

راکتورهای شیمیایی

CHEMICAL REACTORS

خانم رقیه جم جاه

واژه‌های کلیدی:

راکتور، زمان اقامت، بزرگتر کردن معیاس، واکنش‌های پلیمری، گرانروی، توزیع وزن مولکولی

مقدمه

کلیه فرایندهای شیمیایی برای تولید انبوه و اقتصادی فرآورده‌های موردنظر از مواد اولیه از مراحل متوالی انجام می‌گیرند. در یک فرایند شیمیایی ابتدا مواد خام تحت تأثیر یک رشته تغییرات فیزیکی قرار گرفته، سپس برای انجام واکنشهای شیمیایی وارد راکتور می‌شوند. در مرحله نهایی، محصولات واکنش برخی عملیات فیزیکی مانند جداسازی، خالص‌سازی را پشت سر می‌گذارند تا یک فرآورده نهایی با کیفیت مطلوب حاصل شود. مرحله تغییر شیمیایی که در راکتور انجام می‌گیرد نبض فرایند می‌باشد و یک فرایند شیمیایی را از نظر اقتصادی توجیه یارده می‌کند (۱).

به‌طور کلی راکتور متشکل از ظرفی، تحت شرایط دلخواه عملیاتی، برای تولید محصولات موردنظر از طریق واکنشهای معین شیمیایی است. اشکال مختلف راکتور، ویژگیهای عملی و اصول بنیادی مهندسی، تکنولوژی آن را تشکیل می‌دهند [1].
زمانی که معیاس تولید افزایش می‌یابد، ابعاد هندسی راکتور، سینتیک شیمیایی و نتایج واکنش در تولید صنعتی، باید مورد بررسی قرار

کلیه فرایندهای شیمیایی به‌منظور تولید انبوه و اقتصادی فرآورده‌های موردنظر از مواد اولیه به‌صورت مجموعه‌ای از مراحل متوالی می‌باشند. زمانی که معیاس تولید افزایش می‌یابد، ابعاد هندسی راکتور، نتایج و سینتیک واکنش باید مورد بررسی قرار گیرند. اشکال و طرحهای فراوانی از راکتور ساخته شده‌اند و عوامل متعددی در انتخاب نوع راکتور در نظر گرفته می‌شوند. نتایج مربوط به سینتیک واکنشها و خواص فیزیکی محصولات در یک راکتور از مایشگاهی که با نوع صنعتی و در حال گسترش آن متفاوت می‌باشد بهتر به‌دست می‌آیند.
طراحی راکتور اهمیت ویژه‌ای در مورد فرایندهای پلیمر شدن دارد. پارامترهایی از قبیل توزیع وزن مولکولی، شاخه‌دار و شبکه‌ای شدن، تحت تأثیر نوع راکتور می‌باشند. افزایش گرانروی و تأثیر آن بر فرایند پلیمر شدن یکی از مهمترین جنبه‌های واکنش پلیمر شدن می‌باشد. در طراحی راکتورها عواملی از قبیل پایداری، ایمنی، گزینش پذیری محصولات، توزیع وزن مولکولی، نحوه اختلاط و انتقال حرارت و جرم بسیار اهمیت دارد.

Key Words:

Reactor, Residence time, Scale - up, Polymer reactions, Viscosity, Molecular weight distribution.

گیرند. در این مقاله به طور خلاصه درباره این عنوانها بحث می شود: سینتیک و ترمودینامیک واکنشها، انواع راکتورها و ویژگیهای آنها، بزرگتر کردن مقیاس تولید، طراحی واکنشهای پلیمری، کارایی راکتور، افزایش گرانی و تأثیر آن بر فرایند پلیمر شدن، گزینش پذیری راکتور، توزیع وزن مولکولی، پایداری و ایمنی راکتور و در پایان یک نوع راکتور آزمایشگاهی معرفی می شود. مواردی از قبیل شبیه سازی فرایند، کنترل راکتور، انتخاب مصالح مصرفی در راکتور، تولید کاتالیزورها، تجزیه تحلیل اقتصادی، جداسازی، خالص سازی پس از واکنش، در ساخت راکتورها شایان توجه اند که در اینجا فرصت بررسی آنها را نخواهیم داشت.

طراحی راکتور نیاز به داشتن اطلاعات عمیق علمی و تجربی در زمینه های ترمودینامیک، سینتیک شیمیایی، مکانیک سیالات، انتقال حرارت، انتقال جرم و مسائل اقتصادی دارد.

تعیین نوع تغییرات شیمیایی و حداکثر تبدیل آنها در راکتور و میزان حرارت آزاد شده یا جذب شده واکنش به کمک علم ترمودینامیک صورت می گیرد. با استفاده از انرژی آزاد اجزای ترکیب شونده، می توان ثابت تعادل را به دست آورد و با دانستن ثابت تعادل حداکثر مقدار محصول واکنش را می توان تخمین زد [1].

تعیین سرعت تشکیل فراورده ها و تأثیر شرایط عمل بر این سرعت، بررسی و شناخت مکانیسم واکنش و چگونگی انجام آن با آگاهی به علم سینتیک امکان پذیر می باشد.

دانستن سینتیک واکنش شیمیایی به منظور طراحی راکتورها ضروری و بدلائیل زیر اهمیت دارد؛ با توجه به چگونگی واکنش مواد که در ارتباط با ساختار مولکولی آنهاست می توان در مورد استحکام نسبی پیوندهای شیمیایی و رفتار آنها اطلاعاتی به دست آورد و در جهت درک ماهیت سیستمهای واکنش دهنده، چگونگی تشکیل و شکسته شدن پیوندهای شیمیایی و تخمین انرژی و پایداری از آنها استفاده کرد. سینتیک، پایه تئوریهایی مهمی در احتراق و انحلال است و به کمک آن می توان روشی به منظور مطالعه انتقال حرارت و جرم و بررسی سرعت واکنشها در زمینه های مختلف به دست آورد.

سرعت واکنشها به نوع آنها بستگی دارد و متغیرهای زیادی روی آن مؤثر است. در سیستمهای همگن دما، فشار و غلظت، متغیرهای اصلی می باشند. در سیستمهای ناهمگن به دلیل وجود چندین فاز و انتقال مواد از فازی به فاز دیگر در طی واکنش، سرعت پیشرفت واکنش و انتقال جرم و حرارت اهمیت دارد و هر چه واکنش سریعتر باشد مسائل انتقال حرارت و جرم مهمتر می شود. در واکنشهای غیر همگن انتقال حرارت و جرم عوامل مهمی در مشخص کردن سرعت واکنش می باشند. مسئله مهمتر مشخص کردن اثر این عوامل بر روی هر یک از مراحل واکنش و شدت این تأثیرات می باشد. با دانستن کمیت هر یک از این عوامل می توان تصویر روشنی از تأثیر آنها بر سرعت واکنش به دست آورد. طراحی دستگاههای

بزرگ صنعتی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، فقط با داشتن اطلاعات فوق امکان پذیر است (۱).

دما و اندازه راکتور برای حداکثر تولید

برای داشتن حداکثر تولید باید توزیع مطلوب محصولات واکنش و میزان تبدیل زیاد آن منظور گردد. شرایط دما و فشار برای انجام واکنش، اندازه و نوع راکتور در میزان تبدیل و توزیع محصولات واکنش مؤثرند. اگر توزیع مطلوب محصولات واکنش در دمای بالا حاصل شود باید حداکثر دمای مجاز را به کار برد. در صورتی که توزیع مطلوب در دمای پایین عملی باشد، یعنی شرایطی که میزان تولید تمام اجسام بسیار اندک است، بهتر است دمای متوسطی اختیار شود، زیرا دمای پایین گرچه توزیع مطلوب را تا اندازه ای محتمل می کند ولی سرعت واکنش و میزان تبدیل را تحت الشعاع قرار می دهد. دمای دقیق واکنش یا گستره دمای لازم به روش تجربی یا به طریق برون یابی به دست می آید. برای این منظور باید دید تغییرات دما و فشار سیستم چگونه تعادل، سرعت واکنش و توزیع محصولات را تحت تأثیر قرار می دهند. از این طریق می توان دمای مناسب را به بهترین وجه برای راکتورهای مختلف به دست آورد. از آنجا که واکنشهای شیمیایی معمولاً با تولید یا جذب حرارت همراه اند، باید دانست که این امر چه اثراتی بر دمای مخلوط واکنش دارد. با داشتن این اطلاعات می توان سیستمهای متعدد راکتور و مبدلهای حرارتی را که دارای بهترین شرایط عملیاتی باشند، طراحی نمود و با مطالعات اقتصادی، یکی از سیستمهای طراحی شده را به عنوان بهترین مورد انتخاب کرد. هدف، تعیین بهترین شرایط عملیاتی و سعی در نزدیک شدن به این شرایط می باشد (۱).

