

ویژگی‌های مهم راکتورهای شیمیایی :

کنترل شرایط واکنش: راکتورها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که شرایط واکنش (مانند دما، فشار، غلظت، pH و زمان اقامت (را به دقت کنترل کنند تا سرعت و بازدهی واکنش بهینه شود و محصولات جانبی ناخواسته به حداقل برسند).

انتقال حرارت و جرم: راکتورها باید به خوبی انتقال حرارت و جرم را انجام دهند تا واکنش به طور یکنواخت در کل حجم راکتور پیش برود و از ایجاد نقاط داغ یا سرد جلوگیری شود.

مخلوط کردن: در بسیاری از واکنش‌ها، مخلوط کردن مواد اولیه ضروری است تا سطح تماس بین آن‌ها افزایش یابد و سرعت واکنش بالا رود. راکتورها معمولاً دارای سیستم‌های همزنی هستند که این کار را انجام می‌دهند.

ایمنی: راکتورها باید به گونه‌ای طراحی شوند که ایمنی فرایند را تضمین کنند و از وقوع حوادثی مانند انفجار، آتش‌سوزی و نشت مواد شیمیایی جلوگیری کنند.

مقیاس‌پذیری: طراحی راکتورها باید به گونه‌ای باشد که بتوان آن‌ها را به راحتی از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی بزرگتر تبدیل کرد.

راکتور شیمیایی

1. معرفی انواع واکنش

شیمیایی

پلیمری

۲. عوامل موثر بر واکنش

غلظت و فشار

دما

کاتالیست

اختلاط

selectivity

۳. تقسیم بندی راکتورها

بر اساس نوع جریان

بر اساس عملکرد

بر اساس ساختمان

انواع خاص

طبقه بندی بر اساس جریان سیال :

راکتورهای پیوسته (Continuous Reactors)

راکتورهای لوله‌ای (PFR - Plug Flow Reactor): توی این راکتورها، سیال به صورت پیوسته از یک لوله عبور می‌کند و واکنش در طول لوله انجام می‌شود. فرض بر اینست که سیال به صورت "Plug" حرکت می‌کند، یعنی همه ذرات سیال در یک مقطع، سرعت یکسانی دارند.

راکتورهای مخزنی همزن دار پیوسته (CSTR - Continuous Stirred-Tank Reactor): توی این راکتورها، سیال به صورت پیوسته وارد یک مخزن می‌شود و با همزن مخلوط می‌شود. فرض بر اینست که محتویات مخزن کاملاً همگن هستند و غلظت و دما در همه جای مخزن یکسان است.

راکتورهای ناپیوسته (Batch Reactors): توی این راکتورها، مواد اولیه به داخل راکتور ریخته می‌شوند، واکنش انجام می‌شود و بعد از اتمام واکنش، محصولات تخلیه می‌شوند. این نوع راکتورها برای تولید مقادیر کم و یا واکنش‌هایی که نیاز به زمان طولانی دارند مناسب هستند.

راکتورهای نیمه پیوسته (Semi-Batch Reactors): این راکتورها ترکیبی از راکتورهای پیوسته و ناپیوسته هستند. مثلاً ممکنه یکی از مواد اولیه به صورت پیوسته به راکتور اضافه بشود در حالی که بقیه مواد از ابتدا داخل راکتور باشند.

۲ طبقه بندی بر اساس هندسه راکتور :

راکتورهای لوله‌ای (Tubular Reactors): این راکتورها معمولاً به شکل لوله‌های استوانه‌ای هستند و برای واکنش‌های فاز گازی و مایع استفاده می‌شوند.

راکتورهای مخزنی (Tank Reactors): این راکتورها معمولاً به شکل مخازن استوانه‌ای یا کروی هستند و برای واکنش‌های فاز مایع استفاده می‌شوند.

راکتورهای بستر ثابت (Fixed-Bed Reactors): توی این راکتورها، کاتالیزور به صورت ثابت در داخل راکتور قرار داده و سیال از بین ذرات کاتالیزور عبور می‌کند.

راکتورهای بستر سیال (Fluidized-Bed Reactors): توی این راکتورها، ذرات کاتالیزور به حالت معلق در میان و مثل یک سیال رفتار می‌کنند. این نوع راکتورها برای واکنش‌هایی که نیاز به انتقال حرارت بالا دارند مناسب هستند.

3. انواع راکتورهای شیمیایی بر اساس فازهای موجود:

* * راکتورهای فاز مایع (Liquid Phase Reactors): واکنش در فاز مایع انجام می‌شود.

* * راکتورهای فاز گاز (Gas Phase Reactors): واکنش در فاز گاز انجام می‌شود.

* * راکتورهای گاز-مایع (Gas-Liquid Reactors): واکنش بین فاز گاز و مایع انجام می‌شود.

* * راکتورهای سه‌فازی (Three-Phase Reactors): واکنش بین سه فاز (معمولاً جامد، مایع و گاز) انجام می‌شود.

راکتور شیمیایی همگن و ناهمگن

راکتورهای شیمیایی بر اساس شاخص نوع و تعداد فازهایی که واکنش در آن صورت می‌گیرد، به دو دسته همگن و ناهمگن تقسیم بندی می‌شوند. ساده ترین راکتورها راکتورهای همگن هستند که معمولاً یک فاز گازی یا مایع تک تکان داده می‌شود تا از حضور مناطق راکد جلوگیری شود. راکتورهای ناهمگن پیچیده تر هستند، که در آنها واکنش دهنده ها، محصولات و یک کاتالیزور احتمالی می‌توانند در فازهای مختلف وجود داشته باشند. یک مثال راکتور مایع-جامد (گاز-جامد یا مایع-جامد) است که در آن واکنش های کاتالیزوری ناهمگن انجام می‌شود.

سلام! خیلی خب، بیا در مورد انواع راکتورهای شیمیایی بر اساس فازها صحبت کنیم. این یه بحث خیلی جالب و مهمه تو مهندسی شیمی! به طور کلی، راکتورها رو میشه بر اساس فازهای درگیر تو واکنش دسته بندی کرد.

۱ راکتورهای همگن (Homogeneous Reactors):

تو این نوع راکتورها، همه مواد واکنش دهنده و محصولات تو یه فاز قرار دارن. یعنی یا همه مایع هستن، یا همه گاز.

مثال ها :

راکتورهای مخزنی پیوسته (Continuous Stirred-Tank Reactors) یا CSTR این نوع راکتور ها خیلی رایج هستن. یه مخزن دارن که مواد به طور مداوم وارد آن میشوند و محصولات هم به طور مداوم خارج میشوند. یک همزن هم دارن که مواد رو خوب مخلوط میکنه تا دما و غلظت در کل راکتور یکنواخت باشه.

راکتورهای لوله ای (Plug Flow Reactors) یا PFR اینها یک لوله هستن که مواد از یه سر آن وارد میشوند و از آن سر دیگه خارج میشوند. فرض بر اینه که هیچ اختلاطی تو جهت جریان وجود نداره و مواد مثل یه "دوشاخه" از داخل لوله رد میشود.

کاربردها: واکنش های پلیمریزاسیون، واکنش های تخمیر، و خیلی از واکنش های شیمیایی دیگه که در فاز مایع یا گاز انجام میشوند.

۲ راکتورهای ناهمگن (Heterogeneous Reactors):

در این نوع راکتورها، مواد واکنش دهنده در فازهای مختلف قرار دارن. مثلاً یه فاز جامد داریم که به عنوان کاتالیزور عمل میکنه و یه فاز مایع یا گاز که مواد واکنش دهنده توش حل شدن یا از روش رد میشوند.

مثال ها :

راکتورهای بستر ثابت (Fixed-Bed Reactors) اینها تعداد زیادی ذرات جامد کاتالیزور دارن که در یک لوله یا مخزن چیده شدن. مواد واکنش دهنده از بین این ذرات رد میشن و واکنش انجام میشه.

راکتورهای بستر سیال (Fluidized-Bed Reactors): در اینها، ذرات جامد کاتالیزور توسط یه جریان گاز یا مایع معلق نگه داشته میشوند. این باعث میشه که اختلاط خیلی خوبی بین فاز جامد و سیال ایجاد بشه و انتقال حرارت و جرم هم خیلی خوب انجام بشه.

راکتورهای سوسپانسیونی (Slurry Reactors): در اینها، ذرات جامد کاتالیزور در یک مایع معلق هستند و یک همزن هم مواد رو مخلوط میکنه.

کاربردها: فرآیندهای پالایش نفت، تولید آمونیاک، و خیلی از واکنشهای کاتالیزوری دیگه.

راکتورهای شیمیایی بر اساس فاکتورهای مختلفی دسته‌بندی می‌شوند، از جمله:

نحوه عملکرد :

راکتورهای ناپیوسته (Batch Reactors): مواد اولیه به طور کامل وارد راکتور می‌شوند، واکنش انجام می‌شود و سپس محصولات تخلیه می‌شوند.

راکتورهای پیوسته (Continuous Reactors): مواد اولیه به طور مداوم وارد راکتور می‌شوند و محصولات به طور مداوم خارج می‌شوند.

فازهای موجود :

راکتورهای فاز مایع (Liquid Phase Reactors): واکنش در فاز مایع انجام می‌شود.

راکتورهای فاز گاز (Gas Phase Reactors): واکنش در فاز گاز انجام می‌شود.

راکتورهای گاز-مایع (Gas-Liquid Reactors): واکنش بین فاز گاز و مایع انجام می‌شود.

راکتورهای سه‌فازی (Three-Phase Reactors): واکنش بین سه فاز (معمولاً جامد، مایع و گاز) انجام می‌شود.

نوع کاتالیزور :

راکتورهای همگن (Homogeneous Reactors): کاتالیزور در همان فاز مواد اولیه است.

راکتورهای ناهمگن (Heterogeneous Reactors): کاتالیزور در فاز متفاوتی نسبت به مواد اولیه است.

شکل و ساختار :

راکتورهای لوله‌ای (Tubular Reactors)

راکتورهای مخزنی (Tank Reactors)

راکتورهای بستر ثابت (Fixed Bed Reactors)

راکتورهای بستر سیال (Fluidized Bed Reactors)

طراحی و عملکرد راکتورهای شیمیایی :

طراحی و عملکرد راکتورهای شیمیایی به عوامل مختلفی بستگی دارد، از جمله:

نوع واکنش شیمیایی: نوع واکنش شیمیایی تعیین می‌کند که چه نوع راکتوری برای آن مناسب است.

شرایط واکنش: شرایط واکنش (دما، فشار، غلظت و غیره) باید به دقت کنترل شوند تا سرعت و بازدهی واکنش بهینه شود.

خواص مواد: خواص مواد اولیه و محصولات (مانند ویسکوزیته، چگالی و حلالیت) بر طراحی راکتور تأثیر می‌گذارند.

هزینه: هزینه ساخت و بهره‌برداری از راکتور باید در نظر گرفته شود.

-انواع راکتورهای شیمیایی

تقسیم بندی های گوناگونی برای راکتور های شیمیایی بر اساس شاخص های متفاوتی صورت گرفته است.

راکتورهای شیمیایی بر اساس شاخص نوع و تعداد فازهایی که واکنش در آن صورت می گیرد، به صورت زیر تقسیم بندی می شوند.

۱- راکتورهای تک فازی:

در این راکتورها واکنش در فاز گاز یا در فاز مایع انجام می شود.

۲ راکتورهای چند فازي:

در این راکتورها واکنش میان فازهای گاز و مایع یا میان دو فاز مایع یا میان فازهای سیال و جامد انجام می شود.

