فصل یازدهم

برج‌های تقطیر و استخراج

چکیدهٔ فصل

در این فصل، هنرجویان با عملیات فیزیکی تقطیر و استخراج به منظور تخلیص مایعات، آشنا می‌شوند. همچنین عملکرد دستگاه‌های مربوطه یعنی برج‌های تقطیر و استخراج را می‌آموزند.

دانسته‌های قبلی : هنرجویان در سال گذشته، اطلاعات مختصری در مورد این دو عملیات، به صورت تئوری و عملی کسب کرده‌اند.

اهداف فصل : از هنرجویان انتظار می‌رود که بتوانند پس از پایان فصل، راجع به عناوین زیر توضیحات لازم را ارائه دهند.

- تعریف تقطیر
- اصول تقطیر
- انواع تقطیر از نظر عملیاتی و تشریح هر کدام
- انواع تقطیر از نظر فشار عملیاتی
- استخراج و موارد مربوطه
- موارد انتخاب حلّال
- انواع برج‌های تقطیر، سینی‌دار و آکنده
- انواع برج‌های استخراج؛ پاششی، سینی‌دار، آکنده و استخراج کننده با همزن مکانیکی

برنامهٔ زمان‌بندی تدریس فصل یازدهم

هفته	موضوعات	صفحه
۲۷	تقطیر و انواع آن	۸۳ تا ۸۹
۲۸	برج‌های تقطیر سینی‌دار	۹۲ تا ۹۸
۲۹	برج‌های تقطیر ــ آکنده	۹۹ تا ۱۰۳
۳۰	استخراج ــ برج‌های استخراج	۹۰ تا ۹۲ ۱۰۴ تا ۱۰۸

هفتهٔ بیست و هفتم

	برنامهٔ زمان‌بندی هفتهٔ بیست و هفتم	دقیقه
۱	آماده کردن کلاس (احوالپرسی، تبریک سال جدید، حضور و غیاب و . . .)	۲۰
۲	تدریس	۱۰۰
۳	استراحت میان تدریس (سه نوبت)	۱۵

تقطیر و انواع آن

عناوین و مطالبی که در این هفته تدریس می‌شوند، عبارت‌اند از :

ــ تعریف جامعی از تقطیر

ــ خصوصیات مایعات سبک (فرّار) و سنگین

ــ تعریف قابلیت تبخیر یا فرّاریت

ــ انواع تقطیر

ــ تشریح تقطیرهای ساده، ناگهانی و جزء به جزء، از نظر :

عملکرد، نوع عملیات، دستگاه، درجهٔ خلوص محصولات، کاربرد و خصوصیات دیگر

ــ انواع تقطیر از نظر فشار عملیاتی :

تقطیر در فشار بالا، تقطیر اتمسفریک، تقطیر در خلأ

ــ توضیح مثال‌های عملی تقطیر

راهنمای تدریس

متن کتاب درسی عملیات دستگاهی، برای تدریس عناوین مطروحه مرجع خوبی است، لذا به مواردی اشاره خواهد شد که نیاز به توضیح تکمیلی داشته باشند، به صورت زیر :

ــ **تعریف تقطیر** : بهتر است برای تقطیر تعریف جامعی به هنرجویان ارائه داد، مثلاً :

تقطیر فرآیندی است که در آن اجزای یک مخلوط مایع یکنواخت، به دلیل اختلاف در نقطهٔ جوش براساس دو عمل تبخیر و مَیَعان از یکدیگر جدا می‌شوند.

ــ دستگاه‌های مورد استفاده برای تقطیر، به نام برج یا ستون تقطیر معروف هستند، که به دو صورت سینی‌دار و آکنده طراحی می‌شوند و تقطیر جزء به جزء در این برج‌ها انجام می‌شود.

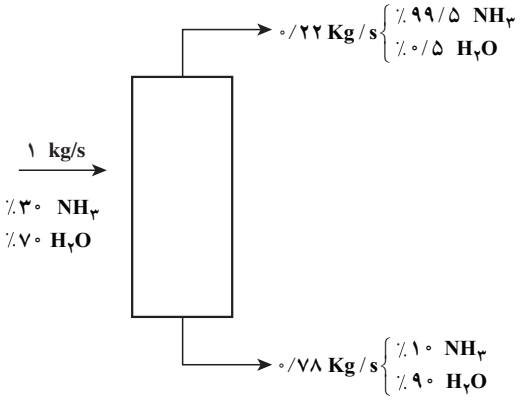
ــ تدریس این هفته، بیشتر در خصوص تقطیر و انواع آن از دید عملکردی است و راجع به برج‌های تقطیر، در هفتهٔ بعد صحبت خواهد شد.

ــ یکی از قسمت‌های مهم این فصل، فشار برج‌های تقطیر است که براساس نوع خوراک از نظر سبکی و سنگینی، تعیین می‌شود.

ــ توضیح در مورد مثال‌های[1] عملی تقطیر :

مثال (۱) به جداسازی اتانل از آب در یک برج تقطیر ناپیوسته مربوط می‌شود. این مثال شاهدی بر مباحث مطروحه در بخش تقطیر جزء به جزء ناپیوسته است. اول اینکه نقش زمان را در عملیات ناپیوسته بیان می‌کند. به این صورت که ختم تقطیر را زمانی اعلام می‌دارد که درصد مولی اتانل در داخل دیگ به ۱۰/۵ برسد. در ثانی، چنان‌که از نتایج پیداست، بیشترین درصد مادهٔ سبک، که اتانل باشد، در شروع عملیات، یعنی در اولین قطرهٔ محصول بالای برج است (۷۸ درصد) و با ادامهٔ کار برج، درصد خلوص آن کاهش می‌یابد. به طوری‌که در آخرین قطرهٔ محصول، درصد اتانل به ۷۴ تنزّل می‌کند زیرا به مرور، مادهٔ سنگین‌تر که آب است نیز تبخیر می‌شود.

در مثال (۲)، گزارشی از جداسازی آمونیاک از آب در یک برج تقطیر پیوسته مشاهده می‌شود. در این برج هر ثانیه یک کیلوگرم محلول ۳۰٪ وزنی آمونیاک در آب، به صورت خوراک وارد برج می‌شود و از بالای برج ۰/۲۲ کیلوگرم و از پایین برج مقدار ۰/۷۸ کیلوگرم بر ثانیه، محصولات خارج می‌گردد.



شکل ۱۱ــ ۱

با توجه به شکل ۱۱ــ۱، در هر ثانیه ۰/۳ kg آمونیاک و ۰/۷ kg آب وارد برج می‌شوند و با حضور ۹ سینی، تقطیر صورت می‌گیرد و در هر ثانیه ۰/۲۱۸۹ kg آمونیاک جدا می‌شود و از بالای برج خارج می‌گردد و مابقی همراه با آب از پایین برج بیرون می‌رود، محاسبات سادهٔ زیر بیانگر این نتایج است :

$$۱\times ۰/۳۰ = ۰/۳\,kg/s \quad NH_۳ \qquad , \qquad ۱\times ۰/۷۰ = ۰/۷\,kg/s \quad H_۲o$$

$$۰/۲۲\,kg/s \times ٪۹۹/۵ = ۰/۲۱۸۹ \;\; kg/s \;\; NH_۳$$

آب موجود در محصول بالای برج

$$۰/۲۲ - ۰/۲۱۸۹ = ۰/۰۰۱۱ \;\; kg/s \;\; H_۲o$$

آمونیاک تفکیک نشده، به همراه آب، که محصول پایین برج است، از آن خارج می‌شود.

$$۰/۷۸ \;\; kg/s \times ٪۱۰ = ۰/۰۷۸ \;\; kg/s \;\; NH_۳$$

با یک محاسبه، بازده جداسازی آمونیاک از خوراک مورد نظر، حدوداً ۷۲/۹۷٪ است؛

$$\frac{۰/۲۱۸۹}{۰/۳} \times ۱۰۰ = ٪۷۲/۹۷$$

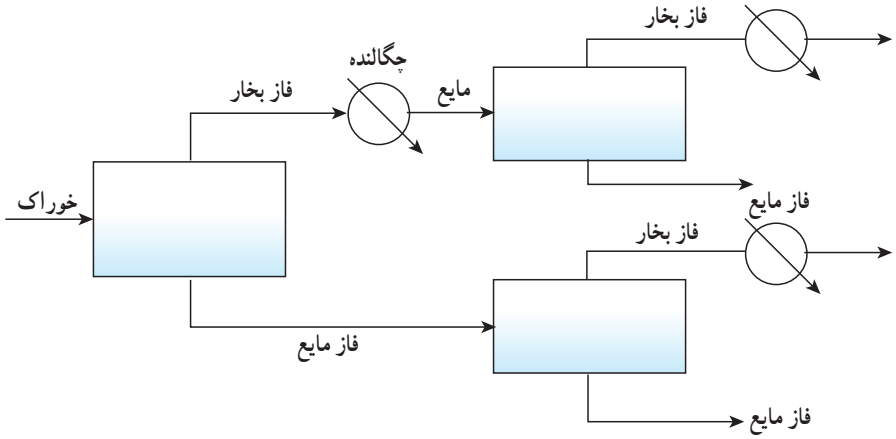
نکته : با علم به این‌که این فصل، این نمونه مسائل را مد نظر ندارد ولی توضیح این دو مثال ذهن هنرجویان را نسبت به عملیات تقطیر در صنعت روشن می‌سازد.

ــ دلیل بالاتر بودن درجهٔ خلوص محصولات در تقطیر جزء به جزء نسبت به تقطیر ساده، این گونه توضیح داده می‌شود :

تقطیر ساده، یک تقطیر یک مرحله‌ای است و به همین دلیل از درجهٔ خلوص بالایی برخوردار نیست. برای افزایش درجهٔ خلوص محصولات، می‌توان هر کدام از فاز بخار یا مایع ایجاد شده را به‌صورت خوراک جدید، بار دیگر مورد تقطیر قرار داد و در صورت دست نیافتن به درجهٔ خلوص مورد نظر، این کار ادامه می‌یابد. واضح است که این تقطیرهای پی در پی یا چند مرحله‌ای

۱ــ این مثال‌ها در صفحات ۸۹ و ۹۰ کتاب درسی عملیات دستگاهی ذکر شده‌اند.

به‌فضای بسیار بزرگی نیاز دارد (مانند شکل ۱۱ــ۲).



شکل ۱۱ــ۲

برای حل این مشکل، برج‌های سینی‌دار جهت انجام تقطیر جزء به جزء یا چند مرحله‌ای طراحی می‌شوند و در آنها هر سینی نقش یک مخزن تقطیر را دارد. در هر سینی تماس مایع و بخار انجام می‌شود و انتقال حرارت و انتقال جرم صورت می‌گیرد. تعداد سینی‌ها بستگی به درجهٔ خلوص مطلوب دارد.

ــ تأکید بر این مطلب ضروری است :

«به دلیل ثابت بودن وضعیت عملیاتی، تقطیر پیوسته بر ناپیوسته ارجح است.»

ــ مقدار، دما، فشار و سرعت مایع برگشتی، نقش بسیار مهمی در عملکرد برج تقطیر دارند. با تنظیم مقدار مایع برگشتی، می‌توان سه عامل دیگر را نیز کنترل کرد.

چون دمای مایع برگشتی، از دمای سینی‌های بالای برج کمتر است، با این عمل، دمای بالای برج کنترل می‌شود و شیب حرارتی مناسب به دست می‌آید.

