتر است.

کله مثال ۲۱: مخلوط استون و کلروفورم در فشار یک اتمسفر تشکیل یک آزوتروپ با نقطه جوش حداکثر در غلظت ۳۶% مولی از استون می دهد. اگر خوراکی با غلظت ۵۰% مولی از استون وارد یک برج تقطیر آتمسفریک با تعداد مراحل زیاد شود، محصولات بالا و پایین برج کدام است؟

(مهندسی شیمی - سراسری ۹۶)

- (۱) محصول بالا: کلروفورم خالص؛ محصول پایین: مخلوط آزوتروپ استون - کلروفورم
- (۲) محصول بالا: استون خالص؛ محصول پایین: مخلوط آزوتروپ استون - کلروفورم
- (۳) محصول بالا: استون تقریباً خالص؛ محصول پایین: کلروفورم تقریباً خالص
- (۴) محصول بالا: آزوتروپ استون - کلروفورم؛ محصول پایین: استون خالص

پاسخ: گزینه «۲» تشکیل آزوتروپ با نقطه جوش حداکثر، وقتی است که انحراف منفی از قانون راولت زیاد بود و اختلاف فشار بخار اجزای سازنده کم باشد. در این حالت همواره محصول پایین برج آزوتروپ است. همچنین چون آزوتروپ دیرجوش تر از استون است، محصول بالای برج استون خواهد بود.

کله مثال ۲۲: به چه روشی امکان تهیه اتانول با خلوص ۹۳% مولی از مخلوط آن با آب (۴۰% اتانول) وجود دارد؟

(مهندسی شیمی - سراسری ۹۶)

- (۱) تقطیر معمولی در فشار اتمسفر
- (۲) تقطیر در خلأ نسبی در ۱۷۰ mmHg مطلق
- (۳) تقطیر در خلأ و تقطیر آزوتروپی به کمک بنزن
- (۴) تقطیر آزوتروپی به کمک حلال تولوئن و تشکیل یک آزوتروپ سه فازی

پاسخ: گزینه «۳» مخلوط اتانول و آب دارای نقطه آزوتروپ در فشار ۱ atm، دمای ۷۸/۲°C و جزء مولی ۸۹/۴ درصد اتانول است. با کاهش فشار به پایین تر از ۷۰ mmHg و یا استفاده از بخار فوق داغ به جای بخار آب و یا یک گاز خنثی می توان این نقطه را حذف کرد.

کله مثال ۲۳: مقدار فراریت مادهی A به مادهی B در یک مخلوط دوفازی در صورتی که جزء مولی A در فاز بخار برابر ۰/۹ و در فاز مایع برابر ۰/۲ باشد، چقدر خواهد بود؟

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

- (۱) ۰/۵۳ (۲) ۹ (۳) ۱۰ (۴) ۳۶

پاسخ: گزینه «۴» مقدار فراریت نسبی برابر است با:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{y}{x}\right)_A}{\left(\frac{y}{x}\right)_B}$$

$$\begin{cases} y_A = 0/9 \rightarrow y_B = 1 - 0/9 = 0/1 \\ x_A = 0/2 \rightarrow x_B = 1 - 0/2 = 0/8 \end{cases} \Rightarrow \alpha = \frac{(0/9)/(0/2)}{(0/1)/(0/8)} = 36$$

طبق صورت سؤال داریم:

کله مثال ۲۴: در صورت وجود کدام یک از شرایط زیر برای تقطیر معمولی، بهتر است از تقطیر آزوتروپی استفاده شود؟

(مهندسی شیمی - بهداشت، ایمنی و محیط زیست - سراسری ۹۷)

- (۱) به دلیل وجود آزوتروپ، جداسازی امکان پذیر نباشد.
- (۲) تنها به برج بلند، به دلیل تعداد سینی زیاد نیاز باشد.
- (۳) تنها نیاز به نسبت مایع برگشتی زیاد و در نتیجه قطر بزرگ باشد.
- (۴) قطر و ارتفاع برج بزرگ محاسبه شوند.

