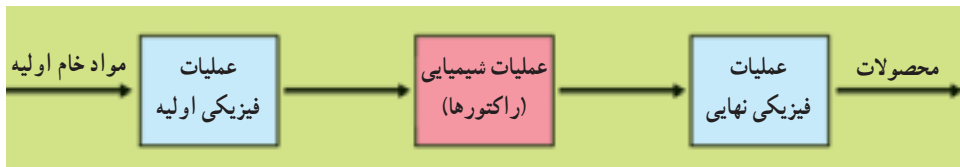


راکتورهای شیمیایی

هدف‌های رفتاری: پس از پایان این فصل از فراگیر انتظار می‌رود بتواند:

- ۱- راکتور را تعریف کند.
- ۲- جایگاه راکتورها را در یک واحد صنعتی شرح دهد.
- ۳- انواع راکتورها را شرح دهد.
- ۴- اطلاعات مورد نیاز و مراحل مختلف طراحی راکتور را شرح دهد.

راکتور^۱ (واکنشگاه) شیمیایی دستگاهی است که در آن واکنش یا واکنش‌های شیمیایی نظیر تبدیل، ترکیب یا تجزیه به منظور تولید مواد مورد نظر انجام می‌شود. طبق قرارداد دستگاهی که در آن واکنش سوختن به منظور تولید انرژی انجام می‌شود، راکتور نیست. شکل ۹-۱ عملیات اصلی در یک واحد صنایع شیمیایی را نشان می‌دهد. مواد خام ابتدا از یک رشته فرآیندهای تغییر فیزیکی اولیه از قبیل جداسازی، مخلوط کردن و ... عبور می‌کنند تا آماده ورود به مرحله بعدی یعنی تغییرات شیمیایی شوند. در این مرحله به کمک راکتور یا راکتورهای مناسب واکنش‌های شیمیایی مورد نظر انجام و محصول تهیه می‌شود. به دلیل انجام بعضی از واکنش‌های ناخواسته یا وجود مقداری از مواد خام که در راکتور فرصت انجام واکنش را نداشته و همراه محصول از راکتور خارج شده‌اند، این محصول غالباً قابل عرضه به بازار نمی‌باشد و لازم است عملیات فیزیکی نهایی از قبیل جداسازی، خالص‌سازی و ... بر روی آن انجام شود. در صنایع شیمیایی، آن بخش از عملیات شیمیایی که در راکتورها صورت می‌گیرد مهم‌ترین و حساس‌ترین عملیات کارخانه محسوب می‌گردد.

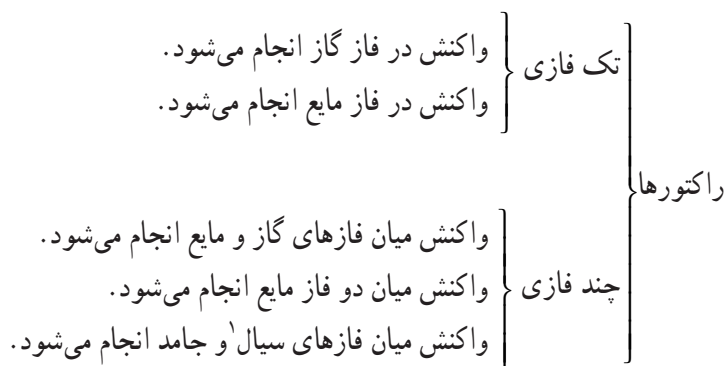


شکل ۹-۱- بخش‌های اصلی در یک واحد صنعتی شیمیایی

^۱ Reactor

۹-۱- تقسیم بندی راکتورها

بر اساس دیدگاه‌های متفاوت، تقسیم بندی‌های متنوعی برای راکتورهای شیمیایی انجام شده است. یکی از مهم ترین مشخصه‌های واکنش‌های شیمیایی تعداد و نوع فازهایی است که واکنش در آن صورت می‌گیرد. بر این مبنا می‌توان راکتورهای شیمیایی را نیز تقسیم بندی نمود. این تقسیم بندی در زیر آورده شده است:



تقسیم بندی دیگر راکتورها بر اساس نوع عملیات آن‌ها است. این تقسیم بندی به شکل زیر است:

- ۱- راکتورهای ناپیوسته^۲: مثل راکتور تولید پلی کلرید وینیل (PVC) از طریق پلیمر کردن کلرید وینیل.
- ۲- راکتورهای پیوسته یا جریان پایدار^۳: مثل راکتور تولید آمونیاک از طریق واکنش گازهای هیدروژن و نیتروژن.
- ۳- راکتورهای نیمه پیوسته^۴: مثل راکتور هیدروژن دار کردن روغن مایع به منظور اشباع آن و تولید روغن جامد.

۹-۲- راکتورهای ناپیوسته

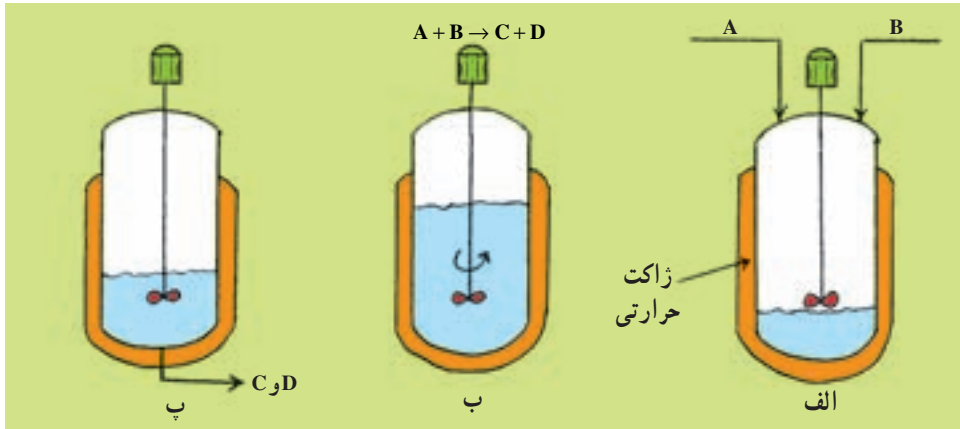
در این راکتورها مواد اولیه به مقدار معین وارد راکتور می‌شود. در زمان مشخص واکنش انجام می‌گیرد و سپس محصول از راکتور تخلیه می‌شود. بدین ترتیب یک دوره کار راکتور که شامل بارگیری، انجام واکنش و تخلیه است پایان می‌پذیرد و راکتور برای انجام واکنش در دوره بعد پاکسازی و آماده سازی می‌شود. (شکل ۹-۲)

۱- سیال منظور مایع یا گاز یا مایع + گاز است.

