پودمان ۴

راکتور و مخازن

بخش اصلی در یک واحد شیمیایی، واکنش شیمیایی است که در راکتور انجام می‌شود، در بیشتر فرایندهای صنایع شیمیایی، خوراک یا محصولات فرایند می‌بایست ذخیره و نگهداری شوند، لذا انواع مخزن‌های ذخیره‌سازی استفاده می‌شود.

واحد یادگیری ۴
راکتور ومخازن

مقدمه

راکتورهای شیمیایی از بخش‌های اصلی یک واحد صنعتی شیمیایی هستند که درآن واکنش‌های شیمیایی انجام می‌شوند. در این پودمان سرعت واکنش، عوامل مؤثر بر سرعت واکنش‌های شیمیایی و انواع راکتورهای شیمیایی بررسی می‌شوند.
مخازن ذخیره‌سازی دارای کاربرد گسترده‌ای در بیشتر صنایع هستند و برای نگهداری گازها و مایعات استفاده می‌شوند. در ادامه این پودمان به معرفی مخازن ذخیره‌سازی مایعات و انواع آن پرداخته می‌شود و همچنین تعیین نقطه اشتعال، ایمنی و کار با مخازن ذخیره‌سازی ارائه خواهد شد.

استاندارد عملکرد

تعیین سرعت واکنش، کار با راکتورهای شیمیایی و مخازن ذخیره طبق دستورکار

شایستگی‌های غیرفنی:

۱ـ اخلاق حرفه‌ای: حضور منظم و وقت‌شناسی، انجام‌دادن وظایف وکارهای محوّل، پیروی از قوانین؛
۲ـ مدیریت منابع: شروع به کار به موقع، مدیریت مؤثر زمان، استفاده از مواد و تجهیزات؛
۳ـ کار گروهی: حضوری فعّال در فعالیت‌های گروهی، انجام کارها و وظایف محوّل؛
۴ـ مستندسازی: گزارش نویسی فعالیت‌های آزمایشگاهی؛
۵ـ محاسبه و کاربست ریاضی.

شایستگی‌های فنی:

۱ـ تعیین سرعت واکنش‌ها؛
۲ـ کار با راکتورهای شیمیایی؛
۳ـ کار با مخازن ذخیره.

۱ـ۴ـ درصد تبدیل در واکنش‌های شیمیایی

واکنش شیمیایی فرایندی است که طی آن یک یا چند ماده به مواد دیگر تبدیل می‌شوند، بنابراین با یک واکنش شیمیایی مواد اولیه یا ترکیب‌شونده‌ها به محصولات با ارزش اقتصادی بالا تبدیل می‌شوند. از این واکنش‌ها به واکنش تولید بنزین و گازوئیل در پالایشگاه‌های نفت، تولید پودرهای ماشین لباسشویی در کارخانه‌های صنایع شوینده، تولید دارو در کارخانه‌های تولید دارو و تولید مواد غذایی در کارخانه‌های صنایع غذایی و غیره می‌توان اشاره کرد. به دستگاهی که واکنش شیمیایی در آن صورت می‌گیرد، واکنشگاه یا راکتور[۱] گفته می‌شود.

پرسش ۱

درصد تبدیل ترکیب‌شونده[۲]:

واکنش شیمیایی $A \rightarrow C$ در یک راکتور با ۱۰ مول از مادهٔ اولیه A آغاز می‌شود، مقدار مول مادهٔ A موجود در واکنش پس از ۱۰۰ دقیقه، ۲۰۰ دقیقه و ۳۰۰ دقیقه از شروع واکنش، کدام‌یک می‌تواند باشد؟

الف) ۸ مول، ۶ مول، ۷ مول
ب) ۱۰ مول، ۸ مول، ۷ مول
پ) ۸ مول، ۶ مول، ۴ مول
ت) ۴ مول، ۶ مول، ۸ مول

دریک راکتور شیمیایی درصد تبدیل یک ترکیب‌شونده از تقسیم مقدار مول مصرفی بر مقدار مول اولیهٔ ترکیب‌شونده ضرب در عدد ۱۰۰، به‌دست می‌آید.

اگر واکنش شیمیایی A در حال انجام باشد، میزان درصد تبدیل ترکیب‌شوندهٔ A مطابق با معادلهٔ (۱) محاسبه می‌شود.

$$\text{درصد تبدیل ترکیب‌شونده A} = \frac{\text{تعداد مول مصرفی مادهٔ A}}{\text{تعداد مول اولیه مادهٔ A}} \times ۱۰۰ \qquad (۱)$$

مثال ۱: واکنش $A \rightarrow C$ با ۱۰ مول از ترکیب‌شوندهٔ A در یک راکتور آغاز می‌شود. پس از گذشت دو ساعت از شروع واکنش، سه مول از A در راکتور باقی می‌ماند. درصد تبدیل مادهٔ A در این راکتور چند درصد است؟

پاسخ: مطابق با معادلهٔ (۱)، می‌بایست در ابتدا تعداد مول مصرفی تعیین شود. برای این منظور می‌توان تعداد مول باقی مانده را از تعداد مول اولیه کم کرد.

تعداد مول مصرفی = تعداد مول اولیه − تعداد مول باقی‌مانده

تعداد مول مصرفی = ۱۰ − ۳ = ۷ mol

$$\text{درصد تبدیل ترکیب‌شونده} = \frac{\text{تعداد مول مصرفی مادهٔ A}}{\text{تعداد مول اولیه مادهٔ A}} \times ۱۰۰ = \frac{۷}{۱۰} \times ۱۰۰ = ٪۷۰$$

۱ـ Reactor
۲ـ Conversion Percent

پرسش ۲

۱ـ به نظر شما در پایان واکنش در مثال ۱ میزان درصد تبدیل چند درصد خواهد شد؟ توضیح دهید؟

الف) ۸۰ ب) ۶۰ پ) ۳۰ ت) ۱۰۰

۲ـ میزان درصد تبدیل ماده A را در زمان‌های مختلف برای پرسش ۱ تعیین کنید.

۲ـ۴ـ سرعت واکنش شیمیایی

سرعت یک واکنش، میزان پیشرفت واکنش و روند تبدیل مواد ترکیب‌شونده به محصول را در مدت زمان معین نشان می‌دهد. سرعت واکنش یکی از مهم‌ترین مباحث در علم شیمی است؛ لذا شیمی‌دانان همیشه دنبال راهی هستند که سرعت واکنش را بالا ببرند. مطالعهٔ سرعت یک واکنش شیمیایی[۱]، باعث ایجاد شاخه‌ای در علم شیمی به نام سینتیک[۲] شده است.

