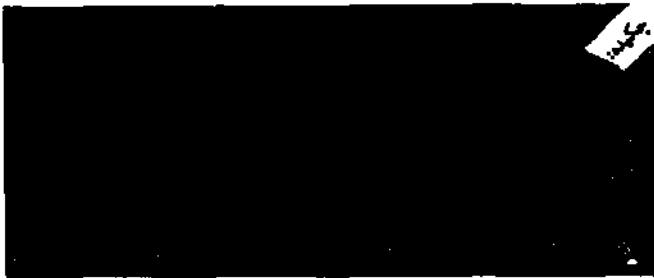


فرآیند پلیمرها در یک بازنگری جامع

Polymer Processing: An Overview

ترجمه دکتر سید علی حسینی (CEP) در ۱۳۸۷



کلید واژه:

فرآیند پلیمرها - اختلاط - حذف مواد فرار - فرآیندهای پلیمری واکنش پذیر

Key words:

Polymer Processing, Mixing, Devolatilization, Reactive Processing.

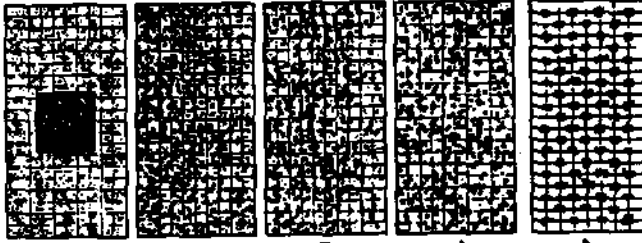
ذرات نیز باید در وضعیتی قرار گیرند که تعریف چنین حالتی برای آنها مصداق پیدا کند (شکل ۳۵). از آنجا که تعداد بی شماری از ذرات در اختلاط دخالت دارند، لازم است حالت مخلوط کامل را به طور آماری تعریف کنیم.

حالت کاملاً مخلوط نشده

حالت کاملاً مخلوط شده

Ω_{11}

$$\Omega_{\text{mixed}} = \frac{(N_1 + N_2)!}{N_1! N_2!}$$



الف

ب

ج

د

هـ

A, B: نام اجزاء
a, b: کسر حجمی
A, B: اندازه نهایی ذرات

شکل ۳۵ - حالت مخلوط

وقتی مخلوط کاملی از یک جزء A در جزء B حاصل می شود که احتمال پیدا کردن ذره ای از A در همه نقاط مخلوط یکسان و برابر کسر حجمی A در مخلوط باشد که آن را a می نامیم. تعداد ذرات هر یک از اجزاء A و B را به ترتیب N_A و N_B می نامیم. ذرات جزء A یا ذرات جزء B فرقی ندارند ولی ذرات یک جزء از یکدیگر قابل تمیز نیستند. در این شرایط فقط یک آرایش قابل تمیز وجود دارد که در آن اجزاء A و B در حالت غیر مخلوط قرار دارند (شکل ۳۵ الف) که برای آن $\Omega_{11} = 1$. تعداد آرایشهای قابل تمیزی که مخلوط کامل است، آنگونه که در شکل ۳۵ آمده، عبارت است از:

$$\Omega_M = \frac{(N_A + N_B)!}{N_A! N_B!} \quad (35)$$

بدیهی است که این عدد بسیار بزرگ است. اشکال ۳۵ د و ۳۵ هـ تنها دو شکل ممکن را نشان می دهند. آرایش نشان داده شده در شکل ۳۵ ج، مورد خاصی است که اصطلاحاً آنرا آرایش منظم اتفاقی می نامند. احتمال دستیابی به چنین حالتی با استفاده از تجهیزات فعلی اختلاط، فقط برای دو جزء سازگاری میسر است که ذرات آن تا مقیاس مولکولی کوچک باشند. نیروهای بین مولکولی که طی آخرین مرحله اختلاط پدید می آیند، پیدایش این حالت را تسهیل می نمایند.

اختلاط

از نقطه نظر مصرف کننده مواد و سازنده آنها، اختلاط، مرحله فرآیندی است که یک پلیمر مطابق با معیارهای مورد نظر برای کارایی خاصی، طراحی شود. برای دستیابی به این هدف، یک یا چند جزء فرعی را باید در یک جزء اصلی پراکنده ساخت. عموماً این جزء اصلی یک پلیمر است که در دمای عملیاتی در حالت مایع یا لاستیکی است. ماهیت جزء فرعی میتواند مایع، لاستیکی یا جامد باشد. اگر جزء فرعی به حالت مایع یا لاستیکی باشد، سازگاری اجزاء با یکدیگر نقش مهمی ایفا می کند. در حالت جامد، باید بین جامداتی که اندازه ذرات آنها بزرگتر از $10 \mu m$ است و آنهایی که ذرات ریزتری دارند، تمایز قائل شد.

ذرات درشت به آسانی جریان می یابند. در برخی موارد نظیر استفاده از الیاف تقویت کننده، نباید از شکستگی الیاف حین اختلاط اجتناب جست. ذرات ریز تمایل به تشکیل کلوخه دارند که باید حین عمل اختلاط تا حد ذرات نهایی شکسته شوند. دستگاه مورد استفاده جهت اختلاط، می تواند اساساً برای تغییر ساختار پلیمر بکار رود تا با دیگرگون ساختن توزیع وزن مولکولی یا به خط کردن شاخه ها، خواص آن را به طریق دلخواهی تغییر دهد.

سنجش کارایی

هدف از سنجش کارایی فرآیند اختلاط پاسخ به این سوال است که آیا به خواص دلخواه دست یافته ایم یا خیر:

- یکخواختی رنگ مخلوط پس از افزودن رنگ دانه
- یکخواختی اندازه و توزیع حبابها پس از افزودن عامل کف کننده
- خواص فیزیکی و سایش لاستیک پس از آمیختن با دوده
- اصلاح خواص یک پلیمر پایه در نتیجه آلهیز کردن آن با یک پلیمر نسیمه سازگار و اصلاح خواص دیگر

در اصل، ابداع تجهیزات اختلاط صرفاً متکی بر اطلاعات تجربی بود. مثلاً «بن بوری» (F.H. Banbury) اولین و هنوز برترین مخلوط کننده داخلی را اختراع کرد. اساس اختراع وی تجاری بود که از آسیاب دو غلطکی (two-roll mill) بدست آورده بود.

اولین قدم در بدست آوردن یک تئوری علمی برای اختلاط عبارت از بیان یک تعریف کلی از حالت مخلوط است. به منظور تسهیل یک سیستم متشکل از اجزاء جداگانه به یک حالت مخلوط کامل، آخرین

اگر V_{01} و V_{02} کسر حجمی A و B در مخلوط باشند، حالت اختلاط کامل را می‌توان به صورت احتمال یافتن غلظت X_0 از جزء A در داخل نمونه‌ای به حجم V_0 بیان نمود:

$$P(X_A) = \text{EXP} \left(-\frac{1}{2} \frac{(X_A - a)^2}{\sigma^2} \right) \quad (31)$$

اگر a اندازه ذرات A باشد، واریانس σ^2 را که $\sigma^2 = a \cdot b$ می‌نامیم، می‌توان به صورت زیر نشان داد.

$$\sigma^2 = a \cdot b \frac{\alpha}{V_0} \quad (32)$$

در اینجا α/V_0 عبارت است از نسبت حجم ریزترین ذره جزء A به حجم نمونه که برداشت شده است.

توزیع غلظت تعداد زیادی از نمونه‌ها با اندازه ذرات معین، که از حالت مخلوط کامل برداشت شده باشد، براساس معادلات ۳۱ و ۳۲، و شکل ۳۶ خواهد بود. هر انحرافی معرف مخلوطی کمتر از کامل است.

چندین روش برای توصیف کمی کیفیت مخلوط ارائه شده است. واریانس N نمونه عبارت است از:

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_1^N [X_{A1} - a]^2 \quad (33)$$

که در آن X_{A1} عبارت از غلظت جزء A در نمونه‌های برداشته شده است. بنابراین می‌توان شاخص اختلاط را چنین تعریف کرد:

$$I = \frac{\sigma_0^2 - S^2}{\sigma_0^2 - \sigma^2} \quad (34)$$

که در آن $\sigma^2 = a \cdot b$ عبارت است از واریانس حالت کاملاً مخلوط نشده این شاخص در مورد مخلوط کامل برابر ۱ و برای حالت کاملاً مخلوط نشده برابر صفر است. برای مطالعه یک مخلوط، کیفیت مخلوط به کمک برداشت نمونه‌های بزرگ جهت تعیین یکنواختی کلی و برداشت نمونه‌های کوچکتر برای تعیین بافت و ساختار محلی، ارزیابی می‌شود. پی، وی، دانکورتز (Danckwerts) [30] برای اولین بار اندازه‌گیری میزان جدا افتادگی و شدت جدا افتادگی را برای تشخیص بافت و ساختار کلی، بیان نمود.

علوه کونوله، ششم، طهر سال دوم شماره اول

جدا افتادگی میزانی از اندازه مناطق جدا افتاده است؛ شدت جدا افتادگی میزانی از تفاوت نسبی غلظت هابین مناطق جدا افتاده است. دانکورتز [30] عبارات ریاضی برای هر دو میزان بدست آورد. با این وجود کاربرد آنها مستلزم دستگاه تجزیه تصاویر است. روشهای مختلفی برای برآورد کیفیت مخلوطها ارائه شده است که هر یک مختص خانواده معینی از مواد است. همه روشهای درجه‌بندی کمی مخلوطها، بر اساس آن اصول آماری شروع می‌شوند که مورد بحث قرار گرفت.

کیفیت مخلوط

ارائه مدلی برای فرآیند اختلاط بسیار مطلوب است که پی‌گیری فرآیند به گونه‌ای که در یک دستگاه معین شکل می‌گیرد، و پیش‌بینی حاصل کار - کیفیت مخلوط - را امکان‌پذیر سازد. برای دستیابی به این هدف باید هر ذره بسیار کوچکی را در طول فرآیند ردیابی کرد و این کاری فراسوی توانائی ما است.

محققین از طریق پی‌گیری قطعات کوچک ماده (سلولهای از ماده) طی فرآیند به بررسی عمل اختلاط پرداخته‌اند. افزایش سطح مشترک بین اجزاء، معیاری برای بیان پیشرفت عمل اختلاط است.

در این بحث، مواد به عنوان محیط پیوسته‌ای جهت اختلاط در نظر گرفته شده است. گرچه این عمل برای ساده کردن مسأله است، با وجود این نتایج آن می‌تواند به درک کیفی شرایط پیچیده‌تر منجر شود. روش ساده‌سازی فوق قابل توجه است چون ذرات بسیار کوچک هر جزء از یکدیگر قابل تمیز نیست؛ بنابراین فرق چندانی نخواهد داشت که کدام ذره بسیار کوچک موقعیت خاصی را اشغال کند.

سه نوع حرکت اصلی برای اختلاط در نظر گرفته شده است:

- نفوذ مولکولی
- نفوذ چرخانه‌ای (در جریان درهم)
- جا به جایی

در فرآیند پلیمرها، ما حداقل با یک جزء دارای ویسکوزیته بالا سروکار داریم و نفوذ تنها طی مرحله نهایی اختلاط قابل توجه می‌شود. در این مرحله جزء فرعی تقریباً به طور یکنواخت توزیع یافته است. چون در سیستم‌های پلیمری، به اعداد رینولدز، شاخص جریان درهم نمی‌توان دست یافت، بنابراین اختلاط ناشی از نفوذ چرخانه‌ای اهمیتی ندارد. در نتیجه برای اختلاط پلیمرها، جا به جایی تنها نوع جریان است که باید در نظر گرفته شود.

دو نوع جا به جایی مورد بررسی در فرآیندهای اختلاط عبارت‌اند از: جا به جایی انبوه (جا به جایی تویی) و جا به جایی لایه‌ای. جا به جایی در برگیرنده حرکت ذرات سیال است. در جا به جایی انبوه، لخته‌های سیال بایا بدون افزایش سطح مشترک بین اجزاء توزیع می‌یابند. و قتی افزایشی در فصل مشترک اجزاء پدید نیاید، لخته‌های ماده حین تغییر موقعیت بندرت تغییر شکل می‌یابند.

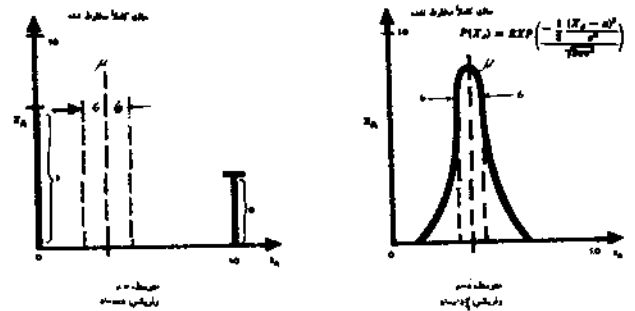
جا به جایی انبوه می‌تواند اتفاقی باشد، مانند موردی که اپراتوری

ورقه پلیمری را از نورد دو غلطکی می برد و سپس آنرا تا می کند و مجدداً بین دو غلطک قرار می دهد، یا جابه جایی انبوه منظم در همز نه‌های ساکن [۳۶]. جابه جایی انبوه به گونه‌ای که بین روتورهای غیر درگیر یک مخلوط کن داخلی صورت می گیرد، را غالباً اتفاقی می نامند و ساختن مدلی از آن مشکل است. در مورد یک دستگاه معین و شرایط عملیاتی مشخص، فقط مسأله زمان مطرح است و وقتی تکنیکهای لازم ابداع گردید، حل مسأله امکان پذیر خواهد شد.

جابه جایی لایه‌ای حاصل جریان لایه‌ای است که تغییر شکل‌هایی را بر یک سیستم تکمیل می کند. همزدگی مایع امایع و اختلاط جامد امایع از طریق اختلاط جابه جایی لایه‌ای در مکانیسمهای مختلف جریان انجام می شود که عبارت اند از: برش، ازدیاد طول و فشرده سازی. با وجود این جریان برشی نقش مهمی در فرآیندهای تجاری ایفا می کند زیرا دستیابی به آن در ماشین آلات صنعتی بر راحتی امکان پذیر است. در اختلاط لایه‌ای، نسبت ویسکوزیته‌ها نقش مهمی به عهده دارد و متغیر تعیین کننده گرنش اعمال شده است. میزان گرنش اعمال شده تنها بر افزایش دمایی اثر می کند که در پی اعمال مقدار معینی گرنش پدید می آید. حتی در مورد یک سیال توانی که با اعمال برش نازک می شود، کل انرژی جذب شده و به همراه دما با افزایش میزان برش به ازای گرنش کل ثابت، افزایش می یابد [۳۶].

ویسکوزیته اجزاء نه تنها بر فرآیند اختلاط اثر می کنند بلکه کشسانی آنها را نیز تحت تأثیر قرار می دهد. منظور نمودن کشسانی در مدل اختلاط، منجر به وارد شدن زمان در مدل، بعنوان یک متغیر می گردد زیرا سیالهای ویسکو الاستیک، قدرت ذخیره انرژی به صورت انرژی پتانسیل در خود را دارند و می توانند آنرا به عنوان انرژی جنبشی رها سازند. هم اکنون مدل سازی فرآیندهای ساده اختلاط مواد ویسکو الاستیک با استفاده از روشهای (عددی) اجزاء معین امکان پذیر است.

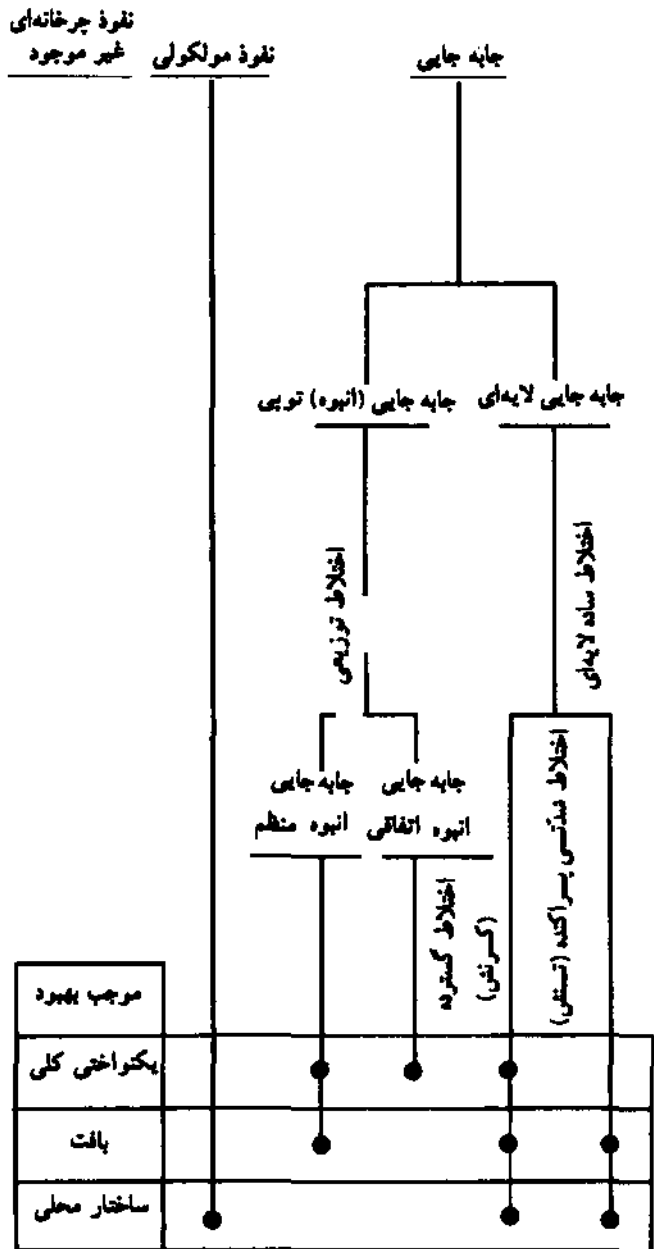
این ملاحظات قابل تعمیم به مخلوط‌هایی است که از یک جزء اصلی مایع و یک جزء فرعی شامل ذرات جامدی که به راحتی جاری میگردند، تشکیل شده‌اند. در این موارد نیز تنشهای برشی تا آنجا که به اختلاط مربوط است، دخالتی ندارند.



شکل ۳۶ - تعریف آماری حالت مخلوط‌ها

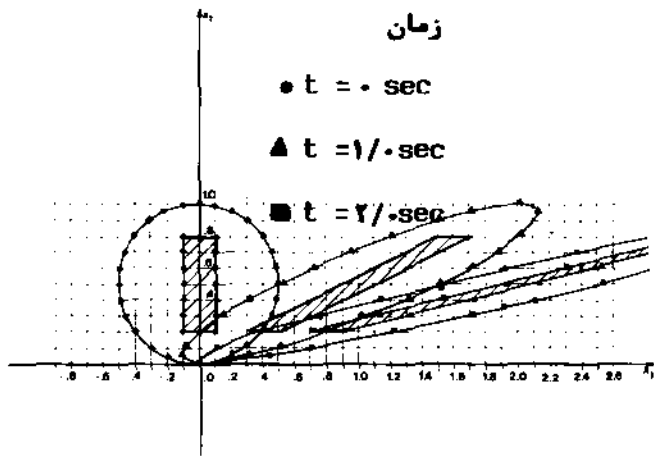
در مورد اجزاء فرعی، شامل ذرات جامد که کلوخه تشکیل می دهند و برای شکستن آنها تنش تسلیم اعمال شده باید از مقدار معینی تجاوز کند، میزان تنش که تعیین کننده تنشهای محلی است نقش تعیین کننده‌ای ایفا می کند. برای آنکه بتوان شکستن کلوخه‌هایی از ذرات با خواص و شکل معلوم در میدان جریان مشخصی را پیش بینی کرد، تحقیقات اضافی قابل ملاحظه‌ای لازم است. این نوع اختلاط را در مقابل اختلاط توزیعی یا گسترده، اختلاط پراکنده یا شدنی می نامند.

در اختلاط لایه‌ای، خطوط جریان هرگز یکدیگر را قطع نمی کنند. غیر یکنواختی‌های اولیه توزیع جزء فرعی بر روی خطوط جریان اختلاط را فقط در صورتی می توان حذف کرد که اختلاط لایه‌ای با جریان جابه جایی تویبی تلفیق گردد. شکل ۳۷ مکانیسمهای اختلاط و اثر آن را بر فرآیند اختلاط نشان می دهد.



شکل ۳۷ - مکانیسمهای اختلاط

$$k = 2 \text{ sec}^{-1} \quad R = \frac{1}{2}$$

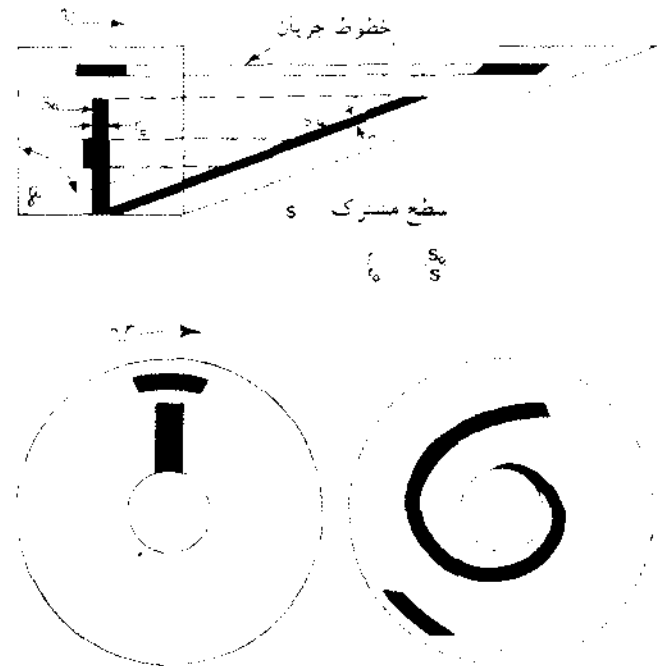


در شکل ۳۸، پیشرفت اختلاط در جریان برشی بین دو صفحه موازی و بین دو استوانه هم محور (جریان Couette) نشان داده شده است. غیر یکنواختی‌های جزء فرعی بر روی خطوط جریان را نمی‌توان با اختلاط لایه‌ای رفع نمود، گرچه با این عمل درجه اختلاط بهبود می‌یابد. اهمیت جهت یابی اولیه جزء فرعی نیز در شکل ۳۸ نشان داده شده است. اسپنسر و واپلی (۳۲) اولین کسانی بودند که معادلات رشد سطح مشترک را برای جریان ساده برشی به دست آوردند. آنها نتیجه گرفتند که افزایش درجه آمیختگی در تغییر شکلهای برشی وسیع متناسب با کرنش برشی است. این نتیجه‌گیری به طور گسترده‌ای جهت پیش‌بینی درجه اختلاط در تجهیزات صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با یک محاسبه سرانگشتی می‌توان گفت که برای یک اختلاط خوب باید کرنش برشی حداقل بین ۸۰۰۰ تا ۱۰/۰۰۰ واحد باشد.

شکل ۳۹ - میدان ساده برشی

در شکل ۴۰ پیشرفت اختلاط در جریان توام با ازدیاد طول سطحی نشان داده شده که عاری از دوران است و در آن اختلاط سریعتر از مثالهای قبلی صورت می‌گیرد. اروین [۳۳] نشان داد که اختلاط برشی ساده با تغییر جهت عمل برش لحظه‌ای بهینه می‌گردد به نحوی که همواره زاویه ۴۵ درجه با امتداد محور اصلی تغییر شکل را حفظ می‌کند. بررسیهای انجام شده درباره اختلاط لایه‌ای بر اهمیت جریان تسوی (plug flow) در ترکیب با جریان لایه‌ای تأکید دارد. این مسأله نه تنها هر غیر یکنواختی اولیه موجود در توزیع جزء فرعی را از بین می‌برد، بلکه جهت‌یابی نسبت به عمل برش را نیز تغییر می‌دهد.

یک مشخصه مهم دستگاههای اختلاط پیوسته، توزیع زمان اقامت ذرات در آنها است. برای اطمینان از تولید محصولی (یکنواخت) یکدست، بدست آوردن توزیع زمان اقامت بساریک، مهم است. توزیع کیفیت

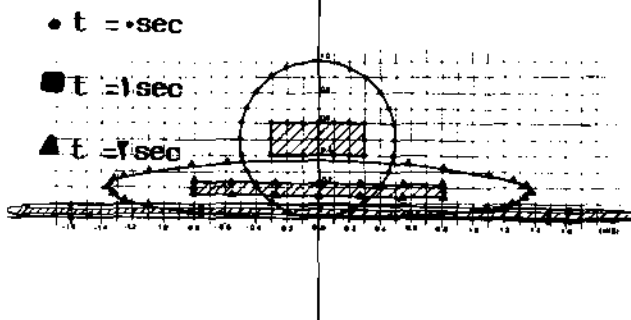


شکل ۳۸ - اختلاط لایه‌ای

در حرکت لایه‌ای، حجمی از سیال متحمل ازدیاد طول انتقالی و نیز دورانی می‌گردد. شکل ۳۹ این موضوع را در مورد جریان برشی بین صفحات موازی نشان می‌دهد (در این شرایط انتقال حذف شده است)؛ ازدیاد طول باعث افزایش درجه اختلاط می‌شود. دوران باعث هدایت بدنه تغییر شکل یافته به سمت عمل برش می‌گردد و به این ترتیب میزان پیشرفت اختلاط را کاهش می‌دهد. اگر اعمال برش وقتی به میزان نصف کرنش برشی رسید قطع گردد و در امتداد عمودی ادامه یابد به درجه اختلاط حاصل به ازای همان کرنش به میزان قابل ملاحظه‌ای بزرگتر از کرنش برشی است.

میزان ازدیاد طول

$$k/2 = 1/0 \text{ sec}^{-1} \quad R = \frac{1}{2}$$



شکل ۴۰ - جریان سطحی توام با ازدیاد طول: جریان صرفاً برشی

یکواخت) یکدست مخلوط مستلزم زمان اقامت مساوی برای همه ذرات است. غالب سیستمهای پلیمری که حساسیت بسیاری به دما دارند یا حاوی افزودنیهای واکنش پذیر هستند که با دما فعال می شوند، نیاز به طی مراحل فرآیندی دارند. مواد خروجی از اکسترودرها ممکن است حاوی مقادیر متغیری از ژلها باشند که ناشی از زمان اقامت بیش از حد اجزاء فرعی است. همچنین زمان تخلیه یک سیستم اختلاط توسط توزیع زمان اقامت اجزاء آن معین می گردد.

تجهیزات اختلاط

قدیمی ترین وسیله اختلاط غلطک (یا نورد دو غلطکی) است. این وسیله بسیار موثر است و هنوز هم در آزمایشگاهها و نیز در صنایع لاستیک برای تهیه مخلوطهای مخصوصی کم مقدار مورد استفاده قرار می گیرد. اولین مخلوط کن داخلی، مخلوط کن «بن بوری» بود که دارای دو روتور ناهمسو گرد و غیردرگیر بود. این وسیله هنوز هم مهم ترین مخلوط کن در صنایع لاستیک است.

تعدادی مخلوط کن بر اساس همین اصول طراحی، روتورهای درگیر و همغیر درگیر را به کار می گیرند. طی سالهای ۱۹۶۰، شرکت فارل اولین مخلوط کن پیوسته را ساخت. از آن زمان تاکنون تعدادی مخلوط کن پیوسته با روتورهای غیردرگیر ناهمسو گرد با اشکال هندسی متفاوتی ساخته و به بازار عرضه شده اند. این وسایل با اکسترودرهای دوقلوی همسو گرد کاملاً درگیر به رقابت برخاسته اند. با ضمیمه نمودن بخشهای اختلاط با برش زیاد و برخی تغییرات در شکلهای هندسی مارپیچ، مخلوط کنهای همسو گرد دوقلو به صورت مخلوط کنهای بسیار مؤثری در آمده اند که به سادگی قابل تطبیق با شرایط تعداد زیادی از پلیمرها هستند. عموماً هیچیک از دو مخلوط کن پیوسته و همسو گرد دوقلو برای ایجاد فشار خروجی قابل ملاحظه طراحی نشده اند. این خصوصیت انعطاف بیشتری در مورد انتخاب مستغیرهای عملیاتی فراهم می آورد. اکسترودرهای دوقلوی ناهمسو گرد درگیر کارایی اختلاط خوبی ندارند. با وجود این، با تعبیه بخشهای خاصی میتوان اختلاط را بهبود بخشید. اکسترودر دوقلو به دلیل داشتن منحنی توزیع زمان اقامت پاریک، برای تهیه آمیزه هایی از مواد حساس به دما مناسب هستند.

یک وسیله نسبتاً جدیدی که به ماشین آلات اختلاط صنعتی اضافه شده، «دیسک - پک» (disk-pack) است که برای مقادیر خروجی کم تا متوسط مناسب میباشد. این وسیله میتواند اعمال ذوب، حذف مواد فرار و پمپ کردن را نیز انجام دهد.

اکسترودرهای یک محوری اساساً برای ذوب، حذف مواد فرار (Devolatilization) و پمپ کردن ساخته می شوند. با تعبیه وسایلی که الگوی جریان لایه ای را در داخل مجرای اکسترودر می شکنند، می توان بهبود محدودی در کارایی اختلاط آنها ایجاد کرد.

حذف مواد فرار و فرآیندهای واکنش پذیر

گاهی پلیمر تخلیه شده از راکتور حاوی درصد بالایی از اجزاء فرار است و مستلزم خالص سازی تا چند قسمت در میلیون می باشد. درجه خالص سازی را کاربرد نهایی پلیمر تعیین می کند. برای برخی از کاربردها نظیر بسته بندی مواد غذایی که استانداردهای ایمنی و بهداشت بالایی دارند، یا خواص مکانیکی منتخب برای بعضی مصارف نهایی، خلوص بسیار بالایی مورد نیاز است. هر دو کاربرد فوق ممکن است به نحو نامطلوبی تحت تأثیر مقادیر بسیار کم مواد آلوده کننده باقی مانده، واقع شوند.

حذف مواد فرار

از آنجا که مواد آلوده کننده در غالب موارد نسبت به پلیمرهای میزبان فرار هستند، آنها را از طریق تبخیر از داخل فاز فشرده تر (پلیمر) به داخل فاز گازی مجاور می رانند. چنین فرآیند جداسازی را اصطلاحاً حذف مواد فرار (devolatilization) می نامند. پلیمر مورد نظر جهت حذف مواد فرار می تواند به صورت مذاب یا بستری از ذرات جامد باشد. جداسازی از طریق اعمال خلاء یا با استفاده از مواد بی اثر نظیر تخلیه بکمک ازت یا بخار آب، امکان پذیر است.

حذف مواد فرار یک واحد عملیاتی مهم در فرآیند مواد پلی مری است و از نظر اهمیت شاید بلافاصله بعد از اختلاط و آمیزه سازی قرار گیرد. اطلاعات راجع به مکانیسم حذف مواد فرار پراکنده و غیردقیق است. مدل های ریاضی و الگوریتم های طراحی ناقص اند و به شکل نامناسبی آزموده شده اند.

بهرتر است دو شکل متمایز حذف مواد فرار را مشخص سازیم. در تبخیر ناگهانی مواد، جریان خوراک مذاب حاوی مقادیر زیادی حلال است. اعمال خلاء موجب کف کردن می شود. میزان انتقال حرارت به پلیمر که صرف گرمای نهان تبخیر جزء فرار می شود، میزان تبخیر را تعیین می کند. در شکل دوم، خوراک یا جامد است یا مذاب. اگر خوراک مذاب باشد، به اندازه کافی رقیق هست که بتوان بر آن فرآیند حذف مواد فراری را اعمال کرد که تحت کنترل نفوذ باشد. در بیشتر عملیات صنعتی، سه عنصر فرآیندی قابل تمایز وجود دارد:

- ذرات جامد وقتی پلیمر در حالت لاستیکی باشد، مثل پلی اتیلن.
- ذرات جامد وقتی که دمای فرآیند T برابر یا کمتر از دمای گنر همیشه ای T_g پلیمر باشد، مثل پی وی سی.
- ظرف یا فیلمی از پلیمر مذاب ساکن و یک ظرف مذاب در حال دوران، که وقتی $T > T_g$ باشد گاهی آن را کناره غلظان (Rolling bank) می نامند.

ظرف مذاب دوار و فیلم مذاب ساکن با ابعاد گوناگون در همه دستگاههای حذف مواد فرار که شامل تیغه یا لبه های دوار باشند در کنار یکدیگر وجود دارند.

تعادل جداسازی نهایی قابل دستیابی توسط قوانین جداسازی ترمودینامیکی (Partition Law) بیان می شود. این قوانین ترکیب تعادلی

پلیمر را به فشار جزئی تعادلی جزء آلوده کننده در فاز گاز مجاور، P_c مربوط می‌سازند. این قانون جداسازی از تئوری فلوری هاجینز (Flory-Huggins) نتیجه می‌شود:

$$P_c = P_c^0 \gamma_c \phi_c \quad (35)$$

که در آن ϕ_c عبارت است از کسر حجمی جزء آلوده کننده و P_c^0 فشار بخار جزء آلوده کننده خالص و γ_c ضریب فعالیت همان جزء است.

$$\gamma_c = \text{EXP}[(1 - \phi_c) + X(1 - \phi_c)^2] \quad (36)$$

در اینجا X معرف یک پارامتر تقابلی است. چنانچه غلظت جزء آلوده کننده به اندازه کافی کم باشد، معادله (35) به صورت قانون هانری در خواهد آمد:

$$P_c = K_w \omega_c \quad (37)$$

که در آن ω_c کسر وزن است و K_w عبارت است از

$$K_w = P_c^0 (\rho_p / \rho_c) \text{EXP}(1 + X) \quad (38)$$

در این رابطه ρ و ρ_p به ترتیب وزن مخصوص پلیمر و جزء آلوده کننده هستند.

مواد بی اثر

وارد کردن یک ماده بی اثر به چند طریق موجب تسریع حذف مواد فرار می‌شود. وجود ماده بی اثر در فاز بخار موجب کاهش P_c و ترکیب قابل دسترسی از جزء آلوده کننده در بخارات می‌گردد. به علاوه، وجود ماده بی اثر در پلیمر مذاب به عنوان یک فاز جدا (پراکنده) عمل تبخیر ناگهانی جزء آلوده کننده در فشارهای بالاتر را بکمک خاصیت افزایشی فشارهای بخار، امکان پذیر می‌سازد. علاوه بر این، تبخیر یک مایع پراکنده بی اثر، نظیر آب، موجب افزایش بسیار فصل مشترک برای انتقال جرم می‌شود. با وجود این، چنین ماده‌ای عمل کف کردن را تشدید می‌کند.

تشدید حذف مواد فرار با کف

اصولاً وقتی پلیمر مذاب در معرض کاهش فشار واقع می‌شود و فشار آن به P می‌رسد، حبابهایی تشکیل می‌شوند. فشار P باید به میزان $2\sigma/R_b$ کمتر از P_c باشد که در آن σ به کشش سطحی و R_b شعاع اولیه

حباب است. بدین ترتیب مایع فوق اشباعی حاصل می‌شود که جوش با عمل تشکیل حباب را موجب می‌گردد. در عمل، برای به وجود آوردن کف در پلیمر مذاب، ایجاد خلاء به میزانی پایتینتر از فشار فوق اشباع همواره مورد نیاز نیست. برعکس، در غلظتهای بسیار کم جزء آلوده کننده، پدیده کف کردن مشاهده شده است.

حبابها حتی در غیاب مواد افزودنی بی اثر نیز به صورت ناهمگن پدید می‌آیند. این عمل احتمالاً از طریق لختههای گاز ظاهراً پایدار که بین شکافها و ترکهای مواد ریز موجود در پلیمر به تله افتاده اند، انجام می‌گیرد. با کاهش فشار بیرونی، این لختههای گاز آزاد می‌شوند. هوای به تله افتاده نیز همین اثر را دارد که ممکن است به یکی از طرق زیر ایجاد گردد: فضای خالی بین شکافها در مخروط تغذیه یک اکسترودری که خوراک دانه‌ای دارد، یا در یک ماشین دوار نظیر اکسترودر یا تبخیر کننده فیلم نازک به دلیل جریان کششی بین لبه ظرف دوار همگرا و پلیمر چسبیده به جداره ساکن هم جوار، پدید می‌آید.

توان

انرژی حرارتی به دو طریق به پلیمر مذاب انتقال می‌یابد: از طریق انتقال مستقیم حرارت از ورای جداره دستگاه یا از طریق تبدیل انرژی مکانیکی (کار محور دوار) به انرژی حرارتی ناشی از گرمزایی ویسکوز (Viscous Heat Dissipation).

در تبخیر ناگهانی که در آن غلظت جزء فرار زیاد است، غالباً عامل کنترل میزان تبخیر، میزان انتقال حرارت از دیواره‌های دستگاه به ماده پلیمری است. دلیل این امر یکی بزرگی مقدار گرمای نهان تبخیر و دیگری کوچکی مشهور ضریب انتقال حرارت مواد پلیمری است. اعمال مکانیکی حرارت فقط وقتی قابل ملاحظه است که ویسکوزیته مذاب پلیمری زیاد باشد. این امر در شرایطی رخ می‌دهد که غلظت جزء فرار کم است و دیگر نیازی به تأمین مقادیر زیاد گرمای نهان تبخیر نیست. در آن صورت حذف مواد فرار ممکن است حتی در سیطره نفوذ باشد. بنابراین، امر مهم در طراحی، خصوصاً در مورد اکسترودرهایی که به مجاری تخلیه گاز (هواکش) مجهز هستند، تعیین سهم توان گراننده دستگاه در یک گستره محدود ترکیب - ویسکوزیته، در تأمین انرژی تبخیر است.

مرحله بندی

کاهش میزان خلاء اعمال شده، p ، منجر به دو پدیده رقابتی می‌شود. از یک سو، هر چه p کمتر شود، پتانسیل جداسازی نیز افزایش می‌یابد. این شرط را از دو دیدگاه میتوان تشریح کرد: اول از نظر تعادلی (هر چه فشار خروجی P_c کمتر باشد در نتیجه و نهایتاً W_c کمتر می‌شود) و دوم از نظر میزان (نیروی محرکه قوی تر، یعنی تفاضل P_c خوراک و p ، جهت ایجاد کف). از سوی دیگر، هر چه p کمتر شود، مقدار بخار جزء آلوده کننده که بازای واحد حجم جابه‌جا شده توسط پمپ خلاء خارج می‌شود، کمتر خواهد بود.

بر اساس این پدیده‌های رقابتی باید خلاء را طی مراحل اعمال کرد. وقتی بخش عمده جزء فرار خارج گردیده است باید فشار بالاتری (خلاء کمتری) اعمال شود. وقتی حذف غلظت‌های کم ماده آلوده‌کننده از ترکیب نیز مورد نظر باشد، باید عمل را در فشار پائینتری (خلاء بیشتری) به انجام رساند. گرچه با عمل مرحله‌بندی، کل خلاء ایجاد شده به حداقل خواهد رسید، ولی برای جداسازی مطلوب برابر و دبی‌های مساوی، استفاده از تجهیزات بزرگتر ضروری است (مثلاً استفاده از مجاری تخلیه بزرگتر (هواکش‌ها) در یک اکسترودر). پدیده‌ی است که لازمه یک طراحی بهینه، مقایسه هزینه بین منافع نسبی پمپ‌های خلاء کوچکتر در مقایسه با اکسترودرهای کوچکتر است.

خواص در پدیده‌های انتقال

لازمه تحلیل و طراحی غالب فرآیندهای حذف مواد فرار، اطلاع از نفوذ مولکولی نه تنها در موارد تحت کنترل نفوذ، بلکه در مواردی است که کف تولید می‌شود. احتمال می‌رود که حبابها به دلیل جذب مواد فرار آلوده‌کننده از پلیمر مذاب در برگیرنده آنها، بزرگ شوند. مولکولهای مواد آلوده‌کننده از طریق نفوذ به فصل مشترک بین حباب و مذاب انتقال می‌یابند. گرچه مسیر نفوذ بین حبابها کوتاه است و سطوح انتقال بین فازها وسیع است، ولی میتوان تصور کرد که در حذف مواد فرار بکمک کف، نفوذ مرحله کنترل کننده میزان حذف باشد.

در غیاب حبابها میتوان میزان حذف مواد فرار را به روش تجدید سطح (Surface Renewal) یا مراحل اختلاط، تشدید کرد. عموماً اگر مذاب را متناوباً در معرض چندین چرخه تبخیر کوتاه و مراحل اختلاط بین آنها قرار دهیم به مراتب بهتر از آن است که مذاب فقط یک چرخه تبخیر با مدت زمان کلی برابر ولی بدون اختلاط را طی کند.

همه فرآیندهای حذف مواد فرار که در آنها نهایتاً نفوذ مولکولی تعیین کننده میزان حذف است، توسط نفوذ مولکولی جزئی سامان نیافته محدود می‌شوند. نفوذ مواد حل شده با مولکولهای کوچک در پلیمر مذاب با غلظت به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. میزان این کاهش ممکن است به اندازه چند مرتبه - بزرگی کمتر از نفوذ در مایعات متداول باشد. نفوذ متناظر پلیمرهای جامد باز هم کمتر است. این تقیصه با کاهش فواصل نفوذ جبران می‌گردد، مثلاً در مورد ذرات پلیمری با قطر بسیار کم در پلی‌مر شدن امولسیون یا تعلیقی.

تجهیزات

بهتر است تجهیزات مورد استفاده در حذف مواد فرار را بر اساس حالت فیزیکی پلیمر (مذاب یا جامد) یا شرایط انتقال (غلظت کم و زیاد جزء آلوده‌کننده) دسته‌بندی کرد.

وقتی یک پلیمر، مایعی با ویسکوزیته نسبتاً کم و نیروی محرکه زیاد باشد، مناسب‌ترین فرآیند تبخیر ناگهانی ساده است. $(P_1 - P_2)$ تجهیزات مورد نیاز عبارت‌اند از مخزن انبساط با یک مجرای تخلیه گاز

(لوله هواکش) در بالای آن برای برداشت بخارات و یک پمپ تخلیه مناسب (از نوع دنده‌ای یا ماریپیج) جهت برداشت برشهای ویسکوزیتری. با تزریق جریان خوراک به یک منطقه کاهش ناگهانی فشار، عمل ایجاد کف تسهیل می‌شود.

تفاوت انواع آرایش تجهیزات، در درجه اول مربوط به انواع روشهای ایجاد فصل مشترک به عنوان سطوح انتقال جرم است. در دستگاه حذف مواد فرار به روش کرانه‌های ریزان

(Falling-strand Devolatilizer)، فیلمی از مذاب در یک قالب اکسترودر شده و رها می‌شود تا به دلیل وزن خود سقوط کند. حین سقوط عمل تبخیر ناگهانی رخ می‌دهد و سپس فیلم به داخل ظرف حاوی پلیمر مذاب می‌ریزد تا سرانجام به بیرون انتقال یابد. در تبخیرکننده فیلم نازک

(Thin-Film Evaporator)، فیلم مایع نازکی از جداره داخلی یک استوانه قائم به دلیل وزن خود پائین می‌آید و در تماس با جریان بخاری قرار می‌گیرد که در وسط و رو به بالا در حرکت است. انتقال جرم از وراء فصل مشترک گاز-مایع، عمود بر محور استوانه صورت می‌گیرد. برای استفاده از دستگاه در مواردی که فاز مایع ویسکوزیته بالاتری دارد، از تیغه‌های ماریپیجی واقع بر محور دوار منطبق بر محور استوانه استفاده می‌شود. این تیغه‌ها به فیلم پلیمری مولفه حرکتی رو به پائین می‌دهند و بدین ترتیب جریان آن را به سمت خروج از دستگاه سرعت می‌بخشند.

اگر یک پلیمر، ماده مذاب ویسکوزی باشد که پمپ کردن آن مشکل است، میتوان از اکسترودرهای مجهز به مجاری تخلیه گاز (هواکش‌دار)، به ویژه از نوع اکسترودر دوقلو، به عنوان وسیله حذف مواد فرار استفاده کرد. ماده مذاب مسیر قیف تغذیه تا خروجی دستگاههای اکسترودر دوقلو غیر درگیر و اکسترودرهای تک محوری، به صورت تلفیقی از جریان فشاری و کششی طی میکند. در اکسترودرهای دوقلو که درگیری نزدیک با یکدیگر دارند (همسوگرد و ناهمسوگرد) تلفیقی از جریان نشتی و چاب‌جاسازی مکانیکی مثبت، ماده مذاب را به خروجی دستگاه می‌راند. به منظور تسهیل در امر تبخیر و در پی آن خارج ساختن مواد آلوده‌کننده فضایی جهت خروج فاز بخار تأمین میگردد. این فضا در مجاورت ماده مذاب واقع است و به طور پیوسته از طریق افزایش عمق کانال بستر ماریپیج و نیز از طریق افزایش میزان نشت بین کانالها در اکسترودرهای دوقلو ایجاد می‌شود.

حرارت به دلیل گرمایی ویسکوز، خصوصاً در فاصله لقی بین لبه ماریپیج و بدنه در برگیرنده ماریپیج، ایجاد می‌شود و از بدنه در برگیرنده ماریپیج انتقال می‌یابد. در اینجا، طی هر بار گردش ماریپیج، فیلمی از مذاب بر بدنه می‌نشیند، و حداقل بخشی از آن با مذاب موجود در ظرف مجدداً در می‌آمیزد تا به سمت پائین دست مجرای ماریپیج جریان یابد.

برخی از پلیمرها به هنگام خروج از ظروف واکنش به صورت دانه‌ای هستند. اقتصادی‌ترین روش حذف مواد فرار برای این ذرات، حذف مستقیم آنها از حالت جامد است. بدین ترتیب عملیات ذوب و دانه‌سازی مجدد مورد نیاز نخواهد بود.

موارد استفاده از واکنشهای انبوه و در نتیجه دستگاههایی از نوع اکسترودر را دیکته می کنند.

اکسترودرها خصوصاً به عنوان یک راکتور پلیمری مناسب هستند. اکسترودرها بر اساس جریان کششی کار می کنند و قادرند مواد ویسکوالاستیک را پمپ و مخلوط کنند و در عین حال فشارهای زیاد تولید و دماهای بالا را حفظ کنند. به علاوه اکسترودرها می توانند مراحل عملیاتی نظیر ذوب، اختلاط، کاهش یا ایجاد فشار و افزودن جریانهای جانبی مواد را به ترتیب انجام دهند. افزودن جریانهای جانبی با جداسازی مراحل از یکدیگر به وسیله آب بندی به کمک مذاب انجام می شود که کاهش فشار را امکان پذیر می سازد و می توان جریانهای جانبی جامد، مایع یا گازی شکل را پس از اندازه گیری به داخل اکسترودر فرستاد به علاوه این امکان نیز وجود دارد که یک یا چند عملیات فرآیندی، نظیر آمیزه سازی، شکل دهی و واکنش را در همان ماشین انجام داد.

اکسترودرهای دوقلو، به ویژه با ماریج های چند قطعه و کانال بستر ماریج قطعه ای ساخته می شوند تا ذوب، اختلاط، تحت فشار قرار دادن و عملیات حذف مواد فرار را به هر ترتیب مورد نظری و با سهولت نسبی امکان پذیر سازند.

قالب گیری تزریقی و واکنش پذیر

یکی از جنبه های مورد توجه فرآیندهای قالب گیری تزریقی این است که برخلاف قالب گیری تزریقی سنتی، کاهش قابل ملاحظه ای در هزینه های پمپ کردن در بر دارند که به دلیل استفاده از خوراکی های پیش پلیمری با ویسکوزیته کم است. چنانچه مرحله پر کردن قالب قبل از واکنش پیشرفته کامل شود، می توان فشار تزریق سنتی را از بیش از ۱۰۰۰ psi (۶۹۰۰ kpa) به مقادیر کم ۱۰ psi (۰.۶۹ kpa) کاهش داد. با وجود این، به دلیل کاهش سودآور مدت هر سیکل قالب گیری، نمی توان مدت زمان پخت، حین بسته بودن قالب را بسیار طولانی در نظر گرفت. لازمه یک طراحی مؤثر، تنظیم ظریف این دو حالت است. نخست آنکه واکنش را به اندازه کافی عقب بیاندازیم تا برای پر کردن قالب نیازی به فشارهای بالا نباشد. دوم آنکه سرعت واکنش و میزان تبدیل را حتی الامکان زیاد کنیم تا مدت هر سیکل کاهش یابد.

گرچه لوله های تحت فشار، کاربردهای وسیعی به عنوان پلیمر ساز ندارند، با وجود این، جریان تحت فشار در فرآیندهای قالب گیری تزریقی واکنش پذیر مهم است. مجاری منتهی به قالب (هواکش و راه گشاه (runner & sprue) را می توان به منزله راکتورهای لوله ای با جریان تحت فشار در نظر گرفت؛ خود قالب را می توان به منزله یک راکتور با صفحات موازی در نظر گرفت.

یک وجه تمایز مهم بین قالب گیری و جریان در راکتورهای سنتی، ماهیت گذرای جریان است. همچنان که جبهه جریان مواد مذاب از راگا می گذرد تا سرانجام حفره های قالب را پر کند، طول مسیر جریان به صورت پیوسته افزایش می یابد. هم زمان اگر سیال در حال واکنش باشد،

حداقل یکی از فرآیندهای حذف مواد فرار برای پلی اتیلن این است که در یک سیلو، بستری آکنده از دانه های پلی اتیلن فراهم آوریم سپس برای استخراج ماده آلوده کننده (اتیلن) از طریق نفوذ جریان گازی نظیر ازت را بر بستر بگذاریم. این فرآیند برای استخراج مواد آلوده کننده ای با فشار بخار زیاد نظیر اتیلن مناسب ترین روش است.

فرآیندهای واکنش پذیر

ساخت و تولید محصولاتی از پلیمرهای سنتزی (پلاستیکها، لاستیکها، الیاف و فیلمها) به طور سنتی شامل دو مجموعه عملیات جداگانه و متمایز از یکدیگر بوده است: واکنش و فرآیند، در راکتورهای مورد استفاده برای پلیمر کردن مولکولهای مونومر به مولکولهای پلیمر تبدیل می شوند و تجهیزات فرآیند پلیمرها، مولکولهای پلیمر را به محصولات شکل گرفته تبدیل کنند.

هدف فرآیندهای واکنش پذیر ادغام این دو مجموعه عملیات است. این کار از طریق انجام عمل پلیمر شدن و واکنشهای تغییر شکل پلیمرها در دستگاههای فرآیندی واحد، نظیر قالبها و اکسترودرها صورت می گیرد. در حال حاضر دو نمونه بسیار جالب توجه عبارت انداز: قالب گیری تزریقی واکنش پذیر (Reaction Injection Molding - RIM) و اکستروژن

واکنش پذیر (Reaction Extrusion - REX)

اکستروژن واکنش پذیر

در تاریخ تحول مواد، ما به دورانی وارد شده ایم که به عصر آلیاژهای پلیمری معروف است. در تکاپوی یافتن مواد به اصطلاح ترموپلاستیک مهندسی با خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و شیمیایی تشدید یافته، کانون تحقیقات از سنتز مواد پلیمری جدید به سوی ترکیب پلیمرهای موجود با یکدیگر و با انواع مواد پر کننده و عوامل تقویت کننده، تغییر مکان داده است. آمیزه ها و آلیاژهای حاصل را غالباً به روش شیمیایی اصلاح می کنند تا سازگاری و پایداری آنها بهبود یابد. مثالی قدیمی ABS و مثال جدید در این زمینه نایلون سخت است.

واکنشهای اصلاح پلیمرها که در زیر آمده است معرف اکستروژن واکنش پذیر هستند:

● پلیمر کردن مونومر A در حضور پلیمر B برای تولید مخلوط فیزیکی کامل (آلیاژ پلیمری)

● پیوند زدن مونومر A بر پلیمر B برای تولید بلوکها یا شاخه های کوپلیمری

● درگیر کردن پلیمر A با پلیمر B به روش شیمیایی برای تولید ساختار بلوکی یا پیوندی (شاخه ای)

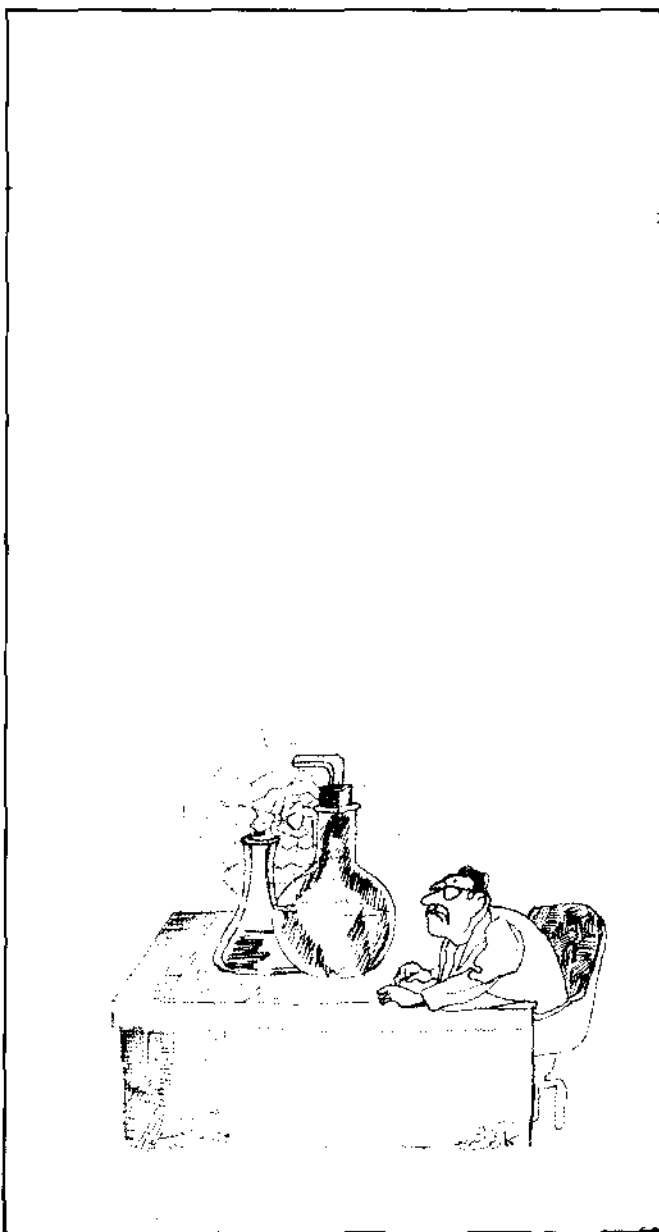
● کوپلیمر کردن مقادیر کم A با B (بلوک، پیوندی و غیره) برای تولید عوامل سازگار کننده که موجبات پایداری آلیاژهای پلیمری A و B را فراهم آورد.

سنتز مواد جدید به روش اکستروژن واکنش پذیر حتی در تخیل ما نیز نمی گنجد. تولید این مواد مستلزم به کاربردن مفاهیم مهندسی فرآیند غیر سنتی است. علاوه بر مسأله پلیمر شدن تعلیقی و امولسیون، عوامل اقتصادی خصوصاً قیمت انرژی و تجهیزات سرمایه ای در بسیاری از

وسیع غلظت‌های پلیمری بین این دو غایت، توجه کمی مبذول شده است. اما این منطقه برای مخلوط‌های در حال واکنش حائز اهمیت است. برای مخلوط‌های پلیمری در حال واکنش، تغییرات قضایی ناگهانی ویسکوزیته همراه با گرادیان حرارتی ایجاد شده توسط واکنش‌های شدیداً گرمازا، قابل پیش‌بینی است. وقتی خصوصیات مقابله‌کننده‌ای نظیر رشد وزن مولکولی مرحله میعان، پلیمر شدن افزایش زنجیر (Chain-Addition Polymerization) و کوپلیمر شدن (Copolymerization) وارد محاسبات می‌شوند، مسأله پیچیده‌تر می‌شود.

REFERENCES:

30. Danckwerts, P.V., *Research*, 6, p. 355, London (1953).
31. Hold, P., *Adv. in Poly. Technol.*, 2, pp 141, 197 (1962).
32. Spence, R.S., and R.N. Wiley, *J. Colloid Sci.*, 6, (1951).
33. Erwin, L., *Poly. Eng. and Sci.*, 18, p.13 (1978).



خواص مواد جریان تغییر قابل ملاحظه‌ای هم با زمان و هم با مکان خواهد کرد. اگر مدت پر کردن قالب به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مدت واکنش باشد، برای سهولت، فرآیند قالب‌گیری تزریقی را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. اولی جریان بدون واکنش است (پر کردن قالب) و دومی واکنش در یک محیط ساکن است (پخت). از آنجا که لازمه فرآیندهای قالب‌گیری تزریقی واکنش‌پذیر، واکنش‌های سریع است تا مدت هر سیکل قالب‌گیری کوتاهتر گردد، در عمل مرتبه بزرگی زمان پر کردن قالب و زمان واکنش با یکدیگر برابرند.

در قالب‌گیری تزریقی واکنش‌پذیر، به طور وسیعی از پلیمر شدن یورتان‌ها که به اندازه کافی سریع هستند، استفاده می‌شود. در فرآیندهای قالب‌گیری تزریقی واکنش‌پذیر از واکنش‌های دیگری مثل پلیمر شدن آمیدها در حضور کاتالیزور آنیونی و برخی از پلیمر شدن‌های اپوکسیدی نیز استفاده شده است.

ویسکوزیته واکنش

طراحی دستگاه‌های سنتی (بدون واکنش) فرآیند پلیمرها به دلیل ماهیت غیر نیوتونی ویسکوزیته پلیمر مذاب مشکل است. در طراحی تجهیزات فرآیند سیال‌های واکنش‌پذیر طراح با کار دشوارتری مواجه می‌شود، یعنی به حساب آوردن تغییرات ویسکوزیته با پیشرفت واکنش، تغییر دما، وزن مولکولی و نیز غیریکواختی در داخل دستگاه.

در جریان مخلوط‌ها یا پمپ کردن سیال‌های در حال پلیمر شدن، به دلیل افزایش سریع ویسکوزیته با پیشرفت واکنش، ممکن است بسا مشکلاتی مواجه شویم. برای درک پدیده توأم با این نوع جریان، لازم است رابطه شدتی واکنش و ویسکوزیته را بررسی کنیم. چنین به نظر می‌آید که میزان برش به عنوان ویسکوزیته واکنش به غلظت و وزن مولکولی به مراتب بیش از دما حساس باشد.

وقتی محصول پلیمر شدن محلول باشد، غلظت پلیمر با پیشرفت واکنش افزایش می‌یابد، به همان ترتیب که در واکنش‌های سریع گرمازا و انتقال حرارت ضعیف، دما افزایش می‌یابد. افزایش ویسکوزیته واکنش می‌تواند تا حدودی توسط افزایش دما تعدیل شود. از سوی دیگر، وزن مولکولی بسته به ماهیت پلیمر شدن، ممکن است با پیشرفت واکنش، افزایش یا کاهش یابد. در نتیجه روند تغییر پروفیل ویسکوزیته متغیر و متنوع است.

پروفیل تغییر ویسکوزیته واکنش، اثر عمیقی بر استراتژی طراحی فرآیند پلیمر شدن دارد. تصمیمات مربوط به شکل پمپ کردن (تحت فشار قرار دادن درونی در مقایسه با تحت فشار قرار دادن بیرونی) و نحوه اختلاط (لایه‌ای در مقابل درهم) به طور بحرانی به ویسکوزیته واکنش بستگی دارد.

ویسکوزیته در یک واکنش، از خوراک مونومری به یک محصول پلیمری مذاب، ممکن است از نظر اندازه هفتاد برابر یا بیشتر تغییر کند. گرچه مساعی فراوانی به توصیف رفتار جریان محلول‌های پلیمری رقیق و نیز رفتار پلیمرهای مذاب اختصاص یافته است، ولی در مورد محدوده