فشار و سرعت این مایع نیز در نحوهٔ حرکت مایع و بخار درون برج و کنترل فشار و دبی آنها نسبت به یکدیگر مؤثر هستند. با تنظیم مقدار مایع مذکور و U[1] شکل ساختن مسیر حرکت آن، از چگالنده تا اولین سینی برج، این دو عامل در حد بهینه کنترل می‌شوند و از اختلالات احتمالی برج می‌کاهند.

دانستنی (۱)

تقطیر؛ فرّاریت نسبی : تقطیر یکی از روش‌های مهم و متداول برای تفکیک و تخلیص مواد موجود در مخلوط‌های همگن مایع (محلول‌های مایع)، در صنایع شیمیایی و به خصوص در صنعت نفت است.

بارش باران و تشکیل شبنم بر برگ گل‌ها و شیشه‌ها در فصل زمستان از مثال‌های تقطیر در طبیعت است.

اختلاف نقطهٔ جوش مایعات موجود در یک مخلوط مایع، اساس فرآیند تقطیر است. یادآوری می‌شود اختلاف نقطهٔ جوش، شرط لازم جهت انجام عمل تقطیر است ولی الزاماً کافی نیست و عامل دیگری به نام «فرّاریت» اجزاء،

۱ــ در جواب به سؤال مطروحه در صفحهٔ (۸۷) کتاب درسی عملیات دستگاهی (دلیل U شکل ساختن مسیر مایع برگشتی)

از عوامل اصلی برای امکان پذیر بودن عمل تقطیر به حساب می‌آید.

هر چه اختلاف فرّاریت نسبی بین اجزا بیشتر باشد، عمل تفکیک توسط تقطیر ساده‌تر و با درجهٔ خلوص بالاتری صورت می‌گیرد.

فرّاریت نسبی را با (α) نمایش می‌دهند که تابعی از غلظت است، و برای هر دو جزء، نسبت به هم محاسبه می‌شود.

برای مثال، در مخلوط دو جزئی A و B، فرّاریت نسبی جزء A نسبت به جزء B عبارت است از :

خارج قسمت نسبت غلظت A به B در فاز بخار بر نسبت غلظت A به B در فاز مایع.

اگر x نشانگر کسر مولی[1] اجزا در فاز مایع و y نشانگر کسر مولی اجزا در فاز بخار باشد طبق تعریف ذکر شده برای فرّاریت نسبی، رابطهٔ زیر به دست می‌آید :

$$\alpha_{AB} = \frac{y_A / y_B}{x_A / x_B} = \frac{y_A x_B}{y_B x_A}$$

از آنجا که

$$x_A + x_B = ۱ \quad , \qquad y_A + y_B = ۱$$

$$\Rightarrow \boxed{\alpha_{AB} = \frac{y_A (۱ - x_A)}{x_A (۱ - y_A)} \qquad (۱-۱۱)}$$

رابطهٔ (۱۱ــ۱)

در صورتی‌که α=۱ باشد عمل تقطیر امکان پذیر نیست، زیرا نشان دهندهٔ این است که هر دو جزء به یک اندازه در فاز مایع و بخار وجود دارند. هر قدر α از یک بزرگ‌تر باشد تفکیک ساده‌تر انجام می‌شود.

فرّاریت نسبی در محلول‌های ایده‌آل[2]، براساس فشار بخارهای اجزا محاسبه می‌شود، به صورت رابطهٔ زیر :

$$\alpha_{AB} = \frac{P_{VA}}{P_{VB}}$$

رابطهٔ (۱۱ــ۲)

در رابطهٔ (۱۱ــ ۲)[3]، P_V نماد فشار بخار است.

۱ــ کسر مولی نسبت تعداد مول هر جزء به کل مول‌های موجود است (mole Fraction)

۲ــ محلول ایده‌آل محلولی است که دارای شرایط زیر باشد :

الف) تغییر نیافتن نیروهای بین مولکولی در اثر اختلاط

ب) تغییر نیافتن حجم در اثر اختلاط

ج) جذب یا دفع نشدن انرژی حرارتی در اثر اختلاط

د) فشار بخار محلول با کسر مولی اجزای تشکیل دهندهٔ آن متناسب باشد.

واضح است با این شرایط، محلول ایده‌آل واقعاً وجود ندارد ولی این فرض برای حل مسائل و محاسبات لازم است.

۳ــ این رابطه در مسئلهٔ ۲ خودآزمایی فصل ۱۱ معرفی شده است.

فعالیت

تهیهٔ تصاویر بزرگی از یک برج سینی‌دار و آکنده جهت تدریس :

دو شکل ۱۱ــ۵ و ۱۱ــ۶ کتاب درسی برای تدریس هفتهٔ آینده مرجع خوبی هستند. از هنرجویان خواسته شود تصاویر بزرگ این دو شکل را داوطلبانه تهیه کنند. آنها می‌توانند این دو شکل را به صورت دستی یا با دستگاه کپی در ابعاد بزرگ تهیه کنند و به کلاس درس بیاورند و امتیاز بگیرند. برای این فعالیت دو هنرجو کافی است.

فعالیت

تهیه تصاویر از سایت‌های اینترنتی :

هنرآموز محترم با آموزش کلمات کلیدی، مانند

Tray Towers ـ Packing Towers ـ Packings ـ Trays

و روش تحقیق در سایت‌ها[1]، از هنرجویان بخواهند تصاویری از این وسایل تهیه کنند و به صورت مجموعه درآورند و ارائه دهند و امتیاز کسب کنند. برای این کار نیاز به گروه‌بندی هنرجویان است که به انتخاب خودشان، انجام می‌شود.

۱ــ بر فرض، سایت Google برای تحقیق انتخاب می‌شود، در قسمت search، واژهٔ مورد نظر تایپ و در صفحهٔ ارائه شده کلمهٔ images انتخاب شود.

هفتهٔ بیست و هشتم

	برنامهٔ زمان‌بندی هفتهٔ بیست و هشتم	دقیقه
۱	آماده کردن کلاس (احوالپرسی، حضور و غیاب)	۵
۲	رفع اشکال	۱۰
۳	پرسش	۳۰
۴	تدریس	۸۰
۵	استراحت میان تدریس (دو نوبت)	۱۰

سؤالات پیشنهادی

۱ــ تقطیر را تعریف کنید.

۲ــ عمل تقطیر برای جداسازی چه نوع مخلوط‌هایی است؟ مثال بزنید.

۳ــ در چه مواردی امکان استفاده از عمل تقطیر وجود دارد؟

۴ــ متداول‌ترین و مهم‌ترین عمل در میان عملیات جداسازی، چیست؟

۵ــ تقطیر براساس دو فرآیند فیزیکی انجام می‌شود، آنها را نام ببرید.

۶ــ دلیل جدا شدن مواد در فرآیند تقطیر چیست؟

۷ــ چهار خصوصیت برای «جزء سبک» در تقطیر ذکر کنید.

۸ ــ چهار خصوصیت برای «جزء سنگین» در تقطیر ذکر کنید.

۹ــ «قابلیت تبخیر یا فرّاریت» چیست؟

۱۰ــ اگر مخلوطی از پنتان و هگزان داشته باشیم، مقدار کدامیک در محصول بالای برج بیشتر است؟ چرا؟

۱۱ــ در چه صورت بازده عمل تقطیر بالاتر است؟

۱۲ــ انواع تقطیر را نام ببرید.

۱۳ــ مختصراً توضیح دهید «تقطیر ساده» چگونه انجام می‌شود.

۱۴ــ تجهیزات لازم برای انجام یک «تقطیر ساده» را نام ببرید.

۱۵ــ آیا در تقطیر ساده، امکان تولید محصولات به صورت خالص وجود دارد؟ توضیح دهید.

۱۶ــ هدف اصلی از «تقطیر ساده» چیست؟

۱۷ــ تقطیر ساده از نظر عملیاتی، چگونه انجام می‌شود؟

۱۸ــ دلیل اصلی خالص نبودن محصولات در تقطیر ساده، چیست؟

۱۹ــ «تبخیر ناگهانی» را مختصراً توضیح دهید.

۲۰ــ «تبخیر ناگهانی» و تقطیر ساده را از نظر شرایط عملیاتی فشار و دما و درجهٔ خلوص محصولات مقایسه کنید.

۲۱ــ برای رسیدن به درجهٔ خلوص بالا در تقطیر، چه نوع تقطیری پیشنهاد می‌کنید؟

۲۲ــ «نفت خام با دمای k ۴۴۰ و فشار kPa ۹۰۰ وارد یک مخزن لوله‌ای می‌شود و در دمای k ۵۲۰ و فشار kPa ۴۰۰ آن را ترک می‌کند و وارد برج تقطیر می‌شود.» مشخص کنید :

اولاً به نظر شما در این مخزن لوله‌ای چه دستگاه‌هایی وجود دارد؟

ثانیاً این فرآیند، چه نوع تقطیری را نشان می‌دهد؟

۲۳ــ چرا سرعت «تبخیر ناگهانی» از تقطیر ساده بیشتر است؟

۲۴ــ در تقطیر جزء به جزء ناپیوسته، زمان چگونه و بر چه اساسی تعیین می‌شود؟

۲۵ــ در تقطیر جزء به جزء ناپیوسته، ترکیب محصولات بالای برج به چه عواملی بستگی دارد؟

۲۶ــ در تقطیر جزء به جزء، چرا بخشی از محصول به برج بازگشت داده می‌شود؟

۲۷ــ در تقطیر جزء به جزء، بالاترین درصد خلوص برای محصول بالای برج چه زمانی است؟ و با ادامهٔ کار برج این درصد چگونه تغییر می‌کند؟ چرا؟

۲۸ــ در تقطیر ناپیوسته، عامل مهمی که در خلوص محصول نقش دارد، چیست؟

۲۹ــ تجهیزات یک ستون تقطیر را نام ببرید.

۳۰ــ «مایع برگشتی» چیست؟

۳۱ــ گرمادهی در ستون تقطیر چگونه انجام می‌شود؟

۳۲ــ نقش هر سینی در ستون تقطیر چیست؟

۳۳ــ در ستون تقطیر، بخار که به طرف بالای برج حرکت می‌کند ..... و به عکس مایع برگشتی از بالای برج با پایین آمدن ..... می‌شود.

۳۴ــ در ستون تقطیر، خوراک از چه قسمتی به برج وارد می‌شود؟ چرا؟

۳۵ــ بخش «تصفیه» و «عاری‌سازی» را در یک ستون تقطیر مشخص کنید.

۳۶ــ از نظر عملیاتی، کدام نوع تقطیر ارجح است؟ چرا؟

۳۷ــ از نظر فشار عملیاتی، برج‌های تقطیر چگونه می‌توانند کار کنند؟ اقتصادی‌ترین روش کدام است؟ در چه مواردی نمی‌توان با این روش کار کرد؟

۳۸ــ خوراک‌های سنگین در چه فشاری تقطیر می‌شوند؟ چرا؟

۳۹ــ چرا خوراک‌های سنگین را نمی‌توان در فشار اتمسفری تقطیر کرد؟

۴۰ــ خوراک‌های سبک در چه فشاری تقطیر می‌شوند؟ چرا؟

۴۱ــ چرا خوراک‌های سبک را نمی‌توان در فشار اتمسفری تقطیر کرد؟

۴۲ــ خوراک‌های سنگین را در فشار ..... و خوراک‌های سبک را در فشار ..... تقطیر می‌کنند.

۴۳ــ برای جداکردن برش روغن از نفت خام از برج تقطیر در ..... استفاده می‌کنند.

۴۴ــ برای جداکردن پروپان از بوتان از برج تقطیر در ..... استفاده می‌کنند.