انواع راکتورها و ویژگیهای آنها

اشکال و طرحهای فراوانی از راکتور ساخته شده است. عوامل متعددی در انتخاب نوع راکتور در نظر گرفته می شوند. از جمله این عوامل، مورد استفاده آن به عنوان راکتور آزمایشگاهی، راکتور صنعتی و یا واحد تجاری می باشد. در ضمن نوع واکنش، ظرفیت تولید، بهای دستگاهها، راه اندازی آنها، ایمنی، انعطاف پذیری، عمر و دوام در دستگاهها، مدت زمان واکنش و جنبه های اقتصادی در انتخاب راکتور باید مورد توجه قرار گیرند. عواملی از قبیل خواص و حالت فیزیکی خوراک و فراورده ها، نظیر گاز، مایع، جامد یا ترکیبی از آنها، ویژگیهای واکنش شیمیایی نظیر غلظت مواد واکنشگر، سرعت واکنش، شرایط عملیاتی، دفع یا جذب حرارت، اثر متغیرها بر روی هر یک از مراحل و شدت این تأثیرات، ماهیت کاتالیزور مورد استفاده (فعالیت، عمر، حالت فیزیکی)، تجهیزات لازم برای اختلاط و تخلیه محصولات واکنش، خصوصیات جریان، پدیده های انتقال و اختلاط و شیوه های جداسازی نیز باید مورد توجه قرار گیرند. از میان عوامل فوق، که در ارتباط با یکدیگرند و باید با

هم مورد بررسی و توجه قرار گیرند، اختلاط مؤثر واکنشگرها و تخلیه محصولات مهمترین مسئله در راکتور می باشد. سایر عوامل با انتخاب صحیح اولیه سیستم واکنشگرها و میزان تبدیل آنها و گزینش پذیری محصولات واکنش تنظیم می شوند. راکتورها با توجه به ویژگیهای آنها به چهار دسته عمده زیر تقسیم می شوند:

— راکتور ناپیوسته با همزدگی خوب (نوبتی به خوبی همزده)

(well-stirred batch reactor)

— راکتور نیمه پیوسته (semi-batch reactor)

— راکتور پیوسته همزده (continuous-stirred reactor)

— راکتور لوله ای (tubular-reactor)

در شکل ۱ سه نوع راکتور نشان داده شده است.

معمولاً یکی از این سه نوع راکتور و با ترکیبی از آنها مورد استفاده قرار می گیرند. انتخاب نوع و مدل بستگی به سرعت واکنشها و پدیده های انتقال حرارت، همزدگی و انتقال جرم دارد. در بخش بعد به اختصار درباره مشخصات و زمینه های اصلی کاربرد راکتورها بحث می شود.

راکتور ناپیوسته با همزدگی خوب (نوبتی به خوبی همزده)

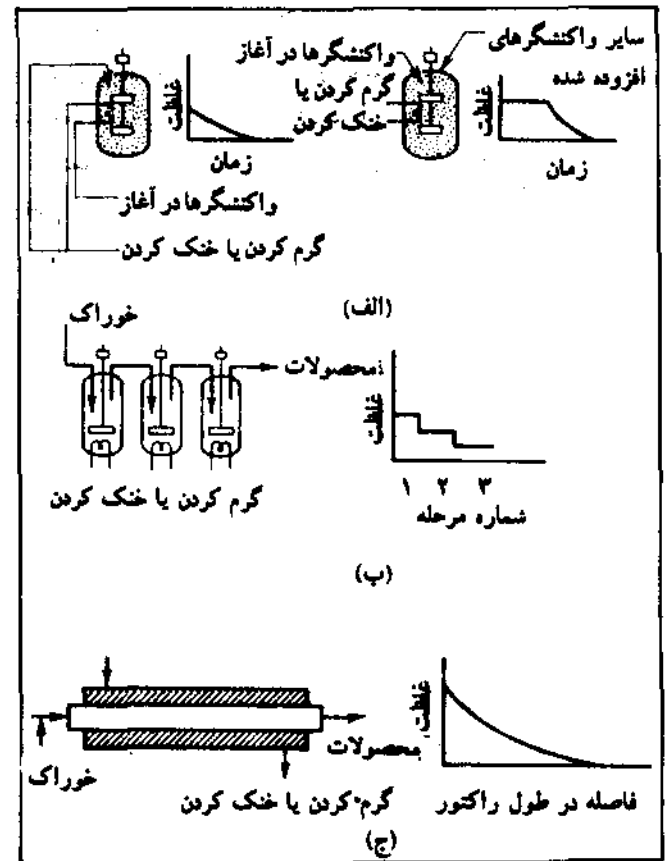
راکتور ناپیوسته ظرفی است که مواد ترکیب شونده طی زمان معینی در داخل آن در حالی که به هم زده می شوند به خوبی مخلوط می گردند و واکنش می دهند. این عمل ناپیوسته است و غلظت اجسام با زمان تغییر می کند، با این حال در هر لحظه ترکیب نسبی اجسام در تمام نقاط دلخواه داخل راکتور همسان است (۱).

راکتورهای ناپیوسته دستگاههای نسبتاً ساده ای بوده و نیاز به وسایل و دستگاههای کمکی اضافی ندارند. این راکتورها برای مطالعه سرعتهای واکنش در تجربیات آزمایشگاهی در مقیاس کوچک مناسب می باشند و همچنین زمانی که در صنعت، تولید در مقیاس کم مد نظر باشد از این قبیل راکتورها استفاده می شود. عموماً راکتورهای تجاری پیوسته بر راکتورهای ناپیوسته برتری دارند، زیرا سرمایه گذاری و قیمت تمام شده در فرایندهای پیوسته کمتر است. این نوع راکتورها عموماً در دما و حجم ثابت به کار می روند، بنابراین در مطالعه سرعت سیستمهای همگن مفیدند. این راکتورها مناسبترین وسیله برای تولید محصولات پربها، تهیه مقدار کم محصول یا تولید تعداد زیادی محصول متنوع با استفاده از یک دستگاه هستند. همچنین در مواردی که عدم اطلاع از چگونگی جریان پیوسته نظیر انتقال مواد با گرآوری بالا یا مواد چسبناک وجود دارد، این نوع راکتور برتری دارد. در موارد خاصی که عملیات متوالی بیشتری برای به دست آوردن محصولاتی با راندمان بالا مورد نظر باشد چنین وسیله ای مناسبتر است، به عنوان مثال در موردی که واکنش دهنده ها با طی چرخه مرکی از دما و فشار، غلظت متغیری را شاهد باشند.

از راکتورهای ناپیوسته اغلب در تعمیم و توسعه فرایندهای پیوسته استفاده می شود. به لحاظ تناسب و سهولت به کارگیری آن در طرحهای آزمایشگاهی، جز در مواردی که واکنشها سریع می باشند، نتایج به خوبی می توانند تفسیر شوند و مورد بهره برداری قرار گیرند و در بزرگتر کردن مقیاس مورد استفاده واقع شوند [2].

تقریباً در تمام راکتورهای ناپیوسته مواد به خوبی همزده می شوند. بنابراین همه خصوصیات به طور ایده ال در تمام نقاط همسان اند. زمان اقامت تمام اجزاء واکنشگر همسان و ثابت است. زمان اقامت همسان سبب تولید محصول یکتواخت و گزینش پذیری نسبت به راکتورهای پیوسته می شود. از مزایای دیگر راکتور ناپیوسته بهای اندک و انعطاف پذیری آن است (به دلیل سهولت کنترل واکنش و در صورت لزوم توقف آن) ولی در عین حال معایبی مانند هزینه زیاد کارگر، زمان طولانی لازم برای تخلیه، تمیز کردن و پر کردن مجدد و کنترل کیفیت محصول دارد. در ضمن واکنشهای جانبی ناخواسته، محصول ناپایدار و یا واسطه های فعال عملیاتی نوبتی را همراهی می کنند (۱).