۲- Batch Reactors

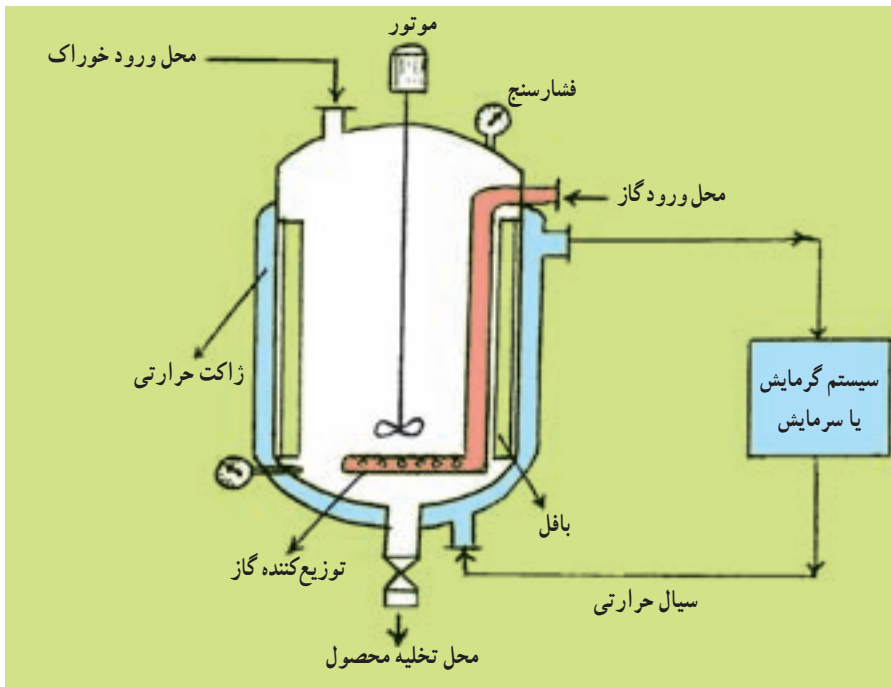
۳- Continuous or Steady Flow Reactors

۴- Semi Batch Reactors



شکل ۹-۲- مراحل مختلف عملیات یک راکتور ناپیوسته. الف- بارگیری ب- انجام واکنش پ- تخلیه

این نوع راکتورها نسبتاً ساده هستند و احتیاج به وسایل کمکی و سیستم‌های کنترل کمتری دارند. در صنعت از این نوع راکتورها برای انجام واکنش‌های کند، که احتیاج به زمان اقامت زیادی دارند، استفاده می‌شود. مدت اقامت مواد واکنش دهنده در داخل راکتور، که طی آن واکنش‌گرها فرصت انجام واکنش را پیدا می‌کنند، زمان اقامت گویند. یکی دیگر از کاربردهای راکتورهای ناپیوسته هنگامی است که هدف تولید محصول به مقدار کم و مقطعی بوده و دایمی نمی‌باشد. شکل ۹-۳ قسمت‌های مختلف یک راکتور ناپیوسته صنعتی را نشان می‌دهد. این راکتورها به‌طور معمول



شکل ۹-۳- یک راکتور ناپیوسته صنعتی

مجهر به موتور و همزن می‌باشند. شکل همزن بسته به نوع سیال و گرانروی آن متفاوت است. قطر پره همزن بسته به نوع آن معمولاً $\frac{1}{3}$ تا $\frac{1}{2}$ قطر راکتور است^۱. این راکتورها غالباً دو جداره می‌باشند. به جداره خارجی این راکتورها، که در آن بسته به گرمازا یا گرماگیر بودن واکنش سیال سرد یا گرم عبور داده می‌شود، ژاکت حرارتی گویند. سیالی که در داخل یک سیکل بسته جریان دارد و فضای داخل ژاکت را پر می‌کند، می‌تواند آب سرد (جهت سرمایش) یا بخار آب (جهت گرمایش) یا روغن (برای هر دو منظور) باشد. معمولاً تعداد ۴ تیغه عمودی در جداره داخلی راکتور نصب می‌شود. این تیغه‌ها با فل^۲ نام دارند و باعث می‌شوند به هنگام چرخش پره‌های همزن، در مقابل حرکت دورانی سیال مانع ایجاد شده، آشفتگی شدیدی به وجود آمده، اختلاط به نحو مطلوب انجام شود. ارتفاع بافل باید به گونه‌ای باشد که از سطح مایع (که معمولاً $\frac{2}{3}$ حجم راکتور را پر می‌کند) بالاتر باشد.

۹-۳- راکتورهای پیوسته

در این نوع راکتورها، مواد اولیه به‌طور دایم وارد راکتور می‌شود و پس از انجام واکنش محصول، پیوسته از راکتور خارج می‌شود. این گونه راکتورها هنگامی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند که هدف تولید مقدار زیادی محصول به‌طور دایم باشد در ضمن راکتورهای پیوسته برای انجام واکنش‌های سریع مناسب‌تر می‌باشند.

