



دانشگاه علوم پزشکی آزاد اسلامی

دانشکده علوم دارویی - دانشکده شیمی

شیمی صنعتی ۲

دکتر بیگدلی

با سلام خدمت دانشجویان گرامی

احتراما به استحضار می رسانم با توجه به شرایط پیش آمده و برای آرامش شما عزیزان

۳ جلسه درسی در جزوه زیر قرار دارد

برای هرگونه سوال درسی میتوانید با ایمیل اینجانب

ارتباط برقرار کنید

t_bigdeli@iau-tnb.ac.ir

با سپاس از بذل توجهتان

بیگدلی

سرفصل وزارت علوم به شرح زیر است که تا جلسه تقطیر در این جزوه قرار دارد

فایل کامل در انتشارات موجود است و در صورت نیاز به ایمیل دوستان ارسال میشود

فصل اول - تشریح عملیات ۶ گانه اساسی در صنایع شیمی

(تولید و انتقال انرژی، تغییر اندازه، پراکنده سازی، جداکردن، واکنش شیمیایی،

کنترل فرآیند)

فصل دوم - آشنایی با عملیات واحد؛

- واحد جذب و دفع گاز

- واحد تبخیر

- واحد تقطیر

- واحد استخراج

- واحد تبلور

- واحد رطوبت دهی / رطوبت زدایی

فصل سوم - آشنایی با انواع و نحوه کارکرد دستگاه پر کاربرد در صنعت شیمی

آسیاب‌ها، خردکننده‌ها و همزن‌ها

پمپ‌ها و کمپرسورها

خشک کننده و کوره‌ها

صافی‌ها (شنی، میکرو، اولترافیلتراسیون)

فصل اول- تشریح عملیات ۶ گانه اساسی در صنایع شیمی (تولید و انتقال انرژی، تغییر اندازه، پراکنده سازی، جداکردن، واکنش شیمیایی، کنترل فرآیند)

انرژی چیست؟

انرژی را می‌توان به صورت ظرفیت یا استعداد انجام کار تعریف کرد.

تولید و انتقال انرژی

در صنایع شیمیایی، انرژی مصرف یا از نوعی به نوع دیگر تبدیل می‌شود. روند رو به رشد افزایش جمعیت، نیاز به مصرف انرژی را می‌افزاید. بهترین منبع انرژی در حال حاضر نفت است. به نظر می‌رسد بدلیل توسعه تکنولوژی حمل و نقل، در کشورهای در حال رشد، اهمیت نسبی نفت در سطح کنونی باقی بماند. از طرف دیگر رشد روزافزونی در استفاده از گاز طبیعی، بدلیل آلودگی کمتر برای محیط زیست، ثبت گردیده است. میزان مصرف انرژی در صنایع شیمیایی یک سوم انرژی مصرفی در کل صنایع است. استفاده صحیح و اقتصادی از انرژی در صنایع شیمیایی به کاهش قیمت تمام شده محصول کمک می‌کند. انرژی در صنایع شیمیایی نه تنها برای انجام واکنش‌های شیمیایی بطور مستقیم مصرف می‌شود، بلکه برای عملیات فیزیکی مثل انتقال مواد، خرد کردن، صاف کردن، کمپرس کردن گازها و ... نیز استفاده می‌شود.

شاخص مصرف انرژی

این شاخص در صنایع شیمیایی، میزان مصرف انرژی به ازای تولید یک واحد برحسب وزن یا حجم محصول است. این واحد از انرژی بر حسب کیلووات ساعت، کیلو ژول یا مقدار سوخت مصرف شده برای تولید یک واحد برحسب وزن یا حجم محصول بیان می‌شود. بنابراین واحدهای انرژی مصرفی صنایع شیمیایی کیلو وات ساعت بر تن، کیلو ژول بر کیلوگرم و ... است.

انواع انرژی

انرژی‌های مختلف را بر اساس چگونگی کاربرد آنها، دائمی یا غیر دائمی بودن، جدید یا قدیمی بودن تکنولوژی و یا روش‌های استفاده از آنها می‌توان تقسیم‌بندی نمود. نوعی تقسیم‌بندی انرژی به این شکل است که تمام انرژی‌ها را در دو گروه انرژی‌های نهفته در ماده و انرژی‌های مکانیکی یا حرکتی تقسیم‌بندی می‌کنند قدم بعدی توصیف انرژی بر حسب کمیت‌هایی است که به رفتار یک سیستم مربوط می‌شود، که مبنای اصلی تعریف می‌باشد؛

بطور کلی در فیزیک دو دیدگاه وجود دارد ؛ دیدگاه ماکروسکوپیکی و دیدگاه میکروسکوپیکی.

کمیت‌های ماکروسکوپیکی عبارتند از مشخص کردن چند ویژگی اساسی و قابل اندازه‌گیری یک سیستم. این کمیت‌ها بطور عام دارای ویژگی‌های مشترکی هستند که عبارتند از:

- هیچ گونه فرض خاصی درباره‌ی ساختار ماده ندارند .
- تعداد آنها کم است .
- آن را کم و بیش بطور مستقیم با حواس خود درک می‌کنیم .
- می‌توان آن را مستقیم اندازه گرفت.

در توصیف میکروسکوپیکی در یک سیستم، می‌توان بیان داشت که ؛ تعداد بسیار زیادی مولکول قرار دارد که هر مولکول می‌تواند انرژی خاصی داشته باشد. بنابراین فرض می‌شود که حالت تعادل سیستم، حالتی است که احتمال آن بیشینه است. بنابراین توصیف میکروسکوپیکی یک سیستم شامل مشخصات زیر است:

- فرض‌هایی درباره ساختار ماده برای مثال مولکول‌ها می‌شود .
- کمیت‌های زیادی باید مشخص شود .
- کمیت‌های مشخص شده توسط حواس ما درک نمی‌شود .
- این کمیت‌ها را نمی‌توان اندازه گرفت.

انرژی نهفته در ماده

- انرژی سوخت‌های فسیلی مثل نفت و گاز طبیعی و زغال سنگ
- انرژی اتمی مثل اورانیوم و پلوتونیم
- انرژی خورشیدی
- انرژی الکتریکی
- انرژی شیمیایی حاصل از مواد غذایی مثل چربی ها ، کربوهیدرات ها (نشاسته)
- انرژی زمین گرمایی

انرژی مکانیکی (حرکتی)

- انرژی آب های جاری و باد
- انرژی نهفته عضلانی
- انرژی جذر و مد آب دریا

نوع دیگر تقسیم بندی بر حسب تجدید پذیر (دائمی بودن) و تجدید ناپذیر (غیر دائمی بودن) انرژی‌ها است .

انرژی‌های تجدید پذیر^۱

انرژی تجدیدپذیر به آن دسته از انرژی‌ها گفته می‌شود که برای تولیدشان از منابع فاقد دی‌اکسیدکربن استفاده می‌گردد. این دسته شامل منابع متنوع و مختلفی بوده که از انرژی‌های طبیعی و قابل دسترس به وجود می‌آیند. استفاده از این نوع انرژی موجب کاهش مصرف فرآورده‌های نفتی و اشتغال‌زایی شده و میزان آلاینده‌های محیط زیست را نیز کاهش می‌دهد. این نوع انرژی‌ها معایب سوخت‌های فسیلی مانند افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و در نتیجه افزایش دمای کره زمین و تغییرات آب و هوایی و آلودگی زیست محیطی را ندارد علاوه بر این منابع تولید آنها تمام ناشدنی و بدون محدودیت است. توسعه این نوع از انرژی‌ها با توجه به عوامل مختلف به‌ویژه هزینه اولیه و قیمت تمام شده بالا و نبود سیاست‌های حمایتی، با مشکلاتی مواجه است. که باعث شده است تا به حال این انرژی‌ها فراگیر نشوند. به همین منظور سال‌هاست تلاش برای انجام تحقیقات مختلف در زمینه جای‌گزینی مواد پسماند به جای مواد اولیه تولید این نوع انرژی و سوخت انجام می‌پذیرد. چشم انداز استفاده از این انرژی در کشور ما نیز همانند سایر کشورهای توسعه یافته از اهمیت قابل توجهی برخوردار بوده به گونه‌ای که دولت در برنامه پنجم توسعه برنامه‌ریزی لازم را صورت داده لذا با توجه به سیاست‌های جهانی توسعه این انرژی‌ها در کشور ما بمنظور حل مشکلات و ایجاد اشتغال اجتناب ناپذیر خواهد بود بررسی‌های صورت گرفته در این رابطه حاکی از آن است که توسعه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند نقش بسزایی در افزایش درجه امنیت سیستم انرژی کشور ایفا نماید. نمونه‌های مختلف این نوع انرژی از جمله انرژی باد، انرژی خورشیدی ، انرژی زیست توده ، انرژی زمین گرمایی ، انرژی جاذبه ماه، بایودیزل ، بایو اتانول و.... می باشد.

- انرژی باد
- انرژی خورشیدی
- انرژی آب های جاری
- انرژی زمین گرمایی
- انرژی جذر و مد آب
- انرژی سوخت های فسیلی نفت، گاز طبیعی، زغال سنگ
- انرژی اتمی ناشی از اورانیوم

¹ Renewable Resource Energy

انرژی‌های تجدید ناپذیر^۲

به آن دسته از منابع انرژی گفته می‌شود که در صورت استفاده شدن، فرآیند تولید و جایگزین شدن آنها به صورت طبیعی بسیار زمان‌بر است (حداقل چندین میلیون سال) لذا با در نظر گرفتن طول عمر و مقیاس زمانی انسان‌ها و جوامع، و همچنین نیاز ثابت و روزافزون انسان به منابع انرژی، این دسته از منابع انرژی تجدیدناپذیر محسوب می‌شوند هر چند که آنها پس از میلیون‌ها یا ده‌ها میلیون سال دوباره ایجاد می‌شوند.

- کانی‌های زمین
- کانسنگ‌های فلزی
- سوخت‌های فسیلی
- زغال سنگ، نفت خام، گاز طبیعی
- آب‌های زیرزمینی

انرژی‌های متداول

- انرژی سوخت‌های فسیلی
- انرژی آب‌های جاری
- انرژی باد (تبدیل به انرژی مکانیکی) مثل آسیاب‌های بادی
- انرژی الکتریکی

انرژی‌های نو

دسته بندی دیگر بر حسب جدید بودن تکنولوژی استفاده از انرژی هاست . به انرژی‌هایی که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند در اصطلاح (انرژی های نو) می‌گویند و انرژی‌های متداول طی ۱۵۰ سال اخیر نیز انرژی‌های قدیمی‌تر می‌باشند .

- انرژی اتمی
- انرژی خورشیدی
- انرژی جذر و مد آب دریا
- انرژی باد (تبدیل به الکتریسیه)
- انرژی زمین گرمایی

² Non-renewable resource Energy

توضیح برخی از انواع انرژی‌های رایج

انرژی الکتریکی

از این انرژی در فرآیندهای الکتروشیمیایی (الکترولیز نمک‌های مذاب و محلول‌ها)، الکتروترمال (ذوب کردن، گرم کردن)، الکترومغناطیسی (تغلیظ جامدات)، به علاوه به میزان وسیعی انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود و در راه اندازی ماشین آلاتی مثل خردکن‌ها، مخلوط‌کن‌ها، سانتریفوژها و ... نیز استفاده می‌شود.

انرژی گرمایی

انرژی گرمایی در صنایع شیمیایی برای فرآیندهای فیزیکی مثل گرم کردن، ذوب کردن، خشک کردن، تبخیر، تقطیر و ... کاربرد دارد.

انرژی تشعشعی

در فرآیندهای رادیوشیمیایی مثل واکنش‌های پلیمریزاسیون استفاده می‌شود. استفاده از انرژی اتمی در فرآیندهای شیمیایی، همان استفاده از انرژی تشعشعی است.

انرژی نور

برای انجام واکنش‌های فتوشیمیایی مثل هالوژنه کردن ترکیبات آلی استفاده می‌شود.

انرژی گرمایی درون زمین

کشورهایی مثل ایسلند، مکزیک، نیوزلند، آمریکا ... از این نوع انرژی استفاده می‌کنند.

انرژی باد و خورشید

برای تبدیل به انرژی‌های مکانیکی، گرمایی و الکتریکی استفاده می‌شوند.

انرژی مواد خوراکی

از انرژی بسیاری از دانه‌های گیاهی به طور مستقیم یا با کمی تغییر برای سوخت دیزل استفاده می‌شود.

انرژی گرمایی اقیانوس‌ها

اختلاف درجه حرارت بین سطح اقیانوس و عمق آن، نیروی محرکه مناسبی برای راه اندازی ماشین آلاتی است که الکتریسته تولید می کنند همانند کشور ژاپن و هاوایی آمریکا.

انرژی حاصل از تجزیه مواد

از تخمیر فاضلاب‌ها متان ایجاد می‌شود که منبع مناسبی برای انرژی است (مصارف خانگی، سوخت موتورهای احتراق داخلی)

استفاده بجا و مناسب انرژی

صنایع شیمیایی که به مقدار زیادی انرژی مصرف می‌کنند، هزینه این انرژی را در قیمت تمام شده کالا وارد می‌نمایند. بنابراین فاکتور اقتصادی یک انرژی بر حسب ضریب استفاده آن (θ) معرفی می‌گردد.

این ضریب استفاده عبارتست از:

$$\theta = \frac{W_t}{W_a} \times 100$$

نسبت بین مقدار انرژی محاسبه شده بر حسب تئوری به ازای تولید یک واحد از کالا (بر حسب وزن یا حجم) به مقدار انرژی که به طور واقعی مصرف شده است و به٪ بیان می‌شود: در میان صنایع تعداد زیادی دارای ضریب استفاده کم و ضعیف هستند که این از بین رفتن (هدر رفتن) انرژی را نشان می‌دهد. ضریب استفاده به عنوان فاکتور توانایی مصرف انرژی نیز ذکر شده است.

طبقه‌بندی انواع جریان

جریان دائم (پایا) و جریان غیردائم یا گذار (ناپایا)^۳

جریان تراکم پذیر و تراکم ناپذیر^۴

جریان یکنواخت و غیر یکنواخت^۵

جریان لایه‌ای و درهم (آشفته)^۶

جریان ایده آل و حقیقی^۷

جریان یک بعدی و دوبعدی و سه بعدی^۸

جریان داخلی و خارجی^۹

جریان توسعه یافته و در حال توسعه^{۱۰}

جریان چرخشی و غیر چرخشی^{۱۱}

جریان تک فاز و چند فاز^{۱۲}

جریان پایا و ناپایا

جریان پایا یا جریان دائمی؛ جریانی است که سرعت ذرات یک نقطه از فضا در سیال وابستگی به زمان نداشته باشد، یا بنا به تعریفی دیگر اگر یک سرعت سنج را در نقطه‌ای از سیال بگذاریم سرعت تمام ذراتی که از آن رد می‌شود یکسان باشد جریان پایا و در غیر این صورت ناپایا است. بطور کلی هنگامی که یک فرآیند یا سیستمی تحت شرایط ثابت و بدون تغییر عمل می‌کند، می‌گوئیم عملیات جریان پایا می‌باشد در غیر این صورت ناپایا می‌-

³ steady and unsteady

⁴ compressible and incompressible

⁵ uniform and Non-uniform

⁶ laminar and Turbulent(frenzied)

⁷ Ideal and Real

⁸ One-dimensional and Two-dimensional and Three-dimensional

⁹ Internal and external

¹⁰ developed and developing

¹¹ Rotational and Non-rotational

¹² single phase and multi phase

باشد. مفهوم عملیات یکنواخت یا پایا این است که شرایط کاری و عملیاتی فرآیند با زمان تغییر نمی‌کند. البته این جمله به این مفهوم نیست که فاکتورهای دما، فشار، غلظت و ... در قسمت‌های مختلف سیستم یکسان باشد، بلکه مفهوم آن این است که این فاکتورها در یک نقطه معین از سیستم ثابت می‌مانند و این امکان نیز وجود دارد که شرایط یک نقطه مشخص از سیستم با نقطه دیگر بطور کامل متفاوت باشد (برخلاف سیستم‌های در حال تعادل)، ولی شرایط هر قسمت با زمان تغییر نمی‌کند.

نکته: توجه به این نکته مهم است که در جریان دائم هر خاصیت جریان می‌تواند از یک نقطه به نقطه دیگر متفاوت باشد ولی در هر نقطه با زمان تغییر نمی‌کند.

مثال: عملیات یک اتومبیل برای ورود به یک بزرگراه را در نظر بگیرید. قبل از ورود به بزرگراه مدام ترمز کرده و متوقف می‌شود. و سپس شروع به حرکت می‌کند یعنی سرعت کم و زیاد می‌شود و مصرف بنزین متناسب با سرعت تغییر می‌کند لذا این عملیات یکنواخت نیستند. وقتی اتومبیل وارد بزرگراه می‌شود و در خط مشخصی از سرعت قرار می‌گیرد و سرعت خود را روی یک عدد مشخص تنظیم می‌کند و تا مدتی در همان حالت باقی می‌ماند بدون اینکه ترمز کند و یا سرعتش را افزایش دهد، در این حالت این عملیات یکنواخت هست زیرا هیچ تغییری در شرایط سیستم بوجود نیامده است.

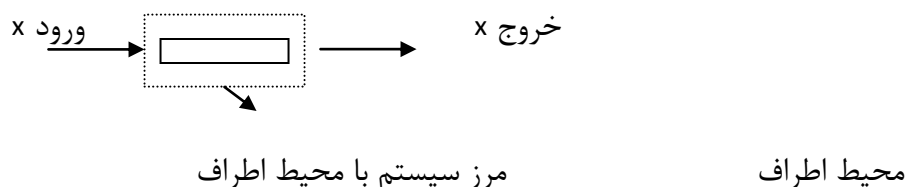
موازنه

موازنه به ۲ صورت موازنه جرم (موازنه اتم) و موازنه انرژی در صنایع شیمیایی انجام می‌پذیرد.

موازنه جرم

موازنه جرم در واقع نگرش به مفهوم قانون بقا جرم می‌باشد. می‌دانیم که جرم در طی انجام یک واکنش شیمیایی نه تولید می‌شود و نه از بین می‌رود بلکه از حالتی به حالت دیگر تغییر پیدا می‌کند. به هنگام موازنه جرم سیستم باید مشخص شود. سیستم اختیاری است و بستگی به شرایط کار دارد. محیط خارج از سیستم، محیط اطراف یا پیرامون نامیده می‌شود. مرز سیستم با محیط اطراف و نیز جرم‌های ورودی و خروجی باید مشخص شود.

شمای یک سیستم همراه با ورودی و خروجی جرم به صورت زیر است:



این سیستم می‌تواند یک مرحله از یک فرآیند یا کل یک فرآیند را نشان دهد. همانطور که می‌بینید مرز سیستم در اطراف سیستم مشخص گشته است. فرض کنید که می‌خواهیم مقدار x را نسبت به سیستم فوق موازنه کنیم و x می‌تواند به سیستم وارد و یا از آن خارج شود. اگر قانون بقا جرم برای x صادق باشد (به این مفهوم که x نه از بین می‌رود و نه بوجود می‌آید) بنابراین خواهیم داشت:

$$\text{مقدار اضافه شده به (یا کاسته شده از) } x \text{ در درون سیستم} = \text{خروجی } x - \text{ورودی } x$$

مقادیر اضافه شده یا کاسته شده در درون سیستم را بطور معمول مقدار ذخیره (انباشتگی) می‌نامند. این رابطه موازنه جرم کل در فرآیند یک سیستم را در حالت عادی نشان می‌دهد.

به صورت بهتر موازنه کلی جرم به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{انباشتگی} = \text{خروجی} - \text{ورودی}$$

انباشتگی (مجموع جرم های انباشته شده) = خروجی (مجموع جرم های خروجی) - ورودی (مجموع جرم های ورودی)

چون مجموع جرم‌های موجود در سیستم بستگی مستقیم به جرم اتم‌های مواد اولیه و میانی و پایانی دارد، لذا موازنه جرم را می‌توان بر اساس موازنه اتم‌ها نیز قرار داد. زیرا در یک واکنش شیمیایی (فرآیند شیمیایی) تعداد اتم‌ها تغییر نمی‌کند. همچنین می‌توان موازنه جرم را بر اساس موازنه یک اتم مشخص برای مثال کربن انجام داد:

$$\text{انباشتگی اتم های کربن در سیستم} = \text{اتم های کربن خروجی} - \text{اتم های کربن ورودی}$$

لازم به تذکر است که در طول فرآیند شیمیایی هیچ اتم کربنی بوجود نیامده و یا از بین نرفته است.

نکته:

اگر قانون بقاء جرم را در مورد یک عملیات جریان یکنواخت به کار ببریم، مسأله بسیار ساده خواهد شد زیرا که مقدار انباشتگی در این حالت در عمل صفر است.

$$\text{خروجی (کل جرم خارج شده از سیستم)} = \text{ورودی (کل جرم وارد شده به سیستم)}$$

روش حل مسائل موازنه جرم

شامل مراحل است به شرح زیر:

(۱) مرحله اول: نمونه سؤال یا مسئله‌ای را که با آن مواجه هستید، به وضوح مشخص کنید و عملیات موازنه جرم را در رابطه با آن انجام دهید.

(۲) مرحله دوم: یک شمای جریان مربوط به فرآیند یا عملیات مورد نظر را بکشید. ضمن مشخص کردن سیستم مورد نظر به دقت، در اطراف آن خطوط نقطه چین بکشید تا پیرامون از سیستم مشخص شود.

(۳) مرحله سوم: اساس و مبنای محاسبات را مشخص کنید. بطور معمول اساس محاسبات بازده عملی واکنش شیمیایی و فرآیند مربوط به آن می‌باشد.

(۴) مرحله چهارم: در این قسمت پس از شناسایی تمامی مواد ورودی و خروجی، آنها را با تمام مشخصات کمیتی و درصد ترکیبی در یک جدول وارد کنید.

(۵) مرحله پنجم: موازنه‌های لازم برای حل مسئله را فرموله کنید.

مثال: با توجه به شمای جریان مواد نشان داده شده نفت سنگین A با نفت سنگین B در یک واحد عملیاتی مخلوط شده و پس از آن مخلوط وارد واحد نوآرایی کاتالیزور می‌شود. اگر نفت A شامل ۶۰٪ هیدروکربن C_6 و ۴۰٪ هیدروکربن C_8 باشد و نفت B محتوی ۵۰٪ هیدروکربن C_6 و ۵۰٪ هیدروکربن C_8 باشد و اگر در هر دقیقه ۲۰۰kg از A با ۱۰۰kg از B وارد مخلوط شوند:

الف) در هر دقیقه چند کیلوگرم مخلوط تهیه می‌شود؟

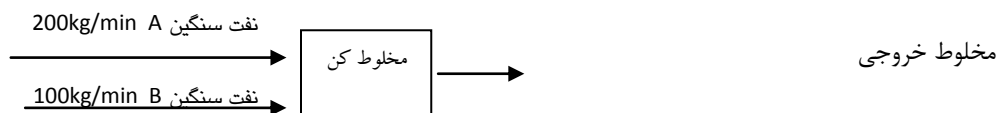
ب) مخلوط خروجی چند درصد C_6 و چند درصد C_8 دارد؟

حل:

مرحله اول: چون سؤال‌های مسئله در مورد مقدار و ترکیب محصول می‌باشند، لذا این مسئله یک مسئله موازنه جرم می‌باشد و چون جریان پایاست

پس: مقدار خروجی = مقدار ورودی

مرحله دوم: شمای کلی جریان مواد به صورت زیر است:



مرحله سوم: امکان انتخاب مبناهای متعددی برای محاسبات وجود دارد

الف) 200kg از A وارد مخلوط کن می شود
 ب) 100kg از B وارد مخلوط کن می شود
 { این دو مبنا می توانند استفاده شوند

ج) مجموع جریان های A و B وارد مخلوط کن می شود. (مبنای جالبی نیست چون از مجموع دو جسم بدست می آید ما مبنای الف را انتخاب می کنیم).

مرحله چهارم: در این مرحله مواد ورودی و خروجی را با دقت شناسایی کرده و همه اطلاعات مربوط به آن را به صورت منظم در یک جدول وارد می کنیم. هر جریان شامل دو قسمت است جزء یا ترکیب درصد و کمیت یا مقدار. در این مسئله دو جریان ورودی (جریان ورودی نفت A و جریان ورودی نفت B) و یک جریان خروجی (مخلوط) وجود دارد. حال با استفاده از اطلاعات موجود راجع به نفت سنگین A و نفت سنگین B و مقدار کل A و B جدول مواد ورودی و خروجی را به شکل زیر تنظیم می کنیم:

جسم	ورودی		خروجی	
	نفت سنگین A		مخلوط	
	ترکیب %	مقدار	ترکیب %	مقدار
C ₆	60	120kg	50	50kg
C ₈	40	80kg	50	50kg
جمع		200kg		100kg

مرحله پنجم: باید ترکیب و مقدار مخلوط خروجی را تعیین کنیم

کمیت خروجی = کمیت ورودی

گفتیم چون جریان پایاست پس:

ورودی B (جرم نفت سنگین) + ورودی A (جرم نفت سنگین) = کمیت ورودی

$$= 200\text{kg} + 100\text{kg}$$

$$= 300\text{kg}$$

چون مبنا را بر اساس 200kg از نفت سنگین A وردی گرفتیم پس مقدار کمیت خروجی خواهد بود:

۳۰۰ کیلوگرم از مخلوط

کمیت خروجی =

۲۰۰ کیلوگرم از نفت سنگین A

حال موازنه کمیت‌های خروجی

کمیت C_6 در مخلوط

کمیت C_6 در نفت B + کمیت C_6 در نفت A = کمیت جزء C_6

$$= 120\text{kg} + 50\text{kg} = 170\text{kg}$$

کمیت C_8 در مخلوط

کمیت C_8 در نفت B + کمیت C_8 در نفت A = کمیت ورودی جزء C_8

$$= 80\text{kg} + 50\text{kg} = 130\text{kg}$$

با مشخص شدن کمیت اجزاء C_6 و C_8 در مخلوط خروجی و نیز مشخص بودن جرم ورودی (300kg) حال به راحتی می‌توانیم اجزاء C_6 و C_8 در مخلوط خروجی را بدست بیاوریم:

$$C_6\% \text{ در مخلوط خروجی} = \frac{170\text{kg}}{300\text{kg}} \times 100 = 56.7\%$$

$$C_8\% \text{ در مخلوط خروجی} = \frac{130\text{kg}}{300\text{kg}} \times 100 = 43.3\%$$

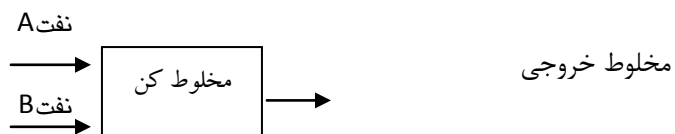
مثال:

اگر مسئله قبلی به این ترتیب مطرح شود که:

نفت A و نفت B با همان درصد ترکیبی قبل از اجزای C_6, C_8 باید به چه نسبتی مخلوط شوند تا مخلوطی تهیه شود که درصد ترکیبی جزء C_6 در آن ۵۳٪ درصد ترکیبی جزء C_8 در آن ۴۷٪ باشد؟

مرحله اول: چون مسئله راجع به کمیت و اجزای ترکیبی می باشد، موازنه جرم ورودی است.

مرحله دوم: شمای کلی جریان مواد باید رسم شود.



مرحله سوم: مبنای محاسبات را تهیه 100kg از مخلوط خروجی در نظر می گیریم.

مرحله چهارم: تنظیم جدول مواد ورودی و خروجی

ورودی		خروجی		جسم
<u>نفت سنگین A</u>		<u>نفت سنگین B</u>		
ترکیب %	مقدار	ترکیب %	مقدار	
60	?	50	?	C ₆
40	?	50	?	C ₈
		100kg		جمع

با توجه به جدول نمی توانیم هیچ موازنه جرمی را داشته باشیم. چون هر موازنه جرم دو مجهول خواهد داشت. لذا به جای علامت سؤال باید پارامترهایی را قرار دهیم. فرض می کنیم کل کمیت مقداری نفت A باشد A و کل کمیت مقداری نفت B باشد B پس جدول را کامل می کنیم.

به صورت زیر:

جسم	ورودی				خروجی	
	نفت سنگین A		نفت سنگین B		مخلوط	
	ترکیب %	مقدار	ترکیب %	مقدار	ترکیب %	مقدار
C ₆	60	0/6A	50	0/5B	53	53kg
C ₈	40	0/4A	50	0/5B	47	47kg
جمع	100	A	100	B	100	100kg

مرحله پنجم: موازنه لازم برای حل مسئله موازنه کل جرم را می توان به صورت زیر نوشت:

کل مقدار B + کل مقدار A = کل مخلوط

$$100\text{kg} = A + B$$

موازنه جزء به صورت زیر خواهد بود:

موازنه جرم جزء C₆: مقدار C₆ در مخلوط خروجی = مقدار C₆ در B + مقدار C₆ در A

$$0/6A + 0/50B = 53\text{kg}$$

موازنه جرم جزء C₈: مقدار C₈ در مخلوط خروجی = مقدار C₈ در B + مقدار C₈ در A

$$0/40A + 0/50B = 47\text{kg}$$

حال سه معادله و دو مجهول داریم که قابل حل است:

$$\begin{cases} A + B = 100\text{kg} \\ 0/6A + 0/50B = 53\text{kg} \\ 0/4A + 0/5B = 47\text{kg} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = 30\text{kg} \\ B = 70\text{kg} \end{cases} \Rightarrow \text{نسبت مخلوط شدن A, B} \quad \frac{A}{B} = \frac{30}{70}$$

موازنه اتم‌ها

نوع دیگری از موازنه جرم که اهمیت فوق العاده ای دارد و وارد جزئیات واکنش های شیمیایی نمی شود موازنه اتم هاست. این نوع موازنه، بر مبنای موازنه اتم ها و مفهوم بقاء ذرات اتمی استوار است. لذا می توان موازنه ای به صورت زیر نوشت:

کمیت خروجی (بر اساس تعداد همان اتم مشخص) = کمیت ورودی (بر اساس تعداد یک اتم مشخص)

این رابطه بدون توجه به اینکه واکنش شیمیایی صورت گرفته یا نه، درست می باشد. به عنوان مثال، اگر هیدروکربن ها در فرآیندی شرکت کرده باشند، می توان نوشت:

کمیت خروجی (بر اساس تعداد اتم های کربن) = کمیت ورودی (بر اساس تعداد اتم های کربن)

و یا:

کمیت خروجی (بر اساس تعداد اتم های نیتروژن) = کمیت ورودی (بر اساس تعداد اتم های نیتروژن)

مثال:

جدول زیر کمیت های ورودی و خروجی یک سیستم را طبق عملیات کراکینگ کاتالیزوری نشان می دهد. با استفاده از این اطلاعات نسبت تعداد مولهای محصول را به تعداد مولهای مواد اولیه محاسبه کنید.

