



مدل سازی فرآیندهای اکستروژن برای پلیمرها

فاطمه باقی¹، فریبا سلطان‌الکتابی²

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی شیمی، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران

fatemebaghi32@gmail.com

² استادیار گروه مهندسی شیمی، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران

f_kottab@iaush.ac.ir

چکیده

فرآیند اکستروژن یکی از تکنیک‌های صنعتی مهم است که به‌ویژه در تولید محصولات پیچیده و با دقت بالا در صنایع مختلف مانند پلاستیک، غذا، و داروسازی کاربرد دارد. این فرآیند به‌طور گسترده‌ای برای تولید قطعات و محصولات با اشکال خاص و یکنواخت، از مواد مختلف استفاده می‌شود. در زیر به بررسی دقیق‌تر این فرآیند و چالش‌ها و توسعه‌های آن در حوزه‌های مختلف پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: اکستروژن، ماردون، مدل‌سازی، پلیمر، پردازش

1. مقدمه

اکسترودرها در چند صنعت مهم استفاده می‌شوند، شامل:

1. صنعت پلاستیک: در تولید محصولات پلاستیکی مانند لوله‌ها، شیلنگ‌ها، کابل‌ها و فیلم‌ها.
2. صنعت فلز: در تولید محصولات فلزی مانند سیم‌های عایق‌دار، کابل‌ها و ورقه‌ها.
3. پردازش غذا: در تولید تجهیزات و کالاهای غذایی و محصولات وابسته به صنایع غذایی.

این دستگاه‌ها به‌طور گسترده‌ای به دلیل توانایی آنها در تولید محصولات با کیفیت بالا و صرفه جویی در زمان و هزینه استفاده می‌شوند [1].

اکسترودرها از نظر ساختار به دو دسته تقسیم بندی می‌شوند: تک‌ماردونی و دوماردونی.

اکسترودرهای تک‌ماردونی به‌طور گسترده در صنعت پلیمر مورد استفاده قرار می‌گیرند و به پردازش عمومی پلیمرها می‌پردازند. این اکسترودرها شامل یک ماردون هستند که مواد اولیه را ذوب و شکل می‌دهند. در این سیستم، گرما و فشار باعث ذوب شدن پلیمر شده و سپس این ترکیب ذوب شده به شکل‌های مختلف از طریق دای‌ها خروج می‌شود. اکسترودرهای تک‌ماردونی معمولاً برای تولید محصولاتی مانند لوله‌ها، ورقه‌ها و فیلم‌ها کاربرد دارند.



در مقابل، اکسترودرهای دوماردونی معمولاً برای ترکیب انواع الیاف و پرکننده‌ها به کار می‌روند. این نوع اکسترودر شامل دو ماردون است که به صورت موازی کار می‌کنند و امکان ترکیب مؤثر مواد مختلف را فراهم می‌آورند. ترکیب‌های پلیمری قبل از قالب‌گیری نهایی در این اکسترودرها استفاده می‌شوند تا خواص نهایی محصولات بهینه شود [2].

اکسترودرهای دو ماردون می‌توانند به دو دسته اصلی تقسیم شوند که بر اساس تعاملات دو پیچ آن‌ها مشخص می‌شود:

1. پیچ‌های دوقلو در حال در هم تنیدن (Intermeshing Twin Screws): در این نوع اکسترودرها، ماردون‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در نقاط خاصی یکدیگر را درگیر می‌کنند. این طراحی منجر به بهبود تعامل مواد، همگن‌سازی بهتر و افزایش کیفیت می‌شود. این نوع اکسترودرها معمولاً در فرآیندهای ترکیب و مخلوط کردن پلیمرها و افزودنی‌ها استفاده می‌شوند. در این اکسترودرها، به خاطر چرخش مخالف و به هم تنیدن پیچ‌ها، قابلیت‌های جابجایی مثبت بهینه شده و عملکرد پمپاژ بالاتری را ارائه می‌کنند.
2. پیچ‌های دوقلو غیر در هم تنیده (Non-Intermeshing Twin Screws): در این حالت، ماردون‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که با یکدیگر درگیر نمی‌شوند. این طراحی امکان عبور آسان‌تر مواد را فراهم می‌آورد و عمدتاً برای فرآیندهایی که نیاز به ترکیب کمتری دارند و شرایط فشار و دما ملایم‌تری را می‌طلبند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به طور کلی، اکسترودرهای دوقلوی ماردونی با چرخش مخالف و کاملاً درهم تنیده، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد جابجایی مثبت خود، توانایی‌های پمپاژی فوق‌العاده‌ای دارند که این امر آن‌ها را برای کاربردهای پیچیده و فرآیندهای پیشرفته در صنایع پلاستیک و کامپوزیت بسیار مناسب می‌سازد. (3) اکسترودرهای دو مخربایی کنتراندی چرخان که به صورت متقابل می‌چرخند، فناوری پیشرفته‌ای هستند که از همزن‌های پیوسته توسعه یافته‌اند. [3،4] در تولید مبتنی بر پلیمر، اکسترودرها نقش اساسی در فرآیندهای مختلف دارند و تاریخچه استفاده از آن‌ها به ویژه در تولید پروفیل لوله‌های پلی وینیل کلراید (PVC) به مدت طولانی برمی‌گردد. استفاده از اکسترودرها در این حوزه به دلیل توانایی بالای آن‌ها در پردازش و شکل‌دهی مواد پلیمر، به ویژه PVC، بسیار مهم است. [5] توسعه تاریخی اکسترودرها و بهبود طراحی، ساخت کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف، به ویژه در تولید کامپوزیت‌ها، اهمیت فراوانی دارد. در این زمینه، مطالعه دقیق بر روی شرایط عملیاتی، پارامترهای مؤثر و مدل‌سازی نظری می‌تواند به بهبود فرآیندهای تولید کمک کند. در ادامه به توضیح جوانب مختلف این مطالعه پرداخته می‌شود.

1.1 نکات کلی

اولین تحلیل‌های دقیق از فرآیند اکستروژن به مبحث کلاسیک دستگاه‌های تک پیچ تغذیه شده با سیل مربوط می‌شود [6] اکستروژن و تمرکز بر روی فرآیند انتقال ذوب و سپس انتقال جامد. مدل بنیادی برای ذوب در یک اکسترودر تک پیچ که توسط مادوک و تادمور پیشنهاد شد [6،8] مدل‌های ذوب و مدل‌های جامع کامپیوتری مختلف پایه‌گذار توسعه اکسترودرهای تک پیچ تغذیه‌شده با سیلاب بودند که در ادامه مقاله مورد بحث قرار می‌گیرند. با این حال، مطالعات در مورد اکستروژن تک پیچ تغذیه‌شده با گرسنگی تنها به تازگی آغاز شده و عمدتاً بر ظرفیت اختلاط و

ذوب تمرکز دارند و توجه کمی به مدل‌سازی فرآیند داده شده است [6,9] از سوی دیگر، اکسترودرهای دو ماردره به طور معمول در صنعت مدرن استفاده می‌شوند [5,10,13] این اکسترودرها را می‌توان بر اساس جهت چرخش نسبی پیچ‌هایشان به دو دسته تقسیم کرد.