این نوع راکتورها نیاز به سیستم‌های کمکی و کنترلی متنوع‌تر و دقیق‌تر دارند. به کمک سیستم‌های کنترل دما، فشار، غلظت و ... تولید محصول با کیفیت بهتر امکان‌پذیر می‌شود. از این راکتورها در بسیاری از صنایع شیمیایی، به خصوص صنایع نفت، گاز و پتروشیمی استفاده می‌شود. راکتورهای پیوسته به دو شکل راکتورهای لوله‌ای^۱ و راکتورهای تانکی^۲ ساخته می‌شوند. شکل ۹-۴ این دو نوع راکتور را نشان می‌دهد. در شرایط ایده‌آل، در راکتور لوله‌ای، ذرات مسیر مستقیم را طی می‌کنند و واکنش در غیاب همزن انجام می‌شود. ولی در راکتور تانکی، مواد در داخل راکتور کاملاً هم‌زده و مخلوط می‌شوند. یکی از کاربردهای مهم راکتورهای لوله‌ای انجام واکنش‌های ناهمگن در حضور کاتالیزگر جامد می‌باشد. زمان اقامت برای راکتورهای پیوسته (جریان پایدار) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{زمان اقامت} = \frac{\text{حجم راکتور} (m^3)}{\text{دبی حجمی}^5 \text{ خوراک} (m^3/h)}$$

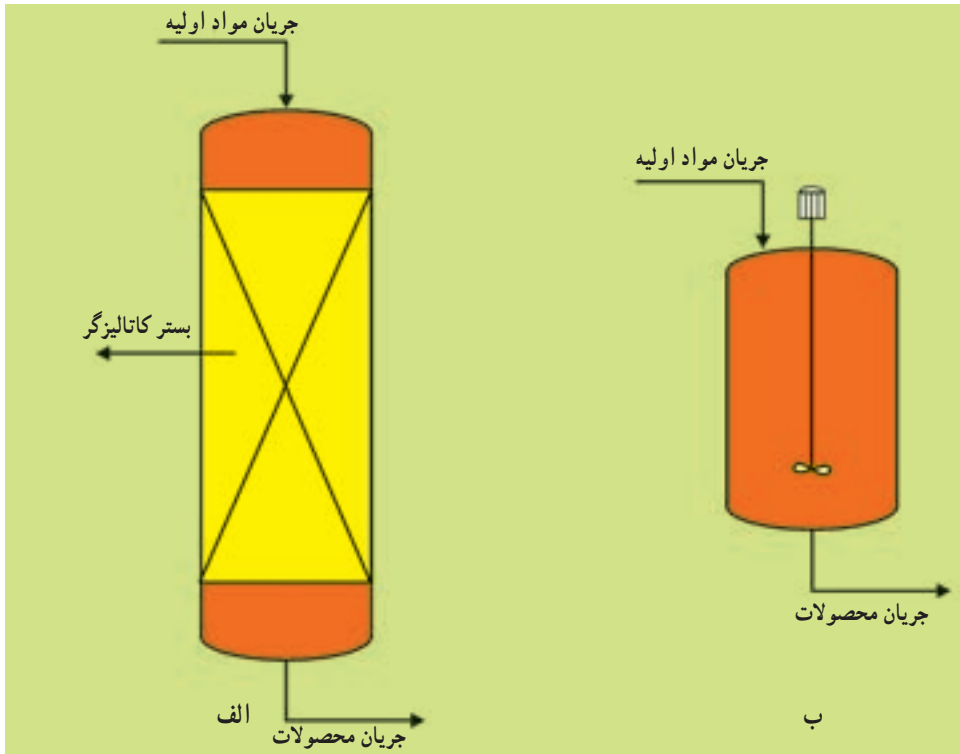
۱- در خصوص انواع همزن‌ها در فصل بعد توضیح داده شده است.