۴۵ــ رابطهٔ فشار و نقطهٔ جوش مواد چیست؟

پاسخ برخی از سؤالات پیشنهادی

پاسخ سؤال (۷) : نقطهٔ جوش پایین‌تر، فشار بخار بالاتر، مولکول‌های کوچک‌تر، قابلیت تبخیر (فرّاریت) بیشتر

یادآوری می‌شود خصوصیات جزء سنگین، که مورد سؤال (۸) است، در همهٔ موارد وضعیت عکس دارد.

پاسخ سؤال (۱۱) : هر چه اختلاف نقطهٔ جوش اجزا نسبت به هم، بیشتر باشد یا به عبارت دیگر، فرّاریت نسبی اجزا نسبت به هم بیشتر باشد، درجهٔ خلوص محصولات بیشتر و در نتیجه بازده تقطیر و کارآیی آن بالاتر است.

پاسخ سؤال (۱۴) : تجهیزات لازم برای یک عمل تقطیر ساده عبارت‌اند از :

۱ــ مخزن خوراک ۲ــ سیستم گرمایشی مانند ژاکت حرارتی ۳ــ مبرّد

پاسخ سؤال (۱۶) : چون تقطیر ساده یک تقطیر یک مرحله‌ای است پس نباید از محصولات درجهٔ خلوص بالا را انتظار داشت مگر اینکه اختلاف فرّاریت اجزا نسبت به هم خیلی زیاد باشد. به طورکلی هدف اصلی از تقطیر ساده، تبدیل خوراک به اجزای سبک و سنگین است. به طور مثال در بسیاری از پالایشگاه‌های مجهز و معتبر، ابتدا نفت خام را با یک تقطیر ساده در فشار بالا، تقطیر می‌کنند تا اجزای سبک کاملاً از اجزای سنگین جدا شده و از بالای برج خارج شوند. سپس، بر روی هر کدام در فشارهای مناسب تقطیر مجدد انجام می‌دهند.

پاسخ سؤال (۲۰) : از نظر فشار و دما، تبخیر ناگهانی با تقطیر ساده تفاوت دارد. در تبخیر یا تقطیر ناگهانی، با کاهش فشار و افزایش دما (نسبت به تقطیر ساده) خوراک را قبل از ورود به مخزن تقطیر، دو فازی می‌کنند تا به‌محض ورود، با سرعت بالا دو فاز از هم جدا شود. در نتیجه، از نظر سرعت انجام تفکیک نیز با هم تفاوت دارند که از این نظر تبخیر ناگهانی ارجح است. از نظر نوع عملیات، تبخیر ناگهانی معمولاً به صورت پیوسته انجام می‌شود، درحالی‌که تقطیر ساده را هم به صورت پیوسته و هم ناپیوسته می‌توان انجام داد.

از نظر درجهٔ خلوص، چون هر دو یک مرحله‌ای هستند درجهٔ خلوص بالایی ندارند.

پاسخ سؤال (۲۲) : به طور طبیعی چون خوراک پس از خروج از مخزن لوله‌ای، به کاهش فشار و افزایش دما دچار می‌شود می‌توان حدس زد که در این مخزن به اصطلاح لوله‌ای کوره یا مبدل حرارتی جهت افزایش دما و مثلاً شیر فشار شکنی برای کاهش فشار وجود دارد.

نوع تقطیر : تقطیر ناگهانی

هنرآموز محترم می‌تواند از اعداد دیگری برای مطرح کردن این سؤال استفاده کند.

پاسخ سؤال (۲۴) : در این نوع تقطیر، مدت عملیات را براساس درصد مورد انتظار جزء سبک در فاز بخار یا فاز مایع تعیین می‌کنند.

پاسخ سؤال (۲۶) : به دلایل زیر، بخشی از محصول بالای برج به برج بازگشت داده می‌شود، که به نام «مایع برگشتی[۱]» معروف است :

۱ــ تأمین مایع روی سینی‌ها جهت خشک نشدن آنها

۲ــ تنظیم دمای برج

۳ــ دست یابی به درجهٔ خلوص بالاتر

۱ــ Reflux

۴ــ ایجاد حالت پایدار[1] برای برج

پاسخ سؤال (۲۹) :

۱ــ بدنهٔ فلزی استوانه‌ای شکل

۲ــ سینی‌های سوراخ‌دار (یا آکنه‌ها)

۳ــ دستگاه جوش‌آور[2] برای تأمین بخارآب

۴ــ کندانسور جهت مَیَعان بخار خروجی از بالای برج

پاسخ سؤال (۳۱) : خوراک پس از عبور از یک کوره یا مبدل حرارتی به دمای لازم می‌رسد و به برج وارد می‌شود. در طول تقطیر ممکن است از بخارآب جهت تأمین حرارت استفاده شود.

پاسخ سؤال (۳۳) : سبک‌تر ــ سنگین‌تر

پاسخ سؤال (۳۴) : معمولاً خوراک در برج به جایی وارد می‌شود که جریان مایع یا بخار داخل برج تقریباً دارای همان ترکیب خوراک باشد و این عمل در حقیقت یک صرفه‌جویی در میزان انرژی است. (در مقایسه با اینکه خوراک از پایین وارد برج شود که در این صورت انرژی حرارتی بیشتری مورد نیاز است).

ادامهٔ تدریس فصل یازدهم

عناوین و مطالبی که در این هفته تدریس می‌شوند، عبارت‌اند از :

- تقسیم‌بندی برج‌های تقطیر از نظر نوع عملیات
- تقسیم‌بندی برج‌های تقطیر از نظر ساختمان داخلی
- ساختمان و عملکرد برج تقطیر سینی‌دار[3]؛
- شکل برج و جنس آن
- شکل سینی‌ها
- سرریز یا بند
- ناودان
- چگونگی نصب سینی‌ها در برج (نحوهٔ جریان مایع بر روی سینی‌ها)
- فاصلهٔ بین سینی‌ها
- نقش سینی‌ها
- محل ورود خوراک و خروج محصولات
- عملکرد برج
- انواع سینی‌ها و مقایسهٔ آنها از جهات مختلف
- برج‌های تقطیر، از نظر نوع عملیات، به دو دستهٔ پیوسته و ناپیوسته تقسیم می‌شوند.

۱ــ Steady State

۲ــ Reboiler

۳ــ تدریس برج تقطیر سینی‌دار، با استفاده از شکل‌های (۱۱ــ۶) الی (۱۱ــ ۱۵) کتاب درسی عملیات دستگاهی، انجام می‌شود.

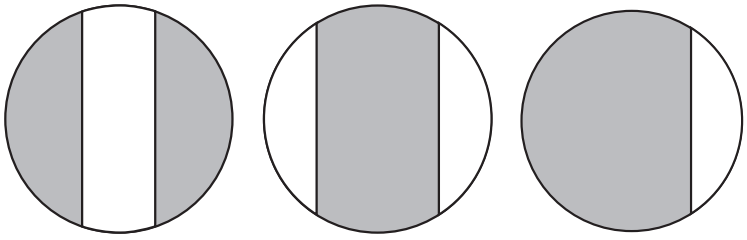
ــ برج‌های تقطیر سینی‌دار جهت انجام سه فرآیند جداسازی تقطیر، جذب[1] و استخراج، در واحدهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در شکل ۱۱ــ۳، تعدادی برج تقطیر سینی‌دار در یک واحد صنعتی مشاهده می‌شود :

شکل ۱۱ــ۳ــ برج‌های تقطیر سینی‌دار

ــ تدریس قسمت‌های داخلی برج‌های سینی‌دار و عملکرد آنها، با استفاده از شکل‌های مربوطه انجام می‌شود[2].

ــ در رابطه با شکل سینی‌ها : همیشه قطر فعال[3] سینی‌ها، کمتر از قطر برج می‌باشد زیرا جهت حرکت مایع در برج، فضایی در نظر گرفته می‌شود که به «ناودان» معروف است، این فضا، براساس میزان جریان مایع نسبت به بخار، به شکل‌های مختلفی طراحی می‌شود. شکل ۱۱ــ۴، نمای بالای یک سینی را با طرح‌های مختلفی از ناودان، نشان می‌دهد :



شکل ۱۱ــ۴ــ طراحی ناودان بر روی سینی‌ها

شکل ۱۱ــ ۴ ــ الف، جهت جریان‌های متوسط مایع و بخار است. نحوهٔ جریان مایع بر روی این سینی‌ها، «متقاطع[4]» نام دارد. در جریان‌های بالا، یک ناودان کفایت نمی‌کند و معمولاً دو نوع (ب) و (پ) را به صورت یک در میان، به کار می‌برند و به آن «جریان

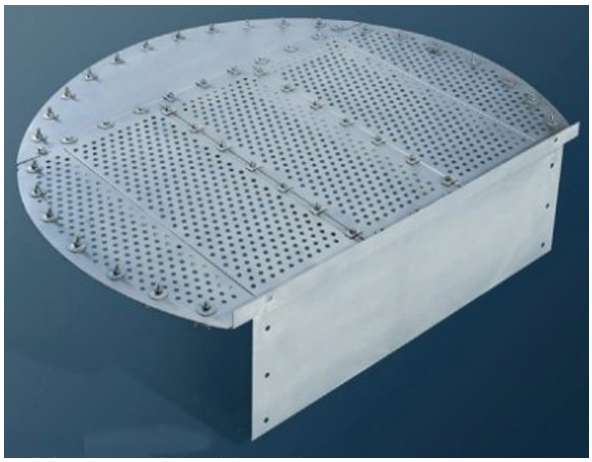
۱ــ گفتنی است شکل (۱۱ــ۶) کتاب درسی عملیات دستگاهی، برج سینی‌داری را نشان می‌دهد که جهت انجام یک فرآیند جذب گازی، مورد استفاده قرار گرفته است.

۲ــ شکل‌های (۱۱ــ ۵) الی (۱۱ــ ۱۵)، همچنین تصویر بزرگ شدهٔ شکل‌های (۱۱ــ ۵) و (۱۱ــ۶) کتاب که به صورت فعالیت، مطرح شده بود نیز می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

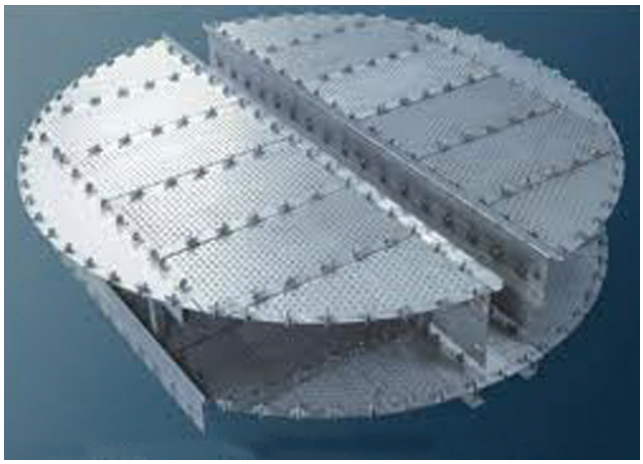
۳ــ منظور از قطر فعال سینی، قسمتی از سینی است که جهت عبور بخار و تماس دوفاز مایع و بخار در نظر گرفته می‌شود.