انواع: اکسترودرهای دوقلوی چرخش هم‌جهت و چرخش مخالف. در یک اکسترودر دوقلوی چرخش هم‌جهت حداکثر سرعت در نوک پیچ‌ها یافت می‌شود، در حالی که در اکسترودرهای دو پیچ معکوس بیشترین سرعت در ناحیه درهم‌تنیده به دست می‌آید. می‌توان ادعا کرد که همگردان بودن این مکانیزم اختلاط بهتری را فراهم می‌کند زیرا مواد بین لوب‌ها منتقل می‌شوند. با این حال، ادامه دارد. مکانیزم ضد چرخش باعث ایجاد فشار بالاتری می‌شود که این امر آن را برای پروفیل کارآمدتر می‌سازد. [14] بسیاری از مطالعات و آزمایش‌ها به انواع مختلف اکسترودر پرداخته‌اند که جریان ماده در پیچ‌ها درک شود. اکسترودرهای تک پیچ و دو پیچ توسط سناریو و همکاران مقایسه شدند [15]. به عنوان بخشی از یک تحقیق طراحی که بر روی یک اکسترودر ساده برای کشورهای کمتر توسعه یافته با هدف پخت اکسترودر و پردازش مواد غذایی محلی متمرکز است. اکسترودرهای تک پیچ، نسبت به اکسترودرهای دو پیچ ساده‌تر برای ساخت هستند اما بیشتر احتمال دارد که با مواد مسدود شوند. اکسترودر رایج‌ترین نوع اکسترودر است و هزینه سرمایه‌گذاری نسبتاً پایینی دارد [16] استفاده از پیچ با قطر کوچکتر می‌تواند چندین مزیت را برای دستیابی به توان خروجی بالاتر در سرعت‌های بالای پیچ ارائه دهد. یکی از مزایای مهم اکسترودر با قطر کوچک تر ویژگی‌های بهتر انتقال حرارت است. توان خروجی بالاتر در سرعت‌های بالا با استفاده از اکسترودر با قطر کوچک تر قابل دستیابی است. این امر ویژگی‌های بهتر انتقال حرارت را ارائه می‌دهد [16] هدف یک قالب اکستروژن توزیع ذوب پلیمر در کانال جریان است تا اینکه ماده با سرعت یکنواخت و کاهش فشار حداقل از قالب خارج می‌شود. به جز دایره‌ای دای، ایجاد یک هندسه کانال جریان واحد که بتوان از آن برای دامنه وسیعی استفاده کرد، بسیار دشوار است از پلیمرها و شرایط عملیاتی. از طریق یک قالب اکستروژن، توزیع سرعت خروجی یک عملکردی از نرخ برش، دما و اتلاف حرارت ذوب پلیمری [17]. در هر دو حالت تک و اکستروژن دو ماردون، همه قالب‌ها نیاز به گرمایش کافی و یکنواخت دارند و نباید فضای دای در آنها وجود داشته باشد کانال‌های جریان برای جلوگیری از نقاط داغ یا سرد در جریان پلیمر که ممکن است ویسکوزیته ذوب را تغییر دهد منجر به تخریب رزین می‌شود [18]. عملکرد قالب اکستروژن به طراحی هندسه منیفولد و شرایط عملیاتی که در طول اکستروژن اتخاذ می‌شود بستگی دارد [17] طراحی اکستروژن ساخت دای یک کار پیچیده است زیرا ابعاد محصول خروجی به طراحی دای و به خواص پلیمر و پارامترهای فرایند اکستروژن بستگی دارد. فرایند طراحی قالب می‌تواند با ترکیب شبیه‌سازی محاسباتی با داده‌های تجربی و بهبود نظارت بر اکستروژن طراحی بهتر و پیشرفته قالب کیفیت محصول را بهبود بخشد [19] در اکسترودرهای دو ماردون، از آنجایی که پره یکی از ماردون‌ها با کانال ماردون دیگر درگیر می‌شود، می‌توان از انسداد جلوگیری کرد و در نتیجه، اختلاط مواد در کانال‌های ماردون‌ها بهبود یابد.

در اکسترودرهای تک ماردون، مواد برای مدت زمان بیشتری نسبت به اکسترودرهای دو ماردون نگه‌داشته می‌شود، پدیده‌ای که با لایه‌های ساکن روی سطح ماردون مرتبط است [20] حدود سه برابر بیشتر خروجی مواد نسبت به یک اکسترودر تک پیچ با اندازه و سرعت پیچ مشابه دارد [21] به طور نظری، فرآیند جریان ماده می‌تواند به چهار بخش تقسیم شود: (الف) تغذیه اکسترودر، (ب) حمل و نقل جرم، (ج) جریان از طریق قالب، (د) خروج از قالب و پردازش بعدی. در حین فرآوری ماده، جرم عمدتاً توسط نیروی برشی، فشار، نرخ خنک‌سازی، شکل‌دهی و زمان اقامت تغییر شکل می‌یابد. [22] به‌طور معمول، کانال اکستروژن به سه بخش تقسیم می‌شود: (الف) منطقه تغذیه، (ب) منطقه انتقال و (ج) منطقه اندازه‌گیری. زمان پردازش مواد در اکسترودر به‌عنوان زمان توزیع اقامت نامیده می‌شود. توزیع زمان اقامت یک پارامتر مهم برای کیفیت محصول است. توزیع زمان اقامت در اکسترودرهای دوقلوی چرخش معکوس به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است [20-23] مطالعه ساکایی و همکاران [20]. زمان اقامت توزیع در اکسترودرهای دوقلوی