در موقع به کارگیری نتایج راکتور ناپیوسته باید برای بزرگ کردن مقیاس یا طراحی راکتورهای پیوسته مجموعه ملاحظاتی را در نظر گرفت. بنابراین آگاهی از ویژگیهای جریان درونی در طرح راکتور برای پیش بینی



شکل ۱ - سه نوع راکتور اصلی (الف) راکتور ناپیوسته، (ب) راکتور پیوسته، (ج) لوله ای [1]

کارایی مهم است. از این راکتورها برای ساخت رزینهای پلاستیکی استفاده می‌شود. تولید تمام رزینهای پلی‌استر، فسولیک، آلکید، اوره فرمالدئید، آکریلیک و فوران با این نوع راکتور امکان‌پذیر می‌باشد و همچنین از آنها برای انجام واکنشهای پلیمری به طریق تراکمی یا رادیکال آزاد استفاده می‌شود [1]. راکتورهای ناپیوسته هم نزده به طور عمده برای عملیات قالبگیری موادی مانند پلی متیل متاکریلات یا ناپلون ۶ به کار می‌روند [2].

راکتور نیمه پیوسته

راکتور نیمه پیوسته، راکتور ناپیوسته اصلاح شده‌ای می‌باشد که کاربردهای متفاوتی از تیتز کردن کالرمتری در آزمایشگاه‌ها گرفته تا تبدیل چدن به فولاد در کوره‌های بزرگ دارد. این نوع راکتورها انعطاف‌پذیرند، ولی تفسیر نتایج حاصل از عملیات آنها دشوارتر از انواع دیگر است. با این قبیل راکتورها می‌توان سرعت واکنش را کنترل کرد زیرا واکنش، ضمن افزایش پیوسته واکنشگرها انجام می‌گیرد. زمانی که واکنش اصلی گرما ده یا گرماگیر باشد، برای دستیابی به محصول بهتر و گزینش پذیرتر، افزودن و خارج ساختن تدریجی مواد به کنترل دما کمک می‌کند (۱). تولید فرآورده‌های لاتکس با گستره وسیع در این نوع راکتورها امکان‌پذیر می‌باشد [2].

راکتور پیوسته همزده

در راکتورهایی با جریان و مخزن همزده، مواد واکنشگر به طور پیوسته به ظرف واکنش که خوب به هم می‌خورد، افزوده می‌شوند و همزمان فرآورده‌ها از آن خارج می‌گردند. این نوع راکتورها اختصاراً *CSTR (Continuous-flow Stirred Tank Reactor)* نامیده می‌شوند. در این راکتورها همزدگی مکانیکی و هیدرولیکی برای ایجاد یکواختی در محیط واکنش و دما مورد نیاز است [1].

راکتورهای پیوسته به دو دسته «پایا» و «ناپایا» تقسیم می‌شوند. راکتورهای با حالت پایا در واکنشهای سریع مثلاً در صنایع نفت مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین این نوع راکتورها برای مطالعه سیستمهای همگن به کار گرفته می‌شوند و در برخی حالات در بررسی یا تکمیل مطالعه سیستمهای همگن بر راکتورهای ناپیوسته برتری دارند. معمولاً مطالعه واکنشهایی که بسیار سریع هستند و یا در فاز گازی صورت می‌گیرند و یا اینکه محصولات آنها متفاوت هستند با این نوع راکتورها آسانتر می‌باشد. اولین نوع راکتور با حالت پایا به انواع گوناگون راکتور با جریان تویی (*plug flow*)، راکتور حلزونی، راکتور با جریان پیستونی، لوله‌ای کامل و راکتورهایی با عدم اختلاط موسوم می‌باشند. جریان اجزای سیال در داخل این نوع راکتورها کاملاً منظم است و هیچ گونه اختلاط یا نفوذی در امتداد عمود بر مسیر جریان سیال مشاهده نمی‌شود. در ضمن، زمان اقامت برای تمام اجزای سیال همسان

است.

نوع دیگر راکتور با حالت پایا به نامهای راکتور مخلوط شده (*mixed*)، راکتور همزده با پس‌آمیزی (*stirred tank backmix*) یا راکتور مخزنی همزده پیوسته *CSTR* موسوم است. همان طور که از این اسامی برمی‌آید محتویات این راکتورها به خوبی مخلوط می‌شوند و توزیع دما و غلظت همه اجزاء در راکتور همسان است. بنابراین ترکیب نسبی جریان خروجی از راکتور با سیال موجود در آن یکسان است. این قبیل جریان را «جریان همزده» (*mixed flow*) یا مخلوط شده و راکتور مربوطه را راکتور همزده یا راکتور با جریان همزده (*mixed flow reactor*) می‌نامند (۱).

محتویات راکتور *CSTR* در مقایسه با راکتور ناپیوسته به خوبی همزده می‌شوند و زمانی که محتویات موجود در داخل راکتور *CSTR* از آن خارج می‌شوند، غلظت مواد واکنشگر پایین است. گاهی چندین *CSTR* به صورت مجموعه، برای تبدیلات بالای مواد واکنشگر مورد استفاده قرار می‌گیرند [1].

اغلب راکتورهای با مخزن همزده، برای دمای یکواخت و ترکیبات همسان ظرف واکنش طراحی می‌شوند. از این نوع راکتورها در تهیه پاراتولوالدئید (*PTAL: para-tolualdehyde*)، پلی اتیلن با جرم مخصوص کم، کوبلیمرهای پلی اتیلن و کوبلیمرهای استیرن نظیر کوبلیمر استیرن - آکریلونیتریل استفاده می‌شود.

راکتور لوله‌ای

راکتور لوله‌ای متشکل از لوله‌ای است که جریان پیوسته‌ای با حالت پایا در آن برقرار است. در راکتورهای ایده‌ال اگر جریان سیال به وسیله قالبهای جامد یا پیستون باشد زمان واکنش یا زمان اقامت در یک لوله با یک سطح مقطع معین برای تمام موادی که جریان می‌یابند یکسان است. از این جنبه و نیز از لحاظ گرادیان پیش برنده واکنش که به مرور زمان و با پیشرفت واکنش کاهش می‌یابد، این نوع راکتور به راکتور ناپیوسته شبیه است. در راکتورهای لوله‌ای با قطر بزرگ تنها گرادیان دما افزایش می‌یابد و دفع حرارت واکنش پلیمر شدن از میان دیواره لوله به طور فزاینده‌ای مشکل می‌شود.

راکتورهای لوله‌ای اغلب در پلیمر شدن توده‌ای به طریق رادیکال آزاد و همچنین انجام واکنشهای پلیمری به روش تراکمی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگر محصولات فرعی در فاز دیگر پراکنده شوند، تعادل پیشرفت واکنش را محدود نخواهد کرد. از این نوع راکتورها برای پیرولیز یا کراکینگ مواد نفتی به اولفینها به ویژه اتیلن استفاده می‌شود [1].

در راکتورهای لوله‌ای سه نوع جریان قابل مشاهده است این سه نوع عبارتند از: جریان لایه‌ای (*laminar flow*)، جریان در هم (*turbulent flow*) و جریان تویی (*plug flow*)

به طور کلی در برخی موارد برای دستیابی به درجه مطلوب تبدیل،

قسمتی از جریان خروجی از یک راکتور را به داخل آن باز می‌گردانند. این نوع را راکتور با جریان برگشتی می‌نامند (۱).

نوع راکتور	ویژگی‌ها	کاربردها
گاز - مایع	لوله‌ای پیوسته CSTR لوله‌ای	انتگرالی یا دیفرانسیلی واکنشهای آهسته واکنشهای نسبتاً سریع واکنشهای سریع
جامد - گاز - مایع	بستر شناور ناپیوسته تماس گاز - مایع* قهلم آرام باجت	گاز بی اثر یا مایع برای شناوری واکنشهای آهسته واکنشهای سریع
مایع - مایع	مایع - ناپیوسته CSTR فیلمی لوله‌ای ناپیوسته لوله‌ای	همزدن خوب بدون ته‌نشینی یا فاز پراکنده واکنشهای سریع انتگرالی یا دیفرانسیلی با بستر ثابت پراکنده‌گی خوب جامدات بستر ثابت یا شناور

* سطح مشترک تماس باید معین باشد.

تجاری استفاده شود. عوامل تعیین کننده در طراحی و بزرگتر کردن مقیاس راکتور، ماهیت محیط واکنش، سرعت یک واکنش ویژه، میزان انتقال جرم و حرارت از محل واکنش یا به محل واکنش، می‌باشند. زمانی که سرعت واکنش و انتقال حرارت قابل ملاحظه باشند یکدیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهند و گفته می‌شود که این متغیرها وابسته به هم‌اند، در این شرایط، افزایش اندازه راکتور شدت انتقال حرارت و جرم و در نتیجه سرعت معلوم واکنش را تغییر می‌دهد. بنابراین تأثیر برگزینش پذیری نیز ممکن است. درجه وابستگی متغیرهای اشاره شده به یکدیگر متفاوت است و به عوامل متعددی بستگی دارد. گاهی اوقات پدیده‌های انتقال حرارت و جرم را در سیستمهای واکنش دهنده می‌توان توسط روشهای ریاضی یا حتی عددی تحلیل کرد. با توجه به این اطلاعات مطالبی درباره طراحی واکنشهای پلیمر شدن بیان می‌شود [1].

