

مروری بر فرایند پودرسازی برشی حالت جامد پلیمرها و کاربردهای آن

حسین حسینی^۱، بهزاد شیرکوند هداوند^۲، ارجمند مهربانی^{۳*}

۱- تبریز، دانشگاه تبریز، گروه مهندسی شیمی

۲- تهران، پژوهشکده صنایع رنگ

۳- اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی شیمی

پست الکترونیکی: Arjomand@cc.iut.ac.ir

چکیده

فرایند پودرسازی برشی حالت جامد پلیمرها روشی نوین در عملیات فرایندی پلیمرها برای تولید مواد جدید می‌باشد. با بکارگیری موفقیت‌آمیز این روش، می‌توان شاهد تحولی در صنایع مختلف پلیمرها بویژه در صنایع بازیافت پلیمرها، فرایند کامپاندینگ، و بهبود خواص مکانیکی - شیمیایی بود. در این فرایند، پیوسته یک مرحله‌ای پلیمرها در معرض نیروهای برشی و فشاری قرار می‌گیرند و مصرف انرژی کمتری دارند. در این مقاله، ضمن تشریح این فرایند و کاربردهای مختلف آن در صنایع پلیمری، نقاط برتری آن نسبت به روش‌های موجود بررسی می‌شوند.

کلمات کلیدی: پودرسازی برشی حالت جامد پلیمرها، بازیافت پلیمرها، کامپاندینگ

مقدمه

پودرسازی یک فرایند بسیار مهم در صنعت برای کاهش اندازه مواد جامد می‌باشد. اندازه کوچکتر ذرات باعث بهبود عوامل زیر می‌گردد:

- یکنواختی خوراک و توزیع دما در میان مواد در خلال فرایندهای مختلف،
- ایجاد محل‌های فعال مؤثر برای پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی،
- افزایش شدت حل شدن و کیفیت مخلوط کردن،
- به علت وزن مولکولی بالا و هدایت حرارتی پایین مواد پلیمری استفاده از ذرات کوچکتر نسبت به گرانول پلیمری باعث انعطاف‌پذیری بیشتری در صنایع فرایندی پلیمرها می‌گردد.

برای تولید پودرهای پلیمری از سه فناوری اساسی استفاده می‌شود:

(۱) پلیمریزاسیون سوسپانسیونی از محلول‌های رقیق پلیمری؛

(۲) پلیمریزاسیون امولسیونی از محلول‌های رقیق پلیمری؛

(۳) خرد کردن مکانیکی ذرات پلیمری.

از دو فناوری نخست برای تولید پودرهای پلیمری بکر^۱ استفاده می‌شود. هر چند که حذف عامل پودرکنندگی (امولسیون‌کننده‌ها و حلال‌های آلی) فرایندی پرهزینه بوده و در عمل نیز بطور کامل موفقیت‌آمیز نیست (بویژه در حذف ترکیب امولسیون‌کننده). خرد کردن مکانیکی معمول‌ترین تجربه پودرسازی به واسطه ظرفیت

1. Virgin

که در بالا اشاره شد، مزیت این فرایند در این است که در دماهای نزدیک به دمای محیط انجام می‌گیرد. برای تخلیه بهتر پودرهای ریز می‌توان آنها را فلوتاسیون نمود.

کاربرد مهم دیگر این روش پودرسازی را می‌توان به صورت زیر شرح داد:

ناسازگاری ترکیبات پلی اولفین یک مانع عمده برای بازیافت ضایعات پلاستیکی می‌باشد. اغلب روش‌های جاری بازیافت نمی‌توانند بطور مناسبی این مشکل را حل نمایند. در ابتدا باید جداسازی و سورت کردن پلیمرها را انجام داد که هم به زمان اضافی و هم به هزینه بیشتری نیاز دارد. بعلاوه، محصولات تولید شده از این ضایعات اغلب ارزش و کیفیت پایین‌تری نسبت به مواد بکر حتی بعد از جداسازی دارند.

کاربرد روش‌های جایگزینی از قبیل افزودن عوامل سازگارکننده بعلت هزینه بالای این عوامل، دارای ارزش اقتصادی چندانی نیست، ولی اگر همین بازیافت را با روش پودرسازی برشی حالت جامد انجام گیرد می‌توان بر محدودیت‌های فوق‌الذکر غلبه نمود. هر چند که نحوه عمل هنوز شناخته شده نیست؛ اما نتایج و مشاهدات فیزیکی نشان می‌دهد که پلیمرها توسط یک مکانیسم رئولوژیکی انفجاری بطور ناگهانی تبدیل به پودر می‌شوند.