جسم	خوراک (درصد مولی)	محصول (درصد مولی)
C_6H_{14}	0	5
C_7H_{14}	0	15
C_8H_{18}	3	20
$C_{11}H_{24}$	7	25
$C_{12}H_{24}$	20	10
$C_{15}H_{32}$	35	10
$C_{18}H_{36}$	35	15

حل: مبنای محاسبه را 100mol خوراک سیستم در نظر می گیریم.

جدول ورودی و خروجی ها را نیز به شکل زیر تنظیم می کنیم:

جسم	ورودی		خروجی	
	جریان مواد اولیه		جریان محصول	
	ترکیب (جزء)	مقدار یا کمیت (مول)	ترکیب	مقدار
C_6H_{14}	0	0	5	?
C_7H_{14}	0	0	15	?
C_8H_{18}	3	3	20	?
$C_{11}H_{24}$	7	7	25	?
$C_{12}H_{24}$	20	20	10	?
$C_{15}H_{32}$	35	35	10	?
$C_{18}H_{36}$	35	35	15	?
	100			

در این فرآیند به دلیل شکسته شدن مولکول ها به مولکول های کوچکتر، نمی توان موازنه ای برای هر جزء هیدروکربنی انجام داد. به عنوان مثال نمی توان گفت که کمیت ورودی $C_{12}H_{24}$ با کمیت خروجی آن برابر است ولی می توان از موازنه اتم های C یا H استفاده کرد. ما اتم های H را انتخاب می کنیم.

ابتدا اتم های H مواد ورودی را محاسبه می کنیم. همانطور که ملاحظه می شود اتم های H در ترکیبات $C_{18}H_{36}$, $C_{15}H_{32}$, $C_{12}H_{24}$, $C_{11}H_{24}$, C_8H_{18} وجود دارند.

تعداد اتم های H در هر ترکیب = مقدار مول آن ترکیب $\times$ تعداد اتم های H

برای مثال: با توجه به جدول بالا ستون اول برای C_8H_{18} (3 C_8H_{18}) سه مول داریم پس تعداد اتم های H این ترکیب می شود.

$$3 \times 18$$

پس خواهیم داشت:

$$3 \times 18 + 7 \times 24 + 20 \times 24 + 35 \times 32 + 35 \times 36 = 3082$$

تعداد کل اتم های H ورودی به سیستم

تذکر: عدد آووگادرو از طرفین رابطه موازنه حذف شده است.

حال تعداد اتم های H در مواد خروجی را محاسبه می کنیم. منتهی یک مشکل داریم و آن اینست که مقدار مولهای هر ترکیب را نداریم. کاری که انجام می دهیم اینست که تعداد کل مولهای مواد خروجی را N فرض می کنیم. که در اینصورت از حاصلضرب جزء هر ترکیب در تعداد کل مولها (یعنی N) مقدار مول هر ترکیب بدست می آید.

برای مثال: مقدار مول ترکیب C_6H_{14} هست:

$$0/05 \times N = 0/05N$$

و تعداد اتم های H در مولکولهای C_6H_{14} خواهد بود:

$$0/05N \times 14$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$H \text{ های } = (0/05 \times 14) + 0/15 \times 14 + 0/20 \times 18 + 0/25 \times 24 + 0/10 \times 24$$

$$+ (0/10 \times 32 + 0/15 \times 36)N$$

$$23/4N = \text{تعداد کل اتم های H خروجی: لذا}$$

داشتیم: تعداد کل اتم های H خروجی = تعداد کل اتم های H ورودی

$$\rightarrow N = 131/8$$

تعداد کل مول های خروجی

= نسبت تعداد مولهای محصول به تعداد مولهای اولیه

$$\frac{131/8}{100} = 1/318 \quad 3082 = 23/4N$$

موازنه انرژی

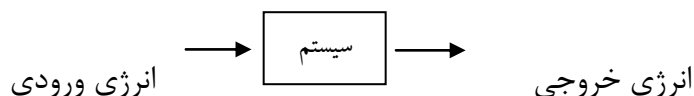
پیش‌تر بر اساس قانون بقاء جرم (در یک واکنش شیمیایی تغییر قابل سنجشی در جرم رخ ندهد)، موازنه جرم در طول یک فرآیند توضیح داده شد. اکنون با توجه به قانون بقاء انرژی، راجع به موازنه انرژی در طول یک فرآیند بحث می‌کنیم. اگر قانون بقاء انرژی در یک سیستم برقرار باشد، خواهیم داشت:

میزان افزایش (کاهش) انرژی در داخل سیستم = انرژی خارج شده از سیستم - انرژی وارد شده به سیستم

ذخیره انرژی = انرژی خارج شده از سیستم - انرژی وارد شده به سیستم

اگر فرآیند تحت شرایط جریان پایا عمل نماید، آنگاه مقدار ذخیره انرژی مساوی صفر بوده و بنابراین داریم:

انرژی خارج شده از سیستم = انرژی وارد شده به سیستم



شمای کلی یک سیستم به همراه انرژی ورودی و خروجی

می‌دانیم که مواد می‌توانند دارای اشکال مختلف انرژی مثل: انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل، انرژی داخلی و یا آنتالپی باشند. همچنین انرژی می‌تواند به شکل گرما و کار بین سیستم و محیط اطرافش رد و بدل شود. بنابراین در هنگام موازنه انرژی یک فرآیند باید با دقت همه اشکال مختلف انرژی شناسائی شوند تا بتوان رابطه زیر را نوشت:

کل انرژی خروجی از سیستم = کل انرژی ورودی به سیستم

برای استفاده از این رابطه باید بطور دقیق بدانیم که سیستم چیست؟ اشاره کردیم که ما باید سیستم را مشخص کنیم نیز گفتیم که هر چیزی در اطراف سیستم محیط پیرامون خوانده می‌شود.

انواع سیستم

در مطالعات ترمودینامیکی با سه نوع سیستم سر و کار داریم، سیستم باز، سیستم بسته و سیستم منزوی.

سیستم باز؛ سیستمی است که بتواند با پیرامون خود هم انرژی و هم ماده مبادله کند.

سیستم بسته؛ آن است که امکان مبادله ماده میان آن و پیرامونش فراهم نیست، اما انتقال انرژی از سیستم به اطراف ممکن است.

سیستم منزوی؛ سیستمی است که با دنیای اطرافش هیچ برهمکنشی نداشته باشد، به بیان دیگر، یک سیستم منزوی آن است که با دنیای دور و برش نه انرژی مبادله کند و نه ماده.

نکته؛ با توجه به تعریف‌های مذکور، یک سیستم باز نه جرم ثابتی دارد و نه انرژی ثابتی دارد، حال آنکه جرم یک سیستم بسته ثابت است. اما انرژی آن ثابت نیست؛ سرانجام، در یک سیستم منزوی هم جرم و هم انرژی آن ثابت است.

برای سیستم‌های مطرح شده در بالا می‌توان به صورت زیر توضیحاتی را بیان داشت.

سیستم های بسته: سیستم های غیرقابل نفوذ نسبت به جرم و نفوذپذیر نسبت به انرژی را بسته می نامند. یعنی حرارت و کار ممکن است در آن جا به جا شود. قانون بقای انرژی برای یک سیستم بسته عبارتست از:

$$\Delta K + \Delta Q + \Delta U = Q_c + W_c$$

در این رابطه داریم:

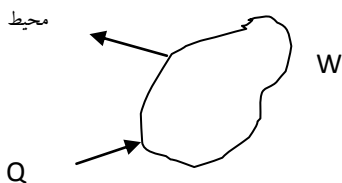
ΔK = تغییرات انرژی جنبشی مواد موجود در سیستم که نتیجه حرکت یا سرعت سیستم است

ΔQ = تغییرات انرژی پتانسیل مواد موجود در سیستم که نتیجه وضعیت آنها در میدان جاذبه است.

ΔU = تغییرات انرژی داخلی مواد موجود در سیستم که نتیجه حرکات در هم مولکولها و نیز ماهیت شیمیایی آنهاست.

W_c = کاری که سیستم روی محیط انجام می‌دهد

Q_c = حرارتی که از محیط به سیستم منتقل شده است.



یک نکته راجع به انتخاب علامت W, Q :

اگر فرض کنیم سیستم به صورت رو به رو باشد.

آنگاه قرار داد می‌کنیم که وقتی گرما از محیط پیرامون به سیستم منتقل می‌شود علامت $+$ است. از طرفی وقتی کار از سیستم به محیط پیرامون منتقل می‌شود علامت $-$ خواهد بود و بالعکس، این نکته بطور کامل قرار دادی می‌باشد.

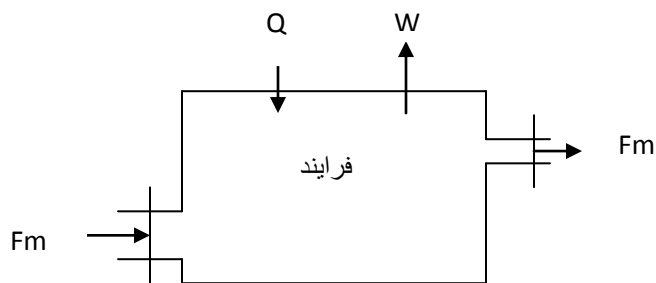
داشتیم:

$$\Delta K + \Delta Q + \Delta U = Q - W$$

مفهوم این معادله این است که تغییر انرژی کل سیستم برابر است با گرمای افزوده شده به سیستم منهای کار انجام شده توسط سیستم. فرآیندهایی که در سیستم‌های بسته انجام می‌شوند اغلب طوری هستند که در انرژی پتانسیل یا انرژی جنبشی تغییری بوجود نمی‌آورند بلکه فقط باعث تغییر در انرژی داخلی می‌شوند. بنابراین در چنین سیستم‌هایی معادله به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\Delta U = Q - W$$

سیستم‌های باز: سیستم‌هایی از قبیل راکتور شیمیایی، که در آن جرم وارد و از آن خارج می‌شود، سیستم باز نامیده می‌شوند.



همانطور که ملاحظه می‌شود جرم در نقطه ۱ (از سمت چپ تصویر؛ F_m پایینی) وارد و از نقطه ۲ (سمت راست تصویر؛ F_m بالایی) خارج می‌شود. در سیستم‌های یکنواخت (پایا) شدت جریان جرم ورودی در نقطه ۱ (F_m پایینی) با شدت جریان جرم خروجی در نقطه ۲ (F_m بالایی) برابر است کار انجام شده از طریق فرآیند

روی محیط W و حرارت منتقل شده از محیط به فرآیند Q است. معادله کلی بیلان انرژی در یک سیستم باز یکنواخت به صورت زیر است:

خروجی = ورودی

$$F_m(U_1 + K_1 + Q_1 + P_1 V_1) + Q = F_m(U_2 + K_2 + Q_2 + P_2 V_2) + W$$

F_m = شدت جریان جرم ورودی به سیستم و خروجی از سیستم

U_1 = انرژی داخلی یا درونی مواد وارد شده به سیستم

U_2 = انرژی داخلی یا درونی مواد خارج شده از سیستم

K_1 = انرژی جنبشی مواد ورودی

K_2 = انرژی جنبشی مواد خروجی

Q_1 = انرژی پتانسیل مواد ورودی

Q_2 = انرژی پتانسیل مواد خروجی

P_1 = فشار در نقطه ورودی خوراک

P_2 = فشار در نقطه خروجی مواد

V_1 = حجم مخصوص مواد ورودی

V_2 = حجم مخصوص مواد خروجی

Q = شدت حرارت منتقل شده به سیستم

W = کار انجام شده از طریق فرآیند

داریم:

انتالپی

$$U + PV = H$$

چون در بسیاری از فرآیندها تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل محسوس نیست لذا با قراردادن در معادله کلی
 بیان تغییرات آن صفر منظور می شود بنابراین معادله خواهد شد:

$$F_m(H_2 - H_1) = Q - W$$

$$\Delta H = Q - W$$

ΔH تغییرات آنتالپی بین جریان های ورودی و خروجی سیستم است.

فرآیند بی دررو یا آدیاباتیک

فرآیند بی دررو یا فرآیند آدیاباتیک، فرآیندی است که در آن بین محیط و سیستم، گرمایی رد و بدل نمی شود
 ($Q=0$). برای اینکه گرما بین سیستم و محیط مبادله نشود باید سیستم عایق بندی شده باشد

$$Q+W=\Delta U$$

$$Q=0 \quad , \quad \Delta U=W \quad , \quad \Delta U=\frac{3}{2} n R \Delta T$$

در فرآیند آدیاباتیک $Q=0$ است لذا هنگام انبساط، دمای گاز کاهش و هنگام تراکم، دمای گاز افزایش می
 یابد. در انبساط $W<0$ پس $\Delta T < 0$ یعنی دما کاهش می یابد و در تراکم $W > 0$ پس دما افزایش
 می یابد. در اینجا تغییرات انرژی درونی، برابر کار اعمال شده بر سیستم است. فرآیندهایی که بسیار سریع
 انجام می شوند را هم می توان فرآیند آدیاباتیک در نظر گرفت. چون در این فرآیندها سیستم، فرصت تبادل انرژی
 گرمایی با محیط را پیدا نخواهد کرد.

$$W < 0 \Rightarrow \Delta u < 0$$

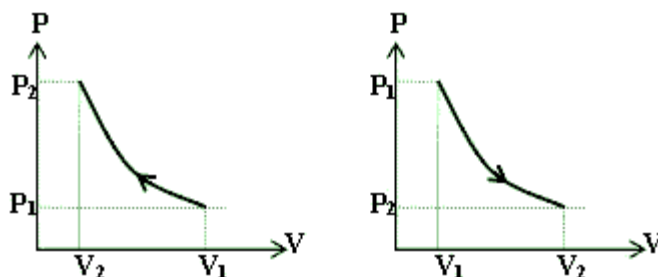
. اگر گاز منبسط شود، سیستم به محیط کار می دهد و انرژی درونی کم می شود

$$W > 0 \Rightarrow \Delta u > 0$$

. اگر گاز متراکم شود، سیستم از محیط کار می گیرد و انرژی درونی زیاد می شود

نکته : در این فرآیند می توان دستگاه را عایق بندی کرد و سپس عمل تراکم یا انبساط را بسیار
 آهسته انجام داد.

نمودار P – V در فرآیند آدیاباتیکی:



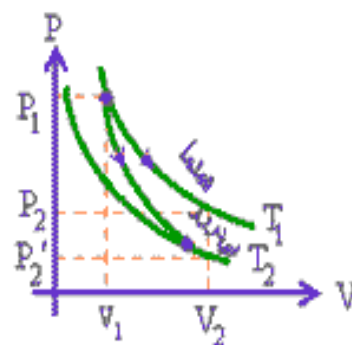
نکته: چون در فرآیند آدیاباتیکی $Q=0$ پس افت فشار در فرآیند آدیاباتیکی انبساط، و افزایش فشار در فرآیند آدیاباتیکی تراکم از افت فشار یا افزایش فشار در فرآیند همدمای بیشتر است. یعنی شیب نمودار P-V در فرآیند آدیاباتیکی، از افت فشار یا افزایش فشار در فرآیند همدمای بیشتر است.

اگر مقداری گاز کامل را از حالت اولیه P_1, V_1 یک بار به صورت هم دما منبسط کنیم و حجم آن را به V_2 برسانیم، فشار گاز به P_2 خواهد رسید. اگر گاز را از حالت اولیه به صورت آدیاباتیکی به حجم V_2 برسانیم فشار حالت نهایی P'_2 می‌گردد. با توجه به نمودار، مشخص شده است که P'_2 کمتر از P_2 خواهد بود.

$$\left| W_{\text{isobar } V_1 \rightarrow V_2} \right| > \left| W_{\text{adiabatic } V_1 \rightarrow V_2} \right|$$

$$W_{\text{isobar } V_1 \rightarrow V_2} = -nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = -P_1 V_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$W = \Delta U = \frac{f}{2} nR (T_2 - T_1) = \frac{f}{2} (P_2 V_2 - P_1 V_1)$$



در فرآیند همدمای در حین انبساط مقداری گرما از چشمه گرمایی گرفته می‌شود تا دما ثابت بماند. ولی در فرآیند آدیاباتیکی، تبادل گرمایی نداریم. افت فشار در فرآیند بی‌دررو بیشتر از فرآیند هم دماست. چون نمودارهای P-V برای دو فرآیند همدمای و آدیاباتیکی به صورت منحنی است، برای تشخیص نمودار مربوط به هر یک از فرآیندها داریم:

- اگر فرآیند همدم باشد، باید دما در دو انتهای مسیر برابر باشد $PV=nRT$.
- در فرآیند همدم $P_1 V_1 = P_2 V_2$ اگر در غیر این صورت فرآیند آدیاباتیکی خواهد بود .

دستگاه ها می توانند فرآیندی را طی کنند که از مجموع چند فرآیند تشکیل شده باشد . فرآیندی که در طول آن دستگاه پس از طی چند فرآیند به حالت اولیه خود بر می گردد **چرخه** نامیده می شود.

در چرخه ی پاد ساعتگرد $U = 0$, $W = -Q = S$:

در چرخه ی ساعتگرد $U = 0$, $W = -Q = -S$:

نکته: تغییر انرژی درونی ΔU دستگاه به مسیر تحول بستگی ندارد ولی Q, W به مسیر تحول وابسته هستند.

فرآیند هم حجم	$\Delta U = Q$	$W = 0$
فرآیند بی دررو	$\Delta U = W$	$Q = 0$
فرآیند هم دما	$Q = -W$	$\Delta U = 0$
چرخه	$Q = -W$	$\Delta U = 0$

اصلی‌ترین هدف از تغییر و افزایش مقیاس رسیدن به ظرفیت تولید مورد نظر براساس پیش بینی تقاضای بازار و بررسی‌های اقتصادی است. روش‌های متعددی برای این منظور وجود دارد، هر کدام از این روش‌ها باید با توجه به شرایط فرآیندی و اقتصادی بررسی و روش بهینه انتخاب گردد. هنگامی که یک فرآیند در مقیاس آزمایشگاهی طراحی می‌شود، با توجه به کم بودن حجم خوراک و تجهیزات مورد نیاز، توجه به بعضی نکات طراحی مانند بهینه کردن شرایط عملیاتی به منظور کاهش هزینه‌ها کم اهمیت خواهد بود و برای کنترل فرآیند نیاز به سیستم کنترل پیچیده‌ای نیست، همچنین مسائل ایمنی نیز از اولویت کمتری برخوردار هستند. در حالی که در تغییر مقیاس همان واحد، باید تمام مشکلات و ریسک‌های احتمالی بررسی گردد. لذا انجام تغییر مقیاس توسعه کمی و کیفی تکنولوژی را نیز به همراه دارد. یکی دیگر از مزایای تغییر مقیاس، سودآور کردن پژوهش‌های علمی است. تحقیقات مداوم در زمینه یک موضوع خاص نیاز به صرف هزینه و انرژی زیادی دارد که این هزینه‌ها شامل خرید تجهیزات، ماده اولیه، منابع علمی پژوهشی، نیروی انسانی و ... می‌باشد. در کشور ما بطور معمول این اعتبارات از سرمایه ملی تامین می‌شود اما در اکثر موارد بازگشت سرمایه هرگز صورت نمی‌پذیرد که علت اصلی آن عدم توانایی انتقال دانش و تکنولوژی از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس‌های بالاتر به منظور تولید محصول و فروش آن می‌باشد. همچنین به روشنی آشکار است که با انجام تغییر مقیاس توانایی مهندسان در این زمینه افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهد یافت که در ارتقاء و تربیت نیروی انسانی بسیار حائز اهمیت است. افزایش مقیاس به معنای راه‌اندازی و انجام عملیات در یک مقیاس صنعتی و تجاری با استفاده از تجربیاتی است که در مقیاس‌های کوچکتر حاصل شده است. مهندسين شیمی بطورعموم با فرآیندهای صنعتی سروکار دارند. در این مقیاس‌ها رفتار مشاهده شده از مواد و تجهیزات، متفاوت‌تر از آن چیزی است که در سایزهای کوچکتر دیده می‌شود. به عبارتی نحوه انجام واکنش‌های شیمیایی مورد بررسی به ابعاد محیط واکنش بستگی دارد. تفاوت دیگری که قابل توجه می‌باشد، این موضوع است که در مقیاس صنعتی واکنش‌ها به طور معمول از نوع هتروژن هستند و تعداد عملیات‌های واحد هم بیشتر می‌باشد. به عبارت دیگر در "افزایش مقیاس" یک فرآیند را از آزمایشگاه تا صنعت برون‌یابی می‌کنیم. که در انجام این عمل باید به یک سری از پارامترها از قبیل: هرچه سریع‌تر بودن زمان راه‌اندازی واحد، عمر مفید بیشتر قطعات و سود دهی بالاتر توجه کرد. مهارت کسب شده در ابعاد آزمایشگاهی به علت شرایط خاص موجود در صنعت بطور کامل قابل انتقال به صنعت نیست. در نتیجه به صورت مستقیم

این انتقال انجام نمی‌شود، ابتدا وارد ابعاد نیمه صنعتی شده و در نهایت صنعتی می‌شود. برای تغییر مقیاس دو رویکرد تئوری و عملی را میتوان بکار برد. در رویکرد تئوری تلاش بر این است که با شناخت کافی از تمام پارامترهای تاثیرگذار سامانه، مدلسازی رفتاری آن در قالب یک مدل جامع بر مبنای روابط و معادلات پایه و ایجاد ارتباط مناسب بین آنها صورت پذیرد، به گونه‌ای که مدل توان پیشگویی رفتار سامانه در شرایط مختلف را با دقت لازم داشته باشد. این رویکرد همان گونه که در ادامه گفته خواهد شد در سامانه‌هایی که از پیچیدگی رفتاری برخوردار می‌باشند دچار محدودیت فراوانی است. در رویکرد دیگر، تلاش بر اینست که به ساده‌ترین و مطمئن‌ترین روش ممکن، مدلی حتی مجازی و بدون بنیان تئوری (برای پیشگویی رفتار سامانه در محدوده مورد نظر بر پایه اطلاعات انبوه موجود) تدوین گردد تا مبنای طراحی قرار گیرد. این رویکرد و یا تلفیقی از هر دو، در حال حاضر مبنای تغییر مقیاس در صنعت را تشکیل می‌دهند. روش‌های متعددی جهت تغییر مقیاس وجود دارند. این روش‌ها به طور معمول به تنهایی پاسخگوی دقت مورد نیاز برای تضمین عملکرد صحیح سامانه با ابعاد جدید نبوده و بسته به پیچیدگی سامانه مورد مطالعه، باید ترکیبی از آنها را بکار برد. باید توجه داشت که حتی با استفاده از این روش‌ها نیز نمی‌توان تمام ظرفیت‌های مورد نیاز بعضی سامانه‌ها بعنوان مثال یک راکتور را طراحی نمود و ممکن است شرایطی پیش آید که با کمک هیچ یک از روش‌هایی که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد، امکان طراحی سامانه در ظرفیت مطلوب میسر نشود، که در چنین شرایطی جهت غلبه بر مشکل، ناگزیر به تغییر طراحی سامانه خواهیم بود در ادامه به روش‌های متداول اشاره می‌شود.

چهار پارامتر، یک فرآیند صنعتی را از فرآیند آزمایشگاهی متمایز می‌کند:

- ✓ ویژگی‌های محصول: به طور مثال محصولی که کاربرد دارویی دارد ولی بعد از یک ماه خراب می‌شود، ویژگی محصول خوبی ندارد. و یا ماده‌ای که در اثر نور تخریب می‌شود و خواص خود را از دست می‌دهد، ویژگی محصول مطلوب را از دست خواهد داد. اما در آزمایشگاه این نکات از اهمیت کمتری برخوردار است.
- ✓ بحث بازار^{۱۳}: یعنی بررسی پارامترهای و ویژگی‌های بازار مانند ظرفیت بازار، نیاز بازار، بازار یابی
- ✓ بررسی فنی: یعنی انتخاب فرآیند تکنولوژی
- ✓ تجزیه و تحلیل مالی و اقتصادی: بررسی سود و زیان، منحنی‌های مربوط به سرمایه و هزینه.

¹³ Mark study

برای انجام یک عملیات موفقیت‌آمیز در طراحی واحدهای صنعتی به طریق "افزایش مقیاس" لازم است که متغیرهای مهم فرآیند را بتوانیم کنترل کنیم که در صورت انجام این عمل قادر خواهیم بود تا اثر هر کدام از این پارامترها را بر روی خروجی فرآیند پیش‌بینی کنیم. برای بررسی اثر هر پارامتر در ابتدا سعی می‌کنیم که از معادلات ریاضی استفاده کنیم. در مرحله دوم اگر معادلات ریاضی در مواردی موجود نبود، از شبیه‌سازی‌های تجربی استفاده می‌نماییم. شبیه‌سازی سبب تولید داده‌های مورد اعتماد گشته و اجرای فرآیندهای بعدی را تسهیل می‌کند. در طراحی مدل برای هر افزایش اندازه‌ای به منظور صنعتی کردن واکنش‌های شیمیایی باید جواب سؤالات زیر را پیدا کنیم

✓ مدل باید چه مقدار کوچکتر از طرح اصلی باشد؟ و آیا یک مدل کفایت و یا به مدل‌های بیشتری نیاز می‌باشد؟

✓ چه موقع می‌توان ابعاد انجام واکنش را تغییر داد و به سراغ سایزهای مورد نظر رفت؟

✓ چه قوانینی بر سازگار کردن داده‌های حاصل از مدل با سایزهای بزرگ‌تر حاکم است؟

✓ آیا امکان رسیدن به شباهت کامل بین مدل و مقیاس صنعتی وجود دارد؟ و در غیر این صورت چه کاری باید انجام داد؟

امکان پاسخگویی به این سؤالات ارتباط مستقیمی با اصول بنیادی طراحی مدل‌ها دارد.

مقیاس‌های مطرح در طراحی فرآیندها

در انتخاب مقیاس مناسب برای طراحی، در قدم اول باید سعی نمود که نزدیکترین ظرفیت موجود به ظرفیت مد نظر بعنوان مبنای طراحی انتخاب شده و با اعمال کمترین تغییرات در پارامترها و مشخصات سامانه، به ظرفیت مدنظر رسید. هر چه ظرفیت موجود به ظرفیت مدنظر نزدیکتر باشد، میزان تغییرات اعمال شده در پارامترهای سامانه کاهش خواهد یافت و میزان خطای ناشی از تغییر ظرفیت کمتر خواهد بود. برای تمام فرآیندهای شناخته شده صنایع پتروشیمی، حداقل ظرفیت مجاز برای تضمین طراحی یک واحد صنعتی، واحد پیش‌تاز می‌باشد.

از دیدگاه کلی، برای توسعه یک فرآیند از مرحله کارهای آزمایشگاهی اولیه، مراحل زیر بایستی طی گردند:

- ✓ مقیاس تست‌های راکتور آزمایشگاهی کوچک
- ✓ مقیاس تست‌های راکتوری در ظرفیت آزمایشگاهی
- ✓ مقیاس تست‌های فرآیندی در ظرفیت واحد پيستاز^{۱۴}
- ✓ مقیاس تست‌های فرآیندی و بهینه‌سازی در مقیاس نیمه صنعتی نمایشی^{۱۵}
- ✓ مقیاس صنعتی

بسته به پیچیدگی فرآیند، در واکنش‌های صورت گرفته و سایر پدیده‌های مطرح، ضریب افزایش مقیاس و سطح پیچیدگی پارامترهای مورد بررسی در هریک از مراحل بالا متفاوت بوده و در بسیاری از موارد، مراحل ۲ و ۳ خود به چند ظرفیت دیگر تقسیم می‌شوند تا حداکثر شناخت نسبت به پارامترهای کمتر شناخته شده حاصل شود. ترکیبی از مدل تولید شده توسط اطلاعات واحد پيستاز و بهبود یافته توسط مقایسه آن با نتایج واحد صنعتی، مسیر مطمئنی برای تغییر مقیاس فرآیند خواهد بود.

¹⁴ Pilot Plant

¹⁵ Demonstration

فرآیندهای شیمیایی

بیانگر چگونگی تبدیل یک یا چند ماده به مواد دیگر است. این عمل می‌تواند بطور خودبخودی یا با تحمیل انرژی اضافه صورت پذیرد. از نظر صنعتی فرآیندهای شیمیایی دارای انواع زیر می‌باشند:

فرآیندهای همگن و ناهمگن، فرآیندهای دمای بالا و دمای پائین، فرآیندهای فشار بالا و فشار پائین، فرآیندهای کاتالیستی و غیرکاتالیستی

فرآیندهای همگن

فرآیندهای همگن یا هموژن که در محیط‌های یکنواخت رخ می‌دهند، در صنایع شیمیایی بسیار نادرند. آلودگی‌ها، ایجاد محیط بطور کامل یکنواخت را مشکل می‌سازند، چون تمام مواد ناخالصی‌های غیر هم فاز دارند. مواد اولیه کاربردی در صنایع شیمیایی، همواره ناخالصی دارند. این ناخالصی‌ها، در واکنشها تاثیر دارند و ممکن است به عنوان کاتالیزور یا عوامل بازدارنده عمل کنند. بنابراین فقط فرآیندهایی که در فاز گازی یا مایع رخ می‌دهند می‌توان بطورنسبی همگن به شمار آورد. به عبارت دیگر در عمل و در صنعت بنا به قرارداد ما سیستمی را هموژن می‌گوئیم که واکنشها بطور کامل در فاز گاز و یا مایع انجام گیرند. به عنوان یک قاعده کلی، سرعت واکنش در سیستم‌های همگن بیشتر از سیستم‌های ناهمگن است. حتی اگر سیستم ناهمگن مجهز به همزن قوی باشد، تعداد برخوردهای مولکولی بین مواد واکنشگر از دو مایع امتزاج ناپذیر، به مراتب کمتر از سیستم‌های همگن است. از طرفی، راه اندازی و کنترل سیستم‌های همگن ساده‌تر است. طراحی تجهیزات مورد استفاده برای این سیستم‌ها نیز ساده‌تر است. بنابراین در صنعت سعی بر این است که فرآیندها در صورت امکان در سیستم هموژن انجام شوند.

عمده ترین واکنش‌های سیستم همگن عبارتند از:

واکنش‌های تجمعی، واکنش‌های پلیمریزاسیون، واکنش‌های کراکینگ

واکنش تجمعی: عبارتست از ترکیب چند مولکول مشابه برای ایجاد مولکول‌های بزرگتر

واکنش پلیمریزاسیون: عبارتست از ترکیب تعداد زیادی از مولکول‌های یک منومر برای ایجاد یک مولکول بزرگ به نام پلیمر یا بسپار.