به‌طور کلی سرعت یک واکنش شیمیایی از تقسیم تغییرات غلظت مادهٔ ترکیب‌شونده بر مدت زمان معین مطابق معادلهٔ (۲) به‌دست می‌آید.

$$\text{سرعت واکنش} = \frac{\text{تغییرات غلظت ترکیب شونده}}{\text{مدت زمان تغییرات}} \qquad (۲)$$

تغییرات غلظت ترکیب‌شونده به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

غلظت مصرفی ترکیب‌شونده= غلظت باقی‌مانده ـ غلظت اولیه = تغییرات غلظت ترکیب‌شونده

اگر یکای غلظت، مول بر لیتر و یکای زمان دقیقه باشد. یکای سرعت واکنش عبارت است از:

$$\text{یکای سرعت واکنش} = \frac{\left(\frac{\text{mol}}{\text{L}}\right)}{(\text{min})} = \frac{\text{mol}}{\text{L.min}}$$

پرسش ۳

یکاهای دیگری برای سرعت بیان کنید.

برای تعریف سرعت می‌توان به جای معادلهٔ (۲) و به جای تغییرات غلظت ترکیب‌شونده از تغییرات تعداد مول ترکیب‌شونده مطابق معادلهٔ (۳) استفاده کرد.

$$\text{سرعت واکنش} = \frac{۱}{V_R} \times \frac{\text{تغییرات تعداد مول ترکیب شونده}}{\text{مدت زمان}} \qquad (۳)$$

۱ـ Reaction Rate

۲ـ kinetic

در رابطهٔ (۳)، V_R حجم راکتور است.
البته به جای تغییرات تعداد مول ترکیب‌شونده می‌توان از تعداد مول مصرفی ترکیب‌شونده نیز استفاده کرد؛ لذا:

$$\text{سرعت واکنش} = \frac{۱}{V_R} \times \frac{\text{تعداد مول مصرفی ترکیب شونده}}{\text{مدت زمان}} \qquad (۴)$$

پرسش ۴

یکاهای سرعت واکنش را مطابق با معادلهٔ ۴ بیان کنید.

توجه

یکای سرعت واکنش بر اساس معادله‌های (۲) و (۳) تفاوتی نمی‌کند.

مثال ۲: واکنش $A \rightarrow C$ با تعداد ۷ مول از مادهٔ A در یک راکتور یک لیتری انجام شده است؛ پس از گذشت دو ساعت، ۳ مول از A در راکتور باقی‌مانده است، مطلوب است:
الف) درصد تبدیل ترکیب‌شونده در این مدت
ب) سرعت واکنش در این مدت
پاسخ: برای تعیین درصد تبدیل از معادلهٔ (۱) و سرعت واکنش از معادلهٔ (۴) استفاده می‌شود.

تعداد مول A باقی‌مانده ـ تعداد مول A اولیه = تعداد مول A مصرفی

تعداد مول A مصرفی = ۷ـ۳=۴ mol

$$\text{درصد تبدیل مادهٔ } A = \frac{\text{تعداد مول مصرفی مادهٔ } A}{\text{تعداد مول اولیه مادهٔ } A} = \frac{۴}{۷} \times ۱۰۰ = ٪۵۷$$

$$\text{سرعت واکنش} = \frac{۱}{V_R} \times \frac{\text{تعداد مول مصرفی ترکیب شونده}}{\text{مدت زمان}} = \frac{۱}{۱} \times \frac{۴}{۲\times۶۰} = \frac{۴}{۱۲۰} = ۰/۰۳۳ \frac{\text{mol}}{\text{L.min}}$$

پرسش ۵

واکنش $A \rightarrow C$ با تعداد ۵ مول از مادهٔ اولیهٔ A در یک راکتور ۵ لیتری آغاز شده است. پس از گذشت دو دقیقه از شروع واکنش، تعداد ۳ مول محصول C تولید می‌شود. حال مطلوب است:
الف) درصد تبدیل ترکیب‌شونده ب) سرعت واکنش

هدف از مطالعهٔ سرعت یک واکنش شیمیایی، تعیین میزان سرعت و روند پیشرفت واکنش است. از لحاظ مقدار سرعت، معمولاً واکنش‌ها را به‌صورت ذیل دسته‌بندی می‌کنند.

- واکنش‌های خیلی سریع: مدت زمان انجام شدن این واکنش‌ها خیلی کوتاه و در حدود ۰/۰۰۰۱ ثانیه است؛
- واکنش‌های سریع: مدت زمان انجام شدن این واکنش‌ها کم و در حدود حساسیت انسان به زمان (ثانیه) است؛

- واکنش‌های معمولی: بیشتر واکنش‌هایی که در آزمایشگاه انجام می‌شود، از این نوع هستند و مدت زمان آن در حدود دقیقه یا ساعت است؛
- واکنش‌های کند: مدت زمان انجام شدن این واکنش‌ها در حدود روزها و هفته‌اند؛
- واکنش‌های خیلی کند: مدت زمان انجام شدن این واکنش‌ها در حدود سال‌هاست.

از واکنش‌های خیلی سریع می‌توان به تشکیل رسوب نقره‌کلرید به هنگام مخلوط شدن محلول‌های حاوی یون‌های کلرید و نقره و از واکنش‌های کند می‌توان به زنگ زدن آهن اشاره کرد.

تحقیق کنید ۱

با استفاده از تحقیق اینترنتی، چند نمونه از واکنش‌های با سرعت کم و زیاد را نام ببرید.

۳ـ۴ـ عوامل مؤثر بر سرعت واکنش شیمیایی

عوامل مؤثر بر سرعت واکنش‌های شیمیایی عبارت‌اند از:

۱ـ دما

۲ـ فشار

۳ـ غلظت ترکیب‌شونده

۴ـ اندازهٔ ذرّات ترکیب‌شونده و سطح تماس

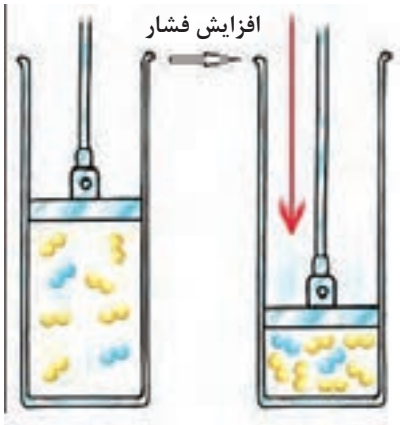
۵ـ کاتالیزگر

تأثیر دما بر سرعت واکنش شیمیایی:

در اغلب واکنش‌های شیمیایی بین دما و سرعت واکنش رابطهٔ مستقیم وجود دارد؛ یعنی با افزایش دما، تعداد بیشتری از ذرّات ترکیب‌شونده با هم برخورد می‌کنند و برخوردها با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد. در نتیجه سرعت واکنش شیمیایی افزایش می‌یابد. به‌طور کلی به ازای افزایش دما به میزان ۱۰ درجهٔ سلسیوس، سرعت واکنش شیمیایی دو برابر می‌شود.

تأثیر فشار بر سرعت واکنش شیمیایی:

برای بعضی از واکنش‌های شیمیایی با افزایش فشار تعداد برخوردهای مواد ترکیب‌شونده بیشتر می‌شود و در نتیجه میزان سرعت واکنش افزایش می‌یابد (شکل ۱ـ۴).