در این فرایند، احتمال سازگاری ترکیبات پلیمری را می‌توان به واکنش‌های مکانیکی - شیمیایی که در خلال آن رخ می‌دهد نسبت داد و در واقع نیازی به اضافه نمودن عوامل سازگارکننده نیست [۳]. پودرهای یکنواخت تولید شده از آمیزه‌های پلیمری ناسازگار نشان‌دهنده نوعی یکنواختی است که با هیچیک از روش‌های موجود مخلوط کردن قابل دسترسی نیست. این تغییرات شامل شکستن پیوندهای مولکولی و ایجاد محل‌های فعال جدید می‌باشد که با دوباره ترکیب شدن باعث تغییر شیمیایی و خواص فیزیکی پلیمرها می‌گردد.

کاربردهای مختلف فرایند پودرسازی برشی پلیمرها

بخشی از کاربردها و امتیازات این روش در مقایسه با روش‌های موجود دیگر برای تولید پودرهای پلیمری در ادامه مورد اشاره قرار می‌گیرد [۳-۹]:

الف) با استفاده از این روش می‌توان پلاستیک‌هایی که ناسازگار بوده و یا خیلی سخت با هم آمیزه می‌شوند را ترکیب نمود تا ماده جدیدی با خواص عملیاتی بهتر و هزینه پایین‌تر ایجاد گردد.

بالای آن می‌باشد. اساس کار برای کاهش اندازه مواد، اعمال تنش کافی بر روی مواد جامد برای شکستن آنها به قطعات کوچکتر می‌باشد. اتلاف انرژی در فرایندهای پودرسازی بسیار بالاست که این امر ناشی از تجهیزات مکانیکی مورد استفاده می‌باشد.

روش خرد کردن مناسب برای هر ماده بر اساس خواص مکانیکی، اندازه مطلوب مواد و منبع انرژی مناسب برای فرایند انتخاب می‌شود. در حالت کلی، روش‌های گوناگونی از قبیل برش، آسیاب کردن و انفجار در این دسته‌بندی قرار می‌گیرند.

یکی از روش‌های مکانیکی برای پودر کردن، مواد استفاده از نیروهای برشی و فشار بالا بطور همزمان می‌باشد. این اندیشه توسط بریجمن^۱ برای پودر کردن فلزات به وسیله فشار هیدروستاتیک ارائه گردید. سپس انیکولوپین^۲ اندیشه استفاده از فشار بالا و نیروهای برشی برای پودر کردن پلیمرها با استفاده از یک فرایند اکستروژن را بیان نمود [۱]. اگر چه مکانیسم پودرسازی به وسیله این روش بطور کامل هنوز قابل فهم نبوده؛ اما از آن در چند سال اخیر برای آمیزه نمودن پلیمرها و بازیافت نمودن پلیمرهای دارای اتصالات عرضی و بدون اتصالات عرضی و همچنین پودر نمودن آنها به عنوان یک خوراک برای فرایند بعدی استفاده می‌شود. این فرایند پودرسازی برشی حالت جامد^۳ نامیده می‌شود.

ذرات خروجی از یک فرایند پودرسازی باید قابل احیا مجدد بوده و تغییر اندازه متوسط ذرات کمتر از ۱۰ درصد باشد. ذرات خروجی می‌توانند به عنوان پرکننده در کامپوزیت‌های پلیمری و یا در یک مخلوط با پلیمر بکر استفاده گردند. در سال‌های اخیر، روش شبکه پلیمری در هم فرو رفته^۴ برای تولید مواد پلیمری با کیفیت بالا از لاستیک‌های بازیافت شده به شکل پودر پیشنهاد شده است [۲]. از فرایند پودرسازی برشی در حالت جامد می‌توان استفاده نمود تا ضایعات لاستیک با دانسیته پایین اتصالات عرضی را بازیافت نمود. می‌توان پیش‌بینی کرد که مکانیسم پودرسازی بستگی به ساختار ماده، توزیع فاز پراکنده شده در شبکه (در حالتی که پلیمر با ترکیبات دیگر آمیزه شده) و طبیعت فعل و انفعالات بین اجزا بستگی دارد.