طراحی واکنشهای پلیمر شدن

یک فرایند پلیمر شدن را می‌توان به طور کلی به سه مرحله متوالی آماده‌سازی، پلیمر شدن و جداسازی تقسیم کرد. آماده‌سازی به مفهوم تخلیص و اختلاط مواد واکنشگر است. خالص‌سازی با درجه بالا بسیار حائز اهمیت است، زیرا مقادیر جزئی از ریباینده‌های رادیکال (*radical scavenger*) یا عوامل انتقال به زنجیر در سیستم واکنش دهنده بر سرعت پلیمر شدن و وزن مولکولی پلیمر تشکیل شده تأثیر می‌گذارد. اختلاط خوب واکنشگرها قبل و در حین واکنش نقش بسیار مهمی در واکنش دارد و در کیفیت فرآورده مؤثر است.

راکتور آزمایشگاهی

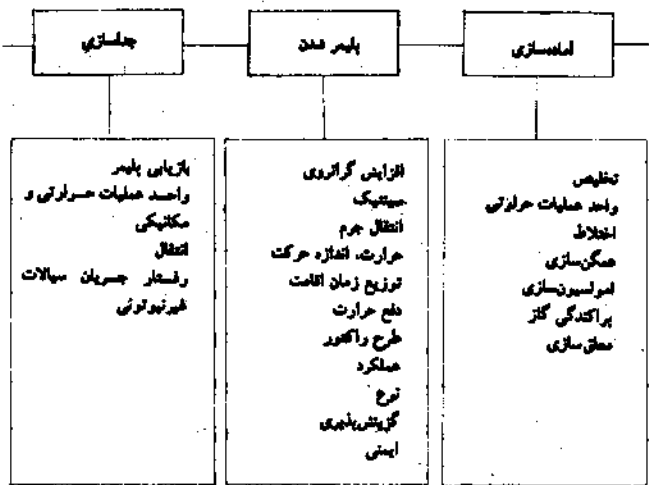
راکتور آزمایشگاهی با نوع صنعتی پاراکتورهای که ضمن تکمیل و توسعه فرایندها مورد استفاده قرار می‌گیرند، متفاوت است و داده‌های مربوط به سینتیک واکنشها و خواص فیزیکی محصولات در این نوع راکتور سهلتر به دست می‌آید. شباهت این راکتور به یکی از انواع متداول آن (ناپیوسته، نیمه پیوسته، پیوسته همزده، لوله‌ای) با الگوهای جریان معین، عملیات تکدما و به دست آوردن نتایج در محدوده وسیعی از متغیرها حائز اهمیت است. گستره شرایط مورد مطالعه برای تعیین کفایت تأثیر متغیرها باید به اندازه کافی وسیع باشد. اما نیازی نیست که معادلات سرعت دقیقاً با مکانیسم صحیح واکنشها مطابقت داشته باشند. معادلات سرعت واقعی می‌توانند برای درک فرایند مفید باشند و به شرایط مطالعه نشده تعمیم یابند.

راکتورهای همزده برای خوردن مایع مفیدند. به طور عمده برای سیستمهای مایع چندفازی به کار می‌روند. این راکتورها برای فشارهای پایین و دماهای نسبتاً پایین نیز مناسب‌اند. راکتورهای ناپیوسته با اختلاط خوب برای واکنشهای آهسته ترجیح داده می‌شوند چون در راکتورهای با جریان پیوسته امکان اندازه‌گیری تغییر غلظت ترکیبات با زمان وجود دارد. این نوع راکتورها برای واکنشهای سریع نیز مناسب‌اند. تمام راکتورهای آزمایشگاهی مجهز به همزن باید به یک موتور با دور متغیر مجهز باشند تا از همزدگی به میزان دلخواه اطمینان حاصل شود [2].

راکتور مخصوص هر واکنش را می‌توان با توجه به شرایط واکنش، عوامل مؤثر و شیوه‌های انجام آن انتخاب کرد. در جدول ۱ فهرست کوتاهی از انواع راکتورهای توصیه شده با توجه به سرعت و مخلوط واکنش آمده است. بدیهی است که بهترین انتخاب با تجزیه و تحلیل دقیق واکنش مورد نظر، خواص فیزیکی و شیمیایی سیستمها و ارزیابی موضوعات مورد مطالعه امکان پذیر می‌باشد.

بزرگتر کردن مقیاس (Scale-up)

اساس بزرگتر کردن مقیاس، انتخاب طرحها و شرایط عملیاتی است که متغیرهای وابسته اصلی در واحدهایی با اندازه‌های متفاوت آثار مشابهی داشته باشند. هدف نهایی اطمینان از توزیع دلخواه، زمان تأثیر واکنش و کیفیت مطلوب محصول است. قبل از تولید محصول در مقیاس صنعتی استفاده از کوچکترین واحد آزمایشگاهی و یا طرح نیمه صنعتی (*Pilot plant*) برای ملاحظات و بررسیهای علمی و اقتصادی ضروری است. زمانی که تولید مقادیر زیاد محصول مورد نظر باشد و در ضمن تردیدهای قابل ملاحظه‌ای در هنگام اجرای روشهای آزمایشگاهی در مقیاسهای صنعتی موجود باشد بهتر است از واحدهای حد واسط طرحهای صنعتی و



شکل ۲ - قسمتهای اصلی فرایند پلیمر شدن و بعضی جنبه‌های طراحی راکتور [3]

روشهای پلیمر شدن به چهار گروه اصلی پلیمر شدن توده، امولسیون، تعلیق و محلول طبقه بندی می‌شوند. فرایندهای پلیمر شدن به سیستمهای همگن و ناهمگن قابل تقسیم است؛ پلیمر شدن تعلیقی و امولسیونی، به صورت همگن، پلیمر شدن توده، همگن (پلی-متیل متاکریلات) و ناهمگن (پی‌وی‌سی) و پلیمر شدن محلول به صورت سیستم همگن می‌باشد. اگر پلیمر تشکیل شده در حلال، محلول نباشد و در طی پلیمر شدن رسوب کند، پلیمر شدن محلول به صورت تعلیقی مورد مطالعه

دومین مرحله فرایند پلیمر شدن، واکنش پلیمر شدن می‌باشد. پلیمر شدن رادیکال آزاد واکنشهای زنجیری در محیط همگن یا ناهمگن و معمولاً در فاز مایع انجام می‌گیرد. افزایش گرانی سیستمهای همگن که ممکن است طی مدت پلیمر شدن تا چندین برابر تغییر کند می‌تواند اثرات مهمی روی سینتیک واکنش، پدیده‌های انتقال حرارت، انتقال جرم، اندازه حرکت، کیفیت اختلاط و در نهایت توزیع زمان اقامت در فرایندهای پیوسته داشته باشد. از آنجا که اکثر واکنشهای پلیمر شدن گرماده است و عموماً واکنش در دمای ثابتی انجام می‌گیرد، باید حرارت زیادی از این نوع راکتور تخلیه شود. طراحی راکتور اهمیت ویژه‌ای در مورد فرایندهای پلیمر شدن دارد. خصوصیات محصول از قبیل توزیع وزن مولکولی، شاخه‌دار شدن زنجیر و شبکه‌ای شدن پلیمرها تحت تأثیر نوع راکتور است.

آخرین مرحله فرایند پلیمر شدن مرحله جداسازی برای به دست آوردن پلیمری با درجه خلوص و حالت معین است. این مرحله معمولاً از طریق عملیات فیزیکی و حرارتی انجام می‌شود؛ در این مرحله باید رفتار جریان پلیمر مذاب، یا محلول و یا پراکنده مورد توجه قرار گیرد، زیرا در بسیاری از موارد محصول پلیمری به صورت سیالات غیر نیوتونی رفتار می‌کند. در شکل ۲ بعضی از جنبه‌های مهم طراحی شیمیایی فرایند پلیمر شدن به طور شمایی خلاصه شده است.