شکل ۱ـ۴ـ تأثیر فشار بر سرعت واکنش

تأثیر غلظت ترکیب‌شونده‌ها بر سرعت واکنش شیمیایی:

افزایش در تعداد برخوردها باعث افزایش سرعت واکنش می‌شود. تراشهٔ چوب در هوای عادی که شامل ۲۰ درصد اکسیژن است، به‌خوبی می‌سوزد، اما همین تراشه در اکسیژن خالص، بسیار سریع‌تر می‌سوزد. هر چه غلظت مواد واکنش‌گر بیشتر باشد، به همان میزان تعداد برخورد ذرّات به یکدیگر بیشتر می‌شود و پیامد آن افزایش سرعت واکنش است.

تأثیر اندازهٔ ذرّات ترکیب‌شونده بر سرعت واکنش شیمیایی:

هر چه سطح مؤثر برخورد در ترکیب‌شونده‌ها بیشتر باشد، واکنش‌ها با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتند. اگر کبریت روشنی را در مقابل تکهٔ بزرگی از زغال بگیرید، شاید اتفاق خاصی نیفتد، اما اگر همین زغال را به تکه‌های بسیار ریز خرد کنید و آنها را به هوا پرت کنید و کبریتی را روشن کنید، انفجاری را خواهید دید که این پدیده به‌دلیل افزایش سطح مؤثر برخورد ذرّات واکنش‌دهنده است. علت زنگ‌زدگی سریع‌تر براده‌های آهن نسبت به یک میخ آهنی نیز همین افزایش سطح تماس است؛ بنابراین افزایش سطح تماس، تعداد برخورد ذرّات را افزایش می‌دهد و بر روی سرعت واکنش تأثیر می‌گذارد.

تأثیر کاتالیزگر بر سرعت واکنش شیمیایی:

یکی دیگر از عوامل مؤثر بر سرعت واکنش‌های شیمیایی وجود کاتالیزگر مناسب است. در یک تعریف کلی، به موادی که در محیط واکنش حضور دارند و موجب افزایش سرعت و تغییر مسیر پیشرفت واکنش می‌شوند و در خاتمهٔ واکنش بدون هیچ تغییر شیمیایی در محیط واکنش باقی می‌مانند، کاتالیز گفته می‌شود.

هر واکنشی کاتالیزگر مخصوص به خود را دارد؛ ولی در عین حال ممکن است یک نوع کاتالیزگر برای چند واکنش شیمیایی مختلف مناسب باشد. در هر ماده کاتالیزگر به شیوه‌ای وارد عمل می‌شود و روی سرعت واکنش شیمیایی اثر می‌گذارد. در واکنش‌ها کاتالیزگر با اتصال به مواد اولیهٔ واکنش، سطح تماس را افزایش می‌دهد و همچنین انرژی لازم برای آغاز واکنش را کم می‌کند که پیامد هر دو روش افزایش سرعت است. یکی دیگر از محاسن استفاده از کاتالیزگر انتخابی عمل‌کردن آن است، یعنی اگر در یک راکتور چند واکنش هم‌زمان صورت بگیرد، یک کاتالیزگر مناسب می‌تواند سرعت تشکیل و تولید محصول مطلوب را افزایش دهد و سرعت واکنش‌های نامطلوب و ناخواسته را کاهش دهد (شکل ۲ـ۴).

شکل ۲ـ۴ـ تأثیر کاتالیزگر بر پیشرفت واکنش

فعالیت آزمایشگاهی ۱

بررسی تأثیر غلظت بر سرعت واکنش‌های شیمیایی:

انجام دادن واکنش سولفوریک‌اسید با نمک سدیم‌تیوسولفات

نکته ۱

واکنش انجام شده به‌صورت زیر است.

$$Na_2S_2O_3 + H_2SO_4 \rightarrow Na_2SO_4 + H_2O + S + SO_2$$

نکته: به علت تولید رسوب گوگرد، رنگ محلول کدر می‌شود

مواد لازم	وسایل لازم
محلول سولفوریک‌اسید با غلظت‌های ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲ مولار محلول سدیم‌تیوسولفات با غلظت ۰/۵ مولار	بشر ۵۰ میلی‌لیتری استوانهٔ مدرّج ۵۰ میلی‌لیتری زمان‌سنج (کرونومتر)

روش کار:

۱ـ ۵ میلی‌لیتر محلول سولفوریک‌اسید ۰/۵ مولار را داخل استوانهٔ مدرّج بریزید، ۵میلی‌لیتر محلول سدیم‌تیوسولفات ۰/۵ مولار به آن اضافه کنید و زمان را از لحظه اضافه‌کردن آن تا هنگام کدر شدن رنگ محلول اندازه‌گیری کنید (t_1)؛

۲ـ آزمایش مرحلهٔ ۱ را با محلول‌های سولفوریک اسید ۱، ۱/۵ و ۲ مولار و محلول سدیم‌تیوسولفات ۰/۵ مولار تکرار کنید و هر بار زمان کدرشدن محلول را با زمان‌سنج اندازه بگیرید. (t_2، t_3، t_4)؛

۳ـ نتایج آزمایش‌ها را درجدول زیر یادداشت کنید:

غلظت سولفوریک‌اسید (مولار)	مدت زمان واکنش (ثانیه)
۰/۵	
۱/۰	
۱/۵	
۲/۰	

چه نتیجه‌ای از این آزمایش می‌توان گرفت؟ بحث کنید.

فعالیت آزمایشگاهی ۲

بررسی تأثیر دما بر سرعت واکنش‌های شیمیایی:

انجام دادن واکنش سولفوریک‌اسید با نمک سدیم‌تیوسولفات در دماهای مختلف

مواد لازم	وسایل لازم
محلول سولفوریک‌اسید با غلظت ۰/۵ مولار محلول سدیم‌تیوسولفات با غلظت ۰/۵ مولار	بشر ۱۰۰ میلی‌لیتری، لولهٔ آزمایش، گیرهٔ لولهٔ آزمایش، توری‌نسوز، سه‌پایه، چراغ گاز، پایه فلزی، دماسنج و زمان‌سنج.

روش کار:

۱ـ دو لولهٔ آزمایش را بردارید و در یکی از آنها ۳ میلی‌لیتر سولفوریک‌اسید ۰/۵ مولار و در دیگری ۳ میلی‌لیتر محلول سدیم‌تیوسولفات ۰/۵ مولار بریزید. سپس هر دو لوله را به کمک گیرهٔ لولهٔ آزمایش در داخل بشر بگذارید و بشر را تا نیمهٔ آن پر از آب کنید. بعد دماسنجی را به کمک گیره به پایهٔ فلزی نصب کنید؛ به‌طوری که مخزن دماسنج داخل بشر و درون آب قرار گیرد. چند لحظه صبر کنید تا دماسنج دمای رقیق آب داخل بشر را نشان دهد.

۲ـ حال بشر را روی چراغ گاز روشن قرار دهید و چند لحظه صبر کنید تا دمای آب داخل بشر به حدود ۵۰درجهٔ سلسیوس برسد. سپس محلول سدیم‌تیوسولفات را به محلول سولفوریک‌اسید اضافه کنید و زمان را از لحظهٔ اضافه‌کردن تا هنگام کدرشدن محلول اندازه‌گیری کنید (t_1).