۴ــ Cross Flow (Single Pass Flow)

دوگذره[1]» می‌گویند. این دو نوع جریان مایع بر روی سینی‌ها، در شکل‌های ۱۱ــ۵ و ۱۱ــ۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱ــ۵ــ سینی تک گذره (جریان متقاطع)



شکل ۱۱ــ۶ــ جریان دوگذره

ــ معرفی انواع سینی‌ها : جهت سهولت در فرآیند یاددهی و یادگیری این بخش، با توجه به تصاویر هر کدام از سینی‌ها، خصوصیات آنها با عناوین مزایا و معایب بیان می‌شوند. به این ترتیب مقایسه‌ای بین سینی‌های مختلف نیز انجام شده است، برای مثال؛

خصوصیات سینی‌های غربالی[2]؛ (شکل ۱۱ــ۷)

مزایا :

۱ــ ساخت ساده و ارزان

۲ــ مقاوم در برابر گرفتگی (قابل استفاده برای مایعات رسوب‌زا یا دارای جامدات معلق)

۳ــ افت فشار کم

۴ــ تعمیرات و نظافت آسان

شکل ۱۱ــ۷ــ سینی غربالی

معایب :

۱ــ انعطاف پذیری کم در برابر تغییرات جریان مایع و بخار (فقط برای جریان‌های ثابت قابل استفاده هستند).

۲ــ سطح تماس کم دو فاز مایع و بخار

به روش مشابه، خصوصیات سینی‌های دریچه‌ای[3] و کلاهکی[4] بیان می‌شوند. در شکل‌های ۱۱ــ۸ و ۱۱ــ۹ به ترتیب نمایی از سینی‌های دریچه‌ای و کلاهکی مشاهده می‌شوند.

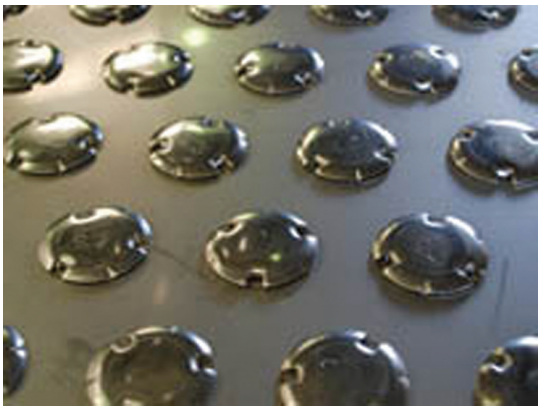
---

۱ ــ Double Pass Flow

۲ ــ Sieve Trays

۳ــ Valve Trays

۴ــ Bubble – Cap Trays



شکل ۱۱ــ ۸ ــ سینی دریچه‌ای

شکل ۱۱ــ۹ــ سینی کلاهکی

ساده‌ترین نوع سینی، سینی غربالی است. روی این سینی‌ها، سوراخ‌هایی جهت عبور بخار به سمت بالا وجود دارد که به آنها «بالا برندهٔ بخار[۱]» می‌گویند. به منظور ایجاد شرایط مناسب‌تر جهت توزیع بخار در مایع و تماس بیشتر این دو فاز، کلاهک‌ها یا دریچه‌هایی روی سوراخ‌ها نصب می‌شوند.

در مقایسه، می‌توان سینی‌های دریچه‌ای را بهترین سینی معرفی و انتخاب کرد، زیرا سطح تماس نسبتاً زیاد، افت فشار نسبتاً کم، قابلیت استفاده در شدت جریان‌های متغیر مایع و بخار و قیمت نسبتاً مناسب دارند.

ــ ذکر این نکته ضروری است که قسمت‌های مختلف یک برج سینی‌دار، همه براساس محاسبات دقیق و هدفمند طراحی می‌شوند، برای مثال؛

ارتفاع بند یا سرریز، که باید در حد بهینه باشد زیرا بلند بودن آن باعث افت فشار زیاد فاز بخار می‌شود و کوتاه بودن آن، مانع از تماس لازم دو فاز مایع و بخار بر روی سینی‌ها می‌شود و در نتیجه فرصت کافی جهت انتقال حرارت و انتقال جرم، وجود ندارد و بازده برج کاهش می‌یابد. و یا تعیین تعداد سینی‌های لازم و محل ورود خوراک به برج، مثالی دیگر است که با روش‌های مختلف محاسبه می‌شوند[۲].

ــ در رابطه با فواصل بین سینی‌ها : تعیین فاصلهٔ بین سینی‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است، به دلایل زیر :

۱ــ در اثر فشار بخار، مقداری از قطرات مایع به زیر سینی بالاتر حمل می‌شود، فاصلهٔ مناسب بین سینی‌ها، به این قطرات فرصت بازگشت می‌دهد.

۲ــ در اثر انتقال حرارت از بخار به مایع روی سینی‌ها، ممکن است بعضی از مولکول‌های مایع که متعلق به سینی‌های بالاتر نیستند، نیز تبدیل به بخار شوند، فاصلهٔ بین سینی‌ها موجب می‌شود که این گونه مولکول‌ها دوباره به مایع تبدیل شوند و به پایین برج برگردند و در سینی مخصوص خود قرار گیرند.

۳ــ در فواصل بین سینی‌ها از دریچه‌های آدم‌رو، برای تعمیرات استفاده می‌شود.

---

۱ ــ Riser

۲ــ دو روش برای محاسبهٔ تعداد سینی‌های ایده‌آل و محل ورود خوراک وجود دارد :

الف) روش تقریبی و سریع مک کیب ــ تیل (Mccabe ــ Thiele)

ب) روش دقیق پانچون ــ ساواریت (Panchon ــSavarit)

هنر آموزان برای کسب اطلاعات بیشتر می‌توانند به کتاب عملیات واحدها (unit operation) اثر Smithــ Mccabe مراجعه کنند (فصل ۱۹).

دانستنی (۲)

واحد تقطیر : به طورکلی در هر واحد تقطیر، سه دستگاه اصلی مشاهده می‌شود :

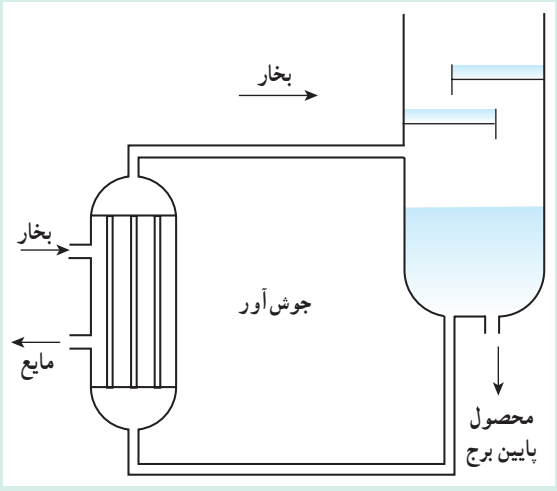
ستون تقطیر[۱]، جوش‌آور[۲]، کندانسور[۳]

این سه دستگاه در ارتباط با یکدیگر کار می‌کنند، به طوری‌که اختلال در کار هر کدام اثر نامطلوبی بر بازده واحد می‌گذارد.

در **ستون‌های تقطیر** تعدادی سینی یا آکنه جهت تماس فازهای مایع و بخار وجود دارد. در یک برج تقطیر سینی‌دار، جریان مایع و بخار به صورت غیر همسو حرکت کرده و روی سینی‌ها با هم انتقال حرارت و انتقال جرم انجام می‌دهند. هر سینی یک مرحلهٔ تقطیر تلقی می‌شود.

در آغاز عملیات[۴]، همهٔ خروجی محصول بالای برج بعد از عبور از کندانسور به صورت مایع به بالاترین سینی برگردانده می‌شود[۵] ولی بعد از مدتی که برج به حالتی[۶] می‌رسد که هر جزء در سینی مخصوص خود قرار می‌گیرد، فقط بخشی از آن به نام مایع برگشتی به برج برگردانده می‌شود که در درجهٔ خلوص محصول بالای برج، نقش مؤثری دارد. مایع برگشتی در حقیقت موجب مایع شدن قسمتی از بخارات بالای برج می‌شود و در نتیجه اجزای غیرفرّار سریع‌تر به مایع تبدیل می‌شوند و به پایین می‌ریزند و غلظت اجزای فرّار در محصول بالای برج افزایش می‌یابد.

جوش‌آور : جوش‌آورها، مبدل‌های حرارتی و در واقع منبع تأمین انرژی حرارتی هستند که در قسمت پایین برج تقطیر قرار دارند. مایع خروجی از برج، به جوش‌آور وارد می‌شود و در اثر تماس غیر مستقیم با بخارآب یا روغن داغ، مجدداً تبخیر نسبی می‌شود. بخار حاصل وارد برج می‌شود و مایع باقی مانده به صورت محصول پایین برج تقطیر، جمع‌آوری می‌گردد. طرح یک نوع جوش‌آور در شکل ۱۱ــ۱۰ مشاهده می‌شود[۷].



شکل ۱۱ــ ۱۰ ــ یک نوع جوش‌آور

کندانسور : کندانسور یک مبدل حرارتی است که در بالای برج تقطیر جهت مَیَعان بخار خروجی از برج، استفاده می‌شود. سیال سرد می‌تواند آب یا هوای سرد باشد.

۱ــ Distillation Column

۲ــ Reboiler

۳ــ Condensor

۴ــ Start up

۵ــ Total Reflux

۶ــ Steady state

۷ــ جوش‌آورها به طرق مختلف در واحد تقطیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. نوعی از آنها به صورت لوله‌های حاوی بخار درون مخزن است که مایع خروجی از برج در آن قرار دارد. شکل از کتاب «آشنایی با مهندسی شیمی» تألیف مختاریان و محمد نصیری انتخاب شده است.

دانستنی (۳)

عوامل مؤثر در بازده تفکیک :

۱ــ سطح تماس دو فاز : هر چه سطح تماس دو فاز بیشتر باشد انتقال جرم، که عامل تفکیک است، بیشتر انجام می‌شود. افزایش سطح تماس از دو طریق کلی محقق می‌شود :

الف) کوچک کردن اندازهٔ حباب‌های بخار (گاز)

ب) استفاده از برج‌های آکنده

۲ــ زمان تماس دو فاز : هر چه زمان تماس دو فاز بیشتر باشد، بازده تفکیک بیشتر می‌شود. افزایش زمان تماس به طرق زیر امکان پذیر است :

الف) در برج‌های سینی‌دار، حتی‌المقدور ارتفاع مایع روی سینی‌ها زیاد باشد.

ب) در برج‌های آکنده، تخلخل آکنه‌ها در این امر مؤثر است.

۳ــ سرعت حرکت حباب‌های بخار (گاز) : افزایش سرعت حرکت حباب‌های بخار در فاز مایع، به هم‌خوردگی را بیشتر می‌کند و در نتیجه انتقال جرم مؤثرتر می‌شود.

۴ــ افت فشار : افت فشار در برج‌ها بسیار مسئله ساز و ناشی از حرکت رو به بالای سیالات است. مثلاً در برج‌های تقطیر عبور بخار از سینی‌ها و ارتفاع مایع روی آنها یا از میان آکنه‌ها، افت فشار ایجاد می‌کند که باعث بروز مشکلاتی در کار برج خواهد شد که بیشتر متوجه مصرف انرژی است. در اثر افت فشار زیاد، فشار در پایین برج بالا می‌رود و در نتیجه نقطهٔ جوش اجزا نیز بالا می‌رود و برای تقطیر، به انرژی حرارتی بیشتری نیاز است که در این صورت ممکن است به تجزیهٔ شیمیایی و تغییر خواص مواد منجر گردد.

در کل، هر چه مسیر عبور بخار باریک‌تر و ارتفاع مایع روی سینی‌ها بیشتر یا تخلخل آکنه‌ها بیش از حد لازم باشد افت فشار بیشتر خواهد بود.

به منظور اطمینان از عملکرد برج، در نقاط مختلف آن فشارسنج، دماسنج و شیرهای نمونه‌گیری نصب می‌کنند.

