

طراحی راکتور پیشرفته

مرجع: طراحی راکتورهای شیمیایی، لون اشپیل
ترجمه دکتر سهرابی

Ref.: Chemical Reaction Engineering, Levenspiel

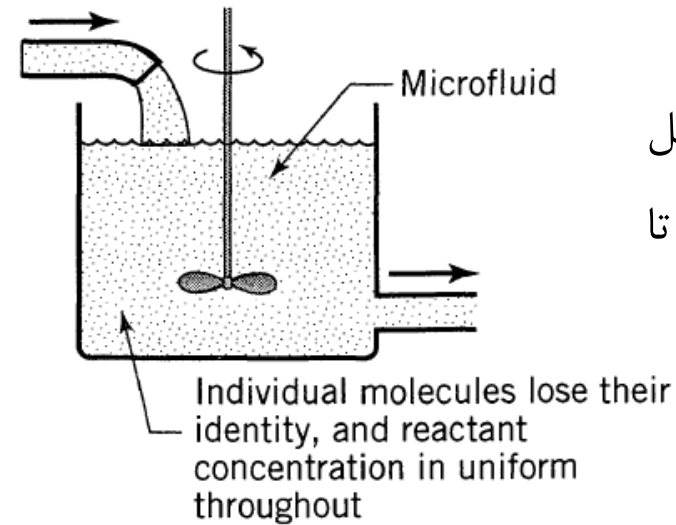
مدرس: یگانه داودبیگی

(جلسه پانزدهم)

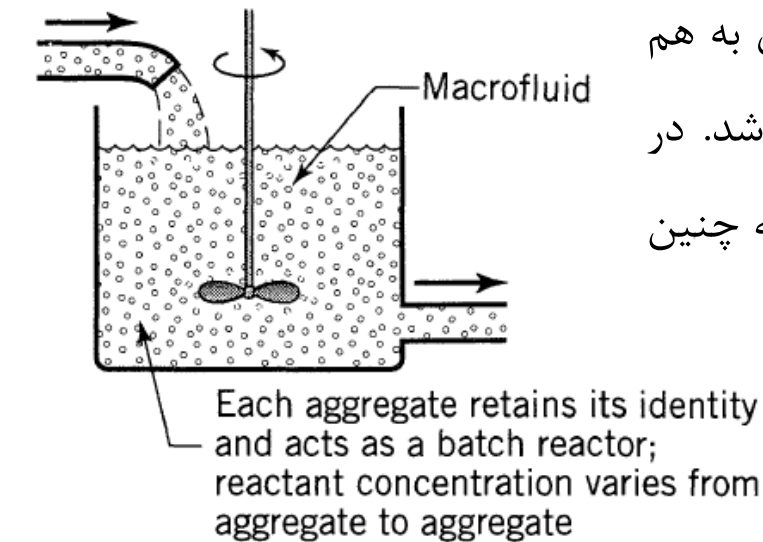
فصل دهم

آمیختگی سیالات

آمیختگی سیالات در سیستم‌های نامتجانس (هتروژن) و در سیستم‌های متجانس (هموژن) که در آن‌ها واکنش‌های بسیار تند بین دو سیال صورت می‌گیرد اهمیت پیدا می‌کند و اثر بسیار مهمی در پیشرفت واکنش شیمیایی خواهد داشت. مثلاً واکنش بین یک اسید و باز قوی که در آن‌ها به محض تماس دو سیال مواد با یکدیگر واکنش می‌دهند. ما سیال‌ها را به دو دسته حدی تقسیم می‌کنیم.



سیال میکرو یا ریز (micro fluid): سیالی است متشکل از مولکول‌های کاملاً منفرد و کاملاً پراکنده در داخل سیستم که در آن مولکول‌ها امکان حرکت و برخورد با سایر مولکول‌های سیال را دارند. هر چه در مورد سیالات تا کنون گفته شد بر اساس این فرض بوده است.



سیال ماکرو یا درشت (macro fluid): سیالی است که از تعداد بسیار زیادی گروه یا قطعات یا مولکول‌های به هم چسبیده یا توده یا هم‌بسته‌های کوچک تشکیل شده است. هر هم‌بسته شامل میلیاردها مولکول منفرد می‌باشد. در سیال ماکروی کامل هیچ ارتباطی بین مولکول‌های هم‌بسته‌ها با مولکول‌های دیگر وجود ندارد. البته چنین سیالی در واقعیت نداریم.