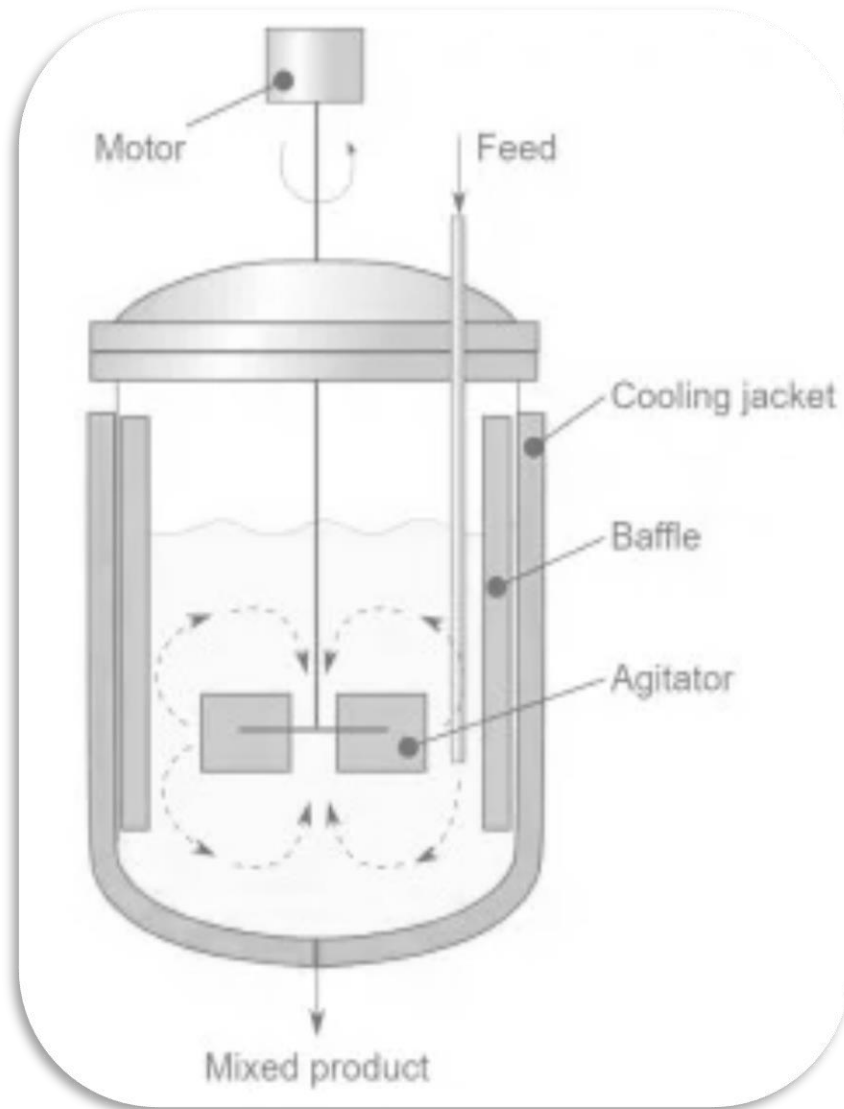
اما در تقسیم بندی دیگری از راکتورها، بر حسب نحوه کار به سه گروه کلی تقسیم بندی می شوند.

اجزا و ساختار راکتورهای Batch

• اجزای اصلی :

۱. **تانک (مخزن):** محیطی برای واکنش مواد اولیه (دارای مخازن ورودی و خروجی) .
 ۲. **میکسر:** برای مخلوط کردن و تبادل حرارت بین مواد .
 ۳. **سیستم کنترل:** برای کنترل دما، فشار و سایر پارامترهای مرتبط .
 ۴. **پمپها:** برای انتقال مواد بین مراحل یا از تانک .
 ۵. **سیستم حفاظت و ایمنی:** شامل سیستمهای حفاظتی برای پیشگیری از اتفاقات ناخواسته .
 ۶. **سیستم جداسازی محصول:** برای جداسازی محصولات نهایی از مواد باقی مانده .
 ۷. **سیستمهای اندازه گیری:** برای نظارت بر پارامترهای واکنش و کیفیت محصولات .
- طراحی دقیق و متناسب با خصوصیات واکنشها، نوع مواد شیمیایی و شرایط فرآیند برای دستیابی به بهترین عملکرد و بهره‌وری ضروری است.





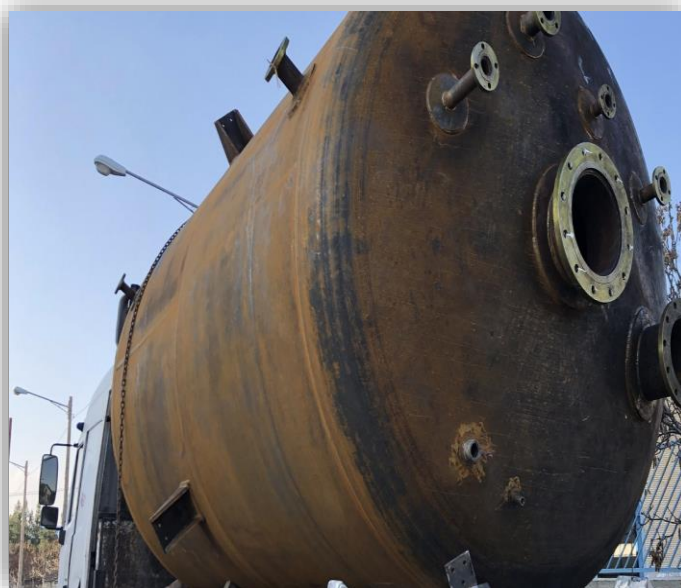


راکتورهای ناپیوسته نسبت به انواع دیگر راکتورها نیاز به سیستم های کنترلی کمتری دارند و ساختار ساده تری نیز دارند. مصرف این نوع از راکتورها در مواردی است که انجام واکنش مورد نظر به مدت زمان نسبتاً طولانی نیاز دارند تا واکنش گرها فرصت انجام واکنش را در یک راکتور ناپیوسته داشته باشند.

راکتورهای نیمه پیوسته

این نوع از راکتورها دارای انواع مختلفی هستند، دارای فقط ورودی و یا خروجی ماده هستند. راکتورهای نیمه پیوسته دارای همان محدودیت های راکتور ناپیوسته هستند اما از نظر مزایا نسبت به راکتورهای ناپیوسته، دارای کنترل مناسب تر حرارت و واکنش های نامطلوب می باشد. بدین صورت که می توان با وارد نمودن تدریجی یکی از اجزای واکنش دهنده با غلظت پایین از ایجاد محصولات نامطلوب جلوگیری نمود. از موارد استفاده راکتورهای نیمه پیوسته می توان به کاربرد آن برای واکنش های دو فازی نام برد که گاز به صورت حباب وارد فاز مایع شود.

دو نوع غالب از ترکیب مواد در راکتور نیمه پیوسته وجود دارد که در نوع اول راکتور از یکی از مواد اولیه پر شده و ماده یا مواد اولیه دیگر به آن اضافه می شوند. در نوع دیگر مواد اولیه به طور همزمان وارد راکتور می شوند و تا پایان واکنش هیچ ماده ای از راکتور خروج پیدا نمیکنند.



راکتورهای پیوسته

در راکتورهای پیوسته، به طور مداوم ورودی ماده اولیه و خروجی محصول وجود دارد و از آن جایی که در این حالت ترکیب درصد ورودی و خروجی با زمان تغییر نمی کند که اصطلاحاً حالت پایا (Steady State) گفته می شود.

زمانیکه لازم باشد تا حجم زیادی از محصول در زمانی کم تولید شود، راکتورهای پیوسته بهترین گزینه برای انجام واکنش هستند. در این نوع از راکتور ها، دستگاه های و ابزار های کمکی و کنترلی بسیاری مورد نیاز است تا بتوان کنترل کیفیت محصولات واکنش را به بهترین نحو انجام داد.

جدا از دو تقسیم بندی اصلی بالا، راکتورهای لوله ای و مخزنی و همچنین بستر سیال و بستر ثابت انواعی از راکتورهای زیر مجموعه تقسیم بندی های ذکر شده در بالا هستند که بسته به نیاز هر فرایند از هر کدام از آنها مورد استفاده قرار میگیرد

انواع راکتورهای شیمیایی:

راکتورهای شیمیایی به عنوان قلب فرآیندهای شیمیایی صنعتی، در اشکال و طراحی های مختلف توسعه یافته اند تا پاسخگوی واکنش های گوناگون تحت شرایط عملیاتی متنوع باشند. طبقه بندی این راکتورها تنها محدود به جریان سیال نیست، بلکه می توان آنها را بر اساس حالت فازی واکنش، استفاده از کاتالیست، وضعیت بستر، یا ویژگی های ساختاری نیز بررسی کرد. در این بخش، علاوه بر دسته بندی های رایج (PFR, CSTR, Batch و غیره)، به راکتورهای پیشرفته تر و ویژه نیز پرداخته می شود.





***راکتور نیمه پیوسته (Semi-Batch)** ترکیبی از ویژگی‌های Batch و CSTR است. در این راکتورها برخی اجزای واکنش دهنده به صورت تدریجی تزریق می‌شوند، در حالی که محصول خروجی ممکن است تا پایان واکنش در راکتور باقی بماند یا به آرامی خارج شود. این نوع راکتور در واکنش‌هایی که با آزاد شدن حرارت شدید همراه است

یا واکنش دهنده ناپایدار دارند، بسیار مفید است؛ چراکه نرخ واکنش را می‌توان از طریق کنترل نرخ تزریق تنظیم کرد.

***راکتور بستر متحرک (Moving-Bed Reactor)** در این نوع طراحی، فاز جامد (معمولاً کاتالیست) به‌طور پیوسته یا متناوب در راکتور جابجا می‌شود، در حالی که فاز سیال از میان آن عبور می‌کند. این راکتورها در صنایعی که نیاز به تعویض پیوسته کاتالیست یا حفظ دمای یکنواخت دارند (مانند بازیافت نفت سنگین یا ریفرمینگ بخار)، بسیار پرکاربردند. کنترل دقیق دما و حفظ توزیع یکنواخت فاز جامد از چالش‌های این نوع راکتور است.

***راکتور بستر سیال (Fluidized-Bed)**، همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، نوعی راکتور پیشرفته است که در آن ذرات جامد به کمک جریان گاز یا مایع در حالت معلق نگه داشته می‌شوند. این طراحی موجب بهبود انتقال حرارت و جرم، افزایش نرخ واکنش و حذف نقاط داغ می‌شود. از این راکتورها به‌طور گسترده در تولید مواد شیمیایی گازی، کراکینگ کاتالیستی، و احتراق زغال‌سنگ استفاده می‌شود.

***راکتور غشایی (Membrane Reactor)** نوعی راکتور نوآورانه است که در آن واکنش و جداسازی به‌صورت هم‌زمان انجام می‌گیرد. به‌طور معمول، غشای نیمه‌تراوا درون راکتور تعبیه شده که اجازه عبور انتخابی یک یا چند محصول را می‌دهد. این ویژگی باعث می‌شود تعادل شیمیایی واکنش به سمت تولید بیشتر محصولات رانده شود. راکتورهای غشایی برای واکنش‌های برگشت‌پذیر مانند تولید هیدروژن یا آمونیاک کاربرد ویژه دارند.