از این روش می‌توان برای پودرسازی ترموستها، ترموپلاستیک‌های دارای اتصالات عرضی و مواد پلیمری طبیعی استفاده نمود. همانطوری

1. Bridgman
2. Enikolopian
3. Solid State Shear Pulverization (SSSP)
4. Interpenetrating Polymer Network

گزارش موجود از پودرهای به دست آمده از ترکیبات ناسازگار نشان‌دهنده این موضوع است که درجه یکنواختی این پودرها با این روش با هیچکدام از روش‌های آمیزه نمودن موجود قابل مقایسه نیست.

استفاده از این روش برای بازیافت لاستیک‌ها و پلاستیک‌ها احتیاج به مصرف انرژی کمتر، در حدود یک پنجم انرژی مورد نیاز در روش‌های موجود متداول دارد و باعث تولید پودرهای یکنواخت‌تر و ریزتری می‌گردد که همین عامل باعث افزایش کاربرد این پودرها می‌گردد.

ذ) تولید نانوکامپوزیت‌های پلیمری یکی دیگر از کاربردهای مهم این روش می‌باشد. ایجاد نانو کامپوزیت‌ها یک راه بسیار مؤثر و ارزان‌قیمت برای تولید مواد پلیمری با ویژگی‌های جدید و بهبودیافته می‌باشند. به عنوان مثال، با افزودن یک نانو فیلر مانند خاک رس می‌توان خواص حرارتی و مکانیکی پلیمر را تغییر داد. تأثیر کلی این نانو فیلر به عوامل بستگی دارد که مهمترین آنها پراکنش می‌باشد. با استفاده از روش‌های مرسوم، اغلب مشکل است تا به حداکثر پراکنش^۱ رسید؛ ولی با استفاده از فرایند پودرسازی برشی حالت جامد می‌توان نانوکامپوزیت‌هایی با پراکنش ایده‌آل تهیه نمود.

ر) یکی دیگر از امتیازات این روش تولید مستقیم پوشش‌های پودری می‌باشد که می‌توان آنها را بطور مستقیم برای حفاظت مواد در برابر خوردگی استفاده نمود. در واقع، اینها می‌توانند جایگزین مناسبی برای رنگ‌ها و پوشش‌های مایع باشند که بر مبنای حلال‌های آلی مخرب محیط زیست بنا شده‌اند. در ضمن اینکه آنها دارای طول عمر بیشتر بوده و پایدارتر هستند و به عنوان پوشش بر روی سطح فلزات و یا سطوح متخلخل معدنی می‌توانند بکار گرفته شوند.

اصول پودرسازی برشی حالت جامد پلیمرها

تقاضای در حال رشد برای تولید پودرهای پلیمری ریز با دانسیته توده بالا، قابلیت جریان خوب، توزیع یکنواخت اندازه ذرات و یک شکل مخصوص نیاز به پیشرفت‌های پیوسته‌ای در فناوری و تجهیزات تولید پودر دارد. اندازه ذرات یک مشخصه بسیار مهم می‌باشد که بر روی انتخاب یک پودر برای هر کاربردی تأثیر می‌گذارد. پودرهای پلیمری

ب) گسترده‌ی توزیع وزن مولکولی پلیمرها برای بهبود فرایند ساخت فیلم،

پ) بر خلاف روش‌های متداول قبلی که پیش از پودرسازی نیاز به ذوب پلیمر بود در این روش هیچگونه نیازی به این کار نیست و تمام فرایند در فاز جامد صورت می‌گیرد و از مسائل و مشکلات انتقال حرارت جلوگیری کرده و در ضمن مصرف انرژی را نیز بسیار کاهش می‌دهد که از مزیت‌های عمده این روش محسوب می‌شود،

ت) آمیزه نمودن پلیمرهایی که ویسکوزیته‌های بسیار متفاوت دارند،
ث) رشد روزافزون استفاده از پودرهای پلیمری در صنایع فرایندی پلاستیک‌ها از قبیل قالب‌گیری چرخشی، پوشش‌های پودری، و ترکیب کردن پلیمرها،

ج) تولید محصولات پلیمری با سطح مقطع بسیار بالا و شکل‌های منحصر بفرد،

چ) کاهش زمانی فرایند نسبت به روش‌های متداول موجود به دلیل انجام فرایند در یک مرحله،

ح) حذف مشکل افزودنی‌هایی حساس به حرارت،

خ) دستیابی به آمیزه‌هایی از لاستیک/پلاستیک که با روش‌های دیگر قابل دسترسی نمی‌باشد،