واکنش کراکینگ: شکستن مولکول‌های بزرگ به مولکول‌های کوچک، تحت شرایط مختلف (همانند صنعت نفت) می‌باشد که برای این شکسته شدن پیوند باید انرژی بیشتر از انرژی پیوندی مولکول به مواد داده شود، در نتیجه

این فرآیند بطور کامل گرماگیر است. در صنعت بطور معمول انرژی مورد نیاز این فرآیند با گرما دادن در فشار بالا صورت می گیرد (دمایی در حدود ۹۰۰-۷۰۰ درجه سانتی گراد و فشاری در حدود ۷ تا ۱۵ اتمسفر). در صنعتی به بزرگی صنعت نفت و پتروشیمی ایجاد کردن این شرایط در این ابعاد کاری بسیار پر هزینه است که این هزینه هم برای تامین انرژی و هم برای نگهداری تجهیزات است.

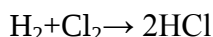
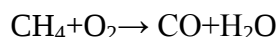
مهمترین فرآیندهای همگن عبارتند از:

فرآیندهای همگن فاز گازی

فرآیندهای همگن با توجه به خصوصیات مربوط به سادگی عملیات، کنترل و نیز هزینه کم آن به صورت وسیع در صنایع مرتبط با شیمی آلی به کار برده می شوند. در بعضی از فرآیندها مواد آلی به صورت بخار در می آید (تبخیر می شوند) و سپس با مواد گازی وارد واکنش می شوند.

مثل کلره کردن استیلن، سولفورده کردن و....

چند نمونه واکنش در سیستم همگن فاز گازی



فرآیندهای همگن فاز مایع

فرآیندهای گوناگونی در فاز مایع انجام می شود که تعدادی از آنها به قرار زیر است:

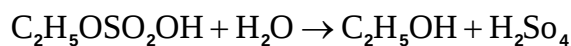
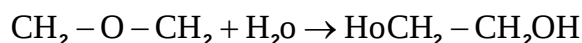
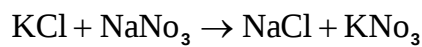
- واکنش های خنثی شدن محلول اسیدی به وسیله محلول قلیا که تولید نمک به حالت محلول می کند.

- تهیه اترهای مختلف از الکل ها

- ذوب قلیائی سولفوبنزن که تولید فنل می کند.

- هیدراتاسیون اکسید اتیلن که در فشار ۲۲ اتمسفر و دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد تولید اتیلن گلیکول می کند.

چند نمونه واکنش در سیستم همگن فاز مایع:



فرآیندهای ناهمگن

در این فرآیندها واکنش بین واکنش دهنده ها در فازهای مختلف انجام می گیرد و برای انجام واکنش باید مواد واکنشگر از یک فاز به فاز دیگر عبور کند که این کار مستلزم عبور مواد از فصل مشترک بین فازها می باشد. در مواردی که عبور مواد به همراه انجام واکنش است، این واکنش یا در داخل یکی از فازها و یا در سطح مشترک بین فازها انجام می گردد. بیشتر فرآیندهای صنعتی در این گروه جای می گیرند و به علت تنوع زیاد این سیستم ها کلاسه کردن آنها بسیار مشکل می باشد. بهترین روش دسته بندی این فرآیندها بر اساس حالت فیزیکی فازهای مواد واکنشگر است که در آن، فرآیندها به انواع فرآیندهای گاز - مایع (G-L)، مایع - جامد (L-S) و گاز - جامد (G-S) تقسیم می شوند. مکانیسم فرآیندهای ناهمگن بسیار پیچیده تر از فرآیندهای همگن است، چون برخورد بین واکنشگرها، در فازهای گوناگون شکل می گیرد. این کار مستلزم انتقال واکنشگرها تا مرز بین فازها در اثر پدیده انتقال جرم است. بنابراین سرعت این فرآیندها کمتر از سرعت فرآیندهای همگن است. در صنعت بسیاری از فرآیندها به همراه واکنش های شیمیایی نبوده بلکه همراه با پدیده های شیمی - فیزیکی می باشد، مانند حل کردن فیزیکی، استخراج بدون واکنش شیمیایی. مهمترین فرآیندهای ناهمگن عبارتند از:

۱) فرآیندهای ناهمگن گاز - مایع (G-L)

فرآیند گاز - مایع که در اکثر فرآیندهای صنعتی مهم وجود دارد مربوط به واکنش بین مواد مایع و گاز می باشد مانند فرآیند جذب گازها توسط مایعات و واجذب گازها از مایعات، تقطیر، فرآیند جذب (Absorption) و واجذب (Desorption) از فرآیندهای مهم در صنایع شیمیایی و پتروشیمی می باشد.

۲) فرآیندهای ناهمگن گاز - جامد (G-S)

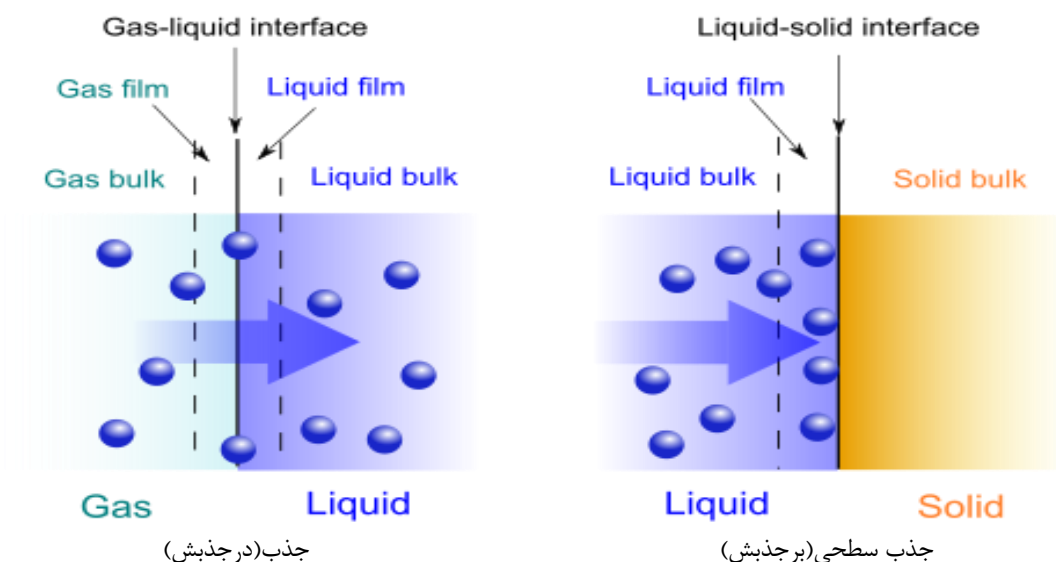
در میان فرآیندهایی که بیش از همه از واکنش های بین مواد جامد و گاز استفاده می کنند باید از فرآیند های جذب سطحی گازها بوسیله جامدات (مثل کربن فعال) نام برد. از انواع واکنش های این سیستم می توان به واکنش بین گازها در حضور یک کاتالیزور جامد، تصعید و تراکم بخار یک جسم جامد، انواع روشهای پخت مواد

جامد (مثل پخت سولفورها و تکلیس مواد جامد) اشاره کرد. گفتیم یکی از فرآیندهای مهم این بخش پدیده جذب سطحی است.

*** یک نکته حائز اهمیت است؛ آن هم تشخیص تفاوت بین جذب، جذب سطحی و

جذب^{۱۶}؛ فرآیندی شیمیایی و فیزیکی است که در طی آن یک ماده بر دیگری می‌چسبد. گونه‌های ویژه جذب در زیر آمده‌اند:

- بر جذبش^{۱۷} یا جذب سطحی؛ فرآیند جذب اتم‌ها یا مولکول‌های موجود در یک مایع یا گاز در تماس با یک سطح جامد است. این جذب به وسیله نیروهای چسبندگی و همدوسی روی می‌دهد.
- در جذبش^{۱۸}؛ فرآیندی فیزیکی یا شیمیایی است که طی آن اتم‌ها، مولکول‌ها یا یون‌ها در توده ماده اعم از گاز، مایع یا جامد جذب می‌شود.
- باز جذب^{۱۹} یا جذب عمقی؛ که جذب یک ماده به وسیله سلول زیستی است.



¹⁶ Sorption
¹⁷ Adsorption
¹⁸ Absorption
¹⁹ Resorption

۳) فرآیندهای ناهمگن مایع - جامد (L-S)

فرآیندهایی که در آنها مایع و جامد با هم وارد عمل می‌شوند و در صنعت دارای اهمیت خیلی زیادی هستند. که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- جذب سطحی یک ماده حل شده در یک مایع به وسیله یک جذب کننده جامد
- حل کردن مواد جامد در یک مایع و خارج کردن آن به صورت رسوب
- استخراج توسط حلال
- ذوب اجسام جامد و کریستال کردن
- پلیمریزاسیون (منومرهای مایع که تولید پلیمرهای جامد می‌کند)

۴) فرآیندهای ناهمگن جامد - جامد (S-S) و مایع - مایع (L-L)

در میان واکنش‌هایی که تنها در فاز جامد (S-S) صورت می‌گیرد باید از اجتماع مواد جامد در جریان عمل تکلیس آنها نام برد. یعنی پدیده‌ای که تحت آن، مواد جامد به حالت گرد یا پودر، در اثر حرارت، به حالت سخت و منفذدار در می‌آیند. با توجه به اینکه واکنش بین مواد جامد بسیار کند می‌باشد، از نظر صنعتی هیچ‌گونه اهمیتی ندارد به عبارت دیگر به دلیل کندی انتشار در فازهای جامد، در صنعت فرآیند جداسازی جامد- جامد حتی اگر کند انجام شود، موردی ندارد و از تجهیزات ویژه برای بالا بردن سرعت انجام واکنش استفاده می‌گردد. از میان فرآیندهای مایع - مایع (L-L) می‌توان به فرآیندهای استخراج، امولسیون و دزامولسیون اشاره کرد که در صنعت کاربرد بسیاری را دارا می‌باشند.

فرآیندهای کاتالیستی

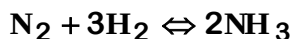
کاتالیست‌ها کلید توسعه صنایع شیمیایی و پتروشیمیایی می‌باشند. امروزه حدود ۹۰ درصد فرآیندهای شیمیایی، کاتالیستی هستند. تولید سولفوریک اسید، آمونیاک، روغن‌های خوراکی، هیدروکربن‌های آروماتیک، بوتادین، سیکلوهگزان، وینیل استات، استالدئید، استیک اسید، الکل‌ها، پلاستیک‌ها با فرآیندهای کاتالیستی می‌باشد. اُستوالد در سال ۱۹۰۰ کاتالیست را چنین تعریف می‌کند: «کاتالیست ماده‌ای است که سبب تغییر سرعت یک واکنش شیمیایی می‌شود، بدون آنکه در محصول حضور یابد» این تغییر سرعت بطور معمول مثبت است. با افزایش سرعت یک واکنش مشخص نسبت به واکنش‌های دیگر، می‌توان میزان محصول مورد نظر را نسبت به محصولات جانبی افزایش داد، که این خود بهترین فایده یک کاتالیزور است. کاتالیست‌ها بطور معمول از طریق ایجاد یک کمپلکس شیمیایی موقت از کاتالیزور و واکنش دهنده‌ها عمل می‌کنند. اولین کاربرد کاتالیست در فرآیندهای معدنی در نیمه اول قرن نوزدهم بود که به سرعت توسعه یافت و به کاربرد آن در فرآیندهای آلی و در نهایت فرآیندهای صنعتی منجر شد. امروزه تولید کاتالیستی هیدروکربن‌های سوختی مایع برای تولید انرژی، از مهم‌ترین کاربردهای صنعتی کاتالیست‌ها می‌باشد. جدول زیر تعدادی از واکنش‌های کاتالیستی را نشان می‌دهد

کاتالیست‌های رایج مورد استفاده	محصول نهایی	واکنش
پلاتینیم، وانادیم، اسید فریک، یون‌های آهن، مس، کبالت در محلول و...	سولفوریک اسید	$SO_2 \xrightarrow{O_2} SO_3$
مخلوط اکسیدهای منگنز، مس، کبالت	حذف Co از هوا و دیگر گازها	$Co \xrightarrow{O_2} Co_2$
نقره، پلاتین و پالادیم		
آلیاژ پلاتینیوم یا پالادیم، رودیم	نیتریک اسید	$NH_3 \xrightarrow{O_2} NO$
$CuCl_2, CrCl_3 (Cr_2O_3) -$	کلر	$HCl \xrightarrow{O_2} H_2O + Cl_2$
آلومینوسیلیکات‌های اصلاح شده با اکسید منیزیم	فرمالدئید	$CH_4 \xrightarrow{O_2} HCHO$
اسیدسولفوریک، اسیدفسفریک	اتیل الکل	$CH_2 = CH_2 + H_2O \xrightarrow{\text{هیدراسون}} C_2H_5OH$
آلومینوسیلیکات‌های آمورف	سوخت‌های موتور	$C_{20} - C_{15} \rightarrow C_6C_{12}$
ژئولیت‌های بلورین		

فرآیندهای دما و فشار بالا

استفاده از فناوری فشار و دمای بالا، در صنعت افزایش یافته است. بسیاری از مواد شیمیایی در فرآیندها با فشارهای بالا تولید می‌شود. نمونه‌هایی از این فرآیندها در صنایع فلز گذاری، سرامیک، پلیمر، آمونیاک و در تولید برق به وسیله توربین های بخار با فشار نزدیک به ۱۰۰ بار استفاده می‌شود. کاربرد فشار بالا در صنایع، نیاز به استفاده از ماشین ها با آلیاژهای ویژه دارد. در سیستم های فشار بالا بطور معمول واکنش در اثر فشار، بهتر و سریعتر بهره می دهد و بنابراین، از نظر اقتصادی با صرفه است. فایده فشار بالا را در سنتز گاز آمونیاک از واکنش گازهای هیدروژن و ازت می‌توان مشاهده کرد.

اول: افزایش فشار، سبب افزایش سرعت و بهره وری واکنش می‌شود.



دوم: افزایش فشار سبب کاهش حجم شده و در نتیجه اندازه‌ی ماشین‌ها به گونه‌ی شایان توجهی کاهش می‌یابد و برای نصب آنها فضای کمتری لازم است.

سوم: در اثر فشار، گازها متراکم شده و در نتیجه تبادل گرما با محیط پیرامون در مبدل های حرارتی، بهتر انجام می‌گیرد.

چهارم: در اثر تراکم گاز در فشار بالا، فاصله‌ی میان مولکولهای گازی کمتر شده و سرعت واکنش افزایش می‌یابد.

پنجم: در واکنش های کاتالیزوری به وسیله جامدات، با افزایش فشار، گازها بهتر جذب سطح کاتالیزور می‌شوند. به عبارت دیگر با افزایش فشار، چگالی گاز بیشتر شده و بنابراین، جذب سطحی در واحد سطح کاتالیزور نیز افزایش می یابد. از جمله فرآیندهایی که در دما و فشار بالا انجام می‌شوند می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

(۱) سنتز آمونیاک، فرآیند هابر- بوش (فشار ۲۰۰-۱۵۰ بار و دمای ۵۵۰ سانتی گراد)

(۲) سنتز متانول، فرآیند فیشر- تروپس (فشار ۳۰۰-۲۰۰ بار و دمای ۴۰۰ سانتی گراد)

(۳) بسپار شدن اتیلن، فرآیند جیبسون- میشل (فشار ۲۰۰۰ بار و دمای ۱۹۰ سانتی گراد)

(۴) سنتز الماس (فشار ۲۰۰-۱۵۰ کیلو بار)

کنترل در فرآیندهای شیمیایی

با توجه به محدود بودن دقت بشر در اندازه گیری کمیت های مختلف و کنترل آنها، استفاده از سیستم های کنترل کننده بطور تقریبی در اکثر صنایع معمول است و فواید زیر را دربردارد:

- افزایش کیفیت فرآورده ها و نگه داشتن آن در حد مطلوب
- صرفه جویی از نظر نیروی انسانی
- حذف خطرات احتمالی ناشی از تغییر ناگهانی کمیت ها (بالا بردن ایمنی سیستم)
- جلوگیری از ضایعات و خسارات اقتصادی

دما، فشار و سطح (یا ارتفاع) مایعات موجود در مخازن، سه کمیت مهم و مؤثر در فرآیندهای شیمیایی هستند که با نصب سیستم های کنترل کننده روی دستگاه های مختلف مورد نظر، مقدار آنها به طور اتوماتیک در محدوده مجاز کنترل می شود. کنترل نشدن کمیت های مذکور در واکنش های شیمیایی، اثرات جبران ناپذیری بر جای می گذارد.

منظور از کنترل فرآیند چیست

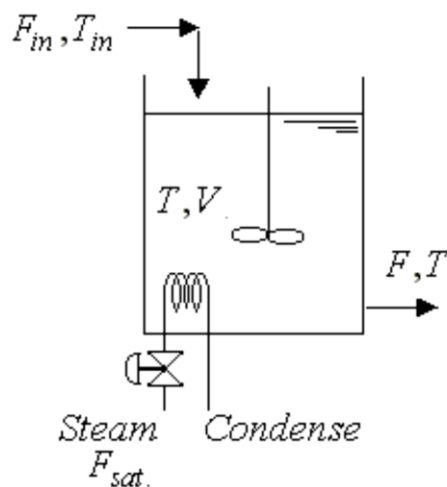
سه هدف کلان از به کارگیری سیستم کنترل فرآیند عبارتند از:

- عملکرد - محور: اجبار سیستم به باقی ماندن در مقادیر مقرر و/یا رگولاسیون،
- پایدار - محور: تضمین پایداری سیستم و جلوگیری از تغییر حالات و تعطیلی فرآیند،
- بهینه سازی: بهینه کردن عملکرد فرآیند با اعمال سیاست های کنترلی.

برای شرح نکات محوری بالا فرض کنید یک فرآیند شامل یک تانک پیش گرمکن برای یک راکتور شیمیایی در پایین دست داریم (شکل صفحه بعد). هدف کنترلی عبارتست از:

- دمای خروجی در یک حد مقرر باقی بماند
- دمای خروجی یک پروفیل دمایی را تعقیب کند
- سطح مایع در یک حد مقرر باقی بماند

متغیرهایی که می توانند به عنوان اغتشاش (کمیت های تاثیرگذار ولی ناخواسته) در نظر گرفته شوند، یکی T_{in} و دیگری F_{in} و یا حتی فشاربخار اشباع می باشند. در صورتی که T_{in} و F_{in} و یا حتی فشاربخار ثابت بمانند، یعنی سیستم در حالت یکنواخت بماند، دیگر نیازی به کنترل یا نظارت خودکار و یا حتی دستی توسط اپراتور نیست. بدیهی ست که در عمل اینطور نبوده و با کاهش و افزایش فشار، خط تولید و یا سایر آثار محیطی کمیت های مذکور مرتب عوض می شوند. بنابراین باید به نحوی کمیت های تاثیرپذیر را کنترل کنیم.



دیاگرام جریان یک فرآیند اختلاط

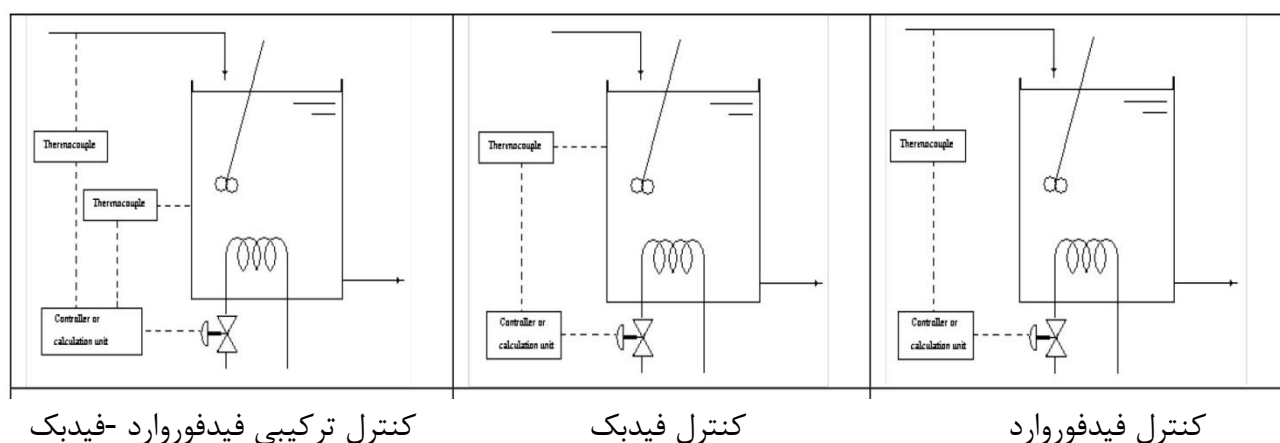
به هر حال نکته قابل توجه اینست که فارغ از پیاده‌سازی کنترل دستی یا خودکار باید دید چگونه T و V را که تحت تاثیر متغیرهای T_{in} و F_{in} یا فشار بخار اشباع عوض شده‌اند، می‌توان به طور واقعی و عملی مجبور به برگشتن به مقدار مقرر خودشان کرد. شاید اولین چیزی که به ذهن می‌رسد این باشد که با یک مخزن (مکانیسم دستی) یا یک جریان مجهز به شیر (مکانیسم خودکار و ماشینی) V را بطور مستقیم عوض کنیم ولی این کار برای متغیر T ممکن نیست. لذا نکات مهم در کنترل فرآیند عبارتند از؛

نکته اول؛ که مهم‌ترین نکته می‌باشد، تغییر هدفمند کمیت‌های موردنظر بطور غیرمستقیم می‌باشد.

نکته دوم؛ حضور ابزار دقیق امر مهمی است. برای کنترل دستی یا خودکار باید به نحوی بفهمیم که متغیر موردنظر آیا عوض شده است که نیازمند انفعال ما باشد یا خیر. لذا وجود نشانگرها و سنجشگرهای ارزانی مثل ترموکوپل‌ها برای اندازه‌گیری T یا عمق سنج‌ها برای اندازه‌گیری V برای دانستن بدون خطای کمیت‌های موردنظر ما (اعم از تاثیرگذار و تاثیرپذیر) الزامیست.

نکته سوم؛ که در راستای نکته اول است به این شرح است که، کدام متغیر تاثیرگذار مهندسی و ماکرو (مثل شدت جریان‌ها نه برای کشش سطحی سیال یا آنتروپی سیستم) را انتخاب کنیم تا وسیله تاثیرگذاری موثر و البته غیرمستقیم روی کمیت تاثیرپذیر مورد نظر ما باشد. برای مثال گزینه‌های مناسب عبارتند از شدت جریان ورودی F_{in} ، شدت جریان خروجی (F) و یا شدت جریان بخار اشباع. دقت شود که کمیت فیزیکی و ماکروی T_{in} نیز یک گزینه متغیر تاثیرگذار می‌باشد ولی تغییر دادن T_{in} از نظر عملی گران است (نیاز به دو شیر کنترل می‌باشد).

نکته چهارم؛ فلسفه و نحوه مقابله با تغییر کمیت‌های موردنظر می‌باشد. اگر بدانیم بطور معمول، منشا تغییر در کمیت تاثیرپذیر (همانند T) و یا تغییر در شدت جریان ورودی (F_{in}) است، آنگاه ممکن است بخواهیم با علت پیدایش آن‌ها مقابله کنیم. لذا، باید یک اندازه‌گیری روی اغتشاش (F_{in}) نیز داشته باشیم و متناسب با مقدار آن انفعال نشان دهیم یعنی متغیر تاثیرگذار (برای مثال شدت جریان) را عوض کنیم. این آرایش و منطق مقابله با اغتشاش موسوم به سیستم کنترل پیشخور یا فیدفوروارد (Feedforward) یا فعال می‌باشد. در طرف مقابل اگر بخواهیم با معلول مقابله کنیم، یعنی انفعالی برخورد کنیم، آنگاه فلسفه پسخور یا فیدبک (Feedback) را انتخاب کرده ایم. در این آرایش تنها المان اندازه‌گیری فقط شامل همان متغیر تاثیرپذیر می‌شود. این نوع مکانیسم کنترل رایج‌ترین نوع کنترل در فرایندها می‌باشد. در شکل زیر سه نمونه آرایش کنترلی خودکار نشان داده شده است. لازم به ذکر است به خاطر تمایز هرچه بیشتر، خطوط کنترلی یا سیگنال‌ها بطور تعمدی با خط چین نشان داده شده اند تا با جریان مواد یا حتی انرژی اشتباه نشوند.



فصل دوم - آشنایی با عملیات واحد

- واحد جذب و دفع گاز

- واحد تبخیر

- واحد تقطیر

- واحد استخراج

- واحد تبلور

- واحد رطوبت دهی / رطوبت زدایی

عملیات واحد^{۲۰}

علمی است که به بررسی فرآیندهای جداسازی مورد استفاده در صنایع شیمیایی می‌پردازد. عملیاتی همچون تقطیر، تبخیر، انواع روش‌های استخراج، تبلور و... در علم عملیات واحد به‌طور مفصل مورد بررسی قرار می‌گیرد. مفاهیم انتقال جرم، انتقال حرارت و ترمودینامیک، اساس مفاهیم و تئوری‌های عملیات واحد هستند. در هر صنعت شیمیایی به جز واکنش شیمیایی که نقش اصلی را داشته و ماهیت مواد را تغییر می‌دهد، بخش عمده‌ای از فعالیت‌ها به جداسازی و خالص‌سازی مواد اختصاص دارد. بطور معمول الزامی به انجام این اعمال همراه با واکنش شیمیایی نیست؛ زیرا واکنش تابع شرایط خاصی بوده و برای پیشرفت آن شرایط ویژه‌ای لازم است تا انجام واکنش را تسهیل بخشد. در این محیط‌ها شرایط ویژه عملیاتی دما، فشار و حضور کاتالیزور و... وجود دارد و لذا بهتر است فقط ترکیب شونده‌ها وارد این فضا گشته و ناخالصی‌ها پیشتر جدا گردیده باشند. پس از انجام واکنش نیز بخشی از مواد بصورت ترکیب نشده و بخشی بصورت محصولات جانبی حاصل می‌شوند که لازم است از محصولات اصلی جداسازی شوند. آشنایی با عملیات واحدهای صنعتی که با هدف خالص‌سازی و جداسازی مواد و مبتنی بر پدیده‌های انتقال (حرارت، جرم و مومنتوم) عمل می‌کنند، هدف این فصل می‌باشد.

عملیات انتقال جرم

بسیاری از عملیات مهندسی شیمی با مسئله تغییر غلظت در محلول‌ها و مخلوط‌ها سروکار دارند که این تغییرات، بطور الزامی توسط واکنش‌های شیمیایی صورت نمی‌پذیرند. چنانچه این عملیات باعث بوجود آمدن تغییراتی در ترکیب مخلوط‌ها شود آنها را عملیات انتقال جرم می‌نامند. عملیات انتقال جرم به وسیله انتقال یک ماده به داخل ماده دیگر در مقیاس مولکولی مشخص می‌شود. برای مثال، وقتی آب از درون یک استخر به درون جریان هوایی که بر روی سطح آب در حرکت است، تبخیر می‌گردد، مولکول‌های بخار آب از میان مولکول‌های هوای روی سطح به درون توده هوا نفوذ کرده و از آنجا به بیرون برده می‌شوند. علت انتقال جرم بین دو نقطه گرادیان غلظت (تغییر غلظت) است. که ماده نفوذ کننده از محل با غلظت بیشتر به محلی که دارای غلظت کمتری منتقل می‌شود.

²⁰ Unit operation

پیش از بیان هر نکته‌ای ابتدا به شرح مختصری پیرامون فاز و انتقال فازي پرداخته می‌شود. هر فاز یک محیط همگن و متمایز از یک سیستم است که در آن هیچ مرز قابل مشاهده‌ای که موجب جدایش شده باشد وجود ندارد. اجسام در سه فاز متعارف گاز مایع و جامد به سر می‌برند، هر فاز می‌تواند، محتوی ترکیبی همگون بصورت خالص یا شامل چند سازنده باشد. تغییر حالت هر ماده بعلت تاثیر دما یا فشار یا انجام واکنش بعنوان یک انتقال فازي شناخته می‌شود. انتقال‌های فازي در ادامه نام برده شده‌اند؛

تصعید		ترسیب	
جامد	←	گاز	←
ذوب		انجماد	
جامد	←	مایع	←
میعان		تبخیر	
گاز	←	مایع	←
		گاز	

بخش عمده‌ای از عملیات جداسازی سازنده‌ها بر مبنای انتقال جرم از یک فاز به فاز دیگر است. دستگاه‌های تماس‌دهنده دو فاز براساس جریان فازها و تداوم آنها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

الف) در تماس ناپیوسته^{۲۱}؛ فازها به مقدار معین درون سامانه وارد و تماس بین آنها برقرار می‌شود. در این حال ابتدا ترکیب فازها با شرایط تعادل فاصله داشته و به تدریج به حالت تعادل نزدیک می‌شوند. در نتیجه غلظت‌های هر فاز با زمان تغییر می‌کند. درحین جداسازی نه جریانی به دستگاه وارد و نه از آن خارج می‌شود.

ب) در تماس پیوسته^{۲۲}؛ جریان‌های مداوم و ثابت فازها با غلظت مشخص و ثابت به درون سامانه وارد و به سمت خروج حرکت می‌کنند و لذا در هر نقطه از حرکتشان در طول سامانه غلظت هر فاز ثابت باقی می‌ماند. دارای دو تماس جزئی و مرحله‌ای می‌باشد. در تماس جزئی فازها تغییرات تدریجی غلظت فازها در طول به نسبت زیادی از سامانه بین نقاط ورودی و خروجی انجام می‌شود. اما در تماس مرحله‌ای تماس بین فازها در یک مقطع (مرحله) از سامانه یا در یک دستگاه مجزا برقرار و سپس جدایش بین فازها انجام و مجدداً این تماس در مقطع (دستگاه) بعدی برقرار می‌شود. بنابراین در فاصله بین دو مرحله هیچ انتقال جرمی انجام نمی‌شود.

²¹ unsteady-state

²² steady-state

سرعت انتقال جرم در هر موقعیت متناسب با نیروی محرکه می‌باشد، که میزان دوری غلظت جسم منتقل شونده در دو فاز از شرایط تعادل است. با رسیدن به شرایط تعادل بعنوان یک حالت جدید، انتقال جرم خالص بین فازها متوقف می‌شود. در رابطه با شرایط تعادل نکات زیر قابل ذکر است:

- انتقال جرم همواره در جهت نزدیک شدن به تعادل بین فازها پیش می‌رود
- همیشه در فصل مشترک بین دو فاز غلظت‌های تعادلی در نظر گرفته می‌شود. بدین صورت که با وجود غلظت‌های متفاوت در توده سیالات فرض می‌شود غلظت‌ها در ناحیه فصل مشترک منطبق بدر شرایط تعادلی باشند
- فصل مشترک بین دو فاز بعنوان یک صفحه با ضخامت صفر در نظر گرفته می‌شود که فاقد مقاومت در مقابل انتقال جرم است.