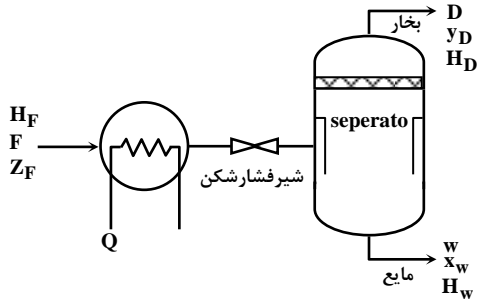
پاسخ: گزینه «۴» تقطیر هم جوش یا آزوتروپی یک حالت خاص از تقطیر چندجزئی است که جهت تفکیک برخی از مخلوطهای دوجزئی که امکان جداسازی آنها با تقطیر معمولی مشکل یا غیرممکن است، به کار می رود. اگر فراریت نسبی یک مخلوط دوجزئی بسیار کم باشد، تقطیر مداوم جهت تهیه محصولات تقریباً خالص مستلزم به کار بردن نسبت جریان برگشتی بالا، بار حرارتی زیاد و نیز سطح مقطع بزرگ و تعداد سینیهای فراوان است. در این صورت از تقطیر آزوتروپی استفاده می شود.



درسنامه (۲): روش‌های تقطیر



تبخیر ناگهانی یا تقطیر تعادلی (Flash Vaporization or Equilibrium Distillation)



این فرآیند تک مرحله‌ای است که در آن جزئی از یک مخلوط مایع تبخیر می‌شود و بخار حاصل به حالت تعادل با مایع باقی‌مانده می‌رسد و سپس فازهای بخار و مایع از یکدیگر جدا شده و از دستگاه خارج می‌شوند. این فرآیند ممکن است به صورت ناپیوسته و یا مداوم انجام گیرد.

خوراک ورودی در ابتدا گرم می‌شود. در شیر فشار شکن، به دلیل کاهش فشار، مخلوط دو فاز (بخار و مایع) می‌گردد. جداکننده از نوع سیکلونی است که در آن به دلیل جدا شدن بهتر بخار و مایع، خوراک به صورت مماسی وارد می‌شود. هرچه فشار پایین‌تر باشد، میزان اجزای بخار بیشتر می‌شود. اما این امر موجب کاهش دما شده و به همین دلیل برای میعان بخار، ممکن است نتوان از آب معمولی استفاده کرد. پس فشار باید مقدار مشخصی باشد.

موازنه جرم جزئی و کلی روی برج

$$\text{موازنه کلی: } F = D + W$$

$$\text{موازنه جزئی: } FZ_F = Dy_D + Wx_w$$

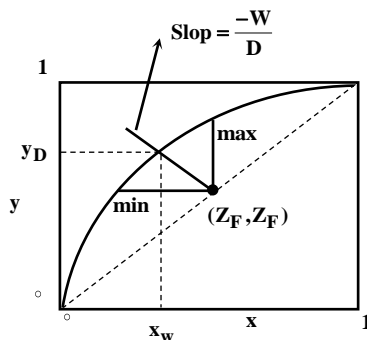
$$\text{موازنه انرژی: } FH_F + Q = DH_D + WH_W \quad (\text{با فرض عدم افت حرارتی})$$

کلیه کسر مولی‌ها برای جزء فراتر است.

$$W = \text{دبی مولی مایع خروجی (مول/زمان)}, \quad D = \text{دبی مولی بخار خروجی (مول/زمان)}, \quad F = \text{دبی مولی خوراک ورودی (مول/زمان)}, \quad H = \text{آننتالپی}$$

مایع W و بخار D همواره در حال تعادل هستند. مایع W در نقطه جوش و بخار D در نقطه شبنم می‌باشد. از ترکیب سه رابطه بالا، خواهیم داشت:

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



رابطه $-\frac{W}{D} = \frac{y_D - z_F}{x_w - z_F}$ ، معادله یک خط راست با شیب $-\frac{W}{D}$ می‌باشد. دو

مجهول x_w و y_D وجود دارد. پس نیاز به معادله دیگری داریم. این معادله، معادله تعادل است که در حالت کلی به صورت منحنی و در حالت خاص (α ثابت) به

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

$$1) (y_D)_{\max} \Rightarrow -\frac{W}{D} = \infty \Rightarrow D = 0$$

با توجه به نمودار، دو حالت حدی را در نظر می‌گیریم:

چون که حالت حدی است، یک قطره بخار داریم. در این حالت خوراک در دمای حباب قرار دارد و یک قطره حباب ایجاد می‌شود که غنی‌ترین بخار است و

$$2) (y_D)_{\min} \Rightarrow -\frac{W}{D} = 0 \Rightarrow W = 0$$

حداکثر جداسازی را داریم.