د) بازیافت ضایعات مختلف پلیمری در حالت جامد که روشی جدید در زمینه بازیافت انواع مختلف پلیمرها شامل پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن ترفتالات، پلی‌استایرن، و پلی‌وینیل کلراید می‌باشد که محصول به صورت پودرهایی یکنواخت با رنگ روشن می‌باشد. این فرایند فرصت‌های جدیدی برای توسعه ارزش افزوده محصولات بازیافتی از لاستیک‌ها و پلاستیک‌ها ایجاد می‌نماید. ناسازگاری ترکیبات پلی‌اولفین تأثیر نامطلوبی بر روی بازیافت پلاستیک‌ها با روش‌های متداول موجود می‌گذارد. اغلب این روش‌ها نیاز به جداسازی ابتدایی ضایعات بر حسب نوع و رنگ دارند که این مستلزم صرف هزینه و هم زمان بیشتر می‌باشد. همچنین محصولات بازیافت شده دارای ارزش و کیفیت کمتری نسبت به محصولات تولیدی به این روش هستند.

سازگار شدن ترکیبات پلیمری در فرایند پودرسازی برشی حالت جامد، می‌تواند به علت وجود واکنش‌های مکانیکی - شیمیایی می‌باشد که در حین فرایند پودرسازی بوقوع می‌پیوندد.

تجهیزات فرایند پودرسازی برشی حالت جامد

توضیح مختصری راجع به تجهیزات و فرایند پودرسازی برشی حالت جامد در این بخش داده می‌شود [۳۵-۱۰]. یک روش تولید پودرهای ریز از پلی‌اتیلن توسط پژوهشگران آلمانی در ثبت اختراعات آلمان بشماره ۱۲۲۹۷۰۹^۳ ارائه شده است. آنها با ایجاد یک فشار مناسب در یک مجرای غلتکی^۴ شرایط لازم را برای خرد کردن این ذرات فراهم کردند. در این روش ضروری است تا ماده را حداقل شش بار از میان مجرای داغ عبور داده تا به نهایت خردشدگی برسد. ماده حاصل در یک آسیاب با دمایی در حدود ۸۰-۷۵ درجه سانتیگراد خرد می‌شود. با چنین پیش فرضی می‌توان پدیده‌های مکانیکی - شیمیایی که باعث سست شدن پیوندهای مولکولی زنجیره‌های پلی‌اتیلن می‌شود، در اثر اعمال فشار خردکننده درون مجرای با دمای معین را توضیح داد که در طی آن ضایعات پلی‌اتیلن به ذرات بسیار ریز و در نهایت پودر تبدیل گردد. این روش، در عمل موفقیت‌آمیز نبود؛ چون مقدار انرژی مورد نیاز برای خرد کردن یک جسم جامد قابل ملاحظه می‌باشد، بویژه اگر ماده دارای قدرت کششی بالا باشد. در ضمن، زمان زیادی هم برای فرایند مورد نیاز است.

بنابراین، استفاده از این روش در عمل غیراقتصادی بوده و می‌بایست به دنبال روشی اقتصادی، پیوسته، و با مصرف کم انرژی بود تا بتوان پودرهایی با اندازه ذرات یکنواخت تولید نمود در ضمن اینکه تعداد تجهیزات مورد نیاز را باید به حداقل رساند.

تجهیزات مورد نظر برای تولید پودرهای ریز بر طبق آخرین فناوری‌های پودرسازی برشی حالت جامد در چهار بخش زیر قرار می‌گیرند که توسط پلیمر پیموده می‌شوند:

- (۱) بخش امتزاج و نرم شدگی،
- (۲) بخش دفع گاز،
- (۳) بخش سرد کننده،
- (۴) بخش تخلیه.

پلیمری تحت فرایند، به شکل گرانول توسط یک قیف به بخش نخست این دستگاه وارد می‌شود. پلیمر بعد از عبور از قیف، توسط یک پیچش^۵ به سمت جلو انتقال داده می‌شود. گرانول‌ها در بخش نخست توسط القا انرژی برشی ممزوج می‌شوند. پیچش‌ها در قسمت داخلی

تجاری موجود یا به روش کاهش اندازه (خرد کردن) و یا بوسیله فرایند حل کردن تولید می‌شوند. در فرایند خرد کردن، کاهش اندازه از طریق وارد کردن ضربه و یا فشردن انجام می‌گیرد. قطر پودرهای تولید شده به روش مکانیکی ۴۰-۱۰ مش می‌باشد. این ذرات بطور معمول دارای شکل نامنظمی با توجه به تجهیزات استفاده شده هستند و فقط برای پوشش‌های پودری خشک و قالب‌گیری مناسب هستند. پودرهای ریزتر، با اندازه ذرات ۶۵۰-۲۰۰ مش برای پراکنش حلال، عوامل پیوندی در صنایع نساجی و استفاده به عنوان افزودنی مناسب‌تر هستند.