۲- Baffle

۳- Plug Flow Reactor

۴- Mixed Flow Reactor

۵- Volumetric Flow Rate



شکل ۹-۴- دو نوع راکتور پیوسته الف - لوله‌ای (با بستر کاتالیزگر) ب - تانکی

مثال ۱- جرم مخصوص خوراک یک راکتور جریان پایدار لوله‌ای به قطر ۱ m و ارتفاع ۵ m برابر 1000 kg/m^3 می‌باشد. اگر سرعت جریان جرمی خوراک 500 kg/min باشد، زمان اقامت مواد در داخل راکتور را به دست آورید.

$$D = 1 \text{ m}$$

$$h = 5 \text{ m}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m} = 500 \text{ kg/min}$$

حل:

$$\text{سرعت جریان حجمی خوراک} = \dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \Rightarrow \dot{V} = \frac{500 \text{ kg/min}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.5 \text{ m}^3/\text{min}$$

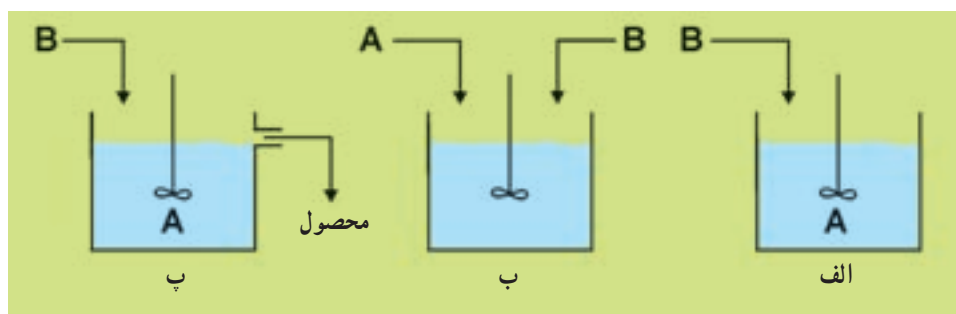
$$\text{حجم راکتور} = V = \frac{\pi D^2}{4} \times L = \frac{3.14 \times (1)^2}{4} \times 5 = 3.925 \text{ m}^3$$

$$\text{زمان اقامت} = t = \frac{3.925 \text{ m}^3}{0.5 \text{ m}^3/\text{min}} = 7.85 \text{ min}$$

یعنی به طور متوسط ۷ دقیقه و ۵۱ ثانیه طول می‌کشد تا ذرات از داخل راکتور عبور کنند.

۹-۴- راکتورهای نیمه پیوسته

این نوع راکتورها دارای انواع متنوعی هستند که سه نوع آن‌ها در شکل ۹-۵ نشان داده شده است. در نوع متداول آن (الف) یکی از مواد اولیه ابتدا در داخل راکتور بارگیری و سپس به تدریج ماده یا مواد اولیه دیگر به آن اضافه می‌شود. شکل (ب) نوع دیگری از راکتورهای نیمه پیوسته را نشان می‌دهد که مواد اولیه به طور همزمان به راکتور وارد می‌شود ولی تا پایان واکنش هیچ ماده‌ای از راکتور خارج نمی‌شود. در شکل (پ) نیز یکی از مواد اولیه در داخل راکتور بارگیری شده است و ماده اولیه دیگر به تدریج به آن اضافه می‌گردد و همزمان با آن محصول نیز از راکتور خارج می‌شود.



شکل ۹-۵- انواع راکتورهای نیمه پیوسته

۹-۵- طراحی راکتور

یک راکتور باید به نحوی عمل کند که محیط مناسب جهت انجام واکنش را فراهم نماید. منظور از محیط مناسب محیطی است که شرایط مورد نیاز واکنش نظیر دما، فشار، غلظت، زمان اقامت و چگونگی حرکت سیالات به نحوی باشد که محصول مورد نظر با بهترین کیفیت ممکن و بیشترین بازده به دست آید. جهت دستیابی به این هدف لازم است در طراحی و انتخاب راکتورهای مورد نظر، اطلاعات، دانش و تجربه در زمینه‌های زیر را به کار گرفت.

- ترمودینامیک: وضعیت واکنش از نظر رسیدن به نقطه تعادل و گرمای واکنش را مشخص می‌کند.
- سینتیک: سرعت و نحوه انجام واکنش را تعیین می‌کند.
- مکانیک سیالات: با توجه به اطلاعات سینتیکی و ترمودینامیکی، سرعت و نحوه حرکت سیالات در داخل راکتور را مشخص می‌کند.
- انتقال حرارت: چگونگی گرم کردن یا سرد کردن راکتور را تعیین می‌کند.