تقسیم‌بندی عملیات انتقال جرم

بطور کلی عملیات انتقال جرم را با توجه به نحوه تماس و قابلیت امتزاج‌پذیری دو فاز می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی نمود.

- تماس مستقیم دو فاز غیرقابل امتزاج
- تماس مستقیم بین دو فاز قابل امتزاج
- تماس غیر مستقیم دو فاز که توسط غشاء از یکدیگر جدا شده‌اند

تماس مستقیم دو فاز غیرقابل امتزاج

تماس دو فاز غیرقابل امتزاج مهم‌ترین و عمده‌ترین بخش از سه مجموعه تقسیم‌بندی فوق را شامل می‌شود هر یک از فازهای در حال تماس با یکدیگر می‌تواند شامل یک یا چند جزء باشد. پس از انجام انتقال جرم و رسیدن به تعادل، اجزاء تشکیل دهنده فازها دارای غلظت‌های متفاوتی در دو فاز خواهد بود. برای مثال تماس دو فاز آب و تولوئن را در نظر بگیرید. در نقطه تعادلی (که انتقال جرمی صورت نمی‌گیرد) غلظت تولوئن در دو فاز یکی نیست. کلیه سیستم‌های دو فاز در مقوله انتقال جرم قرار نمی‌گیرند. به عنوان مثال محلول نمکی را در نظر بگیرید که در حال تعادل با بخار آب می‌باشد؛ این بخارات حاوی نمک نیست و به هر حال با آنکه یک فاز خالص است اما انتقال جرم از فازي که حاوی نمک است به فاز دیگر (گاز) صورت نمی‌گیرد.

نفوذ مولکولی در سیالات

نفوذ مولکولی در اثر حرکت مولکول‌های یک جسم و به علت وجود انرژی حرارتی انجام می‌پذیرد با مطالعه تئوری جنبشی گازها می‌توان به چگونگی نفوذ مولکولی پی برد. در این تئوری فرض بر این است که هر مولکول در مسیر مستقیم و با سرعت ثابت حرکت نموده و پس از طی مسافتی به مولکول دیگر برخورد می‌کند و لذا جهت و سرعت حرکت آن تغییر می‌کند. مقدار مسافتی که یک مولکول طی می‌کند تا با مولکول دیگر برخورد نماید مسیر آزاد متوسط مولکول نامیده می‌شود. بدیهی است که سرعت متوسط حرکت مولکول بستگی به درجه حرارت خواهد داشت. بدلیل برخوردهای متعدد، مولکول یک مسیر پر پیچ و خم طی می‌کند. مسافت خالصی را که مولکول در زمان معین و در جهت معین طی می‌نماید، شدت نفوذ آن می‌نامند. البته این مسافت فقط جزئی از کل مسیر واقعی طی شده توسط مولکول می‌باشد، لذا نتیجه می‌گیریم که نفوذ مولکولی پدیده بسیار کندی است. البته با کاهش فشار که سبب کاهش تعداد برخوردها می‌شود و افزایش درجه حرارت که سرعت مولکولی را زیادتر می‌کند، می‌توان سرعت عمل را افزایش داد. همین مسئله در مورد مایعات نیز صدق می‌کند، با این تفاوت که به علت تراکم بیشتر محیط‌های مایع شدت نفوذ در مایعات حتی از گازها نیز خیلی کمتر است. پدیده نفوذ مولکولی در نهایت منجر به یکنواخت شدن غلظت مواد در سرتاسر یک مخلوط می‌گردد.

برای مثال اگر قرص پرمگنات پتاسیم را در یک ظرف آب قرار دهیم، پرمگنات پتاسیم در آب حل می‌شود و لایه غلیظی اطراف قرص پرمگنات را فرا می‌گیرد (لایه غلیظ ارغوانی). بعد از مدتی رنگ ارغوانی سرتاسر مایع را فرا می‌گیرد، یعنی بعد از مدتی عمل انتقال جرم باعث می‌شود تمام آب رنگی شود؛ این رنگی شدن نشان دهنده عمل انتقال جرم است.

تفاوت بین نفوذ مولکولی و مخلوط کردن

مخزنی به قطر $1/5$ متر را در نظر بگیرید که آب نمک به عمق 75% متر در آن ریخته شده است. تصور کنید که لایه ای از آب به ضخامت 75% متر بر روی لایه آب نمک قرار گیرد بدون آنکه آنرا بهم بریزد. حال اگر محتویات مخزن را برای مدتی به شکل ساکن در کنار هم قرار دهیم، نمک بتدریج و از طریق نفوذ مولکولی به درون آب نفوذ کرده و در انتها غلظت آن به نصف مقدار اولیه کاهش می‌یابد. این فرآیند بسیار کند بوده و با محاسبه معلوم می‌شود که غلظت نمک در سطح فوقانی پس از ده سال به $87/5\%$ درصد مقدار نهائی و پس از ۲۸ سال به ۹۹ درصد مقدار نهائی خود خواهد رسید. از طرف دیگر با قراردادن یک هم زن پره ای با سرعتی برابر ۲۲ دور در دقیقه در مدت ۶۰ ثانیه می‌توان غلظت نمک را در تمام نقاط مخزن بصورت یکسان درآورد. عمل هم‌زدن مکانیکی سبب می‌شود که بجای مولکول‌ها گردانه‌ها (چرخانه‌ها) (eddy) با حرکت سریع خود به صورت نامنظم

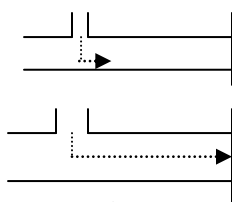
جرم را منتقل نمایند. این روش انتقال جزء حل شده بنام نفوذ متلاطم و یا گردانه ای (چرخانه ای) نامیده می شود. بنابراین نتیجه می شود که مکانیسم انتقال جرم در سیالات ساکن و یا سیالاتی که جریان آرام دارند از طریق نفوذ مولکولی و در جریانهای متلاطم به طریق گردانه ای (چرخانه ای) است. پیشتر ذکر گردید که هر گاه در مخلوطی، غلظت سازنده ها یکنواخت نباشد، نفوذ مولکولی باعث رساندن آن به وضع یکنواخت خواهد شد و مواد از محلی که دارای غلظت بالاتری است به مکانی که غلظت آن کمتر است حرکت خواهند نمود. شدت نفوذ مولکولی را بر حسب flux یا شار مولی یعنی $\frac{\text{mole}}{\text{Area.time}}$ نشان می دهند. ما همواره به دنبال محاسبه سرعت انتقال جرم هستیم که از فلاکس استفاده می کنیم به عبارت دیگر:

$$\text{flux} \cdot \text{Area} = \text{Rate} \quad \frac{\text{mole}}{\text{Area.time}} = \text{flux} \Rightarrow \text{flux} \cdot \text{area} = \frac{\text{mol}}{\text{time}} = \text{Rate}$$

سرعت نفوذی

برای روشن شدن این مطلب مثالی می زنیم. قطاری که در حال حرکت است و فردی داخل آن نشسته برای ناظری که در بیرون ایستاده سرعت کل برابر است با حاصل جمع سرعت فرد و سرعت قطار (چون فرد هم در جهت حرکت مساعی دارد) پس وقتی یک محلول که شامل یک جزء می باشد دارای حرکت باشد سرعت کل برابر است با سرعت جزء + سرعت محلول

مثال: یک لوله محتوی آب داریم (۱) یک ماده رنگی را در لوله وارد می کنیم.



(۱)

مایع ساکن است. ملاحظه می کنیم ماده رنگی از ابتدای لوله شروع به پخش شدن می کند تا اینکه به انتهای لوله برسد. اگر همین عمل (وارد کردن ماده رنگی) را برای یک مایع که دارای حرکت است انجام دهیم شدت پخش رنگ بیشتر می شود که این ناشی از دو چیز است؛

○ سرعت سیال

○ حالت نفوذ رنگ نسبت به سیال

بنابراین ما دو نوع شار داریم:

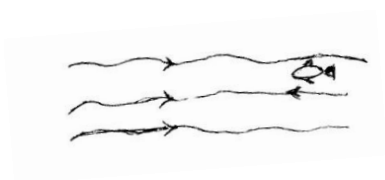
(۱) شار نسبت به محل مشخصی از فضا که آن را با N نمایش می‌دهیم و برابر است با:

$$N_A = C_A V_A$$

(۲) شار یک سازنده مثل A نسبت به سرعت مولی متوسط کلیه سازنده‌های دیگر که آن را با J نمایش می‌دهیم و برابر است با:

$$J_A = N_A - x_A(N_A + N_B) \quad \text{یا} \quad N_A = N x_A + J_A$$

مثال: ماهیگیر



برای یک ماهیگیر سرعت حرکت ماهی در خلاف جهت جریان آب نسبت به قلاب ماهیگیری (معادل N) حائز اهمیت است. ولی سرعت ماهی نسبت به جریان آب (معادل J) مشخصه‌ای است از قدرت شناگری ماهی.

محاسبه شار مولی

شار مولی یک سازنده مثل جزء A در مخلوط B که شاخصی از قدرت نفوذ است بر طبق قانون اول فیک (Fick) در جهت Z چنین نوشته می‌شود: $J_A = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial Z} = -C D_{AB} \frac{\partial X_A}{\partial Z}$ علامت منفی مشخص کننده آن است که نفوذ در جهتی که غلظت کاهش می‌یابد انجام می‌شود.

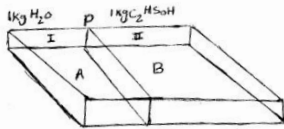
قانون اول فیک به صورت‌های زیر نوشته می‌شود:

$$J_A = -D_{AB} \nabla (C_T X_A) \quad J_A = -C D_{AB} \nabla X_A$$

$$J_A = -D_{AB} \nabla C_A = -D_{AB} \left(\frac{\partial C_A}{\partial X} + \frac{\partial C_A}{\partial y} + \frac{\partial C_A}{\partial Z} \right)$$

ملاحظه کردیم که در رابطه فیک بجای dC_A نوشتیم $C dX_A$ علت به قرار زیر است:

$$\frac{C_A}{C_T} = X_A \rightarrow d \frac{C_A}{C_T} = dX_A \rightarrow dC_A = C_T dX_A$$



به جعبه مقابل توجه کنید. این سیستم توسط صفحه P به دو قسمت تقسیم شده است در بخش I یک کیلوگرم آب (A) و در بخش II یک کیلوگرم اتانل (B) قرار دارد. حال فرض کنید که صفحه میانی (P) را با دقت و آرامی برداریم، نفوذ دو مایع در یکدیگر انجام خواهد شد. آب به سمت راست و اتانل به سمت چپ نفوذ خواهند نمود. پس از پایان عمل نفوذ، غلظت سازنده‌ها در هر قسمت مساوی گردیده و برابر ۵۰ درصد جرمی هر یک خواهد شد. در صورتی که سمت راست را جهت مثبت فرض می کنیم شار N_A نسبت به محل ثابت P مثبت بوده و شار N_B نسبت به P منفی خواهد شد.

برای حالت پایا، شار خالص هست:

$$N_A + N_B = N$$

حرکت A ناشی از دو حرکت است، یکی حرکت توده N و جزء X_A مربوط به N و دیگری شار نفوذی J_A

پس داریم:

$$N_A = NX_A + J_A \quad X_A = \frac{C_A}{C} \quad J_A = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial Z}$$

$$N_A = (N_A + N_B) \frac{C_A}{C} - D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial Z}$$

$$\Rightarrow N_A - \frac{C_A}{C} (N_A + N_B) = -D_{AB} \frac{dC_A}{dZ}$$

$$\Rightarrow -D_{AB} \frac{dC_A}{dZ} = \frac{CN_A - C_A(N_A + N_B)}{C}$$

$$\Rightarrow \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{dZ}{CD_{AB}} = \int_{C_{A1}}^{C_{A2}} \frac{dC_A}{CN_A - C_A(N_A + N_B)} \Rightarrow$$

$$\frac{Z}{CD_{AB}} = \ln \frac{CN_A - C_{A2}(N_A + N_B)}{CN_A - C_{A1}(N_A + N_B)} \cdot \frac{1}{N_A + N_B}$$

$$\Rightarrow N_A = \frac{CD_{AB}}{Z} \frac{N_A}{N_A + N_B} \ln \frac{\frac{N_A}{N_A + N_B} - \frac{C_{A2}}{C}}{\frac{N_A}{N_A + N_B} - \frac{C_{A1}}{C}}$$

این رابطه فرمول کلی جهت محاسبه فلاکس است. که Z طول مسیری است که انتقال جرم در آن اتفاق می افتد. وقتی قانون گازهای کامل صادق باشد آنگاه فرمول فلاکس را به صورت ساده تری می توان نوشت زیرا:

$$\frac{C_A}{C} = \frac{\bar{P}_A}{P_t} = y_A, \quad C = \frac{n}{v} = \frac{P_t}{RT}$$

پس فرمول فلاکس خواهد شد:

$$N_A = \frac{N_A}{N_A + N_B} \cdot \frac{CD_{AB}}{Z} \ln \frac{\frac{N_A}{N_A + N_B} - y_{A2}}{\frac{N_A}{N_A + N_B} - y_{A1}}$$

از معادله کلی فلاکس زمان می توانیم استفاده کنیم که رابطه بین N_A و N_B معلوم باشد. این نسبت با توجه به سیستم مورد نظر تعیین می گردد که در این رابطه با دو حالت خواهیم داشت:

(۱) نفوذ در سیال ساکن (یا نفوذ یکطرفه)

چون نفوذ یکطرفه است (طرف دیگری ساکن است) پس شار آن طرف صفر می شود یعنی

$$\frac{N_A}{N_A + N_B} = 1 \quad \leftarrow N_B = 0$$

(۲) نفوذ دو طرفه (در خلاف جهت یکدیگر)

چون نفوذ دو طرفه است پس خواهیم داشت:

$$N_A + N_B = 0, \quad N_A = -N_B$$

نکته: در مواقعی که واکنش شیمیایی داشته باشیم رابطه بین N_A و N_B با عنایت به استوکیومتری واکنش تعیین می شود.

برای مثال: گاز کاتالیزور B گاز C + $2A \rightarrow$

$$N_A = -2N_B \rightarrow N_B = -1/2 N_A$$

$$N_A + N_B = N_A - 1/2 N_A = \frac{N_A}{2}$$

منفی به خاطر جهت های مخالف است .

ضریب نفوذ در گازها

ضریب نفوذ در گازها اکثریت در جداول موجود می باشد برای مثال ضریب نفوذ CH_4 در H_2 در هست،
 $D_{\text{H}_2-\text{CH}_4} = 6.25 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ در مواردی که نتایج تجربی در دسترس نباشد، می توان از روابطی که بر
 اساس تئوری جنبشی گازها بدست آمده اند استفاده نمود.

یکی از این روابط، رابطه Wilke-Lee است به شرح زیر:

$$D_{AB} = \frac{10^{-4} (1/084 - 0/249 \sqrt{1/MA + 1/MB}) T^{3/2} \sqrt{1/MA + 1/MB}}{P_t (r_{AB})^2 f(KT/\epsilon_{AB})}$$

$$D_{AB} = \text{ضریب نفوذ بر حسب } \text{m}^2/\text{s}$$

$$T = \text{درجه حرارت مطلق } ^\circ\text{K}$$

$$M_A, M_B = \text{جرم های مولکولی اجسام A و B بر حسب kg/Kmol}$$

$$P_t = \text{فشار مطلق بر حسب } \text{N}/\text{m}^2$$

$$r_{AB} = \text{فاصله بین دو مولکول A و B در حالت برخورد } (r_A + r_B)/2 \text{ بر حسب nm}$$

$$\epsilon_{AB} = \text{انرژی جاذبه مولکولی} = \sqrt{\epsilon_A \epsilon_B}$$

$K = \text{ثابت بولتزمن}$ $f(KT/\epsilon_{AB})$ تابع برخورد که با استفاده از نمودار تابع برخورد مولکولی در نفوذ گازها بدست
 می آید.

گفتیم در حالت نفوذ در سیال ساکن داریم:

$$\frac{N_A}{N_A + N_B} = 1$$

$$N_A = \frac{CD_{AB}}{Z} \ln \frac{1 - yA_2}{1 - yA_1}$$

لذا فرمول عمومی فلاکس می شود:

می‌دانیم:

$$\Sigma y = 1 \Rightarrow y_A + y_B = 1 \Rightarrow 1 - y_{A2} = y_{B2}$$

$$\Rightarrow N_A = \frac{CD_{AB}}{Z} \ln \frac{y_{B2}}{y_{B1}}$$

از طرفی:

$$y_{B2} = \frac{P_{B2}}{P_t} \quad \text{و} \quad y_{B1} = \frac{P_{B1}}{P_t}$$

$$\Rightarrow N_A = \frac{CD_{AB}}{Z} \ln \frac{P_{B2}}{P_{B1}}$$

$$\Rightarrow N_A = \frac{D_{AB} \cdot P_t}{RTZ \bar{P}_{B,M}} (\bar{P}_{A1} - \bar{P}_{A2}) \quad \bar{P}_{B,M} = \log \text{ mean pressure}$$

$$\bar{P}_{B,M} = \frac{\bar{P}_{B2} - \bar{P}_{B1}}{\ln\left(\frac{\bar{P}_{B2}}{\bar{P}_{B1}}\right)}$$

پیشتر مشاهده کردید فلاکس انتقال جرم از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$N_A = \frac{N_A}{N_A + N_B} \frac{D_{AB} C}{Z} \ln \frac{N_A / (N_A + N_B) - C_{A2} / C}{N_A / (N_A + N_B) - C_{A1} / C}$$

همچنین گفتیم که اگر قانون گازهای کامل صادق باشد آنگاه: $C = \frac{P_t}{RT}$ که در اینصورت معادله فلاکس انتقال

جرم خواهد شد:

$$N_A = \frac{N_A}{N_A + N_B} \frac{D_{AB} P_t}{RTZ} \ln \frac{\frac{N_A}{N_A + N_B} - \frac{\bar{P}_{A2}}{P_t}}{\frac{N_A}{N_A + N_B} - \frac{\bar{P}_{A1}}{P_t}}$$

$$\Rightarrow N_A = \frac{N_A}{N_A + N_B} \frac{D_{AB} P_t}{RTZ} \ln \frac{N_A / (N_A + N_B) - \bar{P}_{A2} / P_t}{N_A / (N_A + N_B) - \bar{P}_{A2} / P_t}$$

$$\Rightarrow N_A = \frac{N_A}{N_A + N_B} \frac{D_{AB} P_t}{RTZ} \ln \frac{[N_A / (N_A + N_B)] P_t - \bar{P}_{A2}}{[N_A / (N_A + N_B)] P_t - \bar{P}_{A1}}$$

اشاره شد در صورتیکه نفوذ در سیال ساکن صورت بگیرد آنگاه: $\frac{N_A}{N_A + N_B} = 1$ خواهد شد.

پس معادله چنین می شود:

$$N_A = \frac{D_{AB} P_t}{RTZ} \ln \frac{P_t - \bar{P}_{A2}}{P_t - \bar{P}_{A1}} \quad *$$

چون: $P_A + P_B = P_t$ پس روابط زیر برقرار است:

$$P_t - \bar{P}_{A2} = \bar{P}_{B2} \quad , \quad P_t - \bar{P}_{A1} = \bar{P}_{B1}$$

$$P_t = \bar{P}_{B2} + \bar{P}_{A2} \quad , \quad P_t = \bar{P}_{B1} + \bar{P}_{A1} \Rightarrow \begin{cases} P_t = \bar{P}_{B2} + \bar{P}_{A2} \\ P_t = \bar{P}_{B1} + \bar{P}_{A1} \end{cases}$$

$$\bar{P}_{B2} + \bar{P}_{A2} = \bar{P}_{B1} + \bar{P}_{A1} \rightarrow \bar{P}_{B2} - \bar{P}_{B1} = \bar{P}_{A1} - \bar{P}_{A2} \Rightarrow \frac{\bar{P}_{A1} - \bar{P}_{A2}}{\bar{P}_{B2} - \bar{P}_{B1}} = 1 \quad **$$

رابطه* را می توانیم چنین بنویسیم:

$$N_A = \frac{D_{AB} P_t}{RTZ} \ln \frac{\bar{P}_{B2}}{\bar{P}_{B1}}$$

برای مرتب کردن رابطه* به شکل لگاریتمی، رابطه** را در آن وارد می کنیم.

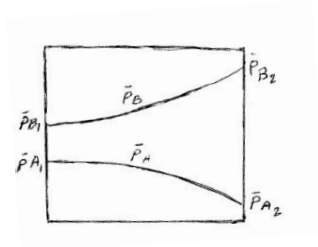
$$N_A = \frac{D_{AB} P_t}{RTZ} \frac{\bar{P}_{A1} - \bar{P}_{A2}}{\bar{P}_{B2} - \bar{P}_{B1}} \ln \frac{\bar{P}_{B2}}{\bar{P}_{B1}}$$

$$\frac{\bar{P}_{B2} - \bar{P}_{B1}}{\ln(\frac{\bar{P}_{B2}}{\bar{P}_{B1}})} = \bar{P}_{B,M} \quad \text{متوسط لگاریتمی اختلاف فشار}$$

با جاگذاری در رابطه فلاكس خواهیم داشت:

$$N_A = \frac{D_{AB} P_t}{RTZ \bar{P}_{B,M}} (\bar{P}_{A1} - \bar{P}_{A2})$$

نمودار این معادله به شكل زیر است.



در نفوذ متقابل با شار مولی مساوی در حالت پایا شدت نفوذ از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$N_A = \frac{D_{AB}}{RTZ} (\bar{P}_{A1} - \bar{P}_{A2})$$

مثال ۱: اکسیژن تحت شرایط پایا درون منواکسید کربن ساکن نفوذ می کند. فشار کل $1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ و درجه حرارت 0°C است. در صورتیکه در دو صفحه به فاصله دو میلیمتر از یکدیگر فشار جزئی اکسیژن به ترتیب 13000 و 6500 N/m^2 باشد، شدت نفوذ اکسیژن را بر حسب kmol/s به ازاء هر متر مربع از صفحات بدست آورید.

ضریب نفوذ این مخلوط $1/87 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ است.

حل: داده های مسئله عبارتند از:

$$D_{AB} = 1/87 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$P_t = 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$z = 0002 \text{ m} \quad \bar{P}_{A1} = 13 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

$$R = 8314 \text{ N.m/kmol} \quad \bar{P}_{B1} = 10^5 - 13 \times 10^3 = 87 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

$$T = 273^\circ \text{ K} \quad \bar{P}_{A2} = 6500 \text{ N/m}^2 = \bar{P}_{B2} = 10^5 - 6500 = 93.5 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

چون نفوذ در حالت پایا در سیال ساکن صورت می گیرد لذا شدت نفوذ از رابطه زیر بدست می آید.

$$N_A = \frac{D_{AB} P_t}{RTz \bar{P}_{B,M}} (\bar{P}_{A1} - \bar{P}_{A2})$$

$$\bar{P}_{B,M} = \frac{\bar{P}_{B1} - \bar{P}_{B2}}{\ln(\frac{\bar{P}_{B1}}{\bar{P}_{B2}})} = \frac{(87 - 93/5)10^3}{\ln(\frac{87}{93/5})} = 90200 \text{ N/m}^2$$

$$\Rightarrow N_A = \frac{(1.87 \times 10^{-5})(10^5)(13 - 6.5)(10^3)}{8314(273)(0002)(9002 \times 10^3)} \Rightarrow N_A = 2.97 \times 10^{-5} \text{ kmol/m}^2.\text{s}$$

مثال ۲: ضریب نفوذ بخارات اتانل (A) C_2H_5OH را درون هوا (B) در فشار یک جو و صفر درجه سلسیوس بدست آورید.

حل:

$$T = 273K, p_t = 101.3kN/m^2, M_A = 46.07, M_B = 29$$

با استفاده از جدول برای هوا $\epsilon_B / K = 78.6, r_B = 0.3711nm$ مقادیر مربوط به اتانل را می توان با استفاده از معادلات مربوطه تخمین زد.

با استفاده از جدول

$$v_A = 2(0.0148) + 6(0.0037) + 0.0074 = 0.0592,$$

$$r_A = 1.18(0.0592)^{2/3} = 0.46nm$$

بنابراین

$$T_{b,A} = 351/4K$$

$$\epsilon_A / K = 1.21(351/4) = 425$$

$$r_{AB} = \frac{0.46 + 0.3711}{2} = 0.416 \quad \frac{\epsilon_{AB}}{k} = \sqrt{425(78.6)} = 17.07$$

$$\frac{kT}{\epsilon_{AB}} = \frac{273}{17.07} = 1.599$$

از شکل تابع برخورد مولکولی در نفوذ گازها

$$f\left(\frac{kT}{\epsilon_{AB}}\right) = 0.595 \quad \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} = 0.237$$

لذا:

$$D_{AB} = \frac{10^{-4} [1.084 - 0.249(0.237)] (273^{3/2}) (0.237)}{(101.3 \times 10^3) (0.416)^2 (0.595)} \\ = 1.05 \times 10^{-5} m^2 / s$$

مثال ۳: در یک مخلوط گازی اکسیژن-ازت که در فشار یک اتمسفر و درجه حرارت 25°C قرار دارد، در دو صفحه به فاصله از 2mm یکدیگر غلظت اکسیژن برابر 10 و 20 درصد حجمی می باشد، تعیین کنید شار نفوذ اکسیژن را برای حالت زیر:

الف) در صورتیکه ازت نفوذ نکند

ب) در صورتی که نفوذ متقابل دو سازنده گاز انجام می گیرد.

چون ضریب نفوذ را به ما نداده پس باید آن را از فرمول تجربی پیدا کرده و سپس شدت نفوذ را محاسبه کنیم.

$$T = 25$$

$$P = 1\text{atm}$$

$$z = 0.2\text{cm}$$

$$y_{A1} = 0.2$$

و یا از جداول مربوطه ضریب نفوذ را می خوانیم.

$$y_{A2} = 0.1$$

$$M_A = 32$$

$$M_B = 28 \quad D_{O_2-N_2} = 0.181 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$R = 82.06 \frac{\text{cm}^3 \cdot \text{atm}}{\text{gmol} \cdot ^{\circ}\text{K}}$$

گفتیم فرمول کلی فلاکس هست:

$$N_A = \frac{CD_{AB}}{Z} \frac{N_A}{N_A + N_B} \ln \frac{\frac{N_A}{N_A + N_B} - \frac{C_{AZ}}{C}}{\frac{N_A}{N_A + N_B} - \frac{C_{A1}}{C}}$$

در قسمت الف گفته ازت نفوذ نمی کند پس نفوذ یکطرفه است یعنی $N_B = 0$ لذا خواهیم

داشت:

$$N_A = \frac{D_{AB} P_t}{RTZ \bar{P}_{B,M}} (\bar{P}_{A1} - \bar{P}_{A2}) \quad \bar{P}_{B,M} = \frac{P_{B2} - P_{B1}}{\ln \frac{P_{B2}}{P_{B1}}}$$

$$\frac{P_{A1}}{P_t} = y_{A1} \rightarrow P_{A1} = P_t * y_{A1} = 0.2 \quad \frac{P_{A2}}{P_t} = y_{A2} \rightarrow P_{A2} = P_t - y_{A2} = 0.1$$

$$P_{B2} = 1 - P_{A2} = 0.9 \quad P_{B1} = 1 - P_{A1} = 0.8 \rightarrow P_{B,M} = \frac{0.9 - 0.8}{\ln \frac{0.9}{0.8}} = 0.849$$

با جاگذاری فلاکس محاسبه خواهد شد یعنی:

$$N_A = \frac{1 \text{ cot} * 0.181 \text{ cm}^2 / \text{s}}{0.2 \text{ cm} * 82.06 \frac{\text{cos}^3 \text{ .atm}}{\text{gmol} \cdot \text{K}} (25 + 273)^0 \text{ K} * 0.849 \text{ atm}} (0 - 2 - 0 - 1) \text{ atm}$$

در حالت ب چون نفوذ دو طرفه است لذا شار از رابطه زیر بدست می آید.

$$N_A = \frac{D_{AB}}{ZRT} (P_{A1} - P_{A2})$$

$$N_A = \frac{0.181 \text{ cm}^2 / \text{s}}{0.2 \text{ cm} * 82.06 \frac{\text{cos}^3 \text{ .atm}}{\text{gmol} \cdot \text{K}} * 298^0 \text{ K}} (0.2 - 0.1) = 3.7 \times 10^{-6} \text{ gmol} / \text{cm}^2 \text{ s}$$

مثال ۴: اکسیژن تحت شرایط پایا درون منواکسید کربن ساکن نفوذ می‌کند. فشار کل $1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ و درجه حرارت 0°C است. در صورتیکه در دو صفحه به فاصله دو میلیمتر از یکدیگر فشار جزئی اکسیژن به ترتیب برابر 13000 ، 6500 N/m^2 باشد، شدت نفوذ اکسیژن را بر حسب kmol/s بازاء هر متر مربع از صفحات بدست آورید ضریب نفوذ این مخلوط $1.87 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ است.