هفتهٔ بیست و نهم

	برنامهٔ زمان‌بندی هفتهٔ بیست و نهم	دقیقه
۱	آماده کردن کلاس (احوالپرسی، حضور و غیاب)	۵
۲	رفع اشکال	۱۰
۳	پرسش	۳۰
۴	تدریس	۸۰
۵	استراحت میان تدریس (دو نوبت)	۱۰

سؤالات پیشنهادی

۱ــ برج‌های تقطیر براساس ساختمان داخلی‌شان، به چند دسته تقسیم می‌شوند، آنها را نام ببرید.

۲ــ شکل و جنس برج‌های سینی‌دار به چه صورت است؟

۳ــ در یک برج تقطیر سینی‌دار، نقش ناودان و سرریز را تعریف کنید.

۴ــ در یک برج تقطیر سینی‌دار، حرکت مایع و بخار چگونه است؟ و روی هر سینی چگونه تفکیک صورت می‌گیرد؟

۵ــ مایعی که از هر سینی سرریز می‌شود به صورت ..... است.

۶ــ به چه دلیل فاصلهٔ سینی‌ها باید به اندازهٔ کافی باشد؟

۷ــ رابطهٔ قطر برج و فاصلهٔ سینی‌ها چگونه است؟

۸ــ نحوهٔ جریان مایع بر روی سینی‌ها به چه عاملی بستگی دارد؟

۹ــ به چند صورت مایع بر روی سینی‌ها جریان می‌یابد؟ نام ببرید.

۱۰ــ برای جریان‌های متوسط مایع و گاز، مایع به چه صورت روی سینی‌ها حرکت می‌کند؟

۱۱ــ برای جریان‌های بالای مایع، نحوهٔ حرکت مایع روی سینی‌ها چگونه است؟

۱۲ــ در برج‌های با قطر بزرگ، نحوهٔ جریان مایع بر روی سینی چگونه است؟

۱۳ــ انواع سینی‌های مورد استفاده در برج‌های تقطیر را نام ببرید.

۱۴ــ خصوصیات (معایب و مزایا) سینی غربالی را بنویسید.

۱۵ــ ساده‌ترین و ارزان‌ترین نوع سینی کدام است؟

۱۶ــ سینی‌ها را از نظر قیمت از پایین به بالا، ردیف کنید.

۱۷ــ کدام یک از سینی‌ها در برابر گرفتگی، مقاوم هستند؟

۱۸ــ برای جریان ثابت مایع و بخار، کدام سینی مناسب‌تر است؟

۱۹ــ یک سینی غربالی را چگونه می‌سازند؟

۲۰ــ قطر سوراخ‌ها در سینی‌های دریچه‌ای ..... از قطر آنها سینی‌های غربالی است.
۲۱ــ عملکرد دریچه‌ها در سینی‌های دریچه‌ای چگونه است؟
۲۲ــ معایب سینی دریچه‌ای را نسبت به غربالی نام ببرید.
۲۳ــ انعطاف پذیری سینی‌های دریچه‌ای را با سینی‌های غربالی مقایسه کنید.
۲۴ــ کدامیک برای جریان‌های متغیر مایع و بخار کاربرد دارد؟ دریچه‌ای ــ غربالی
۲۵ــ دو نمونه از انواع سینی‌های دریچه‌ای را نام ببرید.
۲۶ــ دو نوع سینی را که برای جریان های متغیر مایع و بخار کاربرد دارند، نام ببرید.
۲۷ــ قابلیت انعطاف سینی‌های کلاهکی در برابر تغییر جریان خوراک ..... است.
۲۸ــ به چه دلیل امروزه، استفاده از سینی‌های کلاهکی منسوخ شده است؟

پاسخ سؤالات پیشنهادی

پاسخ همهٔ سؤالات در متن کتاب وجود دارد پس نیازی به تکرار آنها نیست.

ادامهٔ تدریس فصل یازدهم

عناوین و مطالبی که در این هفته تدریس می‌شوند، عبارت‌اند از :

ــ معرفی برج‌های آکنده
ــ کاربردهای برج‌های آکنده در فرآیندهای مختلف صنایع شیمیایی
ــ مورد استفاده قرار دادن یا ندادن برج‌های آکنده به جای سینی‌دار
ــ ساختمان و عملکرد برج تقطیر آکنده[1]

- نقش آکنه‌ها
- نحوهٔ چیدمان آکنه‌ها در برج
- کاربرد صفحات نگهدارنده
- انواع آکنه‌ها
- خصوصیات آکنهٔ مناسب
- خصوصیات مواد جامد خرد شده
- خصوصیات آکنه‌های شکل داده شده
- انواع متداول آکنه‌های شکل داده شده
- خصوصیات آکنه‌های شکل داده شدهٔ سرامیکی
- مواردی که تحت تأثیر اندازهٔ آکنه‌ها هستند
- خصوصیات آکنهٔ منظم
- مقایسهٔ انواع آکنه‌ها

۱ــ Packed Tower

ــ میزان انتقال جرم[1] بین فازها، در برج‌های آکنده[2] بیشتر از برج‌های سینی‌دار است زیرا :

آکنه‌ها[3] به سبب شکل خاصی[4] که دارند، سطح و زمان تماس بیشتری را در اختیار فازها قرار می‌دهند. ولی به همین دلیل، میزان افت فشار فاز بخار نیز، بیشتر می‌شود که با انتخاب آکنه‌های مناسب، می‌توان مقدار آن را در حد قابل ملاحظه‌ای کاهش داد.

ــ خصوصیات آکنهٔ مناسب[5] :

- سطح زیاد و قابل دسترس
- وزن کم
- مقاومت مکانیکی بالا
- مقاومت شیمیایی بالا
- مقاوم در برابر خوردگی
- ایجاد افت فشار کم
- قیمت مناسب

دانستنی (۴)

ــ آکنه‌ها از جهات مختلف از جمله شکل، جنس، عملکرد، کاربرد، چیدمان در برج و ... دسته‌بندی می‌شوند.

آکنه‌ها به دو دستهٔ کلی تقسیم‌بندی می‌شوند :

۱ــ آکنه‌های نامنظم ۲ــ آکنه‌های منظم

۱ــ آکنهٔ نامنظم : رایج‌ترین و پرکاربردترین نوع آکنه، آکنه‌های نامنظم هستند، که ممکن است به‌جهت محدودیت مالی، از ضایعات بعضی کارخانه‌ها تهیه شوند یا در شکل‌های مختلف با طراحی‌های حساب شده از نظر میزان سطح تماس و افت فشار، ساخته شوند که طبعاً قیمت بالاتری دارند. معمولاً نحوهٔ چیدمان این گونه آکنه‌ها در برج، نامنظم است.

دسته‌بندی آکنه‌ها از نظر جنس و کاربرد : سرامیکی، پلاستیکی و فلزی

۱ــ آکنه‌های نامنظم سرامیکی؛ خصوصیات

ــ مقاوم در برابر خوردگی(قابل استفاده در محیط‌های اسیدی و قلیایی)

ــ مقاومت مکانیکی پایین (شکننده)

ــ مقاومت شیمیایی بالا

ــ ایجاد افت فشار بالا

ــ قابلیت ترشوندگی مناسب

---

۱ ــ عامل اصلی جداسازی مواد از یکدیگر، انتقال جرم آنها بین فازهاست.

۲ ــ یا برج‌های پر شده

۳ ــ یا پرکن‌ها

۴ ــ معمولاً آکنه‌ها را متخلخل می‌سازند تا سطح گسترده‌ای را جهت تماس بیشتر ایجاد کنند.

۵ــ در انتخاب آکنه‌ها، باید به این خصوصیات توجه کرد.

ـ قابل استفاده در دماهای بالا

تعدادی ازآکنه‌های نامنظم سرامیکی، در شکل ۱۱ـ۱۱ مشاهده می‌شود.

شکل ۱۱ـ ۱۱ـ آکنه‌های نامنظم سرامیکی

۲ـ آکنه‌های نامنظم پلاستیکی؛ خصوصیات

ـ مقاوم در برابر خوردگی

ـ مقاومت مکانیکی مناسب

ـ مقاومت شیمیایی مناسب

ـ قابلیت ترشوندگی محدود (پلاستیک‌ها آب گریز هستند.)

ـ محدودیت استفاده در دماهای بالا

ـ شکل پذیری بالا

تعدادی از آکنه‌های نامنظم پلاستیکی در شکل ۱۱ـ۱۲ مشاهده می‌شود.

شکل ۱۱ـ۱۲ـ آکنه‌های نامنظم پلاستیکی

۳ـ آکنه‌های نامنظم فلزی؛ خصوصیات

ـ غیر قابل استفاده در محیط‌های خورنده

ـ مقاومت مکانیکی بالا

ـ قابل استفاده در دماهای بالا

ـ قابلیت ترشوندگی مناسب

تعدادی از آکنه‌های نامنظم فلزی در شکل ۱۱ـ ۱۳ مشاهده می‌شود.

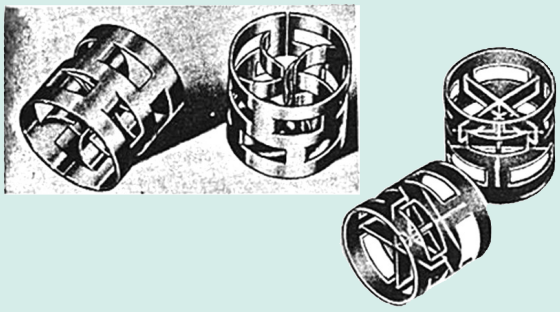
در کل، استفاده از آکنه‌های پلاستیکی و فلزی رایج‌تر است. در صورت انتخاب آکنه‌های فلزی، آلیاژی انتخاب می‌شود که مقاومت لازم در محیط‌های خورنده را داشته باشد.

شکل ۱۱ـ۱۳ـ آکنه‌های نامنظم فلزی

آکنه‌های نامنظم به شکل‌های زیر ساخته می‌شوند :

شکل ۱۱ــ۱۴ــ حلقه‌های راشیگ

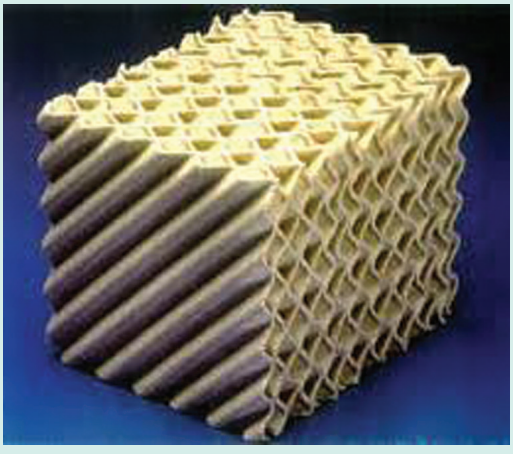
شکل ۱۱ــ۱۵ــ آکنه اینتالوکس



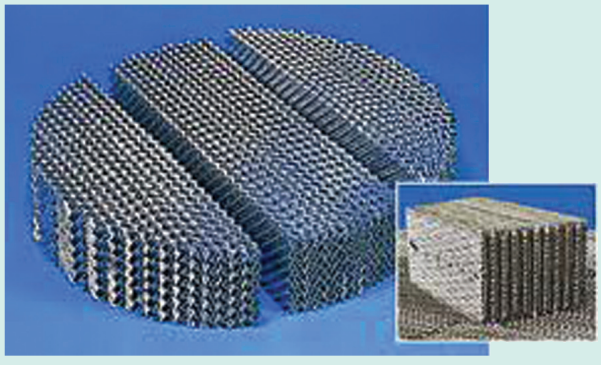
شکل ۱۱ــ۱۶ــ حلقه‌های پال

شکل ۱۱ــ۱۷ــ آکنه اینتالوکس زین اسبی

۲ــ آکنهٔ منظم : شکل‌های ۱۱ــ۱۸ تا ۱۱ــ۲۱ تصاویری از آکنه‌های منظم هستند که به دلیل طراحی مناسب، افت فشار کمتر و سطح تماس بیشتر را در برج فراهم می‌سازند و در نتیجه بازدهی را افزایش می‌دهند.