***راکتور میکروکانالی (Microreactor)** طراحی نوینی است که با کاهش چشمگیر ابعاد راکتور به اندازه میکرومتری، باعث افزایش چشمگیر نسبت سطح به حجم و بهبود انتقال حرارت و جرم می‌شود. این راکتورها در تولیدات دارویی، نانوذرات و واکنش‌های سریع و پرخطر بسیار ارزشمندند. همچنین، امکان انجام آزمایش‌های سریع با حجم کم و افزایش ایمنی فرآیند از مزایای مهم آن‌هاست.

***راکتورهای بیولوژیکی (Bioreactors)** نوع خاصی از راکتورها هستند که برای واکنش‌های زیستی شامل سلول‌های زنده، آنزیم‌ها یا میکروارگانیسم‌ها طراحی شده‌اند. در این راکتورها شرایط محیطی (pH، دما و اکسیژن) باید با دقت تنظیم شود تا بهترین شرایط رشد یا واکنش بیوشیمیایی فراهم گردد. راکتورهای بیولوژیکی به انواع CSTR، Batch، و Airlift تقسیم می‌شوند و در صنایع داروسازی، تولید اتانول و زیست‌فناوری کاربرد فراوان دارند.

***راکتورهای فوتوشیمیایی (Photoreactors)** برای واکنش‌هایی که نیازمند نور یا تابش خاص هستند (مانند نور UV یا مرئی) طراحی می‌شوند. این راکتورها اغلب شامل منبع نوری داخلی یا خارجی‌اند و برای سنتزهای خاص آلی، تصفیه آب یا تولید ترکیبات حساس به نور استفاده می‌شوند. به دلیل پیچیدگی در طراحی مسیر نور و جذب تابش، این راکتورها معمولاً به صورت آزمایشگاهی یا نیمه‌صنعتی استفاده می‌شوند.

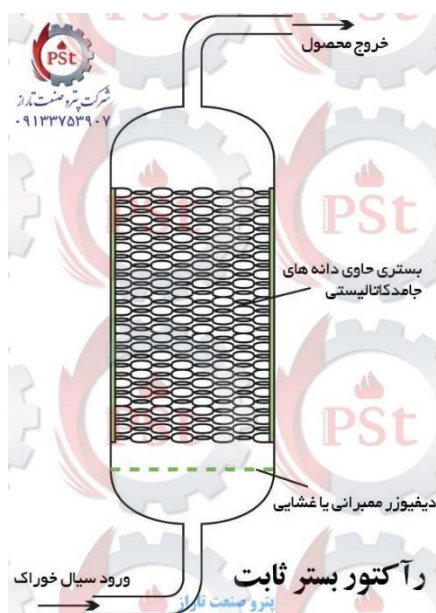
در نهایت، لازم به ذکر است که بسیاری از فرآیندهای صنعتی از ترکیب چند راکتور به صورت سری، موازی یا در قالب فرآیندهای مجتمع استفاده می‌کنند تا بتوانند به بازده بالا، صرفه‌جویی انرژی و کنترل دقیق‌تر واکنش دست یابند. انتخاب راکتور نه تنها به نوع واکنش بلکه به عوامل اقتصادی، ایمنی، محدودیت‌های زیست‌محیطی و قابلیت مقیاس‌پذیری نیز وابسته است.

راکتور بستر ثابت (Fixed Bed Reactor) :

راکتورهای بستر ثابت متشکل از یک یا تعدادی لوله می‌باشند که معمولاً بصورت قائم قرار گرفته و آکنده از دانه‌های کوچک منفرد کاتالیست هستند که به شکل اتفاقی و غیر منظم در راکتور ریخته شده و مکان آنها ثابت است. سیال از فواصل موجود در بین قطعات کاتالیست عبور می‌کند. ممکن است جریان نفوذی به داخل فضای خالی کاتالیست نیز وجود داشته باشد. راکتور بستر ثابت نیاز به دستگاه جانبی اندکی دارد و برای واحدهای کوچک مناسب است.

شکل دانه‌های کاتالیست مختلف می‌باشد نظیر قرص، استوانه، کره و غیره. در بعضی شرایط به ویژه در مورد کاتالیست‌های فلزی مثل پلاتین بجای استفاده از دانه‌های کاتالیست، سیم‌هایی از فلز مورد نظر را به شکل توری در می‌آورند. لایه‌های متعدد این نوع توری بستر کاتالیست را تشکیل می‌دهد. از کاتالیست طوری شکل در بعضی از فرآیندهای صنعتی مثل اکسید کردن آمونیاک و اکسید کردن استالدئید به اسید استیک استفاده می‌شود.

به دلیل نیاز به تبادل گرما ممکن است استفاده از یک لوله با قطر زیاد و آکنده از دانه‌های کاتالیست مطلوب نباشد، لذا ضروری است که از چندین لوله باریک‌تر که مجموعاً درون یک پوسته جای می‌گیرند استفاده شود. تبادل انرژی با محیط از گردش و یا جوشاندن یک سیال در فضای بین لوله‌ها حاصل می‌شود. در واکنش‌های گرمازا اگر دمای واکنش بالا باشد قطر لوله‌ها را کوچکتر انتخاب می‌کنند تا از افزایش شدید دما در مخلوط واکنش جلوگیری شود. لوله‌هایی به قطر ۲٫۵ سانتیمتر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. مسئله تعیین قطر لوله‌ها و تعداد آنها به منظور بدست آوردن محصولات مورد نظر، یکی از موارد اساسی در طراحی این نوع راکتور بشمار می‌رود



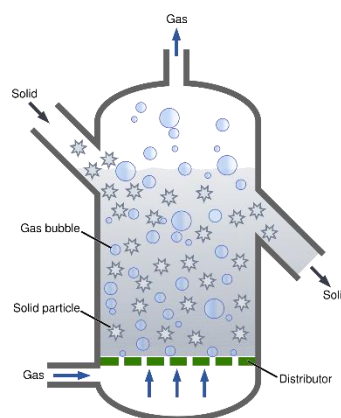
راکتور بستر سیال (Fluidized Bed Reactor) :

اصولا پدیده سیالیت هنگامی روی می دهد که یک سیال (مایع یا گاز) از میان توده ای از قطعات ریز جامد عبور کرده و آن ها را به حالت معلق در آورد. بدیهی است رفتار بسترهای سیال بستگی به ویژگی های قطعات جامد و نوع سیال دارد. تقریبا تمام فرایندهای صنعتی که در آن ها از بستر سیال استفاده می شود با سیستم گاز - جامد سروکار دارند.

در این سیستم به بستری عمودی از قطعات ریز جامد بر روی یک سینی دارای منافذ کوچک که به توزیع کننده (Distributor) موسوم است قرار دارد. گاز از زیر توزیع کننده به سمت بالا و از میان قطعات جامد عبور داده می شود. در سرعت های پایین گاز، قطعات جامد جابجایی قابل توجهی ندارند و لذا رفتار بسترهای

ثابت مشاهده می‌شود. با افزایش سرعت گاز، بستر به حالت انبساط در می‌آید و سرانجام در سرعت خاصی از گاز که به حداقل سرعت سیالیت (Minimum Fluidizing Velocity) موسوم است قطعات جامد به حالت معلق می‌آیند.

اگر سرعت گاز به حدی بسیار بیشتر از حداقل سرعت سیالیت افزایش یابد، بستر شکل سیال در حال جوش را به خود می‌گیرد که در این حالت قطعات جامد به شدت مخلوط شده و حباب‌های درشت گاز از میان بستر می‌گذرند. این وضعیت را بستر سیال حبابی (Bubbling Fluidized Bed) می‌نامند. افزایش بیشتر سرعت گاز سبب به هم چسبیدگی حباب‌ها و ایجاد لخته در بستر می‌شود که معمولاً نامطلوب است. تا این مرحله خروج قطعات جامد از بستر صورت نگرفته و فقط گاز از سیستم خارج می‌شود. اما پس از آن و با ازدیاد سرعت گاز، خروج قطعات جامد به همراه گاز از بستر مشاهده می‌شود. به علاوه تشکیل حباب‌ها نیز متوقف می‌گردد.



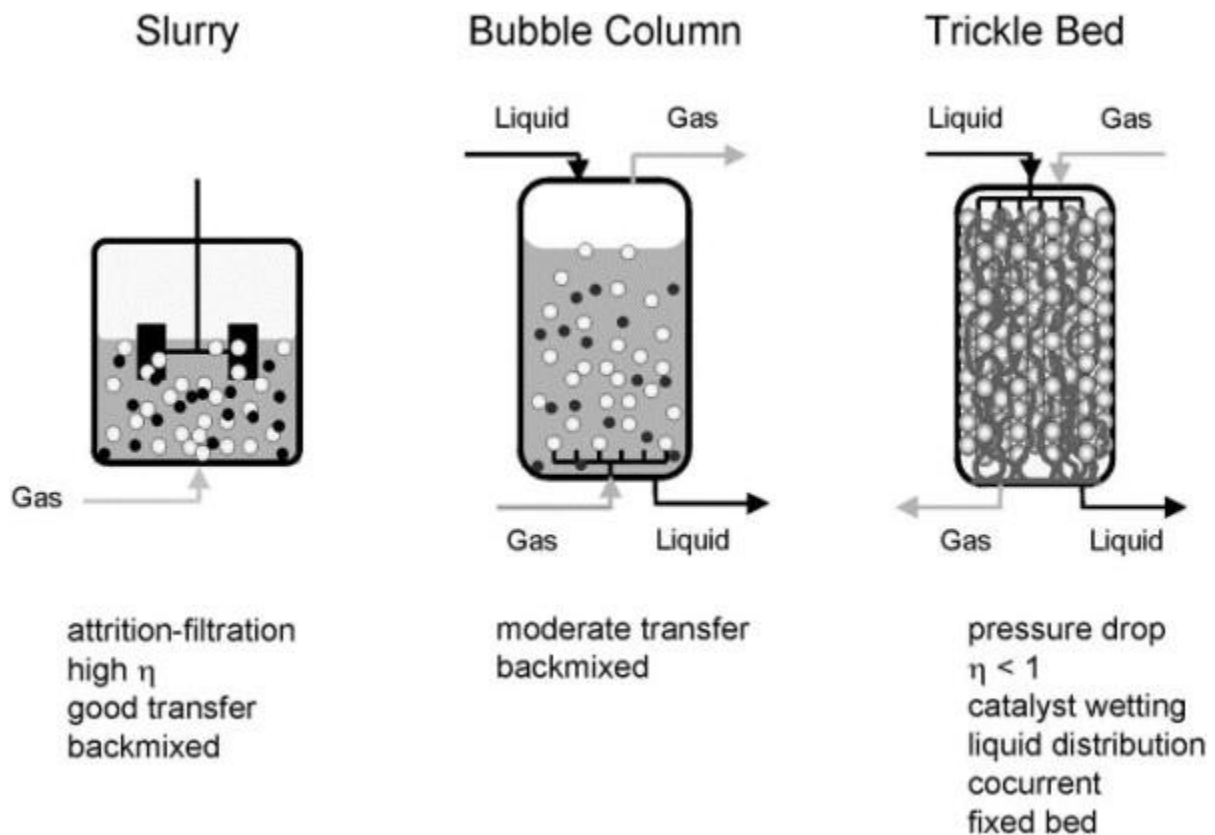
راکتورهای کاتالیستی سه فازی به دو دسته زیر تقسیم بندی می‌شوند:

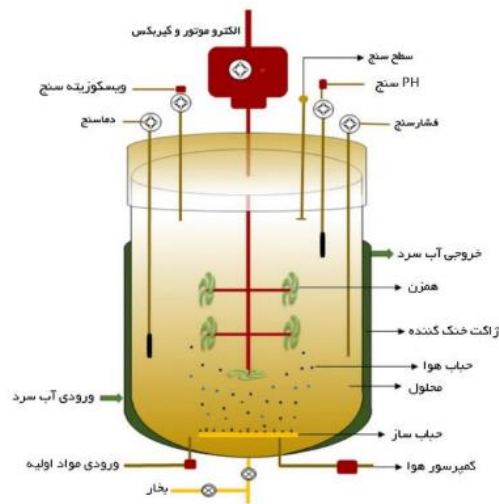
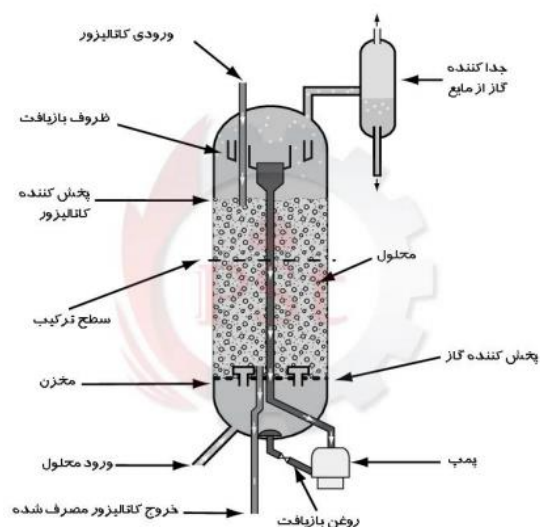
- راکتور بستر دوغابی (Slurry Bed Reactor)
- راکتور بستر قطره‌ای (Trickle Bed Reactor)

راکتور بستر دوغابی (Slurry Bed Reactor):

در این نوع راکتور، فاز گاز بصورت حباب‌هایی از درون مایعی حاوی ذرات کاتالیست ریز عبور می‌کند. راکتورهای بستر دوغابی ممکن است بصورت مداوم و یا نیمه پیوسته بکار روند. در سیستم‌های نیمه پیوسته، فاز مایع حاوی

کاتالیست در راکتور باقی می ماند حال آنکه گاز بصورت پایا وارد راکتور شده و از آن خارج می شود. به علاوه بر حسب نوع واکنش از راکتورهای دوغابی همزن دار، و یا بدون همزن، و یا ستون حبابی استفاده می شود. بنابراین انتخاب نوع راکتور بستر دوغابی بستگی به فرایند مورد نظر و مقیاس آن دارد.





راکتور بستر قطره‌ای (Trickle Bed Reactor):

راکتور بستر قطره‌ای در حقیقت یک راکتور بستر ثابت سه فازی کاتالیستی محسوب می‌شود که دو فاز مایع و گاز، با شدت جریان کم، از بالا و یا پایین بستر وارد راکتور می‌شوند. معمولاً جریان بصورت همسو برقرار می‌گردد. در این نوع راکتور، با استفاده از یک بستر آکنده از قطعات کاتالیست نسبتاً درشت، مشکل حمل قطعات مواد جامد بوسیله جریان گاز را که در راکتورهای دوغابی وجود داشت، برطرف می‌شود. بطور کلی در جریان‌های پایین رونده گاز و مایع از روی بستر ثابتی از قطعات کاتالیست، رفتار و طبیعت سیستم بصورت پیچیده‌ای به شدت جریان‌های گاز و مایع وابسته است. اندک بودن شدت جریان فاز مایع در پاره‌ای موارد سبب تر شدن ناقص قطعات کاتالیست شده و کاهش بهره عملکرد راکتور را به دنبال دارد. بنابراین در مدلسازی رفتار راکتور این مورد باید در نظر گرفته شود

اجزای راکتورهای شیمیایی:

اجزای اصلی راکتور شامل محفظه واکنش، شفت و همزن، شیرآلات، نازل‌های ورودی و خروجی، سیستم گرمایشی و سرمایشی، تجهیزات ابزار دقیق - برای دما، فشار، pH، غلظت و غیره-، بفل، اسپارجر، تجهیزات آب‌بندی (sealing) الکترودموتور و گیربکس و با توجه به نوع عملیات، برخی موارد اختیاری است.

راکتور CSTR از یک تانک مجهز به یک همزن تشکیل شده است. این راکتورها اغلب به شکل استوانه‌های عمودی هستند. میکسرها شامل اجزا مختلفی هستند. همزن، پره همزن، Shaft, Shaft seal, gearbox موتور الکتریکی و بفل

در راکتورهای لوله ای نیز از انواع میکسرها برای اختلاط جریان استفاده میشود. در راکتورهای لوله ای برای ایجاد اختلاط بیشتر و بالا بردن بازده واکنش از بافل‌هایی در مسیر حرکت سیال استفاده میشود

بدنه راکتور:

بسته به شرایط عملیاتی و نوع واکنش، شکل و ویژگی‌های راکتور تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، با توجه به طراحی‌های انجام شده، راکتور ممکن است دارای تجهیزات داخلی و بیرونی مختلفی باشد که در نتیجه شکل ظاهری راکتورها می‌تواند بسیار متنوع باشد.

همزن راکتور :

اغلب واکنش‌های شیمیایی نیاز به اختلاط دارند. عموماً در راکتورها، از همزن (mixer) برای اختلاط مناسب مواد استفاده می‌شود. همزن از الکتروموتور، گیربکس، شفت، آب‌بند شفت و پره تشکیل شده است. الکتروموتور حرکت دورانی لازم را تأمین می‌کند که از طریق شفت به پره‌ها منتقل می‌شود و پره‌ها با حرکت دورانی خود باعث مخلوط شدن مواد می‌شوند. گیربکس، سرعت الکتروموتور را به قدرت تبدیل می‌کند، سرعت خروجی گیربکس معمولاً بین ۶۰ تا ۱۰۰ دور بر دقیقه متغیر است. شایان ذکر است که کیلووات مورد نیاز الکتروموتور و گشتاور گیربکس با رعایت استاندارد ATEX محاسبه می‌شود. در راکتورهای دارای همزن، به دلیل وجود شفت، محل ورود شفت باید آب‌بندی شود.

پره ها :

پره یا **Impeller** برای همزدن مخلوط درون راکتور بکار گرفته می‌شود. همزن‌ها را با توجه

به نوع جریانی که در راکتور ایجاد می‌کنند به دو دسته **Axial** (جریان محوری) و **Radial** (جریان شعاعی) تقسیم می‌کنند. هر کدام از این پره‌ها برای موردی خاص کارایی بهتری دارند، برای مثال پره‌های جریان محوری برای مایعات یا سوسپانسیون‌های جامد مناسب هستند در حالیکه پره‌های شعاعی برای پراکنده کردن حباب‌های گاز در فاز مایع استفاده میشوند.

جریان محوری:



جریان شعاعی:



از لحاظ ساختمانی پره ها انواع مختلفی دارند که نوع fin ساده ترین آنهاست .بسته به ویژگیهای مکانیکی هر کدام از این پره ها کاربرد بخصوصی دارند .به عنوان مثال نوع **Anchor** (لنگری) هنگامی استفاده می شود که سیال ویسکوز باشد .در این موارد معمولاً سطح بیرونی راکتور بوسیله یک ژاکت حرارتی گرم می شود

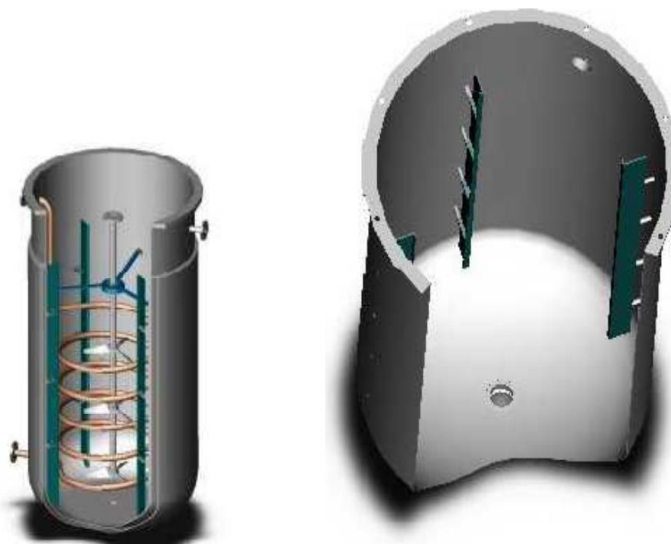


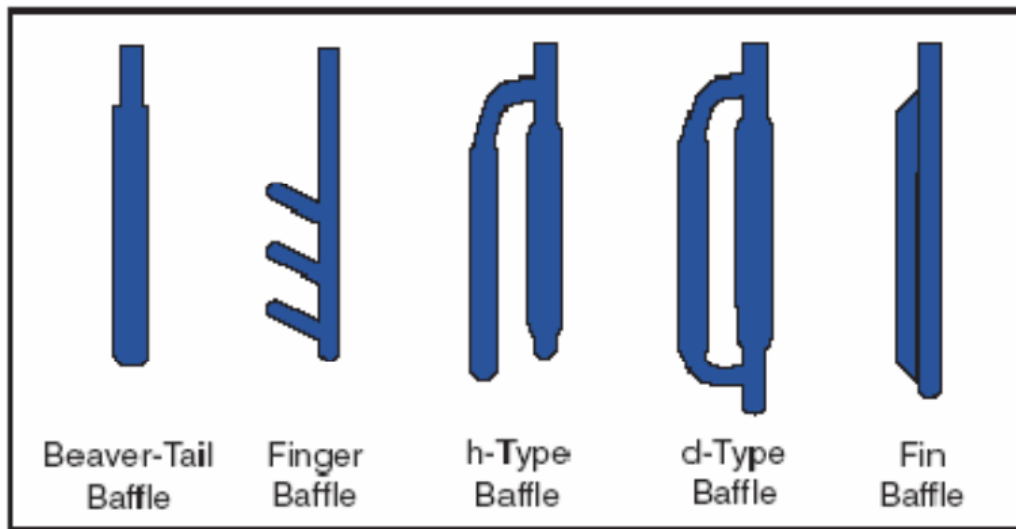
لنگری مارپیچی توربینی ۶ تیغه

بفل (baffle):

بفلها صفحات باریکی هستند که روی جداره داخلی راکتورها و تانکهای اختلاط قرار داده میشوند.

بفلها اغلب برای ایجاد جریانهای متلاطم و با اختلاط بهتر استفاده میشوند. هر چند برای اختلاط کم مایعات ویسکوز بافل نیاز نیست. در راکتورهای با سطح مقطع مربعی یا مستطیلی گوشه های راکتور باعث شکسته شدن خطوط جریان میشوند و بنابراین دیگر نیازی به بفل نیست. همچنین در تانکهایی که میکسر آنها در دیواره نصب شده است نیازی به بافل نیست. معمولاً اگر سیستم دارای خاصیت رسوبگذاری شدید باشد ترجیحاً از بفل استفاده نمی شود. بفل تأثیر زیادی بر جریان و کیفیت اختلاط دارد. بفلها باعث میشوند که جریان از حالت مماسی به محوری تبدیل شده که باعث اختلاط بیشتر میشوند.





انواع بفلها

تجهیزات جانبی راکتور های شیمیایی:

شیر کفبند:

به منظور حذف فضای مرده بین کف مخزن و شیر خروجی از مخزن از شیر کفبند استفاده می شود. هنگام بستن شیر، کف مخزن هیچ گونه فضای مرده ندارد. لذا تمام محتویات راکتور به خوبی همزده می شود.