— انتقال جرم: با توجه به اطلاعات سینتیکی و ترمودینامیکی روش اختلاط مواد و جداسازی مخلوط‌ها را مشخص می‌کند.

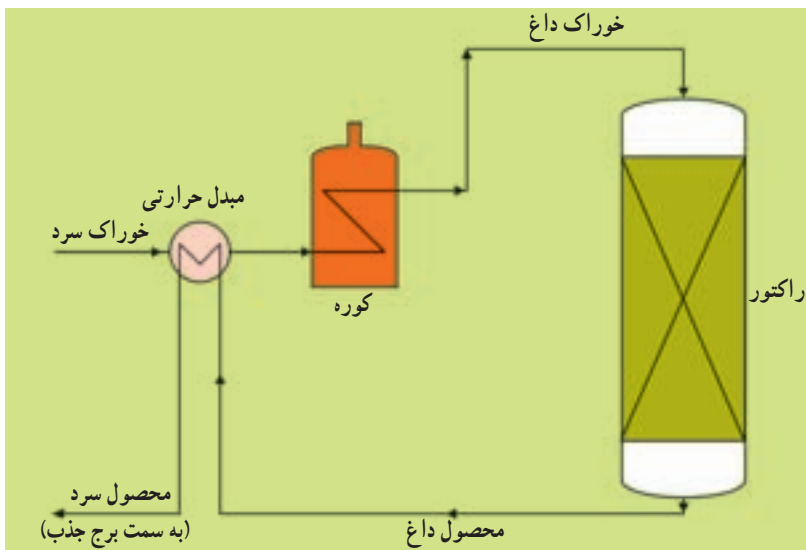
— اقتصاد: با استفاده از زمینه‌های فوق‌الذکر، در نهایت طراحی راکتور باید به نحوی انجام شود که واحد صنعتی بیشترین سوددهی را داشته باشد.

اصولاً مهم‌ترین عامل در طراحی یک واحد صنعتی، توجه به مسایل اقتصادی است. بدین معنی که طراحی قسمت‌های مختلف یک کارخانه باید به گونه‌ای انجام شود که هزینه‌های ساخت و عملیات آن حداقل و مرغوبیت و در نتیجه قیمت محصول آن حداکثر باشد. بنابراین طراحی راکتور یا راکتورهای یک واحد صنعتی مستقل از بخش‌های عملیات فیزیکی مفید نخواهد بود. به عبارت دیگر در یک طرح اقتصادی تنها هزینه‌های مربوط به راکتور شیمیایی نیست که باید به حداقل برسد، زیرا ممکن است بتوان هزینه راکتور را کاهش داد ولی این امر باعث افزایش هزینه‌های جداسازی ناخالصی‌های همراه محصول گردد و در مجموع باعث افزایش هزینه‌های عملیات کل کارخانه شود. بنابراین در یک واحد صنعتی باید تمامی دستگاه‌ها از جمله راکتورها را به گونه‌ای طراحی نمود که سوددهی آن واحد حداکثر شود. طراحی راکتور در واقع مرحله اصلی طراحی یک فرآیند شیمیایی است.

پس از طراحی راکتور، نوبت به طراحی سیستم‌های جداسازی (عملیات فیزیکی اولیه و نهایی) می‌رسد. در این مرحله دستگاه‌هایی نظیر برج جذب، برج تقطیر، فیلتر، کریستالیزور، خشک‌کن، و ... طراحی می‌شوند، در پایان این مرحله دمای عملیاتی کلیه دستگاه‌ها از جمله راکتور مشخص شده است و این آمادگی به وجود آمده است تا مرحله سوم طراحی، یعنی طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی انجام شود. این طراحی باید به گونه‌ای انجام شود که اتلاف انرژی به حداقل برسد. برای مثال اگر خروجی راکتور گرم باشد و بخواهیم آن را سرد کرده به برج جذب بفرستیم و ورودی راکتور سرد باشد و بخواهیم آن را گرم کنیم، این دو جریان را وارد یک مبدل حرارتی می‌نماییم تا با یکدیگر تبادل حرارت نموده از اتلاف انرژی جلوگیری شود. شکل ۹-۶ این طرح را نشان می‌دهد. البته باید توجه داشت که ورودی راکتور همچنان نیاز به کوره جهت رسیدن به دمای مورد نظر را دارد، اما با عبور از مبدل حرارتی، از بار حرارتی کوره کاسته می‌شود.