تجهیزات کاهش اندازه بطور معمول کارایی بالایی ندارند؛ زیرا هزینه بالایی داشته و انرژی زیادی مصرف می‌کنند. برای مثال، فقط در حدود ۳۰ درصد از یک ماده در هر بار عبور از دستگاه به اندازه مطلوب تبدیل می‌شوند. تجهیزات مورد نیاز برای کاهش اندازه به چهار دسته کلی ضربه‌ای، کمپرسی، کششی و برشی تقسیم‌بندی می‌شوند:

انتخاب تجهیزات به نوع پلیمر و اندازه مطلوب ذرات بستگی دارد. کاهش اندازه ذرات به وسیله ضربه شکسته شده و سپس خرد می‌شوند کاهش اندازه ذرات به پودرهای بسیار ریز، به وسیله عملیات پودرسازی مشتمل بر پارگی، برش، سایش و یا مالش ذرات صورت می‌گیرد.

مکانیسم شکست بطور معمول موفقیت‌آمیز است و ماده کم‌کم به اندازه‌های کوچکتر تبدیل می‌شود. وسایلی که اکنون بطور تجاری برای کاهش اندازه پلیمرها در دسترس هستند مثل نوسانگرها^۱ و یا آسیاب جت^۲ بر دو اساس ضربه (تخریب‌کننده مواد شکننده) و برش (برش‌دهنده مواد نرم و الاستومر) بنا نهاده شده‌اند.

این وسایل بطور ذاتی غیر مؤثر بوده و هزینه بالایی دارند (هزینه آن بیشتر از ۲۵ درصد مجموع فرایند تولید ماده خام می‌باشد) و در دمای محیط، این وسایل بالغ بر ۵۰۰۰ کیلو وات ساعت انرژی برای تولید هر تن محصول نیاز دارند. در ضمن، مقدار قابل ملاحظه‌ای حرارت به علت سرعت بالا در حین خرد کردن تولید می‌شود. این حرارت باعث می‌شود تا پلیمر به سطح در حال حرکت بچسبد. مشکل حرارت را می‌توان با استفاده از فرایند خرد کردن با سرمازایی (کاربرد نیتروژن مایع به عنوان عامل مبرد) حل نمود؛ ولی با توجه به گرانبها بودن قیمت نیتروژن مایع، فرایند تبرید هزینه‌ای به مراتب بیشتر از خرد کردن در دمای محیط دارد.

3. German Patent No.1229709
4. Roller Gap
5. Screw

1. Vibratory
2. Jet Mill

روش ذکر شده برای پودر کردن پلی اتیلن توسط تجهیزات فوق الذکر استفاده شد. عملیات در یک اکسترودر دو پیچشی با قطر پیچش ۵۳ میلی متر و طول ۱۴۸۴ میلی متر (۲۸ برابر قطر) انجام گرفت. مقدار فشار عملیاتی در بخش پودرکننده دستگاه بین ۲۵۰ الی ۳۰۰ کیلوپاسکال و شاخص ذوب در پلی اتیلن پودر شده در محدوده ۷ تا ۰/۳ قرار داشتند. میزان محصول تولیدی بین ۵۰-۴۰ کیلوگرم بر ساعت بود و آنالیز پودرهای پلی اتیلن نشان داد که تنها ۲ درصد از آنها بزرگتر از ۱۶۰ میکرون بودند.

همانطور که اشاره شد، فرایند مورد بحث، از لحاظ مصرف انرژی پایین بوده و قیمت تجهیزات بازیافت ضایعات پلیمری ارزان تر می باشد. این فرایند را می توان برای بازیافت اقتصادی انواع مختلفی از ضایعات پلیمرهای طبیعی و سنتزی شامل ضایعات ترکیبی از چند ماده مختلف تعمیم داد. پودرهای تولیدی برای تولید انواع محصولات جدید مناسب می باشند. همچنین از دیگر کاربردهای این پودرها در پوشش و محافظت از بتن های استفاده شده در ساختمان ها و پل ها، محافظت از لوله ها در مقابل خوردگی می باشد. همچنین می توانند جایگزین مناسبی برای رنگ ها و پوشش های مایع باشند که بر اساس استفاده از حلال های آلی مضر برای محیط زیست استوار هستند. این مواد جایگزینی بادوام تر، پایدارتر بوده و بدون هیچ مشکلی برای محیط زیست می توانند بر روی سطوح مختلف بویژه سطوح فلزی و معدنی متخلخل بکار گرفته شوند.