جدول ۲ - مقایسه روشهای پلیمر شدن [3]

نوع پلیمر شدن	ملاحظات	مزایا	معایب
PS, PVC, LDPE, LDPE Polyester, PA, PMMA, HIPS	گرانی بالا یا مشکلات حرارت و اختلاط، مسائل مربوط به پمپ کردن، آلودگی دیواره راکتور با تشکیل فیلم	ظرفیت کم راکتور در مقایسه با پلیمر شدن به طریق غیر مداوم، مشکل اتلاف آب و آلودگی دیواره راکتور با تشکیل فیلم	عملکرد بالای راکتور، پایین بودن هزینه جداسازی، درجه خلوص بالای محصول، بدون واکنشهای انتقالی به حلالها و مواد افزودنی
نوع دانهای: SAN, PMMA, PS غیردانهای: PAN, PTFE, PVC, HIPS	فرایندهای دوغایی: PP, HDPE	ظرفیت کم راکتور در مقایسه با پلیمر شدن به طریق غیر مداوم، مشکل اتلاف آب و آلودگی دیواره راکتور با تشکیل فیلم	پراکنده گز گرانی پایین، انتقال حرارت خوب، و پایین بودن هزینه جداسازی، مقایسه با پلیمر شدن امولسیونی
PMMA, PVAC, ABS, PVC NBR, CR, SBR, PTFE, SAN	هزینه جداسازی در حالت مجزا کردن بالاست، مشکلات اتلاف آب، آلودگی دیواره راکتور با تشکیل فیلم و حضور امولسیون کننده به صورت ناخالصی در محصولات پلیمر وجود دارد	ظرفیت کم راکتور در مقایسه با پلیمر شدن توده کمتر است، در جداسازی پلیمر هزینه جداسازی بالاست، حلالها غالباً آتسگیر و سمی می‌باشند، امکان انتقال واکنشها به حلال و وزنهای مولکولی پایین وجود دارد	در مقایسه با پلیمر شدن به روش توده‌ای گرانی پایین، و انتقال حرارت خوب است، سرعت پلیمر شدن بالا، وزن مولکولی بالا و کاربرد مستقیم لاتکس
SBR, PS, PAN, PVAC, SBR IR, BR, PVAL, PAN, PVA EPDM	ظرفیت کم راکتور در مقایسه با پلیمر شدن توده کمتر است، در جداسازی پلیمر هزینه جداسازی بالاست، حلالها غالباً آتسگیر و سمی می‌باشند، امکان انتقال واکنشها به حلال و وزنهای مولکولی پایین وجود دارد	ظرفیت کم راکتور در مقایسه با پلیمر شدن توده کمتر است، در جداسازی پلیمر هزینه جداسازی بالاست، حلالها غالباً آتسگیر و سمی می‌باشند، امکان انتقال واکنشها به حلال و وزنهای مولکولی پایین وجود دارد	در مقایسه با پلیمر شدن توده گرانی پایین است، انتقال حرارت و اختلاط بهتر صورت می‌گیرد، کاربرد مستقیم محلول امکان پذیر است، آلودگی دیواره راکتور در مقایسه با پلیمر شدن توده کمتر است.

* LDPE - پلی اتیلن با جرم متوسط کم
PS - پلی استیرن
HIPS - پلی استیرن شدیداً آشفته شده
PMMA - پلی متیل متاکریلات
PA - پلی آمید
SAN - استیرن-آکریلونیتریل
PTFE - پلی تترافلورواتیلن
PAN - پلی آکریلونیتریل
HDPE - پلی اتیلن با جرم متوسط بالا
PP - پلی پروپیلن
ABS - آکریلونیتریل-بوتادی-ن
SBR - استیرن-بوتادی-ن
CR - پلی کربودیون
NBR - نایلیک نیتریل بوتادی-ن
PVAL - پلی وینیل آلکول
BR - راکتور ناپیوسته
IR - پلی ایزوپرن
EPDM - اپن پروپیلن - مونومر های آن

قرار می‌گیرد. انتخاب روش پلیمر شدن تا حد زیادی به هدف تولید بستگی دارد. از میان روشهای گوناگون، پلیمر شدن امولسیون مهمترین روش است. اما پلیمر شدن توده و تعلیقی نیز به طور وسیعی برای تولید فرآورده‌های پلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرند. معایب و محاسن انواع روشهای پلیمر شدن و پلیمرهای صنعتی تولید شده با روش‌های مذکور در جدول ۲ ارائه شده است [3].

اکثر پلیمر شدنهای رادیکالی در فاز مایع انجام می‌گیرند، بنابراین معمولترین راکتورهای مورد استفاده، انواع پیوسته همزده آنهاست که می‌توانند به طریق نیمه پیوسته نیز عمل کنند. در جدول ۳ تعدادی از پلیمرهای تولید شده در «راکتور پیوسته همزده» ارائه شده است.

و بهترین روشی که پلیمر را در کیفیت و کمیت مطلوب تولید کند، ارزیابی شود. دانستن چگونگی تأثیر افزایش گرانی و کاهش انتقال حرارت در طول مدت پلیمر شدن ضروری است که درباره این موارد مطالبی به طور مختصر بیان خواهد شد. در ضمن اطلاع از سینتیک غیر ایده‌آل که شامل پدیده‌هایی نظیر توقف، اثرات ژل و شیشه‌ای شدن (gel effect and glass effect)، جمع شدن ذرات و فرایندهای انعقاد، جدا شدن فازها و غیره است، پیش نیازهای ضروری در طراحی راکتور پلیمر شدن است.

افزایش گرانی و تأثیر آن بر فرایند پلیمر شدن یکی از مهمترین ویژگیهای واکنشهای پلیمر شدن، افزایش زیاد

جدول ۳ - طبقه‌بندی انواع راکتورها مطابق شیوه‌های عملی و پهنای توزیع زمان اقامت* [3]

عمل	نوع راکتور	پلیمرهای صنعتی
نابپیوسته و نیمه پیوسته	راکتور با مخزن همزده	(e, a, b) PMMA, ** (e, a, b) PVC (e) PVAC, (e) ABS, (a) PS (b) polyester, (e) SAN, (e, a) PTFE
	قالب (روش RIM***)	(b) PUR
پیوسته (با منحنی توزیع زمان اقامت پهن)	راکتور پیوسته همزده (CSTR)	(a) PP, (a) HDPE, (b) LDPE (sol) IR, (sol + b) PS, (a) PVC (a) PAN,
	بستر شناور	(b) PP, (b) LLDPE
	راکتور حلقوی (Loop reactor)	(e) HDPE
	راکتور لوله‌ای	(b) LDPE
پیوسته (با منحنی توزیع زمان اقامت باریک)	راکتور برجی (Tower reactor)	(b) PA
	راکتور پیوسته همزده از نوع آبخاری (Continuous stirred tank reactor - cascade)	پلی‌استر (B), (e) SAN, (e) SBR, (e) ABS, (B, I) IR, (sol) BR (sol) EPDM (a) HIPS, (e) NBR, (e) CR
	برجی آبخاری (Tower - cascade)	(b) PA (e) PS,
	CSTR - برجی آبخاری - (CSTR - tower - cascade)	(b) PA (b) Pa,
	راکتور تسمه‌ای (Endless belt reactor)	(b) PUR (b) PIB,
	راکتور اکسترودر (Extruder reactor)	(b) PA (b) PU,

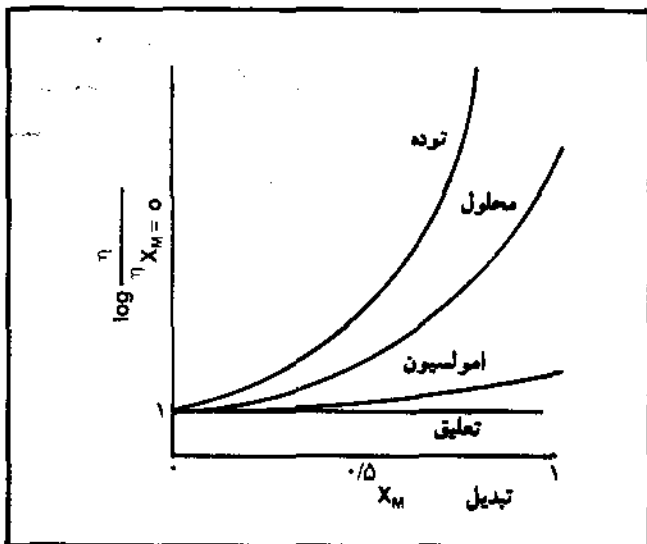
* نمادی از پلیمرها با اولویت روشهای پلیمر شدن آنها در پراکنش داده شده است.
* * * b مخفف پلیمر شدن bulk; e, emulsion; s, suspension; sol: solution است.
* * * RIM: قالب‌گیری تزریقی واکنش (Reaction Injection Molding) - پلی‌ایزوپرن.
* * * PU - پلی‌اورتان، PUR - پلی‌استیک لایتنر پلی‌اورتان.