شکل ۱۱ــ۱۸ــ آکنهٔ منظم



شکل ۱۱ــ۱۹ــ آکنهٔ منظم

شکل ۱۱ــ۲۰ــ آکنهٔ منظم

شکل ۱۱ــ۲۱ــ نمایی از یک برج آکنده

دانستنی (۵)

اختلال در کار برج تقطیر : کنترل نسبت جریان گاز (بخار) به مایع در برج‌های تقطیر بسیار مهم است، به‌طوری‌که اگر این نسبت از یک حدی بیشتر شود، گاز قسمتی از مایع روی سینی‌ها را با خود به سمت سینی‌های بالاتر حمل می‌کند و به مرور فاصلهٔ بین سینی‌ها از مایع و کف پر می‌شود که به این پدیده «ماندگی مایع[۱]» می‌گویند و در اثر آن، بازده برج کاهش می‌یابد. برای جلوگیری از بروز این پدیده، سرعت گاز را باید کم کرد.

و اگر این نسبت از یک حدی کمتر شود، امکان بارش و ریزش مایع از سوراخ‌های سینی فراهم می‌شود که در این صورت حرکت گاز یا بخار به سمت بالا مختل می‌شود و در نتیجه بازده برج کاهش می‌یابد. نام این پدیده «ریزش[۲]» است و برای کنترل آن، باید سرعت گاز را کاهش داد.

۱ــ Liquid Entrainment

۲ــ Wiepping

هفتهٔ سی‌ام

	برنامهٔ زمان‌بندی هفتهٔ سی‌ام	دقیقه
۱	آماده کردن کلاس (احوالپرسی، حضور و غیاب)	۵
۲	رفع اشکال	۱۰
۳	پرسش	۳۰
۴	تدریس	۸۰
۵	استراحت میان تدریس (دو نوبت)	۱۰

سؤالات پیشنهادی

۱ــ برج‌های آکنده در چه فرآیندهایی استفاده می‌شوند؟ آنها را نام ببرید.

۲ــ در چه مواردی برج‌های آکنده جایگزین برج‌های سینی‌دار می‌شوند؟

۳ــ در چه مواردی استفاده از برج‌های آکنده، توصیه نمی‌شود؟ چرا؟

۴ــ حرکت مایع و بخار در برج‌های آکنده چگونه است؟

۵ــ آکنه‌ها با چه هدفی استفاده می‌شوند؟

۶ــ سه خصوصیت مهم آکنه‌ها را ذکر کنید.

۷ــ «صفحات نگه دارنده» به چه منظور در برج‌های آکنده استفاده می‌شوند و باید دارای چه خصوصیتی باشند؟

۸ ــ دلیل استفاده از «توزیع کنندهٔ مایع و گاز» چیست؟ و چه زمانی از «صفحات توزیع کنندهٔ میانی» استفاده می‌کنند؟

۹ــ انواع آکنه‌ها را نام ببرید.

۱۰ــ خصوصیات «مواد جامد خرد شده» را به عنوان آکنه ذکر کنید (معایب و محاسن).

۱۱ــ چرا «مواد جامد خرد شده» کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱۲ــ انواع متداول آکنه‌های شکل داده شده را نام ببرید.

۱۳ــ کدام یک از آکنه‌های شکل داده شده، امروزه بیشتر استفاده می‌شوند؟ چرا؟

۱۴ــ معایب و محاسن آکنه‌های سرامیکی را بنویسید.

۱۵ــ اندازهٔ آکنه‌ها، روی چه پارامترهایی از برج اثر دارند؟

۱۶ــ با افزایش اندازهٔ آکنه، هزینهٔ ساخت ....., افت فشار .....، سطح تماس .....، میزان انتقال جرم ..... و ارتفاع برج..... خواهد یافت.

۱۷ــ نحوهٔ چیدن مواد جامد خرد شده و آکنه‌های شکل داده شده در برج چگونه است؟

۱۸ــ دلایل استفاده از آکنه‌های منظم را بیان کنید.

۱۹ــ ساختمان آکنه‌های منظم از چه قسمت‌هایی تشکیل شده‌اند؟

پاسخ سؤالات پیشنهادی

پاسخ سؤالات مذکور، در متن کتاب موجود است و تنها چند مورد از آنها نیاز به توضیح دارد.

ــ پاسخ سؤال (۶) :

۱ــ سطح تماس مناسب ۲ــ خروج آسان مایع ۳ــ ایجاد افت فشار کم

پاسخ سؤال (۱۶) : کاهش ــ کاهش ــ کاهش ــ کاهش ــ افزایش

ادامهٔ تدریس فصل یازدهم

عناوین و مطالبی که در این هفته تدریس می‌شود، عبارت‌اند از :

ــ موارد استفادهٔ استخراج به جای تقطیر

ــ تعریف «استخراج مایع ــ مایع»

ــ معرفی اجزای موجود در یک فرآیند استخراج

ــ تشریح فرآیند استخراج پی در پی (چند مرحله‌ای)

ــ تعریف جداسازی نسبی، در فرآیند استخراج

ــ تعریف استخراج دو حلّالی یا جزئی

ــ مشخصات حلّال

ــ انواع برج‌های استخراج (ذکر نام دستگاه‌ها)

ــ دو عمل موجود در یک مرحلهٔ استخراج

ــ فاکتورهای تعیین کنندهٔ تعداد مراحل استخراج

ــ تشریح هر یک از برج‌های استخراج

ــ مقایسهٔ عملکرد و بازده برج‌های استخراج

راهنمای تدریس

در آغاز به نظر می‌رسد که یاددهی و یادگیری هشت صفحه در یک هفته برای هنرآموزان و هنرجویان مشکل باشد، ولی با توجه به دانسته‌های قبلی هنرجویان در خصوص این فرآیند و آموزش دو برج سینی‌دار و آکنده در هفته‌های پیش، تدریس مطالب جدید در این مدت زمان امکان پذیر است.

توصیه می‌شود عناوین مطروحه با توجه به متن کتاب تدریس شود. در این قسمت تنها مواردی که نیاز به توضیح بیشتر دارند بیان می‌شوند :

ــ بعد از ارائهٔ تعریف فرآیند استخراج با حلّال، راجع به اجزای موجود در آن، یعنی خوراک[۱]، حلّال[۲]، فاز استخراج شده[۳] و

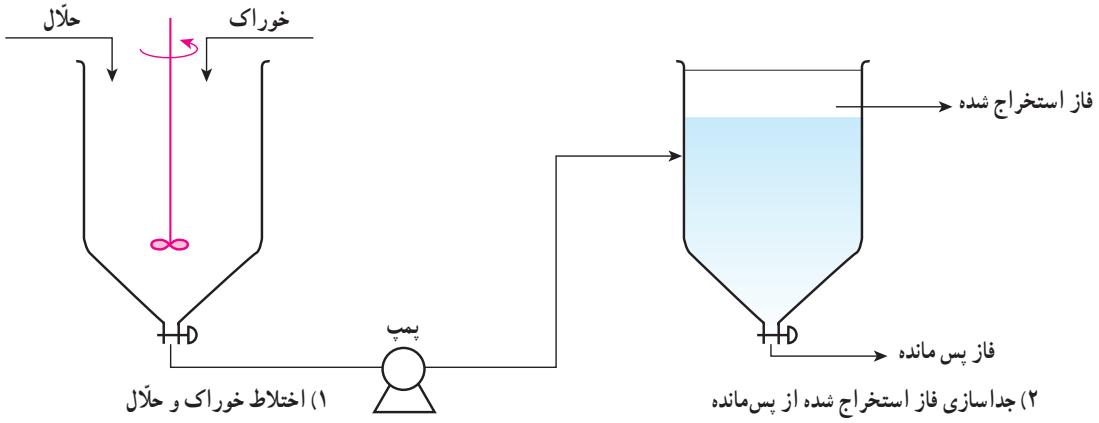
۱ــ Feed

۲ــ Solvent

۳ــ Extract

پس مانده[1] توضیحاتی داده می‌شود.

برای تشریح عملیات موجود در یک مرحله از فرآیند استخراج، می‌توان یک شکل ساده نیز رسم کرد (مانند شکل ۱۱ــ۲۲)[2]



شکل ۱۱ــ۲۲ــ طرحی از فرآیند استخراج یک مرحله‌ای

در یک فرآیند استخراج یک مرحله‌ای، سه دستگاه اصلی وجود دارد که عبارت‌اند از :

۱ــ مخلوط‌کن[3] جهت اختلاط خوراک و حلّال

۲ــ پمپ برای انتقال مخلوط خوراک و حلّال به جداکننده

۳ــ ته‌نشین کننده[4] که در آن دو فاز نامحلول تشکیل شده به نام‌های «فاز استخراج شده» و «فاز پس مانده» ، طی زمان معینی از یکدیگر جدا می‌شوند[5].

ــ هدف از انجام فرآیند استخراج پی در پی یا چند مرحله‌ای، افزایش بازده تفکیک جزء مورد نظر از خوراک است.

در فرآیند استخراج پی در پی، فاز استخراج شده و پس مانده، هر یک جداگانه به عنوان یک خوراک، عمل استخراج را تکرار می‌کنند تا درصد خلوص جزء مورد نظر در فاز استخراج شدهٔ نهایی بالا رود.

برای انجام استخراج‌های پی در پی جهت صرفه‌جویی در فضای اشغالی توسط دستگاه‌ها و ایجاد شرایط عملیاتی مناسب از برج‌های سینی‌دار و آکنده استفاده می‌کنند.

ــ در خصوص مشخصات حلّال انتخابی برای یک فرآیند استخراج، توصیه می‌شود مورد (۴)، به صورت جملات زیر بیان گردد :

«هر قدر حلّال مصرفی در یکی از اجزای خوراک محلول‌تر و نسبت به بقیه نامحلول‌تر باشد محدودهٔ دوفازی وسیع‌تری را ایجاد می‌کند و...»

ــ یادآوری می‌شود، در همهٔ برج‌های استخراج، خوراک (مایع سنگین) از بالا و حلّال (مایع سبک) از پایین وارد برج می‌شوند

۱ــ Raffinate

۲ــ این شکل به نام : «Mixer – settler» معروف است.

۳ــ Mixer

۴ــ Settler

۵ــ هنرجویان در سال دوم در آزمایشگاه شیمی آلی، از یک قیف دکانتور جهت تفکیک دو فاز نامحلول استفاده کرده‌اند.

و حرکت آنها در درون برج، به دلیل اختلاف چگالی است. در پایان عمل استخراج، فاز استخراج شده در بالای برج و فاز پس مانده در پایین آن جمع‌آوری می‌گردد.