یکی دیگر از مزایای بسیار مهم استفاده از این روش، تقویت واکنش پذیری پلیمرها و مواد مونومری جامد برای تشکیل هموپلیمرها، کوپلیمرها و همچنین مواد پلیمری می باشد که توسط روش های دیگر واکنش قابل انجام نیستند [۶]. در این فرایند چنانچه از ترموست ها و الاستومرها استفاده شود، فقط کافی است که به آنها حرارت کمی داده شود تا به دمای مطلوب فرایندی برسند. در صورت استفاده از ترموپلاستیک ها، لازم است آنها را تا دمای نرم کردن گرم کرد و سپس با سرد کردن آنها و اعمال نیروهای برشی و فشاری آنها را پودر نمود. در آخرین مرحله، فرایند فلوتاسیون با کمک یک جریان گاز انجام می گیرد. فلوتاسیون مانع از تجمع پودرهای ریز می گردد. حرارت داده شده به ماده باعث کاهش پیوندهای فیزیکی بین ماکرومولکول ها و تقویت تغییر شکل مکانیکی آنها می شود. نیروهای مورد نیاز را می توان با استفاده از نیروهای پیچشی بالغ بر ۲۰ میلیون کیلوگرم ایجاد نمود.

بارل قرار داده شده اند و در اثر گرمایش بارل در فرایند نرم شدگی تسریع می شود. فرایند گرمایش به وسیله مجراهای اختلاط انجام می گیرد. برای این عمل به یک واسطه حرارتی نیاز بوده و سپس آن توسط یک مجرای تخلیه از سیستم خارج می شود. برای حرارت دادن ماده واسطه از یک سیستم چرخشی استفاده می گردد.

سپس ماده پلیمری توسط پیچش ها به داخل بخش دوم انتقال داده می شود. این بخش از یک مجرای گازگیری تشکیل شده که متصل به یک مجموعه از دستگاه ها برای تولید خلأ یا کاهش فشار می باشد. در بخش دوم دستگاه، رطوبت و مونومرهای رسوبی دفع می گردند. البته بسته به نوع پلیمری که تحت فرایند قرار گرفته است ممکن است نیازی به این منطقه نباشد. پس از آن پیچش ها ماده مورد نظر را به منطقه سردکننده منتقل می کنند. داخل دیواره بارل، مجراهای خنک کننده تعبیه شده اند.

از میان این مجراها یک ماده خنک کننده به مانند آب عبور می کند. این ماده خنک کننده از طریق کانال های خوراک به مجرا تغذیه می شوند و از طریق مجراهای تخلیه از سیستم دفع می گردند. مجرای فوق به عنوان قسمتی از یک چرخه خنک کننده برای ایجاد سرمایش می باشد. در بخش سوم، پیچش ها بطور اضافی توسط یک سیستم خنک کننده سرد می شوند.

سه گروه از این دیسک ها در جهت حرکت ماده قرار داده شده اند. بین دیسک های مجاور، بخش های حامل برای به جلو بردن ماده پودر شده تعبیه شده اند. دیسک های پودرکننده می توانند بیضی شکل و یا مثلثی شکل باشند. این دیسک ها غیر قابل چرخش بوده و بر روی میله پیچش به وسیله فنرهای تعادلی قرار داده شده اند. این دیسک ها در جهت طولی اکسترودر پشت سر یکدیگر به نحوی قرار گرفته اند که باعث پودری تر شدن ماده پلیمری گردیده و در ضمن ماده را در جهت طولی به سمت جلو هدایت می کند. در صورت استفاده از سیستم دو پیچشی، فضای ما بین دو پیچش نیز به انتقال پودرها کمک می کند.

نحوه عملکرد دیسک های مثلثی شکل مشابه با نوع بیضی شکل می باشد ولی میزان پودر شدن در این حالت بیشتر می باشد؛ زیرا که مواد بین قطعات این دیسک گیر می افتند. دیسک های سه گوش نیز در جهت طولی اکسترودر پشت یکدیگر قرار می گیرند که باعث انتقال ماده پودر شده در جهت طولی می شود. در نهایت پودر به بخش تخلیه منتقل می شود و یک پیچش به تخلیه پودر از دستگاه کمک می کند.

