

به نام خدا

اکستروژن

EXTRUSION

رفتار ویسکوالاستیک

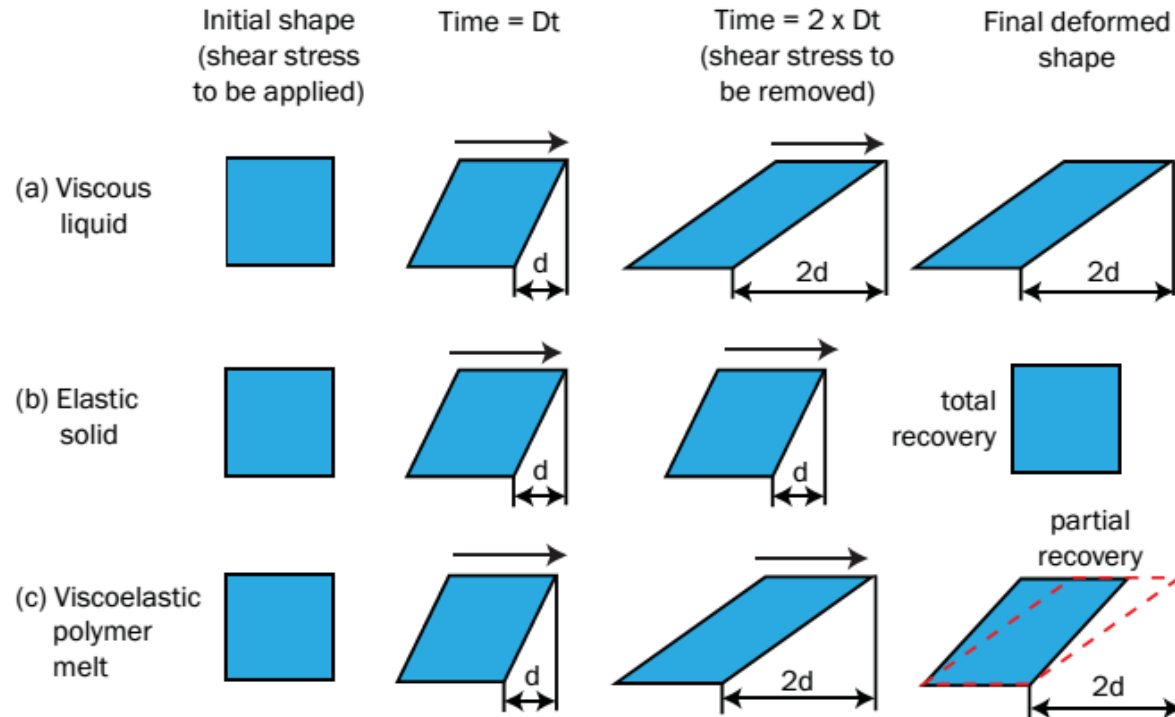


Figure 1.10 (a) Ideal viscous liquid deforms continuously under applied stress (b) Ideal elastic solid deforms immediately upon the application of stress, but fully recovers when the stress is removed (c) Molten thermoplastic deforms continuously under the applied stress (like a viscous liquid), but also recovers partially from the deformation upon removal of the applied stress (like an elastic solid)

ویسکوزیته مذاب برشی

$$\text{viscosity} = \frac{\text{shear stress}}{\text{shear rate}}$$

where

$$\text{shear stress} = \frac{\text{force (F)}}{\text{area (A)}} \quad \text{and} \quad \text{shear rate} = \frac{\text{velocity (v)}}{\text{height (h)}}$$

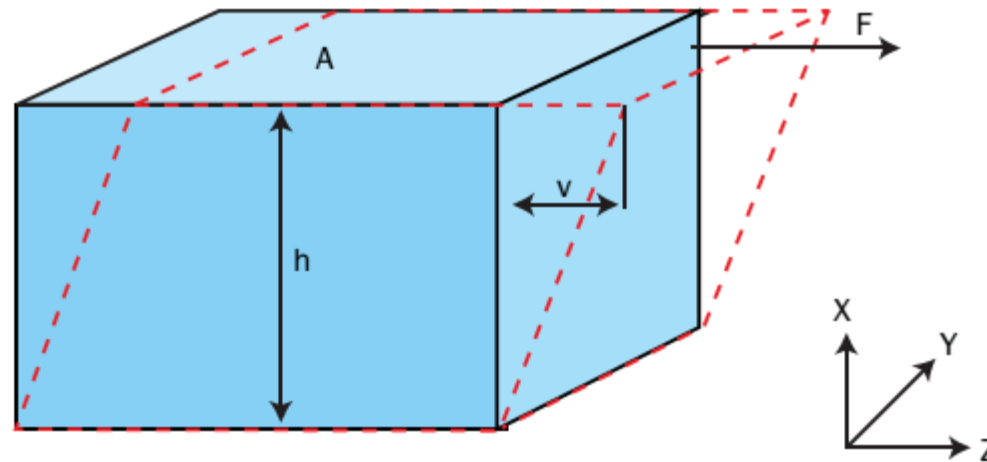


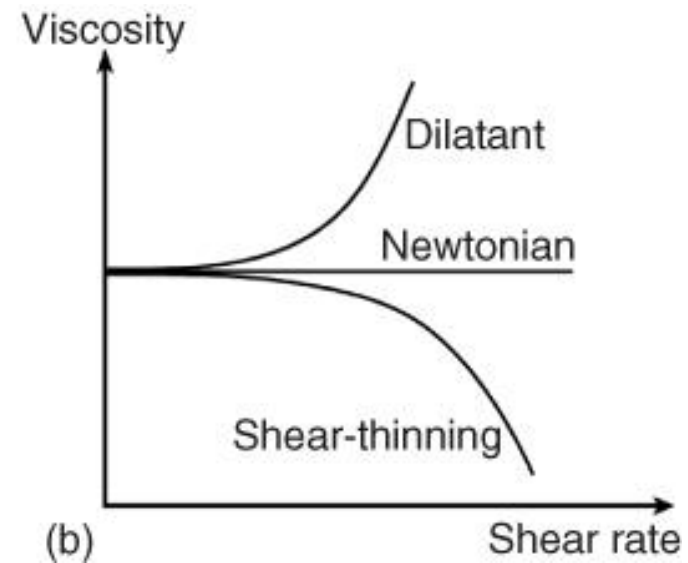
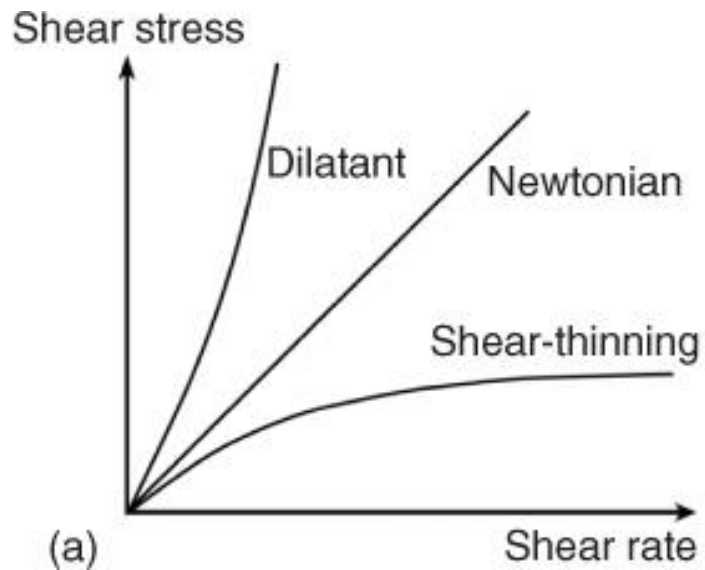
Figure 1.11 The definition of polymer melt viscosity, illustrated by a simple shear flow

سیال نیوتنی و غیر نیوتنی

برای سیالات نیوتنی مانند آب، ویسکوزیته به دما بستگی دارد و به نرخ برش وابسته نیست در حالیکه در سیالات غیرنیوتنی مانند مذاب پلاستیک ویسکوزیته به نرخ برش نیز وابسته است.

رفتار Shear-thinning

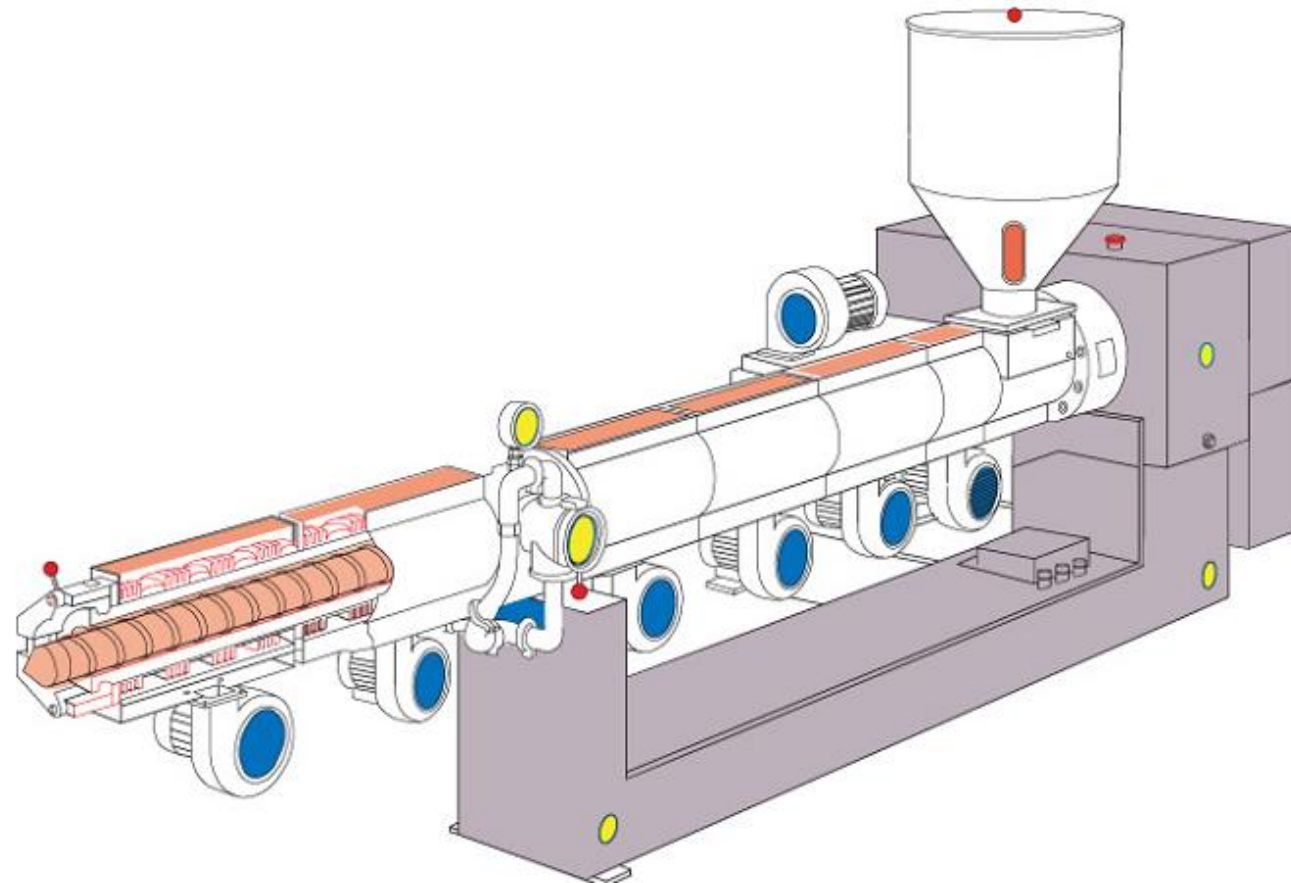
وقتی یک مذاب پلیمری تغییر شکل می یابد، نوعی آزاد شدن و لغزش زنجیره ها روی همدیگر اتفاق افتاده و زنجیره ها در جهت تنش اعمالی قرار می گیرند. در نتیجه تغییر شکل، مقاومت مذاب پلیمری در مقابل جریان کاهش می یابد.



اکستروژن

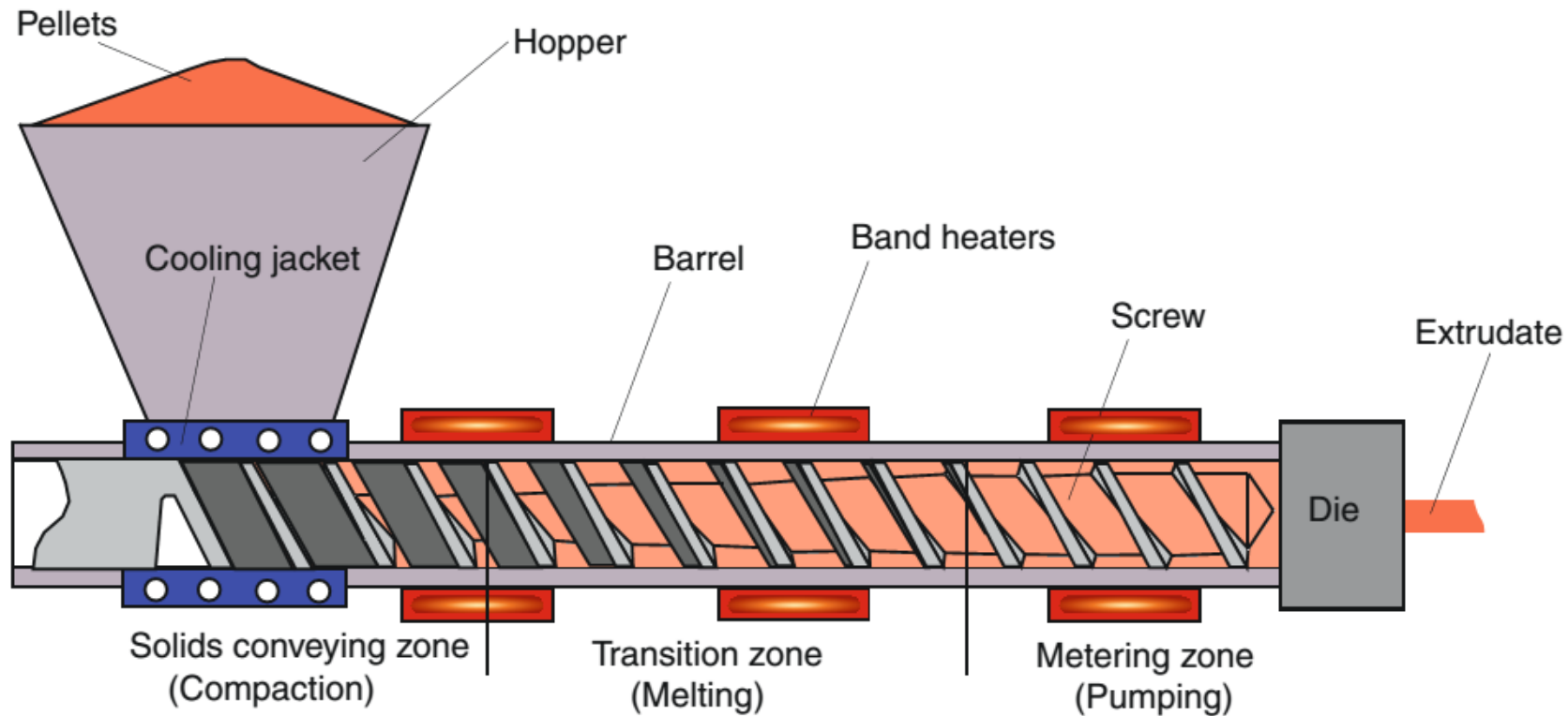
- در طول فرآیند اکستروژن یک مذاب پلیمری از میان یک قالب با شکل خاصی پمپ شده و یک پروفیل خاصی شکل می گیرد.
- این پروفیل می تواند یک صفحه، فیلم، تیوب یا هر سطح مقطع دیگری باشد.
- هرچند هر دو نوع اکسترودر پیچی و سیلندر-پیستونی برای اکستروژن پلیمرها استفاده می شوند اما اصول آنها کاملاً با هم متفاوت دارد.
- امروزه استفاده از اکسترودر های پیچی بسیار رایج تر است.

نمای شماتیک اکسترودر تک مارپیچه



اکسترودر پلاستیک سازی (Plasticating Extruder)

اکسترودرهای تولید محصولات پلاستیکی تک مارپیچه رایج ترین وسیله در صنعت پلاستیک سازی است. □



نواحی مختلف دستگاه اکسترودر

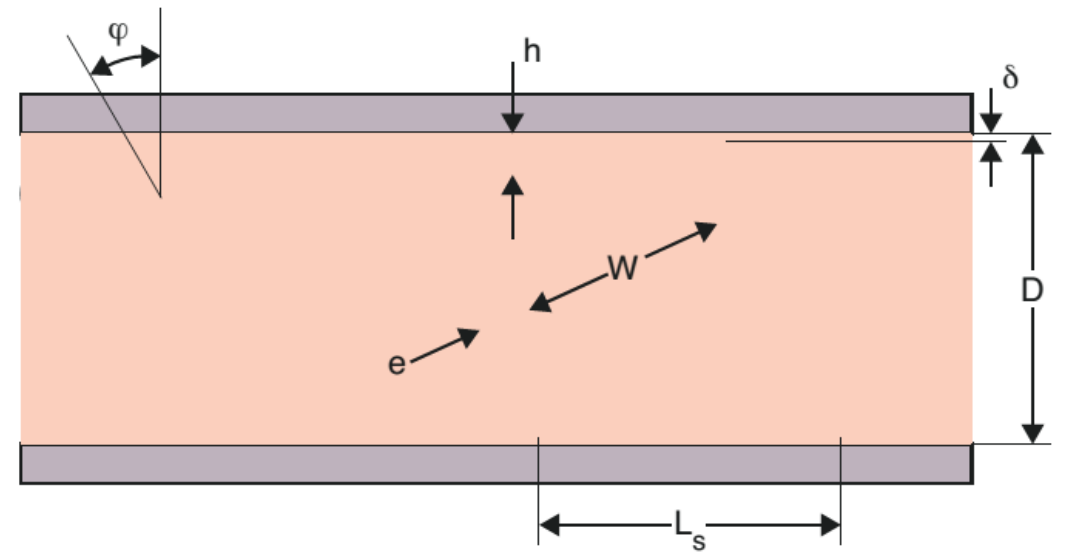
1. ناحیه تغذیه مواد جامد پلیمری
2. ناحیه ذوب یا انتقال
3. ناحیه پمپ

روند کار اکسترودر

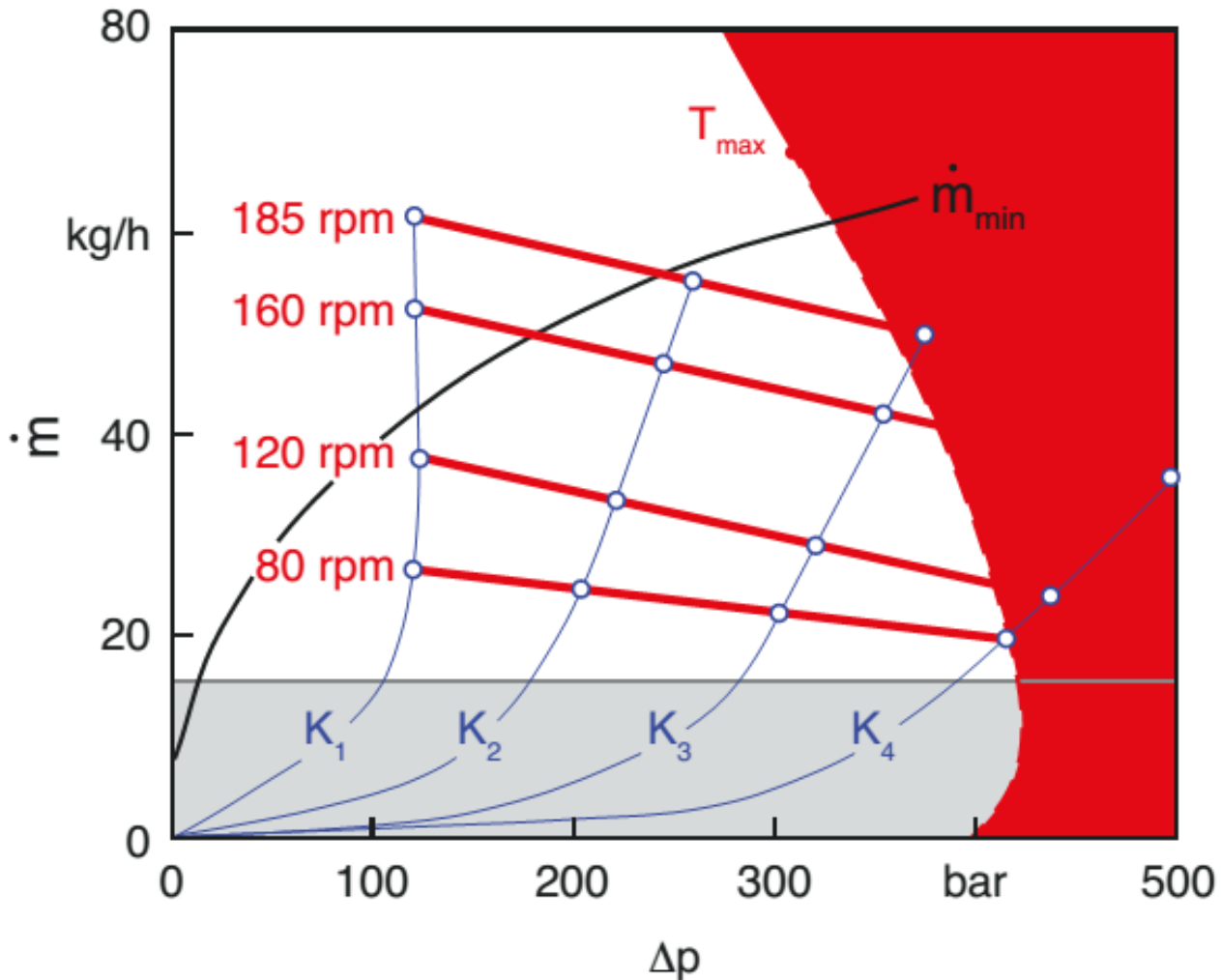
1. انتقال مواد جامد پلیمری از قیف به محفظه مارپیچ
2. فشردن مواد جامد و انتقال آنها به قسمت پایین تر محفظه
3. ذوب کردن مواد جامد پلیمری
4. مخلوط مواد پلیمری بصورت همگن
5. پمپ کردن مذاب پلیمری از میان یک دای

L/D	Length to diameter ratio 20 or less for feeding or melt extruders 25 for blow molding, film blowing, and injection molding 30 or higher for vented extruders or high output extruders
D	Standard diameter
US (inches)	0.75, 1.0, 1.5, 2, 2.5, 3.5, 4.5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, and 24
Europe (mm)	20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, and 600
Φ	Helix angle 17.65° for a square pitch screw where $L_s = D$ New trend: $0.8 < L_s/D < 1.2$
h	Channel depth in the metering section (0.05–0.07) D for $D < 30$ mm (0.02–0.05) D for $D > 30$ mm
β	Compression ratio: $h_{\text{feed}} = \beta h$ 2 to 4
δ	Clearance between the screw flight and the barrel 0.1 mm for $D < 30$ mm 0.15 mm for $D > 30$ mm
N	Screw speed 1–2 rev/s (60–120 rpm) for large extruders 1–5 rev/s (60–300 rpm) for small extruders
V_b	Barrel velocity (relative to screw speed) = πDN 0.5 m/s for most polymers 0.2 m/s for unplasticized PVC 1.0 m/s for LDPE

مشخصات یک اکسترودر



منحنی مشخصه ماریچ و قالب با ماریچ با قطر ۴۵ میلیمتر برای پلی اتیلن



□ منحنی های مشخصه قالب k_1, k_2, k_3, k_4 است.

K_1 : قالب با مقاومت کم، مثلاً برای صفحات ضخیم.

K_4 : قالب با مقاومت بالا مثلاً برای تولید فیلم ها.

□ **نقطه تخلیه باز:** حداکثر خروجی با حداکثر افت فشار. این حالت برای موقعی است که قالب وجود ندارد.

□ **نقطه تخلیه بسته:** خروجی صفر و افت فشار حداقل. برای حالتی است که اکسترودر بسته است.

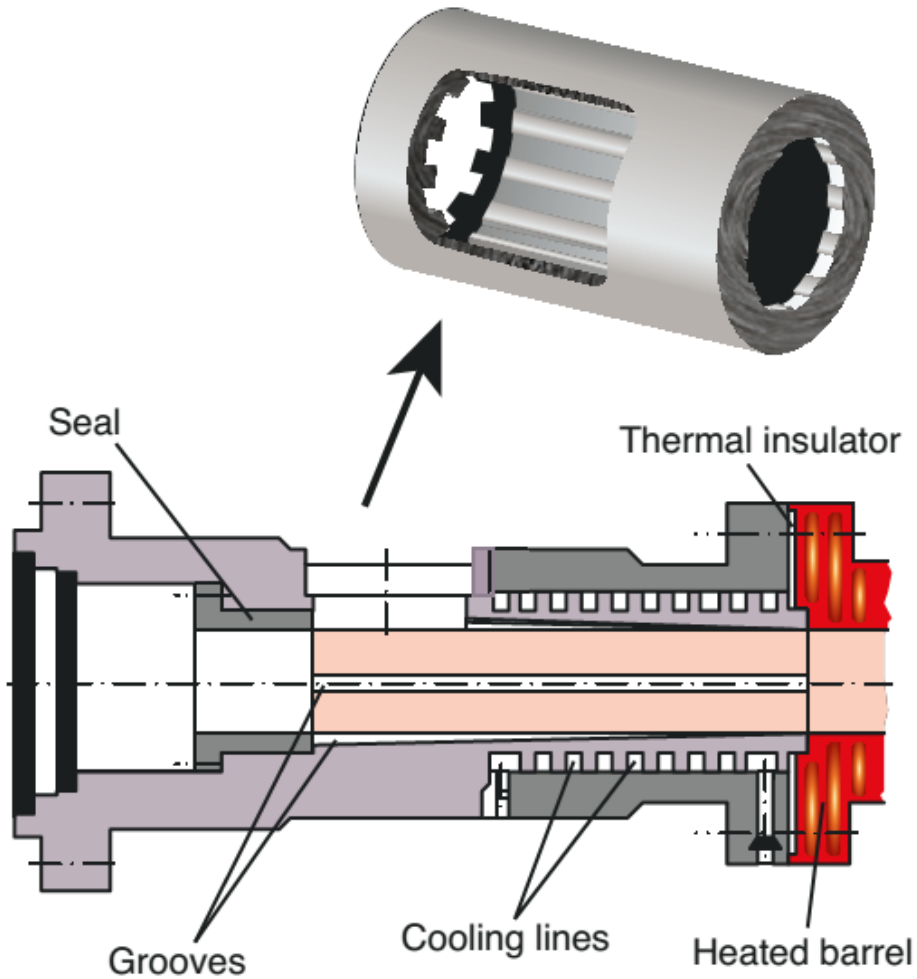
خط ناحیه قرمز بیشینه دمای قابل تنظیم است.

□ خط مشکی بیانگر خروجی مورد نیاز برای یک سیستم مقرون به صرفه است.

ناحیه انتقال مواد جامد

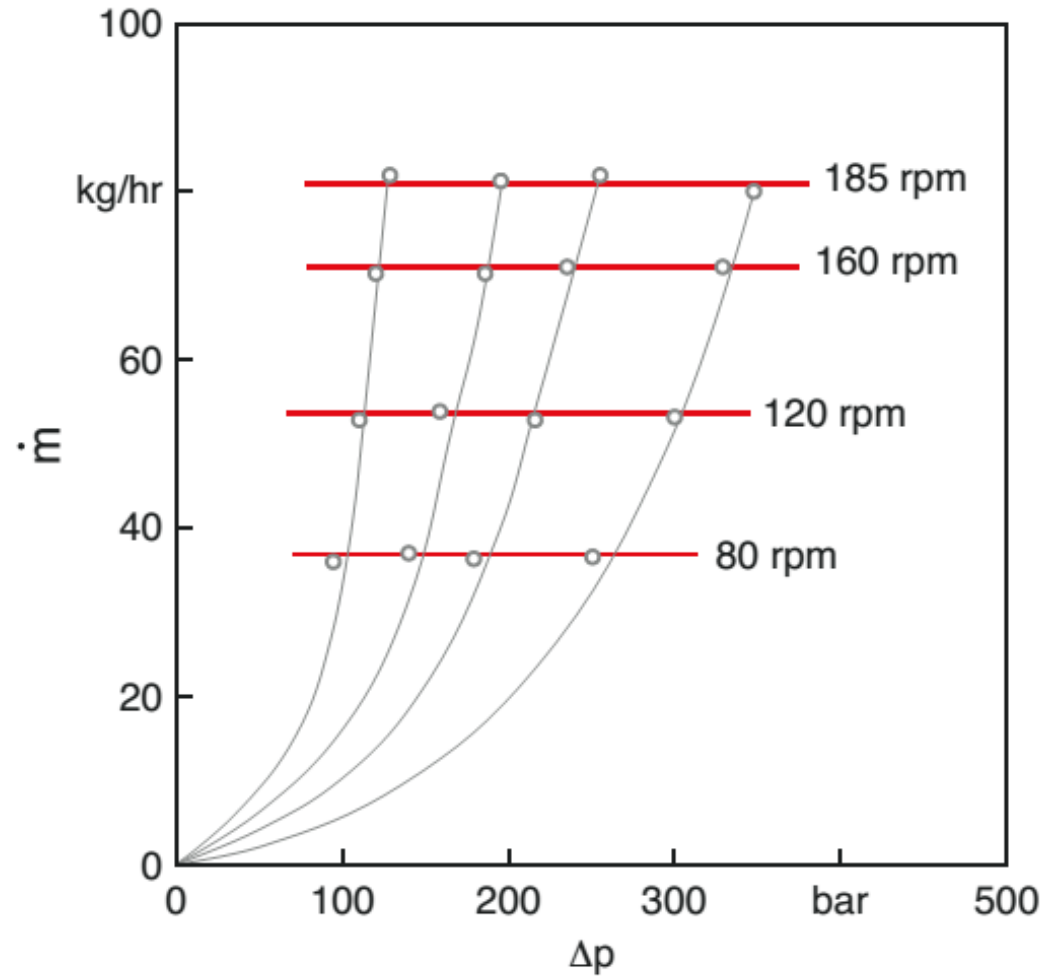
- وظیفه این قسمت انتقال مواد جامد پلیمری از قیف به کانال ماریپچ است.
- به محض رسیدن ماده به کانال، آن فشرده شده و به پایین کانال منتقل می شود.
- به خاطر وجود اصطکاک محفظه کانال، سرعت چرخش مواد پلیمری کمتر از سرعت چرخشی ماریپچ است و در نتیجه باعث لغزش مواد در جهت محوری می شود. این اصطکاک برای حرکت رو به جلو مواد پلاستیکی لازم است.
- برای حفظ ضریب اصطکاک بالا بین محفظه و پلیمر قسمت تغزیه باید خنک شود که این کار با آب خنک انجام می شود.

نمای شماتیک قسمت تغزیه شیار دار اکسترودر تک ماریچه



- شیار دار کردن در راستای محوری باعث افزایش اصطکاک می شود.
- برای جلوگیری از ایجاد فشار اضافی که می تواند منجر به شکست ماریچه یا محفظه شود، طول شیارها نباید بیشتر از ۳.۵ برابر قطر ماریچه باشد.

منحنی های مشخصه مارپیچ و قالب برای یک اکسترودر تغزیه شیار دار با قطر ۴۵ میلیمتر برای پلی اتیلن



بی بعد کردن پارامترها برای مقایسه نمودارها

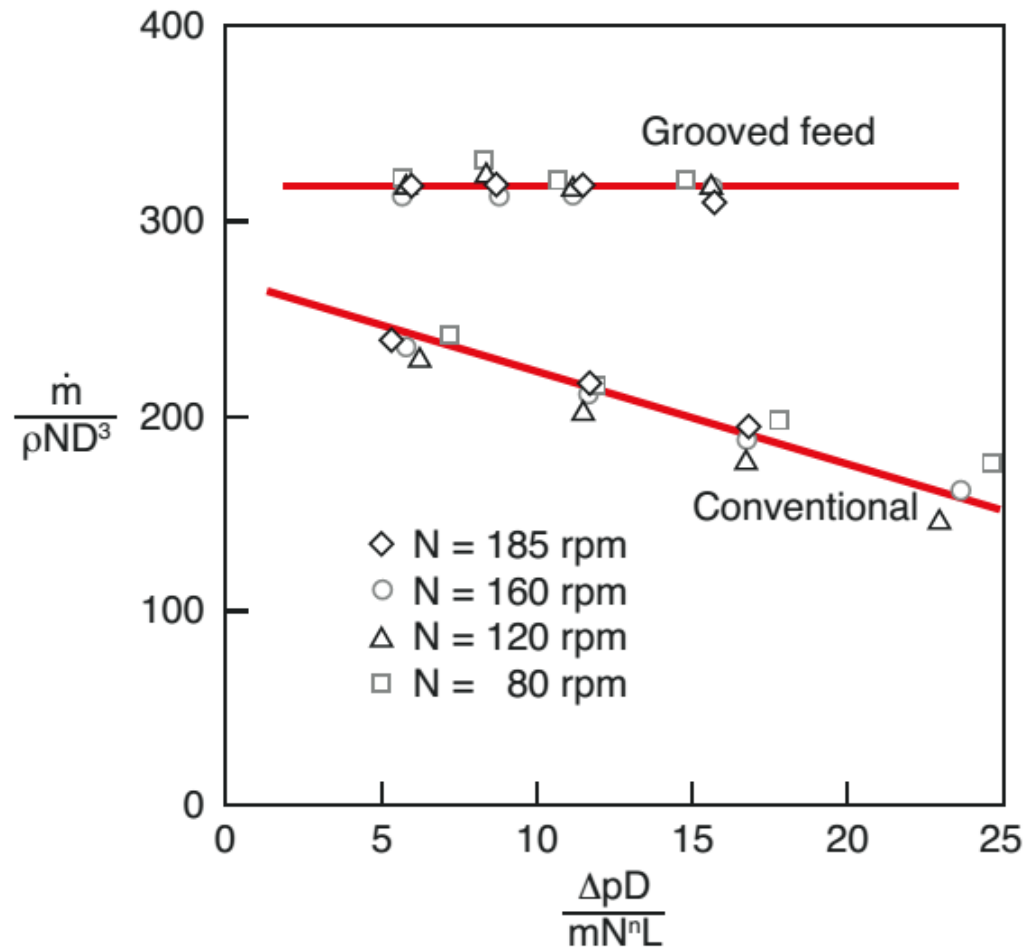
L بیان کننده طول کل کانال برای اکسترودر 25L/D .
زاویه ϕ را فرض میگیریم ۱۷.۶۵ درجه است.

$$\hat{m} = \frac{\dot{m}}{\rho N D^3}$$

$$\Delta \hat{p} = \frac{\Delta p D}{m N^n L_c}$$

$$L_c = \frac{25D}{\sin(\phi)}$$

منحنی مشخصه بی بعد برای اکسترودر با تغزیه معمولی و شیاردار



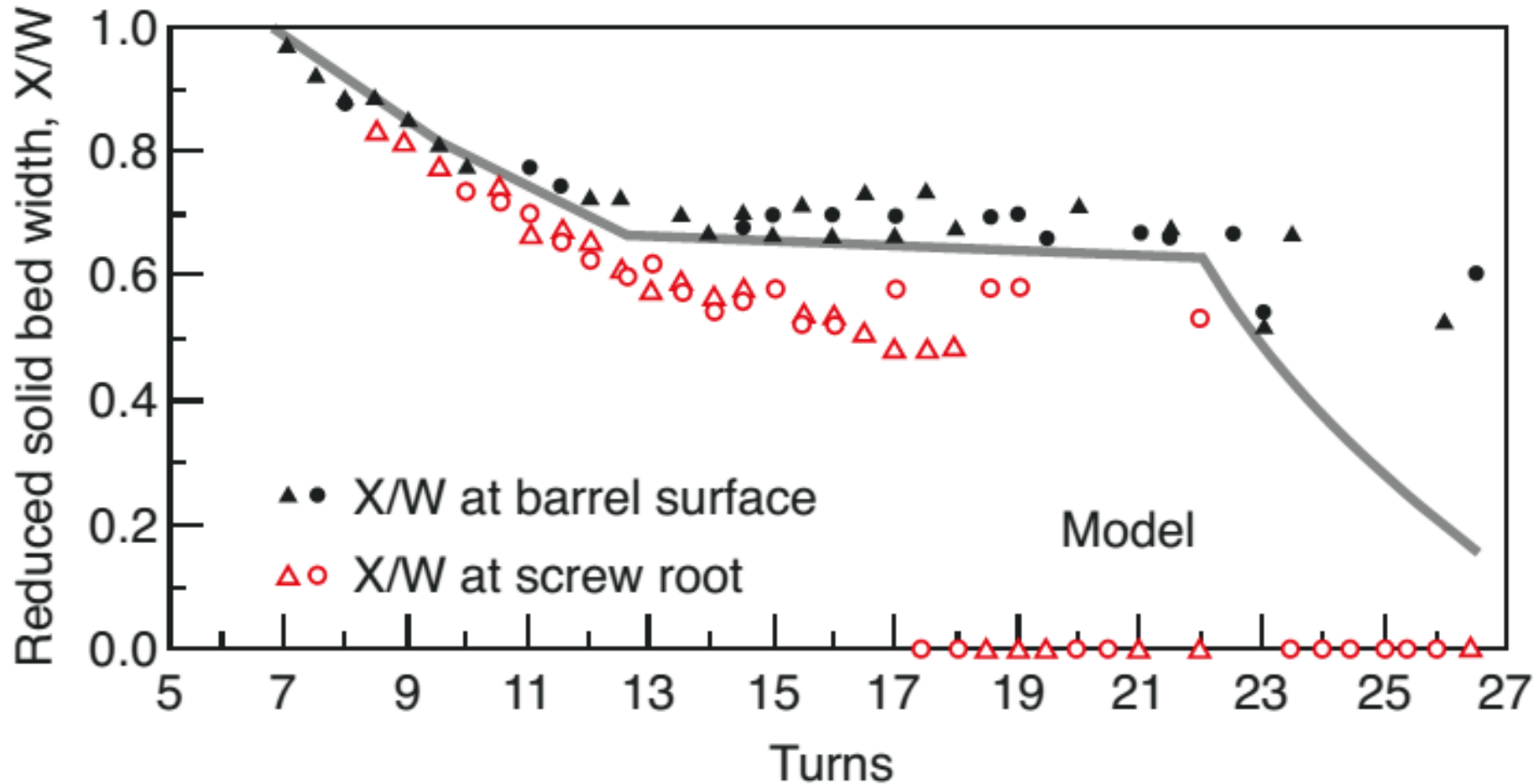
ناحیه ذوب

□ در این ناحیه مواد پلیمری ذوب می شوند. طول این ناحیه تابع خواص مواد، هندسه مارپیچ و شرایط فرآوری است.

ناحیه ذوب

- مواد جامد در مقابل پره جلویی مارپیچ هل داده می شوند، بطوریکه مذاب پلیمری تازه توسط حرکت نسبی بین بستر جامد سطح محفظه از فیلم مذاب به استخر مذاب تبدیل می شود.
- مکان شروع و خاتمه مذاب هنگام طراحی مارپیچ برای کاربرد خاص اهمیت پیدا می کند.

پروفیل بستر جامد برای فراوری LDPE در دو حال آزمایشگاهی و پیش بینی شده با مدل Tadmor



پارامترهای اکسترودر، شرایط فرآوری و خواص ماده برای شکل اسلاید قبل

Extruder Geometry:

Square pitch screw, $D = 63.5$ mm, $L/D = 26.5$, $W = 54.16$ mm

Feed zone - 12.5 turns $h_1 = 9.4$ mm

Transition zone - 9.5 turns $h_1 = 9.4$ mm $h_2 = 3.23$ mm

Metering zone - 4.5 turns $h_2 = 3.23$ mm

Processing Conditions:

$T_0 = 24$ °C $T_b = 149$ °C $N = 60$ rpm $\Delta p = 204$ bar $\dot{m} = 61.8$ kg/h

Material properties (LDPE):

Viscosity: $n = 0.345$ $a = 0.01$ °C⁻¹ $m_0 = 5.6 \times 10^4$ Pa-sⁿ $T_m = 110$ °C

Thermal:

$k_m = 0.1817$ W/m°C $C_m = 2.596$ kJ/kg°C $C_s = 2.763$ kJ/kg°C

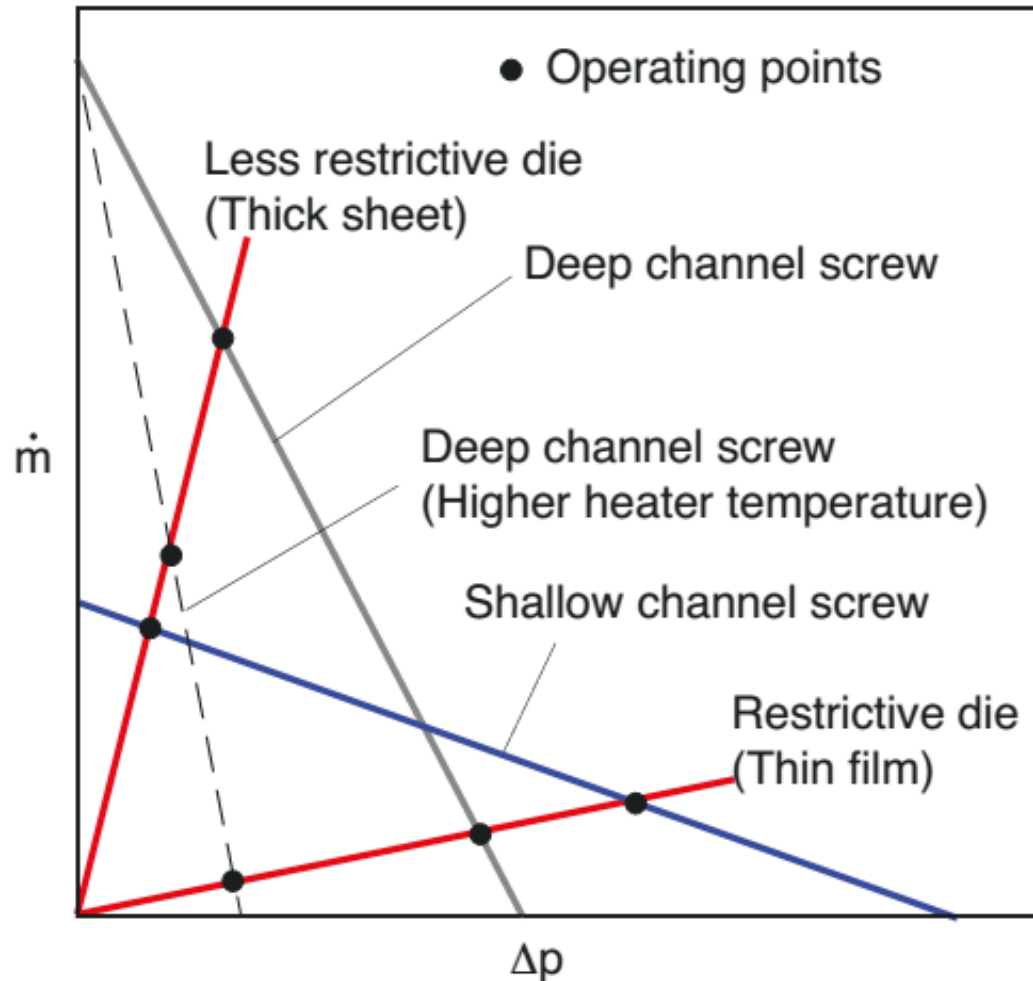
$\rho_{\text{bulk}} = 595$ kg/m³ $\rho_s = 915.1$ kg/m³ $\rho_m = 852.7 + 5.018 \times 10^{-7}p - 0.4756 T$

$\lambda = 129.8$ kJ/kg

ناحیه اندازه گیری (مترینگ) یا ناحیه پمپ کردن

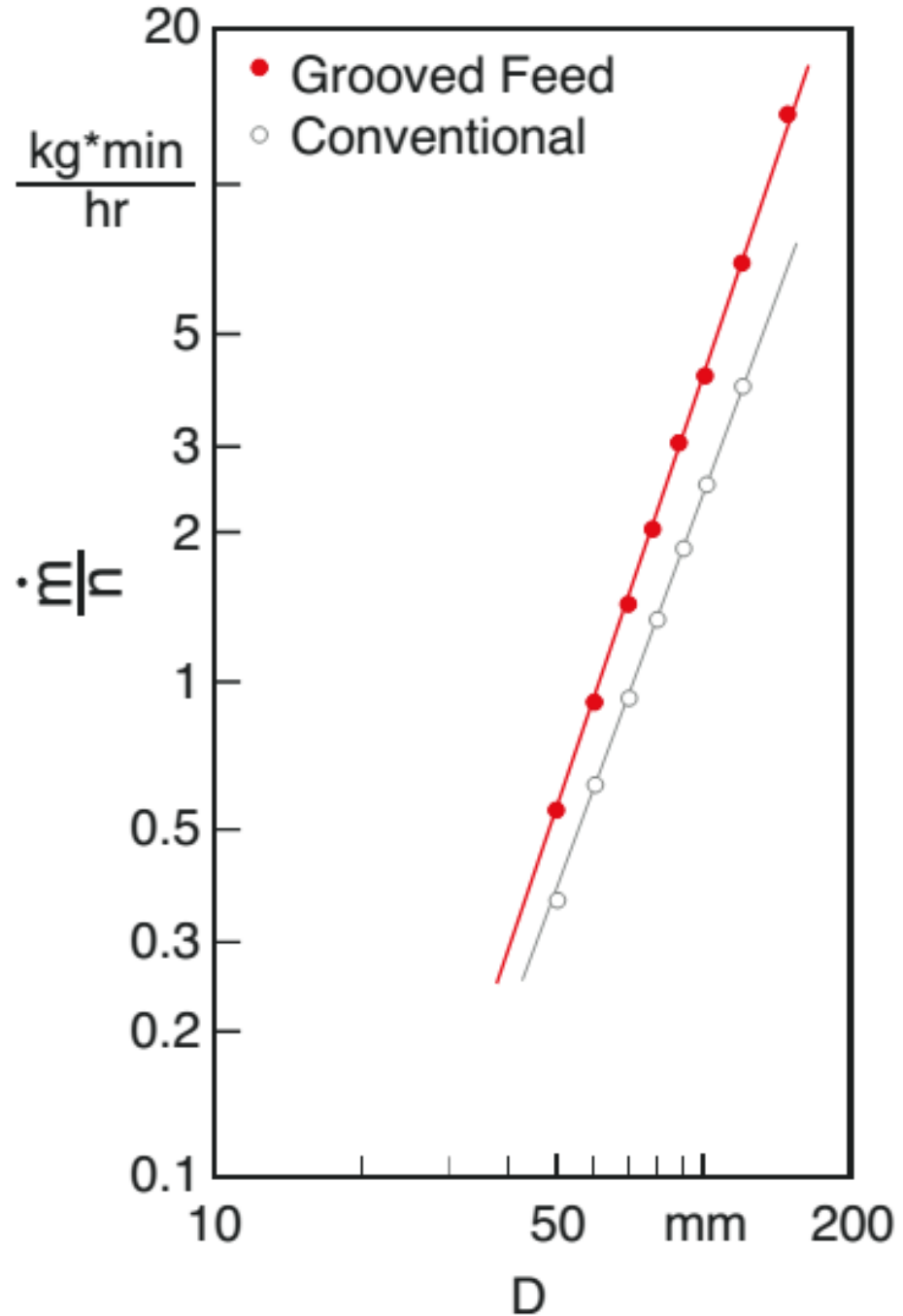
- ناحیه اندازه گیری مهمترین ناحیه اکسترودر است و فشار کافی برای پمپاژ مذاب را فراهم می کند.
- قابلیت پمپاژ در بخش اندازه گیری یک اکسترودر تک مارپیچه با حل کردن معادله حرکت با قوانین مناسب تخمین زده می شود.

منحنی های مشخصه برای یک سیال نیوتنی



□ شکل اثر عمق کانال را روی منحنی مشخصه مارپیچ نشان می دهد. یک قالب اکستروژن با مقاومت بالا (ورقهای نازک) با مارپیچ کم عمق بهتر کار می کند و یک قالب با مقاومت کمتر با مارپیچ با عمق بیشتر دارای بهره وری بیشتری است.

خروجی برای اکسترودر با تغذیه معمولی و شیاردار



آنالیز ترمودینامیکی اکستروژن پلیمر

□ تعادل انرژی برای اکستروژن پلیمر در شکل زیر آمده است.

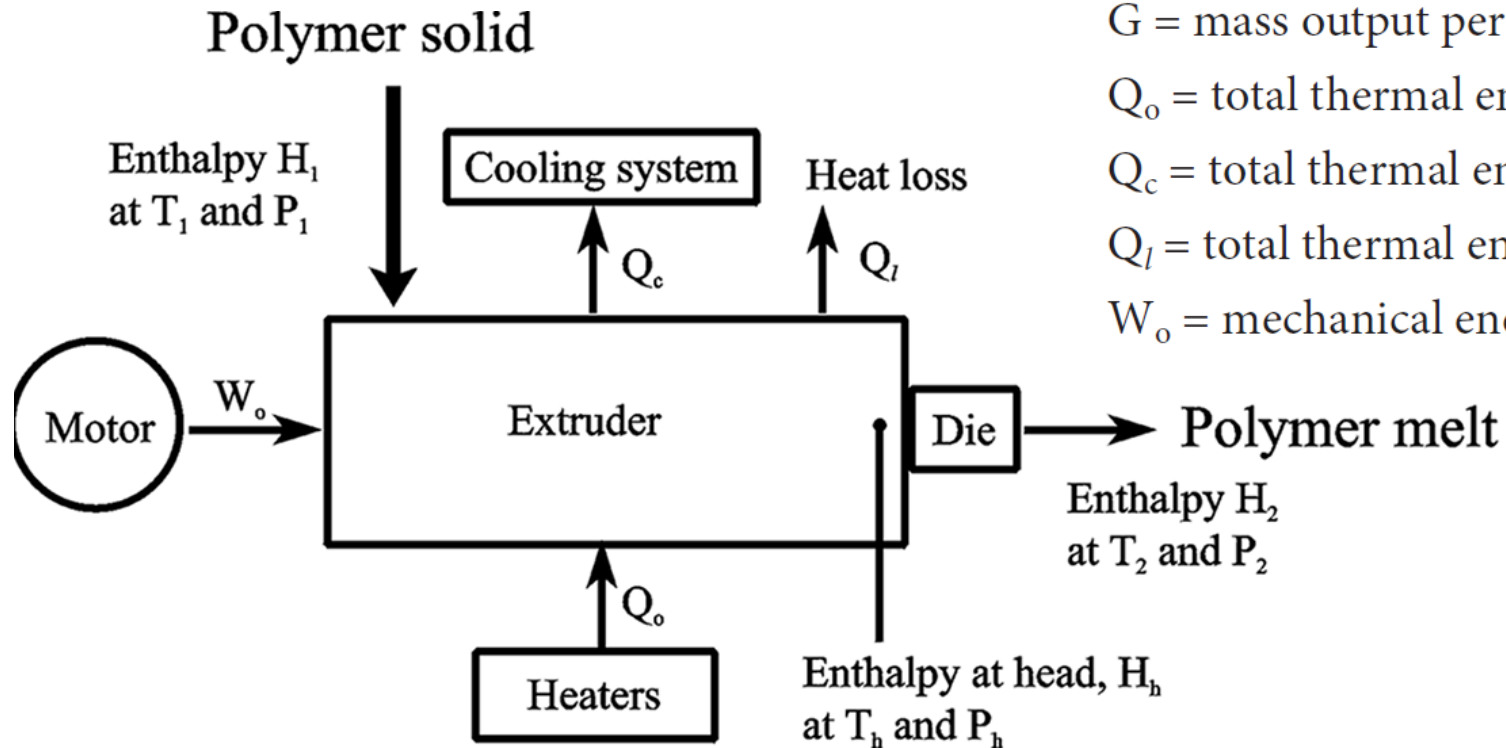
G = mass output per unit time = mass output rate

Q_o = total thermal energy input by the heaters per unit time

Q_c = total thermal energy removed by cooling per unit time

Q_l = total thermal energy loss into surrounding per unit time

W_o = mechanical energy input by the motor per unit time = motor power



آنالیز ترمودینامیکی اکستروژن پلیمر

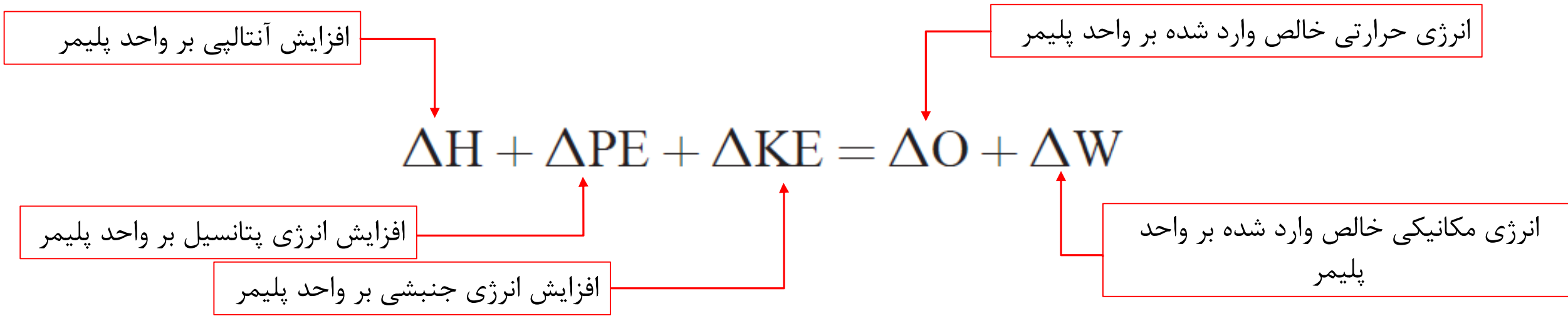
- قانون اول ترمودینامیک، که قانون بقاء انرژی نام دارد، باید در اکستروژن نیز وجود داشته باشد.
- انرژی مورد نیاز برای عملیات اکستروژن پلیمرها توسط موتور و هیترهای محفظه تامین می شود.
- درصد کمی از انرژی موتور که قابل چشم پوشی است از طریق سیستم انتقال قدرت، کوپلینگ و جعبه دنده هدر می رود.
- بیشتر انرژی مکانیکی (W_0) موتور که صرف گردش مارپیچ می شود توسط تنشهای برشی وارده به مذاب پلیمری به گرما تبدیل می شود.
- بخش خیلی کمی از انرژی مکانیکی برای فشرده کردن تغذیه پلیمری مصرف می شود تا فشار مذاب پلیمری را افزایش دهد.
- فشار مذاب تولید شده در انتهای محفظه اکسترودر با خارج شدن مذاب از درون دای به فشار محیط افت می کند و این انرژی مکانیکی به گرما تبدیل می شود. تقریباً همه انرژی مکانیکی به گرما تبدیل می شود.

آنالیز ترمودینامیکی اکستروژن پلیمر

- گرمای تولید شده در مذاب منبع اصلی گرمای مورد نیاز برای ذوب کردن تغذیه پلیمری است.
- انرژی گرمایی تولید شده توسط هیترها (Q_0) به مواد پلیمری داخل محفظه منتقل می شود تا مواد پلیمری را ذوب کند.
- وقتی دمای محفظه بیش از حد افزایش یافت، سیستم خنک کاری مقداری از گرما (Q_c) را هدر می دهد.
- مقدار قابل توجهی از گرما (Q_1) از طریق محفظه و شافت مارپیچ هدر می رود.
- تعادل انرژی های مکانیکی و حرارتی برابر است با گرمای افزایش یافته پلیمر از دمای تغذیه تا دمای ذوب.

آنالیز ترمودینامیکی اکستروژن پلیمر

- مطابق شکل سه اسلاید قبل، پلیمر جامد با دمای $T1$ ، فشار $P1$ و آنتالپی $H1$ وارد اکسترودر شده و مذاب پلیمری با دمای $T2$ ، فشار $P2$ و آنتالپی $H2$ از اکسترودر خارج می شود.
- آنتالپی تابع دما و فشار است. در دمای ثابت با افزایش فشار آنتالپی افزایش می یابد.
- قانون بقاء انرژی برای واحد جرم پلیمر بصورت زیر است.



آنالیز ترمودینامیکی اکستروژن پلیمر

□ به دلیل اینکه ΔPE و ΔKE در مقایسه با ΔH قابل چشم پوشی هستند داریم:

$$\Delta H = \Delta Q + \Delta W$$

□ از طرفی داریم:

$$\Delta Q = (Q_o - Q_c - Q_1)/G$$

□ با نادیده گرفتن افت انرژی مکانیکی داریم:

$$\Delta W = W_o/G$$

آنالیز ترمودینامیکی اکستروژن پلیمر

□ با ترکیب معادلات قبل، توان مورد نیاز موتور بصورت زیر بدست می آید:

$$W_o = G \cdot \Delta H - (Q_o - Q_c - Q_l)$$

□ عملیات آدیاباتیک داریم:

$$\Delta Q = (Q_o - Q_c - Q_l) = 0$$

□ از اینرو توان تئوری موتور در عملیات آدیاباتیک بصورت زیر بدست می آید:

$$W_o^* = G \cdot \Delta H$$

آنالیز ترمودینامیکی اکستروژن پلیمر

□ بیشتر اکسترودرهای مدرن در دوره‌های بالا کار می‌کنند که تولید گرمای اضافه کرده و نیاز به خنک کاری دارند. بنابراین توان مورد نیاز موتور نسبت به آنچه قبلاً محاسبه شد باید بیشتر باشد.

□ راندمان انرژی مکانیکی یک اکسترودر بصورت نسبت توان تئوری موتور در یک عملیات آدیاباتیک، W_o^* ، به توان واقعی موتور، W_o ، تعریف می‌شود:

$$\% \text{ Mechanical energy efficiency} = 100 \cdot \left[\frac{(W_o^*)}{(W_o)} \right]$$

□ بنابراین توان واقعی موتور از حاصلضرب راندمان موتور در توان تئوری موتور به دست می‌آید.

□ راندمان انرژی مکانیکی یک موتور به دو صورت بیان می‌شود: ۱- خروجی پلیمر تولید شده به انرژی مصرف شده (G/W_o) که واحد آن kg/kW-h است. ۲- انرژی موتور مصرف شده به پلیمر خروجی (W_o/G)

آنالیز ترمودینامیکی اکستروژن پلیمر

- ❑ عملیات آدیاباتیک ماکزیمم راندمان انرژی مکانیکی را سرعت بالای اسکرو می دهد و حداقل توان موتور را مصرف می کند.
- ❑ مواد پلیمری برای اینکه از دمای اتاق تا دمای ذوب خود (حدود ۱۷۵ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد) برسند به حدود ۹۵ تا ۱۶۵ کیلوکالری به ازای هر کیلوگرم نیاز دارند. بنابراین حداکثر راندمان انرژی مکانیکی حدودا بین ۵ تا ۹ کیلوگرم بر کیلووات ساعت می باشد.
- ❑ راندمان انرژی مکانیکی اکستروژن های مدرن در سرعت بالای مارپیچ بطور قابل توجهی کمتر از مقادیر بالا است (تقریبا ۴۰ درصد).
- ❑ راندمان انرژی مکانیکی در سرعت پایین مارپیچ به دلیل اینکه هیترها به پلیمر گرما می دهند می تواند بالاتر از مقادیر بالا باشد.
- ❑ پلیمرهای بلورین نسبت به پلیمرهای آمورف انرژی بیشتری نیاز دارند بنابراین راندمان انرژی مکانیکی کمتری دارند.

آنالیز ترمودینامیکی اکستروژن پلیمر

□ فشار مذاب در انتهای مارپیچ قبل از هد قالب معمولاً بین ۵ تا ۴۰ مگاپاسکال می باشد. وقتی مذاب از هد خارج می شود، فشار آن به فشار نسبی صفر می رسد.

□ اگر هیچ تبادل گرمایی بین قالب و مذاب وجود نداشته باشد، آنتالپی مذاب، H_h ، در دمای T_h و فشار P_h باید مساوی با آنتالپی مذاب خارج شده از قالب، H_2 ، در دمای T_2 و فشار P_2 باشد.

□ افت فشار از P_h به P_2 به گرما تبدیل شده و دمای مذاب را از T_h به T_2 افزایش می دهد.

□ با فرض عدم تبادل انرژی بین مذاب و قالب، و چشم پوشی از فشردگی مذاب، $\Delta V = 0$ ، افزایش دمای مذاب از طریق قالب بصورت زیر بدست می آید:

$$\Delta V = 0 \quad C_p = C_v$$

$$\Delta H = \Delta E + \Delta(P \cdot V) = \Delta E + V \cdot \Delta P + P \cdot \Delta V = \Delta E + V \cdot \Delta P = 0 \quad \longrightarrow \quad \Delta T = (T_2 - T_h) = \frac{V \cdot (P_h - P_2)}{C_p}$$

← حجم مخصوص

$$\Delta E = -V \cdot \Delta P = -V \cdot (P_2 - P_h) = V \cdot (P_h - P_2) = C_v \cdot \Delta T = C_p \cdot (T_2 - T_h)$$

مثال ۱

□ نرخ خروجی هدف یک لوله از جنس پلی اتیلن چگالی بالا ۵۰۰ کیلوگرم بر ساعت است. تغذیه پلیمر در دمای اتاق بوده دمای مذاب مورد نظر ۲۳۰ درجه سانتیگراد است. حداقل اندازه موتور اکسترودر با بازدهی انرژی مکانیکی ۷۰٪ را محاسبه کنید.

$$G = 500 \text{ kg/h (1,101 lb/h)}$$

$$\Delta H = (280 \text{ Btu/lb at } 230 \text{ }^\circ\text{C}) - (0 \text{ Btu/lb at RT}) = 280 \text{ Btu/lb}$$

$$\begin{aligned} W_o^* &= G \cdot \Delta H = 1,101 \text{ lb/h} \times 280 \text{ Btu/lb} = 308,280 \text{ Btu/h} \\ &= (308,280 \text{ Btu/h}) \div [2,544 \text{ Btu/(HP-h)}] = 121 \text{ HP} \end{aligned}$$

حل:

$$W_o = (W_o^*) \cdot [100/(\% \text{ Mechanical energy efficiency})] = 121 \text{ HP} \times (100/70) = 173 \text{ HP}$$

مثال ۲

□ افزایش دمای مذاب که فشار آن از ۶۸ اتمسفر (۶/۸۹ مگاپاسکال) در قالب تا فشار اتمسفر در بیرون قالب افت کرده را محاسبه کنید.

حل:

$$C_p = 2.72 \text{ J/g-C (0.65 cal/g-C)}$$

$$V = 10^{-6} \text{ m}^3/\text{g (1 cc/g)}$$

$$V \cdot (P_h - P_2) = 10^{-6} \text{ m}^3/\text{g} \times (6.89 \times 10^6 - 0) \text{ N/m}^2 = 6.89 \text{ N-m/g or J/g}$$

$$\Delta T = [V \cdot (P_h - P_2)] / C_p = 6.89 \text{ J/g} \div 2.72 \text{ J/g-C} = 2.5 \text{ }^\circ\text{C (4.5 }^\circ\text{F)}$$

انواع وسایل اختلاط

1. میکسرهای داخلی (Internal batch mixers)

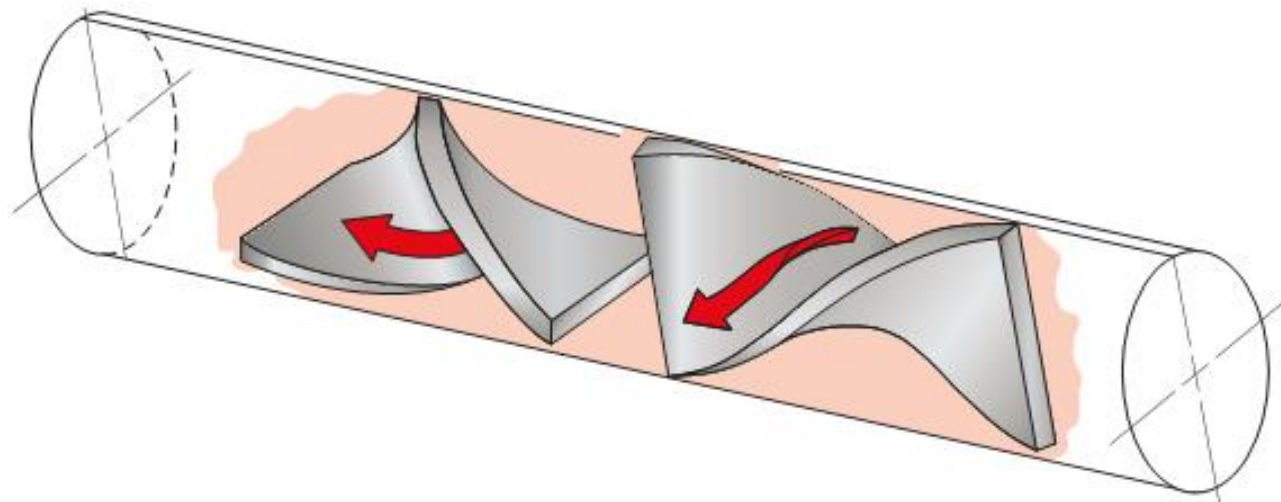
- میکسرهای داخلی مانند بنبوری ها، قدیمی ترین نوع وسایل اختلاط پلیمرها هستند و هنوز بطور گسترده در صنعت لاستیک سازی مورد استفاده قرار می گیرند.

2. میکسرهای پیوسته (Continuous mixers)

- در صنعت اغلب از میکسرهای پیوسته استفاده می شود، مانند اکسترودرهای تک مارپیچه و دو مارپیچه.

میکسره‌های استاتیک

□ میکسره‌های استاتیک یا میکسره‌های بی حرکت، وسایل اختلاطی تحت فشار هستند که از طریق آن مذاب پمپ می شود، و منجر به اختلاط موثر شده بدون اینکه نیاز به قطعات متحرک و غیره باشد.



ادامه

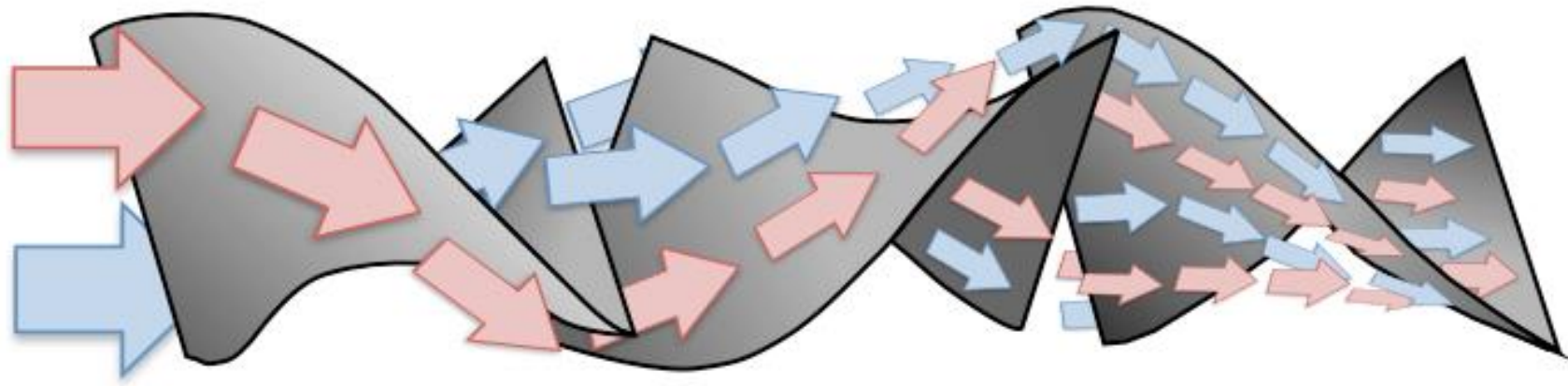
□ همانطور که سیال می چرخد، فصل مشترک بین سیالات افزایش می یابد. به محض اینکه ماده وارد بخش جدید می شود، فصل مشترک ۹۰ درجه تغییر مسیر می دهد.

□ توالی کشش-تغییرجهت تا جایی تکرار می شود که تعداد شیارها آنقدر زیاد شود که ترکیب همگن به نظر آید. تعداد شیارها از یک بخش به بخش دیگر بصورت ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۶، ۳۲ و ... افزایش می یابد:

$$N = 2^n$$

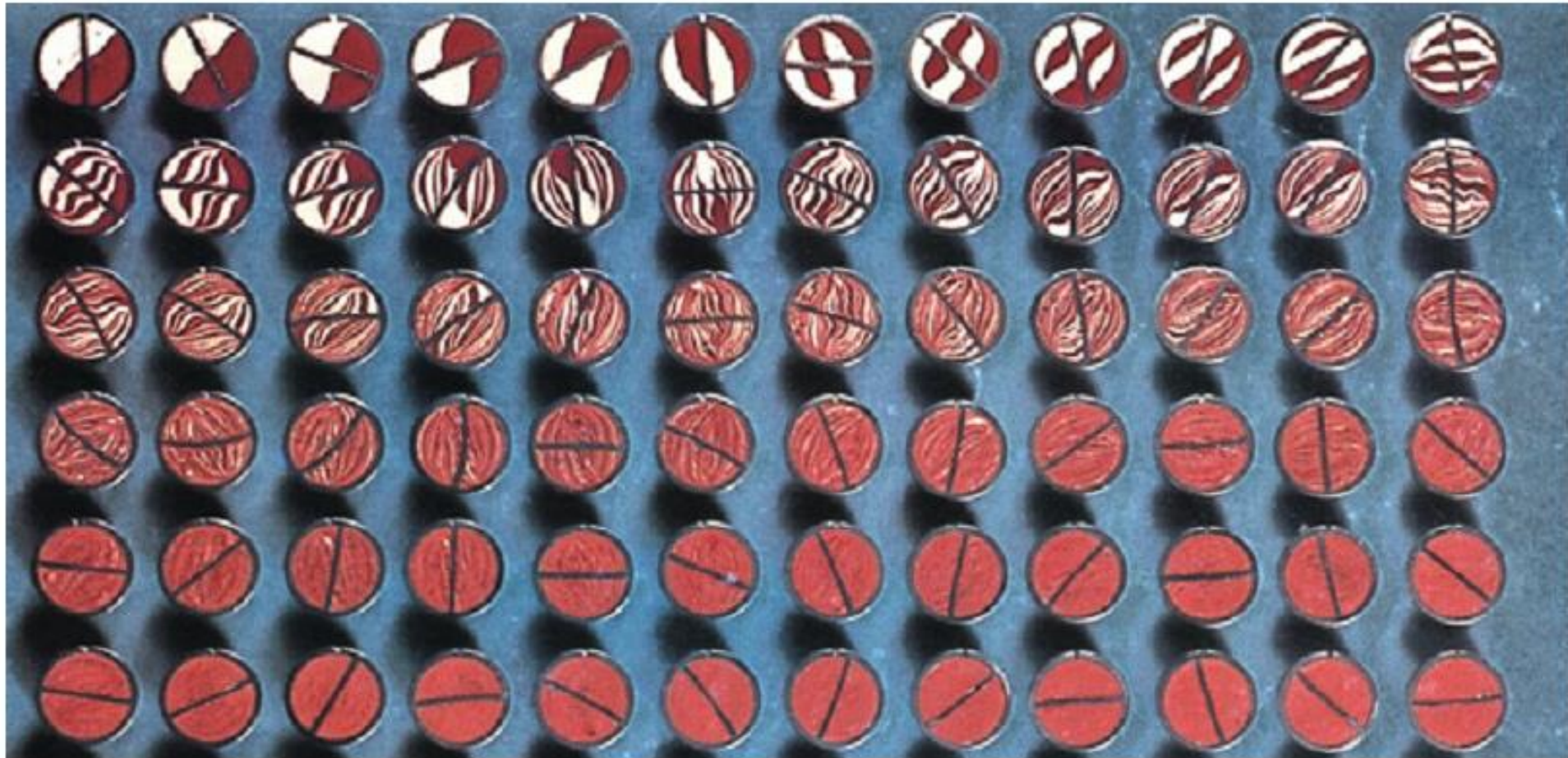
where N is the number of striations and n is the number of sections in the mixer.

رابطه تعداد شیار با تعداد بخش



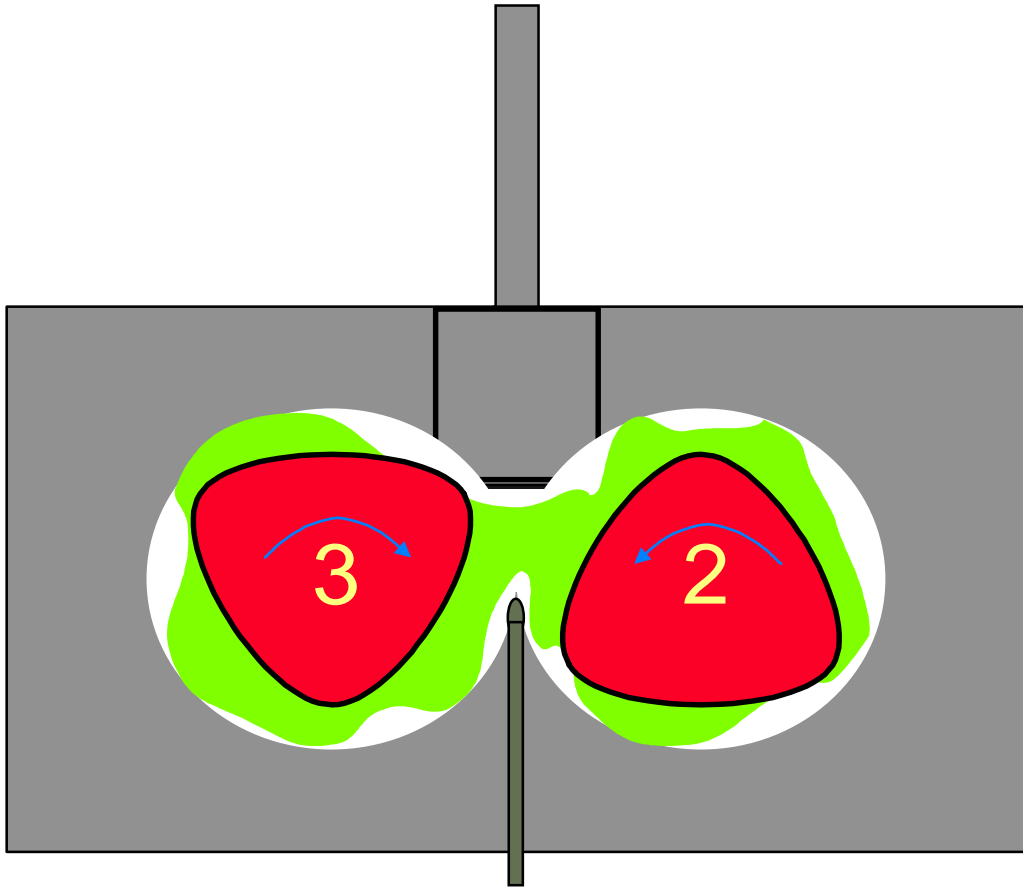
Flow Division

پیشرفت آزمایشگاهی لایه های رزین های رنگی درون میکسر استاتیک



میکسر آزمایشگاهی

□ تحت برش قرار دادن نمونه مورد آزمایش در یک محفظه اختلاط گرم با روتورهای ناهمسوگرد.

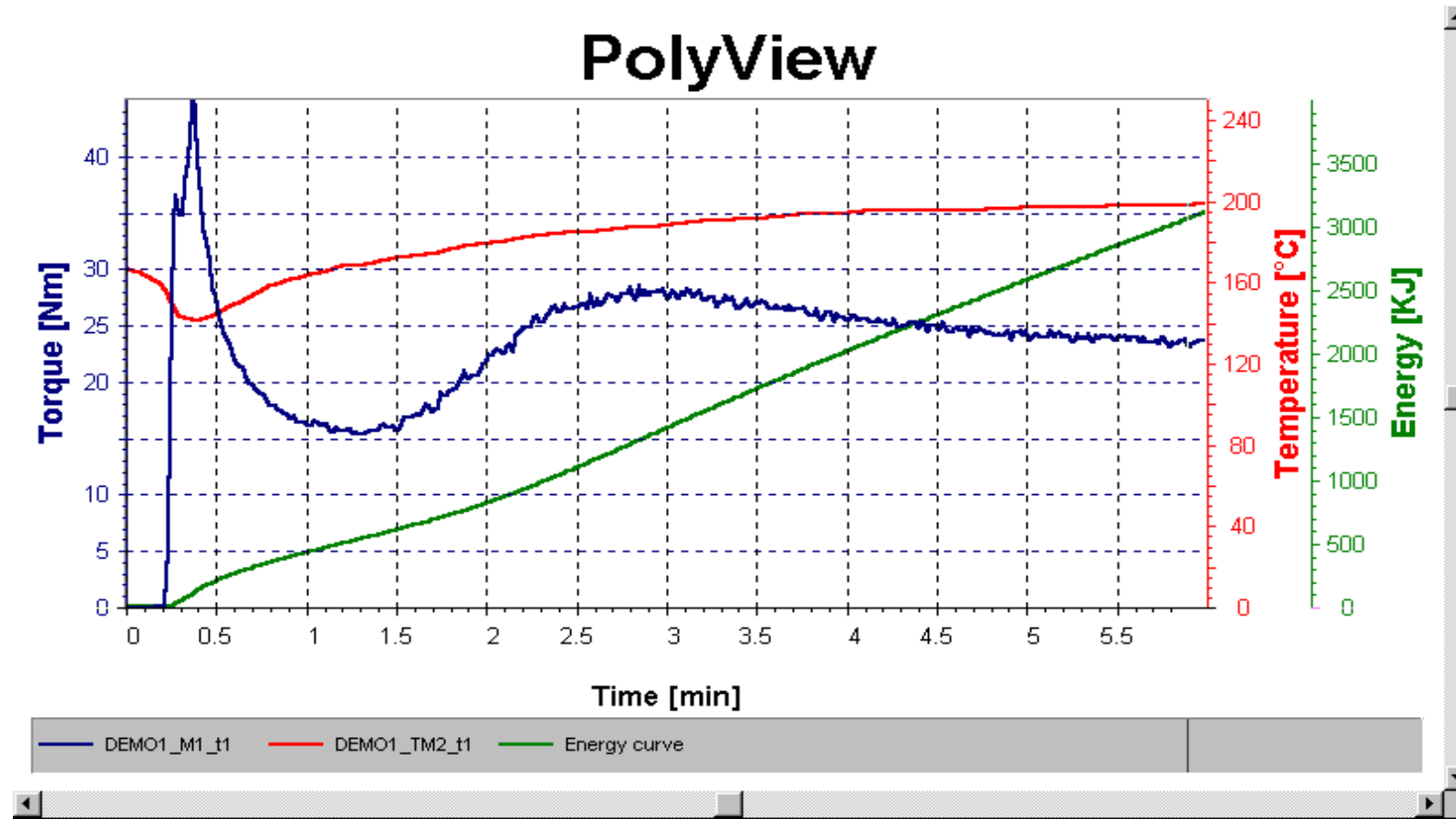


Test results:

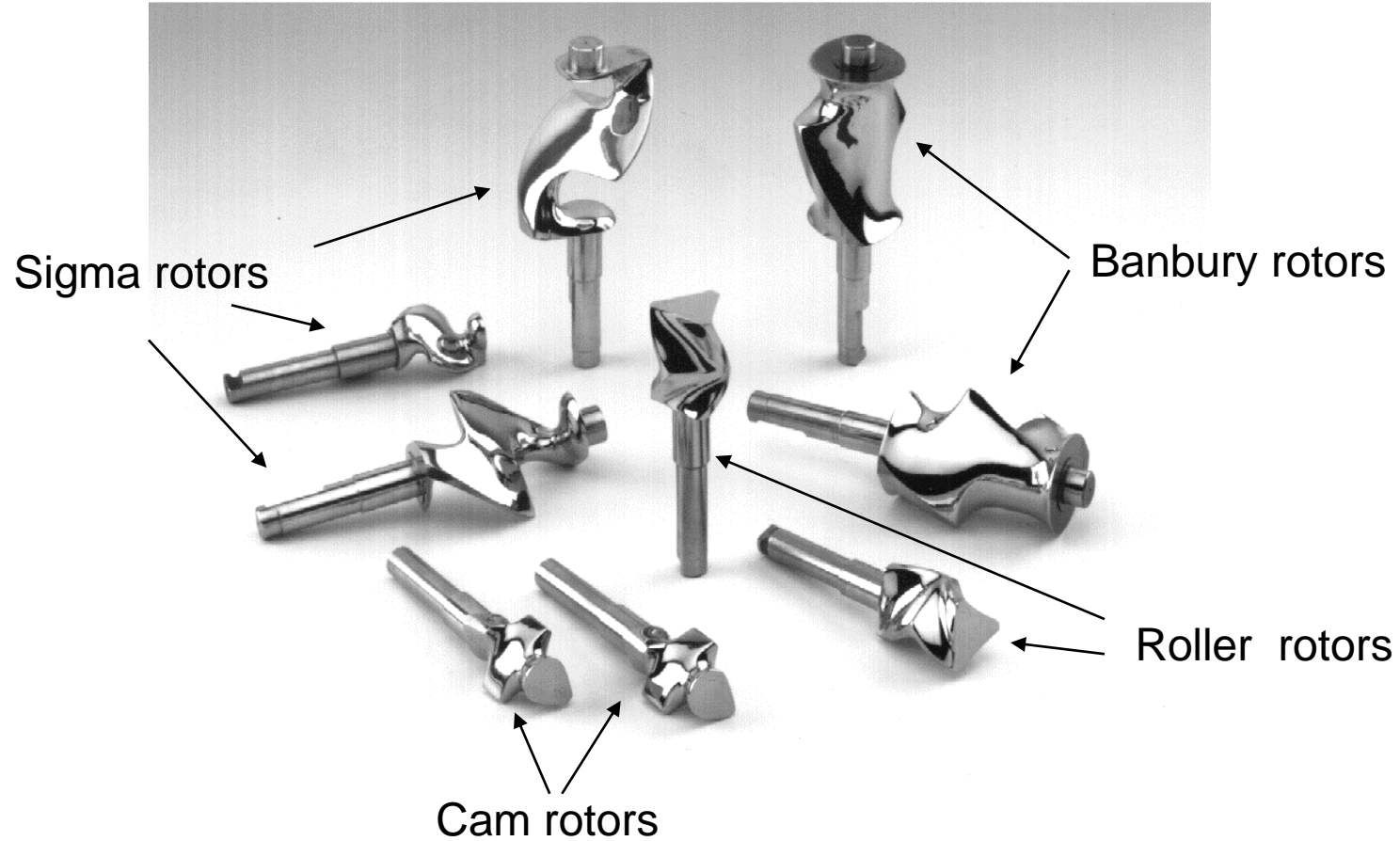
→ Torque

→ Melt temperature

میکسر آزمایشگاهی



انواع روتور میکسر آزمایشگاهی



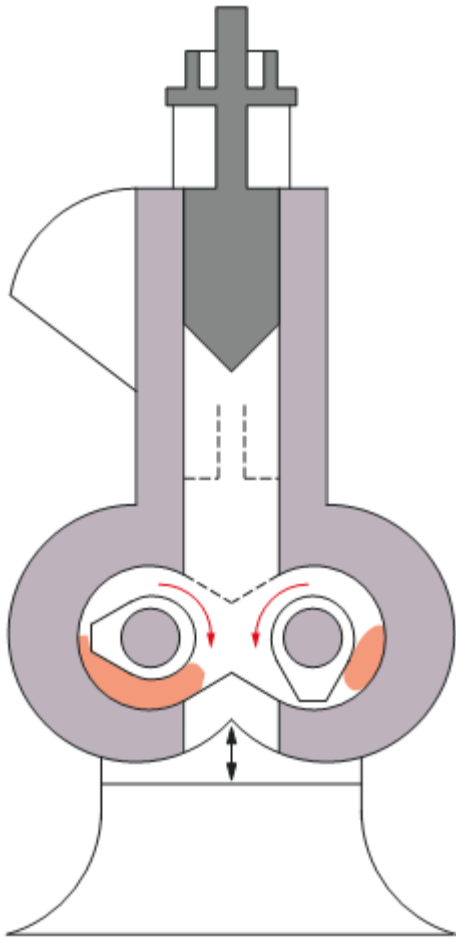
میکسر آزمایشگاهی



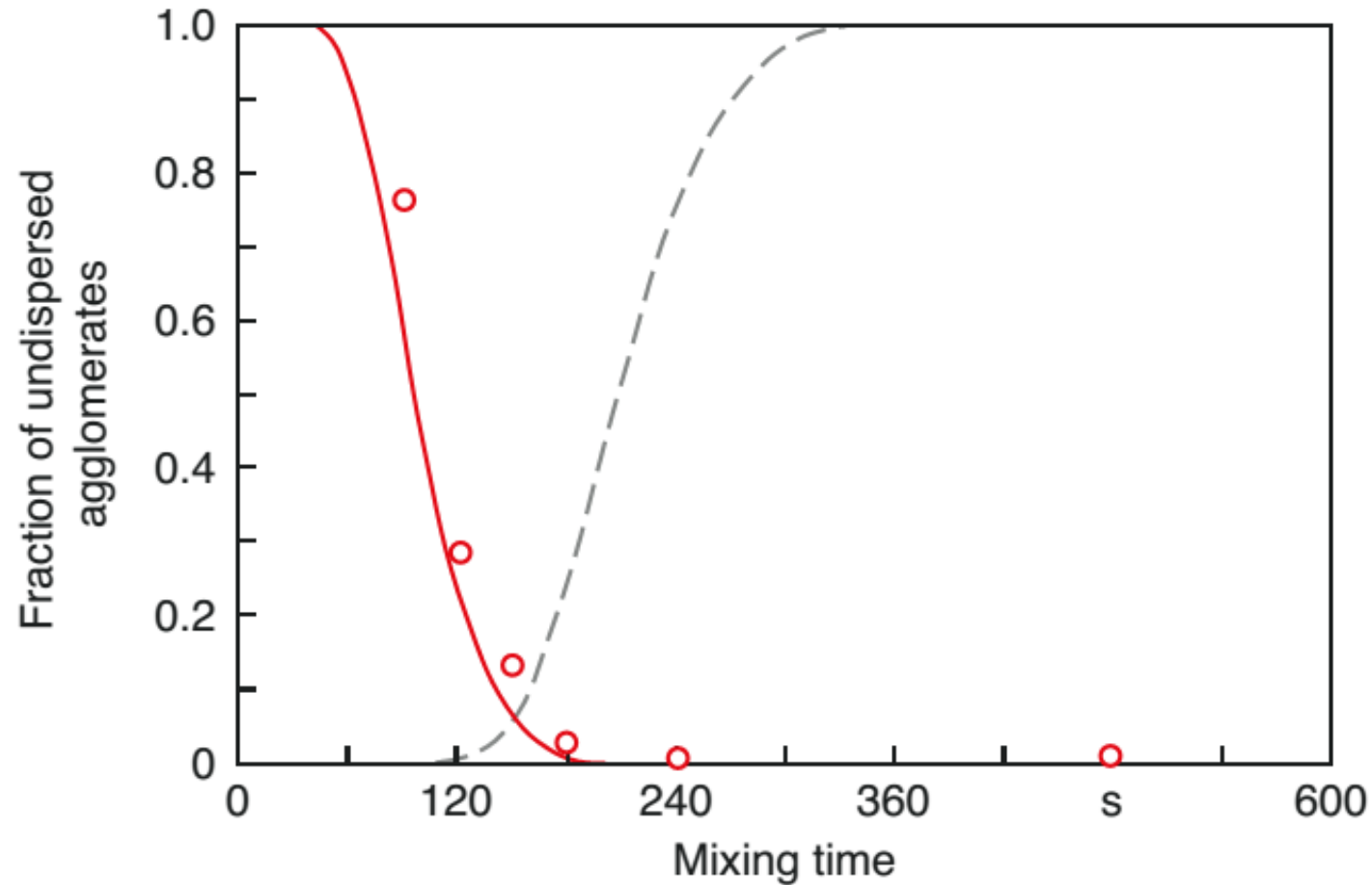
میکسر بنبوری

- میکسر بنبوری معمولترین میکسر داخلی مورد استفاده در صنعت است. میکسرهای داخلی میکسرهای بسیار نیرومندی هستند که تولید جریانهای کششی و برشی خیلی پیچیده ای می کنند که به خصوص برای پراکنده کردن توده های ذرات جامد درون زمینه پلیمری مناسب هستند.
- یکی از کاربردهای مهم بنبوری شکستن و پراکنده کردن بلوک های کربن درون لاستیک است.
- میزان پراکنده کردن ذرات جامد درون زمینه بستگی به زمان اختلاط، سرعت روتور، دما و هندسه پره ها است.

تصویر بنبوری و تصویر روتور آن

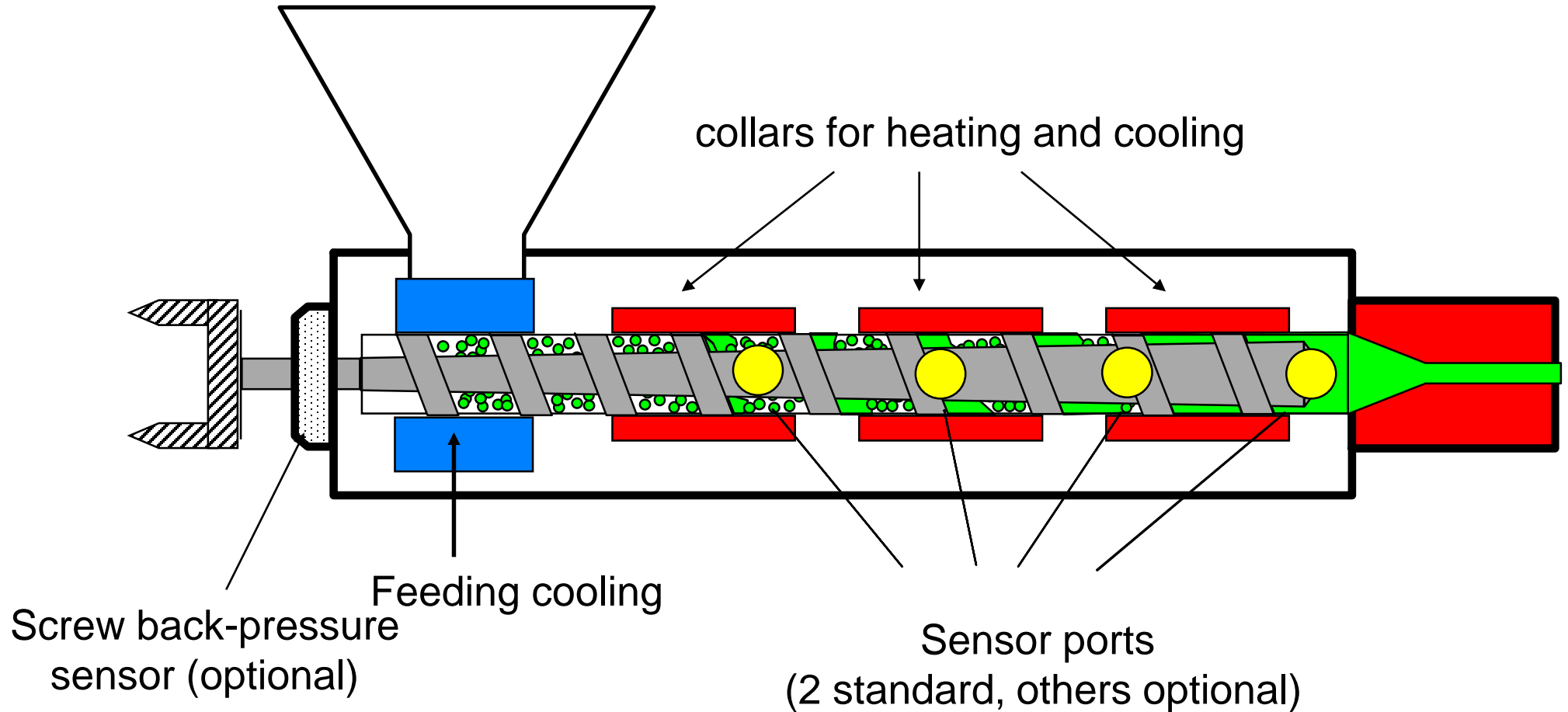


نمودار پراکنده کردن بلوک های کربن با اندازه بزرگتر از ۹ میکرومتر در بنبوری

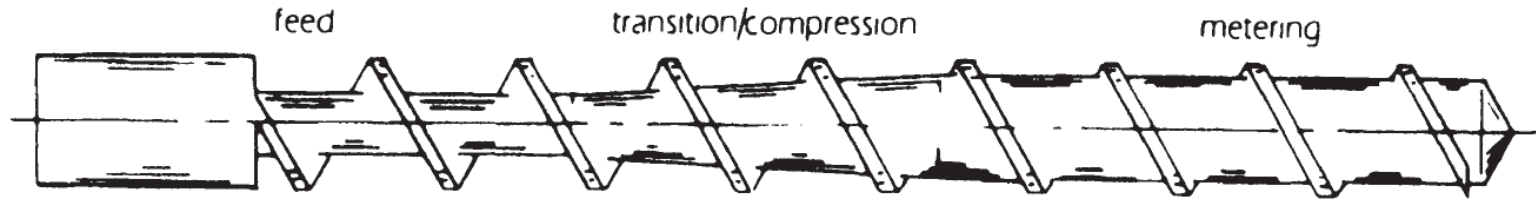


■ دایره های قرمز نتایج آزمایشگاهی، خط قرمز پیش بینی تئوری، خط شکسته درصد توده های بزرگتر از ۵۰۰ نانومتر

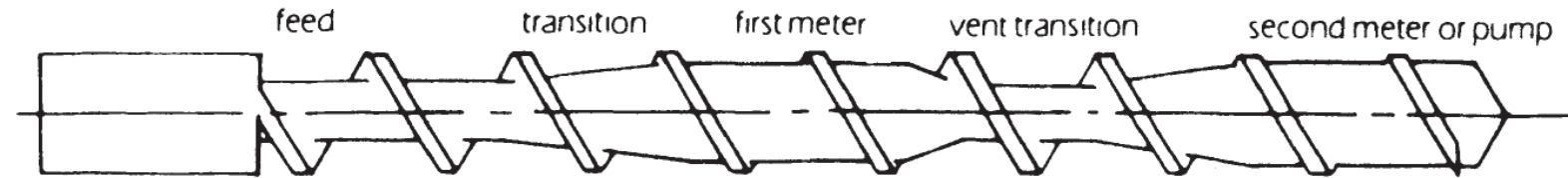
اکسترودرهای تک مارپیچه



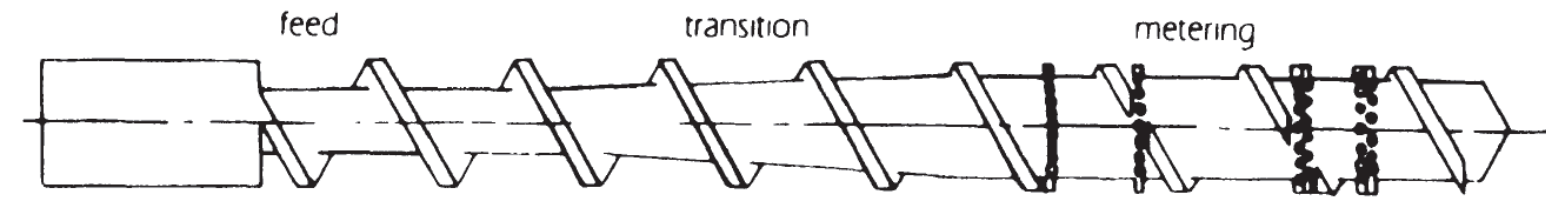
انواع ماریچ اکسترودر تک ماریچ



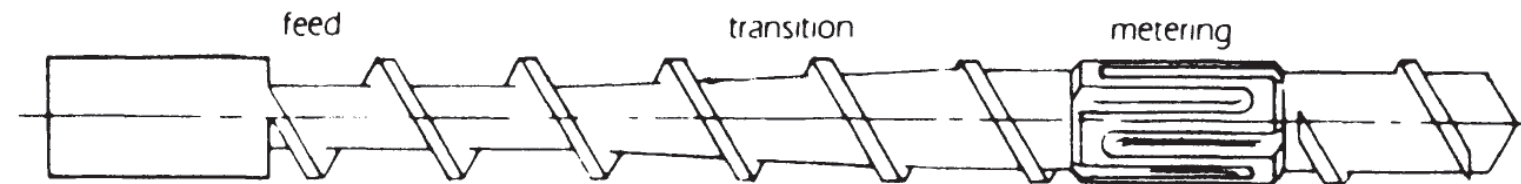
Metering screw



Two stage screw

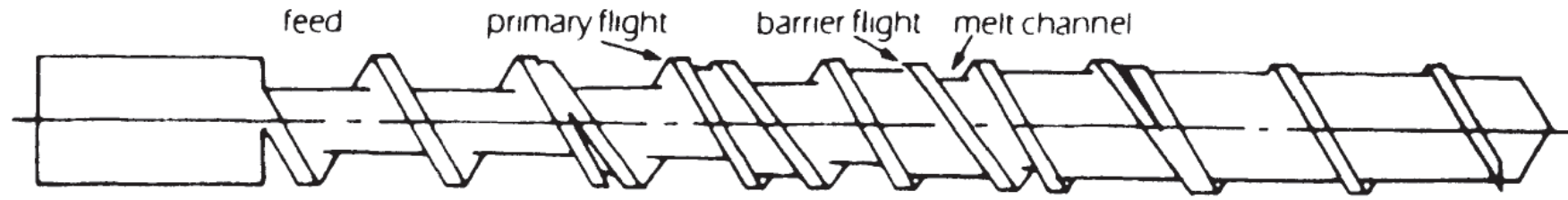


Pin mixing screw

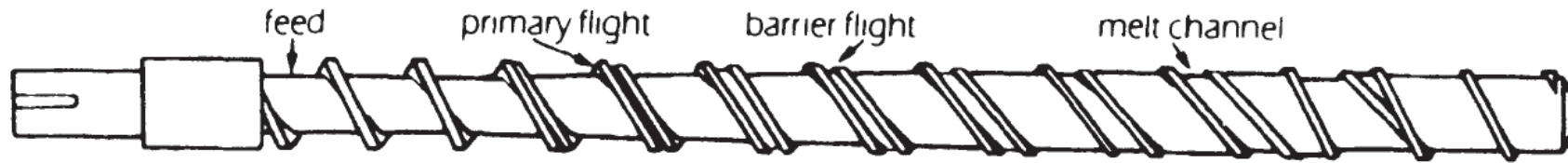


Maddock mixing screw

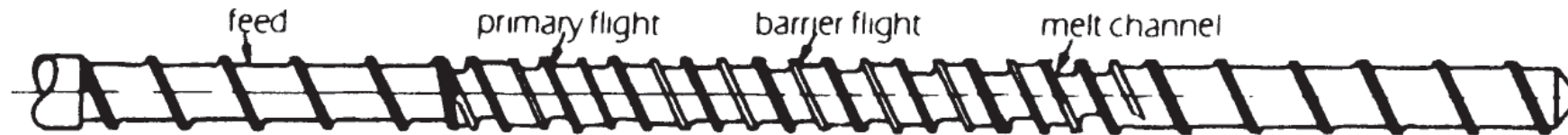
انواع ماریچ اکسترودر تک ماریچ



Davis-Standard Barrier (DSB)™ screw

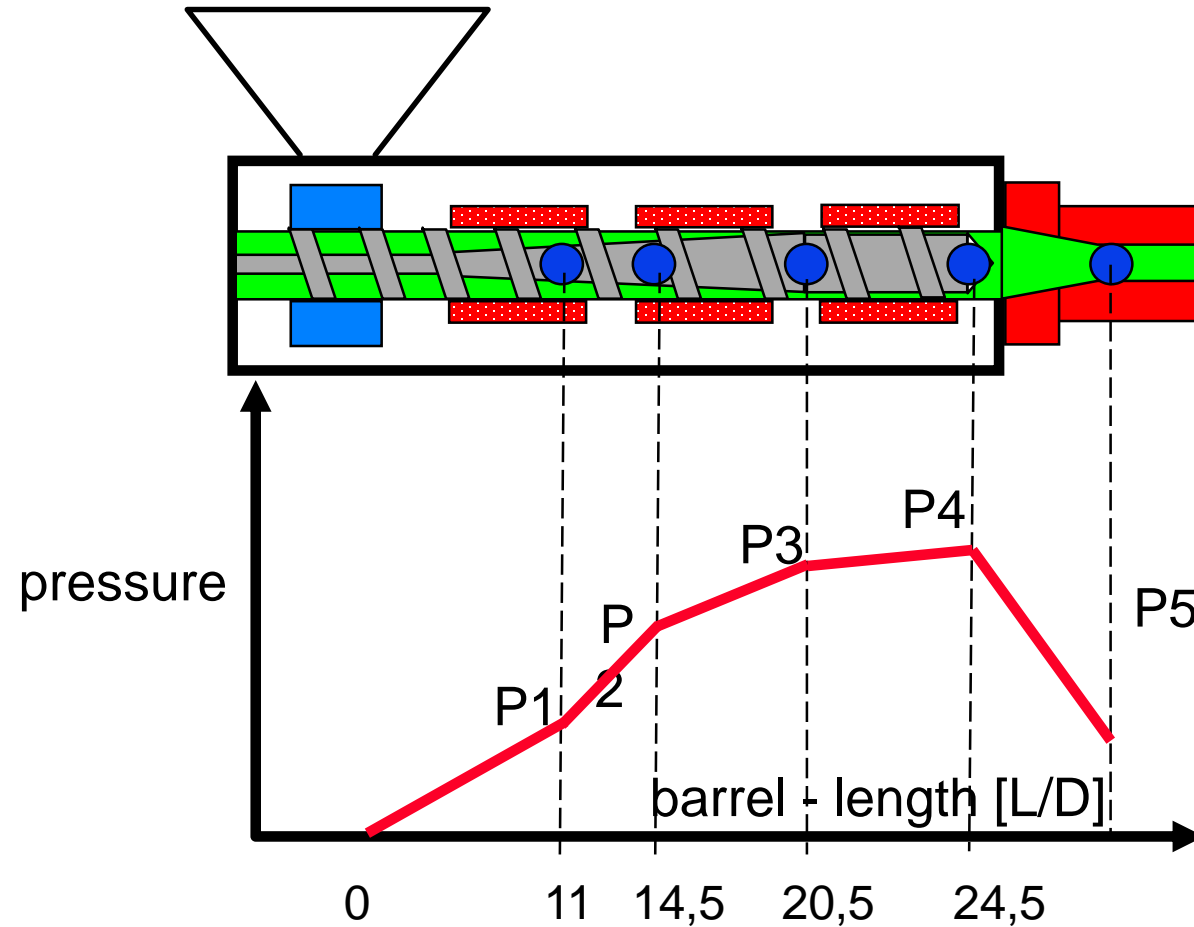


Davis-Standard VPB™ screw



Willert Barrier II screw

توزیع فشار در اکسترودرهای تک مارپیچه



طراحی ماریچ

- ماریچ عمیق نسبت به ماریچ کم عمق نسبت به تغییرات فشار حساسیت بیشتری دارد.
- در فشار کم، ماریچ عمیق خروجی بیشتری فراهم می کند، اما در فشار بالا برعکس است.
- کانالهای کم عمق باعث اختلاط بهتری می شوند.
- ذوب مواد پلاستیکی با استفاده از لقی کم پره ها، زاویه ماریچ بالا و عرض کم بین پره ها بهبود می یابد.
- یکی از مهمترین فاکتورهای ماریچ، نسبت طول به قطر (L/D) است.
- این نسبت می تواند بین ۲۰ تا ۴۰ باشد.

طراحی ماریچ

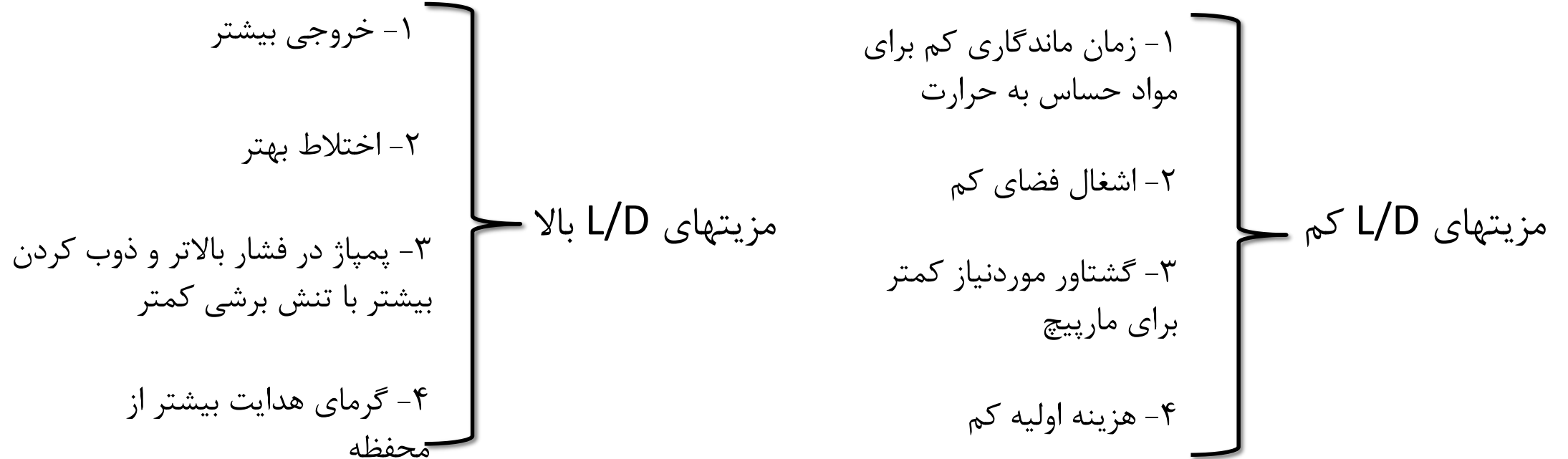


Table 4.4 Hypothetical screw designs for general types of plastic

<i>Dimensions (in.)</i>	<i>Rigid PVC</i>	<i>Impact polystyrene</i>	<i>Low-density polyethylene</i>	<i>High-density polyethylene</i>	<i>Nylon</i>	<i>Cellulose acetate/butyrate</i>
Diameter	4½	4½	4½	4½	4½	4½
Total length	90	90	90	90	90	90
Feed zone (F)	13½	27	22½	36	67½	0
Compression zone	76½	18	45	18	4½	90
Metering zone (M)	0	45	22½	36	18	0
Depth (M)	0.200	0.140	0.125	0.155	0.125	0.125
Depth (F)	0.600	0.600	0.600	0.650	0.650	0.600

طراحی مارپیچ: نسبت فشار

□ نسبت فشار (CR) بصورت نسبت عمق مارپیچ در قسمت تغذیه به عمق مارپیچ در قسمت مترینگ تعریف می شود.

□ این نسبت تعیین کننده مقدار فشار بر روی پلاستیک است. با افزایش این نسبت فشار روی پلاستیک بیشتر می شود.

□ این نسبت بایستی به اندازه کافی بزرگ بوده تا بتواند پلاستیک ذوب نشده را به یک مذاب فشرده بدون حبس شدن هوا تبدیل کند.

□ اگر CR کم باشد هوا در مذاب حبس می شود.

طراحی ماریچ: نسبت فشار

□ مقدار CR کم (۱.۸-۱.۲) مخصوص پلیمرهای: آکریلیکها، ABS، SAN و PVC صلب

□ مقدار CR متوسط (۲-۲.۸) مخصوص پلیمرهای: استال (گرید Delrin 100)، پلیمرهای سلولوزی، نایلون (با شاخص مذاب کم)، پلی کربنات، پلی اتیلن (با شاخص مذاب متوسط تا کم)، پلی پروپیلن (با شاخص مذاب متوسط تا کم)، پلی استایرن، PVC نرم

□ مقدار CR بالا (۳-۴.۵) مخصوص پلیمرهای: استال (گرید Delrin 500, 900)، تفلون، نایلون (با شاخص مذاب بالا)، پلی کربنات، پلی اتیلن (با شاخص مذاب بالا)، پلی پروپیلن (با شاخص مذاب بالا)، پلی اتیلن چگالی بالا

خروجی

□ خروجی مارپیچ به شرطی قابل پیش بینی است که مذاب تحت کنترل و تکرار پذیر باشد.

□ برای یک مارپیچ با پره های مربعی (مارپیچ های مرسومی که فاصله یک پره تا پره بعد به اندازه قطر مارپیچ است)، فرمول ساده زیر برای تخمین خروجی بکار می رود:

$$R = 2.3D^2hgN$$

← خروجی kg/h

→ سرعت دورانی مارپیچ rpm

← قطر مارپیچ mm

← عمق قسمت مترینگ mm

← شتاب گرانش زمین

خروجی

□ اگر خروجی بطور قابل توجهی بالاتر از مقدار پیش بینی شده باشد نشان دهنده این است که اکسترودر در منطقه مترینگ پمپاژ بیش از اندازه داشته که باعث سایش مارپیچ می شود.

□ اگر خروجی خیلی کمتر باشد، نشان دهنده مشکل تغذیه یا سایش مارپیچ یا محفظه است.

لقی اولیه → ← لقی مارپیچ سایش یافته با محفظه

$$OL = \frac{W - O}{M} + 100$$

افت جریان ←

عمق مارپیچ در منطقه مترینگ ←

خنک کاری

- معمولاً در اکسترودرهای PVC، مارپیچ نیاز به خنک کاری دارد. خنک کاری توسط گردش آب یا روغن در مرکز مارپیچ انجام می گیرد (حداقل در قسمت تغذیه).
- خنک کاری برای مارپیچ های با قطر بزرگتر بحرانی تر است.
- هدف اصلی برای خنک کاری مارپیچ افزایش قابلیت مارپیچ برای جلوگیری از تغذیه پلاستیک جامد در ثابت ترین نرخ ممکن است. این کار با افزایش ضریب اصطکاک انجام می گیرد.
- بهترین مکان برای لوله خنک کننده در محدوده پنج پره اولیه است.

کارایی

- کارایی ماشین اکسترودر و خط تولید بستگی به عوامل متعددی دارد. نوع مارپیچ استفاده شده همیشه تاثیر عمده را دارد.
- در بیشتر مواقع موثرترین طراحی مارپیچ در بیشتر مواد، $L/D=25$ است.
- $L/D=30-33$ برای هواگیری یا نیازمندیهای دیگر استفاده می شود.
- $L/D=20$ مخصوص پلاستیک های حساس به حرارت است.
- سرعت کمتر مارپیچ تنش برشی کمتری در پلاستیک ایجاد می کند، بطوریکه هدر رفتن حرارت کاهش می یابد و خواص پلاستیک بهبود می یابد.

هواگیری

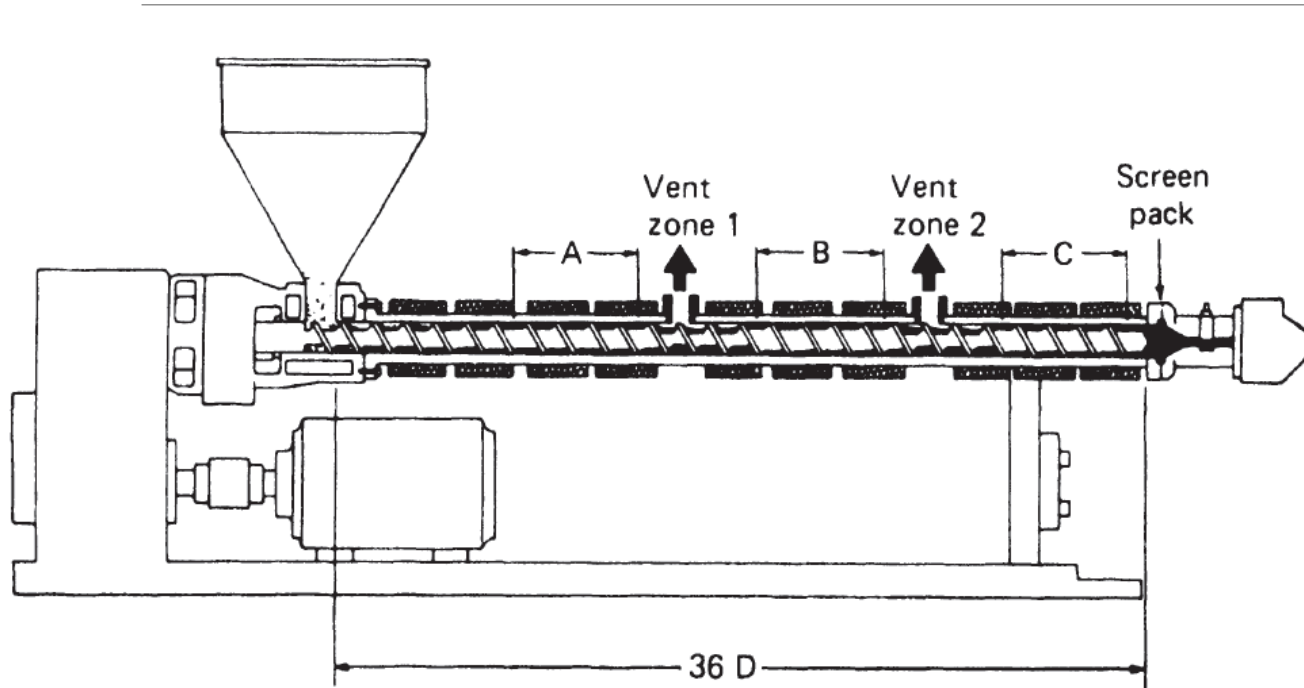


Figure 4.10 A double-vented extruder using a 3-stage screw.

□ در طول فرآیند اکستروژن، مذاب پلیمری می تواند حاوی رطوبت، گازهای ناشی از خود مذاب یا پلاستی سایزر یا سایر افزودنی ها باشد. برای اینگونه مواد از اکسترودرهای با هواگیری استفاده می شود.

□ دفع همه گازها بسیار مشکل است مگر اینکه از هواگیری تحت خلاء استفاده شود.

□ از اینرو پلاستیک های آبدوست مانند نایلون، آکرلیکها، ABS، PET، PBT، پلی اورتان و پلی کربنات باید قبل از فرآوری خشک شوند.

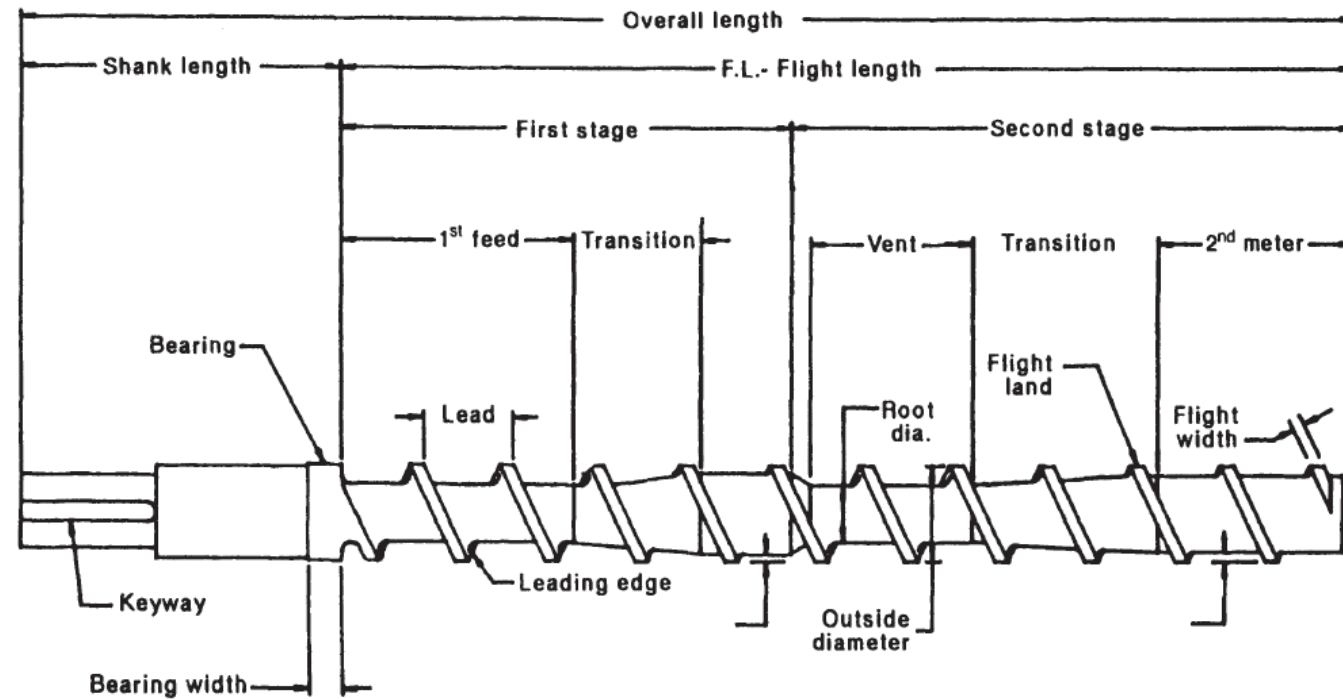
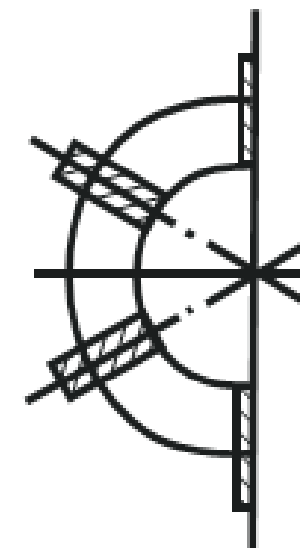
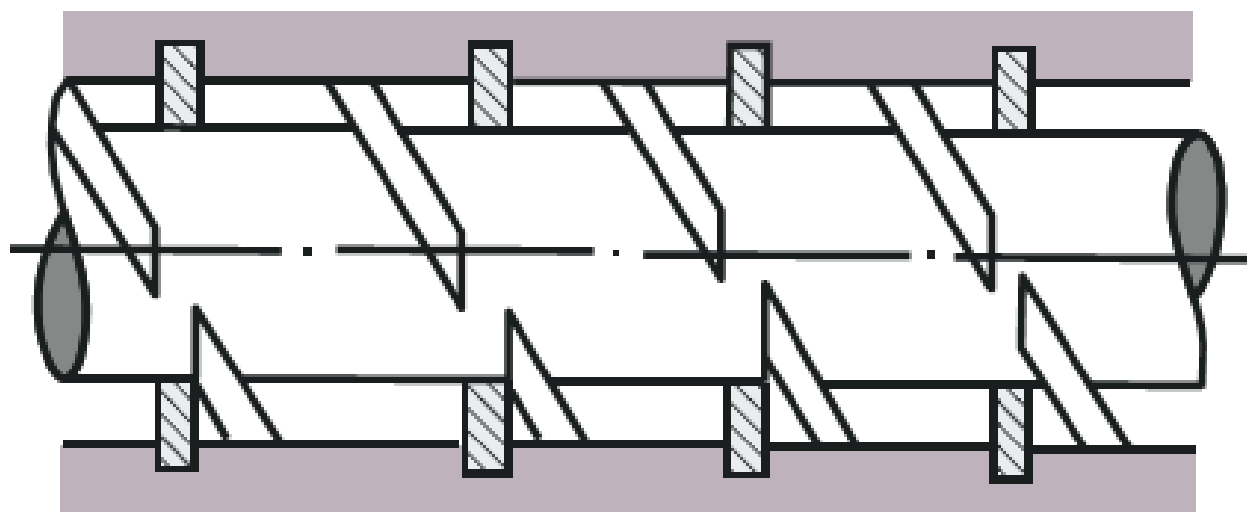
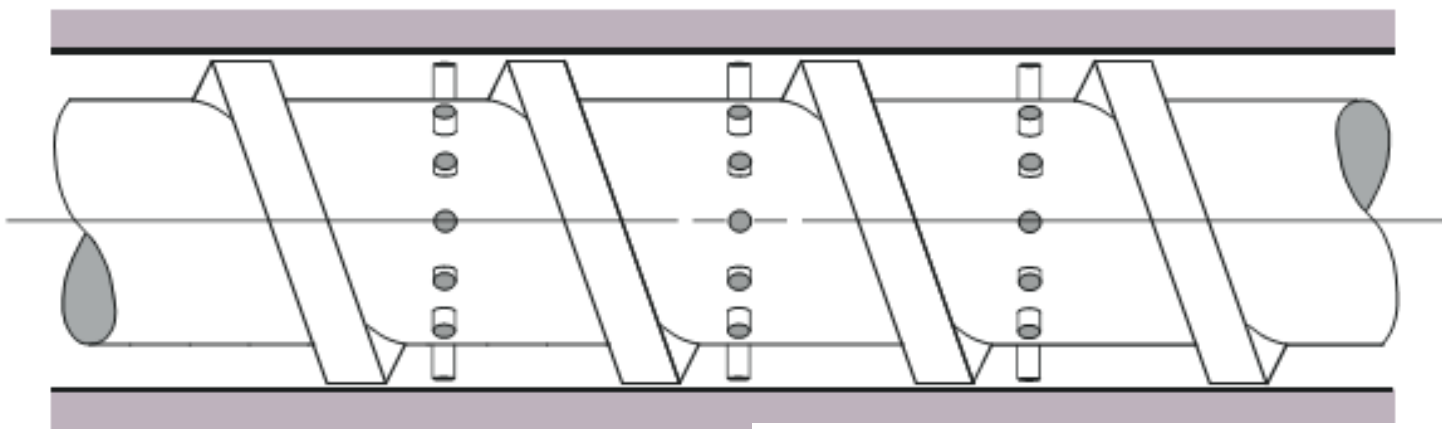


Figure 4.11 Nomenclature for a 2-stage screw.

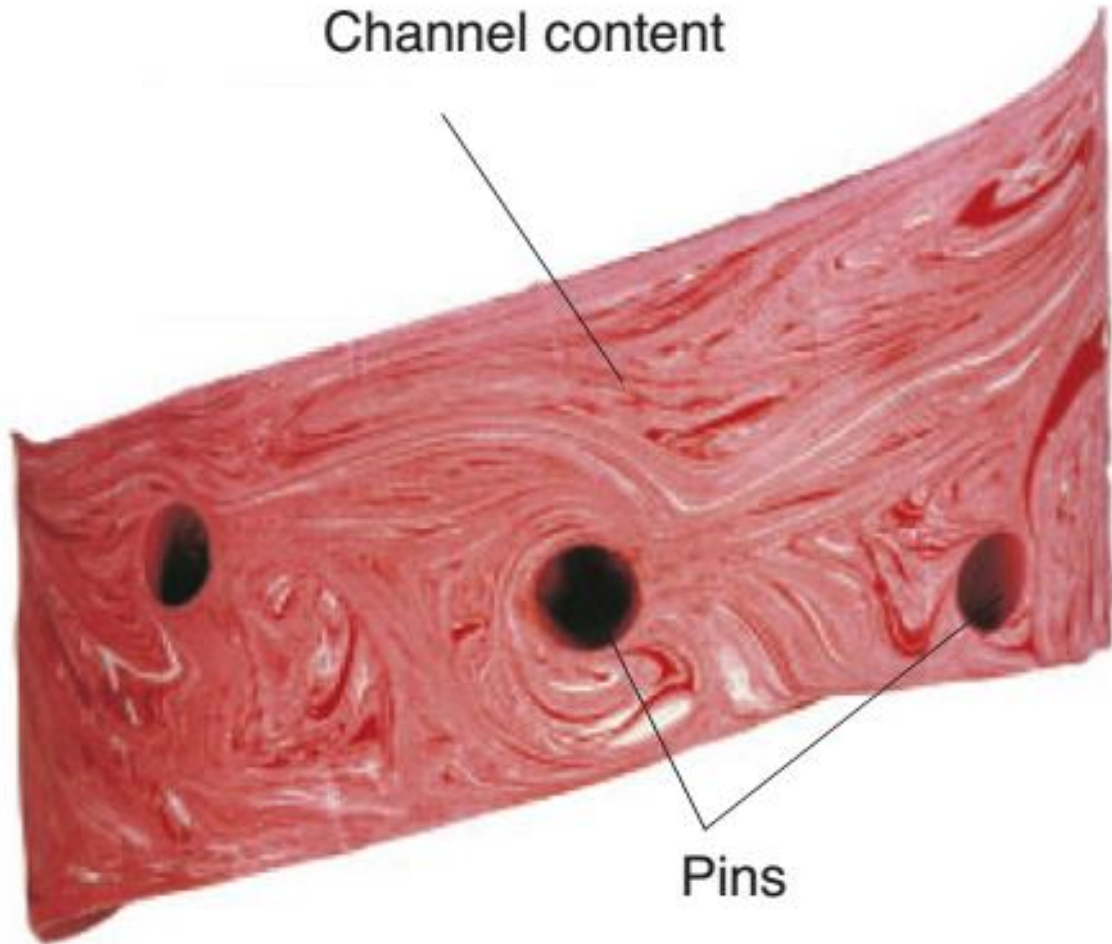
اختلاط در اکسترودرهای تک مارپیچه

- کیفیت اختلاط در این اکسترودر ها می تواند با ایجاد پین هایی روی روتور یا محفظه افزایش یابد. اگر پین ها روی محفظه باشند اکسترودر با نام QSM شناخته می شود.
- در هر دو حالت پین باعث آشفته کردن جریان می شود. این کار را با تغییر جهت دادن سطوح بین سیالات و ایجاد کردن سطوح جدید با تقسیم جریان انجام می دهد.
- وجود پین در اکسترودر به خصوص برای ترکیب مواد با ویسکوزیته بالا مانند لاستیکها لازم است. اغلب به این اکسترودر ها اکسترودر با تغزیه سرد گویند.

مارپیچ پین دار



تصویر محتویات کانال اکسترودر QSM

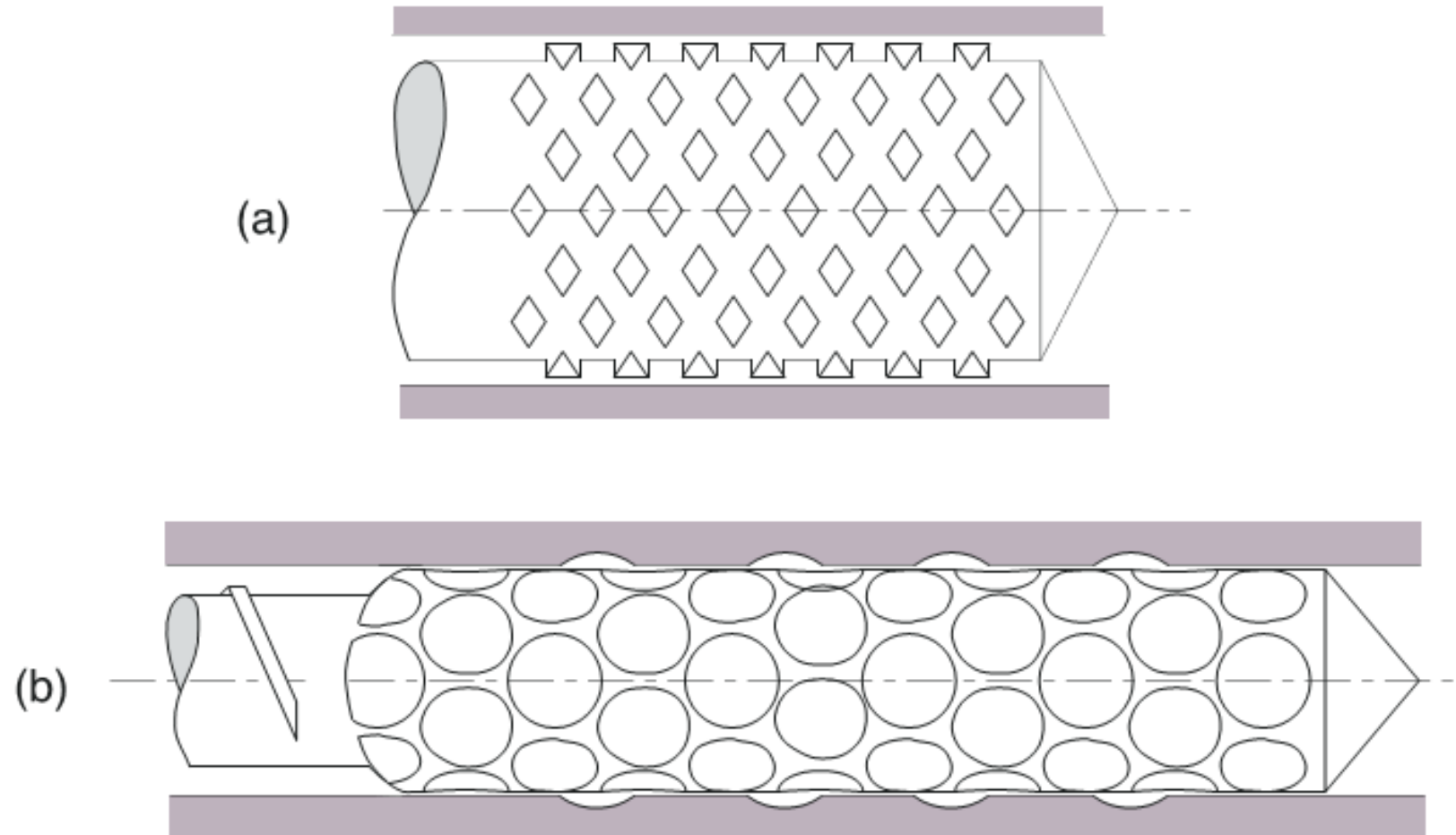


□ تغییر جهت لایه ها با عبور جریان از پین کاملاً در تصویر مشخص است.

ادامه

□ برای مواد با ویسکوزیته کمتر، مانند مذاب پلیمرهای گرمانرم، عمل اختلاط که توسط جریان متقابل (cross-flow) انجام می شود اغلب برای تغییر جهت، آشفتگی و پراکنده کردن کافی نیست، از اینرو لازم است از مقطعهای خاص استفاده شود. از اینرو از میکسرهایی با سر مخلوط کن آشفته (distributive mixing head) استفاده می شود.

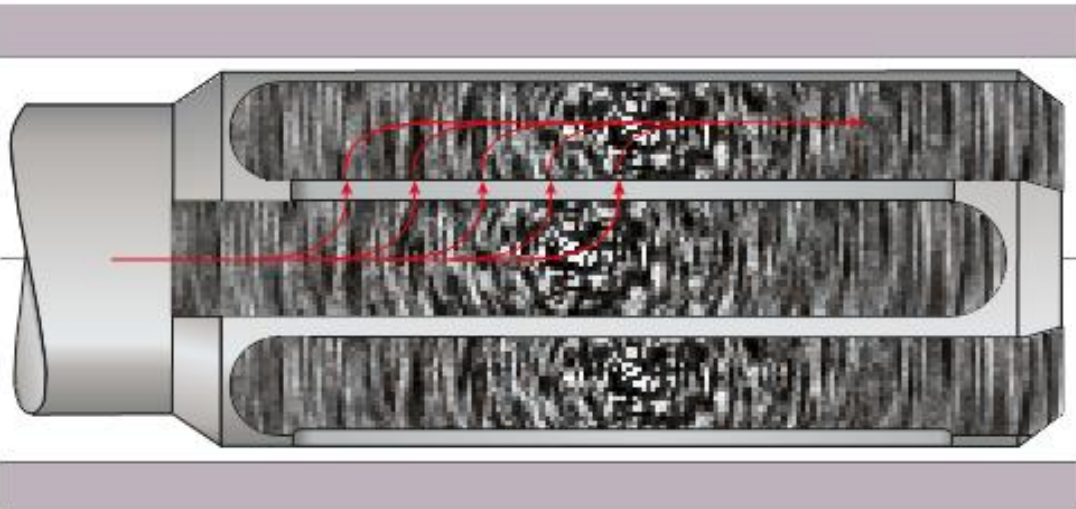
مقطعاتی آشفته کننده جریان (a) مقطع آناناسی، (b) مقطع انتقال حفره



مارپیچ با مقطع Maddock or Union Carbide

□ هنگام شکستن توده ذرات و پراکنده کردن آنها، اختلاط سیالاتی که بین آنها اثرات کشش سطحی وجود دارد، به تنشهای بالایی نیاز داریم.

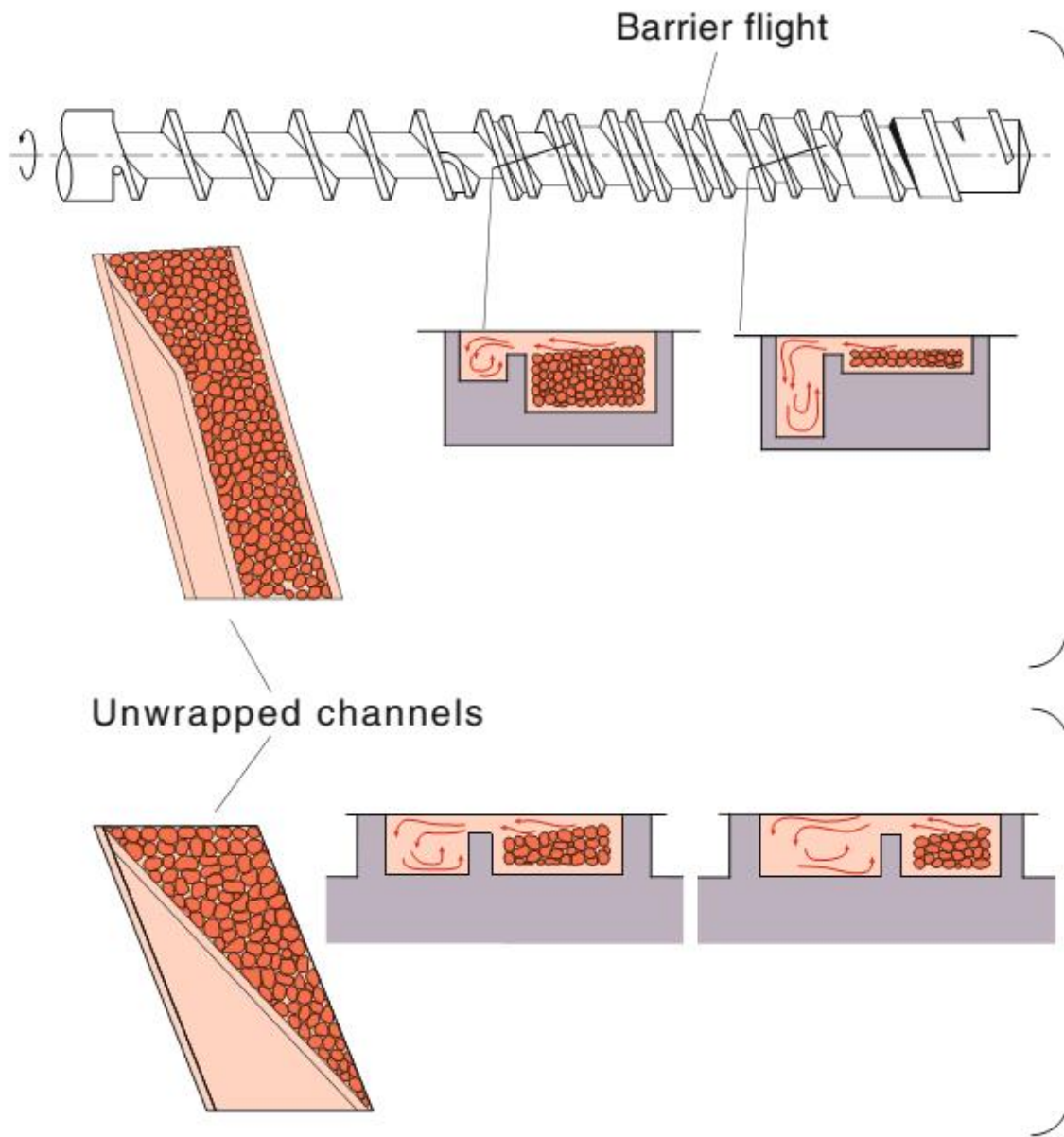
□ مارپیچ های نوع Maddock این تنش لازم را ایجاد می کند. در این نوع مارپیچها مذاب به نیروی بالایی از گپ های باریک عبور داده می شود. این کار باعث اعمال تنش بالا به مذاب می شود. البته این کار باعث ایجاد گرمای ویسکوز شده و باعث افت فشار در طول اکستروژن می شود.



مارپیچ حائل

□ معمولاً از مارپیچ Maillefer و مارپیچ حائل (barrier screw) برای اطمینان از کیفیت بالا و تکرارپذیری استفاده می شود.

□ مارپیچ Maillefer با بکار گیری مکانیزم حذف مذاب (melt removal) عرض بستر جامد را ثابت نگه می دارد، در حالیکه مارپیچ حائل از عمق کانال ثابت با کاهش تدریجی در عرض بستر جامد استفاده می کند.



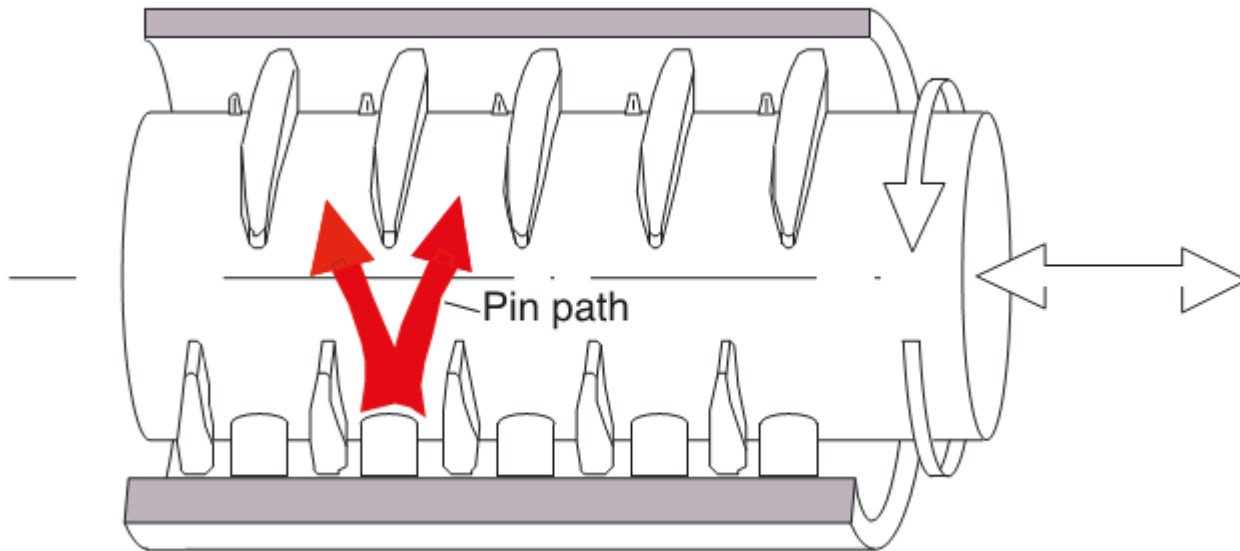
Maillefer screw

Barrier screw

Figure 6.14 Schematic diagram of screws with different barrier flights

اکسترودر رفت و برگشتی Co-Kneader

این یک اکسترودر تک مارپیچه با پین هایی روی محفظه و مارپیچ که در جهت محوری نوسان می کند. پین های روی محفظه کل سطح مارپیچ را پاک می کنند، و در واقع یک مکانیزم خودپاک کن برای مارپیچ فراهم شده است. در نتیجه زمان ماندگاری ماده کم شده و این برای مواد حساس به حرارت بسیار مناسب است. پین های روی محفظه همچنین باعث منقطع کردن بستر جامد شده و باعث پراکنده کردن مذاب شده نرخ ذوب را بهبود می دهد.



□ در این نوع اکسترودر تعداد شیار بر واحد L/D از رابطه زیر بدست می آید:

$$N_s = 2^{12}$$

which means that over a section of $4D$ the number of striations is $2^{12}(4) = 2.8E14$

اکسترودرهای دو ماریچ

- با توسعه مواد پلاستیکی جدید مشخص شده که برخی پلاستیک ها با افزودنی یا بدون افزودنی نیازمند فشار و دمای بالاتری در فرآیند اکستروژن هستند.
- در اکسترودرهای تک ماریچ، مواد با ماریچ دوران می کنند که این می تواند باعث تخریب آنها شود.
- در طول دهه ۱۹۳۰، اکسترودرهای دو یا چند ماریچ برای حل این مشکلات توسعه یافتند.

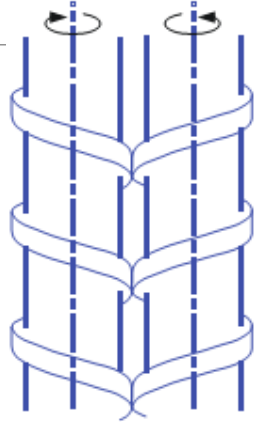
اکسترودرهای دو مارپیچه

□ ویژگیهای مهم اکسترودر چند مارپیچ:

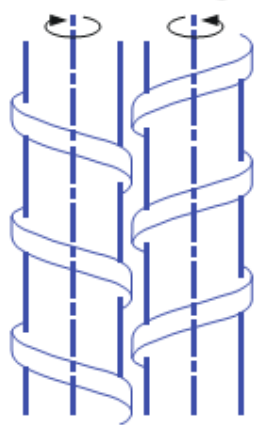
1. ظرفیت انتقال بالا در سرعت کم
2. نرخ پمپاژ بالا و کنترل شده در دامنه وسیعی از دماها و ضرایب اصطکاک
3. تولید گرمای اصطکاکی پایین
4. زمان ماندگاری کم در اکسترودر
5. خود تمیزکنی همراه با اختلاط بهتر
6. قابلیت پمپاژ با جریان برگشتی کاهش نمی یابد

اکسترودرهای دو مارپیچه

Non-intermeshing



intermeshing



□ طبقه بندی از نظر جهت دور مارپیچه:

○ همسو (Co-rotating)

○ ناهمسو (Counter rotating)

□ طبقه بندی اکسترودر دو مارپیچه:

○ تداخلی (Intermeshing)

➤ همسو

➤ ناهمسو

○ غیر تداخلی (No-intermeshing)

➤ ناهمسو

اکسترودرهای دو مارپیچه

- ❑ در اکسترودر دوماپیچه تداخلی همسوگرد نسبت به ناهمسوگرد تنش برشی بیشتری اعمال می شود (به دلیل جهت حرکت مارپیچها در محل تماس دو مارپیچ).
- ❑ اکسترودرهای با مارپیچ تداخلی برای کامپاند کردن بسیار مناسب هستند. نوع همسوگرد برای مواد حساس به حرارت مناسب نیست.
- ❑ اکسترودرهای با مارپیچ تداخلی ناهمسو گرد در مواردی که نیاز به حذف بخار و گاز است مناسب هستند.
- ❑ اکسترودرهای غیرتداخلی اختلاط خوبی فراهم می کند اما برش کمی ایجاد می کند. کاربرد تجاری آنها برای اصلاح، انعقاد، اکستروژن واکنشی و هالوژن دار کردن پلی الفینها بکار می رود.
- ❑ ماهیت جالب دوماپیچ های غیرتداخلی این است که امکان راه اندازی دوماپیچ در سرعت های متفاوت وجود دارد که باعث ایجاد اصطکاک در پلاستیک شده و می تواند برای ذوب سریع پودر پلاستیک استفاده شود. در این اکسترودر ها گاهی اوقات یکی از مارپیچ ها کوتاهتر است. این طراحی برای پلاستیک هایی استفاده می شود که به دلیل چگالی کم یا اصطکاک خیلی کم امکان ذوب آنها با اکسترودر تک مارپیچ وجود ندارد.
- ❑ برای PVC صلب وقتی بصورت پودر باشد باید از اکسترودر دوماپیچ استفاده شود.

انواع اختلاط

اختلاط گسترده (Extensive Mixing):

○ پلاستیک بطور مداوم در جهت جریان تغییر می کند. هر ذره گاهی اوقات روی سطح و گاهی درون جرم پلاستیک حرکت می کند. این اختلاط شبیه ورزش دادن است.

اختلاط متمرکز (Intensive Mixing):

○ لایه های مجاور پلاستیک دارای سرعت های متفاوتی هستند که در اثر تنش برشی ایجاد شده اند. این باعث می شود ذرات پیگمنت شکسته شوند.

□ در اکسترودر تک مارپیچ و بنبوری، هر دو نوع اختلاط وجود دارد. برش پلاستیک در کانال باریک مارپیچ باعث اختلاط متمرکز شده و عبور با جریان های فشاری باعث اختلاط گسترده می شود.

□ در اکسترودر دومارپیچ اختلاط گسترده وجود نداشته و شدت اختلاط متمرکز بیشتر از اکسترودر تک مارپیچ است.

انواع اختلاط

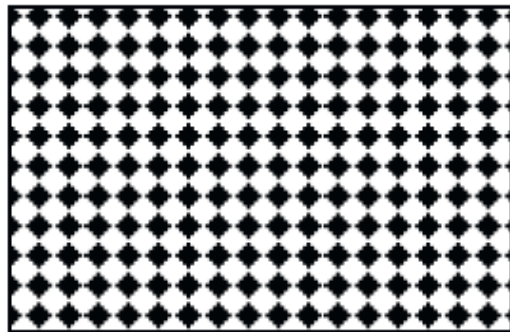
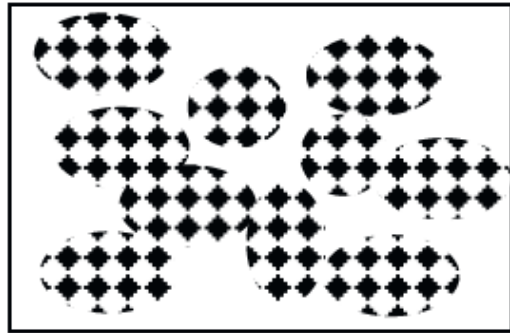
اختلاط توزیعی (Distributive Mixing):

○ عبارتست از در هم آمیختن دو سیال بطوریکه مقیاس جداسازی سیال به مقیاسی که فرآیند دیگر می تواند اتفاق بیافتد (نفوذ یا واکنش شیمیایی) کاهش یابد. اختلاط در یک رژیم جریان آرام انجام شده که در آن توسط تغییر شکل فصل مشترک سیال در نتیجه کرنش برشی متمایز می شود. این توزیع مرتبط با نرخ کرنش است.

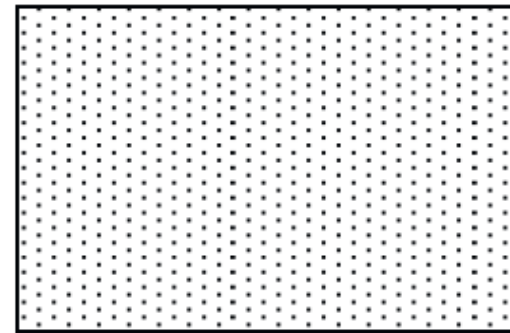
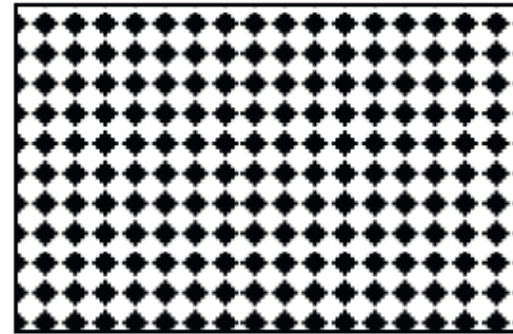
اختلاط پراکنده (Dispersive Mixing):

○ در این اختلاط رشد سطح مشترک دو سیال تابع اندازه تنش است. این اختلاط باعث شکستن تجمعات شده در حالیکه اختلاط توزیعی باعث توزیع ذرات می شود.

انواع اختلاط

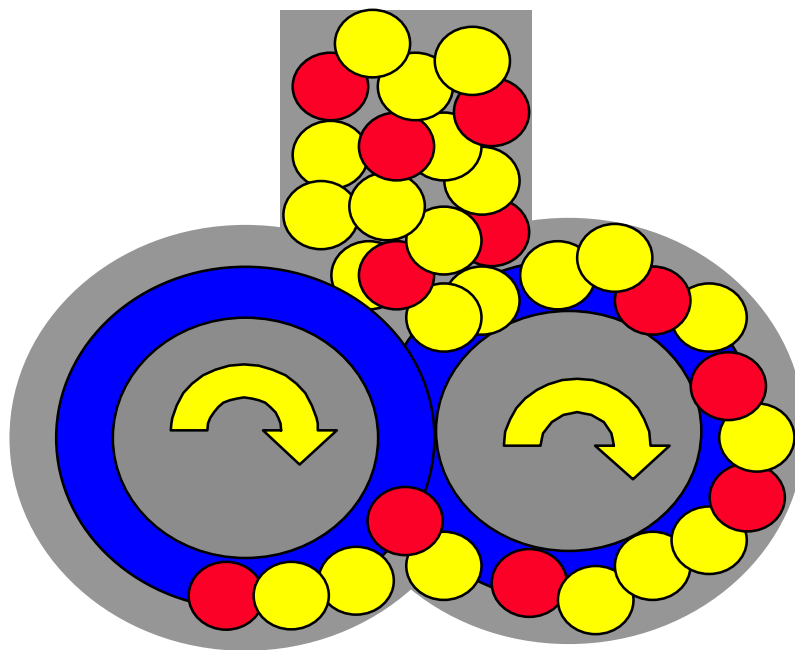


Distributive mixing

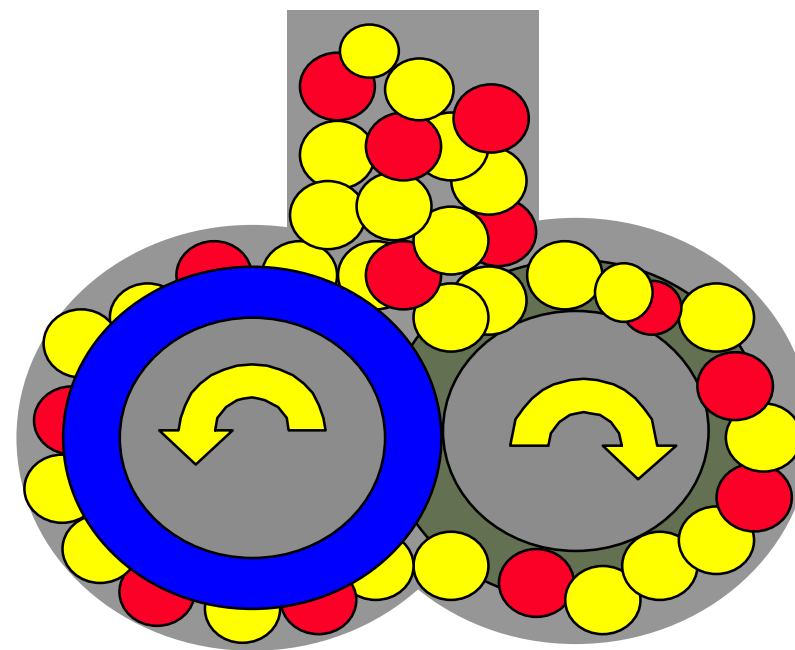


Dispersive mixing

اکسترودرهای دو مارپیچه



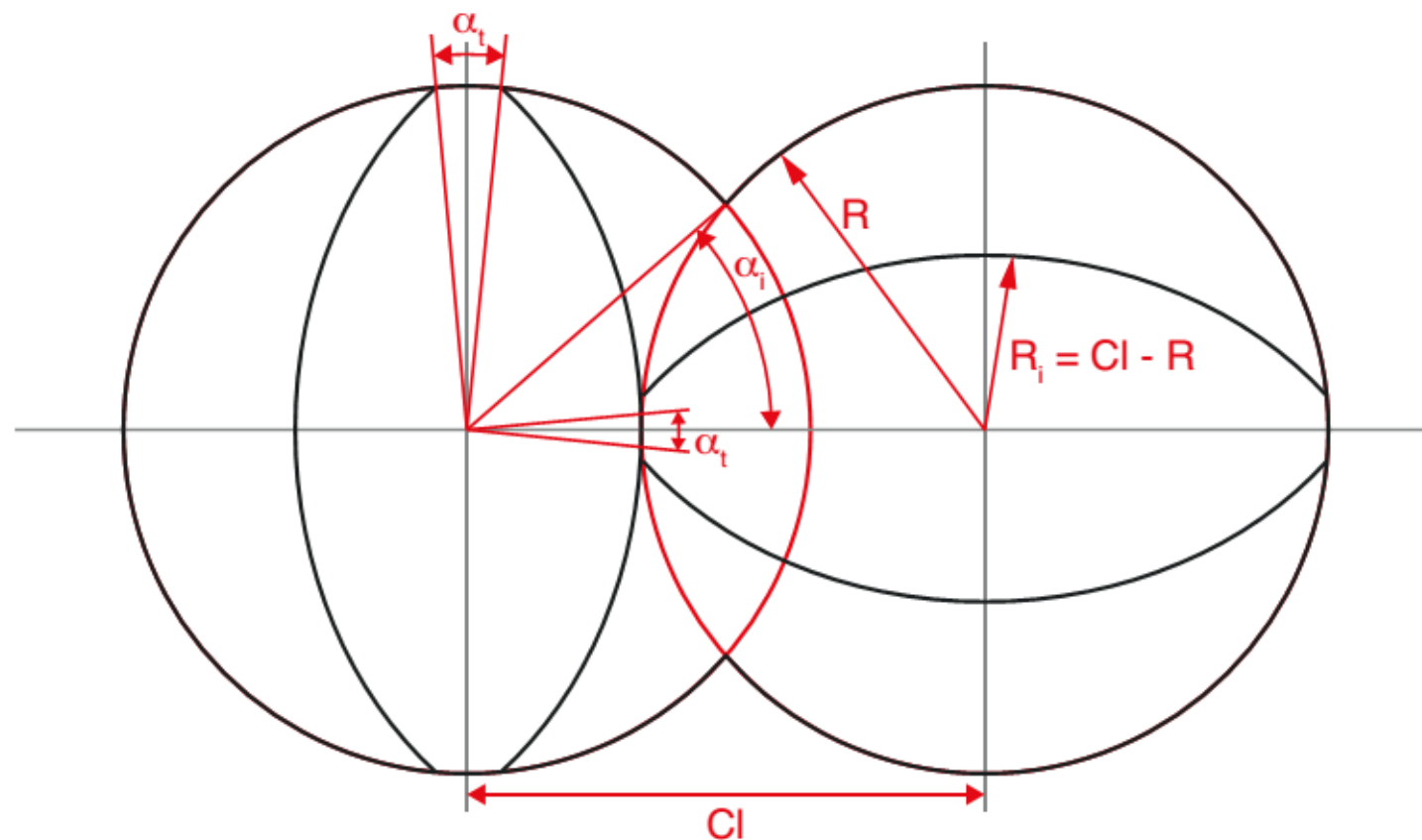
Co-rotating



Counter-rotating

ادامه

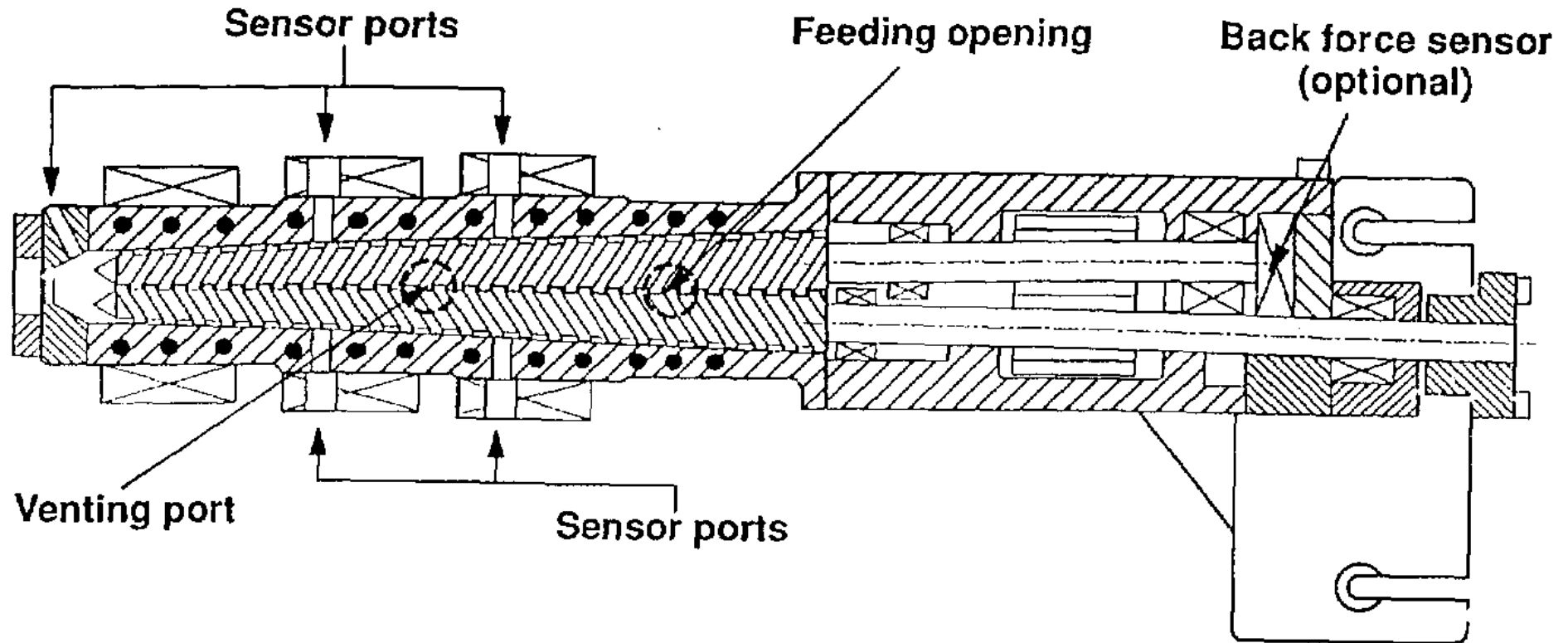
□ اکسترودرهای دومارپیچه تداخلی دارای خاصیت خود تمیزکن هستند، که منجر به کاهش زمان ماندگاری پلیمر داخل اکسترودر می شود. این اثر در شکل زیر نشان داده شده است.



ادامه

- اکسترودرهای همسو دارای خاصیت پمپاژ بالایی هستند که به خاطر عمل دابل مارپیچها است.
- اکسترودرهای ناهمسو تنش برشی بالایی ایجاد می کنند که به خاطر عمل غلتک زنی بالا بین مارپیچها است و خیلی برای پراکنده کردن پیگمنتها و روغنها درون زمینه پلیمری مناسب است.

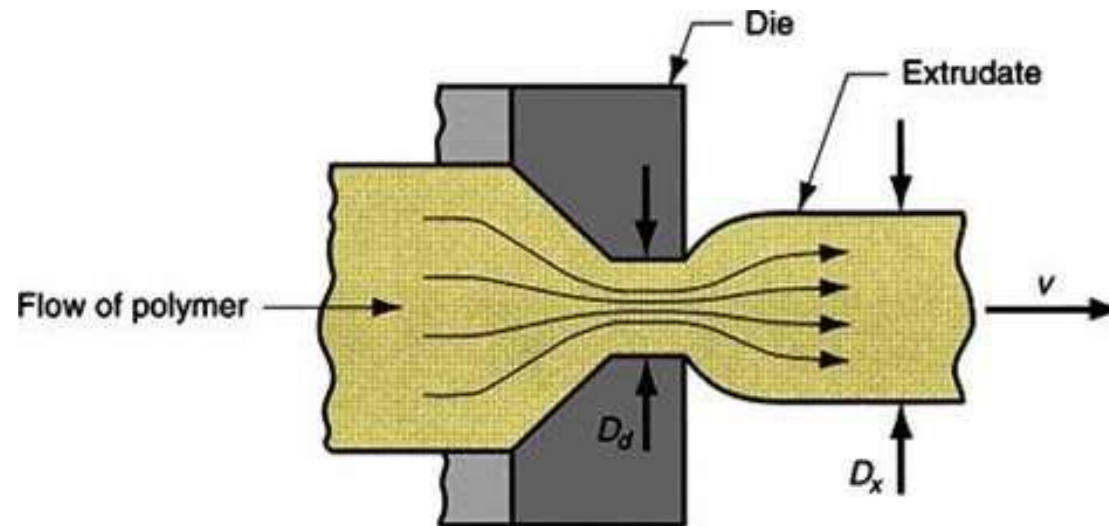
اکسترودرهای دو ماریجه



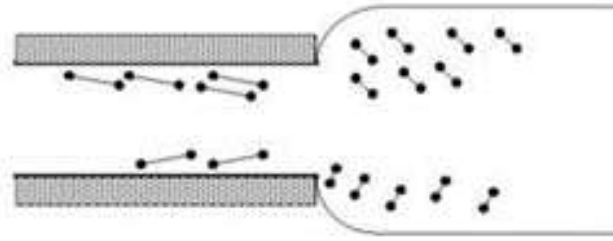
معایب و مشکلات اکستروژن

متورم شدن SWELL

- اندازه و ابعاد پروفیل ماده اکستروود شده افزایش می یابد که منعکس کننده تمایل آن به بازگشت به سطح مقطع بزرگ قبلی که درون محفظه اکستروودر بوده قبل از ورود به قالب، میباشد.



متورم شدن



○ متورم شدن به دلیل افت ناگهانی فشار که باعث آزاد شدن زنجیره های پلیمری می شود رخ می دهد.

○ پلیمرها مواد ویسکوالاستیک هستند ← آزادسازی تنش وابسته به زمان

○ تورم قالب = $\frac{D_2 - D_1}{D_1}$

D1 و D2 به ترتیب قطر ورودی قالب و قطر قطعه خارج شده می باشد.

○ تورم قالب بین ۱۰ تا ۱۰۰ بستگی به عوامل می باشد:

- جنس ماده
- دمای ذوب
- سرعت اکستروژن
- هندسه قالب

متورم شدن

نکات:

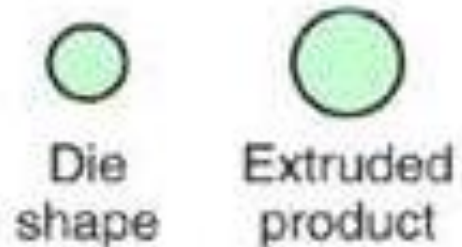
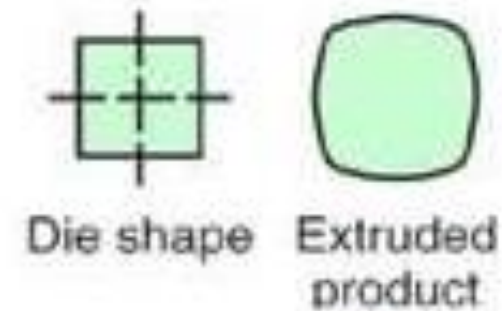
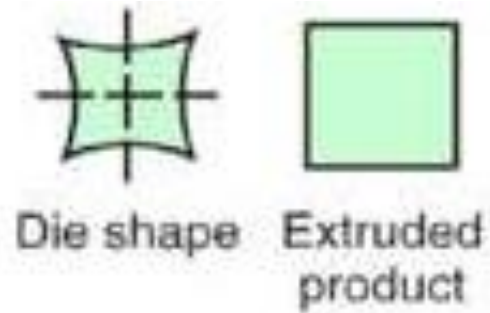
- قالب با پهنای کم باعث ورم بالاتر می شود.
- قالب با پهنای بالا باعث ورم کمتر می شود.
- نرخ خروجی بالاتر منجر به تولید گرمای ویسکوز می شود. (گرمای اصطکاکی)
- نرخ خروجی بالاتر منجر به ورم بالاتر می شود.

متورم شدن

چگونه از متورم شدن جلوگیری شود؟

- کاهش نرخ اکستروژن (سرعت مارپیچ)
- افزایش پهنه قالب
- افزایش نسبت عقب نشینی با بهبود عوامل طراحی

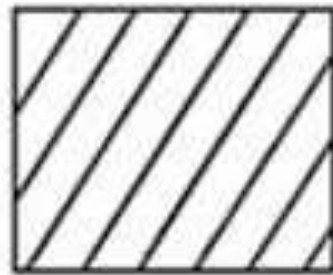
متورم شدن



تفاوت بین شکل قالب و مقطع محصول اکستروود شده:

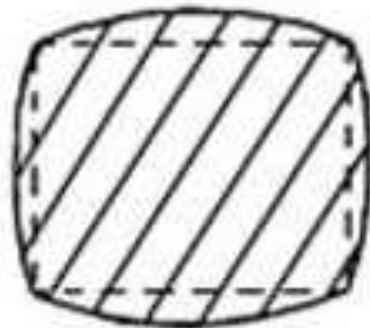
متورم شدن

اثر هندسه قالب:



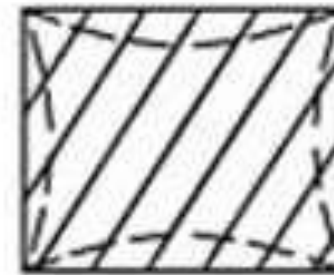
X

Required
section



Y

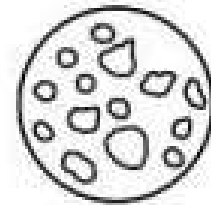
Geometrically square
die gives barrel effect



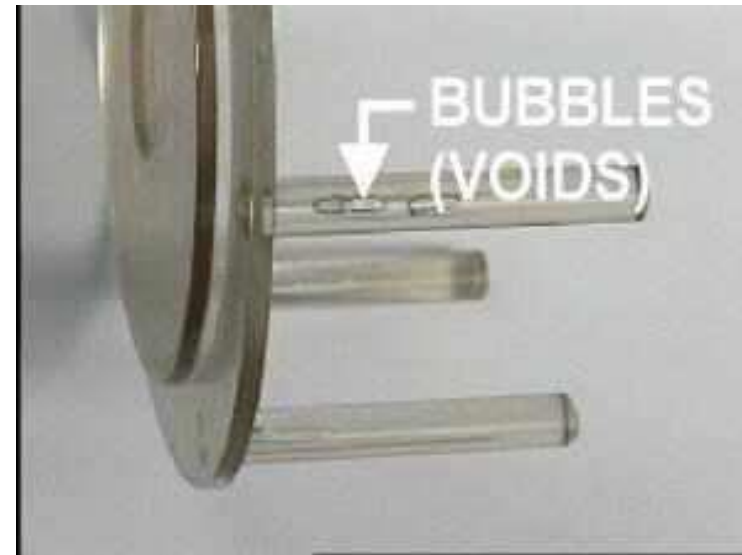
Z

Correct die form to
produce a geometrically
correct shape

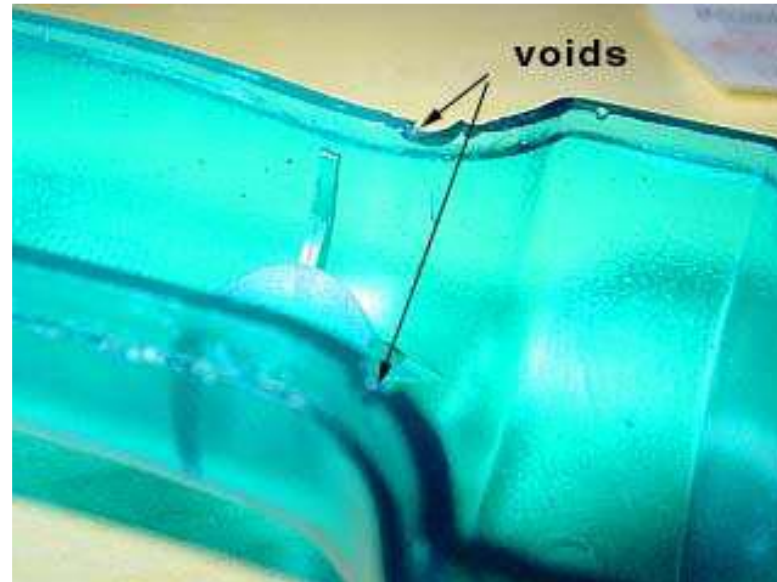
حباب در محصول اکسترود شده



جاب در محصول اکسترود شده



حباب در محصول اکسترود شده



علت ها

جذب رطوبت

حبس هوا

تخریب پلیمر

depolymerization

افزودنی های ناسازگار

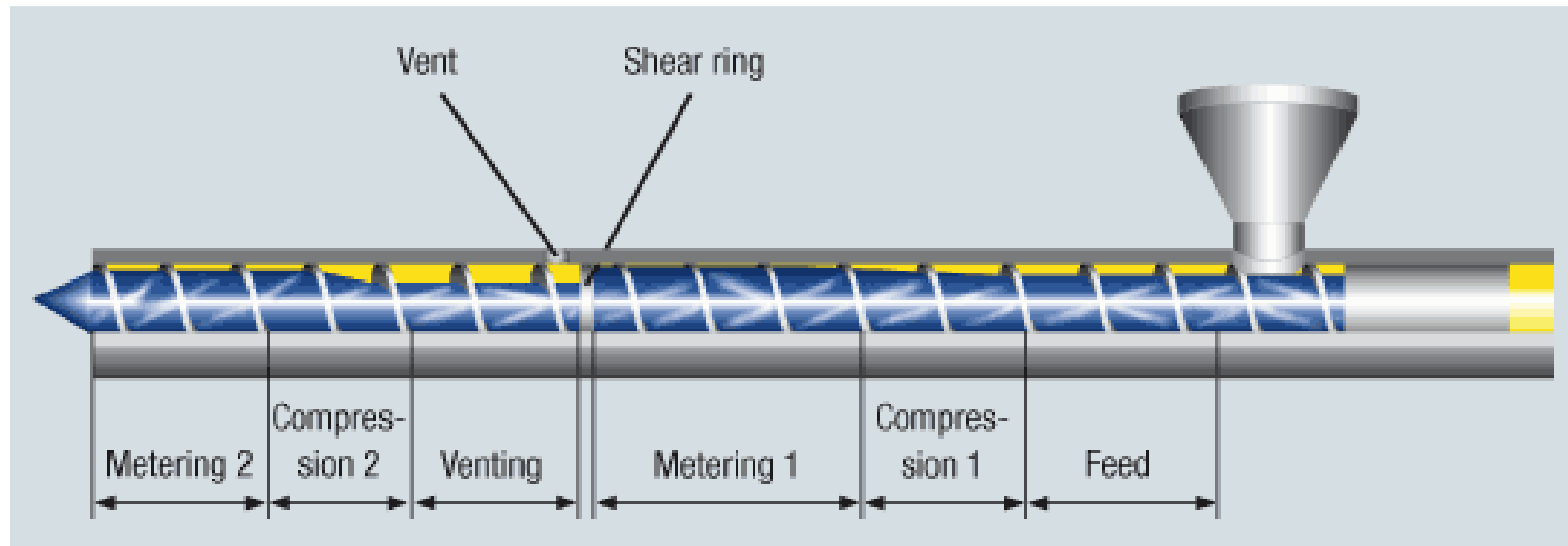
علت ها: جذب رطوبت

- پلیمرها معمولاً خاصیت جذب رطوبت بالایی دارند. برخی پلاستیکها مانند پت، نایلون، و پلی کربنات در اثر جذب آب ضعیف می شوند.
- وقتی دانه ها یا گرانولهای پلیمری گرم میشوند، آب جذب شده بخار می شود. آن از میان اکسترودر عبور کرده و وقتی فشار در دهانه قالب افت می کند به نقطه جوش می رسد.
- نتیجه آن تشکیل حباب داخل نمونه است.

علت ها: جذب رطوبت

راه حل ها:

- به منظور حذف رطوبت، نمونه بایستی قبل از فرآوری و ریخته شدن درون قیف خشک شود.
- خشک کن ها رطوبت نمونه ها را تا 0.01% که برای اجتناب از تشکیل حباب کافی است، کاهش می دهند.
- روی اکسترودر باید خروجی برای خارج شدن رطوبت حذف شده تعبیه شود.



علت ها: حبس هوا

این عیب موقعی رایج می شود که به جای دانه (قرص) یا گرانول پلیمری از پودر استفاده شود.

این عیب وقتی از دانه ها (قرص ها) یا پرانول پلیمری در اکسترودرهای با محفظه بلند استفاده می شود رخ نمی دهد.



علت ها: حبس هوا

راه حل ها:

□ اجتناب از سرعت بالای اکستروژن.

□ خروجی ها و قیف های خلاء هوای حبس شده را حذف میکنند. برای فرآوری پودر اینکار لازم است زیرا به دلیل فاصله کم بین پودرها (به دلیل ریز بودن پودر) امکان فرار هوا وجود ندارد.

علت ها: تخریب پلیمر

- افزایش بیش از حد دما می تواند باعث تخریب پلیمر شود. تخریب از یک پلیمر به پلیمر دیگر متفاوت است. برای مثال PVC خیلی به افزایش دما حساس است.
- این تخریب باعث شکل گیری گازهایی درون ماده می شود.

علت ها: تخریب پلیمر

راه حل ها:

- اجتناب از گرم شدن بیش از حد پلیمر.
- کنترل دمای خیلی دقیق برای مواد مستعد تخریب لازم است.

علت ها: depolymerization

- در این فرآیند، یک پلیمر به یک مونومر یا ترکیبی از مونومرها تبدیل می شود. این رخداد در دمای بالا با افزایش آنتروپی رخ می دهد.
- برخی از محصولات پلیمریزاسیون مجدد، مونومرهای فراری هستند که می توانند داخل ماده محبوس شوند.

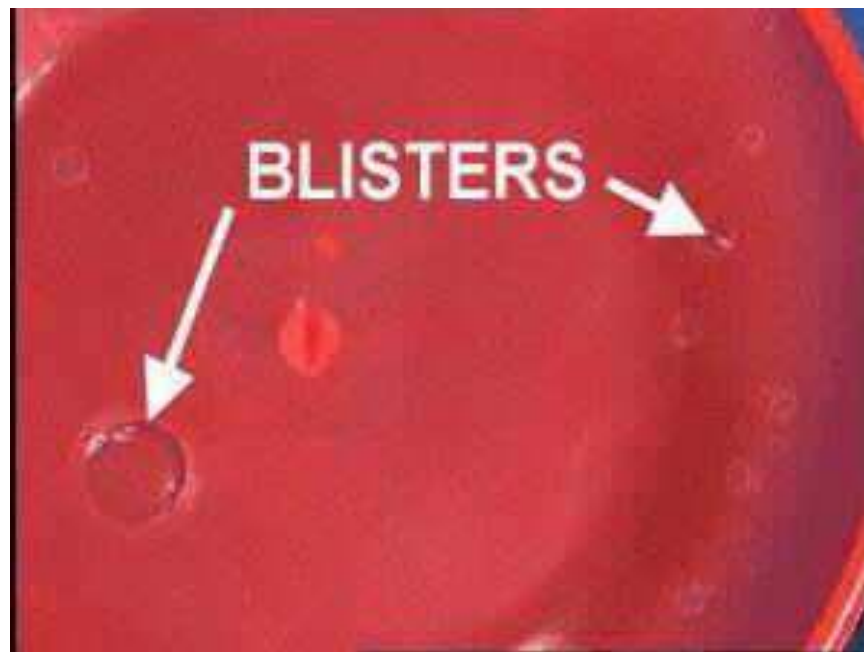
راه حل ها:

- اجتناب از گرم شدن بیش از حد و اطمینان از ایمن بودن دما

تاول زدن

□ تاول زدن ممکن است به دلیل جذب آب توسط گرانول یا سطح خود ماده باشد. مقدار بخار تولید شده برای ایجاد تاول به موارد زیر بستگی دارد:

- مقدار آب موجود
- دمای اکستروژن



تاول زدن: دلایل

□ سرعت بالای چرخش ماریچ

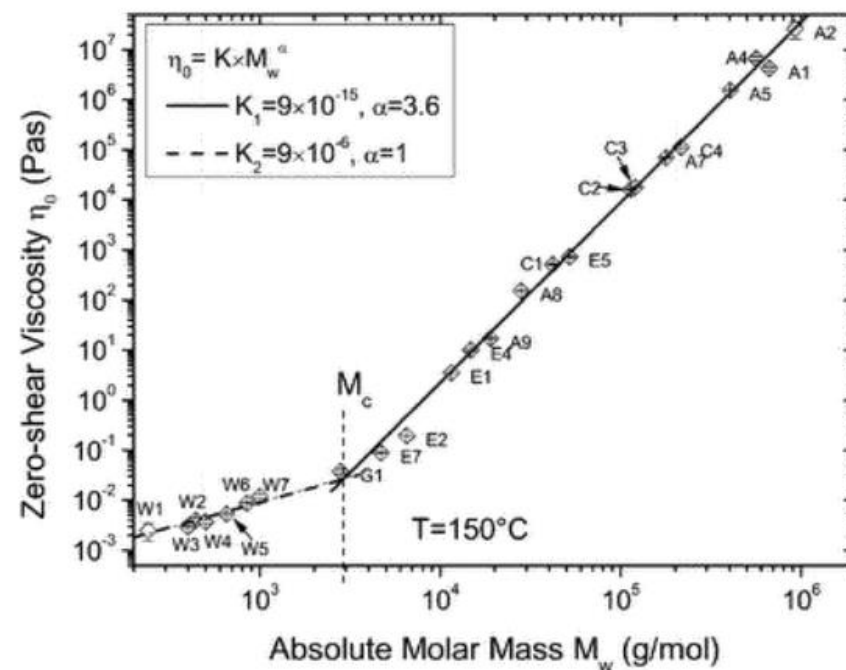
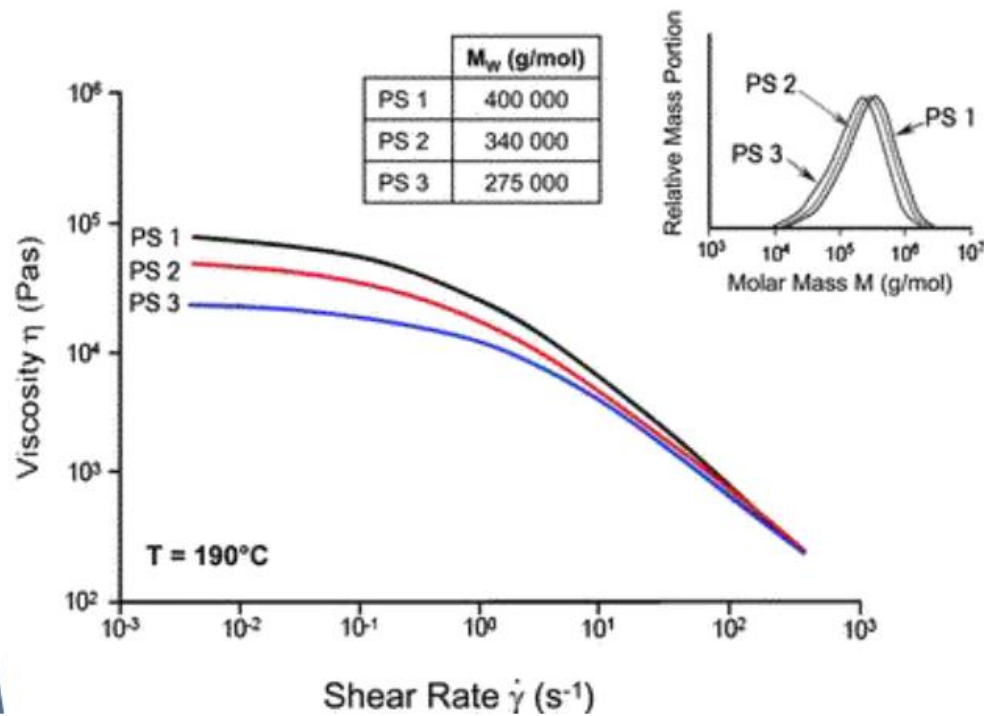
وقتی سرعت چرخش اکسترودر بالا باشد تمایل به وارد کردن هوا به درون مذاب پلیمر دارد. این هوای اضافی ممکن است در طول قالبگیری خارج نشده و در سطح قطعه به صورت تاول باقی بماند.

□ فشار پستی پایین:

فشار پستی چگالی پلیمر را تنظیم می کند. فشار کم باعث می شود پلیمر به اندازه کافی چگال نشده و نتواند گازهای اضافی را به بیرون هل دهد.

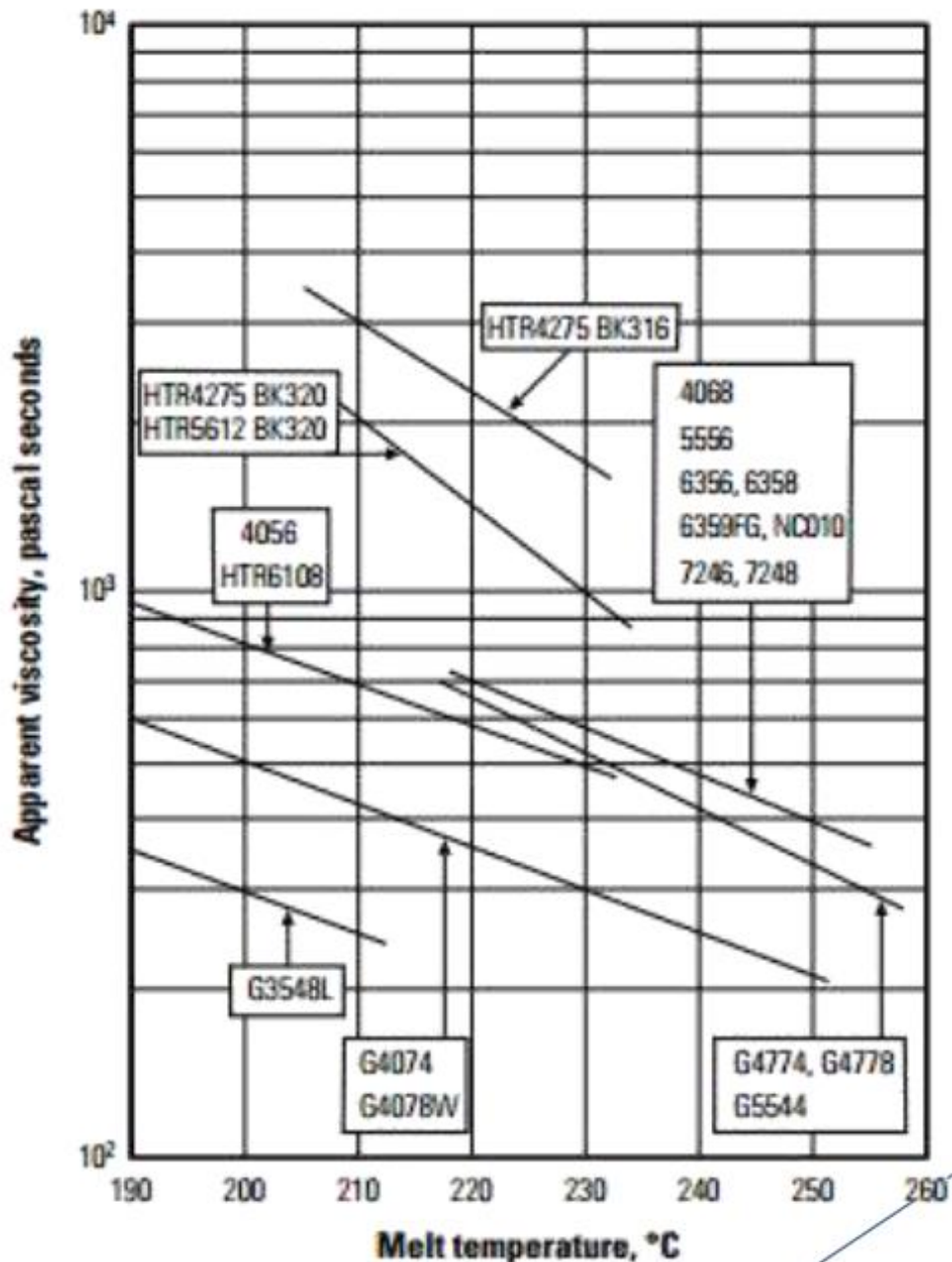
□ استفاده از یک پروفیل دمایی مسطح تر در طول محفظه

رابطه:



وقتی که مشکل در کار با پلیمرهای مایع وجود دارد، اغلب توصیه می شود از پلیمرهای با وزن مولکولی بالاتر استفاده شود.

برآمدگی



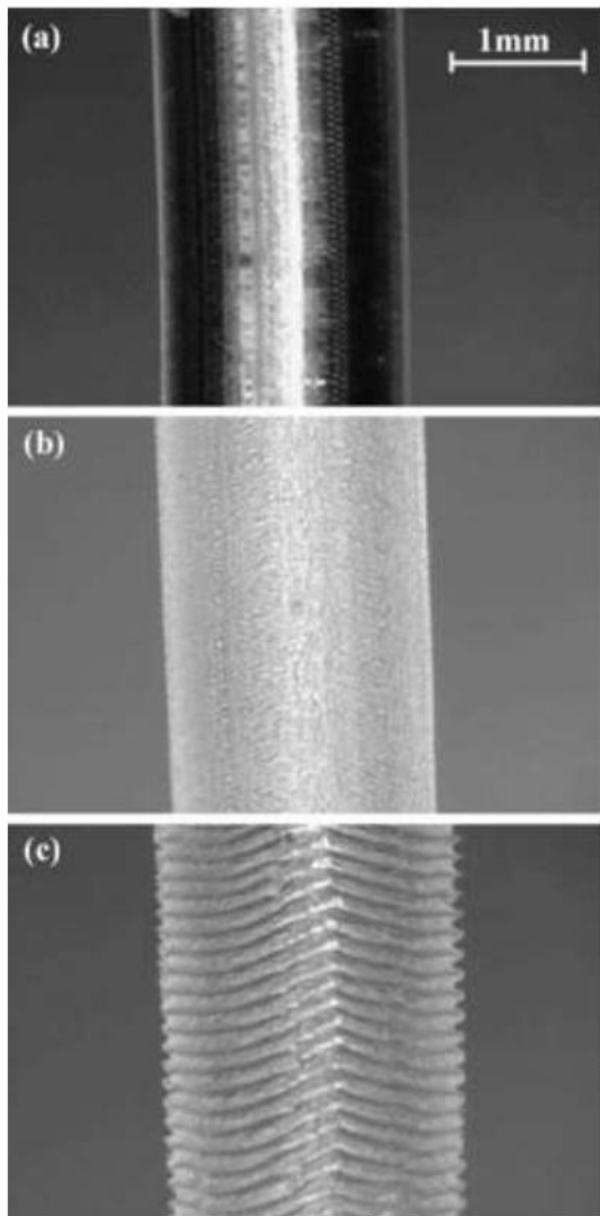
□ برخی محصولات اکستروژن ممکن است سطحی براق و پرداخت داشته باشند اما دارای برآمدگی باشند.

□ این معمولاً ناشی از اختلاط ضعیف مذاب است.

□ کاهش دمای مذاب در قالب ویسکوزیته مذاب را افزایش داده و در نتیجه باعث افزایش فشار می شود. بنابراین کاهش دمای قالب اکستروژن می تواند به کاهش برآمدگی کمک کند.

پوست کوسه ای

□ پوست کوسه ای با افزایش دما کاهش می یابد.



پوست کوسه ای: فشار پلاتو

□ پوست کوسه ای با افزایش دما کاهش می یابد.

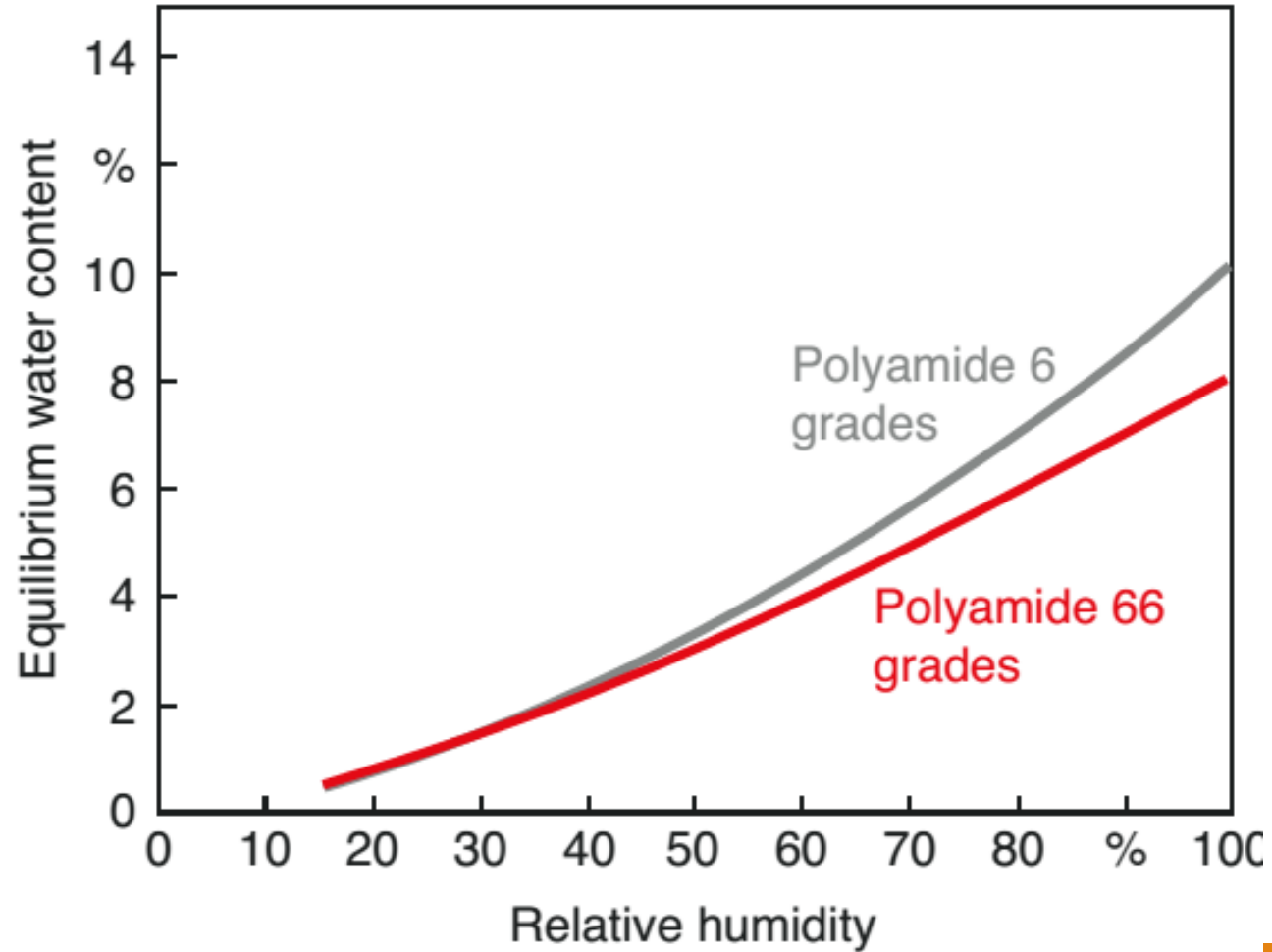
Plasticization

- پلاستی سائزرها به عنوان کمک فراوری استفاده می شوند زیرا باعث کاهش تخریب پلیمرها در دمای بالا می شوند. مثلاً نیتريد سلولوز بدون پلاستی سائزر در دمای فراوری تخریب می شود.
- کاربرد دیگر پلاستی سائزرها تغییر خواص مکانیکی ماده از حالت سخت به نرم است. مثلاً DOP باعث نرم شدن PVC می شود.
- پلی آمید جذب رطوبت بالایی دارد و در نتیجه آب می تواند خواص مکانیکی آن را اندکی تغییر دهد. پس آب می تواند نوعی پلاستی سائزر باشد.

پلاستی سایزهای مرسوم و کاربرد آنها

Plasticizer	Polymers	Plasticizer type
Diethyl phthalate (DOP)	Polyvinyl chloride and copolymers	General purpose, primary plasticizer
Tricresyl phosphate (TCP)	Polyvinyl chloride and copolymers, cellulose acetate, cellulose nitrate	Flame retardant, primary plasticizer
Diethyl adipate (DOA)	Polyvinyl chloride, cellulose acetate, butyrate	Low temperature plasticizer
Diethyl sebacate (DOS)	Polyvinyl chloride, cellulose acetate, butyrate	Secondary plasticizer
Adipic acid polyesters (MW = 1500-3000)	Polyvinyl chloride	Non-migratory secondary plasticizer
Sebacic acid polyesters (MW = 1500-3000)	Polyvinyl chloride	Non-migratory secondary plasticizer
Chlorinated paraffin (%Cl = 40-70) (MW = 600-1000)	Most polymers	Flame retardant, plasticizer extenders
Bi- and terphenyls (also hydrogenated)	Aromatic polyesters	Various
N-ethyl-toluene sulfonamide	Polyamides	General purpose, primary plasticizer
Sulfonamide-formaldehyde resins	Polyamides	Non-migratory secondary plasticizers

میزان جذب آب پلی آمید



رفتار پلیمرها به سمت حلالها بستگی به طبیعت حلال و ساختار مولکولی پلیمر دارد.

اگر بلوک ساختمانی اصلی ماکرو مولکول و مولکول حلال یکی باشند یا طبیعت مشابهی داشته باشند، جذب یک محلول منجر به باد کردن می شود. اگر مقدار کافی اضافه شود، پلیمر در حلال حل می شود.

مناطق کریستالی گرمانرمهای نیمه بلورین، معمولاً تحت تاثیر حلال قرار نمی گیرند، در حالیکه در مناطق بی شکل براحتی نفوذ می کنند.

بعلاوه درجه تشکیل پیوند عرضی در گرماسخت ها و الاستومرها به اینکه آیا یک ماده می تواند بوسیله حلال نفوذپذیر باشد شدیداً تحت تاثیر قرار می گیرد.

اگر فاصله بین مولکولهای پیوند عرضی خورد کوتاهتر باشد مولکولهای حلال کمتری می توانند در آنها نفوذ کنند.

الاستومرها در حضور حلال ورم می کنند در حالیکه گرماسختها با درجه بالای پیوند عرضی اینگونه نیستند و غیرقابل حل هستند.

□ میزان حلالی که جذب می شود فقط به ساختار شیمیایی دو ماده بستگی ندارد بلکه به دما هم بستگی دارد. افزایش دما نیروی کوالانسی را کاهش داده و بنابر این نفوذ پذیری افزایش می یابد.

□ هر چند تعیین قابلیت انحلال پلیمرها مشکل است، اما قوانینی برای تخمین آن وجود دارد. ساده ترین آنها : same dissolves same . مثلاً وقتی دو پلیمر و حلال دارای یک نیروی والانس (نیروی یکسان برای انجام واکنش شیمیایی) باشند انحلال پذیری وجود دارد.

□ قابلیت حل شدن پلیمر و حلال از رابطه ترمودینامیک نیز قابل پیش بینی است:

$$\Delta G \square \Delta H - T\Delta S$$

where ΔG is the change in free energy, ΔH is the change in enthalpy, ΔS the change in entropy, and T the temperature.

ادامه

□ اگر ΔG منفی باشد انحلال امکانپذیر است اما اگر مثبت باشد انحلال امکانپذیر نیست.

□ تغییر در آنتروپی هنگام انحلال پلیمر خیلی اندک است بنابراین فاکتور تعیین کننده اینکه آیا انحلال صورت می گیرد یا نه به تغییرات آنتالپی بستگی دارد.

□ معادله زیر توسط Hildebrand برای تعیین تغییرات آنتالپی در حین انحلال پیشنهاد شده است:

$$\Delta H = V \left(\left(\frac{\Delta E_1}{V_1} \right)^{1/2} - \left(\frac{\Delta E_2}{V_2} \right)^{1/2} \right)^2 \phi_1 \phi_2 \quad (6.23)$$

where V is the total volume of the mixture, V_1 and V_2 the volumes of the solvent and polymer, ΔE_1 and ΔE_2 their energy of evaporation and, ϕ_1 and ϕ_2 their volume fractions. Equation 6.23 can be simplified to

$$\Delta H = V (\delta_1 - \delta_2)^2 \phi_1 \phi_2 \quad (6.24)$$

where δ is called the solubility parameter and is defined by

$$\delta = \left(\frac{\Delta E}{V} \right)^{1/2}$$

- اگر پارامتر انحلال دو ماده به هم تقریبا نزدیک باشد، آنها حل خواهند شد.
- اگر قدر مطلق اختلاف دو پارامتر انحلال کمتر از یک باشد انحلال صورت می گیرد.

پارامتر انحلال برای پلیمرهای مختلف

Polymer	$\delta(\text{cal/cm}^3)^{1/2}$
Polytetrafluoroethylene	6.2
Polyethylene	7.9
Polypropylene	8.0
Polyisobutylene	8.1
Polyisoprene	8.3
Polybutadiene	8.6
Polystyrene	9.1
Poly(vinyl acetate)	9.4
Poly(methyl methacrylate)	9.5
Polycarbonate	9.9
Polysulfone	9.9
Poly(vinyl chloride)	10.1
Polyethylene terephthalate	10.2
Polyamide 6	11.0
Cellulose nitrate	11.5
Poly(vinylidene chloride)	12.2
Polyamide 66	13.6
Polyacrylonitrile	15.4