حل

$$D_{AB} = 1.87 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}, p_t = 10^5 \text{ N/m}^2, z = 0.002 \text{ m}$$

$$R = 8314 \text{ N.m/kmol.K}, T = 273 \text{ K}; \bar{p}_{A,i} = 13 \times 10^3, \bar{p}_{B,i} = 10^3 - 13 \times 10^3 = 87 \times 10^3,$$

$$\bar{p}_{A2} = 6500, \bar{p}_{B2} = 10^3 - 6500 = 93.5 \times 10^3 \text{ all in N/m}^2$$

$$\bar{p}_{B,M} = \frac{\bar{p}_{B1} - \bar{p}_{B2}}{\ln(\bar{p}_{B1}/\bar{p}_{B2})} = \frac{(87 - 93.5)(10^3)}{\ln(87/93.5)} = 90200 \text{ N/m}^2$$

$$N_A = \frac{D_{AB} p_t}{RTz \bar{p}_{B,M}} (\bar{p}_{A1} - \bar{p}_{A2}) = \frac{(1.87 \times 10^{-5})(10^5)(13 - 6.5)(10^3)}{8314(273)(0.002)(90.2 \times 10^3)}$$

$$= 2.97 \times 10^{-5} \text{ kmol/m}^2.\text{s}$$

ضریب نفوذ پذیری در مایعات

ضریب نفوذ پذیری در مایعات بطورعام ثابت هستند. اما این فرض در خصوص تمام مایعات صدق نمی کند و ممکن است D و C هر دو با غلظت تغییر نمایند. بنابراین باید C و D_{AB} را متوسط در نظر بگیریم. بجای C؛

$\frac{\rho}{M}$ جایگزین می کنیم. لذا خواهیم داشت:

$$N_A = \frac{N_A}{N_A + N_B} \frac{D_{AB}}{Z} \left(\frac{\rho}{M} \right) \ln \frac{\frac{N_A}{N_A + N_B} - X_{A2}}{\frac{N_A}{N_A + N_B} - X_{A1}}$$

(بجای $\frac{C_{A2}}{C}$ قراردادیم X_{A2})

مانند گازها در اینجا نیز نسبت $\frac{N_A}{N_A + N_B}$ با توجه به شرایط موجود در مسئله تعیین می شود:

نفوذ در حالت پایا برای جزء A درون جزء ساکن B در این حالت $N_B=0$ و ثابت N_A لذا $\frac{N_A}{N_A + N_B} = 1$ پس خواهیم داشت:

$$N_A = \frac{D_{AB}}{Z X_{B,M}} \left(\frac{\rho}{M} \right)_{av} (X_{A1} - X_{A2}) \quad X_{B,M} = \frac{X_{B2} - X_{B1}}{\ln \left(\frac{X_{B2}}{X_{B1}} \right)}$$

در حالت نفوذ متقابل در حالت پایا شدت نفوذ از رابطه زیر بدست می آید:

$$N_A = \frac{D_{AB}}{Z} \left(\frac{\rho}{M} \right)_{av} (X_{A1} - X_{A2})$$

نکته: D_{AB} که در جداول به ما داده اند تحت شرایط خاصی است که اگر با شرایط مسئله ما وفق داشت از آن استفاده می کنیم ولی اگر شرایط مسئله ما فرق کند آنگاه ما D_{AB} مسئله را از جنس شرایط جدید می کنیم به صورت زیر:

$$\frac{D_{AB1}}{D_{AB2}} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{1.5} \frac{P_2}{P_1} \frac{f_2}{f_1} \quad \text{اگر تغییرات دما کمتر از } 50^\circ\text{C} \text{ باشد بطور معمول نسبت } \frac{f_2}{f_1} \text{ برابر یک خواهد بود.}$$

مثال ۵: شدت نفوذ اسید استیک (A) را در ۱۷ °C از درون لایه ساکنی از آب (B) به ضخامت ۰/۱ سانتیمتر بدست آورید. غلظت اسید استیک در دو طرف فیلم آب به ترتیب ۳ و ۹ درصد جرمی است. ضریب نفوذ اسید استیک در آب در شرایط مسئله m^2/s 0.95×10^{-9} فرض می شود.

حل:

$$z = 0.001m, M_A = 60.03, M_B = 18.02$$

در ۱۷ °C جرم حجمی محلول ۹ درصد برابر 1012 kg/m^3 است لذا:

جزء مولی اسید استیک

$$x_{A1} = \frac{0.09 / 60.03}{0.09 / 60.03 + 0.91 / 18.02} = \frac{0.0015}{0.0520} = 0.0288$$

$$x_{B1} = 1 - 0.0288 = 0.9712$$

جزء مولی آب

$$M = \frac{1}{0.0520} = 19.21 \text{ kg/kmol} \quad \frac{\rho}{M} = \frac{1012}{19.21} = 52.7 \text{ kmol/m}^3$$

به همین ترتیب، جرم حجمی محلول ۳ درصد برابر 10032 kg/m^3 است.

$$x_{A2} = 0.0092, x_{B2} = 0.9908, M = 18.40, \rho / M = 54.5$$

جواب

$$\left(\frac{\rho}{M}\right)_{av} = \frac{52.7 + 54.5}{2} = 53.6 \text{ kmol/m}^3 \quad x_{BM} = \frac{0.9908 - 0.9712}{\ln(0.9908 / 0.9712)} = 0.980$$

$$N_A = \frac{0.95 \times 10^{-9}}{0.001(0.980)} 53.6(0.0288 - 0.0092) = 1.108 \times 10^{-6} \text{ kmol/m}^2 \cdot s$$

نفوذ در مخلوط های چند جزئی در حالت پایا

نفوذ در مخلوط های چند جزئی را می توان با استفاده از یک ضریب نفوذ موثر در معادله فلاكس محاسبه کرد
ضریب نفوذ موثر هر جزء بستگی به ضرائب نفوذ آن جزء در سایر اجزاء مخلوط خواهد داشت. برای محاسبه
ضریب نفوذ موثر از رابطه استفاده می کنیم.

$$D_{A,m} = \frac{1}{\sum_{i=B}^n \frac{y'_i}{D_{A,i}}}$$

y'_i : جزء مولی سازنده i بر مبنای مخلوط فاقد A

D_{Ai} : ضریب نفوذ A در جزء i است.

مثال: شدت نفوذ اکسیژن (A) مربوط به مثال ۱ را در صورتی که گاز ساکن مخلوطی از متان (B) و هیدروژن
(C) به نسبت حجمی دوبریک باشد بدست آوری. ضرائب نفوذ به قرار زیر است:

$$D_{O_2-H_2} = 6.99 \times 10^{-5}, D_{O_2-CH_4} = 1.86 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$p_i = 105 \text{ N/m}^2, T = 273 \text{ K},$$

حل:

$$\bar{p}_{A1} = 13 \times 10^5, \bar{p}_{A2} = 6500, \bar{p}_{iM} = 90.2 \times 10^5, \text{ all in } \text{N/m}^2; z = 0.002 \text{ m}, R = 8314 \text{ N.m/kmol.K},$$

و مانند مثال بالا

$$y'_B = 2/(2+1) = 0.667, y'_C = 1 - 0.667 = 0.333$$

و در نتیجه

$$D_{A,m} = \frac{1}{y'_B / D_{AB} + y'_C / D_{A,c}} = \frac{1}{0.667 / (1.86 \times 10^{-5}) + 0.333 / (6.99 \times 10^{-5})}$$

$$= 2.46 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

بنابراین

$$N_A = \frac{(2.46 \times 10^{-5})(13000 - 6500)}{8314(273)(0.002)(90200)} = 3.91 \times 10^{-5} \text{ kmol/m}^2 \cdot \text{s}$$

تشابه پدیده‌های انتقال جرم، حرارت و سیالات

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

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

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

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

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

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

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

$$E_D = E_H = E_v$$

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

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

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

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

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

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

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

۴- اعداد Re در هر سه پدیده برابر باشند.

۵- شکل هندسی در هر سه پدیده مشابه باشند.

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

۷- شدت انتقال جرم تا حد امکان کم باشد.

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

در شرایط تشابه کاربردی چون هدف انطباق پروفایل‌های سرعت، دما و غلظت نیست بلکه هدف محاسبه ضرایب اصطکاک (C_f) ، انتقال حرارت (h) و انتقال جرم $(k$ یا $f)$ به کمک هم است لذا ضرورتی ندارد بندهای 1 و 4 از شروط هفت‌گانه بالا حتماً صادق باشند. نحوه محاسبه ضرایب انتقال جرم از تشابه با حرارت بدین صورت است که در رابطه مربوط به محاسبه h به جای Nu از sh و به جای pr عدد اشمیت را جایگزین می‌کنیم. مثلاً اگر معادله Nu به صورت زیر باشد

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

معادله sh به صورت زیر خواهد شد:

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

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

$$J_D = St_D \cdot Sc^{\frac{2}{3}} = \frac{C_f}{2}$$

$$J_H = St_H \cdot Pr^{\frac{2}{3}} = \frac{C_f}{2}$$

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

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

$$St_D = \frac{Sh}{Re \cdot Sc} = \frac{F}{Cu}, St_H = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} = \frac{h}{\rho u C_p}$$

نکات مهم این آنالوژی به اختصار عبارتند از:

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

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

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

۳- این آنالوژی در جریان آرام لوله صادق نیست.

۴- این آنالوژی در مسائل شار ثابت صادق نیست.

تئوری‌های انتقال جرم

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

۱- تئوری فیلمی (film)

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

$$F = \frac{D_{AB}C}{Z_F}$$

۲- تئوری رسوخ (Penetration)

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

$$k_L = 2 \sqrt{\frac{D_{AB}}{\pi \theta}}$$

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

۳- تئوری نوشوندگی سطح (Surface Renewal)

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

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

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

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

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

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

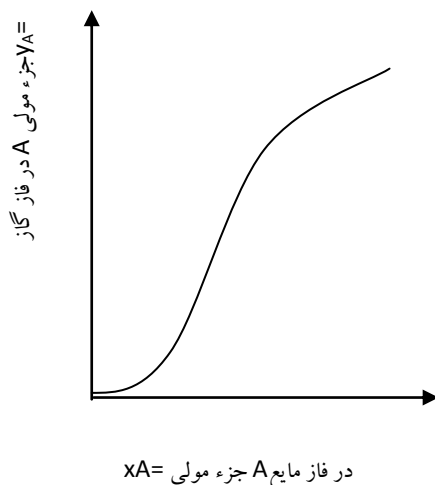
- مطابق این تئوری k_L متناسب با D_{AB}^n است که n بین 0.5 تا 1 است.
- هنگامی که $\sqrt{\frac{S Z_b^2}{D_{AB}}}$ عدد کوچکی باشد (Z_b کم ، S کم و D_{AB} بزرگ) نتایج این تئوری مشابه تئوری فیلمی است و هنگامی که $\sqrt{\frac{S Z_b^2}{D_{AB}}}$ عدد بزرگی باشد نتایج این تئوری مشابه تئوری نوشوندگی است.

فرآیند جذب

به عنوان مثال یک فرآیند جذب گاز را در نظر می‌گیریم که در طی آن آمونیاک موجود در مخلوطی از هوا- آمونیاک در آب حل می‌شود.

$\text{NH}_3 + \text{Air}$
Pure water

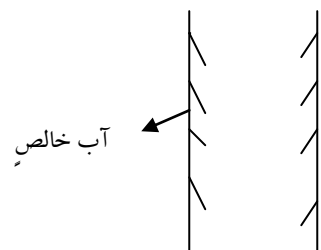
فرض کنید که مقدار معینی از آب را همراه با مخلوطی از گاز آمونیاک و هوا در یک ظرف بسته قرار داده و شرایط را به نحوی تنظیم کنیم که سیستم در دما و فشار ثابت باقی بماند. نظر به اینکه آمونیاک حلالیت زیادی در آب دارد، تعدادی از مولکولهای آمونیاک آنآ و با عبور از سطح مشترکی که دو فاز را از یکدیگر جدا کرده است از فاز گاز به فاز مایع انتقال می‌یابند. اما مجدداً قسمتی از مولکولهای آمونیاک جذب شده با شدتی متناسب با غلظت آن در فاز مایع به فاز گاز باز می‌گردند. با ازدیاد ورود آمونیاک به فاز مایع که سبب افزایش غلظت آن در فاز مذکور می‌شود، شدت بازگشت آمونیاک به فاز گاز نیز افزایش می‌یابد تا اینکه بالاخره شدت ورود آمونیاک به فاز مایع با شدت خروج آن از این فاز برابر می‌شود. در همان حال نیز در اثر مکانیسم نفوذ، غلظتها در سراسر هر فاز یکنواخت می‌شوند. به این ترتیب یک تعادل پویا برقرار می‌گردد که در این حالت در عین حالی که مولکولهای آمونیاک به ورود و خروج خود از فازی به فاز دیگر ادامه می‌دهند، شدت کلی انتقال برابر صفر است و دیگر غلظت موجود در هر فاز تغییر نمی‌کند. اگر مقدار بیشتری گاز آمونیاک به داخل ظرف وارد شود. در نتیجه آمونیاک بیشتری به فاز مایع نفوذ خواهد کرد و بالطبع غلظتهای تعادلی جدیدی که مقدار آنها بیشتر از حالت اول است، ایجاد خواهد شد. ما برای هر غلظتی از آمونیاک در فاز گاز غلظتی از آمونیاک در فاز مایع خواهیم داشت. به این ترتیب که اگر آمونیاک را به عنوان سازنده A در نظر بگیریم آنگاه غلظت جزء مولی آمونیاک در فاز گاز y_A و غلظت جزئی مولی آمونیاک در فاز مایع x_A خواهد بود. چنانچه تغییرات y_A (جزء مولی A در فاز گاز) را با x_A (جزء مولی A در فاز مایع) را در یک دستگاه مختصات بررسی کنیم رابطه بین y_A و x_A به صورت یک منحنی خواهد بود این منحنی، منحنی تعادل توزیع آمونیاک بین هوا و آب نامیده می‌شود که به منحنی توزیع تعادلی موسوم است.



شکل این منحنی فقط تابع درجه حرارت و فشار می باشد.

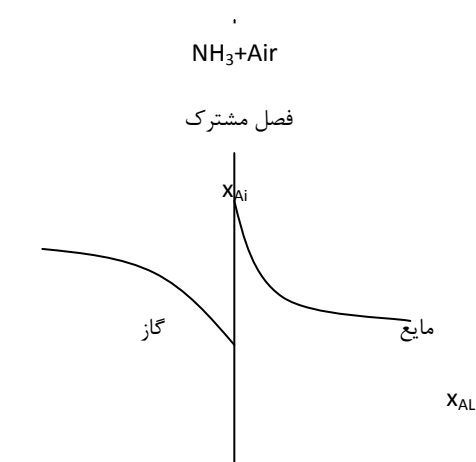
نکته:

وقتی در حال تعادل هستیم غلظت جزء حل شده در هر فاز با یکدیگر مساوی نیست بلکه پتانسیل شیمیایی آن جزء در هر فاز با هم برابر است. حال بحثی که مطرح می شود این است که ما شدت انتقال جرم بین دو فاز را چگونه می توانیم بدست آوریم. عملیات انتقال جرم به حالت پایا انجام می شود هم زمان با جریان پیوسته فازها. یعنی در هر نقطه از دستگاه ما تغییر غلظت نسبت به زمان نداریم.



به این منظور یک برج جداره مرطوب را در نظر می گیریم:

بطور معمول در برج های جداره مرطوب مخلوط هوا و آمونیاک را در مقابل آب قرار می دهند. بطور قطع آبی که از ته برج خارج می شود حاوی آمونیاک و گازی که از بالای برج خارج می شود دارای آمونیاک کمتر خواهد بود. در



یک سطح مقطع از این برج ما بررسی می کنیم ببینیم غلظت ها به چه شکل است. گاز آمونیاک را A فرض می کنیم و دبی گاز ورودی را G . نمودار توزیع غلظت از گاز تا فصل مشترک و از فصل مشترک تا بالک مایع به شکل مقابل است. در جهت انتقال یک گرادیان غلظت داریم غلظت A بر حسب جزء مولی در توده گاز هست $y_{A,G}$ (کل دبی ورودی است) و به تدریج که گاز A به فصل مشترک نزدیک می شود مقدارش کم می شود و در فصل مشترک به $y_{A,i}$ می رسد. در فاز مایع، غلظت در سطح مشترک $x_{A,i}$ می باشد. به تدریج که به بالک مایع می رویم این

مقدار کم شده و می شود $x_{A,L}$.

حال اگر بخواهیم شار انتقال جرم را محاسبه کنیم، منظور محاسبه دو شار می باشد. شار از بالک فاز گاز تا فصل مشترک و شار از فصل مشترک تا بالک مایع شار به طریق زیر محاسبه می شود:

گرادیان غلظت α یا شار غلظت

$$N_A = K(\Delta x) \text{ یا } N_A = K(\Delta y)$$

این معادله بیان کننده آن است که شار متناسب است با گرادیان غلظت. که اگر ضرائب انتقال جرم را در فازهای گاز و مایع به ترتیب K_y و K_x تعریف کنیم آنگاه شار می شود حاصل ضرب ضریب انتقال جرم در گرادیان غلظت بنابراین داریم:

شاری که وارد فصل مشترک می شود.

$$N_A = K_y(y_{A,G} - y_{A,i})$$

$$\rightarrow K_y(y_{A,G} - y_{A,i}) = K_x(x_{A,i} - x_{A,L})$$

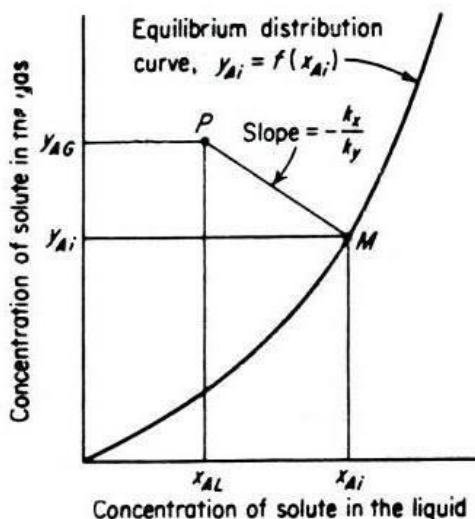
$$N_A = K_x(x_{A,i} -$$

شاری که وارد فاز مایع می شود.

$$x_{A,L})$$

$$\frac{y_{A,G} - y_{A,i}}{x_{A,L} - x_{A,i}} = -\frac{K_x}{K_y}$$

می توانیم چنین بنویسیم:



عملیات انتقال حرارت^{۲۳}

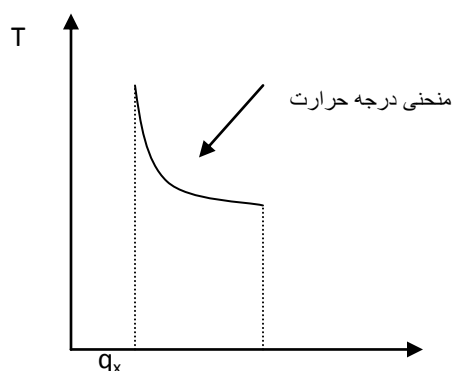
انتقال حرارت، انتقال انرژی است که در اثر اختلاف درجه حرارت بوجود می آید. مقدار انرژی را که قسمت گرمتر به قسمت سردتر می دهد، در عمل انتقال حرارت گویند. در انتقال حرارت در مورد شدت انتقال این انرژی صحبت می گردد که به سه صورت زیر انجام می پذیرد:

(۱) هدایت (۲) کنوکسیون (۳) تشعشع

لازم به ذکر است که در هر یک از سه روش فوق باید اختلاف درجه حرارت موجود باشد تا انتقال صورت گیرد. جهت انتقال همواره از جسم گرم به جسم سرد می باشد.

انتقال حرارت از طریق هدایت^{۲۴}

انتقال حرارت از طریق هدایت در یک جسم هموژن و مات، در اثر اختلاف درجه حرارت بین دو نقطه از آن جسم صورت می گیرد. هدایت در حقیقت انتقال انرژی حرکتی یک مولکول مجاور بوده و تنها عامل ایجاد جریان حرارتی در یک جسم جامد و مات می باشد. اگر گرادیان درجه حرارت در یک جسم وجود داشته باشد. مطابق شکل مقابل آزمایش نشان می دهد که از قسمت گرم به قسمت سرد، انتقال انرژی خواهیم داشت. شدت این انتقال انرژی برای واحد سطح جسم متناسب است با گرادیان درجه حرارت.



برای ایجاد تساوی، ضریب K را که ضریب هدایت حرارتی نامیده می شود اضافه می کنیم:

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial X}$$

$$q = -KA \frac{\partial T}{\partial X}$$

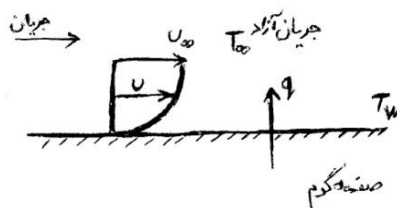
²³ Heat Transfer

²⁴ Conduction heat transfer

در این فرمول (فرمول صفحه پیش) q شدت جریان حرارتی، A سطح جسم، $\frac{\partial T}{\partial X}$ گرادیان درجه حرارت است. علامت منفی بدین خاطر است که جهت جریان حرارتی خلاف جهت افزایش درجه حرارت در جسم است. یعنی درجه حرارت در X_1 بیشتر از X_2 می باشد. این رابطه بنام قانون فوریه معروف می باشد.

انتقال حرارت از طریق کنوکسیون^{۲۵}

در انتقال حرارت بوسیله کنوکسیون مولکولها متحرک بوده و انرژی حرارتی را با خود جابجا می کنند. در این حالت قسمتی از سیال با قسمت دیگر مخلوط شده و عمل کنوکسیون انجام می پذیرد. می دانیم برای سرد کردن صفحه گرم آن را در مقابل یک دمنده حرارتی یا همان بادبزن قرار می دهند. این همان انتقال حرارت کنوکسیون از صفحه گرم به هوای اطراف می باشد. در این مثال کنوکسیون اجباری است. چنانچه برای سرد کردن صفحه گرم از فن استفاده نمی کردیم، عمل سرد شدن باز از طریق کنوکسیون انجام می گرفت. بدین طریق که هوای مجاور صفحه، گرم شده و با تغییری که در وزن مخصوص آن بوجود می آید، به قسمت های دیگر حرکت کرده و هوای سرد جای آنرا می گیرد. این حالت انتقال حرارت در اثر تغییر وزن مخصوص سیال را انتقال حرارت از طریق کنوکسیون طبیعی می نامند. جریانی از هوا را مطابق شکل زیر در نظر می گیریم.



درجه حرارت صفحه T_w و درجه حرارت هوا T_∞ می باشد. هوا با سرعت U_∞ از روی صفحه عبور می کند. شدت جریان حرارتی از طریق کنوکسیون با استفاده از قانون سرمائی نیوتن محاسبه می شود:

$$q = h_A (T_w - T_\infty)$$

A سطح صفحه، h ضریب انتقال حرارت جابجائی، T_w درجه حرارت، دیواره یا صفحه و T_∞ درجه حرارت هوا می باشد.

²⁵ Convection heat transfer

انتقال حرارت از طریق تشعشع^{۲۶}

هر جسمی در تمام جهات انرژی تشعشعی پخش می نماید. وقتی این انرژی به جسم دیگری برخورد می کند قسمتی از آن منعکس، قسمتی از آن عبور و بقیه به آن جذب می شود. اجسام در خلاء نیز می توانند از طریق تشعشع انتقال حرارت داشته باشند که این انتقال از طریق پخش امواج الکترومغناطیس انجام خواهد شد. انتقال حرارت از طریق تشعشع چند مشخصه دارد. یکی اینکه در انتقال حرارت به وسیله تشعشع، احتیاج به محیط فیزیکی نمی باشد. مشخصه دیگر آن است که در تشعشع، انرژی حرارتی منتقل شده با تفاضل توان چهارم درجه حرارت مطلق جسم سرد و گرم نسبت دارد.

شدت جریان حرارتی از طریق تشعشع با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$q = \sigma A(T_1^4 - T_2^4)$$

T_1^4 و T_2^4 درجه حرارت های جسم گرم و سرد و σ ضریب ثابت استفان بولتزمن است.

²⁶ radiation heat transfer

واحد جذب و دفع گاز

عملیات جذب و دفع از جمله روش‌های جداسازی مواد است که در صنایع مختلف کاربردی فراوان دارد بخصوص در صنعت پتروشیمی و پالایش همواره عملیات جذب و دفع نقشی تعیین کننده در فرآیند کلی واحد ایفا نموده و اهمیت آن برکسی پوشیده نیست.

جذب گاز فرآیندی است که در آن یک مخلوط گاز را در تماس با مایعی قرار می دهند تا یک یا تعداد بیشتری از سازنده های مخلوط گاز در مایع حل شده و محلولی از آن سازنده ها در مایع حاصل شود. برای مثال گازی را که به عنوان محصول جانبی از کوره های کک حاصل می شود، ابتدا با آب شستشو می دهند تا آمونیاک آن جدا شود و سپس به منظور جداسازی بخارات بنزن و تولوئن، عمل شستشوی گاز را با روغن تکرار می کنند. گاز نامطبوع سولفید هیدروژن را از مخلوط گاز فوق و یا گاز طبیعی بوسیله شستشوی گاز با محلول های مختلف قلیایی که سولفید هیدروژن را جذب می کنند ، جدا می سازند. بخارات حلال را که توسط جریان گاز حمل می شود با شستشوی مخلوط بوسیله ی یک حلال مناسب دیگر بازیابی کرده و مورد استفاده ی مجدد قرار می دهند . این عملیات شامل انتقال یک ماده از جریان گاز به مایع می باشد. اگر انتقال جرم در جهت معکوس ، یعنی از مایع به گاز صورت گیرد ، فرآیند را دفع یا عاری سازی می نامند. برای مثال ، بنزن و تولوئن جذب شده در حلال روغن (که در بالا به آن اشاره شد) را در اثر تماس محلول مایع با بخار آب آزاد می سازند ، در نتیجه بخارات بنزن و تولوئن وارد فاز گاز شده و خارج می شوند و حلال می تواند مجدداً مورد استفاده قرار گیرد. نظر به اینکه اصول فرآیند جذب و دفع یکسان است ، لذا هر دو تحول را می توان بطور همزمان مطالعه کرد. بطور معمول از این عملیات فقط جهت بازیابی و یا جداسازی حل شونده ها استفاده می کنند اما تفکیک حل شونده ها از یکدیگر توسط فرآیند تقطیر صورت می گیرد.

حلالیت تعادلی گاز در مایعات

شدت انحلال سازنده های یک مخلوط گاز در یک مایع جاذب بستگی به میزان انحراف شرایط سیستم از حالت تعادل دارد. و لذا ضروری است که مشخصات تعادلی سیستم های گاز – مایع مورد بررسی قرار گیرد. دو سیستم برای این عملیات موجود است؛ دو جزئی و چند جزئی

سیستم های دو جزئی

اگر یک گاز خالص و یک مایع غیر فرار را در دما و فشار ثابت به حالت تعادل با یکدیگر در آوریم، غلظت گاز حل شده در مایع را حلالیت آن گاز در آن شرایط گویند. در دمای ثابت، حلالیت گاز با ازدیاد فشار افزایش می یابد و هر نوع گاز در یک حلال معین، حلالیت مختص خود را نشان می دهد و در نتیجه، منحنی حلالیت گازهای مختلف فرق می کند. این منحنی ها بطور معمول به طریق تجربی بدست می آیند. اگر فشار تعادلی یک گاز در یک غلظت معین در مایع زیاد باشد، نتیجه می شود که گاز در مایع تقریباً نامحلول است. بر اساس قانون وانت هوف در مورد گازها در تعادل پویا، اگر دمای یک سیستم در حال تعادل افزایش یابد، تغییر در جهتی صورت می گیرد که همراه با جذب حرارت باشد. با توجه به اینکه (ولی نه در تمام موارد) انحلال گازها با آزاد شدن حرارت همراه است، لذا در بیشتر موارد، حلالیت گازها با افزایش دما، کاهش می یابد. در نقطه جوش حلال، در صورتیکه فشار بخار حلال از فشار جزئی فاز گاز کمتر باشد، حلالیت گاز برابر صفر است.

سیستم های چند جزئی

اگر مخلوط گاز در تماس با یک مایع قرار گیرد، در تحت شرایط خاصی حلالیت تعادلی هر سازنده مستقل از حلالیت سازنده های دیگر خواهد بود، به شرطی که تعادل بر حسب فشارهای جزئی سازنده های مخلوط بیان شود. این رفتار، فقط در محلولهای کامل مشاهده می شود. برای مثال گازهای پروپان و بوتان موجود در یک مخلوط، در پارافین مایع غیر فرار بطور مستقل از یکدیگر حل می شوند، زیرا محلول حاصل، کامل است. محلولهای کامل دارای چند مشخصه مهم هستند که به هم وابسته است:

- میانگین نیروهای جاذبه و دافعه بین مولکولی در این محلولها در اثر آمیختن و یا جدا شدن سازنده ها تغییر نمی کند.
- در اثر آمیختن سازنده ها با هم، گرمایی تولید و یا جذب نمی شود.
- فشار بخار کل محلول با ترکیب نسبی سازنده ها که بر حسب اجزای مولی بیان می شوند، دارای یک رابطه خطی است.
- حجم محلول با ترکیب نسبی سازنده ها دارای یک رابطه ی خطی است.

انتخاب حلال مناسب برای عمل جذب

اگر هدف اصلی از فرآیند جذب تهیه یک محلول مشخص باشد، مثل تولید اسید کلریدریک حلال مناسب با توجه به طبیعت محصول انتخاب می شود. اگر هدف اصلی، حذف برخی از سازنده های مخلوط گاز باشد، انتخاب های بیشتری امکان پذیر است. البته آب ارزان ترین و فراوان ترین حلال محسوب می شود ولی در انتخاب حلال مناسب، خواص مهم زیر را باید در نظر گرفت:

۱- **حلالیت گاز** حلالیت گاز در حلال باید بالا باشد تا شدت جذب گاز زیاد و مقدار حلال مورد نیاز کم شود. بطور معمول حلالی که از نظر طبیعت شیمیایی مشابه با ماده ی حل شونده باشد، امکانات زیادی را جهت انحلال حل شونده فراهم می سازد. برای مثال برای جداسازی بنزن از گازهای کوره ی کک، از روغن هیدروکربن استفاده می کنند و آب را بکار نمی برند. در مواردی که محلول های حاصل، کامل باشند، حلالیت گاز بر حسب جزء مولی در تمام حلال ها یکسان است. اما اگر بر حسب جزء وزنی در نظر گرفته شود، حلالیت گاز در حلال های با وزن مولکولی پایین بیشتر است و لذا وزن کمتری از این حلال ها جهت انجام تحول مورد نیاز خواهد بود واکنش شیمیایی بین حلال و حل شونده اغلب سبب افزایش بسیار زیاد حلالیت گاز می شود. اما اگر بخواهند جهت استفاده ی مجدد، حلال را بازیابی کنند، باید واکنش برگشت پذیر باشد.

۲- **فراریت** - فشار بخار حلال باید کم باشد زیرا گاز خروجی از یک فرآیند جذب بطور معمول از بخار حلال اشباع است و لذا اتلاف حلال در صورت بالا بودن فشار بخار آن زیاد خواهد بود. در صورت لزوم از مایع کمتر فرار دیگری برای بازیابی بخار اول استفاده می کنند. به عنوان مثال از این عمل در برج های جذب هیدروکربن که در قسمت عمده ی آن یک حلال روغنی بکار می رود، استفاده می شود. دلیل استفاده از حلال فرار توان بالای آن در جذب گاز و امکان بازیابی بخارات حلال توسط یک روغن غیر فرار است.

۳- **خوردگی** - حلال نباید اثر خورنده روی مواد داشته باشد و موادی که در ساختمان دستگاهها بکار می روند، نباید غیر معمول و گران باشند.

۴- **بهاء** - حلال نباید گران بها باشد تا اتلاف آن هزینه ی زیادی را ایجاد نکند و بعلاوه به آسانی بدست آید.

۵- **ویسکوزیته** - کم بودن ویسکوزیته به دلایل تسریع سرعت جذب، بهبود مشخصات طغیان در برج های جذب، افت فشار کم در تلمبه کردن و خواص مفید در انتقال حرارت، ترجیح داده می شود.

۶- **خواص متفرقه** - حلال در صورت امکان نباید سمی و آتش گیر باشد. باید از نظر شیمیایی پایدار بوده و نقطه ی انجماد آن نیز پایین باشد.