اسپارجر (توزیع کننده گاز):

در واکنش های گاز-مایع به منظور ورود گاز به راکتور، نیاز به طراحی علمی یک اسپارجر است. وظیفه اسپارجر توزیع مناسب ذرات گاز به درون محلول مایع است. طراحی اسپارجر با توجه به استوکیومتری واکنش، نوع واکنش دهنده مایع، نوع همزن و طول و قطر راکتور انجام می شود.

تجهیزات ابزار دقیق:

برای اینکه عملکرد یک راکتور به صورت آنلاین مشاهده و کنترل شود، به تجهیزات ابزار دقیق مثل دماسنج، فشارسنج، سطح سنج، pH متر، غلظت سنج و غیره نیاز است. همچنین می توان با یک برنامه PLC مقدار خوانده شده توسط هر کدام از این تجهیزات را به تجهیز دیگری مثل شیر ورودی یا خروجی ارتباط داد.

سیستم سرمایشی و گرمایشی:

در راکتورهای شیمیایی، سیستم حرارتی دو نوع است، سیستم حرارتی خارجی که در آن ناودانی، نیم لوله یا ژاکت حاوی سیال با مواد راکتور تماس مستقیم ندارد و بیرون محفظه قرار دارد، ژاکت حرارتی داخلی که در آن، لوله ها درون راکتور و در تماس با مواد هستند. برای گرم کردن از بخار آب (یا آب داغ) یا روغن داغ به عنوان سیال استفاده می شود که با توجه به شرایط عملیاتی دیگ بخار (یا دیگ آب گرم) یا دیگ روغن برای تامین سیال مورد نیاز استفاده می شود. برای سردسازی راکتور، عموماً سیال مورد استفاده آب است که با توجه به شرایط عملیاتی از برج خنک کننده یا چیلر برای تامین آب سرد مورد نیاز استفاده می شود.

انواع راکتورهای شیمیایی بر اساس جریان سیال:

رفتار جریان سیال درون راکتورهای شیمیایی یکی از اصلی ترین فاکتورها در تحلیل سینتیک، طراحی مهندسی، و پیش بینی عملکرد فرآیند است. بر اساس نحوه حرکت سیال، میزان اختلاط، و توزیع اقامت زمانی (RTD)، راکتورها را می توان به چند دسته کلیدی تقسیم کرد. این رفتار تعیین کننده چگونگی توزیع غلظت، دما، و میزان تبدیل درون راکتور است. شناخت دقیق جریان سیال، امکان مدل سازی دقیق تر واکنش ها و طراحی اقتصادی تر را فراهم می آورد.

***راکتور ناپیوسته (Batch Reactor)** نمونه ای از سیستم هایی است که در آن جریان سیال به صورت کلی غایب است. به عبارتی، هیچ گونه جریان ورودی یا خروجی در حین انجام واکنش وجود ندارد. ترکیبات واکنش دهنده درون مخزن بسته ریخته می شوند، واکنش در مدت زمان مشخصی انجام می شود و سپس محصولات برداشت می شوند. در این نوع راکتور، سیال به صورت همگن در نظر گرفته می شود، یعنی فرض می شود غلظت و دما در کل حجم راکتور یکنواخت است. به دلیل نبود جریان، توزیع اقامت زمانی کاملاً مشخص است و برای واکنش هایی که نیاز به کنترل دقیق شرایط دارند، ایده آل است.

***راکتور مخزن همزن دار پیوسته (CSTR)** با جریان ورودی و خروجی مداوم مشخص می شود. در این راکتور، همزن باعث ایجاد اختلاط کامل می شود و جریان سیال به گونه ای فرض می شود که در هر لحظه، تمام محتویات راکتور ترکیب یکنواختی دارند. رفتار جریان در CSTR به صورت کاملاً مخلوط مدل سازی می شود؛ به این معنا که

سیال ورودی به سرعت با محتویات راکتور مخلوط شده و محصول با همان ترکیب خارج می شود. توزیع اقامت زمانی در این راکتورها گسترده است و می تواند منجر به کاهش بهره وری در برخی واکنش ها شود، به ویژه در واکنش های بسیار سریع یا وابسته به غلظت اولیه.

***راکتور جریان پلاگ یا قالبی (Plug Flow Reactor - PFR)** نماینده ای از جریان ایده آل بدون اختلاط محوری است. در این راکتور، سیال در طول راکتور به صورت پیستونی و با سرعت یکنواخت حرکت می کند، به طوری که هر بخش از سیال زمان اقامت خاص خود را دارد و اختلاط در جهت جریان وجود ندارد. این باعث می شود که غلظت واکنش دهنده ها و دما در طول راکتور تغییر کند. مدل جریان PFR به دلیل توزیع باریک اقامت زمانی، در بسیاری از واکنش های سینتیکی مؤثرتر از CSTR است، خصوصاً در واکنش های برگشتناپذیر یا گرمازا که نیاز به کنترل پیش رونده دارند.

***راکتور نیمه پیوسته (Semi-Batch)** از نظر جریان سیال ترکیبی از Batch و CSTR است. جریان ورودی (مثلاً یکی از واکنش دهنده ها یا گاز تزریقی) ممکن است به صورت پیوسته یا نیمه پیوسته وارد راکتور شود، در حالی که محصول ممکن است تا پایان واکنش در راکتور باقی بماند یا به صورت جزئی خارج شود. الگوی جریان در این راکتورها وابسته به شرایط عملیاتی و طراحی سیستم است و رفتار سیال می تواند بین کاملاً مخلوط تا جریان لایه ای متغیر باشد.

***راکتور بستر ثابت (Fixed-Bed Reactor)** نوعی راکتور جریان محور است که در آن فاز سیال از میان بستری از ذرات جامد (معمولاً کاتالیست) عبور می کند. جریان در این راکتورها معمولاً به صورت جریان پلاگ فرض می شود، ولی به دلیل وجود مقاومت در بستر، پراکندگی و انحراف از جریان ایده آل هم چنین وجود دارد. افت فشار و تشکیل کانال های جریان از عوامل مؤثر در غیرایده آل شدن رفتار سیال هستند.

***راکتور بستر سیال (Fluidized-Bed Reactor)** برخلاف بستر ثابت، در این نوع راکتور، ذرات جامد در اثر جریان سیال به حالت معلق درمی آیند. جریان در این سیستم بسیار پیچیده تر است، چرا که شامل ترکیبی از اختلاط گسترده (هم در جهت شعاعی و هم محوری)، حباب زایی، و جریان چندفازی است. در حالت کلی، رفتار جریان در این راکتورها نزدیک به CSTR در نظر گرفته می شود، ولی با تنظیم پارامترها می توان به الگوهای جریان نزدیک به PFR نیز دست یافت. همین انعطاف پذیری در رفتار سیال، Fluidized-bed را برای واکنش های گرمازا و نیازمند انتقال حرارت بالا بسیار مناسب می کند.

***راکتورهای جریان غیرایده‌آل (Non-Ideal Flow)**، مانند بسیاری از راکتورهای صنعتی واقع‌گرایانه، رفتاری بین دو مدل مرزی PFR و CSTR دارند. در این راکتورها، به‌دلیل وجود نواحی با اختلاط ناقص، کانالیزه شدن یا مرده‌گاه‌ها، توزیع اقامت زمانی از مدل‌های ایده‌آل منحرف می‌شود. تحلیل چنین سیستم‌هایی نیازمند استفاده از تکنیک‌هایی مانند تابع اقامت زمانی (RTD)، مدل‌های تانک‌های سری (Tanks-in-Series) یا مدل‌های سلول‌های پراکنده (Dispersion Models) است.

در مجموع، تحلیل راکتورهای شیمیایی از منظر جریان سیال، ابزاری قدرتمند برای طراحی دقیق، پیش‌بینی عملکرد و بهینه‌سازی اقتصادی فرآیندها فراهم می‌آورد. انتخاب نوع جریان نه تنها بر میزان تبدیل و نرخ واکنش تأثیر می‌گذارد، بلکه در مصرف انرژی، اندازه تجهیزات، و مسائل زیست‌محیطی نیز نقشی مهم دارد.

۱. بدنه (Reactor Vessel Body)

بدنه همان بخش اصلی راکتور است که واکنش در آن انجام می‌شود. طراحی بدنه باید توان تحمل فشار و دمای فرآیند را داشته باشد. برای راکتورهای گازی تحت فشار، بدنه معمولاً از فولاد آلیاژی مقاوم ساخته می‌شود و ضخامت دیواره متناسب با فشار طراحی (Design Pressure) انتخاب می‌شود. در راکتورهای مایع یا دو فازی، بدنه علاوه بر تحمل فشار، باید در برابر خوردگی مقاوم باشد؛ مثلاً در راکتورهایی با محیط اسیدی از پوشش‌های مقاوم (مانند شیشه لعاب‌دار یا پوشش تفلونی) استفاده می‌شود. شکل بدنه هم وابسته به نوع جریان است؛ در PFR بدنه لوله‌ای بلند است، در CSTR به صورت استوانه‌ای با همزن مرکزی ساخته می‌شود و در راکتورهای بستر سیال بخش پایین‌تر به صورت مخروطی طراحی می‌شود تا جریان گاز یکنواخت وارد شود.

۲. درپوش (Head / Closure)

هر راکتور نیاز به سیستم باز و بسته شدن دارد تا امکان بارگذاری مواد اولیه، تخلیه کاتالیست یا محصول و همچنین دسترسی برای تعمیرات فراهم شود. در راکتورهای فشار بالا از درپوش‌های فلنج‌دار با پیچ‌های مقاوم

استفاده می‌شود. در راکتورهای آزمایشگاهی کوچک، درپوش‌ها ممکن است شیشه‌ای با بست فلزی باشند. طراحی درپوش باید طوری باشد که نشتی به حداقل برسد.

۳. کویل حرارتی یا ژاکت (Heating/Cooling Coil or Jacket)

کنترل دما یکی از مهم‌ترین بخش‌های طراحی است. برای واکنش‌های گرمازا (Exothermic) مثل پلیمریزاسیون یا سنتز آمونیاک، راکتور باید توان دفع سریع حرارت داشته باشد. در این حالت از کویل‌های داخلی یا ژاکت خارجی استفاده می‌شود که آب خنک یا روغن حرارتی در آن‌ها جریان پیدا می‌کند. در فرآیندهای گرماگیر (Endothermic) مثل ریفرمینگ بخار متان، کویل‌ها برای تأمین حرارت توسط بخار یا سوخت عمل می‌کنند. انتخاب بین کویل داخلی و ژاکت خارجی به اندازه و مقیاس راکتور بستگی دارد؛ ژاکت بیشتر برای راکتورهای کوچک و متوسط (مثل CSTR های داروسازی) و کویل داخلی برای راکتورهای صنعتی بزرگ استفاده می‌شود.

۴. همزن (Agitator / Impeller)

در راکتورهایی مثل CSTR، همزن نقش کلیدی در یکنواخت‌سازی دما، ترکیب و غلظت مواد دارد. طراحی همزن بسته به فازها متفاوت است؛ برای مایعات از پروانه‌های محوری یا شعاعی استفاده می‌شود، برای دو فاز گاز-مایع از توربین‌های با پره‌ی پهن‌تر، و برای سیستم‌های جامد-مایع از همزن‌هایی با توان بالا. سرعت و توان همزن با توجه به حجم راکتور و ویسکوزیته محیط محاسبه می‌شود تا نه تنها اختلاط کامل ایجاد شود بلکه از ته‌نشینی جامدات جلوگیری کند.