۳ـ آزمایش را دوباره انجام دهید و این بار دمای آب داخل بشر را حدود ۶۵ درجهٔ سلسیوس برسانید و زمان کدر شدن محلول را اندازه‌گیری کنید (t_2).

۴ـ آزمایش را در حمام با دمای ۷۵ درجهٔ سلسیوس تکرار کنید و زمان کدرشدن محلول را اندازه‌گیری کنید (t_3).

۵ـ نتایج آزمایش‌ها را در جدول زیر ثبت کنید:

دمای محلول واکنش (سلسیوس)	زمان کدرشدن محلول (ثانیه)
۵۰	
۶۵	
۷۵	

۶ـ چه نتیجه‌ای از این آزمایش می‌توان گرفت؟ بحث کنید.

فعالیت آزمایشگاهی ۳

بررسی تأثیر اندازهٔ ذرّات بر سرعت واکنش‌های شیمیایی:

واکنش هیدروکلریک اسید با فلز منیزیم به‌صورت زیر انجام می‌شود:

$$2HCl + Mg \longrightarrow MgCl_2 + H_2$$

مواد لازم		وسایل لازم	
محلول هیدروکلریک اسید با غلظت ۰/۵ مولار		بشر ۱۰۰میلی‌لیتری	۲ عدد
نوار منیزیم	۱ گرم	زمان‌سنج	
پودر منیزیم	۱ گرم		

روش کار:

۱ـ دو بشر را بردارید و در هر دوی آنها ۸۵ میلی‌لیتر هیدروکلریک‌اسید با غلظت ۰/۵ مولار بریزید. در یکی از بشرها ۱ گرم نوار منیزیم و در دیگری ۱ گرم پودر منیزیم بریزید و صبر کنید تا کاملاً نوار و پودر در اسید حل شود و مدت زمان حل‌شدن فلز منیزیم را در هر دو بشر اندازه بگیرید.

۲ـ نتایج حاصل از آزمایش را در جدول ثبت کنید:

بشر حاوی	مدت زمان حل شدن فلز منیزیم (ثانیه)
نوار منیزیم	
پودر منیزیم	

۳ـ چه نتیجه‌ای از این آزمایش می‌گیرید؟

۴ـ۴ـ تقسیم بندی واکنش‌های شیمیایی براساس تعداد فاز

بر اساس تعداد فازهای مواد، تقسیم‌بندی واکنش‌ها عبارت‌اند از:

واکنش همگن (هموژن[۱]): در این واکنش تمامی مواد شرکت‌کننده در یک فاز هستند. تولید صابون از محلول قلیایی و اسیدهای چرب به‌صورت همگن و در فاز مایع و تولید سیمان نیز به‌صورت همگن و در فاز جامد انجام می‌شود.

واکنش ناهمگن (هتروژن[۲]): اگر مواد شرکت‌کننده در واکنش در یک فاز نباشند، این واکنش را ناهمگن می‌گویند. از واکنش‌های ناهمگن می‌توان به واکنش تولید گاز هیدروژن، تولید بنزین (گاز و جامد)، تولید استیلن (مایع و جامد)، تولید گازوئیل (گاز ـ جامد ـ مایع) اشاره کرد.

۱ـ Homogeneous

۲ـ Hetrogeneous

پرسش ۶

سه نمونه واکنش همگن و سه نمونه واکنش ناهمگن را نام ببرید.

۵ـ۴ـ تقسیم بندی واکنش‌های شیمیایی براساس گرمای واکنش

واکنش گرمازا (گرماده): واکنش‌هایی هستند که در هنگام انجام شدن، گرما ایجاد می‌کنند و به محیط اطراف خود انرژی می‌دهند. واکنش‌های سوختن، خنثی شدن و بسیاری از واکنش‌هایی که با اکسیژن انجام می‌شوند، گرمازا هستند.

فعالیت آزمایشگاهی ۴

واکنش گرمازا (گرماده)

مواد لازم	وسایل لازم
مس (II) سولفات پودر روی	بشر ۱۰۰ میلی‌لیتر دماسنج

روش کار:

۵۰ میلی‌لیتر محلول مس (II) سولفات (یک مولار) را در یک بشر ۱۰۰ میلی‌لیتری بریزید و به آن مقداری پودر روی اضافه کنید. سپس مخلوط را به‌آرامی هم بزنید و دماسنج را درون محتویات بشر قرار دهید و دمای مخلوط را اندازه‌گیری کنید.

واکنش‌های گرماگیر: تعدادی از واکنش‌های شیمیایی برای انجام شدن از محیط اطراف خود گرما می‌گیرند، معمولاً واکنش‌هایی که در آن یک ترکیب‌شونده به چند محصول تبدیل می‌شود، از نوع گرماگیر هستند.

فعالیت آزمایشگاهی ۵

واکنش گرماگیر

مواد لازم	وسایل لازم
آمونیوم نیترات آب	بشر ۱۰۰ میلی‌لیتر، گرم‌کن الکتریکی، دماسنج و لولهٔ آزمایش شیشه‌ای

روش کار: ۲ گرم نمک آمونیوم‌نیترات خشک را درون بشر بریزید و روی آن ۵ میلی‌لیتر آب ۲۰ درجهٔ سلسیوس اضافه کنید و دماسنج را درون بشر قرار دهید. چه چیزی مشاهده می‌کنید؟ دماسنج چه عددی را نشان می‌دهد؟

مثال ۳: واکنش تولید پتاسیم‌کلرید (KCL) از ($KCLO_3$) در یک راکتور ناپیوسته انجام می‌شود. غلظت مادهٔ ترکیب‌شونده در مدت زمان ۴۰ دقیقه مطابق با جدول ذیل اندازه‌گیری شده است، حال مطلوب است:

الف) موازنهٔ مولی فرمول واکنش

ب) میزان سرعت واکنش

زمان (دقیقه)	۰	۱۰	۲۰	۴۰
غلظت ترکیب‌شونده (مواد)	۱	۰/۸	۰/۶۶۷	۰/۵

پاسخ:

الف) موازنهٔ مولی فرمول واکنش با توجه به تعداد اتم‌های مواد در دوطرف واکنش به‌صورت زیر است:

$$2KCLO_3 \rightarrow 2KCL + 3O_2$$

ب) برای تعیین مقدار سرعت از معادلهٔ ۲ استفاده می‌شود.

$$\text{سرعت واکنش} = \frac{\text{غلظت مادهٔ مصرفی ترکیب‌شونده}}{\text{مدت زمان}}$$

غلظت مصرفی مادهٔ ترکیب‌شونده، از تفاضل غلظت اولیه و باقی‌ماندهٔ ترکیب‌شونده به‌دست می‌آید. در این مثال غلظت اولیهٔ همان مقدار غلظت در لحظهٔ صفر است (چون در لحظهٔ صفر هنوز واکنشی شروع نشده است) بنابراین:

زمان (دقیقه)	۰	۱۰	۲۰	۴۰
غلظت ترکیب‌شونده	۱	۰/۸	۰/۶۶۷	۰/۵
غلظت مصرفی ترکیب‌شونده	-	$۱-۰/۸=۰/۲$	$۱-۰/۶۶۷=۰/۳۳۳$	$۱-۰/۵=۰/۵$
سرعت	-	$\frac{۰/۲}{۱۰}=۰/۰۲$	$\frac{۰/۳۳۳}{۲۰}=۰/۰۱۶$	$\frac{۰/۵}{۴۰}=۰/۰۱۲۵$

نکته ایمنی ۱

یکای سرعت در این مثال $\frac{\text{مولار}}{\text{دقیقه}}$ یا $\frac{\text{mol}}{\text{L.min}}$ است.