دستگاه‌های مورد استفاده در عملیات جذب و دفع گاز در صنعت

همانطور که ذکر شد جذب گاز شامل انتقال یک ماده از جریان گاز به مایع می باشد، به عنوان مثال جداسازی گاز هیدروژن سولفید از گاز طبیعی به این روش انجام می شود، اگر انتقال جرم در جهت معکوس، یعنی از مایع به گاز صورت گیرد، فرآیند را دفع یا عاری سازی می نامند. در انتخاب حلال برای این فرآیند باید پارامترهای حلالیت گاز، فراریت، خوردگی، قیمت، ویسکوزیته و... در نظر گرفته شود. دستگاه متداول در جذب گاز انواع برج‌ها می باشد. یکی از مهم ترین تجهیزات فرآیندی که در صنایع مربوط به نفت و گاز وجود دارد، برج‌های جداسازی می باشند. کار این تجهیزات، جداسازی اجزای موجود در یک ترکیب می باشد که هر کدام از این اجزاء می توانند ارزش بسیار بالایی در مقایسه با ترکیب اولیه داشته باشند. در این قسمت به معرفی انواع برج‌های جداسازی می پردازیم. جداسازی برای مخلوط‌های همگن و غیرهمگن صورت می گیرد. اگر مخلوطی که جداسازی می شود همگن باشد، جداسازی می تواند تنها با افزودن و یا ایجاد فاز دیگری در سیستم انجام شود. به عنوان مثال در جداسازی یک مخلوط گازی، فاز دیگر می تواند به وسیله چگالش جزئی انجام شود. در صورتیکه یک مخلوط ناهمگن داشته باشیم، جداسازی می تواند بطور فیزیکی و با استفاده از تفاوت دانسیته بین فازها انجام گیرد. اساس کار برج‌ها افزایش سطح تماس بین فازها می باشد که این افزایش ممکن است توسط سینی یا پرکن تامین شود. برج های جداسازی به سه روش پیوسته، نیمه پیوسته و غیرپیوسته عمل می کنند. جداسازی فازی درون برج‌ها به صورت فازهای جزئی زیر انجام می گیرند: بخار- مایع، مایع- مایع، جامد- مایع، جامد- گاز و جامد- جامد.

دستگاه های بکار رفته در عملیات گاز- مایع به دو دسته زیر تقسیم می شوند:

دستگاه هایی که در آنها گاز پراکنده می شود؛ مخازنی که در آنها حباب گاز ایجاد می شود، مخزن مجهز به همزن و انواع برج‌های سینی دار را می توان در این دسته قرارداد. در این دستگاه‌ها فاز گاز به صورت حباب یا کف در فاز مایع پراکنده می شوند.

دستگاه هایی که در آنها فاز مایع پراکنده می شود؛ این گروه شامل دستگاه‌هایی می شود که در آنها مایع به صورت یک فیلم نازک و یا به صورت قطره ای درآمده و در فاز گاز پراکنده می شود. در این میان برج‌های دیواره مرطوب، برج‌های پاششی و ستون‌های پر شده را می توان نام برد. بطور معمول برج‌های جداسازی، بر اساس عملیات انتقال جرمی که بین فازها انجام می شود، به صورت زیر تقسیم بندی می شوند.

(الف) برج های تقطیر، (ب) برج های استخراج، (ج) برج های جذب و دفع

برج های تقطیر^{۲۷}

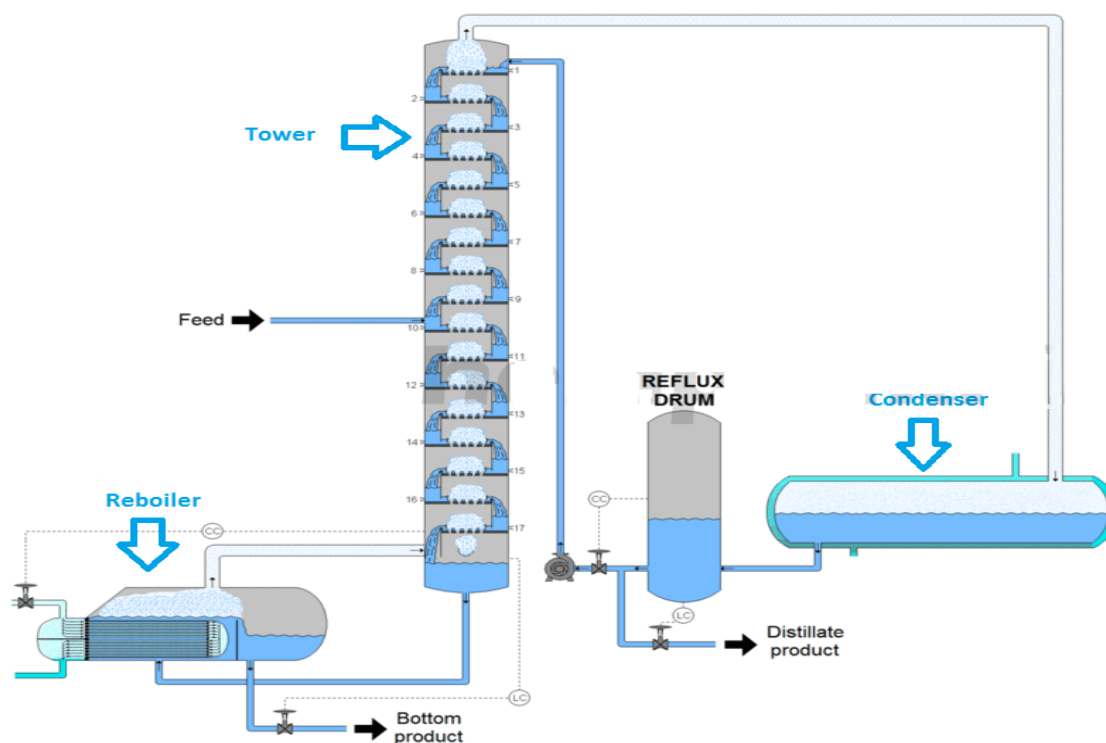
تقطیر از جمله مهم ترین فرآیندهای جداسازی است که اساس جداسازی در آن اختلاف نقطه جوش اجزاء مخلوط می باشد (در بخش عملیات واحد /تقطیر بیشتر توضیح داده خواهد شد) . فرآیند تقطیر از روش های مستقیم جداسازی به شمار می رود . عمل تقطیر با استفاده از حرارت دادن به یک مخلوط و سرد کردن بخارات حاصل انجام می شود. بطور کلی یک برج تقطیر شامل چهار بخش زیر می باشد:

بدنه اصلی برج^{۲۸}

سیستم جوشاننده یا ریبویلر^{۲۹}

سیستم میعان کننده یا کندانسور^{۳۰}

تجهیزات جانبی از جمله سیستم های کنترلی، مبدل های حرارتی میانی، پمپ ها، مخازن و ...



²⁷ Distillation Columns

²⁸ Tower

²⁹ Reboiler

³⁰ Condenser

بطور کلی برج‌هایی که در صنعت برای تقطیر به کار می‌روند، به صورت ۲ نوع زیر می‌باشند:

برج‌های سینی‌دار

برج‌های پر شده (آکنه)

برج‌های تقطیر سینی‌دار^{۳۱}

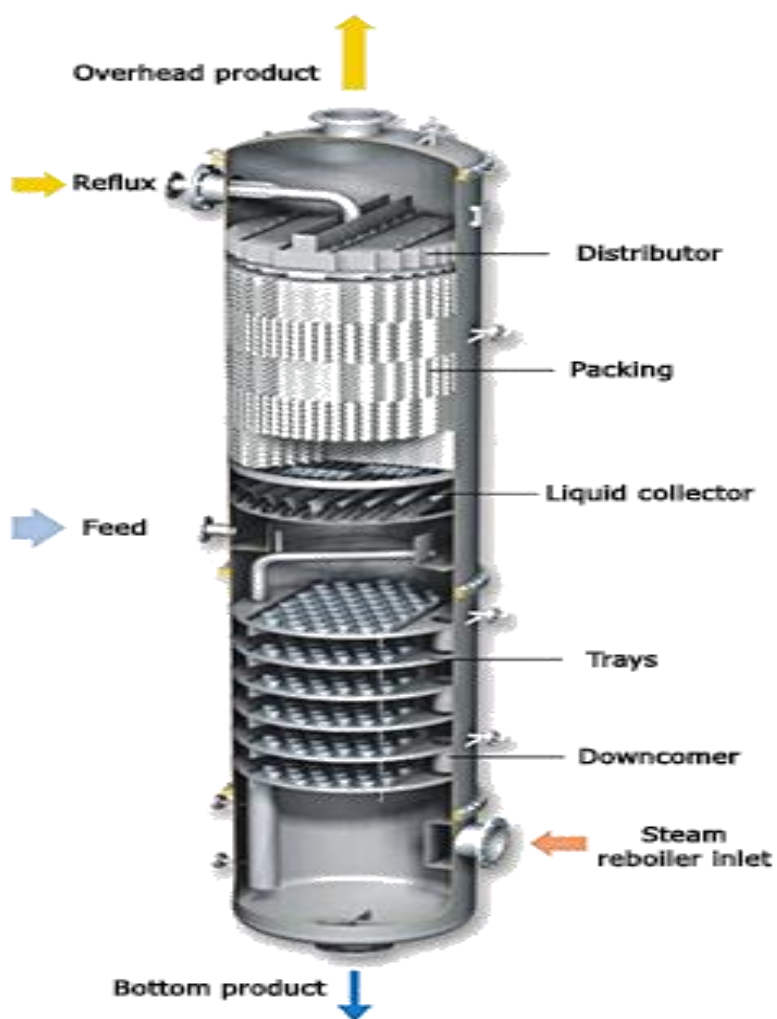
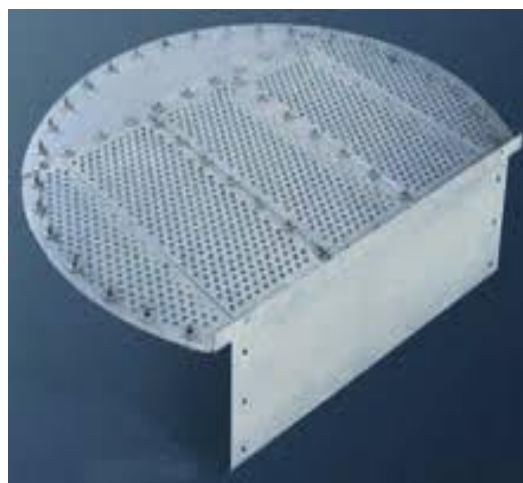
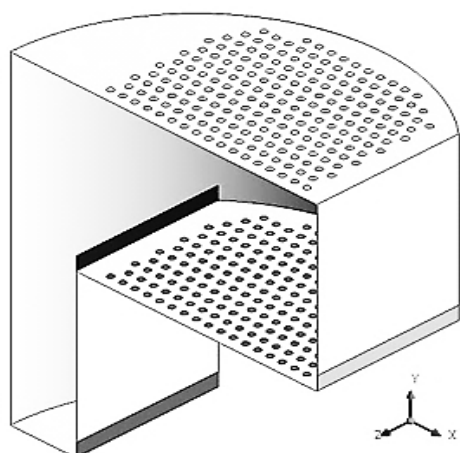
برج‌های سینی‌دار مهم‌ترین نوع برج‌هایی هستند که در مراکز مهم صنعتی مانند پالایشگاه‌ها از آنها استفاده می‌شود. داخل این برج‌ها به فواصل معینی صفحه‌های فلزی سوراخ‌داری قرار داده شده است که به آن‌ها سینی گفته می‌شود. این برج‌ها به ارتفاع‌های مختلفی ساخته می‌شود که ممکن است از چند متر تا بیش از ۵۰ متر متغیر باشد. قطر این برج‌ها نیز ممکن است تا بیش از ۵ متر هم در نظر گرفته شود. برج‌های تقطیر می‌توانند سیستم ریویولر و کندانسور داشته باشند و یا نداشته باشند. درون برج، جریان‌های مایع و گاز بصورت غیرهمسو روی این سینی‌ها با یکدیگر در تماس قرار می‌گیرند و انتقال جرم روی سینی رخ می‌دهد. جریان مایع به شکل افقی روی سینی حرکت کرده و توسط ناودانی‌هایی به سمت پایین (سینی بعد) می‌ریزد. جریان گاز نیز از پایین و توسط منافذ روی سینی، به سمت بالا حرکت می‌کند و به شکل حباب در مایع پخش می‌شود. سپس حباب‌ها از مایع جدا شده و به سمت بالا حرکت می‌کنند. ریویولر حرارت لازم برای بخار شدن مایع در پایین برج را فراهم می‌کند و کندانسور بخار خروجی از بالای برج را مایع می‌کند. مهم‌ترین پارامتر در طراحی یک برج تقطیر، تعداد مراحل تئوری آن می‌باشد. براساس آن تعداد سینی و همچنین ارتفاع برج مشخص می‌گردد. از دیگر پارامترهای مهم یک برج سینی‌دار می‌توان به فاصله سینی‌ها، عمق مایع روی سینی‌ها، نوع منافذ روی سینی، پروفایل فشار و دمای برج، سینی خوراک و ... اشاره کرد. برج‌های سینی‌دار را بر اساس نوع منافذ روی سینی می‌توان به ۳ نوع زیر تقسیم کرد:

سینی‌های غربالی^{۳۲}

سینی‌های غربالی، صفحات مشبک می‌باشند که بخارات از منافذ آن عبور کرده و به صورت حباب‌هایی وارد مایع روی سینی می‌شوند. این سینی‌ها نسبت به دو نوع دیگر بسیار ارزان بوده و ظرفیت بالاتری دارند. مزیت دیگر این سینی‌ها افت فشار کم آنها است که در مجموع باعث شده که در طراحی‌ها در صورتی که مشکل عمده‌ای در میان نباشد به عنوان اولین انتخاب در نظر گرفته شود.

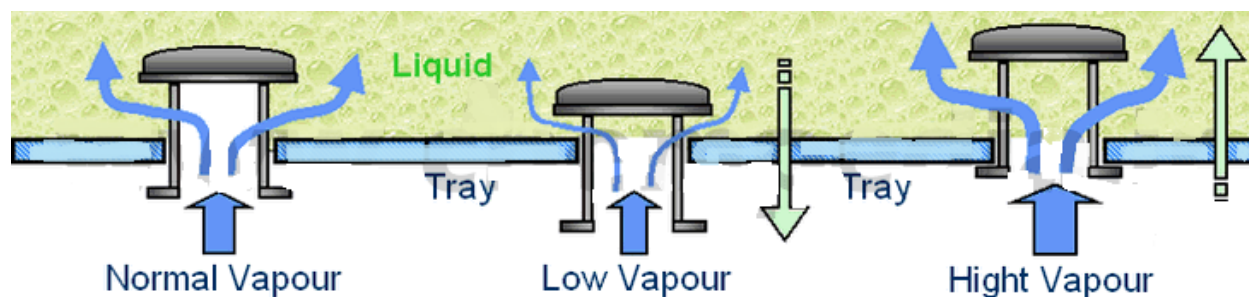
³¹ Tray Distillation Towers

³² Sieve Tray



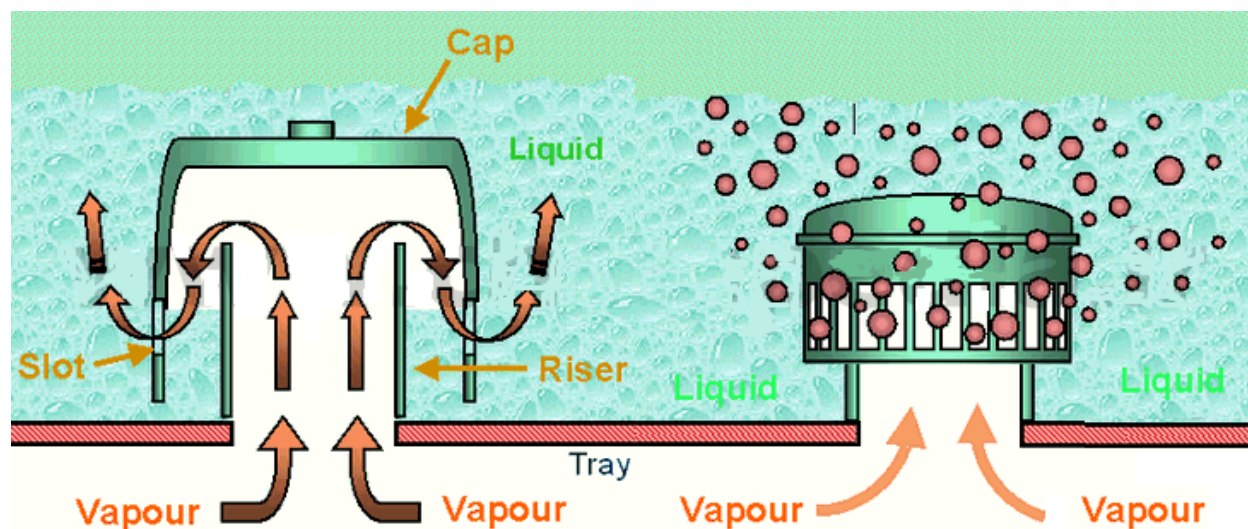
سینی‌های دریچه‌ای^{۳۳}

این سینی‌ها نیز صفحات سوراخ‌دار می‌باشند که هر سوراخ مجهز به یک صفحه کوچک (دیسک) متحرک می‌باشد. سوراخ‌های سینی می‌تواند مدور یا مستطیل باشد. در دبی کم بخار، صفحه بر روی سوراخ مستقر شده و آن را به نحوی می‌پوشاند که مایع چکه نکند. دریچه منافذ در ۲ نوع ثابت و متحرک ساخته می‌شوند. با افزایش دبی بخار دریچه در امتداد قائم به طرف بالا حرکت کرده و مجرا را برای عبور بخار باز می‌کند. این سینی‌ها قیمت مناسبی دارند و نسبت به تغییرات دبی بخار انعطاف پذیر می‌باشند.



³³ Valve Tray

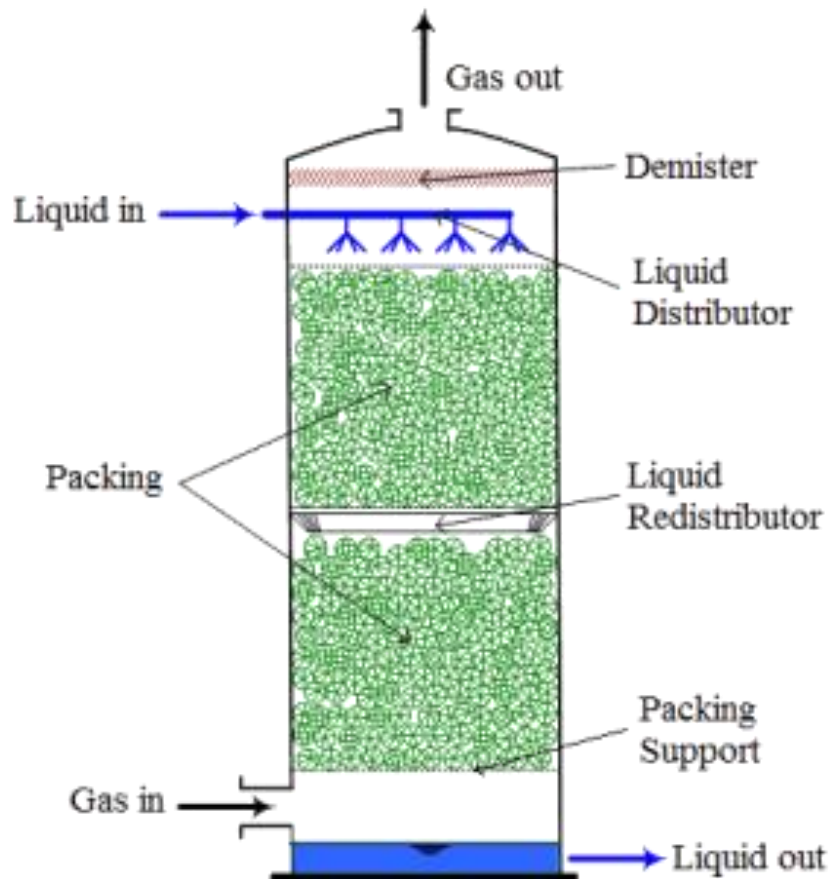
این سینی متشکل از یک صفحه مشبک است که روی هر سوراخ یک لوله هدایت گاز به بالا و یک فنجان وارونه روی آن وجود دارد. در سینی فنجانی بطور معمول لایه‌ای از مایع بر روی سینی باقی می‌ماند و گاز خروجی از زیر فنجان باید از داخل این لایه عبور کند. از مزایای این سینی‌ها این است که نشستی مایع از طریق سوراخ‌های سینی وجود ندارد، همچنین در دبی‌های بسیار کم گاز به خوبی عمل می‌کند.



³⁴ Bubble Cap Tray

برج‌های پرشده (آکنه)^{۳۵}

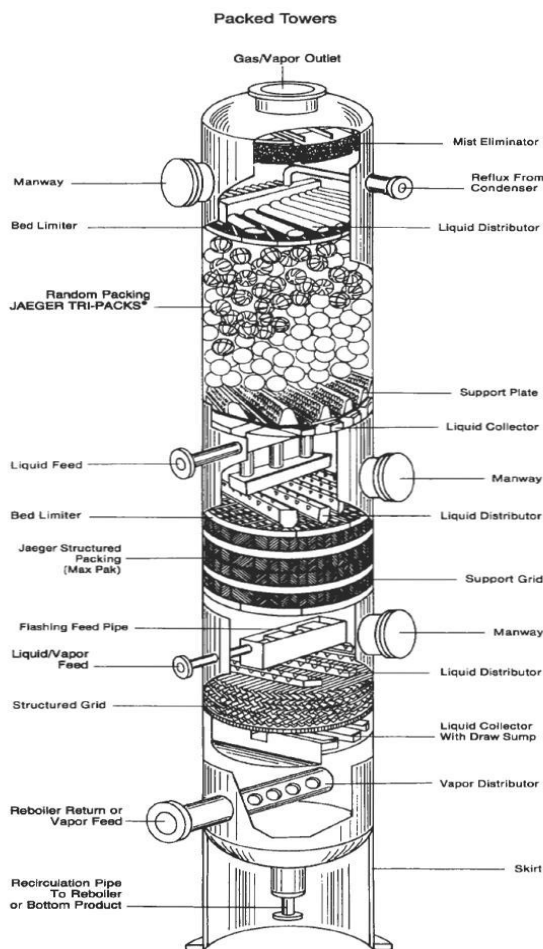
طرز کار برج‌های پرشده به همان صورت برج‌های سینی‌دار می‌باشد، با این تفاوت که در برج‌های پر شده سینی وجود ندارد بلکه تمام برج از اجسامی با جنس و شکل معین پر شده است که به این اجسام پرکن^{۳۶} می‌گویند. پرکن‌ها بر دو نوع منظم و نامنظم تقسیم بندی می‌شوند؛ پرکن‌های منظم در برخی موارد حتی بر سینی‌ها نیز برتری دارند. در این برج‌ها نیز همانند برج‌های سینی‌دار مایع از بالا و گاز از پایین جریان پیدا می‌کند. توزیع مایع در برج‌های پرکن حائز اهمیت بسیاری است زیرا توزیع ناهمسان موجب خشک ماندن برخی قسمت‌های بستر و در نتیجه کاهش راندمان تماس گاز - مایع می‌شود. جهت نگه داشتن بستر پرکن یک سینی زیرین و برای جلوگیری از انبساط بستر یک سینی بالایی در برج‌های پرکن تعبیه می‌شود.



³⁵ Packed Bed Distillation Tower

³⁶ Packing

همانطور که ذکر شد برج پر شده از مهم‌ترین و پرکاربردترین برج‌ها در عملیات دفع و جذب گاز می‌باشد. همانطور که بیان شد این دستگاه از یک ستون یا برج تشکیل شده که شامل ورودی گاز و فضایی برای توزیع آن در قسمت تحتانی، ورودی مایع و توزیع کننده در قسمت فوقانی، خروجی های گاز و مایع به ترتیب در قسمت فوقانی و تحتانی و توده جامد نگه دارنده‌ای به نام پرکن‌های برج است. مایع ورودی که حلالی خالص یا محلول رقیقی از ماده حل شده می‌باشد توسط توزیع کننده در بالای پرکن‌ها توزیع می‌شود و سطوح پرکن‌ها را بطور یکنواخت مرطوب می‌کند. گاز حاوی ماده حل شده یا گاز غنی شده، وارد فضای زیر پرکن‌ها می‌شود و مخالف جریان مایع از روزه‌های موجود در پرکن‌ها بالا می‌رود. برج‌های جذب و دفع همانند تقطیر، هم به صورت پر شده و هم به صورت سینی‌دار به کار می‌روند. همانطو که در شکل دیده می‌شود در این دستگاه‌ها مایع و گاز به صورت متقابل و یا ناهمسو در تماس مداوم با یکدیگر قرار می‌گیرند. برای ایجاد سطح تماس زیاد بین دو فاز، در این برج‌ها از قطعات پرکن استفاده می‌شود.



پرکن‌ها

پکینگ‌ها یا پرکن‌های درون برج به دو روش منظم و نامنظم قرار می‌گیرند. پکینگ‌ها یا پرکن‌ها قطعاتی هستند که داخل برج‌های صنعتی قرار می‌گیرند. وظیفه اصلی آنها افزایش سطح تماس میان گاز (هوای ورودی به داخل برج) و مایع و در نتیجه بالا بردن راندمان کاری برج‌ها می‌باشد. پکینگ‌ها بسته به نوع کاربردشان در انواع مختلف و در سایزهای متفاوتی ساخته می‌شوند. در روش منظم تعداد بیشتری پرکن مورد استفاده قرار می‌گیرد و تمام آنها به صورت منظم در برج قرار می‌گیرد که باعث می‌شود افت فشار گاز کمتر شده، در نتیجه می‌توان از شدت جریان‌های بالا فاز گاز استفاده کرد. اما پرکردن برج به این شیوه به نسبت روش نامنظم هزینه بیشتری را دربرمی‌گیرد. در روش نامنظم پرکن‌ها به صورت تصادفی درون ستون ریخته می‌شوند و احتیاجی به نصب آنها درون برج نیست. پرکن‌هایی که در سایز کوچک‌تر ساخته می‌شوند سطح ویژه بالاتری دارند و شرایط بهتری را برای برخورد میان دو سطح فراهم می‌کند بنابراین باعث افزایش بازده کاری برج می‌شود. ولی تعداد بیشتری از آنها را باید در برج قرار داد.

پرکن‌های داخل برج بایستی دارای خصوصیات زیر باشند

- سطح تماس زیادی را بین مایع و گاز ایجاد کند یعنی سطح پرکن به ازاء واحد حجم ستون بایستی بزرگ باشد.
- دارای خصوصیات مطلوب جهت جریان سیال باشد. پرکن بایستی امکان عبور حجم زیادی از سیال را از سطح مقطع کوچکی بدون آنکه پدیده‌های انباشتگی^{۳۷} و طغیان^{۳۸} رخ دهد، فراهم سازد. افت فشار فاز گاز در اثر عبور از ستون پرشده بایستی کوچک باشد. بعلاوه افت فشار گاز بایستی حتی‌الامکان در اثر اصطکاک سطحی باشد. زیرا که این امر در مقایسه با اصطکاک شکلی در افزایش مقادیر مربوط به ضرایب انتقال جرم مؤثر است.
- از لحاظ شیمیایی در مقابل سیالاتی که بکار می‌رود بی‌اثر باشد.
- دارای استحکام باشد تا استفاده از آن به آسانی امکان پذیر باشد.
- ارزان قیمت باشد.

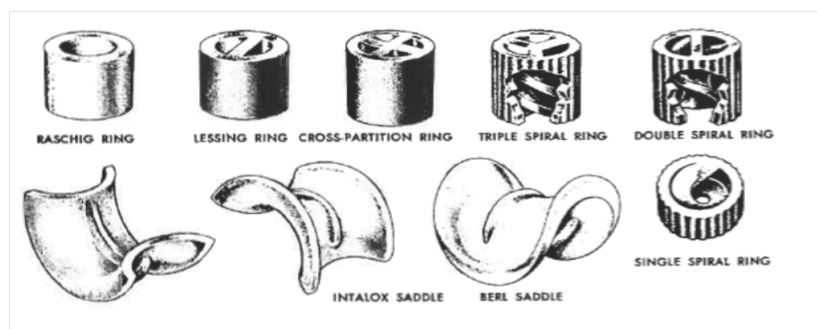
همانطور که پیش‌تر ذکر شد، پرکن‌ها به دو روش کلی منظم و نامنظم در برج‌ها قرار می‌گیرند.

³⁷ Loading

³⁸ Flooding

روش نامنظم

در این طریقه، پرکن‌ها را بطور عادی و تصادفی و بدون در نظر گرفتن هرگونه ترتیبی، به درون ستون می‌ریزند و پرکن‌ها پس از فرود بطور نامنظم انباشته می‌شوند. در گذشته از سنگ‌های خرد شده، شن و ذغال برای پر کردن استفاده می‌شد. امروزه از پرکن‌های متنوعی در برج‌ها استفاده می‌شود. از جمله می‌توان به حلقه‌های لسینگ (lessing)، پرکن‌های زینی شکل به نام برل (Berl) و اینتالوکس (Intalox)، حلقه‌های پال (Pall) با نام‌های Flesi rings، Cascade rings و Hy-pak و... اشاره نمود.