۵. لوله‌های ورودی/خروجی (Inlet/Outlet Pipes & Nozzles)

راکتورها دارای چندین نازل ورودی و خروجی هستند. محل ورود مواد اولیه اهمیت زیادی دارد؛ مثلاً در راکتور لوله‌ای مواد در ابتدای لوله تزریق می‌شوند، ولی در CSTR چند ورودی در نقاط مختلف برای خوراک، کاتالیست یا گاز حل‌شونده وجود دارد. خروجی محصول هم باید طوری طراحی شود که جریان یکنواخت داشته باشد و از گرفتگی یا تجمع جلوگیری کند. در راکتورهای بستر ثابت (Fixed Bed)، ورودی معمولاً از بالا و خروجی از پایین است، در حالی که در بستر سیال طراحی عکس یا ترکیبی به کار می‌رود

طبقه‌بندی راکتورهای شیمیایی بر اساس حالت فازی واکنش، استفاده از کاتالیست، وضعیت بستر و ویژگی‌های ساختاری:

طبقه‌بندی راکتورهای شیمیایی بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و عملکردی آن‌ها، یکی از مهم‌ترین مراحل تحلیل و انتخاب نوع مناسب راکتور برای یک واکنش خاص به شمار می‌رود. چهار عامل اصلی که در این طبقه‌بندی نقش کلیدی دارند عبارت‌اند از: حالت فازی واکنش، وجود یا عدم وجود کاتالیست، وضعیت بستر واکنش، و ویژگی‌های ساختاری راکتور. هر یک از این عوامل به نحوی بر طراحی، بهره‌برداری و راندمان راکتور تأثیر می‌گذارند و انتخاب نادرست در هر کدام می‌تواند منجر به کاهش عملکرد فرآیند یا افزایش هزینه‌های عملیاتی گردد.

– از نظر حالت فازی واکنش، راکتورها را می‌توان به راکتورهای همگن و ناهمگن تقسیم کرد. در راکتورهای همگن، تمام اجزای واکنش (واکنش‌دهنده‌ها و فرآورده‌ها) در یک فاز مشخص، معمولاً مایع یا گاز، حضور دارند و انتقال جرم بین فازها مطرح نیست. این دسته معمولاً در واکنش‌های سریع با شرایط کنترل‌شده کاربرد دارند. در مقابل، راکتورهای ناهمگن واکنش‌هایی را شامل می‌شوند که در آن‌ها دو یا چند فاز مختلف وجود دارد؛ برای مثال واکنش بین گاز و مایع، یا واکنش‌هایی که یک کاتالیست جامد در حضور سیالات گازی یا مایع نقش دارد. در این حالت، انتقال جرم بین فازها و همچنین سطح تماس بین آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است و طراحی را پیچیده‌تر می‌کند.

– از منظر استفاده از کاتالیست، راکتورها به دو دسته‌ی کاتالیزوری و غیرکاتالیزوری تقسیم می‌شوند. راکتورهای کاتالیزوری برای واکنش‌هایی به کار می‌روند که در آن‌ها یک ماده‌ی کاتالیست نقش تسریع‌کننده واکنش را ایفا

می‌کند، بی‌آنکه خود در فرآیند مصرف شود. این کاتالیست‌ها می‌توانند به صورت همگن (محلول در فاز واکنش) یا ناهمگن (جامد در فاز مایع یا گاز) باشند. طراحی این نوع راکتورها نیازمند بررسی دقیق شرایطی نظیر عمر مفید کاتالیست، افت فشار، پخش جریان و توزیع دماست. در مقابل، راکتورهای غیرکاتالیزوری ساختار ساده‌تری دارند اما در بسیاری از فرآیندهای صنعتی به دلیل نیاز به سرعت بالای واکنش و راندمان بالا کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

بر اساس وضعیت بستر واکنش، راکتورها به چند دسته‌ی شناخته‌شده تقسیم می‌شوند؛ از جمله راکتورهای با بستر ثابت، بستر سیال، و بستر متحرک. در راکتورهای بستر ثابت، کاتالیست به‌صورت جامد و ساکن درون بستر راکتور قرار دارد و جریان سیال از میان آن عبور می‌کند. این راکتورها از نظر طراحی ساده و از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌اند، ولی مشکلاتی مانند افت فشار زیاد و توزیع حرارتی غیریکسان دارند. در راکتورهای بستر سیال، ذرات جامد (معمولاً کاتالیست) توسط جریان سیال به حالت معلق درمی‌آیند که باعث بهبود انتقال حرارت و جرم و همچنین یکنواختی دما در راکتور می‌شود. این راکتورها برای واکنش‌های گرمازا بسیار مناسب‌اند. بسترهای متحرک، که در آن‌ها ذرات جامد به همراه جریان سیال حرکت می‌کنند، نیز در برخی فرآیندها کاربرد دارند و مزایایی مانند جابجایی پیوسته کاتالیست و کنترل آسان‌تر واکنش را فراهم می‌کنند.

در نهایت، ویژگی‌های ساختاری راکتور نیز در طبقه‌بندی و انتخاب نوع مناسب راکتور نقش دارند. ساختارهایی مانند راکتورهای لوله‌ای، راکتورهای مخزنی (با یا بدون همزن)، راکتورهای صفحه‌ای یا میکروکانالی هر کدام مزایا و محدودیت‌هایی دارند که باید در طراحی به آن‌ها توجه شود. راکتورهای لوله‌ای برای واکنش‌های گازی پیوسته و با نرخ تبدیل بالا مناسب‌اند و کنترل دمای آن‌ها نسبتاً آسان است. راکتورهای مخزنی ناپیوسته یا نیمه‌پیوسته برای واکنش‌هایی که کنترل دقیق ترکیب واکنش‌دهنده‌ها یا شرایط زمانی نیاز دارند به کار می‌روند. طراحی ساختاری همچنین بر نحوه جریان سیال، توزیع دما، نگهداری، و امکان گسترش مقیاس تأثیر دارد و از این رو نقشی اساسی در طراحی اقتصادی و فنی راکتور ایفا می‌کند.

در مهندسی شیمی، راکتورهای شیمیایی به‌عنوان قلب فرآیندهای صنعتی نقش حیاتی دارند. این راکتورها را می‌توان از جهات مختلفی دسته‌بندی کرد که هر کدام تأثیر مستقیم بر عملکرد، طراحی و بهینه‌سازی فرآیند دارد. در اینجا به بررسی جامع و ساختارمند انواع راکتورها با تمرکز بر چهار معیار کلیدی یعنی حالت فازی واکنش‌دهنده‌ها، استفاده از کاتالیست، وضعیت بستر و ویژگی‌های ساختاری پرداخته شده است.

۱. راکتورهای ناپیوسته (Batch Reactor)

حالت فازی واکنش: معمولاً مایع یا محلول؛ در برخی موارد می‌تواند واکنش‌های گازی یا جامد-مایع را نیز پوشش دهد.

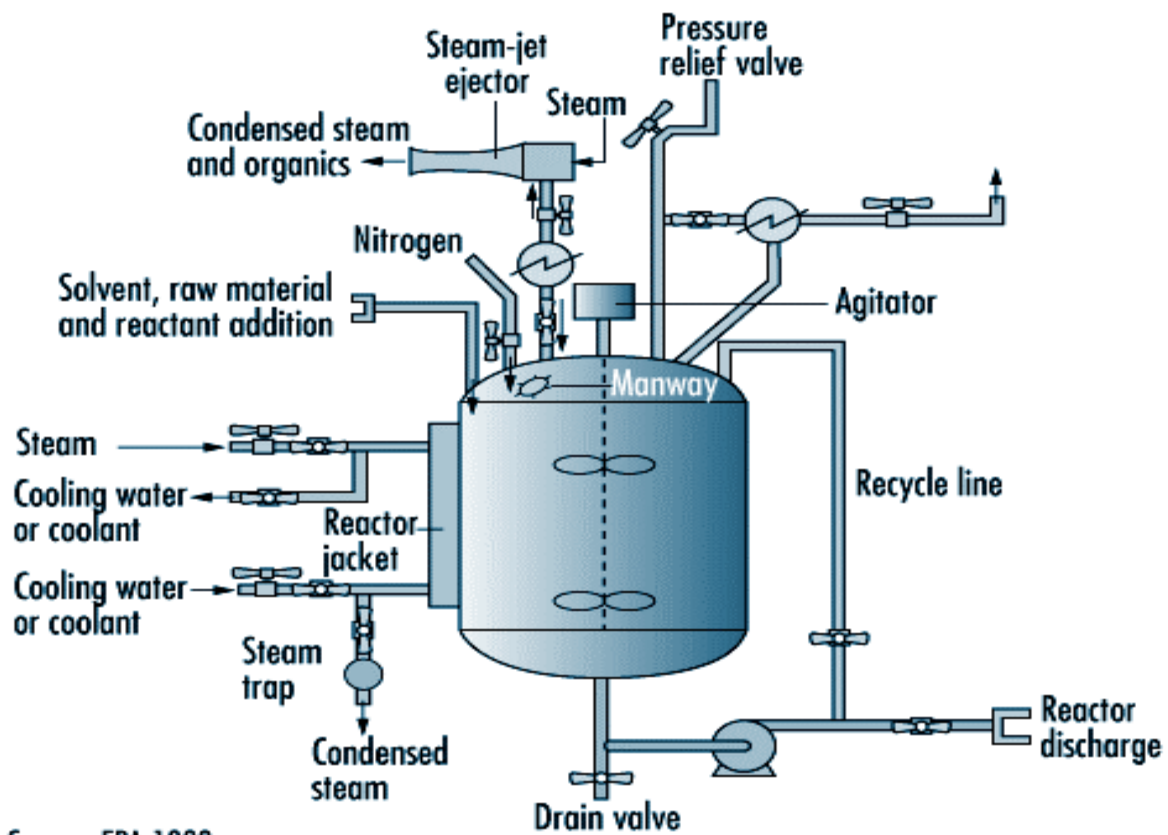
استفاده از کاتالیست: معمولاً بدون کاتالیست، اما گاهی در واکنش‌های خاص از کاتالیست مایع یا جامد استفاده می‌شود.

وضعیت بستر: فاقد بستر جامد؛ محیط واکنش به صورت مایع همگن است.

ویژگی‌های ساختاری: مخزن بسته با سیستم همزن برای اختلاط یکنواخت، بدون جریان ورودی یا خروجی در زمان واکنش.

این نوع راکتور برای واکنش‌های کنترل‌شده، آزمایشگاهی، و تولیدات کوچک بسیار مناسب است؛ چراکه شرایط واکنش به راحتی قابل تنظیم است و می‌توان زمان واکنش را به دلخواه تغییر داد.





Source: EPA 1993.