آخرین مرحله طراحی مربوط به طراحی سیستم‌های سرمایش و گرمایش می‌باشد. معمولاً برج‌های خنک‌کننده یا چیلرها جهت سرمایش و دیگ‌های تولید بخار یا کوره‌های روغن داغ جهت گرمایش به کار می‌روند. این گونه تجهیزات را تسهیلات جانبی^۱ می‌نامند. مراحل مختلف طراحی یک فرآیند شیمیایی که به الگوی پوست پیازی معروف است در شکل ۹-۷ نشان داده شده است.

در کلیه مراحل طراحی یک فرآیند، مهندسين شيمي نقش اصلي را دارند، اما طراحی راکتورها مبحثی است که با توجه به اطلاعات مورد نیاز تنها در حیطه فعالیت مهندسين شيمي می باشد و شاید بتوان گفت تنها زمینه ای است که مهندسي شيمي را به عنوان رشته جداگانه ای از رشته های مهندسي توجیه می نماید.



شکل ۹-۶- نمونه ای از طراحی شبکه مبدل حرارتی به منظور جلوگیری از اتلاف انرژی



شکل ۹-۷- مراحل مختلف طراحی یک فرآیند (الگوی پوست پیازی)

خودآزمایی

- ۱- راکتور شیمیایی را تعریف کنید و با رسم شکل، بخش‌های اصلی یک کارخانه شیمیایی و موقعیت راکتور در آن را شرح دهید.
- ۲- انواع مهم راکتورهای شیمیایی را فقط نام ببرید. الف) بر اساس فاز مواد واکنش دهنده، ب) بر اساس نوع عملیات.
- ۳- مراحل مختلف عملیاتی در یک راکتور ناپیوسته را نام ببرید، دو کاربرد این نوع راکتورها را بنویسید.
- ۴- دو نوع راکتور پیوسته (جریان پایدار) را نام ببرید. تفاوت آن‌ها را بیان کنید و دو کاربرد راکتورهای پیوسته را بنویسید.
- ۵- سه نوع از راکتورهای نیمه پیوسته را با رسم شکل شرح دهید.
- ۶- شش زمینه علمی و مهندسی که در طراحی راکتور به کار می‌روند را نام ببرید و بگویید در هر مورد چه موضوعاتی مشخص می‌گردد؟
- ۷- در هر مورد نوع راکتور را از نظر فاز و عملیات مشخص کنید:
 - الف) گاز کلر از داخل اسید استیک مایع در دمای 80°C عبور می‌کند و در حضور کاتالیزگر انیدرید استیک (مایع)، منوکلرواستیک اسید (مایع) تولید می‌شود. در صورتی که بخشی از گاز کلر واکنش انجام ندهد و از بالای راکتور خارج شود آن را به مخازن محتوی سود هدایت می‌نمایند تا جذب آن گردد.
 - ب) جهت تولید گاز سنتز (مخلوط CO و H_2) گاز متان با بخار آب در دمای بالا از روی نوعی کاتالیزگر عبور داده می‌شود.
 - ج) وینیل کلرید را به همراه کاتالیزگر مناسب مایع وارد راکتور پلیمریزاسیون می‌نماییم سپس با تنظیم دما و فشار موردنظر، زمان لازم جهت انجام واکنش پلیمریزاسیون را به آن می‌دهیم.
- ۸- نحوه عملکرد راکتور را در دو جمله توضیح دهید.