شکل (۲) - پرکن های نامنظم



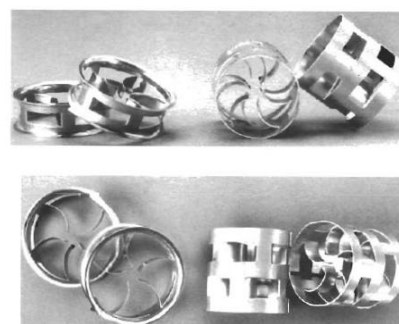
شکل (۴) - پرکن Pall



شکل (۳) - پرکن Hy-pack



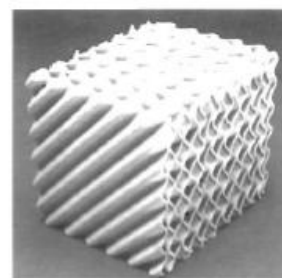
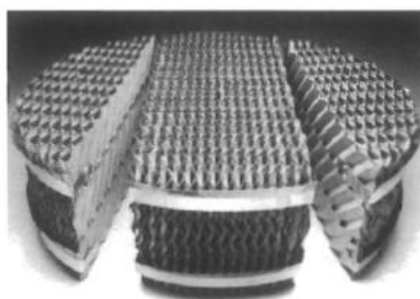
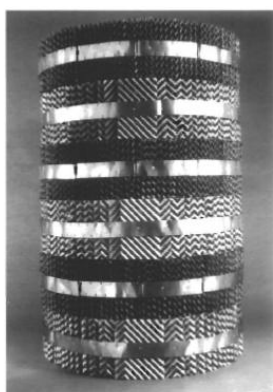
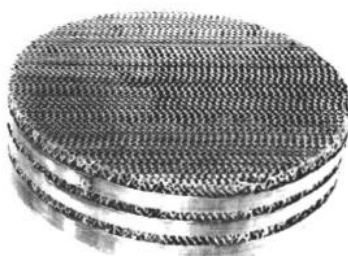
شکل (۶) - پرکن Cascade



شکل (۵) - پرکن Intalox

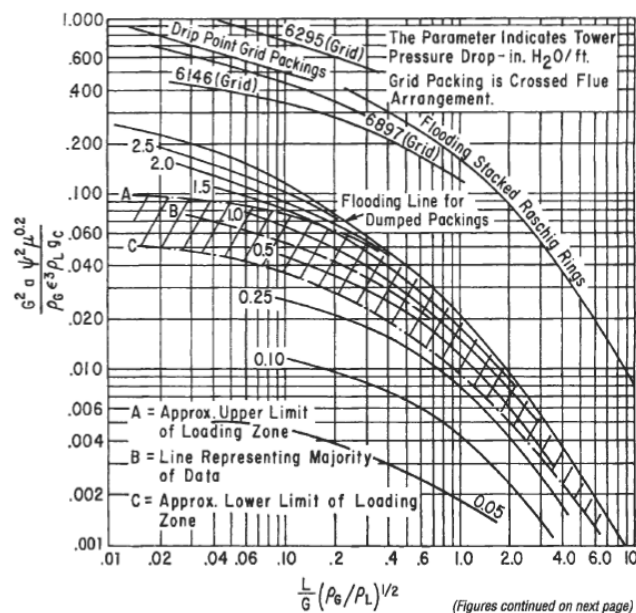
روش منظم

در این نوع روش، پرکن‌ها بسیار متنوع می‌باشند. سینی‌های جریان متقابل حالتی از پرکردن منظم به حساب می‌آیند. در صورت استفاده از این حالت افت فشار گاز کاهش یافته و امکان استفاده از شدت جریان‌های زیاد فاز گاز فراهم می‌شود. البته هزینه‌ی مربوط به پرکردن برج بیشتر از پرکردن نامنظم خواهد بود. استفاده از حلقه‌های راشینگ منظم در اندازه‌های بزرگ اقتصادی می‌باشد. پرکن‌های فلزی به شکل گوناگون دیده می‌شود.



طغیان و انباشتگی

شرایط طغیان در ستون‌های پرشده بصورت نامنظم بستگی به روش پرکردن آن (مرطوب یا خشک) و نیز بستگی به نحوه و میزان نشست پرکن‌ها دارد. منحنی زیر برای اغلب پرکن‌های نامنظم صادق است. اطلاعات اختصاصی‌تر را می‌توان از سازندگان این پرکن‌ها کسب نمود. حدود منحنی انباشتگی را خیلی دقیق نمی‌توان تعیین کرد. اغلب ستون‌های جذب و دفع برای افت فشار گاز بین ۲۰۰ الی ۴۰۰ N/m^2 بازاء هر متر از عمق پرکن‌ها طراحی می‌شوند. ستون‌های تفکیک اتمسفری برای افت فشار ۴۰۰ الی ۶۰۰ N/m^2 و برج‌های تقطیر تحت خلاء برای ۸ الی ۴۰ N/m^2 طراحی می‌گردند.



بررسی افت فشار

عوامل اولیه که بر روی افت فشار در برج‌های پرشده موثر است:

- شدت جریان سیالات.
- دانسیته و ویسکوزیته سیالات.
- اندازه، شکل، جهت‌گیری و سطح ذرات پرکن

افت فشار برای جریان های تک فازه

افت فشار حاصله از عبور یک سیال از درون بستر پر شده ای از جامد نظیر کره ، استوانه ، شن ، ماسه و غیره ، وقتی که این سیال به تنهایی فضای خالی موجود را پر کند با استفاده از معادله ی *Ergun* بدست می آید.

$$\frac{\Delta p}{Z} \frac{g_c \varepsilon^3 d_p \rho_g}{(1-\varepsilon)G'^2} = \frac{150(1-\varepsilon)}{Re} + 1.75$$

این معادله در مورد گازها و یا مایعات صادق است. عبارت سمت چپ ، یک نوع ضریب اصطکاک بشمار می آید. در عبارت سمت راست معادله ، میزان ضریب اصطکاک برای هر یک از انواع جریان دیده می شود. اگر جریان بطور کامل آرام باشد قسمت اول آن مؤثر است و اگر بطور کامل متلاطم باشد ، جمله ی دوم آن مؤثر واقع می شود. البته یک گرایش تدریجی از یک نوع جریان به نوع دیگر وجود دارد و لذا هریک از دو جمله اهمیت نسبی خود را با تغییر شدت جریان ظاهر می کنند. $Re = \frac{d_p G'}{\mu}$ و d_p قطر مؤثر ذرات است ، یعنی قطر کره ای که نسبت سطح بر حجم آن نظیر پر کن مورد نظر باشد.

افت فشار برای جریان دو فازه

در حرکت هم زمان گاز و مایع ، نتایج بدست آمده توسط محققین مختلف، در مورد افت فشار تفاوت های چشمگیری را نشان می دهد. و به این دلیل تفاوت جرم حجمی پرکن ها و یا به واسطه ی اختلاف در ضخامت دیواره ها می باشد. بنابراین تخمین افت فشار چندان دقیق نیست. در غالب موارد استفاده از نمودار قبل توصیه می شود. مقادیر مربوط به پرکن ها را از شرکت های سازنده ی آنها می توان کسب نمود.

تفاوت برج سینی‌دار با برج آکنه (پرکن)

در برج‌های انباشته، بطور معمول افت فشار نسبت به برج‌های سینی‌دار کمتر است. ولی اگر در مایع ورودی برج، ذرات معلق باشد، برج‌های سینی‌دار بهتر عمل می‌کنند. زیرا در برج‌های انباشته، مواد معلق ته‌نشین شده و سبب گرفتگی و برهم خوردن جریان مایع می‌گردد. اگر برج بیش از حد متوسط باشد، برج سینی‌دار بهتر است. زیرا اگر در برج‌های انباشته قطر برج زیاد باشد، تقسیم مایع در هنگام حرکت از بستر انباشته شده یکنواخت نخواهد بود. در برج‌های سینی‌دار می‌توان مقداری از محلول را به شکل فرآیندهای کناری از برج بیرون کشید، ولی در برج‌های انباشته این کار، شدنی نیست. کارهای تعمیراتی در درون برج‌های سینی‌دار، آسانتر انجام می‌گیرد. تمیز کردن برج‌های انباشته، از آنجا که باید پیش از هرچیز آنها را خالی کرده و بعد آنها را تمیز نمایند، بسیار پرهزینه خواهد بود. نکات حائز اهمیت به صورت زیر دسته بندی می‌گردند.

۱- ظرفیت بالا: پرکن‌ها باید امکان شدت جریان زیاد بدون ایجاد افت فشار و تجمع مایع در برج را برای سیال فراهم کنند. به علت وجود پدیده ی طغیان با حمل مایع به خارج از برج که توسط بخار می‌تواند در سرعت های بالاتر از سرعت مجاز سیال صورت پذیرد در ظرفیت های بالا وجود سطح آزاد وسیع ضروری است.

۲- افت فشار: افت فشار در برج ها بسیار مسئله ساز و ناشی از حرکت رو به بالای سیالات است. برای مثال در برج های تقطیر عبور بخار از سینی ها و ارتفاع مایع روی آنها یا از میان آکنه ها، 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 نقطه جوش اجزا نیز بالا می‌رود و برای تقطیر، به انرژی حرارتی بیشتری نیاز است که در این صورت ممکن است به تجزیه 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 نمونه گیری نصب می‌کنند.

۳- وزن و ماندگاری کم مایع: میزان بارگذاری و وزن ستون استوانه‌ای، در صورتیکه وزن پرکن‌ها و مایع مانده در برج کم باشد، کم خواهد بود. البته ماندگاری مایع باید مقداری باشد که نیروی محرکه موثری برای انتقال جرم فراهم شود.

۴- بزرگ بودن سطح فعال به ازای واحد حجم: به منظور افزایش کارایی، پرکنها باید سطح برخورد وسیعی را بین دو فاز سیال فراهم کنند. این امر با استفاده از پرکن‌هایی با شکل‌های نا منظم، که توزیع گسترده مایع را روی سطحی که در تماس مستقیم با سیال دوم است انجام می دهند، تحقق می یابد.

۵- حجم آزاد و وسیع به ازای واحد حجم کل: این ویژگی زمانی اهمیت می یابد که برای انجام واکنش‌های شیمیایی در فاز گاز، به مدت زمان خاصی نیاز باشد، مانند اکسیداسیون اسید نیتریک توسط جذب دی اکسید نیتروژن در یک محلول آبی.

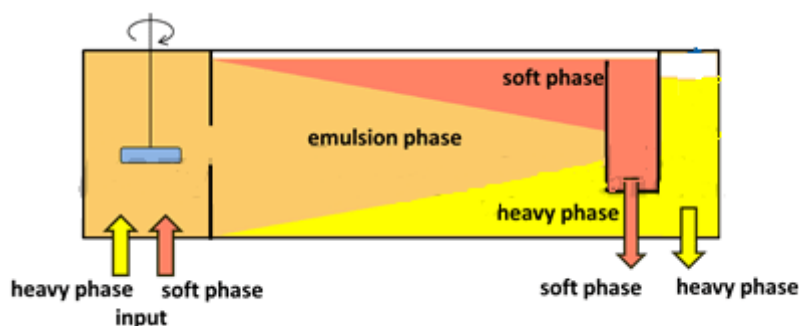
۶- سایر عوامل: هزینه پائین، مقاومت بالا در برابر سائیدگی، خوردگی و عمر طولانی و سازگار بودن پرکن‌ها با سطح داخلی برج.

برج‌های استخراج^{۳۹}

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. برای طراحی یک برج پر شده باید به عوامل مکانیکی نظیر افت فشار، ظرفیت جریان و بارگذاری توجه فراوان نمود، در استخراج مایع-مایع دو فاز را باید در تماس با یکدیگر قرار داد تا عمل انتقال جزء مورد نظر انجام شده و سپس جداسازی صورت گیرد. در استخراج، چون چگالی دو فاز نزدیک به یکدیگر می باشد، برای اختلاط و جداسازی نیروی محرکه کمی در دسترس است. در این حالت عمل مخلوط کردن دو فاز مشکل و جداسازی آن ها مشکل تر است. ویسکوزیته هر دو فاز به نسبت بالا و سرعت حرکت مواد در بیشتر قسمت های دستگاه های استخراج پایین است. در نتیجه در بسیاری از دستگاه های استخراج، نیروی محرکه لازم برای اختلاط و جداسازی با روش های مکانیکی تامین می-شود. محصول استخراج ممکن است سبک تر یا سنگین تر از محصول پسماند باشد در نتیجه محصول استخراج در بعضی از دستگاه ها از قسمت فوقانی و در بعضی دیگر از قسمت تحتانی دستگاه خارج می شود. مهم ترین دستگاه ها و برج هایی که در استخراج بکار برده می شوند عبارتند از:

دستگاه های مخلوط کننده- ته نشین کننده^{۴۰}

این دستگاه جزء متداول ترین دستگاه های استخراج محسوب می شود و عملکرد بسیار ساده ای دارد. راندمان مرحله ای آن ۷۵ تا ۹۵٪ می باشد. این دستگاه از یک بخش برای اختلاط دو فاز و بخش دیگری برای جداسازی آن دو تشکیل شده است. میکسر باید اختلاط یکنواختی را ایجاد کند. این اختلاط می تواند با تکان دادن کل مخزن، رها کردن حباب درون محتویات مخزن و یا جریان دادن محتویات از پایین به بالای مخزن صورت گیرد. ستلر به شکل مخزنی می باشد که به دو فاز مخلوط شده، اجازه ته نشینی می دهد.

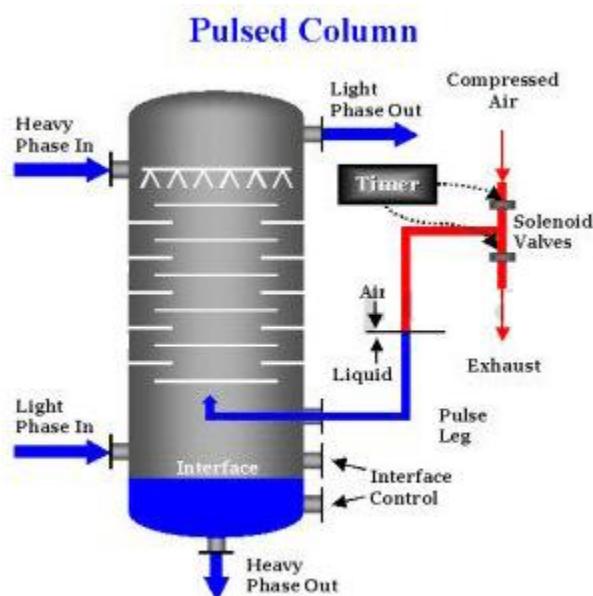


³⁹ Extracting Towers

⁴⁰ Mixer-Settlers

ستون‌های ضربه‌ای^{۴۱}

در این دستگاه پالسی به صورت هیدرولیکی به مایع داخل ستون اعمال می‌شود. چون این استخراج کننده‌ها هیچ قسمت متحرکی ندارند خیلی عملی هستند. صفحات سوراخ دار، طوری سوراخ شده اند که جریان عادی در آن‌ها رخ نمی‌دهد. عمل نوسان که روی مایعات انجام می‌شود، مایعات سبک و سنگین را از سوراخ‌ها عبور می‌دهد. ستون‌های پر شده نیز می‌توانند به صورت ضربه ای عمل کنند. در این دستگاه شدت انتقال جرم در برابر افزایش هزینه انرژی، افزایش می‌یابد.



اجزای ستون ضربه ای

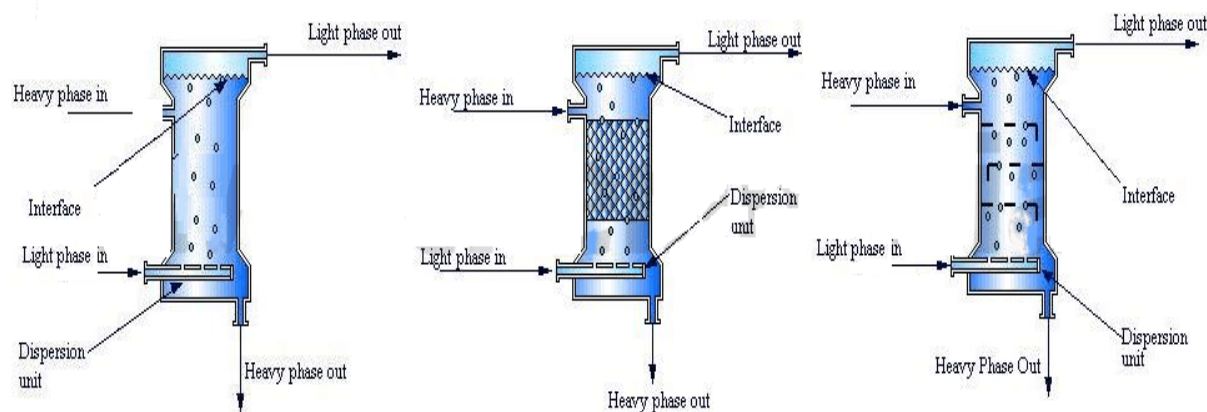
برج‌های استخراج پاششی و پرکن^{۴۲}

در برج پاششی مایع سبک‌تر از پایین وارد و با عبور از قسمتی شبیه به آب پاش به صورت قطرات کوچک پخش می‌شود. قطرات مایع سبک از داخل توده مایع سنگین که بطور پیوسته به طرف پایین حرکت می‌کند عبور کرده و به طرف بالا می‌روند. این قطرات درحین بالا رفتن انتقال جرم را انجام داده و بالای برج به هم ملحق می‌شوند. در روش گفته شده فاز سبک پراکنده و فاز سنگین پیوسته است. عکس این حالت نیز ممکن است، بدین صورت که فاز سنگین در قسمت فوقانی ستون در فاز سبک پاشیده می‌شود و به صورت پراکنده از داخل

⁴¹ Pulsed Columns

⁴² Spray and Packed Extracting Towers

جریان پیوسته مایع سبک، به طرف پایین حرکت کند. به منظور ایجاد تماس بیشتر فاز دارای شدت جریان بیشتر را پراکنده می‌کنند. اگر اختلاف ویسکوزیته بالا باشد، فاز دارای ویسکوزیته بالاتر را برای افزایش سرعت ته نشینی پراکنده می‌کنند. برج‌های پاششی به علت اختلاط محوری، راندمان کمی دارند و به سختی می‌توان از آن یک واحد تئوری به دست آورد.



برج‌های دارای سینی مشبک^{۴۳}

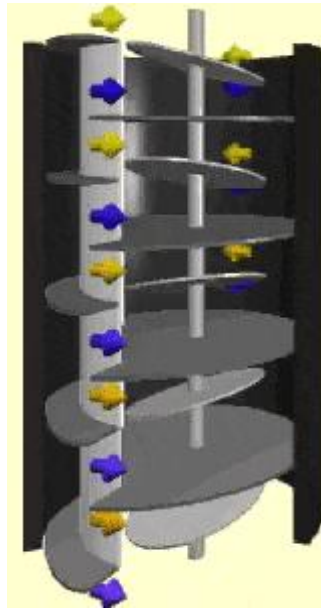
طرز کار این نوع از برج‌ها به صورت برج‌های پاششی است. با این تفاوت که در داخل این برج‌ها به فاصله‌های معین سینی‌های سوراخ‌داری قرار داده شده است. در این سینی‌ها بطور معمول مایع سبک فاز پراکنده را تشکیل می‌دهد، بطوریکه در زیر هر سینی لایه‌ای از مایع تشکیل می‌گردد که به درون مایع سنگین پاشیده می‌شود.

برج‌های استخراج صفحه‌ای^{۴۴}

این گونه از برج‌های استخراج صفحه‌هایی افقی دارند که مایع سنگین از بالای هر صفحه جریان یافته و از لبه به داخل فاز سنگین و به طرف بالا پاشیده می‌شود.

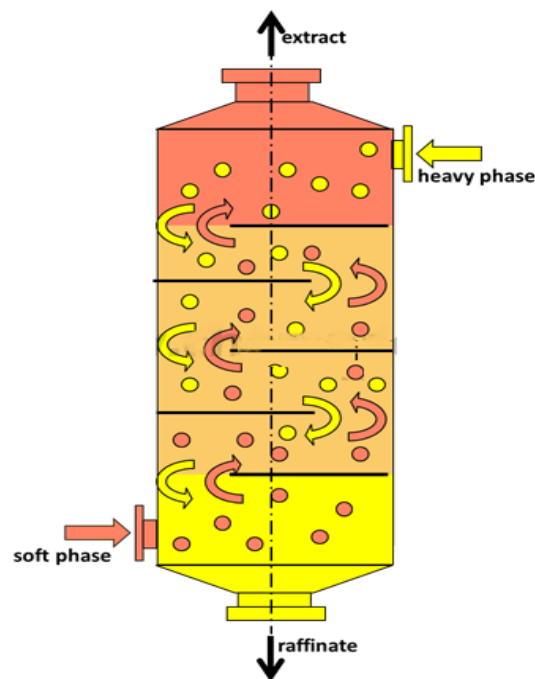
⁴³ Sieve Extracting Tower

⁴⁴ Plate Towers



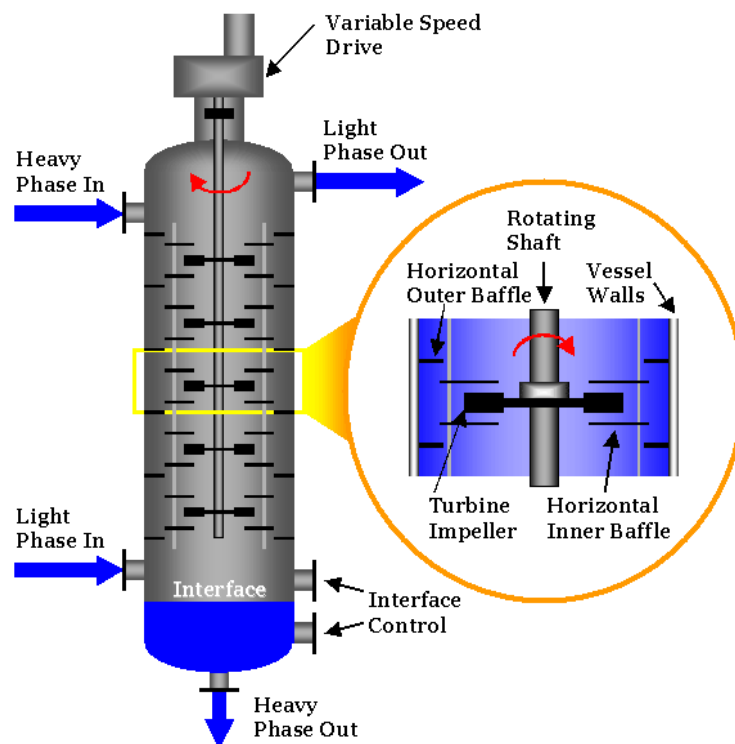
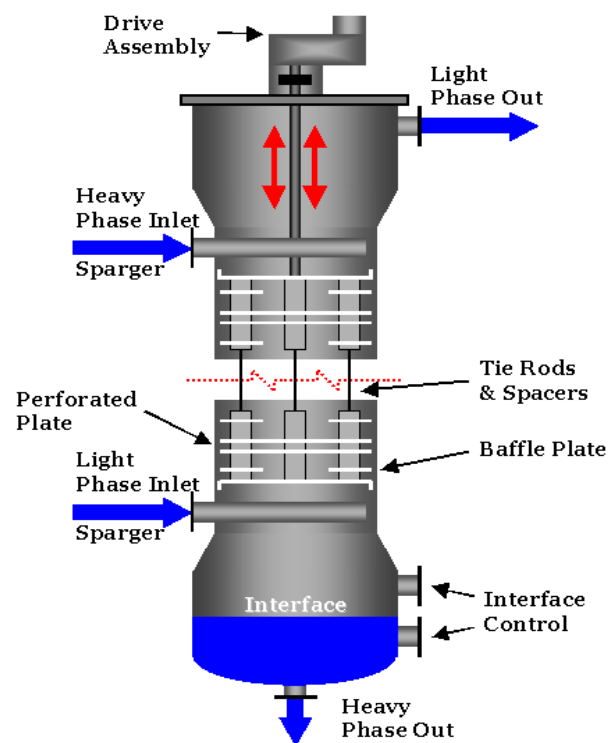
برج‌های استخراج همزن دار^{۴۵}

در این نوع از برج‌های استخراج، انرژی مکانیکی لازم را همزن‌های داخلی نصب شده روی میله‌دوار مرکزی تأمین می‌سازد. دیسک‌های مسطح مایعات را پراکنده و به طرف دیواره برج می‌رانند. در آنجا حلقه‌های استاتور^{۴۶} مناطق ساکنی را ایجاد کرده و دو فاز از یکدیگر جدا می‌شوند.



⁴⁵ Baffle Towers

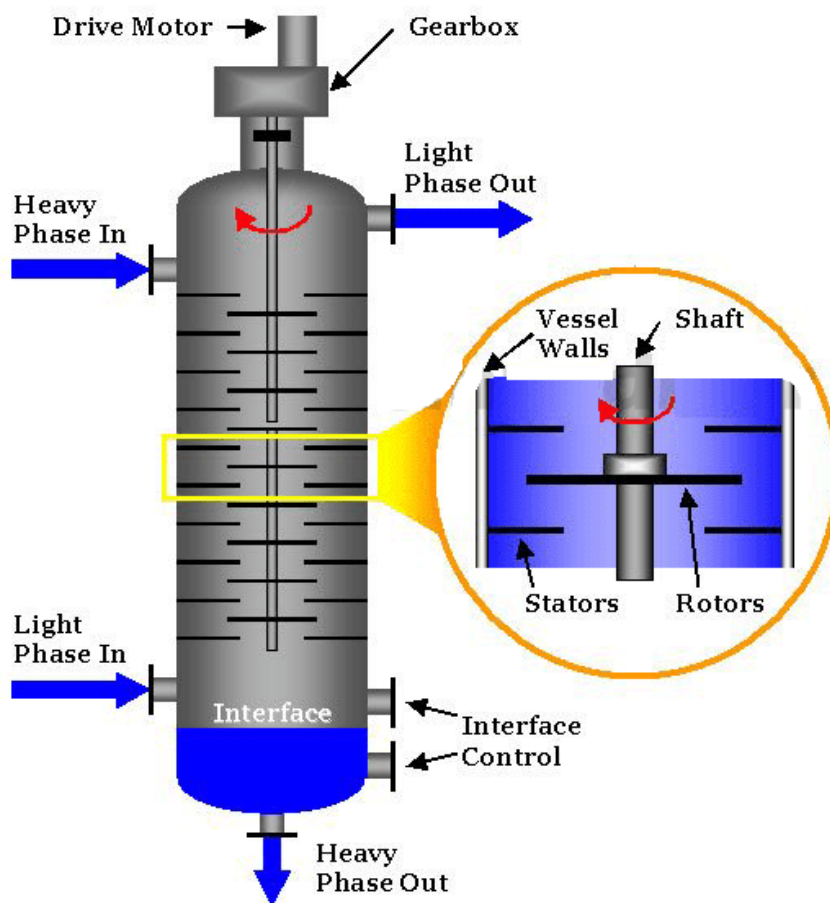
⁴⁶ Stator rings



تصاویر بالا نمونه‌هایی از برج‌های استخراج همزن‌دار می‌باشند

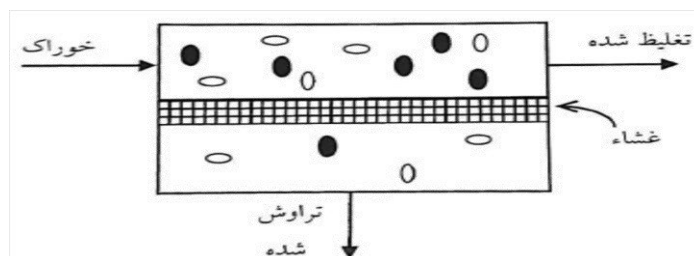
استخراج کننده با دیسک چرخان RDC و استخراج کننده CM

استخراج کننده CM از پره‌های توربینی دیسکی با پره‌های ساخت برای پخش و مخلوط کردن مایعات استفاده می‌کند. همچنین از صفحات افقی برای کاهش اختلاط محوری استفاده می‌نماید. دستگاه RDC خیلی مشابه CM است با این تفاوت که بافل‌های عمودی در آن وجود ندارد و همزدن در اثر دیسک‌های چرخان انجام می‌شود که بطور معمول سرعت بیشتری از پره‌های توربینی دارند.



جداسازی بهینه‌ی گازها به کمک غشاهای معمولی و غشاهای نانوکامپوزیتی

روش‌های متفاوتی به‌منظور اعمال فرآیند جداسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های پرکاربرد، استفاده از غشاهای مصنوعی است. فرآیندهای غشایی جزء روش‌های نوین جداسازی محسوب می‌شود، که مبتنی بر انتقال جرم هستند. اساس این فرآیندها استفاده از یک ماده حائل بنام غشا^{۴۷} بین دو فاز همگن است. این محیط می‌تواند بعنوان فاز سوم در نظر گرفته شود که بطورالزامی بصورت انتخابی عمل می‌نماید، و برخی سازنده‌های یک فاز تحت تاثیر نیروی محرکه غلظتی درون غشا منتقل و به فاز مقابل وارد می‌شوند. قابل ذکر است که بطورمعمول غشاها بصورت کامل انتخاب‌گر عمل نمی‌کنند؛ بلکه مقداری از سازنده‌هایی که انتظار می‌رود در ماده تغلیظ شده باقی بمانند را نیز عبور می‌دهند. این غشاها بطورمعمول از پلیمر و سرامیک‌ها ساخته می‌شوند. بهینه کردن عملکرد غشاها جهت بهبود فرآیند جداسازی گاز یکی از اولویت‌های تحقیقاتی در علم به شمار می‌رود. غشاهای ساخته‌شده با تکنولوژی‌های نوین متشکل از پلی اترسولفون/پلی(اتر-بلوک-آمید) بوده است که ذرات زئولیت در مقیاس میکرو و نانو به ماتریس پلیمری افزوده شده است. افزوده شدن نانوذرات زئولیت بهبود عملکرد جداسازی گازی غشاء نسبت به حضور میکروذرات را در پی داشته است. در این نوع غشاء، پلی اترسولفون نقش لایه نگه‌دارنده و پلی(اتر-بلوک-آمید) به‌عنوان لایه‌ی گزینش‌گر عمل می‌کند. در مرحله‌ی اول مواد پلیمری و نانوذرات زئولیت هر یک به‌صورت جداگانه سنتز می‌شدند. بدین‌صورت که نانوذرات زئولیت NaX از مواد با ترکیب هیدروکسید سدیم، آلومینات سدیم/سیلیکا/ آب سنتز شد. همچنین لایه‌ی نگه‌دارنده‌ی پلی اترسولفون با استفاده از روش تغییر فاز و به‌وسیله‌ی غوطه‌وری و لایه‌ی گزینش‌گر پلی اتر بلوک آمید یک بار به‌صورت خالص و یک بار حاوی نانوذرات زئولیت با روش تبخیر حلال سنتز شد. در ادامه غشا ساخته‌شده و عملکرد آن در جداسازی گازها مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، عملکرد گزینشگری غشا حاوی نانوذرات زئولیت جهت جداسازی گاز دی‌اکسیدکربن/نیتروژن از ۴۲/۰۳ به ۹۸ درصد و جداسازی اکسیژن/نیتروژن از ۰۳/۳ به ۷۶/۷ بهبود یافته است.