۲. راکتور مخزن همزن دار پیوسته (CSTR)

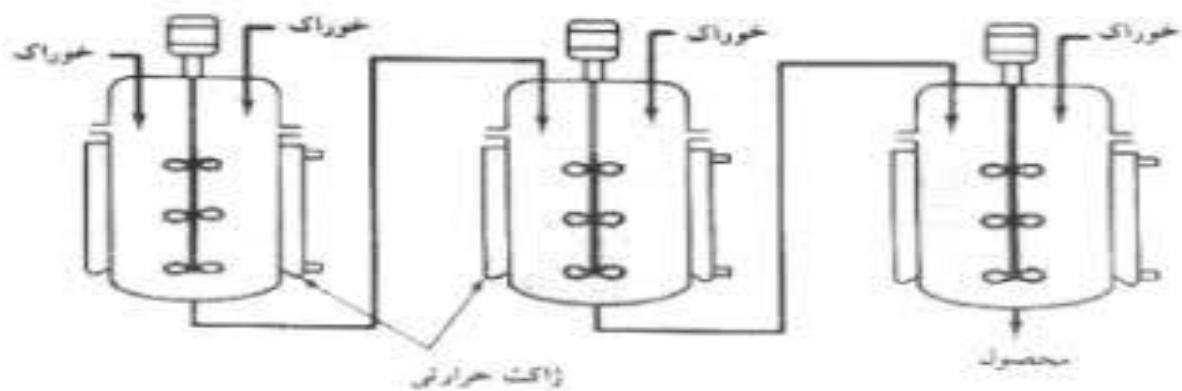
حالت فازي واکنش: معمولاً مایع، گاهی گاز یا گاز-مایع.

استفاده از کاتالیست: می‌تواند کاتالیزوری یا غیرکاتالیزوری باشد. در صورت استفاده از کاتالیست، معمولاً به صورت معلق در سیال یا پوشش داده شده بر روی قطعات داخلی.

وضعیت بستر: در صورت وجود کاتالیست، بستر معمولاً متحرک یا معلق است؛ اما اغلب به صورت مایع همگن بدون بستر جامد در نظر گرفته می‌شود.

ویژگی‌های ساختاری: مخزن مجهز به همزن قوی برای اختلاط کامل، جریان پیوسته ورودی و خروجی.

اختلاط کامل باعث می‌شود شرایط واکنش یکنواخت باشد، اما توزیع زمان اقامت گسترده‌تر از راکتورهای جریان پیستونی است که می‌تواند بهره‌وری را تحت تأثیر قرار دهد.



▪ راکتورهای لوله ای

۱. راکتور لوله مستقیم (Straight Tube Reactor)

راکتورهای لوله‌ای مستقیم، ساده‌ترین و متداول‌ترین نوع راکتورهای جریان پیوسته هستند. در این راکتورها، سیال از ورودی به خروجی حرکت می‌کند و اختلاط محوری در طول لوله بسیار کم است، بنابراین مدل جریان آن‌ها نزدیک به Plug Flow است. این ویژگی باعث می‌شود غلظت واکنش‌دهنده‌ها و دما به تدریج در طول لوله تغییر کند، که برای واکنش‌های سری یا مرتبه بالای شیمیایی بسیار مطلوب است. هندسه ساده‌ی لوله مستقیم امکان کنترل دقیق دما از طریق نصب کویل یا ژاکت حرارتی را فراهم می‌کند و طراحی آن برای مقیاس صنعتی نسبتاً آسان و اقتصادی است. این نوع راکتورها در صنایع پتروشیمی برای تولید متانول، آمونیاک و فرآیندهای کراکینگ کاربرد گسترده‌ای دارند.

۲. راکتور مارپیچی یا کویلی (Helical/Coiled Tube Reactor)

راکتورهای لوله‌ای کویلی یا مارپیچی با پیچاندن لوله‌ها در قالب مارپیچ ساخته می‌شوند و در مقایسه با لوله مستقیم، اختلاط عرضی و انتقال حرارت بهتری دارند. این هندسه باعث می‌شود که دما و غلظت در تمام طول راکتور یکنواخت‌تر باشد و از نقاط داغ (hot spots) جلوگیری شود، به ویژه در واکنش‌های گرمازا یا سریع. همچنین با استفاده از لوله‌های مارپیچی می‌توان طول لوله مؤثر را بدون افزایش فضای فیزیکی افزایش داد. این نوع راکتورها در صنایع شیمیایی که نیاز به کنترل دقیق حرارت و افزایش نرخ تبدیل دارند، مثل فرآیندهای هیدروژناسیون و اکسیژن‌دهی مایع، کاربرد دارند.



<https://rachanashaktifabtech.com/chemica>

۳. راکتور لوله چندگانه (Multi-tubular Reactor)

راکتورهای چندلوله‌ای شامل تعداد زیادی لوله کوچک هستند که داخل یک پوسته بزرگ قرار می‌گیرند و جریان خوراک از آن‌ها عبور می‌کند. این طراحی امکان افزایش سطح تبادل حرارت، کاهش افت فشار و کنترل بهتر دما را فراهم می‌آورد و برای واکنش‌های گرمازا در مقیاس صنعتی بسیار مناسب است. لوله‌ها معمولاً از جنس فولاد ضدزنگ یا مواد مقاوم به خوردگی ساخته می‌شوند و با نصب ژاکت حرارتی یا جریان خنک‌کننده، دمای واکنش به صورت دقیق کنترل می‌شود. این نوع هندسه در صنایع پتروشیمی، تولید آمونیاک، متانول و فرآیندهای کاتالیزوری مانند هیدروژناسیون و اکسیداسیون صنعتی کاربرد فراوان دارد.

▪ راکتورهای بستر ثابت (Fixed-Bed Reactors)

راکتورهای بستر ثابت شامل یک ستون یا محفظه پر از ذرات کاتالیست هستند که سیال واکنش‌دهنده از بین آن‌ها عبور می‌کند. در این طراحی، ذرات کاتالیست در محل خود ثابت می‌مانند و جریان خوراک به صورت قائم یا افقی از میان بستر حرکت می‌کند. دو هندسه رایج برای بستر ثابت عبارت‌اند از: استوانه‌ای عمودی و کروی یا تخم‌مرغی.

- بستر استوانه‌ای عمودی: این هندسه متداول‌ترین شکل بستر ثابت است و باعث می‌شود جریان سیال یکنواخت از بالای ستون به پایین حرکت کند. مزیت این هندسه، کنترل آسان دما و افت فشار نسبتاً پایین است. این نوع در فرآیندهای کاتالیزوری صنعتی مانند تولید اسید سولفوریک و آمونیاک کاربرد گسترده دارد.
- بستر کروی یا تخم‌مرغی: این هندسه برای توزیع بهتر جریان و کاهش نقاط مرده (dead zones) طراحی شده است. شکل کروی یا تخم‌مرغی ذرات باعث می‌شود عبور جریان همگن‌تر شود و راندمان تبدیل بالاتر رود. این نوع طراحی در فرآیندهای حساس به توزیع جریان و واکنش‌های گرمازا کاربرد دارد.

▪ راکتورهای بستر سیال (Fluidized-Bed Reactors)

در راکتورهای بستر سیال، ذرات جامد کاتالیست توسط جریان گاز یا مایع معلق و حرکت می‌کنند و رفتار بستر شبیه سیال می‌شود. این هندسه مزایای مهمی دارد، از جمله افزایش نرخ انتقال حرارت و جرم، اختلاط بهتر و کنترل دمای یکنواخت. دو نوع رایج بستر سیال وجود دارد:

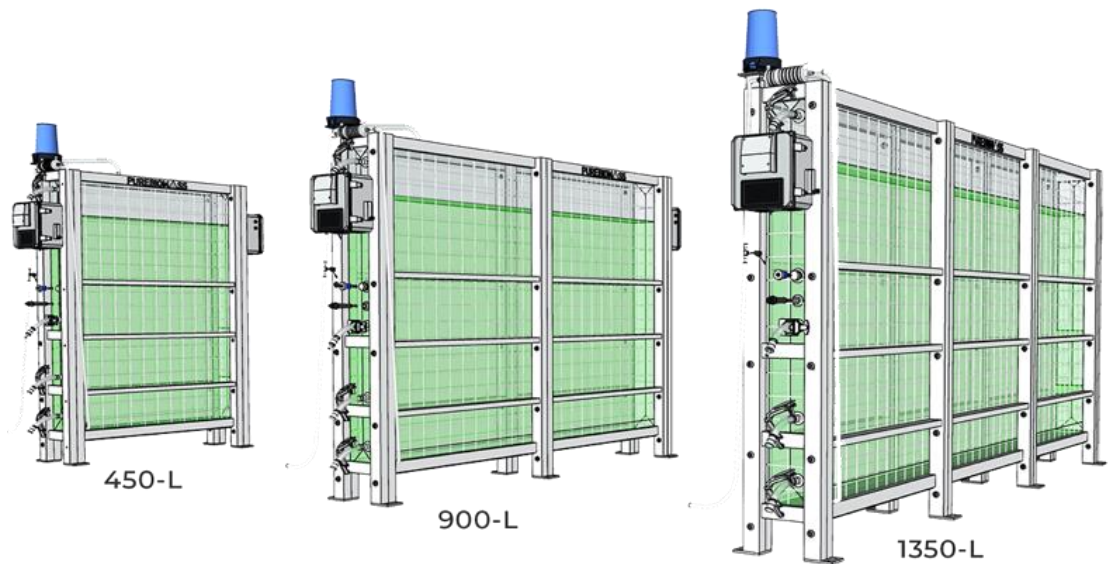
- بستر حبابی (Bubbling Bed): در این نوع، گاز یا مایع با سرعتی نسبتاً پایین به داخل بستر تزریق می‌شود و حباب‌هایی در میان ذرات ایجاد می‌کند. این حباب‌ها باعث اختلاط مکانیکی و افزایش سطح تماس بین ذرات و

سیال می‌شوند. این نوع در فرآیندهای کاتالیزوری گرمازا و واکنش‌هایی که نیاز به دمای یکنواخت دارند، بسیار کاربردی است.

• بستر در گردش (Circulating Fluidized Bed) در این طراحی، سرعت جریان بالاتر است و ذرات به صورت مداوم در گردش هستند. این سیستم برای واکنش‌هایی که نیاز به انتقال حرارت بالا و زمان ماند کوتاه دارند مناسب است و در صنایع پتروشیمی و فرآیندهای انرژی مانند گازسازی یا کاتالیز اکسیداسیون استفاده می‌شود.

▪ راکتورهای صفحه‌ای تخت (Flat Plate Reactors)

راکتورهای صفحه‌ای تخت از صفحات مسطح که سیال میان آن‌ها جریان دارد تشکیل شده‌اند. این طراحی امکان کنترل دقیق دما و توزیع جریان یکنواخت را فراهم می‌کند، زیرا فاصله بین صفحات معمولاً کوچک و سطح تماس بالا است. این نوع هندسه بیشتر در فرآیندهای آزمایشگاهی، نمونه‌سازی و میکرو راکتورها کاربرد دارد، جایی که سرعت انتقال جرم و حرارت اهمیت زیادی دارد. با افزایش تعداد صفحات، می‌توان سطح تماس را افزایش داد و نرخ تبدیل واکنش‌ها را بهبود بخشید.