پرسش ۷

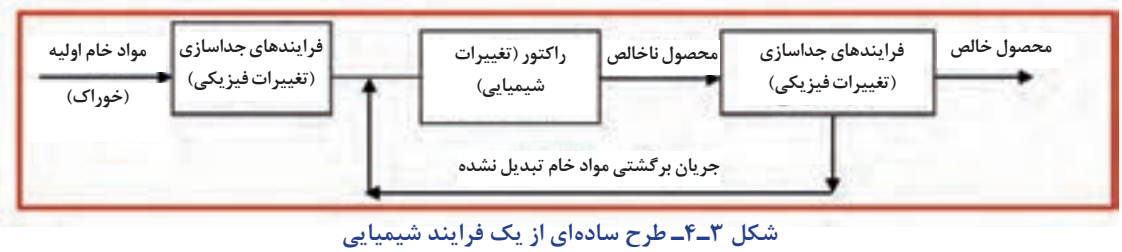
۱ـ سرعت واکنش را تعریف کنید و عوامل تأثیرگذار بر آن را توضیح دهید.
۲ـ دو روش برای تعیین سرعت یک واکنش شیمیایی را توضیح دهید.
۳ـ چرا دما بر سرعت واکنش شیمیایی تأثیر دارد؟
۴ـ واکنش‌های همگن و ناهمگن را با ذکر مثال توضیح دهید.
۵ـ در یک واکنش شیمیایی با گذشت زمان، میزان درصد تبدیل چه تغییری می‌کند؟ چرا؟
۶ـ واکنش $2A \rightarrow 3C$ با ۵ مول از ترکیب‌شوندهٔ A در یک راکتور ۲ لیتری آغاز می‌شود. پس از گذشت نیم ساعت از شروع واکنش، دو مول از A در راکتور باقی می‌ماند. درصد تبدیل ماده A در این راکتور چند درصد است؟ سرعت واکنش بر حسب $\frac{mol}{L.min}$ چقدر است؟
۷ـ کاتالیزگرها چه نقشی در انجام شدن واکنش شیمیایی دارند؟ توضیح دهید.

۶ـ۴ـ راکتورهای شیمیایی

راکتور دستگاهی است که در آن واکنش‌های شیمیایی انجام می‌شود. راکتورهای شیمیایی می‌توانند در اندازه بزرگ و برای مصارف صنعتی یا در اندازه کوچک برای کاربردهای آزمایشگاهی و تحقیقاتی ساخته شوند (شکل زیر).

در یک کارخانهٔ صنایع شیمیایی، مواد خام اولیه یا همان ترکیب‌شونده‌ها از تعدادی فرایندهای فیزیکی اولیه از قبیل جداسازی و خالص‌سازی عبور می‌کنند تا آمادهٔ ورود به مرحلهٔ واکنش شیمیایی شوند.

در این مرحله با استفاده از یک راکتور، تغییرات شیمیایی مناسب انجام می‌شوند و محصول تولید می‌شود. به دلیل انجام‌شدن بعضی از واکنش‌های ناخواسته یا وجود مقداری از مواد اولیهٔ ورودی به راکتور که فرصت انجام واکنش را پیدا نکرده‌اند و همراه محصول از راکتور خارج شده‌اند، محصول تولیدی قابل فروش به بازار نیست و لازم است عملیات فیزیکی دیگری از قبیل جداسازی و خالص‌سازی بر روی آن انجام شود و سپس به عنوان محصول خالص نهایی به بازار عرضه شود. در یک فرایند شیمیایی احتمال اینکه تمام مواد خام اولیه در راکتور مصرف نشوند؛ وجود دارد؛ لذا آن مقدار مواد اولیه که در راکتور مصرف نشده‌اند می‌بایست به راکتور برگردانده شوند که اصطلاحاً به این جریان، جریان برگشتی[1] می‌گویند (شکل ۳ـ۴).



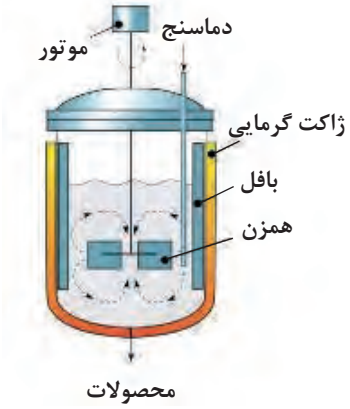
شکل ۳ـ۴ـ طرح ساده‌ای از یک فرایند شیمیایی

۱ـ Recycle Flow

در صنایع شیمیایی، راکتور به‌عنوان قلب فرایند شیمیایی و مهم‌ترین و حساس‌ترین عملیات در کارخانه محسوب می‌شود. راکتورهای شیمیایی براساس نوع عملیات به سه دسته راکتورهای ناپیوسته[1]، پیوسته[2] و نیمه‌پیوسته[3] تقسیم‌بندی می‌شوند. در ادامه توضیح بیشتر این راکتورها آورده شده است.

۷ـ۴ـ راکتورهای ناپیوسته

از دیدگاه تاریخی، راکتورهای ناپیوسته از آغاز صنعت شیمیایی مورد استفاده بوده‌اند و هنوز هم به‌صورت وسیعی در تولید مواد شیمیایی با ارزش افزودهٔ بالا استفاده می‌شوند. در این راکتورها مواد اولیه یا همان ترکیب‌شونده‌ها در همان ابتدای عمل وارد راکتور می‌شوند. محتویات راکتور برای مدت‌زمان مشخصی مخلوط می‌شوند و پس از مدت زمان معینی که واکنش پیشرفت کرد، محتویات داخل راکتور تخلیه می‌شوند؛ بنابراین در این راکتور در هنگام واکنش هیچ جرمی وارد و خارج نمی‌شود (شکل ۴ـ۴). تولید PVC در کارخانجات پتروشیمی در راکتورهای ناپیوسته انجام می‌شود.



شکل ۴ـ۴ـ راکتور ناپیوسته

پرسش ۸

چند واکنش شیمیایی را که در راکتور ناپیوسته انجام می‌شود، نام ببرید.