⁴⁷ Membrane

تغییرات دما و نرخ جذب

وقتی که گاز غنی وارد یک برج جذب می شود، دمای برج به مقدار قابل توجهی از پائین به بالا تغییر می کند. گرمای جذب ماده ی حل شده دمای محلول را افزایش می دهد، ولی تبخیر حلال سبب کاهش دما می شود. بطور معمول اثر کلی این دو عامل افزایش دمای مایع است، اما گاه دما در نزدیکی پائین برج از مقدار بیشینه ای می گذرد. شکل نیمرخ دما به سرعت جذب ماده ی حل شده، تبخیر یا چگالش حلال، و انتقال گرمای بین فازها بستگی دارد. برای به دست آوردن نیمرخ دقیق دمای مایع و گاز محاسبات طولانی مورد نیاز است. وقتی که دمای گاز ورودی به دمای خروجی مایع نزدیک باشد و گاز ورودی سیر شده باشد، تبخیر حلال تاثیر کمی دارد و افزایش دمای مایع بطور تقریبی متناسب با مقدار ماده ی حل شده جذب شده است. برج های آکنده استوانه های عمودی هستند که از دانه ها و قطعاتی به نام آکنه که دارای سطح به نسبت زیادی است پر می شوند. این برج ها جهت ایجاد تماس پیوسته بین جریان متقابل گاز و مایع استفاده می شوند. در این دستگاه، فاز مایع از بالا وارد برج شده و با چکیدن به روی آکنه ها، سطح تماس زیادتری جهت برخورد با گاز حاصل می نمایند. در یک تماس دهنده دیفرانسیلی مانند یک ستون آکنده، عملیات تماس می تواند همان طوری که به صورت دائمی و پیوسته در سرتاسر واحد اتفاق می افتد در نظر گرفته شود. بنابراین آنالیز یک تماس دهنده دیفرانسیلی مرحله ای می تواند براساس جزء دیفرانسیلی طولی یا ارتفاعی انجام شود. در ستون های پر شده، ارتفاعی از ستون که بتواند جداسازی هم ارز با یک صفحه تئوری را ایجاد کند، یک طبقه تئوری (نظری) یا $HETP^{48}$ نامیده می شود. روش دقیق تر مقایسه عملیات گوناگون تماس پیوسته بین فازها مستلزم بررسی یک سری از تماس دهنده های دیفرانسیلی مجزا و به دست آوردن نتایجی است که بتواند بر حسب ضرایب انتقال جرم، یا تعداد واحدهای انتقال بیان شود. هر واحد انتقال همانند یک مرحله تئوری است، با این تفاوت که تغییرات دیفرانسیلی در آن به شرایط تعادل و غلظت بستگی دارد. در ضمن هر طبقه تئوری مربوط به یک سری از تغییرات تعیین و محدود نیز می باشد.

⁴⁸ Height Equivalent to a Theoretical Plate

واحد تبخیر

تبخیر⁴⁹ عملیات واحد مهمی است که بطور معمول به منظور خارج کردن آب از مایعات غذایی رقیق بکار می‌رود، تا محصول مایع غلیظ شده ای بدست آید. بطور مثال خروج آب از مواد غذایی: باعث پایداری میکروبیولوژیکی و کاهش هزینه‌های حمل و نقل و انبارداری می‌گردد. تبخیر یک روش جداسازی مستقیم است که در آن دو فاز ایجاد می‌شود. یکی فاز غلیظ مایع و دیگری فاز بخار می‌باشد، هدف از تبخیر غلیظ کردن محلول حاوی یک ماده حل شده غیر فرار و یک حلال فرار است. تفاوت تبخیر با خشک کردن در این است که در تبخیر برخلاف خشک کردن محصول باقیمانده به جای یک جامد، مایع می‌باشد. تفاوت تبخیر و تقطیر نیز در این است که در تبخیر بخار بطور معمول یک جزئی است و حتی اگر بخار بصورت مخلوطی از چند جزء هم باشد تلاشی برای جداسازی آنها صورت نمی‌گیرد. ویژگی محلولی که در تبخیر مورد فرآیند قرار می‌گیرد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برخی از ویژگی‌های مهم محلول‌ها در فرآیند تبخیر عبارتند از:

غلظت؛ اگرچه بدلیل رقیق بودن محلول ورودی بیشتر خواص محلول شبیه حلال خالص است اما افزایش غلظت در اثر تبخیر حلال باعث افزایش گرانروی و چگالی محلول می‌شود. در نتیجه نقطه جوش محلول نیز بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد، افزایش گرانروی و چگالی محلول ادامه می‌یابد تا اینکه محلول سیر می‌شود یا آنقدر، ویسکوز می‌شود که دیگر انتقال گرما به مقدار کافی صورت نمی‌گیرد. در صورت ادامه جوشاندن این محلول سیر شده بلور تشکیل می‌شود که باید آنرا خارج کرد تا موجب گرفتگی لوله‌ها نشود.

کف کردن؛ برخی مواد آلی به هنگام تبخیر کف می‌کنند یک کف پایدار همراه با بخار از تبخیرکننده، خارج شده و ماندگی زیادی (حمل قطرات مایع با بخار) را موجب می‌شود.

حساسیت دمایی؛ برخی مواد همچون غذاها و داروها نسبت به حرارت حساس بوده و خواص خود را از دست می‌دهند در این موارد برای خارج کردن حلال سعی می‌شود که با تکنیک‌های خاصی دمای محلول و مدت زمان حرارت دادن را کاهش داد.

جرم گرفتگی یا رسوب گذاری؛ برخی از محلول‌ها سبب ایجاد رسوب در سطح لوله‌های تبخیر کننده میشوند. در اثر این موضوع ضریب انتقال حرارت کاهش یافته و هزینه گرم کردن افزایش پیدا می‌کند، بنابراین نیاز به تمیز کاری سطح لوله‌ها است.

خوردگی؛ در صورتی که خطر خوردگی تبخیر کننده توسط محلول وجود داشته باشد سعی می‌شود که جنس

⁴⁹ Evaporation

تبخیر کننده از فولاد ضد زنگ انتخاب گردد. علاوه بر موارد ذکر شده در طراحی تبخیر کننده‌ها خواص دیگری از محلول همچون سمیت، ظرفیت حرارتی، رادیواکتیویته و ... نقش دارند.

تفاوت تبخیر با آب زدایی و تقطیر

آب زدایی⁵⁰؛ خارج نمودن رطوبت از محصولات غذایی که باعث کاهش قابل ملاحظه جرم و حجم آنها می‌گردد. اما محصول نهایی فرآیند تبخیر به صورت مایع باقی می‌ماند.

تقطیر⁵¹؛ بخارات حاصل از فرآیند، بر اساس تفاوت در نقطه‌ی میعان به اجزای دیگری تقسیم می‌گردند. اما در فرآیند تبخیر، بخارات حاصله به اجزای دیگری تقسیم نمی‌گردند.

دسته بندی انواع تبخیرکننده

تبخیرکننده تک مرحله‌ای: اگر بخارات حاصله بدون این که از حرارت موجود در آنها استفاده شود، از مبدل حرارتی خارج گردند به چنین تبخیرکننده‌ای تبخیرکننده تک مرحله‌ای گویند. در این تبخیرکننده، بخارات تولید شده هدر می‌روند.

تبخیرکننده تک مرحله‌ای تحت خلاء؛ دارای یک مبدل حرارتی از نوع غیرتماسی که سبب می‌شود حرارت از بخار کم فشار به محصول منتقل گردد. یک محفظه تبخیر تحت خلأ می‌باشد که اختلاف دما بین بخار و محصول را افزایش داده؛ در نتیجه محصول در دمای به نسبت پایین به جوش آمده و لذا آسیب حرارتی به حداقل ممکن می‌رسد. یک کندانسور که بخارات حاصله را به سیستم خلأ منتقل می‌کند.

تبخیرکننده ی چند مرحله‌ای: اگر بخارات تولیدی به عنوان محیط گرمایشی در محفظه تبخیرکننده دیگری مجدد مورد استفاده قرار گیرند، تبخیرکننده را تبخیرکننده چند مرحله‌ای می‌نامند. در چنین تبخیرکننده‌ای، از بخارات زنده فقط در مرحله ی اول استفاده می‌گردد. استفاده از بخارات تولیدی به عنوان محیط گرمایشی در مراحل بعدی، سبب افزایش بازده مصرف انرژی در این سیستم می‌شود. در سیستم تبخیرکننده سه مرحله‌ای، محصولی که اندکی تغلیظ شده، از اولین مرحله، خارج و به عنوان خوراک به دومین مرحله وارد میشود. محصول خروجی از دومین مرحله به عنوان خوراک وارد مرحله سوم میگردد. محصول در حالی از مرحله سوم خارج میشود که به غلظت مورد نظر رسیده باشد. این آرایش به خصوص را سیستم خوراک پیش‌رونده گویند.

⁵⁰ Dehydration

⁵¹ Distillation

روش‌های جریان محصول در سیستم

سیستم خوراک پیش‌رونده، سیستم خوراک پس‌رونده، سیستم خوراک موازی.

ویژگی‌های ماده‌ی غذایی مایع، تأثیر زیادی بر روی کارایی فرآیند تبخیر دارد. خروج آب از محصول سبب افزایش غلظت محصول در نتیجه کاهش سرعت انتقال حرارت می‌گردد. افزایش غلظت محصول سبب افزایش نقطه جوش می‌گردد. این امر سبب کاهش اختلاف دمای بین محیط گرمایشی و محصول می‌شود که نتیجه‌ی آن کاهش سرعت انتقال حرارت می‌باشد. با توجه به حساسیت مواد غذایی به گرما، در فرآیند تبخیر باید کاهش دمای جوش و نیز زمان گرمایش مورد توجه قرارگیرد، تا از تخریب و صدمه دیدن بیش از حد محصول جلوگیری شود. رسوب مواد بر سطح مبدل حرارتی، انتقال حرارت را بطور جدی کاهش می‌دهد. از آن جا که تمیز کردن مکرر سطوح مبدل حرارتی، مستلزم خاموش کردن سیستم است، لذا ظرفیت فرآوری کاهش می‌یابد. مواد غذایی مایعی که حین تبخیر، کف می‌کنند به همراه بخار از سیستم خارج شده و در نتیجه باعث افت محصول می‌شوند. در طراحی سیستم‌های تبخیر، توجه به حفظ ویژگی‌های اولیه ماده غذایی مایع، دارای اهمیت می‌باشد.

انتخاب تبخیرکننده

در تبخیر حرارت سبب تغلیظ خوراک می‌شود بنابراین نوع حرارت دادن و میزان هم خوردگی سیستم تأثیر زیادی در نوع تبخیر کننده مورد استفاده دارد. حرارت می‌تواند بصورت مستقیم و غیر مستقیم به سیال داده شود. حرارت مستقیم در سیستم‌هایی مانند تبخیر خورشیدی و احتراق سوختها مشاهده می‌شود و در سیستم گرما دادن غیر مستقیم از میعان بخار آب (که درون لوله‌هایی در تبخیر کننده جریان دارد) استفاده می‌شود. بطور کلی بر اساس نحوه تامین حرارت لازم جهت تبخیر، تبخیرکننده‌ها بصورت زیر تقسیم بندی می‌شوند:

الف) استفاده از سطوح حرارتی لوله‌ای جهت تبخیر مایع.

ب) استفاده از کویل، ژاکت حرارتی، دیواره دو جداره و صفحه‌های صاف جهت تبخیر مایع.

ج) استفاده از تماس مستقیم جهت تبخیر مایع.

د) استفاده از تشعشع خورشیدی جهت تبخیر مایع.

برخی از مشکلات مهم که در طول تبخیر رخ می‌دهد عبارت است از:

- ویسکوزیته بالای محلول
- حساسیت دمای محلول
- تشکیل رسوب و نشست آن

این پارامترها و پارامترهایی که پیشتر ذکر شد، در طراحی تبخیرکننده مورد توجه قرار می‌گیرند. در انتخاب یک تبخیرکننده علاوه بر خصوصیات محلول، هزینه ساخت، هزینه عملیاتی، ظرفیت و زمان اقامت نقش تعیین کننده دارد.

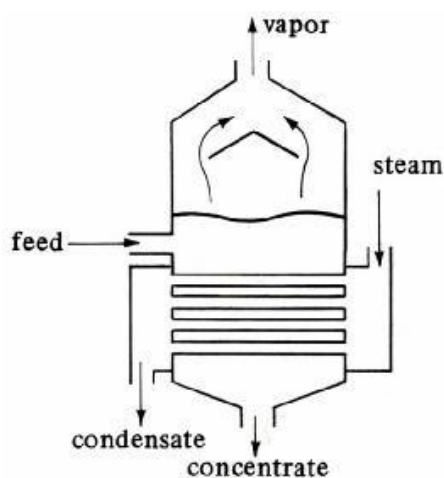
انواع تبخیرکننده ها و کاربردهای آن‌ها^{۵۲}

۱- تبخیرکننده از نوع کتری درباز^{۵۳}

ساده ترین نوع تبخیر کننده است و بصورت یک کتری درباز است که مایع در آن می جوشد. گرمای لازم از طریق میعان بخار موجود در یک ژاکت یا کوئل غوطه ور در کتری تامین می شود. در برخی حالتها نیز گرمایش بصورت مستقیم صورت می گیرد. این تبخیر کننده ها بسیار ارزان قیمت هستند و از لحاظ عملیاتی بسیار ساده می باشند اما اقتصاد حرارتی آنها پایین است و در بعضی مواقع نیاز به همزدن دارند.

۲- تبخیرکننده با گردش طبیعی و لوله افقی^{۵۴}

این تبخیر کننده ها در شکل زیر نشان داده شده است. در لوله‌های این تبخیر کننده همیشه بخار وجود دارد و عمل جوشش در خارج لوله ها انجام می شود و عمل کندانس (برای بخار) در داخل لوله‌ها صورت می گیرد. این تبخیر کننده‌ها برای سیالاتی که ویسکوزیته پایین دارند استفاده می‌شود و بطور معمول کاربرد صنعتی ندارد و برای سیالاتی که فاکتور فولینگ دارند، مناسب نیست. و ضریب کلی انتقال حرارت آن‌ها از دیگر انواع تبخیر کننده‌ها کمتر است.



تبخیر کننده با گردش طبیعی و لوله افقی

⁵² Evaporator type and applications

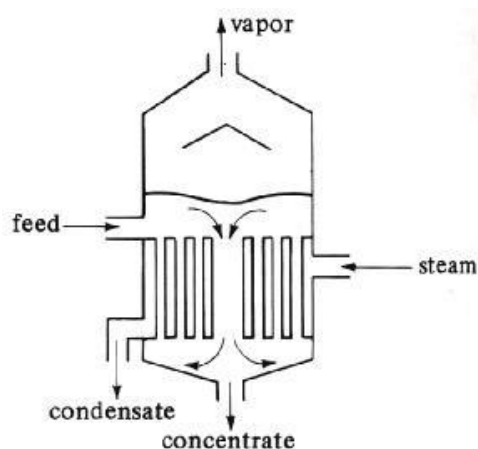
⁵³ Open Kettle or Pan

⁵⁴ Horizontal Tube Natural Circulation Evaporator

۳- تبخیرکننده با گردش طبیعی و لوله عمودی^{۵۵}

در این نوع تبخیر کننده ها عمل کندانس بخار در خارج لوله و عمل جوشش مایع در داخل لوله ها انجام می گیرد و خوراک می تواند از بالا یا از پایین وارد شود. این نوع تبخیر کننده برای سیالات رسوب زا مناسب است و چون گردش طبیعی است برای سیالات ویسکوز مناسب نیست. از این تبخیر کننده در صنعت قند استفاده می شود. ضریب کلی انتقال حرارت در این تبخیر کننده ها بیش از تبخیر کننده های با گردش طبیعی با لوله های افقی است. این تبخیر کننده به نام تبخیر کننده لوله کوتاه نیز موسوم است. طول لوله ها از ۴ تا ۶ فوت و قطر لوله ها بین ۲ تا ۴ اینچ است.

نکته: جنس بدنه این نوع تبخیر کننده از نوع استیل یا کربن استیل است و برای تغلیظ محلولهایی که به درجه حرارت حساس هستند؛ صنایع غذایی و دارویی مناسب نیست.



تبخیر کننده با گردش طبیعی و لوله عمودی

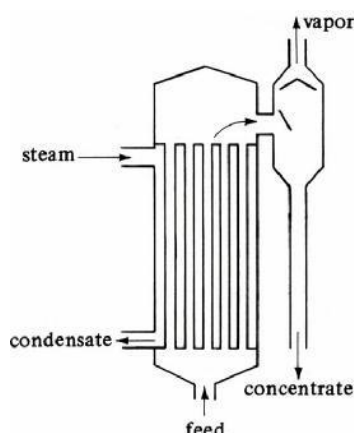
۴- تبخیرکننده با گردش طبیعی و لوله عمودی بلند^{۵۶}

در این تبخیر کننده طول لوله ها از ۱۲ تا ۳۶ فوت و قطر لوله ها بین ۷۵ فوت می باشد. میعان بخار در خارج لوله ها صورت می گیرد. زمان اقامت سیال از حالت قبلی کمتر است. از این تبخیر کننده در صنعت کاغذ استفاده می شود. از این مبدل ها برای گردش بیشتر استفاده می شود و سطح انتقال حرارت آن بیشتر است.

⁵⁵ Vertical Tube Natural Circulation Evaporator

⁵⁶ Long Tube Vertical Type Evaporator

نکته :این تبخیرکننده ارزانترین تبخیرکننده در واحد ظرفیت بخار است.



تبخیر کننده با گردش طبیعی و لوله عمودی بلند

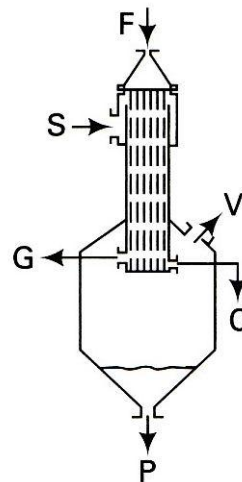
۵- تبخیرکننده با جریان رو به پایین^{۵۷}

یک تبخیر کننده از نوع لوله بلند است که خوراک از بالا وارد آن می‌شود و بصورت فیلم نازک روی دیواره لوله ها جریان می یابد. برای تغلیظ مایعاتی که نسبت به درجه حرارت حساس هستند (انواع آب میوه، پلاسمای خون، ویتامین ها و ...) همچنین سیالات ویسکوز از این مبدل استفاده می‌شود. قطر لوله ها بین ۲ تا ۴ اینچ است. نکته : مدت زمان اقامت مایعات در تبخیر کننده‌هایی که تا اینجا مورد بحث قرار گرفتند، برای عملیات ناپیوسته چند ساعت و برای عملیات پیوسته حدود یک ساعت است. پس مایعات باید برای مدت زمان طولانی در نقطه جوش خود باقی بمانند ولی در این تبخیر کننده زمان اقامت مایع بسیار کم و در حدود ۵ تا ۱۰ ثانیه است. به همین دلیل برای تبخیر مایعات حساس به درجه حرارت مناسب است.

نکته : مشکل عمده این تبخیر کننده ها این است که مایع باید بطور یکنواخت مانند فیلم روی سطح لوله ها جریان یابد و این مشکل را می توان با قرار دادن صفحه فلزی سوراخ دار (مشبک) یا توزیع کننده عنکبوتی حل نمود. همچنین می توان سیال را بصورت مستقیم به دیواره لوله ها اسپری کرد. نکته : هزینه ساخت و هزینه عملیاتی این تبخیر کننده ها زیاد است.

⁵⁷ Falling Film Evaporator

LEGEND
 C = condensate
 F = feed
 G = vent
 P = product
 S = steam
 V = vapor



تبخیرکننده با جریان رو به پایین

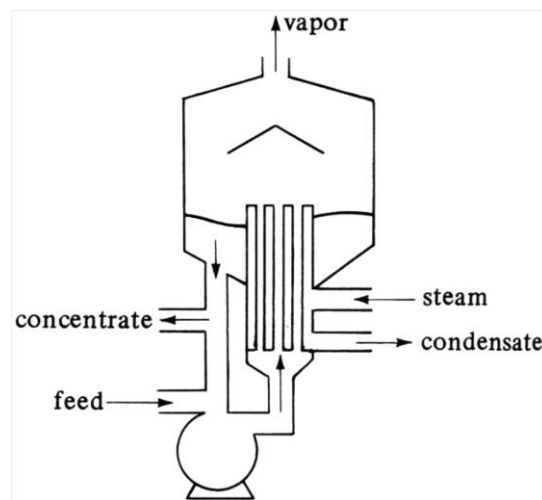
۶ - تبخیرکننده از نوع گردش اجباری^{۵۸}

در تبخیرکننده‌های با گردش طبیعی، مایع با سرعت مشخص وارد لوله‌ها می‌شود و با افزایش بخار تولید شده، سرعت خطی افزایش می‌یابد. ولی برای مایعات ویسکوز ضریب کلی انتقال کوچک است و این نوع تبخیر کننده‌ها غیراقتصادی هستند. در تبخیرکننده‌های با گردش اجباری برای خوراک دهی از پمپ استفاده می‌شود و با افزایش اغتشاش ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

نکته: این تبخیر کننده برای سیالات ویسکوز، رسوب‌زا، محلول‌های دارای نمک، محلول‌های خورنده، محلول‌هایی که تمایل به تشکیل کف دارند و همچنین محلول‌هایی که حساسیت دمایی بالایی دارند، مناسب است.

نکته: هزینه ساخت و هزینه عملیاتی این تبخیر کننده‌ها بسیار بالا است.

⁵⁸ Forced Circulation Type Evaporator



تبخیر کننده از نوع گردش اجباری

۷- تبخیرکننده همزن دار^{۵۹}

در تبخیرکننده‌ها مقاومت اصلی در برابر انتقال حرارت در فاز مایع قرار دارد. یکی از راه‌های افزایش اغتشاش (افزایش ضریب انتقال حرارت) استفاده از همزن‌های مکانیکی درون فاز مایع است. بنابراین این تبخیرکننده مانند یک تبخیر کننده Falling Film اصلاح شده عمل می‌کند. مایعات بسیار ویسکوز (ویسکوزیته بالای ۱۰۰۰ cP) و حساس به دما مانند ژلاتین، ماده خام پلاستیک، آنتی بیوتیک‌ها و آب میوه‌ها را می‌توان در این تبخیرکننده تغلیظ نمود.

نکته: این تبخیرکننده برای انتقال سریع گرما به مایعات بسیار ویسکوز مناسب است.

نکته: در تبخیرکننده‌های دیگر با افزایش ویسکوزیته، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد اما در این نوع تبخیرکننده کاهش ضریب انتقال حرارت کمتر است.

۸- تبخیرکننده با یک مسیر عبوری

در تبخیرکننده‌هایی که تنها یک مسیر عبوری دارند، خوراک مایع تنها یکبار از داخل لوله‌ها عبور می‌کند و با آزاد کردن بخار بصورت محلول غلیظ از تبخیرکننده خارج می‌شود بنابراین تمام تبخیر در یک مسیر صورت می‌گیرد. برای این دستگاه‌ها، نسبت تبخیر به خوراک محدود است ولی برای تبخیرکننده چند مرحله‌ای که عمل تغلیظ در آنها طی چند مرحله صورت می‌گیرد بسیار مناسب است. این تبخیرکننده برای مایعات حساس به دما مناسب است. اگر تحت شرایط خلاء کار کنیم، دمای مایع پایین نگه داشته می‌شود و با یک بار عبور

⁵⁹ Agitated Film Evaporator

سریع از داخل لوله‌ها، محلول غلیظ به مدت کوتاهی در دمای تبخیر می‌ماند و پس از خروج از تبخیر کننده به سرعت سرد می‌شود.

نکته: تبخیر کننده‌های همزن دار، تبخیر کننده‌های یک مسیره هستند.

۹- تبخیرکننده گردشی

در این تبخیرکننده‌ها حوضچه‌ای از مایع تعبیه شده است و خوراک ورودی با مایع درون حوضچه مخلوط می‌شود و مخلوط حاصل از داخل لوله‌ها می‌گذرد. و مایع تبخیر نشده به درون حوضچه بر می‌گردد. بنابراین تنها بخشی از کل تبخیر در یک مسیر انجام می‌شود. همه تبخیر کننده‌های گردشی اجباری به همین صورت کار می‌کنند.

نکته: این تبخیرکننده‌ها بصورت گردش طبیعی (اختلاف چگالی) و گردش اجباری پمپ کار می‌کنند.

نکته: تبخیرکننده‌های جریان رو به بالا و جریان رو به پایین بطور معمول گردش هستند.

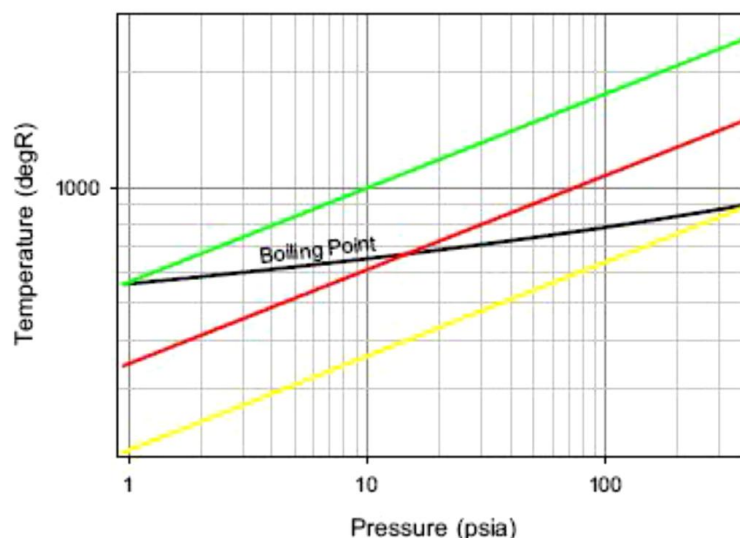
نکته: تبخیرکننده‌های گردشی در محدوده وسیعی از غلظت، بین غلظت خوراک و محلول غلیظ کاربرد دارند

نکته: تبخیرکننده‌های گردشی برای افزایش غلظت مایعات حساس به دما مناسب نیستند.

۱۰- تبخیرکننده با تراکم مجدد بخار^{۶۰}

در تبخیرکننده‌های چند مرحله‌ای حرارت مورد نیاز برای تغلیظ مراحل بعدی توسط بخار تولید شده در مراحل قبلی تامین می‌شود. بخار خروجی از مرحله اول هم‌دما با مایع موجود در آن است بنابراین برای انتقال حرارت نیروی محرکه‌ای وجود ندارد. یکی از راه‌های افزایش دمای بخار متراکم کردن آن است. شکل زیر تغییرات دما را با تراکم بخار اشباع نشان می‌دهد.

⁶⁰ Vapor Recompression Evaporator

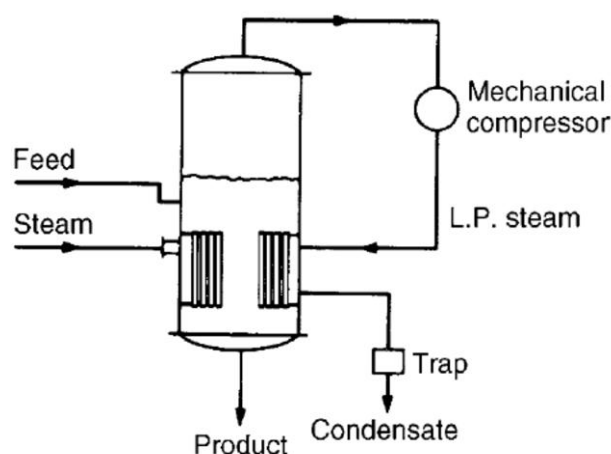


محل تلاقی این خطوط با خط Boiling Point دمای بخار را می دهد. تراکم آدیاباتیک بخار اشباع همیشه بخار سوپرهیت تولید می کند و در این صورت نیروی محرکه ایجاد می شود. متاسفانه با بالا رفتن دما و فشار، گرمای نهان بخار کوچکتر می شود. در تبخیرکننده با تراکم مجدد بخار، بخار خروجی تا فشارهای بالا متراکم می شود و دمای اشباع آن افزایش می یابد تا به عنوان سیال گرم کننده مورد استفاده قرارگیرد. دما و فشار بخار مصرفی از بخار خروجی بیشتر است. این تبدیل بدون هزینه نیست و برای افزایش فشار بخار خروجی از دو روش مکانیکی و حرارتی استفاده می شود.

الف) تبخیرکننده با تراکم مجدد مکانیکی^{۶۱}

در این روش برای افزایش فشار بخار خروجی از کمپرسور استفاده می شود. علت افزایش فشار بخار این است که بخار خروجی نمی تواند مایع را به غلظت نهایی برساند. از مزایای این تبخیرکننده این است که اقتصاد آن از یک تبخیرکننده یک مرحله ای خیلی بیشتر است و معادل یک تبخیرکننده ۱۰ تا ۱۵ مرحله ای است. بنابراین هدف از استفاده از این تبخیرکننده ها کم کردن Rate بخار مصرفی است. از معایب عمده این تبخیرکننده ها هزینه سنگین کمپرسور و هزینه نگهداری آن و مصرف برق زیاد است.

⁶¹ Mechanical Recompression Evaporator



شمایی از یک تبخیر کننده با تراکم مجدد مکانیکی

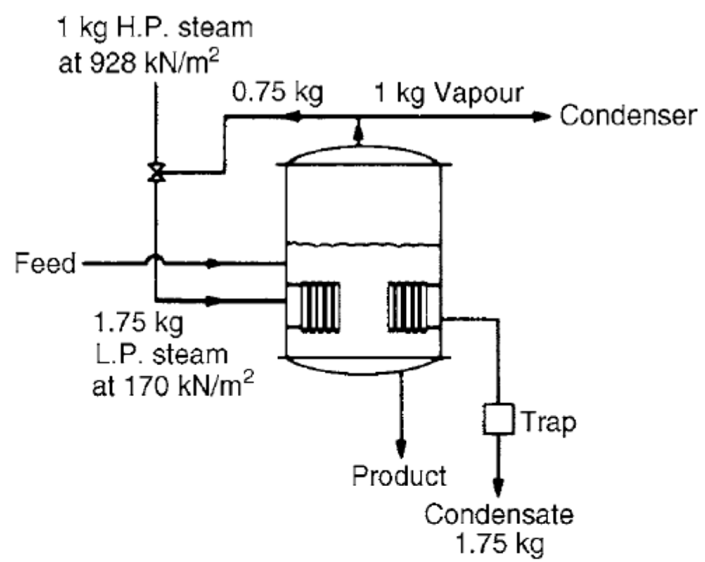
نکته : تبخیرکننده با تراکم مجدد مکانیکی در تغلیظ محلول‌های بسیار رقیق رادیواکتیو و تولید آب مقطر به کار می‌رود.

نکته : در تراکم مجدد بخار ، عامل اصلی در هزینه ، فشار خروجی از کمپرسور است.

ب) تبخیرکننده با تراکم مجدد حرارتی^{۶۲}

ممکن است افزایش فشار توسط سیستم های Steam ejector یا Steam jet صورت گیرد که به این سیستم‌ها تراکم مجدد حرارتی گویند. در این سیستم‌ها بخار با فشاری که توسط بخار خروجی از یک فواره اعمال می‌شود، متراکم می‌شود. این سیستم‌ها برای تبخیر در شرایط خلاء مناسب‌تر از تبخیرکننده با تراکم مجدد مکانیکی است همچنین از لحاظ هزینه ارزانه‌تر هستند ولی اشکال عمده این تبخیرکننده‌ها بازده پایین فواره ها و انعطاف ناپذیری سیستم نسبت به شرایط مختلف عملیاتی است. همچنین قابلیت آنها کمتر از نوع مکانیکی است.

⁶² Thermal Recompression Evaporator



شمایی از یک تبخیر کننده با تراکم مجدد حرارتی