در این حالت خوراک در نقطه جوش (شبنم) است و رقیق‌ترین مایع و حداقل جداسازی را داریم.

نکته ۷: دمای فرآیند همواره بین دمای حباب و دمای شبنم قرار دارد و مایع و بخار در تعادل با هم هستند.

مثال ۲۵: حداکثر مول جزئی بخار حاصل از عمل تبخیر فلاش (Flash vaporization)، برای خوراکی دو جزئی با مول جزئی ۰/۲ و ضریب فراریت ثابت ۴/۰، کدام است؟ (مهندسی شیمی - سراسری ۹۲)

- (۱) ۰/۲ (۲) ۰/۵ (۳) ۰/۷۵ (۴) ۱/۰

پاسخ: گزینه «۲» تغییرات مول جزئی بخار به صورت زیر است:

$$\frac{\alpha X_w}{1 + (\alpha - 1)X_w} < y_D < \frac{\alpha X_F}{1 + (\alpha - 1)X_F} \Rightarrow y_{\max} = \frac{\alpha X_F}{1 + (\alpha - 1)X_F} = \frac{(4)(0.2)}{1 + (4 - 1)(0.2)} = 0.5$$

مثال ۲۶: یک مخلوط دو جزئی حاوی ۵۰٪ مولی جزء فرارتر و با ضریب فراریت ثابت ۲ در یک سیستم تبخیر ناگهانی (Flash Vaporization) ۵۰٪ مول آن تبخیر می‌شود. جزء مولی جزء فرارتر در محصول بخار حاصل در چه حدودی است؟ (مهندسی شیمی - سراسری ۹۳)

- (۱) ۰/۶ (۲) ۰/۵ (۳) ۰/۵۴ (۴) ۰/۴۱

پاسخ: گزینه «۱» رابطه مربوط به تبخیر ناگهانی عبارت است از:

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

$$-1 = \frac{y_D - 0.5}{x_W - 0.5} \quad (I)$$

طبق صورت سؤال $z_F = 0.5$ و $W = D = \frac{1}{2}F$ ، در نتیجه داریم:

$$\alpha = 2, \quad y_D = \frac{\alpha x_W}{1 + (\alpha - 1)x_W}$$

از طرف دیگر در حالت ضریب فراریت ثابت داریم:

$$y_D = \frac{2x_W}{1 + x_W} \quad (II)$$

در نتیجه:

از حل همزمان معادلات (I) و (II) مقدار y_D یا جزء مولی جزء فرارتر در بخار خروجی حدود ۰/۶ می‌شود.

مثال ۲۷: معادله خط کار (Operating Line) در یک دستگاه تبخیر آبی به صورت $y_D = 2x_W - 0.5$ داده شده است. در این حالت غلظت (جزء مولی) ماده فرار در خوراک چقدر است؟ (x و y مقادیر جزء مولی در فاز مایع و گاز می‌باشند). (مهندسی شیمی - سراسری ۹۳)

- (۱) ۰/۱ (۲) ۰/۲۵ (۳) ۰/۱۶۷ (۴) ۰/۵

پاسخ: هیچ کدام از گزینه‌ها صحیح نیست. اطلاعات برای حل سؤال کافی نیست. معادله کلی خط کار در فرآیند تبخیر آبی به صورت

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

است. با توجه به این معادله برای یافتن غلظت ماده فرار در خوراک (z_F) نیاز به W (دبی مولی مایع خروجی) و D (دبی مولی بخار خروجی) می‌باشد.