گرانی با تبدیل مونومر به پلیمر است. افزایش گرانی توده واکنش به ویژه در پلیمر شدن سیستمهای همگن نظیر پلیمر شدن تسوده و محلول چندین برابر افزایش آن در سیستم امولسیون می‌باشد. در پلیمر شدن امولسیون افزایش گرانی متوسط است و در نوع تعلیقی گرانی زیاد

کارایی راکتور یکی از جنبه‌های مهم واکنشهای پلیمری، طراحی مناسب راکتور پلیمر شدن است، به طوری که بتواند شرایط لازم را برای گزینش‌پذیری، ایمنی و کارایی داشته باشد. این مسئله باید با توجه به نوع و اندازه راکتور

تغییری نمی‌یابد.

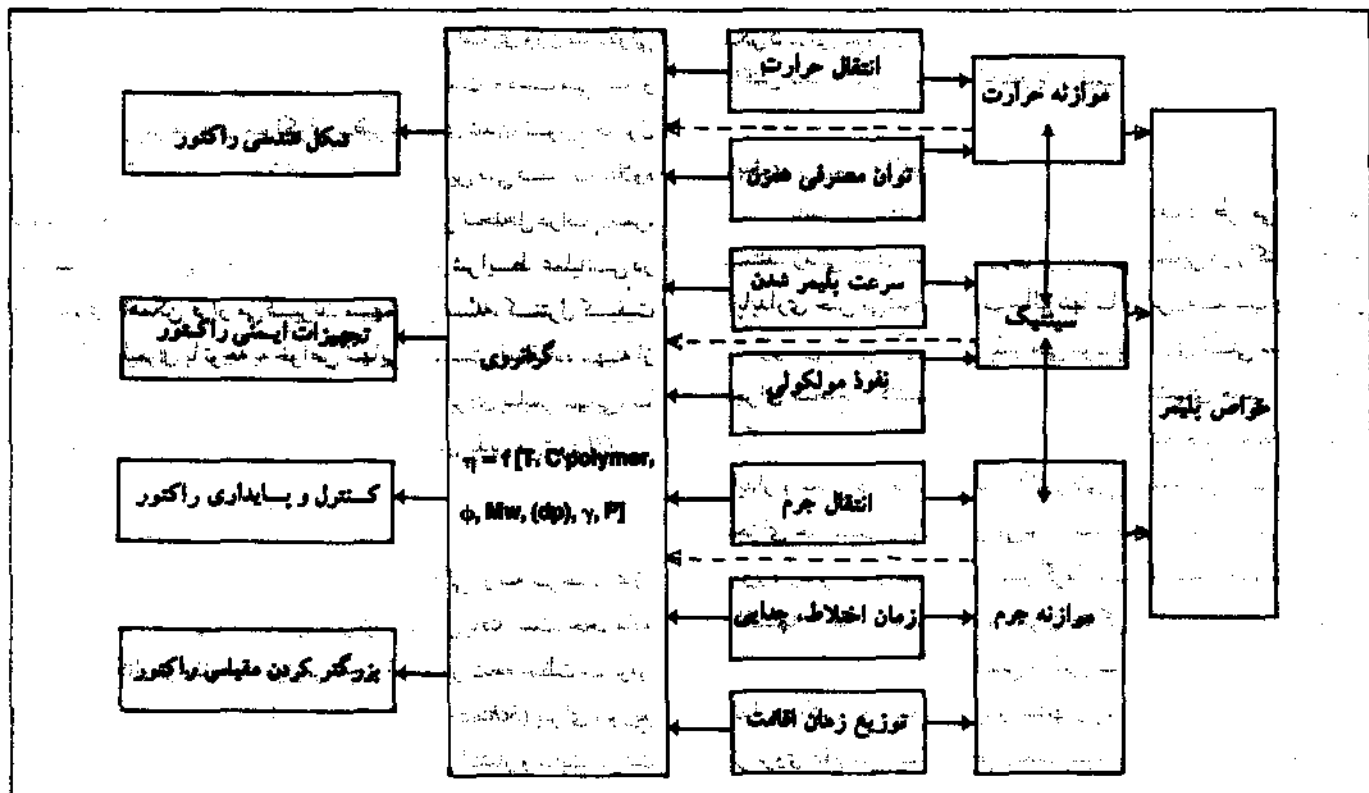
گرانروی اصلی‌ترین پارامتر در فرایند پلیمر شدن است. سینتیک واکنش و همچنین موازنه جرم، حرارت و اندازه حرکت ذرات در راکتور پلیمر شدن به طور قابل توجهی با تغییرات گرانروی تغییر می‌کند. در شکل ۴ تأثیر گرانروی بر فرایند پلیمر شدن به صورت نمودار جریان و به طور شمایی نشان داده شده است [3].



شکل ۳ - طرح کیفی از تغییرات نسبی گرانروی سه با میزان تبدیل مونومر X_M برای روشهای مختلف پلیمر شدن [3]

در این نمودار $P, \gamma, dp, Mw, (\phi), C_{polymer}, T, \eta$ به ترتیب گرانروی، دما، غلظت پلیمر، کسر حجمی، متوسط وزنی وزن مولکولی، قطر ذرات، سرعت لغزش و فشار می‌باشند.

افزایش گرانروی، ضریب انتقال حرارت را کاهش و توان مصرفی همزن را افزایش می‌دهد و در نتیجه ظرفیت سرمایشی راکتور مرتباً کاهش می‌یابد و کنترل راکتور و پایداری آن دشوارتر می‌شود. گرانروی بالا، نفوذ مولکولی و ضرایب انتقال جرم را کاهش می‌دهد و با افزایش زمان لازم برای رسیدن به یکنواختی مطلوب، میزان اختلاط در مقیاس مساکرو- میکرو کاهش می‌یابد، توده محصول واکنش مرتب جدا شده و روی توزیع آماری زمان فرایندهای پیوسته تأثیر می‌گذارد. اثر افزایش گرانروی در سینتیک واکنش به صورت کاهش میزان تشکیل رادیکالی (اثر قفس و کاهش کارایی آغازگر) (*cage effect and reduced initiator efficiency*) ظاهر می‌شود. واکنش اختتام رادیکال پلیمری با نفوذ کنترل می‌شود (اثر ترمز دورف یا اثر ژل) (*Trommsdorff or gel effect*) و در تبدیلهای بالای مونومر این عمل با واکنش انتشار زنجیر (اثر شیشه‌ای) انجام می‌گیرد. محدودیت واکنش اختتام سبب افزایش غلظت رادیکال شده و در نتیجه سرعت واکنش که عامل اصلی در موازنه جرم و حرارت است زیاد می‌شود. یک عامل بسیار مؤثر بر میزان کارایی راکتورهای پلیمر شدن، حرارت تولید شده است که با انتقال حرارت کاهش می‌یابد. گرچه به طور کلی گرانروی پراکنده‌گی‌ها می‌تواند پایین باشد آثار ژل و شیشه‌ای شدن در پلیمر شدنهای تعلیقی و امولسیونی همانند پلیمر شدن توده‌ای باید



شکل ۴ - نمودار شمایی تأثیر گرانروی بر فرایند پلیمر شدن [3]

در نظر گرفته شوند، زیرا این آثار به گرانروی ترکیب در محل واکنش مربوط می‌شوند.

به طور خلاصه می‌توان گفت که افزایش گرانروی نیز شدیداً بر موازنه جرم و حرارت که شامل سینتیک واکنش پلیمر شدن می‌شود، تأثیر می‌گذارد و در نتیجه گزینش پذیری تمام طیف خواص پلیمر را می‌پوشاند و کارآیی راکتور را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین آگاهی از رفتار جریانی و چگونگی افزایش گرانروی با تبدیل مونومر برای انجام آزمایش در راکتور پلیمر شدن حائز اهمیت است [3].