<https://www.google.com/url?sa=i&url=http>

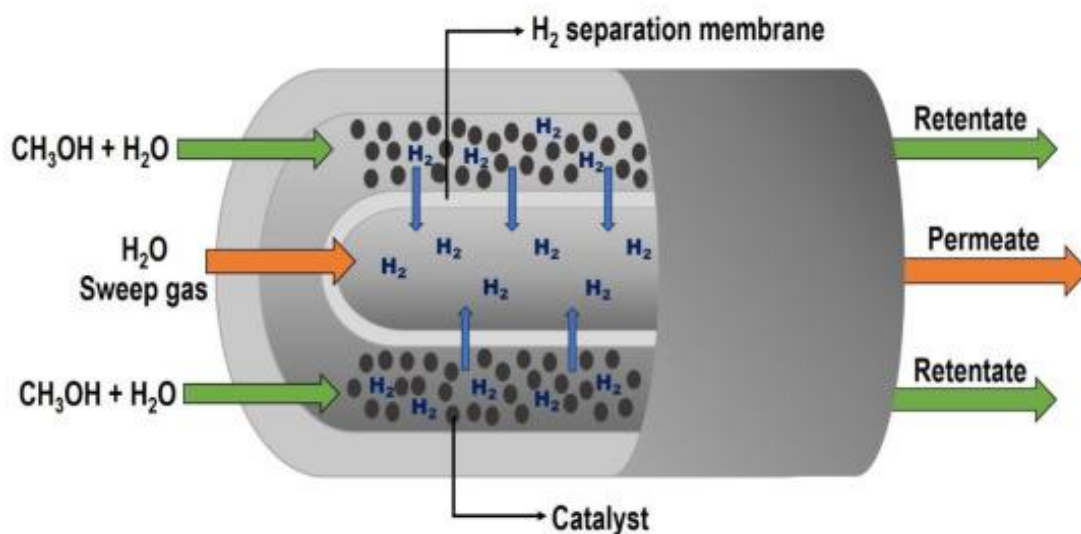
▪ راکتورهای صفحه‌ای موج‌دار (Corrugated Plate Reactors)

در این طراحی، صفحات به صورت موج‌دار یا سینوسی ساخته می‌شوند تا اختلاط و توربولانس در جریان سیال افزایش یابد. این ویژگی باعث می‌شود که انتقال حرارت و جرم بهتر انجام شود و راندمان واکنش بالا رود. صفحات موج‌دار به ویژه در واکنش‌های گرمازا یا جایی که اختلاط طبیعی سیال ناکافی است، استفاده می‌شوند. از دیگر مزایای این هندسه می‌توان به کاهش نقاط مرده (dead zones) و توزیع یکنواخت دما اشاره کرد. این نوع راکتورها در صنایع شیمیایی و غذایی برای فرآیندهای پیوسته و واکنش‌های سطحی کاربرد دارند.

▪ راکتورهای غشایی (Membrane Reactors)

راکتورهای غشایی، ترکیبی از واکنش شیمیایی و جداسازی فازها در یک واحد هستند. در این سیستم، یک یا چند غشاء انتخابی داخل راکتور نصب می‌شوند تا برخی ترکیبات واکنش‌دهنده یا محصول از آن عبور کنند و واکنش به صورت جزئی یا کامل ادامه یابد. این طراحی باعث افزایش نرخ تبدیل، کاهش پس‌ماند و بهبود بهره‌وری

می‌شود. کاربردهای رایج شامل واکنش‌های گاز-گاز یا گاز-مایع با جداسازی همزمان محصول، فرآیندهای هیدروژناسیون و تولید هیدروژن است. یکی از مزیت‌های اصلی راکتورهای غشایی، امکان کنترل دقیق ترکیبات واکنش و افزایش بازده انرژی است.



<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/membrane-reactor>

▪ راکتورهای با هندسه ویژه (Special Geometries)

۱. راکتورهای حلقوی (Annular Reactors)

راکتورهای حلقوی از دو لوله یا استوانه‌ای هم‌مرکز ساخته می‌شوند که فضای بین آن‌ها محل عبور سیال و انجام واکنش است. این طراحی باعث ایجاد سطح تماس زیاد و کنترل بهتر انتقال حرارت می‌شود. بسته به نوع جریان

(همسو یا مخالف)، می‌توان بازده واکنش و انتقال جرم را بهینه کرد. این هندسه به ویژه در واکنش‌های گرمازا یا واکنش‌های کاتالیستی که به انتقال حرارت کارآمد نیاز دارند، کاربرد دارد. همچنین، به دلیل یکنواخت بودن جریان و کاهش نقاط مرده، در صنایع پتروشیمی و فرآیندهای کاتالیستی استفاده فراوانی دارند.

۲. راکتورهای (Jacketed Reactors)

راکتورهای دواره‌ای یکی از متداول‌ترین هندسه‌های ویژه هستند که در آن‌ها یک غلاف (jacket) اطراف محفظه‌ی اصلی راکتور قرار دارد. در فضای بین جداره و غلاف، سیال خنک‌کننده یا گرم‌کننده جریان می‌یابد. این سیستم امکان کنترل دقیق دما را فراهم می‌کند، بدون اینکه نیاز باشد سیال واکنش‌دهنده مستقیماً با سیال حرارتی تماس پیدا کند. این ویژگی برای واکنش‌هایی که به شرایط ایزوترمال حساس هستند (مثل پلیمریزاسیون یا واکنش‌های بیوشیمیایی) حیاتی است. به علاوه، با طراحی‌های پیشرفته‌تر مثل jacket ماریپیچی یا چندلایه، می‌توان بازده انتقال حرارت را بیشتر کرد.

۳. راکتورهای با هندسه پیچیده برای ریزسیالات (Microreactors, Lab-on-Chip)

ریزراکتورها (microreactors) و سیستم‌های «Lab-on-Chip» نسل جدیدی از راکتورها هستند که در ابعاد میکرو و حتی نانو ساخته می‌شوند. این سیستم‌ها کانال‌های بسیار باریکی دارند که سیالات در آن‌ها جریان می‌یابند

و به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، انتقال جرم و حرارت در آن‌ها بسیار سریع و کارآمد است. مزیت اصلی این راکتورها، ایمنی بالا (به دلیل حجم بسیار کم واکنش‌دهنده‌ها)، مصرف انرژی کمتر و قابلیت مقیاس‌پذیری است. این فناوری بیشتر در زمینه‌های داروسازی، سنتز مواد پیشرفته، واکنش‌های سریع و بیولوژیکی و همچنین در تحقیقات آکادمیک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

این سه نوع راکتور نشان می‌دهند که در مهندسی شیمی، انتخاب هندسه‌ی مناسب فقط به تبدیل شیمیایی بستگی ندارد، بلکه انتقال حرارت، انتقال جرم، ایمنی و مقیاس‌پذیری هم نقش تعیین‌کننده دارند.

۳. راکتور جریان پیستونی (PFR)

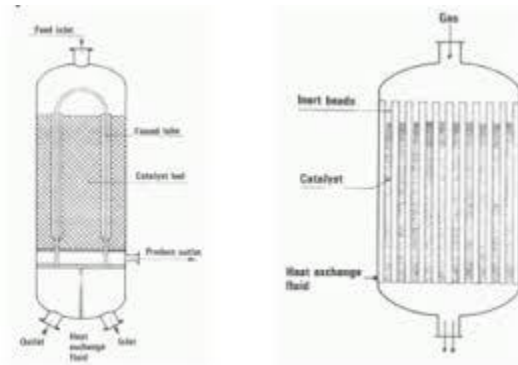
حالت فازی واکنش: گاز، مایع یا گاز-مایع.

استفاده از کاتالیست: می‌تواند کاتالیزوری باشد؛ معمولاً کاتالیست به صورت بستر ثابت یا سیال درون لوله تعبیه می‌شود.

وضعیت بستر: بیشتر به صورت بستر ثابت؛ در برخی موارد بستر سیال برای واکنش‌های خاص استفاده می‌شود.

ویژگی‌های ساختاری: لوله‌های طولانی با جریان پیوسته و بدون اختلاط محوری، دمای واکنش و غلظت واکنش‌دهنده‌ها در طول راکتور تغییر می‌کند.

PFR برای واکنش‌هایی با نیاز به زمان اقامت مشخص و یکنواخت بسیار مناسب است و به دلیل توزیع زمان اقامت باریک، بهره‌وری بالاتری نسبت به CSTR دارد.



۴. راکتور بستر ثابت (Fixed-Bed Reactor)

حالت فازی واکنش: سیال (گاز یا مایع) که از میان بستری از ذرات جامد (کاتالیست) عبور می‌کند.

استفاده از کاتالیست: کاتالیزوری؛ کاتالیست به صورت ذرات جامد ثابت در بستر قرار دارد.

وضعیت بستر: بستر ثابت و غیرمتحرک.

ویژگی‌های ساختاری: راکتور لوله‌ای یا استوانه‌ای با بستر جامد فشرده، جریان سیال به صورت پیستونی یا نزدیک به آن.

این راکتور به دلیل طراحی ساده و کاربرد در واکنش‌های کاتالیزوری صنعتی مانند هیدروژناسیون و سنتز آمونیاک بسیار متداول است، اما مشکلاتی مانند افت فشار و کانالیزه شدن جریان ممکن است وجود داشته باشد.

۵. راکتور بستر سیال (Fluidized-Bed Reactor)

حالت فازی واکنش: سیال (معمولاً گاز) که ذرات جامد (کاتالیست) را به حالت معلق درمی‌آورد.

استفاده از کاتالیست: کاتالیزوری؛ ذرات جامد معلق به عنوان بستر کاتالیستی.

وضعیت بستر: بستر سیال و متحرک.

ویژگی‌های ساختاری: طراحی خاص که اجازه می‌دهد جریان سیال ذرات جامد را معلق و مخلوط نگه دارد، بهبود انتقال حرارت و جرم.

این راکتورها در فرآیندهای گرمازا، واکنش‌های با نیاز به انتقال حرارت بالا و واکنش‌های چندفازی کاربرد زیادی دارند و به دلیل اختلاط عالی، نقاط داغ کمتر ایجاد می‌شود.

۶. راکتور نیمه پیوسته (Semi-Batch Reactor)

حالت فازی واکنش: معمولاً مایع یا محلول، گاهی گاز یا گاز-مایع.

استفاده از کاتالیست: بسته به واکنش، می‌تواند کاتالیزوری یا غیرکاتالیزوری باشد.

وضعیت بستر: معمولاً بدون بستر جامد، اما در برخی طراحی‌ها ممکن است کاتالیست به صورت بستر معلق یا جامد وجود داشته باشد.

ویژگی‌های ساختاری: ترکیبی از Batch و CSTR، با جریان ورودی یا خروجی کنترل‌شده.

معایب	مزایا	ویژگی بارز	نوع راکتور
محدود به برخی واکنش‌ها	سادگی تحلیل سینتیکی	همه اجزا در یک فاز	راکتور همگن
پیچیدگی طراحی	کاربرد گسترده صنعتی	چند فاز درگیر	راکتور ناهمگن
کاهش بهره‌وری در باز یافت	سرعت بالا در واکنش	کاتالیست در فاز واکنش	کاتالیزوری همگن
افت فشار بالا و نیاز به بازسازی کاتالیست	عمر کاتالیست طولانی‌تر	کاتالیست جامد جدا از فاز واکنش	کاتالیزوری ناهمگن
افت فشار زیاد	ساخت ساده، هزینه کم	کاتالیست ثابت و سیال عبوری	بستر ثابت
هزینه ساخت بالا	انتقال حرارت عالی	ذرات معلق و توزیع حرارتی خوب	بستر سیال
پیچیدگی عملیاتی	امکان جابجایی مداوم کاتالیست	حرکت همزمان بستر و سیال	بستر متحرک

حساس به تغییر دما	قابل پیش‌بینی، مقاوم	برای گازها و پیوسته مناسب	راکتور لوله‌ای
نیاز به همزن قوی	کنترل‌پذیر و منعطف	برای واکنش‌های ناپیوسته	راکتور مخزنی
گران‌قیمت	انتقال جرم موثر	سطح تماس زیاد	راکتور صفحه‌ای
مقیاس‌پذیری محدود	بهره‌وری در مقیاس کوچک	کنترل دقیق، اندازه کوچک	راکتور میکروکانالی

نمایی از راکتور مجهز به سیستم
(Internal Coil) کویل داخلی



نمایی از راکتور مجهز به سیستم
(Cooling Jacket) ژاکت خنک‌کننده