مثال ۲۸: حداکثر مول جزئی بخار حاصل از یک عمل تقطیر تعادلی Flash Vaporization که می‌تواند از یک خوراک مایع دو جزئی با ۲۵٪ مولی جزء فرارتر و با ضریب فراریت ثابت ۲ به دست آید، چقدر است؟ (مهندسی شیمی - سراسری ۹۷)

- (۱) ۰/۲۵ (۲) ۰/۴ (۳) ۰/۵ (۴) ۱/۰

پاسخ: گزینه «۲» در حالتی که ضریب فراریت ثابت باشد (α ثابت) رابطه تعادلی به صورت $y_D = \frac{\alpha x_w}{1 + (\alpha - 1)x_w}$ خواهد بود. در این رابطه

$$y_D = \frac{2x_w}{1 + x_w} = \frac{2(0.25)}{1 + 0.25} = 0.4$$

کسر مولی جزء فرارتر در مایع خروجی و y_D کسر مولی جزء فرارتر در بخار خروجی است. با قرار دادن مقادیر داده شده در سؤال در این رابطه داریم:

بنابراین حداکثر مول جزئی بخار در محصول بخار برابر ۰/۴ است.



مثال ۲۹: خوراک مایع دوجزئی حاوی ۶۰ درصد از جزء فرارتر با استفاده از فرایند تقطیر ناگهانی ۵۰ درصد تبخیر می‌شود. معادله خط عملیاتی کدام است؟ (مهندسی شیمی - بهداشت، ایمنی و محیط زیست - سراسری ۹۷)

$$y_D = x_W - 0/6 \quad (1) \quad y_D = -x_W + 0/6 \quad (2) \quad y_D = -x_W + 1/2 \quad (3) \quad y_D = x_W \quad (4)$$

پاسخ: گزینه «۳» رابطه مربوط به تبخیر ناگهانی به صورت مقابل است: $\frac{w}{D} = \frac{y_D - Z_f}{x_W - Z_f}$

طبق صورت سؤال، $Z_f = 0/6$ و $w = \frac{1}{2}F$ می‌باشد، بنابراین طبق رابطه موازنه جرم کلی ($F = D + W$) مقدار بخار خروجی (D) نیز نصف خوراک اولیه خواهد بود، یعنی $D = \frac{1}{2}F$ در نتیجه داریم:

$$-1 = \frac{y_D - 0/6}{x_W - 0/6} \Rightarrow y_D = -x_W + 1/2$$

مثال ۳۰: سه خوراک با مشخصات زیر در یک برج تقطیر استفاده می‌شوند و محصولات بالا و پایین را تولید می‌کنند ضریب فراربت متوسط (α) معادل ۲ می‌باشد. کدام ترتیب ورود خوراها از بالا و پایین صحیح تر است؟ (مهندسی فرآوری و انتقال گاز - سراسری ۹۰)

$$F_2 \begin{cases} \text{مایع اشباع} \\ Z_{F_2} = 0/55 \end{cases} \quad F_3 \begin{cases} \text{بخار اشباع} \\ Z_{F_3} = 0/60 \end{cases} \quad F_1 \begin{cases} \text{بخار اشباع} \\ Z_{F_1} = 0/33 \end{cases}$$

(مهندسی فرآوری و انتقال گاز - سراسری ۹۰)

$$(1) \quad F_1 \text{ بالاترین، } F_2 \text{ وسط، } F_3 \text{ پایین‌ترین} \quad (2) \quad F_1 \text{ بالاترین، } F_3 \text{ متوسط، } F_2 \text{ پایین‌ترین}$$

$$(3) \quad F_2 \text{ بالاترین، } F_3 \text{ وسط، } F_1 \text{ پایین‌ترین} \quad (4) \quad F_3 \text{ بالاترین، } F_2 \text{ وسط، } F_1 \text{ پایین‌ترین}$$

پاسخ: گزینه «۲» در برج تقطیر از بالا به پایین غلظت جزء فرار کمتر می‌شود. همچنین مهم‌ترین حالت این است که غلظت خوراک ورودی با غلظت مواد در سینی ورودی خوراک برابر باشد. بنابراین خوراکی را که جزء فرارتر بیشتری دارد، در محل بالاتری وارد می‌کنند.