گزینش پذیری راکتور

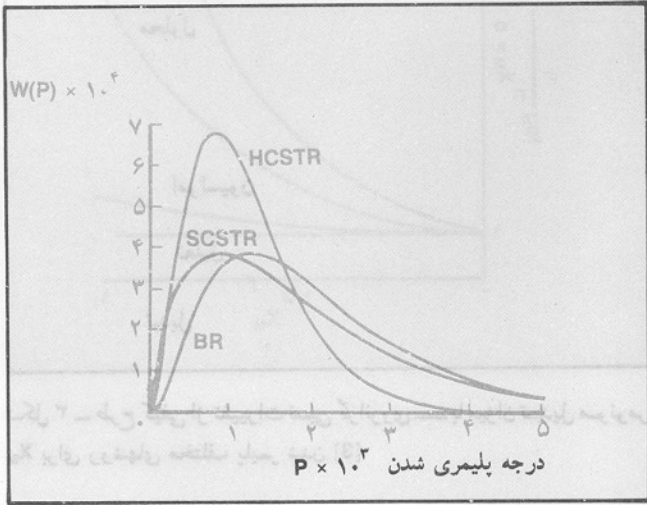
یکی از مهمترین هدفهای طراحی راکتور بهینه‌سازی گزینش پذیری پلیمر شدن است. ساختار مولکولی پلیمرها تنها توسط مکانیسم پلیمر شدن (مراحل یک واکنش) تعیین نمی‌شود بلکه تحت تأثیر پارامترهای طراحی واکنش از قبیل غلظت، گرادیان دما، شرایط خوراک، توزیع زمان اقامت و درجه جدایی قرار می‌گیرد. گرچه متوسط عمر رادیکال پلیمر در حال رشد (τ^*) در حدود چند ثانیه است (معمولاً 10^{-5} تا 10^{-1}) ولی متوسط زمان اقامت در راکتورهای پلیمر شدن (τ) حدود چند ساعت است. نوع راکتور به طور قابل ملاحظه‌ای روی ساختار پلیمر تشکیل یافته تأثیر می‌گذارد. در شرایط همدمای زمان و متغیرهای وابسته به مکان (*location dependent variation*) و غلظت واکنشگرها سبب تغییر گزینش پذیری راکتور می‌شوند.

از آنجا که در هر فرآیند پلیمر شدن تعداد بی‌شماری واکنش متوالی و موازی اتفاق می‌افتند، معمولاً پلیمرهایی با توزیع آماری وزن مولکولی بیشتر، نسبت به محصولات با وزن مولکولی یکنواخت به دست می‌آیند و همراه با سایر پارامترهای مولکولی نظیر شبکه‌ای شدن، توزیع طول رشته‌ها در حالت کوپلیمر شدن کیفیت پلیمر را تعیین می‌کنند. به علاوه نحوه توزیع اندازه ذرات و شکل شناسی پلیمر نظیر تخلخل ذرات پلیمر، جدا شدن فازها و غیره تحت تأثیر نوع راکتور و شرایط عملیاتی در سیستمهای ناهمگن قرار می‌گیرند. مهمترین مسئله، کنترل کیفیت محصولات پلیمری با توجه به خواص نهایی آنهاست. استفاده بهینه از شیوه‌های اندازه‌گیری وزن مولکولی و خواص کاربردی پلیمر نهایی، با کنترل بهتر راکتور و گزینش پذیری بیشتر امکان پذیر می‌شود [3].

توزیع وزن مولکولی

ساده‌ترین واکنشهای پلیمر شدن رادیکالی از سه مرحله، آغاز، انتشار و اختتام با تسهیم نامتناسب یا ترکیب تشکیل یافته است. حجم ماده آغازگر رادیکال در مقایسه با مونومر ناچیز است، در نتیجه غلظت مونومر ثابت فرض می‌شود. توزیع شولز - فلوری (*Schulz-Flory*) برای توزیع وزن مولکولی، بر اساس درجه پلیمر شدن، احتمال انتشار و ثابت سرعت اختتام رادیکال با تسهیم نامتناسب به دست می‌آید [3].

پراکندگی و توزیع وزن مولکولی پلیمر شدن رادیکالی در سه نوع راکتور پیوسته همزده همگن (*HCSTR*) و پیوسته همزده، کامل جدا شده (*SCSTR*) و راکتور ناپیوسته (*BR*) در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طوری که از شکل ۵ پیداست بر اساس محتملترین توزیع شولز - فلوری، باریکترین توزیع مولکولی در راکتور پیوسته همزده همگن (*HCSTR*)، عریض‌تر از آن در راکتور ناپیوسته (*BR*) یا (*PFTR*) و عریض‌ترین توزیع در راکتور پیوسته همزده، کامل جدا شده (*SCSTR*) قابل مشاهده است. پلیمر شدن رادیکالی بسیار پیچیده است و حتی در حالت پلیمر شدن جور همگن واکنشهای انتقال به مونومر، به حلال، و به پلیمر باید مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۵ - توزیع وزن مولکولی در سه نوع راکتور مختلف ایده‌آل برای یک واکنش ساده (آغاز، انتشار و اختتام با ترکیب) [3]

پایداری و ایمنی راکتور

پایداری راکتور و ایمنی آن دو مفهوم مترادف در طراحی واکنشها نیستند. زمانی که در عملکرد تئوری فرایندهای شیمیایی در راکتور تردید و ناپایداری حس می‌شود، عملیات سالم تنها با کنترل مناسب و مطمئن راکتورهای پلیمر شدن امکان پذیر می‌شود. پایداری کلی سیستم نیز اجرای صحیح واکنشها را ضمانت نمی‌کند و واکنشهای جانبی ناخواسته ممکن است روی دهند. راکتورهای ناپیوسته همیشه حالت عملکرد نهایی پایدار و معینی دارند که با رفتار راکتورهای پیوسته متفاوت است. با توزیع مجزای حساسیتهای پارامتری می‌توان عملیات را به‌طور سالم اجرا کرد، به‌ویژه زمانی که واکنش پلیمر شدن گرما ده باشد. بنا به دلایل عملی، واکنشهای جانبی ناخواسته به عنوان مشکل پایداری بی‌اهمیت اند.

مشکلات پایداری و ایمنی راکتور با افزایش آنتالپی واکنش و اندازه راکتور به ویژه در مورد واکنشهای پلیمر شدنی که افزایش گرانروی دفع حرارت را در طول مدت پلیمر شدن کاهش می‌دهد، بسیار اهمیت می‌یابد [3].

طبق قانون آریونس سرعت واکنشها با بالا رفتن دما به صورت نمایی افزایش می‌یابد، در نتیجه رفتار دینامیکی راکتورهای پلیمر شدن به شدت تحت تأثیر دما قرار می‌گیرد. در تحلیل پایداری حرارتی راکتورها، تأثیرات غیر خطی غلظت واکنشگرها بر سرعت واکنش در مقایسه با تأثیر دما از اهمیت بیشتری برخوردار است. اختلاف و انحراف از محدوده‌های معین پایداری منجر به ناپایداری راکتور می‌شود. دو نوع ناپایداری استاتیکی و دینامیکی ممکن است روی دهد. اگر دمای واکنش و تبدیل سریعاً تغییر یابد راکتور ناپایدار استاتیکی نامیده می‌شود. ناپایداری دینامیکی ناشی از تغییرات متناسب دما و تبدیل مونومر به پلیمر زمانی که انتقال فاز معین وجود دارد مشاهده شده است. نوع ناپایداری به نوع راکتور و شرایط عمل بستگی دارد. ناپایداری حرارتی در تعدادی از راکتورهای پیوسته همزده و راکتورهای کامل همزده شده، راکتورهای لوله‌ای غیر ایده‌ال با پراکندگی محوری، راکتورهای لوله‌ای با جریان برگشتی، راکتورهای لوله‌ای با عملکرد حرارتی خودکار مشاهده شده است [3].

اگر دما ضمن انجام یک واکنش جانبی ناخواسته از میزان بحرانی تجاوز کند و پلیمر شدن روی می‌دهد. در این صورت موازنه جرم و حرارت برای توصیف حالت گذرا و دینامیک راکتور، باید همزمان حل گردد تنها در مورد راکتورهایی با مقیاس بزرگ، از ظرفیت حرارتی ظرف واکنش صرف نظر می‌شود و زمانی که دما و میزان تبدیل مواد اولیه به محصول امکان تغییر دارند، تأثیر تغییرات روی ضریب انتقال حرارت و انرژی ورودی توسط همزن مورد توجه قرار گیرد. برای عملیات ایمن راکتورهای پلیمر شدن تحلیل حساسیت حالت فعال نهایی با توجه به زمان آغاز و انجام عملیات و اختلالات غیر عمدی بیرونی نظیر نوسانات در شرایط خوراک‌دهی، دمای خنک کردن، غلظت ناخالصیها و غیره بسیار اهمیت پیدا می‌کند [3].