خواص مکانیکی - شیمیایی، تولید نانو کامپوزیت‌ها با پراکنش بهتر و فرایند کامپاندینگ ایجاد نماید.

مراجع

- [1] Enikolopov et al., United States patent 4607797, (1986).
- [2] Bilgili E. and Arastoopour H., "Pulverization under high normal and shear forces as a first step towards recycling of rubber", Proceeding of Annual Recycling Conference of the Society of Plastics Engineers, ARC 98, Chicago, (1998).
- [3] Khait, United States patent 6849215, (2005).
- [4] Khait, United States patent, 6818173, (2004).
- [5] http://www.environmental-expert.com/articles/article_712/article712.htm, (1999).
- [6] Furgiuele, United States patent, 6797216, (2004).
- [7] Khait et al., United States patent 6494390 B1, (2002).
- [8] Arastoopour H., Illinois Institute of Technology, Seminar (2003).
- [9] Khait K. and Carr S., Solid state shear pulverization, (2001).
- [10] Enikolopian N.S., Akopian E.L. and Nikolskii V.G. "Some problems of strength and fracture of polymer materials", Makromolekulare Chemie, Basel, Switzerland: Huthig and Wepf Verlag, Supplement No.6, p.316-330, (1984).
- [11] Enikolopian N.S., Akopian E.L. and Nikolskii V.G., "Anomalies in the strength and deformational properties of amorphous - crystalline polymers at high temperatures", London, Plenum Publishing Corp., p.805-807, (1983).
- [12] Enikolopian N.S., "Physical aspects of plastic flow", Makromolekulare Chemie, Basel, Switzerland: Huthig and Wepf Verlag, Supplement No.8, p.109-117, (1984).
- [13] Bridgman P.W., The physics of high pressure, New York, McMillan Co., (1931).
- [14] Knunyants M.I., Dorfman I.Y. and Prut E.V., "Multiple failure of LDPE in extrusion in the region of a phase transition", London: Plenum Publishing Corp., p.405-407, (1987).
- [15] Freidman M.L. and Prut E.V., "Physical and physicochemical effects on the rheological properties of polymers during processing", Russian Chemical Reviews, 53, p.186-196, (1984).
- [16] Manevitch L.I., Zarkhin L.S. and Enikolopian N.S., "Nonlinear dynamics and problem of polymer fracture", J.Appl.Polym.Sci., 39, p.2245, (1990).
- [17] Yerina N.A., Potapov V.V., Knunyants M.I. and Prut E.V., "Mechanisms of the elastic-strain grinding of Isotactic polypropylene", Polymer Science USSR, 32, p.704, (1990).
- [18] Karadzhev A.C., Gnezdilova R.B., Gorkov D.A., Nikolskii V.G., Filippov V.V. and Finkel E.E., "Elastic-strain powdering of radiation-cross linked Low-Density Polyethylene", Polymer Science USSR, 34, p.673, (1992).

همانطوری که اشاره گردید، برای مواد ترموپلاستیک فقط کافی است تا آنها را به دمای پیش ذوب رساند که برای اکثر مواد پلیمری این محدوده دمایی در دامنه ۲۰۰-۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار دارد. دمای سرمایش پلیمر نیز بستگی به نوع ماده پلیمری دارد و برای اغلب مواد پلیمری این دما در محدوده ۸۰-۳۰ درجه سانتیگراد قرار دارد که مقدار آن به صورت تجربی تعیین می‌گردد.

برای جلوگیری از تجمع پودرهای پلیمری در منطقه انتهایی، قطر بارل در این مناطق افزایش می‌یابد. پودرهای تولیدی به این روش، کاربردهای بسیار وسیع‌تر از صنایع پلیمری داشته و در صنایع مختلفی از قبیل نساجی، پوشش، آسفالت، بتون و سرامیک می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. در دنیای امروز این موضوع بسیار مهمی می‌باشد؛ زیرا با استفاده عملی از محصولات بازیافت شده از ضایعات پلیمری می‌توان بر مشکلات زیست محیطی ایجاد شده غلبه نمود. با توجه به اینکه پودرسازی در دمایی پایین‌تر از دمای ذوب صورت می‌گیرد، اینگونه پودرها خواص فیزیکی پلیمر اولیه را داشته و تغییرات صورت گرفته در آنها نامحسوس می‌باشد.