$$\alpha = 2 \Rightarrow y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x} = \frac{2x}{1 + x}$$

$$F_1 \begin{cases} \text{مایع اشباع} \\ Z_{F_1} = 0/33 \end{cases} \Rightarrow x_{f_1} = 0/33 \Rightarrow y_{f_1} = \frac{(2)(0/33)}{1 + 0/33} = 0/496$$

$$F_2 \begin{cases} \text{بخار اشباع} \\ Z_{f_2} = 0/55 \end{cases} \Rightarrow y_{f_2} = 0/55 \Rightarrow 0/55 = \frac{(2)x_{f_2}}{1 + x_{f_2}} \Rightarrow x_{f_2} = 0/379$$

$$F_3 \begin{cases} \text{بخار اشباع} \\ Z_{f_3} = 0/6 \end{cases} \Rightarrow y_{f_3} = 0/6 \Rightarrow 0/6 = \frac{(2)x_{f_3}}{1 + x_{f_3}} \Rightarrow x_{f_3} = 0/428$$

بنابراین $y_{f_1} > y_{f_2} > y_{f_3}$ بوده و در نتیجه F_1 بالاترین، F_2 وسط و F_3 پایین‌ترین خواهد بود.

مثال ۳۱: سه خوراک با مشخصات زیر وارد برج تقطیری می‌شود که جداسازی در آن براساس ضریب فراربت ۱/۳ صورت می‌پذیرد. خوراها دوجزئی هستند و برای هر کدام حالت خوراک و درصد جزء فرار داده شده است. ترتیب وارد کردن خوراک از بالا به پایین چگونه است؟ (مهندسی شیمی - بهداشت، ایمنی و محیط زیست - سراسری ۹۶)

$$F_1 \begin{cases} \text{مایع اشباع} \\ Z_{F_1} = 0/40 \end{cases} \quad F_2 \begin{cases} \text{بخار اشباع} \\ Z_{F_2} = 0/50 \end{cases} \quad F_3 \begin{cases} \text{مایع اشباع} \\ Z_{F_3} = 0/50 \end{cases}$$

(۱) F_2 (پایین)، F_3 (مابین)، F_1 (بالا)
(۲) F_2 (بالا)، F_3 (مابین)، F_1 (پایین)
(۳) F_2 (پایین)، F_1 (بالا)، F_3 (مابین)
(۴) F_3 (مابین)، F_2 (بالا)، F_1 (پایین)

پاسخ: گزینه «۲» در برج تقطیر از بالا به پایین، غلظت جزء فرار کمتر می‌شود. همچنین مهم‌ترین حالت این است که غلظت خوراک ورودی با غلظت مواد در سینی خوراک برابر باشند. بنابراین خوراکی را که جزء فرارتر بیشتری دارد، در محل بالاتری وارد می‌کنند.

$$\alpha = 1/3 \Rightarrow y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x} = \frac{1/3x}{1 + 0/3x}$$

$$F_1 \begin{cases} \text{مایع اشباع} \\ Z_{F_1} = 0/4 \end{cases} \Rightarrow x_{f_1} = 0/4 \Rightarrow y_{f_1} = \frac{(1/3)(0/4)}{1+(0/3)(0/4)} \Rightarrow y_{f_1} = 0/43$$

$$F_2 \begin{cases} \text{بخار اشباع} \\ Z_{F_2} = 0/5 \end{cases} \Rightarrow x_{f_2} = 0/5 \Rightarrow y_{f_2} = \frac{(1/3)(0/5)}{1+(0/3)(0/5)} \Rightarrow 0/56$$

$$F_3 \begin{cases} \text{مایع اشباع} \\ Z_{F_3} = 0/5 \end{cases} \Rightarrow x_{f_3} = 0/5 \Rightarrow y_{f_3} = 0/56$$

با توجه به اینکه y_{f_1} از همه کوچکتر است، بنابراین خوراک پایینتر از همه وارد می‌شود.

از طرف دیگر، بهترین حالت ترمودینامیکی برای خوراک، ورود آن به صورت مایع اشباع است، زیرا در این حالت بالاترین خلوص محصول را در بالای برج داریم. اگر خوراک به صورت بخار اشباع وارد شود، کمترین میزان جزء فرار را در پایین ستون، یا به عبارتی خالصترین جزء سنگین را در پایین برج خواهیم داشت. بنابراین مناسبتر است خوراک سوم که مایع اشباع است در بالای برج وارد شده و خوراک دوم، ما بین خوراک سوم و اول وارد شود.