شکل ۱۱ــ۲۳ انواع برج‌های استخراج را نشان می‌دهد :

در شکل ۱۱ــ۲۳ برج‌ها به شرح زیر معرفی می‌گردند :

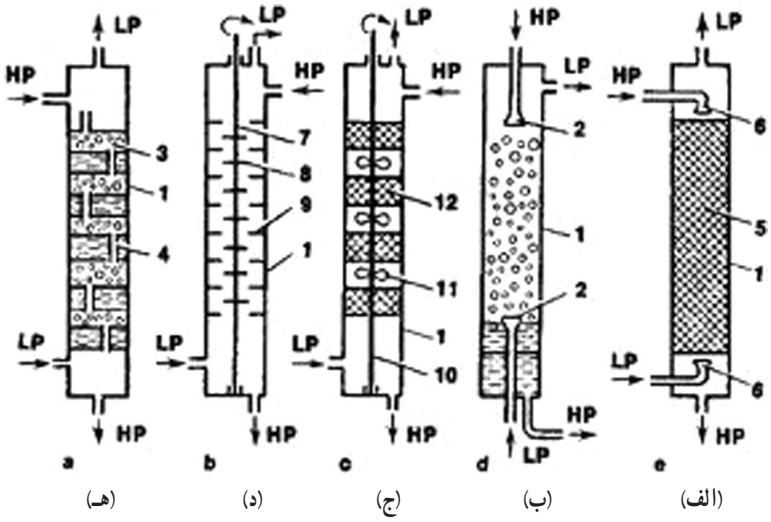
الف) برج استخراج آکنده[۱]

ب) برج پاششی[۲]

ج) مخلوط‌کن ته‌نشین کننده[۳]

د) استخراج کننده با همزن مکانیکی[۴]

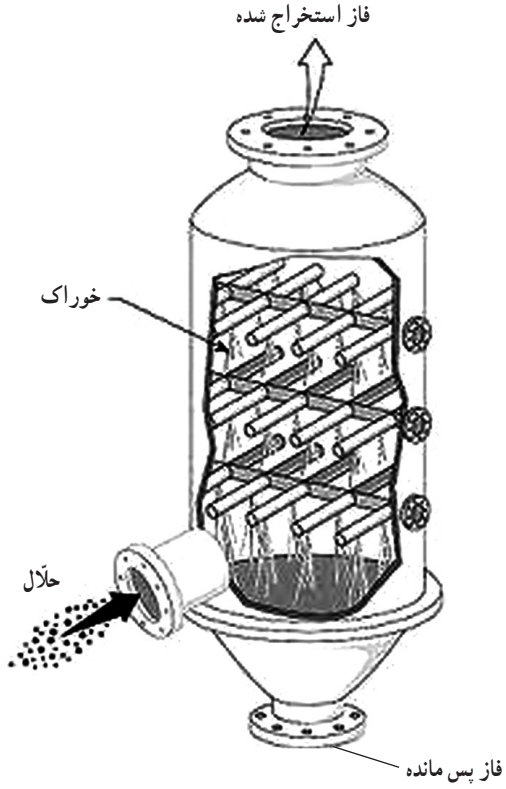
ه) برج استخراج سینی‌دار[۵]



شکل ۱۱ــ۲۳ــ انواع برج‌های استخراج

ــ مقایسهٔ برج‌های استخراج :

۱ــ برج پاششی : ساده‌ترین دستگاه استخراج است که در آن خوراک توسط توزیع کننده‌هایی در برج پخش می‌شود. این برج به دلیل اختلاط نامطلوب، بازده بسیار پایینی دارد و کم استفاده می‌شود. در شکل ۱۱ــ۲۴ یک نوع برج پاششی مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱ــ۲۴ــ برج پاششی استخراج

۱ــ Packing Tower Extractor

۲ــ Spray Tower Extractor

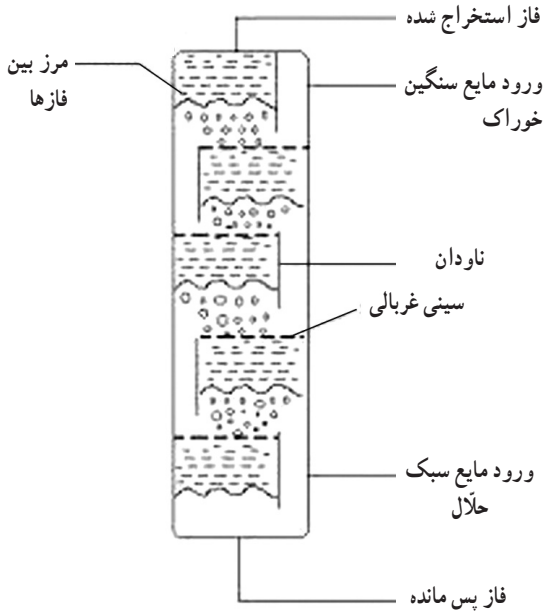
۳ــ Mixer settler Extractor

۴ــ Mechanically Agitated Extractor

۵ــTray Tower Extractor

۲ــ برج استخراج سینی‌دار : این برج برای استخراج از مخلوط مایعاتی است که کشش سطحی آنها کم است و نیروی زیادی جهت اختلاط، لازم ندارد.

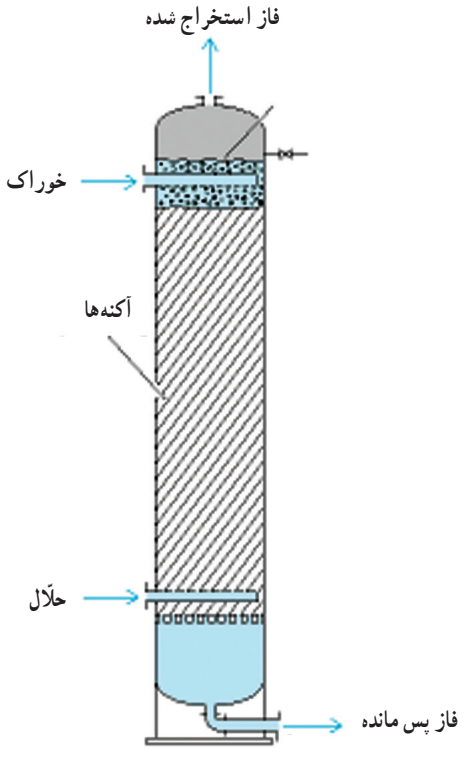
بازده این برج، به مراتب از برج پاششی بالاتر است. شکل ۱۱ــ۲۵ یک برج استخراج سینی‌دار را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ــ۲۵ــ برج استخراج سینی‌دار

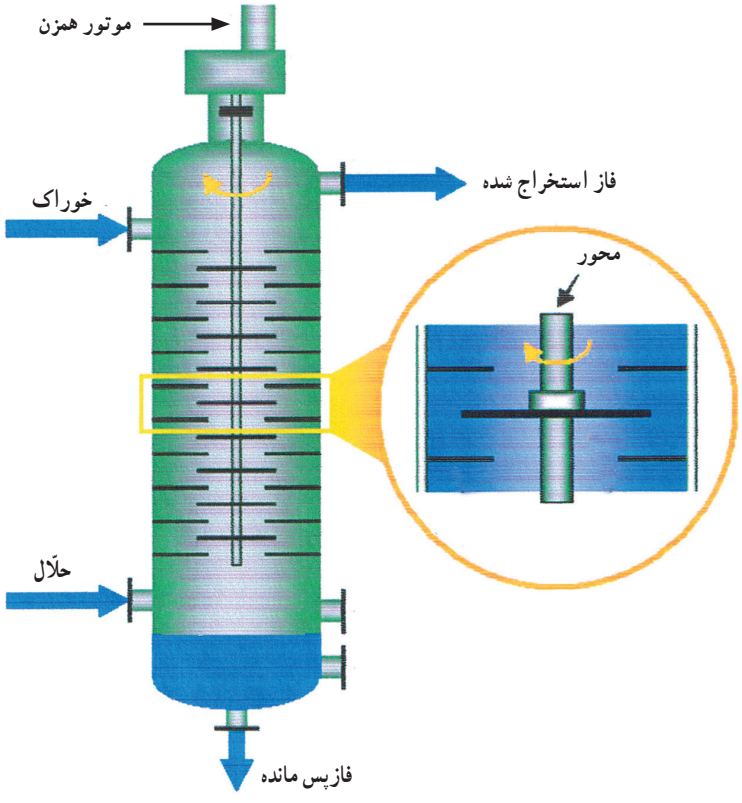
۳ــ برج استخراج آکنده : این برج‌ها، بین دو فاز مایع، شدیداً تماس ایجاد می‌کنند و به همین دلیل کارآیی بیشتری نسبت به دو برج پاششی و سینی‌دار دارند.

در شکل ۱۱ــ۲۶، نمای یک برج استخراج آکنده مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱ــ۲۶ــ برج استخراج آکنده

۴ــ استخراج کننده با همزن مکانیکی : این برج برای مخلوط مایعاتی است که کشش سطحی زیاد و اختلاف چگالی کم دارند. در این صورت اختلاط و جداسازی هر دو به سختی انجام می‌شود و به همزن الکتریکی نیاز دارد. شکل ۱۱ــ ۲۷ یک استخراج کننده با همزن مکانیکی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ــ۲۷ــ استخراج کننده با همزن مکانیکی

فعالیت (تحقیق)

چرا محلول آب و استیک اسید را نمی‌توان با تقطیر از هم جدا کرد؟

بعد از پایان تدریس، از هنرجویان خواسته شود که خودآزمایی را برای هفتهٔ بعد، حل کنند.

هفتهٔ سی و یکم

	برنامهٔ زمان‌بندی هفتهٔ سی و یکم	دقیقه
۱	آماده کردن کلاس (احوالپرسی، حضور و غیاب)	۵
۲	رفع اشکال	۱۰
۳	حل خودآزمایی فصل (۱۱)	۱۵
۴	پرسش	۲۰
۵	برگزاری آزمون فصل یازدهم	۴۰
۶	بررسی سؤالات چند نمونه امتحان نهایی	۴۵

سؤالات خودآزمایی، توسط هنرجویان پاسخ داده شوند.

با مطرح کردن سؤالاتی از درس، اشکالات هنرجویان برطرف گردد و سپس یک آزمون کلی از فصل یازدهم، به عمل آید.

در پایان، سؤالات چند نمونه امتحان نهایی سال‌های قبل، بررسی شود و در صورت امکان، نمونه‌های دیگری در اختیار آنان گذاشته شود.

این آخرین جلسهٔ سال جاری است زیرا هفتهٔ آینده (هفتهٔ آخر اردیبهشت)، امتحانات عملی کارگاه‌ها و آزمایشگاه‌ها برگزار می‌شود.

«موفق و مؤید باشید»

پاسخ سؤالات خودآزمایی[1]

پاسخ سؤال (۱) : توضیح :

نقطهٔ جوش و فشار بخار با هم رابطهٔ عکس دارند، بنابراین آن‌که نقطهٔ جوش پایین‌تر دارد فشار بخار بیشتری دارد و سبک‌تر است، یعنی مادهٔ (A)

و آن‌که نقطهٔ جوش بالاتر دارد فشار بخار کمتری دارد و سنگین‌تر است، یعنی مادهٔ (B)

پاسخ سؤال (۲) :

$$\alpha_{AB}=\frac{P_A}{P_B}\Rightarrow \alpha_{AB}=\frac{۶۰۰}{۱۱۸/۵}=۵/۰۶$$

$$\alpha_{AC}=\frac{P_A}{P_C}\Rightarrow \alpha_{AC}=\frac{۶۰۰}{۴۰۲}=۱/۴۹$$

$$\alpha_{CB}=\frac{P_C}{P_B}\Rightarrow \alpha_{CB}=\frac{۴۰۲}{۱۱۸/۵}=۳/۳۹$$

۱ــ پاسخ اکثر سؤالات در متن کتاب وجود دارد.

هر دو آمیزه‌ای که قابلیت فرّاریت نسبی آنها بیشتر باشد، جداسازی آنها با تقطیر راحت‌تر است، یعنی (A و B)، زیرا از اختلاف بیشتر نقطهٔ جوش یا فشار بخار خبر می‌دهد.