معرفی راکتورهای آزمایشگاهی موجود در آزمایشگاهها

امروزه راکتورهای آزمایشگاهی با کنترل کامپیوتری برای کاربردهای روزمره در پژوهشهای شیمیایی و بررسیهای آزمایشگاهی در دسترس‌اند. با این نوع راکتورها، تمام مراحل یک واکنش به‌ترتیب و به‌طور خودکار انجام می‌گیرند و نتایج حاصل روی صفحه نمایشگر (monitor) ظاهر و همزمان به‌صورت نوشته و منحنی توسط دستگاه چاپگر (printer) چاپ و رسم می‌شوند. این راکتورها سیستم ایمنی پیشرفته و زنگ مخصوص دارند و حتی بدون حضور استفاده‌کننده (اپراتور) می‌توانند کار کنند. طرز عمل آزمایشها و نتایج به‌دست آمده بر روی دیسک‌هایی ذخیره می‌گردند. این نتایج پس از انجام آزمایش می‌توانند به‌صورت پرونده اطلاعات روی صفحه نمایشگر ظاهر، به‌صورت پرونده استاندارد چاپ و یا به‌شکل مسنجهایی توسط چاپگر رسم شوند.

به‌طور کلی استفاده از این دستگاهها خیلی ساده است [4].

برای انجام آزمایش با این نوع راکتورها، دستورالعمل باید فرمولبندی شود. فرمولبندی طرز عمل شامل فرمولهای واکنش، کمیتهای راهنماییهای عملی برای انجام آزمایش است.

این نوع راکتورها از سیستمهای گوناگونی تشکیل شده‌اند که عبارت‌اند از: تقطیر، خلاء، الکترو pH، همزن، سیستم خوراک دهی که خود شامل دو ترازو، توزیع‌کننده فشار گاز بسی اثرمانند نیتروزن و شیرهای خوراک دهی (dosing valve) است. همچنین سیستم ایمنی آشکار ساز دود (smoke detector)، ترموکوپل، روغن حرارتی گردشی و مرکز کنترل که خود شامل کنترل‌کننده، دیسک‌های مختلف برنامه و نتایج، صفحه حروف، صفحه نمایشگر و چاپگر می‌باشد.

معمولاً این دستگاهها شامل تمام تجهیزات موردنیاز برای عملیات اصلی، دستگاههای اندازه‌گیری برای کنترل و نمایش و ابزارهای تنظیم‌کننده می‌باشند. این مجموعه‌ها با منبع جریان الکتریکی خارجی، خنک‌کننده و گاز بی‌اثر آماده می‌شوند. گستره عملکرد دمای این نوع راکتورها از ۳۰- تا ۲۴۰ درجه سانتیگراد است.

برای انجام آزمایش با این دستگاهها، طرز عمل به‌طور دقیق به‌مرحله (stages) معین و تعریف شده‌ای شکسته می‌شود و در هر مرحله یک عمل اصلی یا ترکیب مجازی از عملیات اصلی شرکت می‌کنند. عملیات اصلی عبارت‌اند از: کنترل دمای داخل راکتور، کنترل دمای ژاکت، حرارت دادن محتویات ظرف واکنش، رفلکس، تقطیر، تغذیه وابسته به‌زمان، تغذیه وابسته به‌دما، تغییر pH یا ثابت نگهداشتن آن با افزایش اسید یا باز، کنترل خلاء، تخلیه ظرف واکنش با گاز بسی اثر و همزدن محتویات راکتور.

اشاره می‌شود که با عمل تغذیه وابسته به‌زمان و دما، مایع، مواد معلق یا گاز با سرعت معین به‌داخل ظرف واکنش وارد می‌شود و در تغذیه وابسته به‌دما کنترل دما بر کنترل سرعت تقدم دارد. حدود عملکرد تمام عملیات اصلی محدود به‌طرح راکتورهای آزمایشگاهی است.

پس از وارد کردن طرز عمل از طریق کنترل‌کننده روی دیسک نتایج، در طول اجرای آن صفحه نمایشگر مقادیر مربوط به پارامترهای لازم را با فاصله زمانی یک ثانیه روی صفحه نمایشگر نشان می‌دهد. این پارامترها عبارت‌اند از:

دمای داخل راکتور، دمای خروجی ژاکت، وزن مواد افزوده شده از ترازوها به‌داخل ظرف واکنش یا وزن محصول تقطیر، مقدار pH، میزان خلاء موجود در سیستم برحسب میلی بار، زمان باقیمانده برای تکمیل یک مرحله فرایند، تعداد دور همزن در هر دقیقه، فشار خروجی گاز نیتروزن، جریان سرمایش یا گرمایش حرارتی، جریان سرمایش رفلکس، فشار داخل راکتور و وجود بخارات آتشگیر. در صورت وجود یا بروز نارسایی در یکی از پارامترهای فوق، سیستم با صدای زنگ مخصوص و با چشمک ویژه زیر عنوان مربوطه نارسایی را به‌استفاده‌کننده اطلاع می‌دهد.

شیوه‌های زنگ زدن در راکتورهای آزمایشگاهی

این نوع راکتورها با دو شیوه زنگ زدن «انفعالی» (Passive) و «فعال» (active) کار می‌کنند. شیوه انفعالی زمانی اتخاذ می‌شود که راکتور تحت سرپرستی استفاده‌کننده مراقبت و هدایت شود. در این شیوه، سیستم بدون قطع آزمایش با صدای زنگ و چشمک مخصوص، نارسایی موجود در سیستم را اطلاع می‌دهد تا استفاده‌کننده در صورت امکان آن را برطرف کند و سیستم را مجدداً با شرایط مناسب فعال سازد. در حالی که شیوه «فعال» بدون حضور استفاده‌کننده انتخاب می‌شود و در صورت بروز نارسایی در یکی از پارامترهای اشاره شده فوق خود سیستم مراحل را طی می‌کند و آزمایش را با بستن تمام ورودیها و ختک کردن ظرف واکنش، در شرایط سالمی قطع و خاتمه می‌دهد.

در این نوع راکتورها چاپگر همزمان با اجرای خودکار هر مرحله آزمایش شماره مرحله عمل یا عملیات اصلی انتخاب شده در آن مرحله و منحنی تغییرات زمان بر حسب متغیرهای فرایند را چاپ و رسم می‌کند و ضمن اجرای خودکار آزمایش نتایج بدست آمده در آزمایش با سرعت ضبط معینی روی دیسک نتایج ثبت می‌گردد. در هر زمان، نتایج را با وارد کردن نام برنامه می‌توان روی صفحه نمایشگر به صورت عددی یا از طریق چاپگر به شکل منحنی یا عددی دریافت کرد.

آشکار ساز دود

آشکار ساز دود در حقیقت سیستم ایمنی در این نوع راکتورهاست و در بالای ظرف واکنش قرار دارد. در صورت وجود دود یا بخارات آتشگیر حلال، زنگ به صدا در آمده و لامپ قرمز این دستگاهها روشن می‌شود به این ترتیب دستگاه استفاده‌کننده را از احتمال وجود خطر آگاه می‌سازد.

کارایی‌های جنی

بعضی از این نوع راکتورها دارای قسمتهای اضافی از جمله سیستم جداکننده فازها، ترموکوپل برای سنجشهای کالریتری و همچنین سیستم تغذیه مواد جامد به ظرف واکنش می‌باشند.

با نصب سیستم جدا کننده فازها در بالای ظرف واکنش می‌توان یک مخلوط آزنوتروپ را توسط تقطیر از مخلوط مواد مایع جدا و خارج کرد با انجام این عمل یک فاز به ظرف واکنش برمی‌گردد و فاز دیگر جدا می‌شود. انجام این عمل به سه روش زیر امکان پذیر است: - کنترل از طریق وزن مایع جدا شده، - کنترل مقدار مایع جدا شده با کنترل دمای راکتور، - کنترل مقدار مایع جدا شده با کنترل زمان.

پرونده‌های اطلاعاتی این نوع راکتورها را می‌توان با برنامه‌هایی به کامپیوتر خارجی فرستاد.

به‌طور کلی می‌توان گفت که این نوع راکتورها برای تجریبات آزمایشگاهی در حد مقادیر و مقیاسهای کوچک مفیدند. نتایج و اطلاعات بدست آمده با تجزیه و تحلیل و ارزیابی دقیق و با توجه به شرایط آزمایش می‌توانند برای طراحی و پیش‌بینی نتایج راکتورهای به‌کار گرفته شوند که در ضمن گسترش فرایند مورد استفاده قرار می‌گیرند [4].

مراجع مورد استفاده:

(۱) آکتاویون اشپیل، ترجمه: سهرابی - مرتضی؛ طراحی راکتورهای شیمیایی، جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ اول، سال ۱۳۶۶.



- [1] Kirk - Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd Edition/ vol. 19/1982
- [2] Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, 2nd Edition vol. 2. 1987.
- [3] Comprehensive Polymer Science, 1st Edition vol. 3/1989.
- [4] User Manual Contraves Contalab.