انتقال گرمای فرایند چه از نظر عملیاتی و چه از نظر ایمنی از اهمیت بالایی برخوردار است. همان‌طور که توضیح داده شد، واکنش‌های شیمیایی یا گرمازا هستند و یا گرماگیر. در نتیجه در هنگام انجام‌شدن واکنش ممکن است محتویات درون راکتور سرد یا گرم شوند. بالا رفتن بیش از حد دما در راکتور می‌تواند موجب اختلال در عملکرد و تجهیزات کنترلی آن شود و از همه مهم‌تر، خطر انفجار و نشت مواد را افزایش می‌دهد. همچنین در صورتی که واکنش گرماگیر باشد، با پیشرفت واکنش محتویات راکتور سردتر می‌شود و ممکن است موجب کندی سرعت واکنش یا انجماد مواد در راکتور و تجهیزات آن شود. در نتیجه می‌بایست، همواره دما را در حد مناسب و ایمن نگه داشت. برای این منظور از مبدل‌های حرارتی و تجهیزات انتقال گرما استفاده می‌شود. یکی از متداول‌ترین

۱ـ Batch
۲ـ Continuous
۳ـ Semi-Continuous , Semi - batch

شکل ۵ـ۴ـ راکتور ناپیوستهٔ صنعتی با سامانهٔ گرمایی

روش‌ها برای کنترل دمای راکتورها استفاده از ژاکت و یا کویل‌های تبادل گرما است. در ژاکت‌ها، جریانی از یک ماده مثل روغن یا آب با دمای بالاتر و یا پایین‌تر برای تنظیم دما، در اطراف راکتور و بدون تماس جرمی با محتویات راکتور، درحال چرخش است. در روش کویل لوله‌هایی که حاوی همان جریان سردتر یا گرم‌تر است، به‌صورت مارپیچ و یا طراحی دیگر در اطراف راکتور قرار داده می‌شود تا تبادل گرما انجام شود (شکل ۵ـ۴).

فرایند هم‌زدن و انتقال جرم در راکتورها از اهمیّت بالایی برخوردار است، زیرا در صورتی که محتویات داخل راکتور به‌خوبی ترکیب نشوند، امکان واکنش‌ندادن بخشی از مواد و در نتیجه پایین‌آمدن کیفیت محصول فراهم می‌شود. عمل هم زدن در راکتورهای مخزنی شکل، با استفاده از همزن‌های دوار انجام می‌شود که به محور و الکتروموتور متصل است (شکل ۶ـ۴). شیوهٔ قرارگیری و سرعت چرخش همزن بستگی به عوامل حجم مخزن، شکل مخزن و گرانروی سیال دارد.

شکل ۶ـ۴ـ انواع همزن در راکتور

همچنین انتخاب جنس همزن و بدنهٔ راکتور به مواد داخل راکتور بستگی دارد؛ مثلاً اگر مواد داخل راکتور خورنده باشند، استفاده از فولاد و موادی که امکان خورده‌شدن در آن وجود دارد، غیر منطقی است. در این حالت انتخاب مواد جایگزین یا پوشش‌دهی تجهیزات با لعاب‌های سرامیکی یا پوشش‌های بسپاری (پلیمری)، روش مناسبی در جلوگیری از خوردگی و واکنش‌های ناخواسته است. در این راکتورها میزان درصد تبدیل در طول زمان تغییر می‌کند، امّا اختلاط کامل باعث می‌شود که در هر لحظه دما و میزان درصد تبدیل در سرتاسر راکتور یکنواخت باشد.

معمولاً راکتورهای ناپیوسته در موارد زیر استفاده دارند.

- تولید در مقیاس کوچک صنعتی (ظرفیت کم)؛
- آزمایش‌کردن فرایندهای ناشناخته؛
- تولید صنعتی محصولات گران‌قیمت؛
- برای محصولاتی که تولید آنها در شرایط مداوم مشکل باشد.

امتیاز راکتورهای ناپیوسته در این است که با دادن زمان لازم برای انجام‌شدن واکنش درصد تبدیل بالا برای محصولات به‌وجود می‌آید.

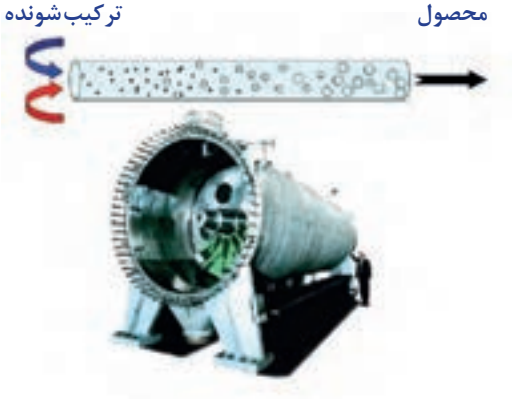
در حالی که استفاده از این نوع راکتورها محدود به واکنش‌های همگن فاز مایع است. از دیگر محدودیت‌های این نوع راکتورها بالا بودن هزینهٔ تولید در واحد حجم محصول تولید شده است، همچنین تولید صنعتی در مقیاس بالا در این گونه راکتورها مشکل است.

۸ـ۴ـ راکتورهای پیوسته

در این نوع راکتورها، مواد اولیه به‌طور دائم وارد راکتور می‌شود و پس از انجام دادن واکنش، محصول به‌طور پیوسته از راکتور خارج می‌شود. این‌گونه راکتورها هنگامی در صنعت استفاده می‌شوند که هدف تولید مقدار زیادی محصول باشد، در ضمن راکتورهای پیوسته برای انجام‌دادن واکنش‌های سریع مناسب‌تر هستند. از این راکتورها در بسیاری از صنایع شیمیایی، به‌خصوص صنایع نفت، گاز و پتروشیمی استفاده می‌شود.

راکتورهای لوله‌ای[1]:

در صنایع شیمیایی برای فرایندهای بزرگ مقیاس، معمولاً از راکتورهای لوله‌ای استفاده می‌شود. زیرا نگه‌داری سامانهٔ راکتورهای لوله‌ای آسان است (چون دارای قسمت‌های متحرک نیستند). این راکتورها معمولاً بالاترین درصد تبدیل مواد اولیه در واحد حجم راکتور را در مقایسه با سایر راکتورهای سامانهٔ پیوسته دارند. در این راکتورها، از یک لوله برای انجام‌شدن واکنش استفاده می‌شود. این نوع راکتورها نسبت به شکل مخزنی آن، فضای کمتری را اشغال می‌کنند (شکل ۷ـ۴).



شکل ۷ـ۴ـ راکتور لوله‌ای

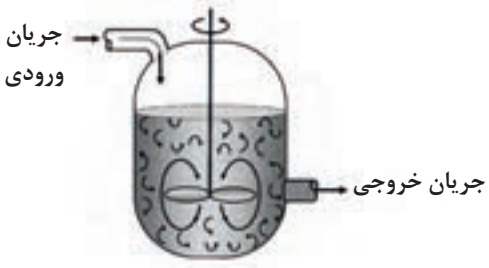
به دلیل ساختار لوله‌ای، این راکتورها سطح تماس بیشتری با محیط اطراف دارند و تبادل گرما راحت‌تر انجام می‌شود. درون راکتورهای لوله‌ای غلظت مواد از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کند. از محدودیت‌های این نوع راکتورها، مشکل بودن کنترل دما برای واکنش‌های گرمازاست. راکتورهای لوله‌ای یا به‌صورت تک لوله‌ای هستند یا به‌صورت مجموعه‌ای از چندین لولهٔ کوتاه‌تر که به‌صورت موازی به یکدیگر متصل هستند. اغلب واکنش‌های ناهمگن گازی در این راکتورها انجام می‌شود.