پاسخ سؤال (۸) : زیرا در این صورت انتقال جرم سریع‌تر و کامل‌تر انجام می‌شود و مرز بین دوفاز، مشخص‌تر و واضح‌تر دیده می‌شود.

پاسخ سؤال (۱۵) :

الف) یک مرحله　　ب) اختلاط ــ جدا شدن　　ج) تقطیر

سؤالات پیشنهادی

۱ــ فرآیند استخراج با حلّال را توضیح دهید.

۲ــ در چه صورت در فرآیند استخراج، جداسازی نسبی حاصل می‌شود؟

۳ــ چه مواقعی به جای تقطیر از استخراج برای جداسازی اجزای موجود در یک محلول مایع استفاده می‌کنند؟

۴ــ تشابهات و تفاوت‌های دو فرآیند تقطیر و استخراج را بیان کنید.

۵ــ جهت استخراج اسید استیک از محلول آن با آب، از چه حلّالی استفاده می‌کنند؟

۶ــ نام اجزای موجود در فرآیند استخراج را بگوئید و مختصراً در مورد هر کدام توضیح دهید.

۷ــ یک مرحله از فرآیند استخراج، شامل چه عملیاتی است؟

۸ ــ در چه فرآیندهایی، برای جداسازی اجزای خوراک از دو حلّال استفاده می‌شود؟ با یک مثال، استخراج دو حلّالی یا جزئی را توضیح دهید.

۹ــ چهار مورد از مشخصاتی را که در انتخاب حلّال مد نظر قرار می‌گیرد، ذکر کنید.

۱۰ــ «ضریب گزینش» را تعریف کنید و کاربرد آن را بیان کنید.

۱۱ــ «ضریب گزینش» بسیار شبیه به ..... در تقطیر است.

۱۲ــ چه زمانی از مقدار کمتری حلّال برای فرآیند استخراج استفاده می‌کنند؟

۱۳ــ جهت بازیابی حلّال، از چه عملیاتی می‌توان استفاده کرد؟

۱۴ــ به چه دلیل حلّال را بازیابی می‌کنند؟

۱۵ــ هر چه تفاوت دانسیته بین فازهای استخراج شده و پس مانده..... باشد، جداسازی فازها ..... انجام می‌شود.

۱۶ــ زیاد بودن کشش سطحی بین دو فاز، چه عیب و چه حسنی دارد؟ آیا در نهایت به نفع فرآیند استخراج است؟ توضیح دهید.

۱۷ــ بر چه اساسی، تعداد مراحل استخراج مشخص می‌شود؟

۱۸ــ انواع برج‌های استخراج را نام ببرید.

۱۹ــ ساده‌ترین برج استخراج چیست؟ ساختمان آن را با رسم شکل، توضیح دهید.

۲۰ــ آیا بازده برج پاششی بالاست؟ چرا؟

۲۱ــ حرکت فازها در داخل برج‌های استخراج به چه دلیل، انجام می‌شود؟

۲۲ــ چه زمانی از برج‌های سینی‌دار غربالی جهت فرآیند استخراج استفاده می‌شود و کارآیی آنها نسبت به برج‌های پاششی چگونه است؟

۲۳ــ یک برج استخراج با تعداد ۱۲ سینی در واحد مربوطه کار می‌کند، چند مرحله استخراج در این برج انجام می‌شود؟

۲۴ــ عملکرد یک برج استخراج آکنده را مختصراً شرح دهید.

۲۵ــ در یک برج استخراج آکنده، سطح جدایی فازها در ..... تشکیل می‌شود.

۲۶ــ در یک برج استخراج آکنده، هر چه اندازه آکنه‌ها ..... باشد، اختلاط ..... انجام می‌شود.

۲۷ــ بازده برج استخراج آکنده را نسبت به برج پاششی، بررسی کنید.

۲۸ــ در چه مواردی از برج آکنده به جای سینی‌دار جهت استخراج استفاده می‌کنند؟

۲۹ــ چه مواقعی از «استخراج کننده با همزن مکانیکی» استفاده می‌شود؟ چرا؟

۳۰ــ دو نوع همزن مکانیکی مورد استفاده در برج استخراج را نام ببرید و بگوئید در صورت استفاده از کدامیک، از بافل استفاده نمی‌شود؟

۳۱ــ سرعت دوران صفحات چرخان (RDC) ..... از پره‌های توربینی است.

پاسخ سؤالات پیشنهادی

پاسخ اکثر سؤالات در متن کتاب وجود دارد. در این قسمت به تعدادی از آنها، جهت اطمینان، پاسخ داده می‌شود :

پاسخ سؤال (۴)

تشابهات :

۱ــ هر دو فرآیند از عملیات فیزیکی جداسازی هستند و با انتقال جرم انجام می‌شوند.

۲ــ هر دو جهت جداسازی اجزای محلول‌های مایع به کار می‌روند.

تفاوت‌ها :

۱ــ در تقطیر حتماً نیاز به حرارت‌دهی است.

۲ــ اساس جداسازی در تقطیر، اختلاف در فرّاریت اجزاست، درحالی‌که در استخراج اختلاف در حلّالیت باعث تفکیک اجزا از یکدیگر است.

۳ــ تقطیر از جمله عملیات مستقیم[1] است، که با تغییر دما انجام می‌شود. درحالی‌که استخراج نیاز به حضور یک مادهٔ سوم یعنی حلّال مایع دارد.

۴ــ بعد از فرآیند استخراج، برای دستیابی به مادهٔ مورد نظر، به انجام فرآیند تفکیک دیگری چون تبخیر یا تقطیر

۱ــ در فصل هشتم کتاب «کارگاه عملیات دستگاهی» ، عملیات جداسازی به دو دستهٔ مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی شده است. برای اطلاعات بیشتر به صفحهٔ ۸۶ کتاب مذکور مراجعه شود.

نیازاست که طی آن حلّال نیز بازیابی می‌شود. درحالی‌که اگر فرآیند تقطیر با طراحی‌های دقیق صورت گیرد، درصد خلوص محصولات می‌تواند در حد انتظار باشد و عمل تفکیک دیگری در کار نیست.

پاسخ سؤال (۱۴) : جهت صرفه‌جویی اقتصادی، حلّال را طوری انتخاب می‌کنند که قابل بازیابی باشد. به این صورت که بین نقطهٔ جوش حلّال و جزء مورد نظر، اختلاف لازم وجود داشته باشد.

پاسخ سؤال (۱۷) : براساس خواص فیزیکی خوراک و حلّال (نظیر حلّالیت، دانسیته و کشش سطحی) و خلوص مورد نیاز برای محصول

پاسخ سؤال (۲۳) : به تعداد سینی‌ها، یعنی ۱۲ مرحله، زیرا در هر سینی یک مرحله استخراج انجام می‌شود.

توجه : جهت دسترسی هنرجویان به سؤالات امتحان نهایی، می‌توانید از سایت اداره سنجش و ارزشیابی تحصیلی به آدرس http: //aee.medu.ir استفاده کنید و آنها را به هنرجویان معرفی نمایید.

معرفی چند نرم‌افزار کاربردی رایج در مهندسی شیمی

۱ــ Aspen (محصول شرکت Aspen Tech) : یکی از معروف‌ترین و پرقدرت‌ترین نرم‌افزارهای مهندسی شیمی «Aspen» است، که شامل چندین بستهٔ نرم‌افزار مرتبط به هم است. با این نرم‌افزار می‌توان شبیه‌سازی و طراحی سیستم‌های پالایشگاهی و پتروشیمی را انجام داد. از نقاط قوت این نرم‌افزار، بانک اطلاعاتی بسیار قوی آن در خصوص جامدات، مایعات و گازها و همچنین قابلیت شبیه‌سازی سیستم‌های پلیمری است.

۲ــ Hysys (محصول شرکت Hyprotech) : این نرم‌افزار جهت طراحی و شبیه‌سازی سیستم‌های پالایشگاهی، پتروشیمی، الکترولیتی و جامد قابل استفاده است.

۳ــ Pro II (محصول شرکت Provision) : کار با این نرم‌افزار ساده و خوب است. با این نرم‌افزار شبیه‌سازی برج‌های تقطیر، سیستم‌های پالایشگاهی و پتروشیمیایی غیر پلیمری انجام می‌شود.

۴ــ Chem Cad (محصول شرکت Chemstation) : محیط کاری این نرم‌افزار، بسیار ساده است. از این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی فرآیندهای شیمیایی، سیستم‌های پالایشگاهی و الکترولیتی می‌توان استفاده کرد.

۵ــ Design II (محصول شرکت Winsim) : از این نرم‌افزار نیز برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود ولی مانند نرم‌افزارهای معرفی شده دیگر، مورد توجه نیست.

منابع و مراجع

۱ــ دیوید هیمل بلاو (ترجمهٔ دکتر مرتضی سهرابی)، اصول بنیانی و مبانی محاسبات در مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۳.

۲ــ استریترو ایلی (ترجمهٔ مهندس علیرضا انتظاری)، مکانیک سیالات، نوپردازان، ۱۳۸۲.

۳ــ محمد نصیری و نادر مختاریان، آشنایی با مهندسی شیمی، ندای مصلح، ۱۳۸۵.

۴ــ مهندس محمدتقی معاضد، حسن عباس نژاد، محمد اشراقی، مهرداد هوشمندی و حجت عشرتی، کتاب مهندسی شیمی، نشر ارکان اصفهان، ۱۳۸۲.

۵ــ دکتر احمد نوربخش، پمپ و پمپاژ، دانشکدهٔ فنی تهران، ۱۳۷۹.

۶ــ وارون مک کیب (ترجمهٔ عطاءالله امینی)، عملیات واحد در مهندسی شیمی، ۱۳۷۹.

۷ــ مهندس ساسان صدرایی نوری، فرآیندهای شیمیایی، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۸۱.

۸ ــ داوود رشتچیان، سیروس قطبی و غلام‌حسین غلامی سعیدی، مبانی صنایع شیمیایی (۱)، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۷۷.

۹ــ داوود رشتچیان، سیروس قطبی و غلام‌حسین غلامی سعیدی، کارگاه مبانی صنایع شیمیایی (۱)، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۷۷.

۱۰ــ شه زاد برقی، ماشین‌آلات صنعتی، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۶۸.

۱۱ــ شه زاد برقی، دستگاه‌های اندازه‌گیری و کنترل، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۶۸.

۱۲ــ سید پندار توفیقی و ساسان صدرایی نوری، عملیات دستگاهی در صنایع شیمیایی، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۸۹.

۱۳ــ سید پندار توفیقی، کارگاه عملیات دستگاهی در صنایع شیمیایی، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۸۸.

۱۴ــ شه زاد برقی، اصول عملیات، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۶۵.

۱۵ــ و.ر. راداکریشنان (ترجمهٔ دکتر جمشید بهین)، وسایل اندازه‌گیری و کنترل در فرآیندهای شیمیایی، متالورژی و معدنی.

16 ــ Treyball , Mass transfer operation , Mc – Graw Hill , 1979.

17 – Gessner G. Hawley , Condensed Chemical Dictionary ,

۱۳۶۳ ، جهاد دانشگاهی دانشگاه شهید بهشتی

18 – J.P .Holman , Heat transfer , Mc – Graw Hil , 1999.

19 – Robert H.Perry and Cecil H. Chilton , Chemical Engineering Handbook , Mc – Graw Hill

20 – Mc Cabe , W.L.,Smith , J.G.,Unit operations of Chemical Engineering , Mc – Graw Hill