میعان جزئی

در این فرآیند روش محاسبه مثل تقطیر تعادلی است. با این تفاوت که خوراک به صورت بخار بوده و باید گرمای آن، البته نه به صورت کامل، گرفته شود (Q با علامت منفی). پس در این فرآیند قسمتی از گرمای نهان تبخیر گرفته می‌شود.

کج مثال ۳۲: در تقطیر آبی کدام عامل موجب دو فاز شدن می‌گردد؟

- (۱) افزایش دما (۲) کاهش فشار (۳) افزایش فشار (۴) کاهش دما

پاسخ: گزینه «۲» با کاهش فشار در شیر فشار شکن، خوراک گرم به دو فاز مایع و بخار تبدیل می‌شود.

کج مثال ۳۳: در عملیات تقطیر آبی (flash distillation) یک مخلوط دو جزئی اگر فشار ثابت بماند ولی دمای Flash را (در محدوده مجاز) افزایش

(مهندسی شیمی - سراسری ۹۰)

دهیم در حالی که خوراک ورودی هیچ تغییری نکند چه اتفاقی خواهد افتاد؟

- (۱) غلظت ماده فرار در بخار بیشتر و در مایع کمتر می‌شود.
 (۲) غلظت ماده فرار هم در بخار و هم در مایع کمتر می‌شود.
 (۳) غلظت ماده فرار هم در بخار و هم در مایع بیشتر می‌شود.

(۴) این امکان وجود ندارد که دمای Flash را برای یک خوراک مشخص تغییر دهیم چون دیگر محصول تحت هر شرایط دمایی که باشد فقط یک فاز خواهد بود.

پاسخ: گزینه «۲» به طور کلی در فرآیند تقطیر تعادلی یا تقطیر ناگهانی، کاهش فشار در شیر فشار شکن موجب تبدیل خوراک گرم به دو فاز بخار و مایع می‌شود. در صورتی که فشار ثابت بماند و دما را زیاد کنیم، غلظت ماده فرار هم در فاز بخار و هم در فاز مایع کمتر می‌گردد.

کج مثال ۳۴: مخلوط A و B که حاوی ۵۰٪ مولی از هریک از اجزاء می‌باشد به‌طور ناگهانی تبخیر می‌شود، به نحوی که مایع به دست آمده از تبخیر ناگهانی ۵۰٪ خوراک اولیه می‌باشد. رابطه میان غلظت جزء فرارتر (A) در فاز بخار و فاز مایع کدام است؟

(۱) $y_D = x_W$ (۲) $y_D = 1 - x_W$ (۳) $y_D = 0/5 - x_W$ (۴) $y_D = 1 - 0/5 x_W$

پاسخ: گزینه «۲» رابطه مربوط به تبخیر ناگهانی عبارت است از:

طبق صورت سؤال، $Z_F = 0/5$ ، $W = \frac{1}{3}F$ می‌باشد، بنابراین طبق رابطه موازنه جرم کلی ($F = D + W$) مقدار بخار خروجی (D) نیز نصف خوراک

اولیه (F) خواهد بود یعنی $D = \frac{1}{3}F$ می‌باشد. در نتیجه خواهیم داشت:

$$-1 = \frac{y_D - 0/5}{x_W - 0/5} \Rightarrow y_D = 1 - x_W$$



مثال ۳۵: کدام یک از معادلات زیر برای خط کار (Operating line) در فرآیند تبخیر آبی (Flash Vap) در سیستم‌های دو جزئی صحیح است؟ (سراسری ۸۹)

$$\begin{aligned} (1) \quad \frac{w}{D} &= -\frac{y_D - x_f}{x_w - x_f} \\ (2) \quad -\frac{w}{D} &= \frac{y_D}{x_w} - x_f \\ (3) \quad \frac{w}{D} &= -\frac{y_D - x_f}{x_f - x_w} \\ (4) \quad -\frac{w}{D} &= \frac{y_D}{x_w} \end{aligned}$$

پاسخ: گزینه «۱» با نوشتن موازنه جرم کلی و جزئی برای فرآیند تبخیر آبی خواهیم داشت:

$$\left. \begin{aligned} (Z_F = x_f) \\ F = D + w \\ FZ_F = Dy_D + wx_w \end{aligned} \right\} \Rightarrow -\frac{w}{D} = \frac{y_D - z_F}{x_w - z_F}$$