۱ـ Plug

راکتور مخزنی همزن‌دار پیوسته[1]:

راکتورهای مخزنی همزن‌دار پیوسته، گونه‌ای متداول از راکتورها هستند که در آنها یک یا چند جریان ورودی به سامانه، مواد ترکیب‌شونده را به داخل راکتور می‌آورد و پس از انجام شدن واکنش، محصولات خارج می‌شوند. به طور معمول شدت جریان ورودی و خروجی از این راکتورها ثابت است. در غیر این صورت امکان سرریز یا تخلیه سریع مخزن راکتور وجود دارد.

راکتور مخزنی همزن‌دار پیوسته یا اصطلاحاً راکتور مخلوط‌شونده، در شرایطی که یک واکنش شیمیایی احتیاج به اختلاط شدید داشته باشد، استفاده می‌شود. راکتورهای مخلوط‌شونده یا به‌تنهایی و یا به‌صورت پشت سر هم استفاده می‌شوند.کنترل دمایی در این نوع راکتورها به‌آسانی انجام می‌گیرد. عمل اختلاط و هم‌زدن مواد با محور و پروانه صورت می‌گیرد. در مقایسه با سایر راکتورها درصد تبدیل مواد در آنها به ازای واحد حجم محصول تولیدی پایین‌تر است و به همین دلیل برای دستیابی به میزان درصد تبدیل بیشتر محصول مطلوب، از راکتور با حجم‌های بزرگ‌تر استفاده می‌شود. راکتورهای مخلوط‌شونده برای اغلب واکنش‌های همگن در فاز مایع استفاده می‌شود (شکل‌های ۸ـ۴ و ۹ـ۴).



شکل ۸ـ۴ـ راکتور مخزنی همزن‌دار پیوسته

در راکتورهای مخلوط‌شونده به‌علت وجود همزن، خوراک ورودی به‌سرعت در سرتاسر ظرف پراکنده می‌شود و غلظت در هر نقطه درون ظرف تقریباً یکسان است؛ لذا سرعت واکنش در تمام نقاط درون راکتور یکسان است. به‌طور کلی در راکتورهای مخلوط‌شونده تغییرات مکانی غلظت (یا خواص فیزیکی) درون راکتور یا در خروجی آن وجود ندارد و خواص آن یکنواخت است.

این نوع راکتورها برای تولید محصولاتی با حجم بالا از قبیل محصولات پتروشیمی، مواد شوینده، بهداشتی و محصولاتی که میزان تقاضای آنها به‌صورت ثابت در بازار وجود دارد، استفاده می‌شود. این نوع راکتورهای پیوسته در مقایسه با راکتورهای لوله‌ای حجم بیشتری نیاز دارند و حجم تولید در آنها بالاتر است.

شکل ۹ـ۴ـ راکتور مخزنی همزن‌دار پیوسته به همراه جزئیات

۱ـ CSTR

زمان اقامت در راکتورهای پیوسته:

در راکتورهای پیوسته که به‌طور مدام مواد خام به آن وارد و محصولات از آن خارج می‌شوند، از کمیتی به نام زمان اقامت استفاده می‌شود. زمان اقامت، متوسط زمانی است که یک ذره وارد راکتور می‌شود و تا زمان خروج در حال انجام دادن واکنش است. این کمیت به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$t = \frac{V}{Q}$$

در این معادله، v نشان‌دهندهٔ حجم راکتور، Q شدت جریان حجمی ورودی به راکتور و t زمان اقامت است. زمان اقامت یکی از متغیرها در طراحی راکتورهای شیمیایی است.

مثال ۴: واکنش $A + B \rightarrow C$ قرار است در یک راکتور لوله‌ای ۵۰ لیتری و در راکتور مخزنی همزن‌دار پیوسته ۷۵ لیتری انجام شود. میزان شدت جریان ورودی به هر دو راکتور ۲۵ لیتر بر دقیقه است. تعیین کنید مدت زمان اقامت مواد در این دو راکتور چقدر است.

پاسخ:

$$\text{زمان اقامت} = \frac{\text{حجم راکتور}}{\text{شدت جریان حجمی ورودی به راکتور}}$$

زمان اقامت در راکتور لوله‌ای:

$$t = \frac{۵۰}{۲۵} = ۲\,\text{min}$$

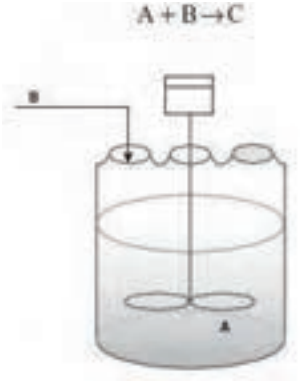
زمان اقامت در راکتور مخلوط شدهٔ پیوسته:

$$t = \frac{۷۵}{۲۵} = ۳\,\text{min}$$

تحقیق کنید ۲

دربارهٔ راکتورهای پیوسته صنعتی، مثال‌هایی را پیدا کنید.

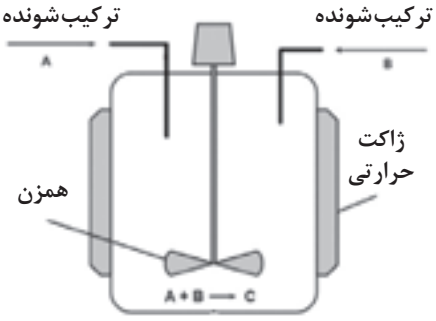
۹ـ۴ـ راکتورهای نیمه پیوسته



این نوع راکتورها دارای انواع متنوعی هستند. در نوع متداول آن یکی از مواد اولیه (A) ابتدا وارد راکتور می‌شود و سپس به تدریج مادهٔ اولیهٔ دیگر (B) به آن اضافه می‌شود (شکل ۱۰ـ۴).

شکل ۱۰ـ۴ـ راکتور نیمه پیوسته

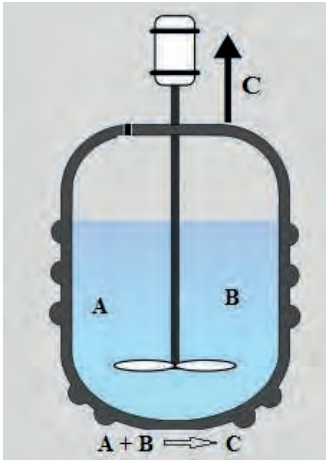
در نوع دیگر، مواد اولیه (A و B) به‌طور هم‌زمان وارد راکتور می‌شود، ولی تا پایان واکنش هیچ محصولی (C) از راکتور خارج نمی‌شود (شکل ۱۱ـ۴).



شکل ۱۱ـ۴ـ راکتور نیمه پیوسته

نوع دیگری از آن وجود دارد که تمامی مواد اولیه (A و B) در داخل راکتور بارگیری شده است و در هنگام واکنش ماده‌ای داخل راکتور نمی‌شود ولی هم‌زمان با واکنش، محصول (C) که معمولاً به‌صورت گاز است از راکتور خارج می‌شود (شکل ۱۲ـ۴).