این فرایند توانایی تولید پودرها در یک محدوده وسیع از اندازه ذرات (در دامنه ۲۰ الی ۲۰۰ میکرون و حتی ریزتر) را دارد. اندازه و توزیع ذرات به وسیله پارامترهای فرایندی و خواص ذاتی ضایعات پلیمری از قبیل ترموپلاستیک یا ترموست بودن، و شدت جریان ذوب کنترل می‌شوند. در ذکر مثالی در مورد کیفیت محصولات تولیدی به روش پودرسازی برشی، حالت جامد برای آمیزه‌سازی پلیمرها می‌توان به این موضوع اشاره نمود که پلی‌اتیلن با دانسیته بالا و پلی‌پروپیلن پلیمرهایی بطور کامل ناسازگار هستند؛ ولی با استفاده از فرایند پودرسازی برشی حالت جامد می‌توان تا ۳۰ درصد وزنی پلی‌پروپیلن را داخل شبکه پلی‌اتیلن با دانسیته بالا قرار داد و ماده‌ای با خواص مکانیکی مناسب را بدست آورد.

نتیجه‌گیری

میزان کاربری و اهمیت بالای فرایند پودرسازی برشی حالت جامد پلیمرها برای صنایع مختلف پلیمری از قبیل اصلاح خواص پلیمری، آمیزه‌سازی و بازیافت ارائه شد. این روش با توجه به کم هزینه بودن، مصرف انرژی پایین و عملی بودن آن در تمام شرایط می‌تواند انقلابی در صنایع مختلف پلیمری به ویژه صنایع بازیافت پلیمرها، بهبود

- [19] Kuptsov S.A., Erina N.A., Minina O.D., Prut E.V. and Antipov E.M., "An x-ray scattering study of PO subjected to elastic-strain powdering", Polymer Science USSR, 35, p.307, (1993).
- [20] Wolfson S.A. and Nikolskii V.G., "Powder extrusion: Fundamentals and different applications", Polym.Eng.Sci., 37, p.1294, (1997).
- [21] Askadskii A.A., Deformation of polymers, Moscow, Khimia, (1973).
- [22] Baramboim N.K., "Mechanochemistry of polymers", Rubber and Plastic Research Association of Great Britain, London, (1964).
- [23] Simionescu C.S. and Opraie C.V., "Mechanochemical synthesis", Russian Chemical Review, 57, p.283, (1988).
- [24] Casale A. and Porter R.S., Polymer Stress Reactions, New York: Academic Press, (1978).
- [25] Prut E.V., "Plastic flow instability and multiple fracture of polymers", Polymer Science USSR, 36, p.493, (1994).
- [26] Ivanov G., US Patent 5743471, (1998).
- [27] Shutov F., US Patent 5769335, (1998).
- [28] Enayati N., Riahi A. and Shutov F., "Solid-state shear extrusion for pulverization of flexible and rigid polyurethane foam wastes", Proceedings of Polyurethanes World Congress, Vancouver, p.103-106, (1993).
- [29] Riahi a., Arastoopour H. and Ivanov G., "Recycling of plastics wastes using solid-state shear extrusion", Proceeding of Annual Technical Conference of Society Plastics Engineers, ANTEC 1993, New Orleans, p.891-892, (1993).
- [30] Venkatasanthanam S., Ivanov G. and Shutov F., "Polyurethane foams reinforced with recycled polyurethane foams waste powder", Proceeding of Annual Technical Conference of Society Plastics Engineers, ANTEC 1995, Boston, p.3673-3684, (1995).
- [31] Patel T. and Shutov F., "Pressure Shear Pulverization Process", Properties of waste and virgin LDPE, Annual Recycling Conference, ARC 98, Chicago, (1998).
- [32] Scheirs J., Polymer Recycling, New York, John Wiley and Sons, (1998).
- [33] Ahn D., Khait K. and Petrich M.A., "Microstructural changes in homopolymers and polymer blends induced by elastic strain pulverization", J.Appl.Polym.Sci., 55, p.1431, (1995).
- [34] Nesarikar A.R., Carr S.H. and Khait K., "Self-compatibilization of polymer blends via novel solid-state shear extrusion pulverization", J.Appl.Polym.Sci., 63, p.1179, (1997).
- [35] Furgiuele K., Khait K. and Torkelson J.M., "The use of solid-state shear pulverization for polymer blend and polymeric waste compatibilization", Proceeding of Annual Recycling Conference of the Society of Plastics Engineers, ARC 98, Chicago, (1998).