حال اگر انتقالی از یک هم‌بسته به هم‌بسته دیگر انجام شود به آن سیال **نیمه میکرو (نیمه جدا)** گوئیم. اکثر سیالات حقیقی بدین صورت هستند.

نکته مهم: با آزمایش ردیاب نمی‌توان تفاوت بین این دو سیال را مشخص نمود ولی هنگامی که واکنش شیمیایی داشته باشیم نحوه عملکرد این دو نوع سیال با یکدیگر کاملاً متفاوت است.

درجه جدایی سیال

یکی از مشخصه‌های سیال است و بیانگر این مطلب است که آیا آمیختگی یا مخلوط شدن سیال در حد میکروسکوپی (مولکولی) است یا در حد ماکروسکوپی (هم‌بسته‌ها). هر چه درجه جدایی زیادتر باشد سیال خاصیت ماکرو دارد. به عبارتی در سیال ماکرو جدایی کامل وجود دارد و در سیال میکرو جدایی وجود ندارد.

زمان آمیختگی

بیانگر این مطلب است که اختلاط سیال در ظرف زود یا دیر انجام می‌شود. مثلاً در راکتور mixed زمان آمیختگی کم است (مخلوط شدن سریع است). در راکتور plug زمان آمیختگی بسیار طولانی است (در واقع در راکتور plug آمیختگی صورت نمی‌گیرد). بنابراین درجه جدایی و زمان آمیختگی اثر مهمی در عملکرد سیستم‌های واکنش‌های شیمیایی دارند و هدف ما تعیین بهترین نحوه اختلاط است.

در ابتدا دو حالت حدی میکرو و ماکرو را بررسی می‌کنیم و فعلا حالتی که فقط یک سیال وارد ظرف می‌شود را بررسی می‌کنیم. آن معادلاتی که تا به حال راجع به واکنش‌های هموژن خوانده‌ایم بر پایه سیال میکرو بوده است. حال فرض می‌کنیم یک سیال ماکرو وارد می‌شود و واکنشی را انجام دهد. می‌خواهیم ببینیم نوع سیال چه نقشی در درصد تبدیل خواهد داشت.

اثر همبستگی سیال بر روی عملکرد راکتورها:

راکتور batch:

سیال ماکروی A را در یک راکتور batch می‌ریزیم. چون راکتور batch است، مرزها چه باشند و چه نباشند فرقی ندارد. هر هم‌بسته درون راکتور خودش بصورت یک راکتور batch کوچک عمل می‌کند. یعنی میلیون‌ها راکتور batch کوچک در یک راکتور batch بزرگ داریم.

نتیجه: پس در راکتور batch از لحاظ درصد تبدیل فرقی بین سیال ماکرو و میکرو وجود ندارد.

$$t_{batch} = - \int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{(-r_A)}$$

راکتور plug:

$$\tau_P = - \int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{(-r_A)} = t_{batch}$$

زمان انجام واکنش در راکتور plug همان زمان طی کردن طول راکتور است. در راکتور plug تفاوتی بین میزان تبدیل در سیال میکرو و میکرو نیست.

راکتور back-mixing یا CSTR:

$$\tau_m = \bar{t}_m = \frac{C_{A0} - C_A}{(-r_A)_{C_A}}$$

وقتی سیال محتوی A میکرو باشد، به محض ورود به راکتور، غلظت A برابر غلظت در جریان خروجی می‌شود. اگر سیال ماکرو باشد مثل این است که میلیون‌ها راکتور batch کوچک وارد یک راکتور mixed شده که هر کدام در حال چرخ خوردن و غلتیدن در راکتور mixed بوده و در آن‌ها واکنش به صورت مستقل انجام می‌شود. به عبارتی توده مولکول‌ها هویت (غلظت) خود را از دست نمی‌دهند.

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{غلظت A باقیمانده (غلظت} \\ \text{A خروجی از ظرف)} \\ \hline \end{array} = \sum_{\substack{\text{تمام} \\ \text{همبسته ها}}} \begin{array}{|c|} \hline \text{غلظت A موجود در} \\ \text{همبسته‌ای با زمان} \\ \text{اقامت بین t و t+dt} \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|} \hline \text{جزیی از جریان که متشکل از} \\ \text{همبسته‌هایی با زمان اقامت} \\ \text{بین t و t+dt می‌باشد.} \\ \hline \end{array}$$

$$C_{A,out} = \int_0^{\infty} (C_A)_{\text{همبسته}} \cdot E \cdot dt$$

واکنش درجه اول:

$$(C_A)_{\text{همبسته}} = C_{A0}e^{-kt}$$

تابع توزیع زمان اقامت در یک راکتور mixed کامل

$$E = \frac{1}{\bar{t}} \cdot e^{-t/\bar{t}}$$

$$C_{A,out} = \int_0^{\infty} C_{A0}e^{-kt} \cdot \frac{1}{\bar{t}} \cdot e^{-t/\bar{t}} \cdot dt = \frac{C_{A0}}{\bar{t}} \int_0^{\infty} e^{\frac{-kt\bar{t}-t}{\bar{t}}} \cdot dt = \frac{C_{A0}}{1+kt} \quad C_{A,out} = \frac{C_{A0}}{1+kt}$$

که همان رابطه راکتور mixed ایده‌آل برای واکنش درجه یک و سیال میکرو است.

بنابراین برای واکنش‌های درجه یک، درجه جدایی (ماکرو یا میکرو بودن) اثری در میزان درصد تبدیل ندارد. یعنی x_A برای سیال ماکرو و میکرو یکسان است.

* اگر واکنش درجه صفر باشد نوع راکتور در درصد تبدیل تاثیر ندارد.

* اگر واکنش درجه یک باشد میکرو یا ماکرو بودن (در هر راکتوری) بی تاثیر است.

واکنش درجه دوم:

Batch: $(-r_A) = kC_A^2 \rightarrow \frac{1}{(C_A)_{\text{همبسته}}} - \frac{1}{C_{A0}} = kt \rightarrow \frac{C_{A0}}{C_A} - 1 = C_{A0}kt \rightarrow \frac{C_A}{C_{A0}} = \frac{1}{1 + C_{A0}kt}$ سیال ماکرو باشد یا میکرو باشد

Plug:

پلاگ و جریان میکرو: $\bar{t}_P = \frac{V}{Q} = \int_{C_{A0}}^{C_{A,out}} -\frac{dC_A}{kC_A^2} = -\frac{1}{k} \int_{C_{A0}}^{C_{A,out}} C_A^{-2} dC_A \rightarrow \frac{C_{A,out}}{C_{A0}} = \frac{1}{1 + kC_{A0}\bar{t}_P}$ ★

پلاگ و جریان ماکرو: $C_{A,out,plug} = \int_0^\infty (C_A)_{\text{همبسته}} \cdot E \cdot dt = \int_0^\infty \frac{C_{A0}}{1 + kC_{A0}t} \delta(t - \bar{t}_P) \cdot dt \rightarrow \frac{C_{A,out}}{C_{A0}} = \frac{1}{1 + kC_{A0}\bar{t}_P}$ ★★

$$\star = \star\star$$

Mixed:

همزده و سیال میکرو $QC_{A0} = QC_{A,out} + kC_{A,out}^2 \cdot V \rightarrow \frac{C_{A,out}}{C_{A0}} = \frac{1}{1 + C_{A0} \cdot k \cdot \bar{t}_m}$ (۱)

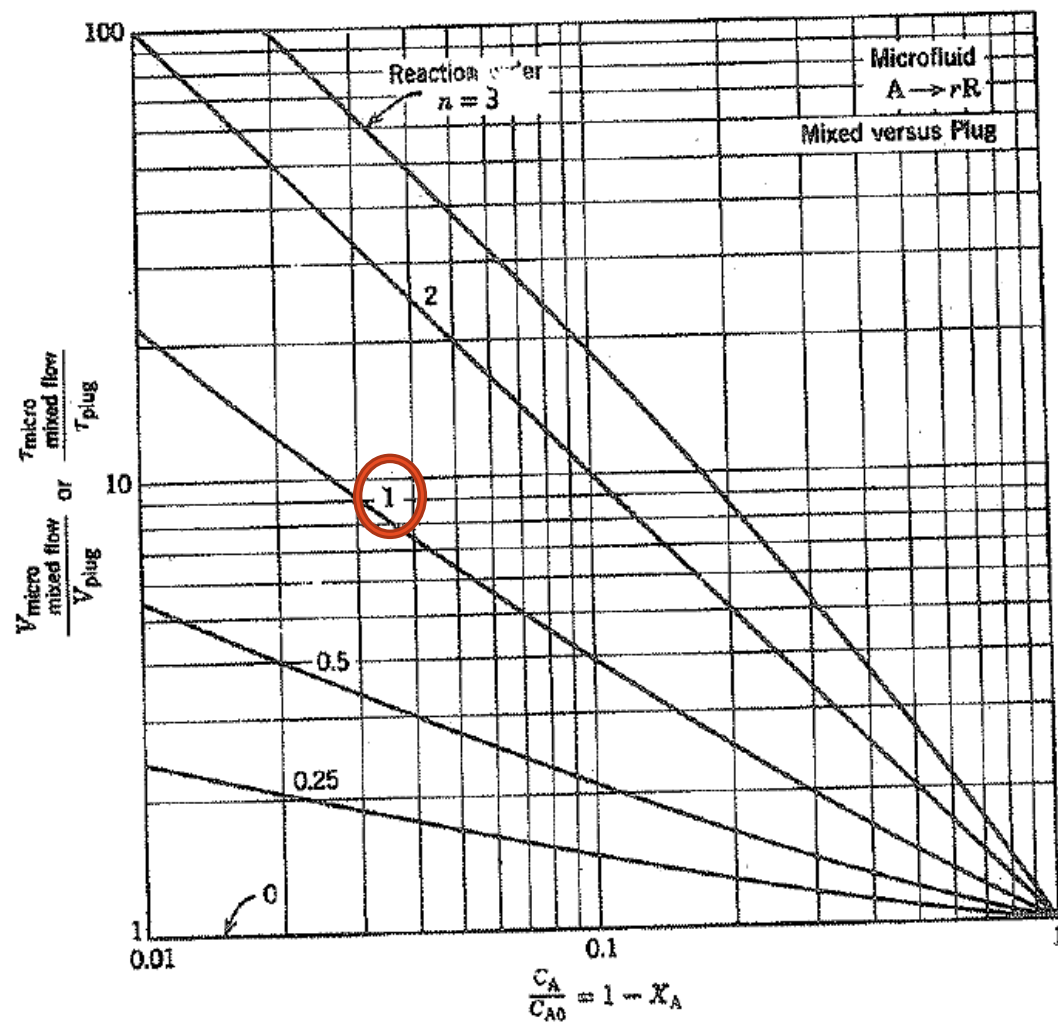
همزده و سیال ماکرو $C_{A,out} = \int \underbrace{\frac{C_{A0}}{1 + kC_{A0}t}}_{C_A \text{ همبسته}} \cdot \underbrace{\frac{e^{-\frac{t}{\bar{t}_m}}}{\bar{t}_m}}_{E \text{ راکتور همزده}} dt = f(C_{A0}, k, \bar{t}_m)$ (۲)

(۱) و (۲) با هم متفاوتند.

$$(-r_A) = \frac{dC_A}{dt} = k \left\{ \begin{array}{l} \text{Plug با سیال ماکرو یا میکرو} \longrightarrow (C_{A,out})_{plug} = C_{A0} - k\bar{t}_P \\ \text{Mixed با سیال میکرو} \longrightarrow (C_{A,out})_{mixed} = C_{A0} - k\bar{t}_m \\ \text{Mixed با سیال ماکرو} \longrightarrow (C_{A,out})_{mixed} = \int_0^{\infty} (C_{A0} - kt) \cdot \frac{1}{\bar{t}_m} \cdot e^{-\frac{t}{\bar{t}_m}} \cdot dt \end{array} \right.$$

کتاب کلیه این معادلات را برای درجات مختلف واکنش به صورت منحنی درآورده است.

Microfluid



Macrofluid