راکتورهای نیمه‌پیوسته همان محدودیت‌های راکتور ناپیوسته را دارد. از امتیازات راکتورهای نیمه‌پیوسته کنترل بهتر دما و کنترل واکنش‌های نامطلوب و محدود کردن تولید محصولات ناخواسته است. این عمل از طریق وارد کردن تدریجی یکی از اجزای ترکیب‌شونده با غلظت کم میسر می‌شود. راکتورهای نیمه‌پیوسته اغلب برای واکنش‌های دو فازی استفاده می‌شوند که یکی از اجزای ترکیب‌شونده، گاز است و جزء گازی به‌صورت حباب به داخل فاز مایع درون راکتور تزریق می‌شود.



شکل ۱۲ـ۴ـ راکتور نیمه پیوسته

پرسش ۹

به نظر شما میزان تبدیل در کدام راکتور بیشتر است؟ چرا؟

فعالیت عملی ۱

کار با راکتور ناپیوسته

تهیه ماست:

مواد و وسایل لازم:

۱ـ دو نمونهٔ مختلف ماست (نمونهٔ A و نمونهٔ B)

۲ـ چهار عدد بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری

۳ـ یک لیتر شیر پاستوریزه

۴ـ چراغ گاز

۵ـ لیوان یک بار مصرف (۱۲ عدد)

۶ـ فویل آلومینیومی

۷ـ قاشق (چهارعدد)
۸ـ محفظهٔ گرم
۹ـ یخچال
۱۰ـ دماسنج الکلی

روش کار:

۱ـ ابتدا نمونهٔ ماست‌ها را به دو قسمت تقسیم کنید (داخل بشر) و آنها را A_1، A_2، B_1 و B_2 شماره‌گذاری کنید. (بهتر است نمونه‌های ماست متفاوت باشند. مثلاً یک نمونه ماست تازه و نمونهٔ دومی ماست ترش باشد.)

۲ـ نمونه‌های A_1 و B_1 را روی شعلهٔ گاز ضمن اینکه به آرامی حرارت می‌دهید به هم بزنید. بعد از جوشانیدن ماست اجازه بدهید تا ماست‌ها خنک شوند.

۳ـ شیر را تادمای $72^{\circ}C$ گرم کنید.

۴ـ اجازه دهید شیر تادمای $45^{\circ}C$ سرد شود، سپس آن را داخل لیوان‌های یک‌بار مصرف تقسیم کنید.

۵ـ به سه لیوان شیر یک قاشق از ماست نمونهٔ A_1 اضافه کنید و خوب مخلوط کنید و در لیوان‌ها را با فویل ببندید و روی آنها را برچسب بزنید.

۶ـ به سه لیوان شیر دیگر یک قاشق از ماست نمونهٔ A_2 اضافه کرده و خوب مخلوط کنید و در لیوان‌ها را با فویل ببندید و روی آنها را برچسب بزنید.

۷ـ به سه لیوان دیگر نمونهٔ B_1 را اضافه کرده و به همان ترتیب عمل کنید.

۸ـ به سه لیوان دیگر نمونهٔ B_2 را اضافه کرده و به همان ترتیب عمل کنید. (توجه داشته باشید که بهتر است برای هر نمونه از یک قاشق جداگانه استفاده کنید.)

۹ـ لیوان‌ها را به مدت چند ساعت (۵ـ۳ ساعت) در جای گرم قرار دهید ($37^{\circ}C$) و سپس آنها را به یخچال منتقل کنید.

۱۰ـ روز بعد ماست‌ها را از نظر بو، طعم، مزه و قوام ظاهری بررسی کنید و دلایل اختلاف آنها را توضیح دهید.

پرسش ۱۰

۱ـ ماست چگونه تهیه می‌شود؟
۲ـ میکروب‌های ماست چگونه به نگهداری شیر کمک می‌کنند؟
۳ـ جوشاندن ماست چه تأثیری روی میکروب‌های آن دارد.
۴ـ ماست‌های حاصل از نمونه‌های A_1 و A_2 چه اختلافی با هم دارند؟ دلیل آن را توضیح دهید.
۵ـ ماست‌های حاصل از نمونه‌های B_1 و B_2 چه اختلافی با هم دارند؟ دلیل آن را توضیح دهید.
۶ـ ماست‌های حاصل از نمونه‌های A_2 و B_2 چه اختلافی با هم دارند؟ دلیل آن را توضیح دهید.

تحقیق کنید:

دربارهٔ راکتورهای پیوستهٔ صنعتی، مثال‌هایی را پیدا کنید.

پرسش ۱۱

۱ـ دو کاربرد از راکتورهای ناپیوسته را بیان کنید و دو واکنش را که در صنایع شیمیایی در راکتور ناپیوسته انجام می‌شود، نام ببرید.

۲ـ واکنش $2C \rightarrow A$ قرار است در یک راکتور مخلوط‌شوندهٔ ۱۰۰ لیتری با ۱۰ مول از مادهٔ A آغاز شود. میزان شدت جریان ورودی به راکتور ۵۰ لیتر بر دقیقه است. مدت زمان اقامت مواد در راکتور چقدر است؟

۳ـ واکنش $2C \rightarrow A$ قرار است در یک راکتور مخلوط‌شوندهٔ ۱۰۰ لیتری با ۱۰ مول از مادهٔ A آغاز شود. پس از گذشت ۲۰ دقیقه از شروع واکنش میزان محصول تولیدی ۱۰ مول است. میزان تبدیل در راکتور چقدر است؟ میزان سرعت واکنش بر حسب $\frac{mol}{L.min}$ چقدر است؟

۴ـ مزایای راکتورهای لوله‌ای و مخلوط‌شونده را نام ببرید.

۵ـ تفاوت راکتور ناپیوسته و پیوسته چیست؟

۶ـ معمولاً گرمای لازم در راکتورها را چگونه تأمین می‌کنند؟ توضیح دهید.

۷ـ هم زدن در کدام‌یک از راکتورهای شیمیایی تأثیرگذار است؟ شیوهٔ تأثیر را توضیح دهید.

۸ـ برای تولید بنزین در یک پالایشگاه از چه راکتوری استفاده می‌شود؟ چرا؟

۹ـ انواع راکتورهای نیمه‌پیوسته را نام ببرید و توضیح دهید.

۱۰ـ آیا از مقایسه میزان تبدیل در دو راکتور می‌توان به مناسب بودن آنها پی برد؟ چگونه؟

۱۱ـ در یک کارخانهٔ شیمیایی که واکنشی در فاز مایع در آن اتفاق می‌افتد، برای افزایش میزان سرعت واکنش از میان راهکارهای زیر، کدام راهکار را پیشنهاد می‌دهید؟ چرا؟

- افزایش دما
- افزایش فشار

۱۲ـ عملیات در یک راکتور ناپیوسته را به همراه شکل توضیح دهید.

۱۳ـ از میان متغیرهای «سرعت واکنش» و «درصد تبدیل»، کدام‌یک در تصمیم‌گیری نوع عملیات مهم‌تر است؟ توضیح دهید.