مثال ۳۶: به یک مخلوط دو جزئی با دبی $100 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ به میزان $45000 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$ حرارت داده می‌شود و مخلوط گرم شده وارد یک ظرف تبخیر ناگهانی شده و به دو فاز مایع و بخار تبدیل می‌شود. در صورتی که آنتالپی مخلوط $50 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ و آنتالپی بخار اشباع $900 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ و آنتالپی مایع اشباع $100 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ باشد، درصد وزنی مایع تشکیل شده چقدر است؟

$$(1) \quad 30 \quad (2) \quad 70 \quad (3) \quad 40 \quad (4) \quad 50$$

پاسخ: گزینه «۴» با توجه به رابطه به دست آمده برای تبخیر ناگهانی یا تعادلی می‌توان نوشت:

$$\frac{W}{D} = \frac{H_D - (H_F + \frac{Q}{F})}{H_W - (H_F - \frac{Q}{F})}$$

$$H_W = 100 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, H_D = 900 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, H_F = 50 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, Q = 45000 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}, F = 100 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\frac{W}{D} = \frac{900 - (50 + \frac{45000}{100})}{100 - (50 + \frac{45000}{100})} = -1 \Rightarrow W = D$$

از طرف دیگر $W + D = F = 100 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ است، پس $W = D = 50 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ می‌شود و $y_D = x_W = 0/5$ است.

مثال ۳۷: یک مخلوط دوفازی دارای 60% درصد ماده‌ی B می‌باشد. در دما و فشار مشخصی، ضرایب توزیع (K-Value) در حالت تعادل برای دو جزء A و B به ترتیب $2/2$ و $0/4$ است. مقدار مولی جزء A در فاز بخار چقدر است؟ (مهندسی شیمی - بهداشت، ایمنی و محیط زیست - سراسری ۹۶)

$$(1) \quad 0/18 \quad (2) \quad 0/5 \quad (3) \quad 0/9 \quad (4) \quad 0/73$$

پاسخ: گزینه «۴»

$$z_F \begin{cases} \%40 A \Rightarrow x_A = 0/4 \\ \%60 B \Rightarrow x_B = 0/6 \end{cases}$$

k-value

$$A \Rightarrow k_A = 2/2$$

$$B \Rightarrow k_B = 0/4 \quad y = ?$$

$$\alpha = \frac{k_A}{k_B} = \frac{2/2}{0/4} = 5/5$$

$$y_{DA} = \frac{\alpha x_A}{1 + (\alpha - 1)x_A} = \frac{5/5 \times 0/4}{1 + 4/5 \times 0/4} = 0/78$$

البته این سؤال دارای ابهام می‌باشد، اینکه آیا از تقطیر آبی استفاده شده یا نه در صورت سؤال ذکر نشده است. اما با محاسبه ضریب فراریت (آلفا) و مقدار جزء A در فاز مایع مقدار y_A به دست خواهد آمد که $0/78$ می‌باشد. این مقدار، درصد جزء A در فاز بخار را نشان می‌دهد. نزدیک‌ترین گزینه به پاسخ، گزینه (۴) می‌باشد.

مثال ۳۸: خوراک ورودی به یک دستگاه تقطیر از نوع تبخیر ناگهانی 15% درصد مولی از جزء فرار و خروجی از آن به صورت 25% درصد بخار است. معادله تعادل $y = 1/5x$ است. جزء مولی فرارتر در مایع خروجی چقدر است؟ (مهندسی فرآوری و انتقال گاز - سراسری ۹۰)

$$(1) \quad 0/10 \quad (2) \quad 0/133 \quad (3) \quad 0/20 \quad (4) \quad 0/333$$

پاسخ: هیچ کدام از گزینه‌ها صحیح نیست. در دستگاه تبخیر ناگهانی، مایع w و بخار D همواره در حال تعادل هستند. پس طبق رابطه تعادلی

$$x_w = \frac{0/25}{1/5} = 0/125$$

$y_D = 1/5x_w$ می‌باشد. از آنجایی که $y_D = 0/25$ است، داریم: