

کارگاه آموزشی تکنولوژی اکسترودرهای تک پیچ



مهندس نوراله میرزائیان

بهار ۱۴۰۴

انجمن ملی صنایع پلیمر ایران

تهران- کیلومتر ۱۵ اتوبان تهران کرج- بلوار پژوهش- پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران ساختمان مرکز رشد ۱- طبقه دوم- واحد ۳۶

وب سایت: www.inpia.ir

۰۲۱-۴۴۱۸۲۸۹۶

تلفن:

۱ ماشین آلات فرآیند اکستروژن

۱-۱- اکسترودر چیست؟

بمنظور تبیین و تشریح اکسترودر، لازم است در ابتدا برخی پارامترها را تعریف نمود. اکسترودر کردن به معنای بیرون راندن و بیرون انداختن می باشد. هنگامی که ماده ای اکسترودر می شود ماده تحت نیرویی از میان روزنه ای به نام دای به بیرون رانده شده و شکل سطح مقطع خروجی دای را به خود می گیرد . بطور مثال هنگامی که شما تیوب خمیر دندان را فشار می دهید تا خمیر دندان خارج شود در واقع شما خمیر دندان را اکسترودر نموده اید. دستگاهی که برای اکسترودر نمودن و بیرون راندن ماده استفاده می شود اکسترودر نام دارد. مواد مختلفی قابلیت اکسترودر شدن دارند مانند: خاک، سرامیک، مواد خوراکی، فلزات و البته پلاستیک ها .

وظیفه اصلی یک اکسترودر ایجاد فشار کافی در مواد بمنظور بیرون راندن مواد از میان دای می باشد. فشار مورد نیاز جهت این امر به شکل هندسی دای ، مشخصات جریان مواد و شدت جریان بستگی دارد. اساساً یک اکسترودر ماشینی توانمند برای ایجاد فشار می باشد، به عبارت دیگر اکسترودر یک پمپ است. یک اکسترودر پلاستیک، یک پمپ برای مواد پلاستیکی است. اما لازم است توجه شود که برخی اکسترودرها نه تنها مواد را اکسترودر می کنند بلکه مواد را کاملاً نرم و ذوب (Plasticating Extruder) می کنند. این اکسترودرها توسط دانه های پلاستیکی جامد تغذیه شده و یک پلاستیک کاملاً ذوب شده به دای تحویل می دهد. از طرف دیگر ماشینی که پلاستیک مذاب را بدون ذوب کردن اکسترودر می کند " اکسترودر با خوراک مذاب ^۱ " نامیده می شود. اکسترودرها معمول ترین ماشین در صنعت فرآیند پلاستیک ها هستند. اکسترودرها تنها در عملیات اکستروژن استفاده نمی شوند بلکه در اکثر عملیات قالبگیری نیز از اکسترودر استفاده می کنند. به عنوان مثال : قالبگیری تزریقی و قالبگیری دمشی. اصولاً هر قطعه پلاستیکی حداقل یک بار از اکسترودر عبور کرده است.

۱-۲- انواع مختلف اکسترودر

در صنعت، سه نوع اکسترودر وجود دارد: اکسترودر مارپیچ دار که معمول ترین نوع اکسترودر می باشد، اکسترودر رفت و برگشتی^۲ و اکسترودر دیسکی^۳ جدول ۱،۱ دسته بندی انواع اکسترودر را نشان می دهد.

جدول ۱،۱- دسته بندی انواع اکسترودر پلیمرها

Screw extruders (continuous)	Single screw extruders	Melt fed
		Plasticating
		Single stage
		Multi stage
		Compounding
Disk or drum extruders (continuous)	Multi screw extruders	Twin screw extruders
		Gear pumps
		Planetary gear extruders
		Multi (>2) screw extruders
		Spiral disk extruder
Reciprocating extruders (discontinuous)	Viscous drag extruders	Drum extruder
		Diskpack extruder
		Stepped disk extruder
	Elastic melt extruders	Screwless extruder
		Screw or disk type melt extruder
Reciprocating extruders (discontinuous)	Ram extruders	Melt fed extruder
		Plasticating extruder
		Capillary rheometer
	Reciprocating single screw extruders	Plasticating unit in injection molding machines
		Compounding extruders such as the Kneader

^۱ Melt-feed extruder

^۲ Reciprocating extruder

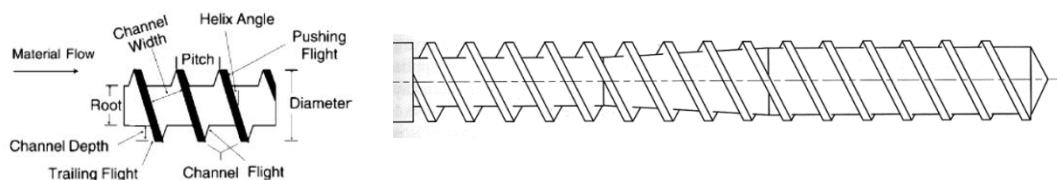
^۳ Disk or drum extruder

در ابتدا به تشریح اجزای مختلف بخش بالا دست خط می پردازیم. دستگاه اکسترودر مهم ترین قسمت در بخش بالادست خط تولید می باشد. اجزای دستگاه اکسترودر عبارتست از :

- مارپیچ یا ماردون (Screw)
- سیلندر (Barrel)
- دهانه تغذیه (Feed throat)
- قیف (Hopper)
- سیستم سرمایش - گرمایش سیلندر (Barrel Heating & Cooling)
- صفحه مذاب شکن (Breaker Plate)
- توری (Screen Pack)
- قوای محرکه اکسترودر (Extruder Drive)
- کاهش دهنده (Reducer or Gearbox)
- پمپ های دنده ای (Gear Pump)
- سیستم کنترل و اندازه گیری (Control & Measurement System)

۱-۳-۱- ماردون اکسترودر

ماردون یا مارپیچ (Screw)، قلب دستگاه اکسترودر است. ماردون یک میله استوانه ای بلند است که یک یا چند پره به دور آن پیچیده شده (شکل ۶،۱) و درون یک سیلندر (Barrel) می چرخد.



شکل ۶،۱- تصویر شماتیک ماردون دوپره (دوکاناله) و تعریف اجزای ماردون تک پره (تک کاناله)

ماردون در دستگاه اکسترودر از اهمیت بالایی برخوردار است چرا که عملیات انتقال مواد، ایجاد حرارت، ذوب و اختلاط مواد پلاستیکی تقریباً توسط آن انجام می شود. پایداری فرآیند و کیفیت محصول اکستروود شده، بسیار وابسته به طراحی ماردون می باشد.

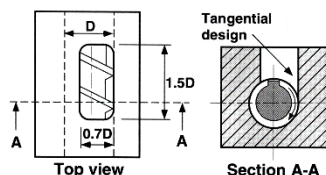
قطر خارجی ماردون، از نوک پره بالا تا نوک پره پایین، در اکثر ماردون ها ثابت می باشد. لقی بین ماردون و سیلندر معمولاً کوچک است. بطور کلی نسبت لقی شعاعی به قطر ماردون حدود ۰،۰۰۱ می باشد. جزئیات طراحی ماردون در فصل های آینده مورد بررسی قرار می گیرد. در آمریکا موادی که جهت ماردون معمولاً استفاده می شود فولاد ۴۱۴۰ بوده که ماده ای با قیمت نسبت ارزان با میزان کربن متوسط می باشد. جداول ۲،۱ ، ۳،۱ و ۴،۱ مشخصات موادی که معمولاً برای ماردون اکسترودر پلیمرها استفاده می شود را نشان می دهند.

جدول ۲،۱- مواد مشابه یا معادل اروپایی

US designation	European designation
8620	21NiCrMo2
4140 Heat treated	42CrMo4
Nitralloy 135M	41CrAlMoZ
304 Stainless steel	X5CrNi189
316 Stainless steel	X5CrNi189
H-13 Tool steel	X40CrMoV51
D-2 Tool steel	X155CrVMo121

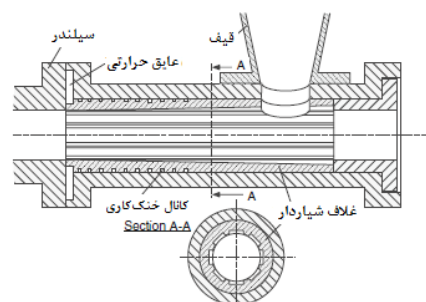
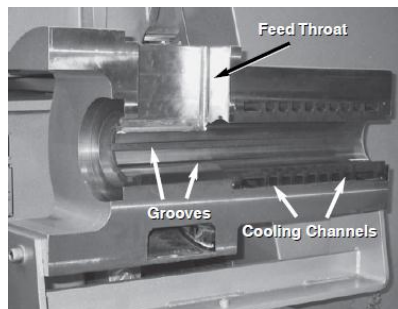
شکل ۸،۱ (الف) یک نوع طراحی معمول برای ورود مواد را نشان می‌دهد. شکل ۸،۱ (ب) یک طرح ورودی بریده^۱ را نشان می‌دهد که بیشتر برای اکسترودر با خوراک مذاب استفاده می‌شود. خطر این نوع طراحی، بخش گوه‌مانند، بین مارپیچ و ورودی خوراک می‌باشد. اگر مذاب نسبتاً سفت و یا بسیار الاستیک باشد، نیروی جانبی زیادی به ماردون وارد می‌شود. این نیرو می‌تواند جهت خم کردن ماردون و فشار دادن آن به سمت سطح سیلندر به اندازه کافی بزرگ باشد. لذا این امر می‌تواند منجر به استهلاک و سایش شدید گردد. مشکل مذکور زمانی حادث می‌شود که این طرح برای خوراک‌دهی دانه‌ها یا پودرهای پلیمری جامد استفاده شود. بنابراین از این شکل هندسی فقط برای خوراک‌دهی به صورت مذاب استفاده می‌کنند. یک طرح بهتر در شکل ۸،۱ (ج) نشان داده شده است. در این طرح نیز یک بریدگی جهت افزایش میزان دریافت مواد وجود دارد و بخش گوه‌مانند در راستای شعاعی، صاف شده است.

شکل شکاف ورودی معمولاً مدور یا مستطیلی می‌باشد. برای انتقال هموار و مناسب مواد از قیف به دهانه تغذیه، بایستی سطح مقطع خروجی قیف با سطح مقطع ورودی دهانه تغذیه یکسان باشد. طول دهانه ورودی مواد به اکسترودر بایستی حدود ۱/۵ تا ۲/۵ برابر قطر داخلی سیلندر و عرض آن نیز باید ۰/۷ برابر قطر مذکور باشد (شکل ۹،۱).



شکل ۹،۱- مشخصات پیشنهادی برای ناحیه ورودی مواد در دهانه تغذیه

اکسترودرهای مجهز به سیلندر شیاردار^۲ اغلب دارای یک دهانه تغذیه ویژه، به منظور جادادن بخش شیاردار، می‌باشند. شکل ۱۰،۱ نمایی از یک دهانه تغذیه شیاردار را نشان می‌دهد. طول مؤثر شیارها بایستی از سه تا پنج برابر قطر تغییر کند. عمق شیارها در راستای طولی تغییر می‌کند. بیشترین عمق مربوط به ابتدای بدنه بوده که تا انتهای دهانه تغذیه، عمق شیارها به صفر می‌رسد.



شکل ۱۰،۱- بدنه تغذیه شیاردار و کانال‌های خنک کاری

در طراحی بخش تغذیه، چندین فاکتور مهم بایستی لحاظ گردد:

- قابلیت خنک کاری بسیار خوب
- عایق حرارتی خوب بین سیلندر و بخش تغذیه
- قابلیت تحمل فشارهای بالا

فاکتور خنک کنندگی خوب به واسطه تولید حجم بالایی از حرارت در اثر اصطکاک در این بخش می‌باشد. اگر حرارت به سرعت دور نشود پلیمر نرم و یا حتی ذوب می‌گردد. این امر به شدت اثربخشی قسمت شیاردار سیلندر را کاهش می‌دهد. استفاده از عایق حرارتی خوب بین سیلندر و بخش تغذیه به منظور کاهش انتقال حرارت از سیلندر به ناحیه تغذیه می‌باشد تا ظرفیت خنک سازی دهانه تغذیه به بیشترین حد ممکن برسد. در بخش تغذیه شیاردار، قابلیت ایجاد فشارهای بالا، از ۱۰۰ تا

¹ Undercut feed port

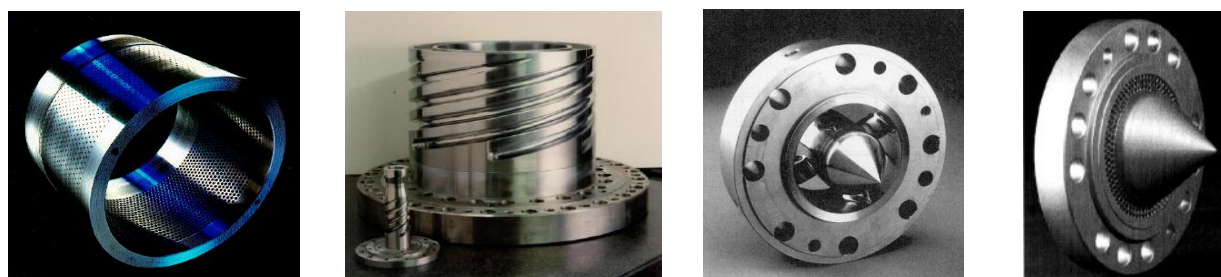
² Grooved barrel

۳. دبی جریان عبوری از دای

۴. خواص رئولوژیکی مذاب پلیمر

بایستی به این نکته توجه کرد که فشار پشت دای در اثر وجود دای به وجود می‌آید نه اکسترودر! اکسترودر فشار لازم جهت اعمال نیرو بر مواد داخل دای را تامین می‌کند. در حقیقت اگر دای وجود نداشته باشد هیچ گونه فشاری بعد از ماردون ایجاد نمی‌شود. در صورتی که پلیمر، دبی جریان، دای و دمای آن ثابت باشد فشار پشت دای ثابت خواهد بود حتی با تغییر اکسترودر (تک‌مارپیچه، دومارپیچه و...).

طراحی دای و آنالیز جریان درون دای، دو پارامتر بسیار پیچیده برای مهندسين طراح فرایندهای پلیمری هستند. یکی از دلایلی که آنالیز را با مشکل مواجه می‌سازد خواص ویسکوالاستیک پلیمرهاست. حتی در صورتی که بتوان سیالات پلیمری را ویسکوز فرض نمود، شکل هندسی کانال جریان بسیاری از دای‌ها پیچیده است. لذا مهندسين طراح بیشتر تمایل به طراحی به صورت تجربی دارند. شکل ۲۰،۱ برخی از طراحی‌های مختلف کلگی برای اکستروژن لوله را نشان می‌دهد.



شکل ۲۰،۱- انواع طراحی‌های مختلف کلگی برای تولید لوله

۱-۳-۱- قوای محرکه اکسترودر

قوای محرکه اکسترودر^۱ معمولاً یک موتور الکتریکی یا هیدرولیکی است که توان مورد نیاز جهت چرخاندن مارپیچ با سرعت دلخواه را تامین می‌کند. این موتور باید بتواند سرعت ثابتی جهت مارپیچ فراهم نماید چرا که نوسان در سرعت مارپیچ منجر به نوسانات خروجی اکسترودر شده که در نهایت باعث ناپایداری ابعادی محصول می‌گردد. لذا قابلیت ایجاد سرعت ثابت از پارامترهای مهم قوای محرکه اکسترودر می‌باشد. همچنین باید بتواند گشتاور لازم جهت چرخش مارپیچ را تامین کند. سومین پارامتر، توانایی تغییر سرعت مارپیچ در یک محدوده نسبتاً وسیع است. در طول سالیان گذشته انواع مختلف قوای محرکه جهت اکسترودرها استفاده شده است. مهم‌ترین انواع قوای محرکه عبارتند از:

- سیستم قوای محرکه موتور AC
- سیستم قوای محرکه موتور DC
- قوای محرکه هیدرولیکی

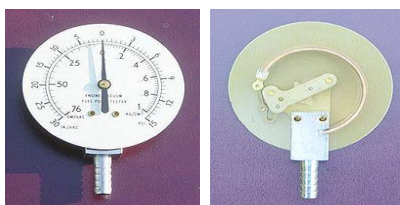
سرعت اسمی این موتورها معمولاً حدود ۱۸۰۰ rpm است در حالی که سرعت چرخش مارپیچ حدود ۱۰۰ rpm می‌باشد. بنابراین یک کاهش‌دهنده سرعت میان موتور و مارپیچ نیاز است. موتوره‌های مختلف را می‌توان برای اکسترودر استفاده نمود. موتوره‌های DC معمول‌ترین موتوره‌های مورد استفاده هستند، اما در حال حاضر استفاده از موتوره‌های AC رو به گسترش می‌باشد. در اکسترودرهای قدیمی اغلب از یک موتور جاروبک^۲ DC مجهز به سرعت‌سنج استفاده می‌شد. در این سیستم تغییرات سرعت، حدود یک درصد ماکزیمم سرعت خواهد بود. یک درصد تغییرات سرعت ممکن است برای برخی محصولات مطلوب باشد اما برای برخی فرایندهای با دقت بالا از قبیل تولید لوله‌های پزشکی مناسب نیست به ویژه زمانی که اکسترودر با سرعت پایین کار می‌کند.

^۱ Extruder drive

^۲ DC brush motor with tachometer feedback

۲-۲-۲- انواع مختلف وسایل اندازه گیری فشار (مبدل فشار)^۱

اندازه گیری فشار در اکسترودرهای اولیه، توسط گیج های بوردن پر شده با گریس^۲ انجام می شد. (شکل ۲.۲) سطح اطمینان این قبیل گیج ها خیلی خوب نیست. در دماهای بالا گریس تمایل به خروج دارد که این امر موجب آلوده شدن محصول به گریس و خطای اندازه گیری می گردد. همچنین وابستگی اندازه گیری فشار گیج بوردن به دما خیلی زیاد است لذا از این گیج دیگر به ندرت استفاده می شود.



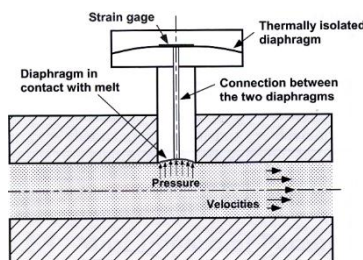
شکل ۲.۲- نمونه گیج بوردن

امروزه چندین نمونه مختلف مبدل فشار وجود دارد. معمول ترین آنها که در اکسترودر استفاده می شود عبارتند از :

۱. مبدل کشش سنج^۳

۲. مبدل پیزو مقاومت^۴

در مبدل های نوع اول یک کشش سنج به یک دیافراگم متصل شده است. فشار مذاب باعث تغییر شکل دیافراگم شده و سپس کشش سنج میزان تغییر شکل دیافراگم را اندازه گیری می کند (شکل ۳.۲). به دلیل این که کشش سنج نمی تواند در معرض دماهای بالا قرار گیرد، به دور از سیلندر یا پلیمر مذاب، قرار داده می شود. لذا از یک میله هیدرولیکی یا مکانیکی برای انتقال تغییر شکل دیافراگم به کشش سنج استفاده می شود.



شکل ۳.۲- اصول کار مبدل های کشش سنج

مبدل های کشش سنج می توانند به صورت لوله موئین^۵ یا میله باشند. در این مبدل ها از دو دیافراگم استفاده می شود که یکی با مذاب پلیمر در تماس است و دیگری به دور از مذاب و در تماس با کشش سنج می باشد. ارتباط بین این دو دیافراگم می تواند به صورت هیدرولیکی (نوع لوله موئین) و یا توسط یک میله باشد (شکل ۴.۲).

اکثر مبدل های لوله موئین توسط حیوه پر می شوند. از آنجایی که دیافراگم مبدل ها بسیار نازک است احتمال پاره شدن و نشت حیوه به درون پلاستیک و محیط کار وجود دارد. متأسفانه اکثر مبدل ها فاقد برچسب هستند که نشان دهد مبدل با حیوه پر شده است تا احتیاط های لازم و موارد ایمنی به اندازه کافی اعمال شود. شایان ذکر است این قبیل مبدل ها نباید برای موارد بهداشتی و بسته بندی مواد غذایی استفاده شوند. ماده جایگزین در این مبدل ها، Nak (پتاسیم-سدیم) می باشد.

¹ Pressure Transducer

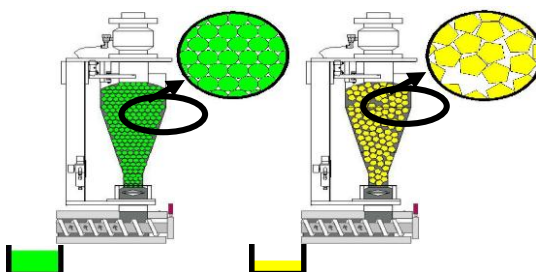
² Grease – filled Bourdon gauges

³ Strain gauge transducer

⁴ Piezo-resistive transducer

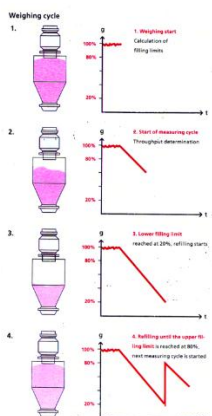
⁵ capillary

باشد. بطور کلی تغذیه کننده گروایمتریک دبی جرمی مواد را از طریق وزن نمودن کل تغذیه کننده و مواد درون آن کنترل می کند.



شکل ۲۷،۲- اثر دانسیته توده مواد بر خروجی اکسترودر

نرخ خروج مواد از تغذیه کننده به نحوی است که یک کاهش خطی در وزن با زمان حاصل شود. به هنگام پر شدن مجدد تغذیه کننده گروایمتریک، برای مدت کوتاهی سیستم اندازه گیری وزنی تبدیل به سیستم اندازه گیری حجمی می شود تا آشفتگی وزنی موجود، تحت کنترل قرار گیرد. شکل ۲۸،۲ نمونه ای از یک دستگاه گروایمتریک و شکل ۲۹،۲ چرخه مراحل کاری این دستگاه را نشان می دهند.

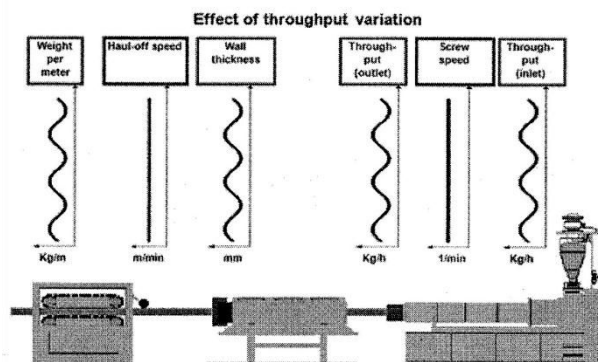


شکل ۲۹،۲- چرخه کاری دستگاه گروایمتریک



شکل ۲۸،۲- نمونه دستگاه گروایمتریک

لازم به ذکر است کنترل دقیق خوراک دهی باعث کاهش نوسانات در ضخامت و قطر لوله می گردد و از این رو کیفیت محصول نهایی را افزایش می دهد. شکل ۳۰،۲ اثر تغییر دبی ورودی بر سایر پارامترهای تولید و کیفیت محصول را نشان می دهد.



شکل ۳۰،۲- اثر تغییر دبی ورودی بر پارامترهای تولید و کیفیت محصول نهایی

۴ مشخصات مهم فرایندی پلیمرها

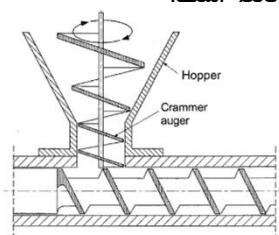
برای درک فرایند اکستروژن، تنها دانستن عملکرد و مشخصات سخت‌افزاری ماشین‌آلات کفایت نمی‌کند. به منظور درک کامل کل فرایند، بایستی بر خواص موادی که اکستروژن می‌شود اشراف داشت. مشخصات پلیمر، تعیین‌کننده صحت طراحی و رفتار فرایند می‌باشد. دو دسته خواص مهم در فرایند اکستروژن وجود دارد: خواص رئولوژیکی (رفتار جریان مواد) و دیگری خواص گرمایی. خواص رئولوژیکی بیان‌کننده این هستند که مواد هنگامی که تحت یک تنش قرار می‌گیرند چگونه تغییر شکل می‌یابند. خواص رئولوژیکی توده مواد در ناحیه خوراک‌دهی و قیف اکستروژن دارای اهمیت می‌باشد. خواص رئولوژیکی مذاب پلیمری در نواحی ذوب شدن، انتقال مذاب و دای مهم می‌باشند.

۴-۱- خواص توده مواد

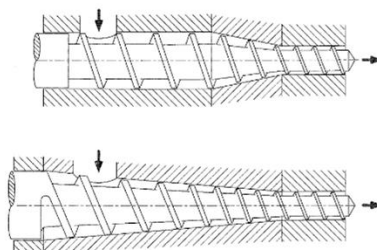
برخی از مهم‌ترین خواص توده مواد چگالی توده، ضریب اصطکاک و شکل و اندازه ذرات است. از این خواص، رفتار انتقال مواد توده را با دقت قابل قبولی می‌توان تشریح نمود. این خواص در بخش‌های ذیل با جزئیات بیشتر مورد بحث قرار می‌گیرند.

۴-۱-۱- چگالی توده مواد^۱

چگالی توده مواد، چگالی ذرات پلیمری شامل فضای خالی میان ذرات می‌باشد. این پارامتر به وسیله پر کردن یک ظرف با حجم مشخص (۱ لیتر یا بیشتر) بدون هیچ‌گونه اعمال فشار، اندازه‌گیری می‌شود. سپس ظرف پر شده وزن گردیده و پارامتر مذکور از حاصل تقسیم وزن مواد بر حجم ظرف محاسبه می‌شود. مواد با چگالی توده پایین ($\rho_b < 0.2 \text{ gr/cc}$) مشکلاتی را در ناحیه انتقال جامد (قیف یا ناحیه خوراک‌دهی اکستروژن) به وجود می‌آورند. مواد با ذرات دارای اشکال نامنظم معمولاً دارای چگالی توده پایینی هستند. هنگامی که چگالی توده پایین باشد دبی جرمی جریان نیز پایین خواهد بود. بنابراین نرخ انتقال مواد جامد برای تامین خوراک نواحی ذوب شدن و انتقال مذاب کافی نخواهد بود. برای کارکردن با این‌گونه مواد وسایل و اکسترودرهای ویژه‌ای طراحی شده‌اند. شکل ۱،۴ یک تغذیه‌کننده کرامر را نشان می‌دهد که به‌منظور بهبود فرایند انتقال مواد با چگالی توده پایین از قیف خوراک‌دهی به سیلندر اکستروژن استفاده می‌شود. همچنین شکل ۲،۴ اکسترودرهایی با طراحی خاص برای این کاربرد را نشان می‌دهد که قطر ناحیه خوراک‌دهی آنها بزرگتر از نواحی دیگر است.



شکل ۱،۴- نمونه تغذیه کننده کرامر



شکل ۲،۴- دو نمونه اکستروژن با طراحی خاص جهت کار کردن با مواد دارای چگالی توده پایین

آگاهی از نحوه تغییر چگالی توده مواد با تغییر فشار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است چرا که تا حدود زیادی تراکم‌پذیری مواد، تعیین‌کننده رفتار انتقال جامد است. فشردگی در اثر بازآرایی^۲ ذرات و تغییر شکل آنها حاصل می‌شود. زمانی

^۱ Bulk density

^۲ rearrangement

۵ اکسترودر چگونه کار می کند؟

مقدمه

در یک اکسترودر تعدادی عملیات انجام می شود که هر کدام از آنها برای عملکرد صحیح اکسترودر نقش کلیدی دارند. این عملیات ها عبارتند از:

- انتقال جامد
- ذوب شدن
- اختلاط
- انتقال مذاب
- گاز زدایی
- شکل دهی

گاز زدایی در همه اکسترودرها انجام نمی شود ، برخی اکسترودرها مجهز به یک منفذ هستند. منفذ این امکان را فراهم می کند تا گازها و مواد فرار از مذاب پلاستیک جدا شوند. عملیات های ذکر شده در بالا، به یکدیگر وابسته اند. بطور نمونه ، اگر دمای ناحیه شکل دهی یا دای کاهش داده شود این عمل بر انتقال مذاب، ذوب شدن، انتقال جامد و گاز زدایی (در اکسترودر منفذدار) اثر می گذارد.

بمنظور درک چگونگی کار اکسترودر بایستی از اتفاقاتی که در هر یک از مناطق عملیاتی اکسترودر رخ می دهد مطلع شد. نقاط شروع و پایان هر ناحیه عملیاتی وابسته به طراحی هندسی ماشین آلات ، خواص پلاستیک و شرایط فرآیندی دارد. بطور مثال، ذوب شدن جایی آغاز می شود که دمای پلاستیک از دمای ذوب آن بالاتر رود. این نقطه با تغییر دمای سیلندر و سرعت مارپیچ می تواند جابجا شود.

از طرف دیگر، شکل هندسی بخش های مختلف مارپیچ ثابت است. به عنوان مثال بخش خوراک دهی، قسمت اول مارپیچ با پره های عمیق می باشد و جایی است که انتقال جامد در آن اتفاق می افتد. اما عملیات انتقال جامد ممکن است قبل یا بعد از انتهای بخش خوراک دهی مارپیچ خاتمه یابد. این مسئله برای ذوب شدن در ناحیه گذار مارپیچ و یا انتقال مذاب در ناحیه سنجش مارپیچ نیز صادق است. لذا مرزهای بخش های مختلف مارپیچ ثابت هستند اما مرزهای مناطق عملیاتی می توانند با تغییر خواص پلاستیک و شرایط فرآیندی جابجا شوند.

۵-۱- انتقال جامد

در اکسترودر عملیات انتقال جامد در دو قسمت قیف تغذیه و در طول چند گام اول مارپیچ اتفاق می افتد. انتقال جامد در قیف تغذیه در اثر گرانش و وزن مواد صورت می پذیرد. مکانیزم انتقال در قیف، انتقال در اثر گرانش^۱ نامیده می شود. مواد از قیف به درون دهانه تغذیه افتاده و از آنجا به کانال مارپیچ سرازیر می شوند. انتقال در طول مارپیچ از اعمال نیروهای اصطکاکی بر ذرات پلاستیکی ایجاد می شود. این مکانیزم انتقال، انتقال در اثر درگ^۲ نامیده می شود که مکانیزم انتقال در نواحی انتقال جامد، ذوب و انتقال مذاب می باشد.

۵-۱-۱- انتقال در اثر گرانش

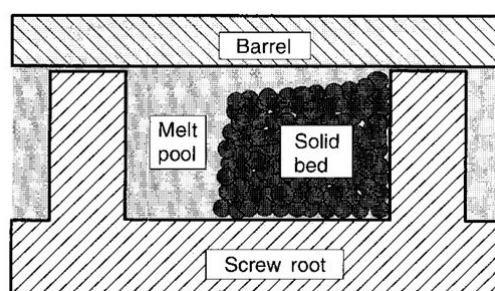
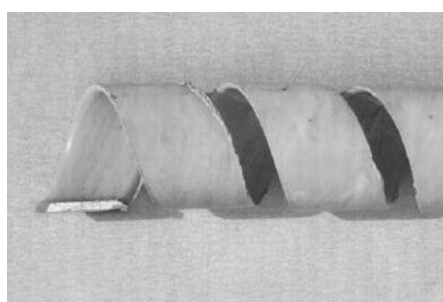
جریان در قیف تغذیه، می تواند کاملاً پیچیده و مشکل باشد. برخی عوامل باعث می شوند این بخش به خوبی کار نکند. به عنوان نمونه، اگر توده مواد شامل ذرات کوچک و بزرگ باشد، ذرات کوچک می توانند از ذرات بزرگ جدا شده و باعث ایجاد یک جریان غیر یکنواخت از درون قیف گردند. همچنین این مسئله منجر به ناپایداری در اکسترودر و خروجی متغیر می گردد.

¹ Gravity induced conveying

² Drag induced conveying

۵-۲-۱- ذوب شدن جامد از کنار (CSM^۱)

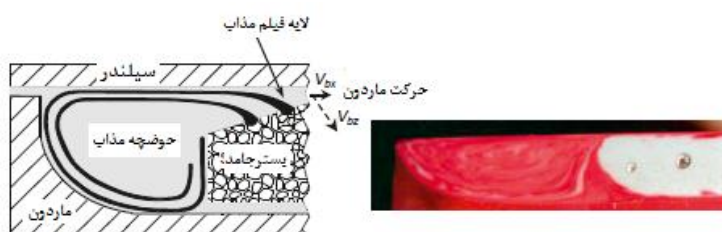
در این مدل ، در ابتدا ذرات جامد به یکدیگر فشرده شده و یک بستر جامد یکپارچه حلزونی شکل را تشکیل می‌دهند که در طول مارپیچ حرکت می‌کند. سپس در اثر حرارت حاصل از اصطکاک با سطح داخلی سیلندر، یک لایه نازک مذاب در فضای میان بستر جامد و سطح سیلندر تشکیل می‌گردد. سپس با ضخیم شدن این لایه، مذاب به فضای میان پره کانال و بستر جامد کشیده می‌شود (شکل ۱۲،۵). این مدل ذوب شدن را ذوب شدن جامد از کنار یا CSM می‌نامند که در اکثر اکسترودرهای تک‌مارپیچه به وقوع می‌پیوندد. همچنین در اثر ذوب شدن بستر جامد یک حوضچه مذاب در کنار پره فعال تشکیل می‌شود. همان طور که در شکل ۱۳،۵ نشان داده شده است، اختلاط در اثر ذوب شدن اتفاق می‌افتد. در صورتی که فرآیند ذوب شدن داخل اکسترودر کامل نشود، عیوب قابل توجهی به واسطه اختلاط ضعیف در محصول پدیدار می‌شود.



نمونه واقعی مواد بیرون آورده شده از اکسترودر و سطح مقطع آن

شکل شماتیک مدل CSM

شکل ۱۲،۵- ذوب شدن بستر جامد از کنار در اکسترودرهای تک‌مارپیچه



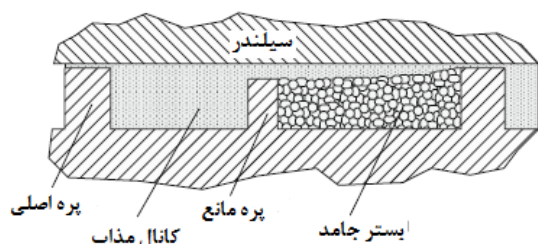
شکل ۱۳،۵- مکانیزم اختلاط در حین فرآیند ذوب شدن

۵-۲-۲- ذوب شدن جامد به شکل پراکنده (DSM^۲)

در این نوع ذوب شدن، ذرات جامد درون ماتریس مذاب پراکنده شده‌اند (شکل ۱۴،۵). اندازه ذرات جامد به تدریج کاهش می‌یابد تا ذوب کامل شود. این مدل ذوب شدن را ذوب شدن جامد به شکل پراکنده یا DSM می‌نامند. این مدل در اکسترودرهای دوماپیچه سرعت بالا و اکسترودرهای تک‌مارپیچه رفت و برگشتی آمیزه‌ساز مشاهده می‌شود. همان طور که قبلاً توضیح داده شد کارایی ذوب نمودن مدل DSM به مراتب بهتر از مدل CSM می‌باشد. همچنین طول ناحیه ذوب شدن مدل DSM به مراتب کوتاه‌تر از مدل CSM می‌باشد. در اکسترودرهای تک‌مارپیچه طول نواحی انتقال جامد و ذوب شدن حدود ۱۵ تا ۲۰D می‌باشد. لذا در صورت در اختیار داشتن یک اکسترودر با L/D برابر ۲۵ طول لازم جهت انتقال مذاب، اختلاط و یا گاززدایی کافی نمی‌باشد. در واقع اگر در فرآیندی گاززدایی لازم باشد بایستی طول مارپیچ ۳۵D-۳۰ انتخاب شود. این در حالی است که در اکسترودرهای دوماپیچه انتقال جامد و ذوب شدن در طولی معادل ۵D-۶D انجام می‌شود لذا این گونه اکسترودرها نسبت به اکسترودرهای تک‌مارپیچه توانمندتر هستند.

¹ Contiguous solids Melting

² Dispersed Solid Melting



شکل ۱۸.۵ - جدایی فازها در ماریچ‌های مانع‌دار

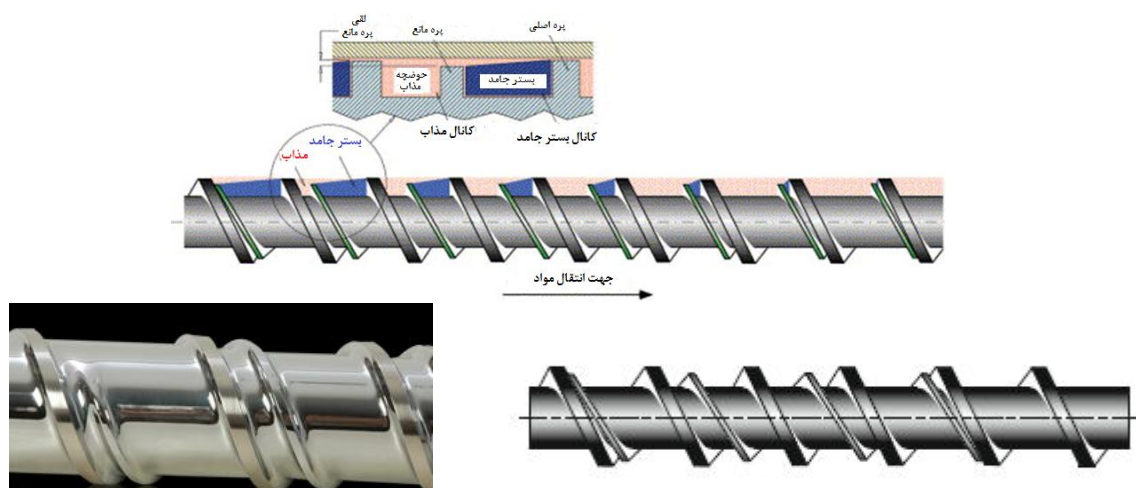
ماریچ مانع‌دار دارای مزایای زیر می‌باشد:

۱. با استفاده از ماریچ‌های مانع‌دار فرآیند اکستروژن پایدارتر می‌گردد.
 ۲. در اینگونه ماریچ‌ها، تمام مواد بطور کامل ذوب می‌شوند چرا که مواد تنها در صورتی می‌توانند از کانال بستر جامد خارج شوند که یا ذوب شده یا اندازه آنها خیلی کوچک شده باشد.
 ۳. به هنگام عبور مواد از روی پره مانع، یک برش اضافی به مواد وارد شده که به مذاب‌سازی و اختلاط کمک می‌کند.
- در کنار این مزایا، ماریچ‌های مانع‌دار معایبی نیز دارند :
۱. قابلیت اختلاط این ماریچ‌ها تفاوت چندانی با سایر ماریچ‌های معمولی ندارند.
 ۲. ماریچ‌های مانع‌دار گران هستند.

۳. نرخ مذاب‌سازی در طول ماریچ کاهش می‌یابد. لذا طول این گونه ماریچ‌ها بلندتر از ماریچ‌های معمولی است. با توجه به سازوکارهای توضیح داده شده، برای ماریچ‌های مانع‌دار طرح‌های مختلفی وجود دارد که مهم‌ترین آنها شرح داده می‌شود:

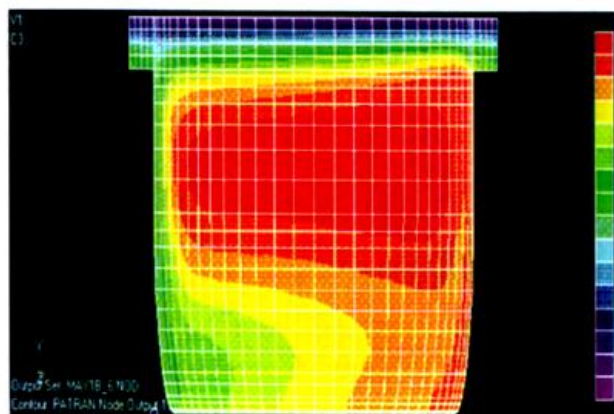
➤ طرح میلگر

این طراحی در شکل ۱۹.۵ نمایش داده شده است. ایده اصلی در این طرح بزرگتر بودن زاویه پیش پره مانع از زاویه پیش پره اصلی است. در این حالت کاهشی پیوسته در عرض کانال ایجاد می‌شود که به دنبال آن افزایشی در عرض کانال مذاب مشاهده می‌شود. به بیان دیگر، در این طرح تغییری آرام در عرض کانال جامد و مذاب دیده می‌شود.

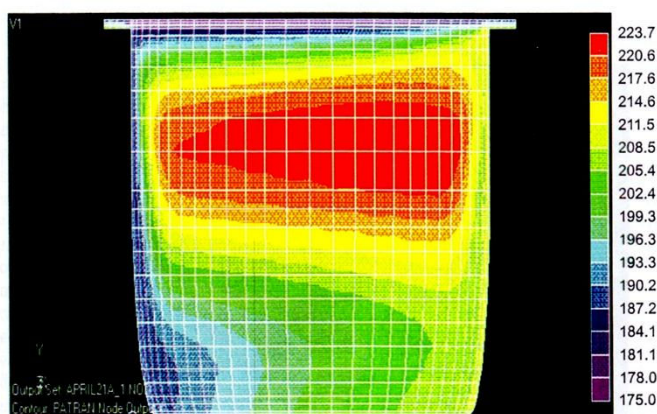


شکل ۱۹.۵ - طرح میلگر برای ماریچ مانع‌دار

براساس تحلیل‌های نظری انجام شده بر روی فرآیند ذوب شدن در طرح میلگر، بهترین طول برای این نوع ماریچ، ۳۰٪ بلندتر از پیچ معمولی است. از معایب این طرح می‌توان این نکته را ذکر کرد که با کاهش عرض کانال جامد در طول ماریچ، سرعت ذوب شدن در بخش‌های انتهایی به شدت کاهش می‌یابد. به طور خلاصه می‌توان گفت طرح میلگر از پایداری خوبی در ذوب شدن برخوردار است، هرچند ممکن است سرعت زیادی در ذوب شدن نداشته باشد.



ب



الف

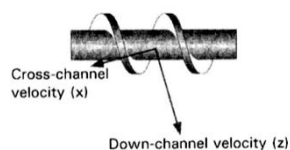
شکل ۲۴,۵- الف) توزیع دمای مذاب در سطح مقطع کانال مارپیچ، ب) توزیع دمای مذاب در سطح مقطع کانال مارپیچ با لقی زیاد

۵-۴- اختلاط

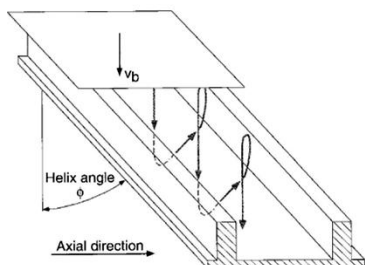
اختلاط هم در ناحیه ذوب شدن و هم در ناحیه انتقال مذاب درون اکسترودر اتفاق می افتد. در ناحیه انتقال جامد به دلیل اینکه لایه های بستر جامد نسبت به هم حرکت نمی کنند لذا اختلاط خاصی نمی تواند به وجود آورد. این نشان می دهد که اختلاط کامل زمانی اتفاق می افتد که تمامی مواد ذوب شده باشند. لذا بحث اختلاط را فقط در بخش انتقال مذاب مطرح می کنیم.

۵-۴-۱- اختلاط توزیعی درون کانال های مارپیچ

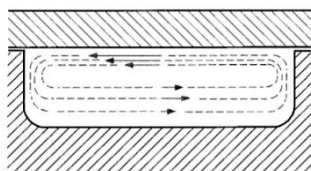
در اثر حرکت مارپیچ درون سیلندر، سیال در دو جهت شروع به حرکت می کند (شکل ۲۵,۵)، یکی حرکت در جهت کانال و دیگری حرکت در عرض کانال. به منظور درک بهتر حرکت مواد درون کانال، یک ساده سازی انجام می دهیم. اگر کانال مارپیچ را از حالت حلزونی خارج کرده و آن را تخت کنیم و سیلندر را به صورت یک صفحه نمایش دهیم، حرکت مواد درون کانال مطابق شکل ۲۶,۵ می شود. در این حالت اگر از سطح مقطع کانال، حرکت مواد را بررسی کنیم می بینیم که مواد درون کانال یک حرکت چرخشی را طی می کنند (شکل ۲۷,۵) که موجب اختلاط مواد می شود.



شکل ۲۵,۵- دو جزء جریان اصلی در کانال اکسترودر



شکل ۲۶,۵- حرکت سیال در ناحیه انتقال مذاب



شکل ۲۷,۵- حرکت چرخشی مواد در سطح مقطع کانال مارپیچ

مقایسه صورت پذیرفته در بالا به صورت کیفی می باشد، لذا به منظور تشریح دقیق تر عملکرد المان های اختلاط، نمونه ای از تحقیقات انجام شده جهت مقایسه کمی المان ها ارائه می گردد . منبع این گزارش کتاب *Mixing in Single Screw Extrusion* نوشته شده توسط Martin Gale می باشد. در این گزارش ۹ میکسر اختلاط به شرح ذیل با یکدیگر مقایسه شده است.

میکسر I: Fluted Rotor



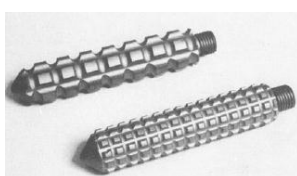
میکسر A (بالایی): annulus

میکسر B (پایینی): screw



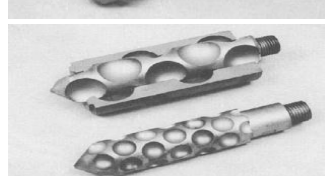
میکسر K (بالایی): pineapple (large stud)

میکسر J (پایینی): pineapple (small stud)



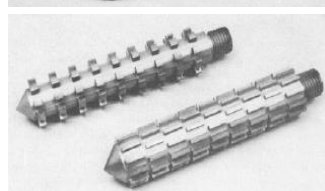
میکسر C (پایینی): CTM (small cavity)

میکسر D (بالایی): CTM (small cavity)



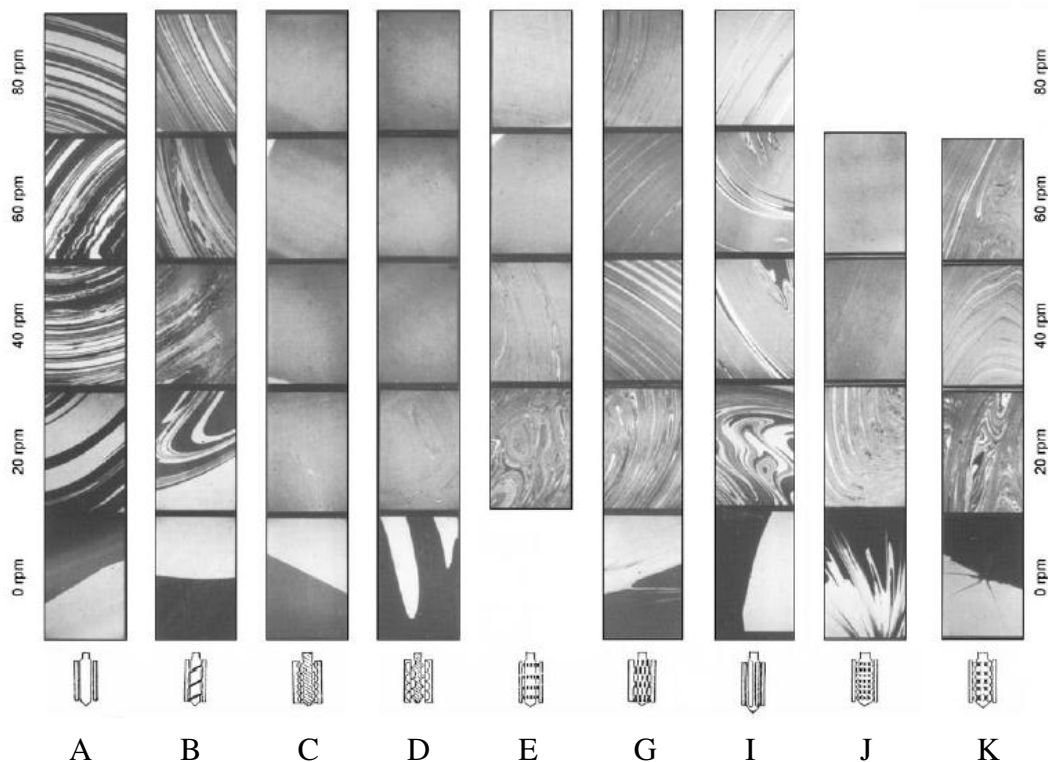
میکسر E (بالایی): Pins

میکسر G (پایینی): 9rows/12 vanes



شکل ۵۴,۵- انواع المان های اختلاط

تصویر میکروگراف نمونه های اکسترودر شده با استفاده از المان های اختلاط شکل ۵۴,۵ در سرعت های مختلف مارپیچ به شرح ذیل مقایسه شده است. با مشاهده تصاویر شکل ۵۵,۵ توانایی و عملکرد المان ها در اختلاط توزیعی و پراکنشی قابل تشخیص است.



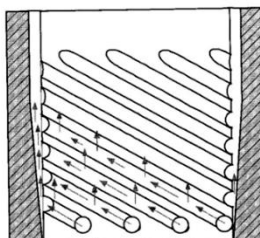
شکل ۵۵,۵- تصاویر میکروگراف نمونه های اکسترودر شده با المان های اختلاط مختلف

فرآیند تولید لوله، تقسیم شدن میله تو پر مذاب پلی اتیلن به چندین جریان اجتناب ناپذیر است چراکه حداقل یک پایه برای نگهداری بخش مندرل (سوزن) لازم است. لذا برای رفع عیب خطوط جوش لازم است تا لایه های مذاب به هنگام چسبیدن به هم، به اندازه کافی درون یکدیگر نفوذ نمایند. بر این اساس کلگی اسپیرال اختراع شد.



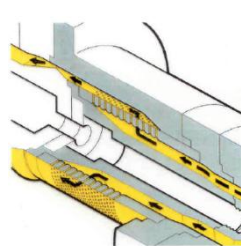
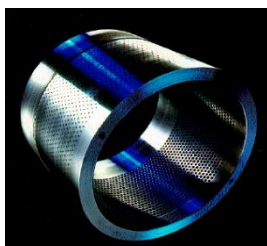
شکل ۵۸،۵- نمونه های کلگی اسپیرال

در این نوع کلگی، میله تو پر مذاب توسط شیارهایی به چندین جریان تقسیم شده به نحوی که این جریان ها از طریق شیارهای مذکور به سطح یک استوانه منتقل شده و در شیارهایی حلزونی شکل ادامه مسیر می دهند (شکل ۵۹،۵). هرچه جریان ها جلوتر می روند عمق کانال های حلزونی کاهش پیدا کرده تا اینکه در نهایت عمق کانال ها به صفر می رسد. خصوصیت ویژه این نوع کلگی، وجود جریان در دو جهت می باشد به گونه ای که اختلاط کامل لایه های مذاب به تدریج صورت می پذیرد (شکل ۵۹،۵). یکی از مزایای مهم دیگر کلگی اسپیرال ایجاد آرایش یافتگی محیطی زنجیرهای پلیمری می باشد. این مسئله به تحمل فشار لوله ها کمک شایانی می کند.



شکل ۵۹،۵- مسیر حرکت مذاب در کلگی اسپیرال

طرح دیگری که برای کلگی فرآیند لوله های پلی اتیلن پیشنهاد شده است کلگی سبدی^۱ است. همان طور که در شکل ۶۰،۵ نشان داده شده است به دلیل تغییر مسیر نود درجه ای حرکت مواد در دو مرحله، اختلاط کامل مواد صورت می پذیرد. از مزایای دیگر این طرح، ایجاد مذاب یکنواخت از لحاظ دما و فشار می باشد.



شکل ۶۰،۵- مسیر حرکت مذاب در کلگی سبدی

¹ Lattice basket