چرخش مخالف و چرخش موافق را مقایسه کرده و دریافته‌اند که توزیع زمان اقامت تندتری در استفاده از اکسترودر دوقلوی چرخش مخالف به دست آمده است. یانسن و همکاران [23] زمان توزیع اقامت را در چهار نوع میکسر پیوسته مقایسه کرده و نتیجه گرفتند که اکسترودرهای دو ماردونه متقابل با چرخش معکوس، زمان توزیع اقامت باریک‌تری نسبت به اکسترودرهای دو ماردونه با چرخش هم‌جهت و هم‌زن‌ها دارند. این یافته با کار نویسندگان دیگر همخوانی دارد که نشان دادند زمان توزیع اقامت برای اکسترودرهای متقابل باریک‌تر از اکسترودرهای تک‌ماردونه یا اکسترودرهای دو ماردونه با چرخش هم‌جهت است [21]. بیشتر اکستروژن‌های تجاری انتخابی از پیچ‌ها یا بخش‌های قابل تعویض ارائه می‌دهند که پیکربندی مناطق تغذیه، انتقال و اندازه‌گیری را تغییر می‌دهند. این نوع طراحی مدولار امکان تغییر فرایند اکستروژن را برای برآورده کردن نیازهای خاص، مانند مخلوط کردن، فراهم می‌کند [1]. پیچ‌های تغذیه‌دار عمده‌ای در اکسترودرهای دوقلوی پیچ دیده می‌شوند. میزان خروجی اکسترودر در حالت پایدار تابعی از سرعت پیچ نیست. بر خلاف ذوب در اکسترودرهای تک‌پیچ، مطالعه ذوب در اکسترودرهای دوقلوی پیچ تنها به‌تازگی در ادبیات علمی ظاهر شده است [12]. مدلهایی برای تحلیل فرآیند ذوب در اکسترودرهای دورانی دوقلوی ایجاد شده‌اند. بر اساس این مدل‌های ذوب، چندین مدل کامپیوتری جامع توسعه یافته است که عمده‌ای برای اکسترودرهای دورانی دوقلوی ساخته شده‌اند [9].

1.2 مدل‌سازی فرایند

به منظور مدل‌سازی یک فرایند، انتخاب ابزار شبیه‌سازی مناسب برای تحلیل عملی و واقع‌گرایانه عملیات اهمیت دارد. برای اکستروژن کامپوزیت‌های پلیمری، ابزار شبیه‌سازی باید قادر باشد جنبه‌های ضروری این فرایند را مورد بررسی قرار دهد. به عنوان مثال، شرایط در سیلندر همدم و ایزو باتیک نیست [27]. و در بیشتر موارد، مواد همگن نیستند. این عدم همگنی در صورتیکه فرایند شامل دانه‌ها [28] یا الیاف [29،30] باشد، بیشتر پیچیده می‌شود. در دهه 1990 جریان‌های غیر ایزوترمال توسط کی و همکاران [31] و وایت و چن [32،33] مورد مطالعه قرار گرفتند. در اکسترودرهای دوقلوی با پیچ‌های در حال چرخش یکسان، توسط بنگ و وایت [34] در ماشین‌های دوقلوی با پیچ‌های مخالف در حال چرخش، و توسط هونگ و وایت [35] برای اکسترودر دوقلوی با پیچ‌های درهم‌تنیده استفاده شده است. جریان پلیمرها در فرآیند اکستروژن به خوبی تعریف شده است، اگرچه مدل‌سازی جریان در اکسترودرهای دو ماردونه همچنان دشوار است. مدل‌سازی پیشرفته‌تر نیاز به رویکرد ترکیبی دارد که شامل بررسی انتقال جامد، ذوب و جریان مذاب پلیمر باشد. اولین تحلیل‌های دقیق از فرآیند اکستروژن پلیمر مرتبط با انتقال مذاب و سپس انتقال جامد بود. [36] برای چنین اکسترودرهایی در مطالعات اخیر [9،37] ظاهر شده است. جریان یک پلیمر مذاب می‌تواند در یک مدل جهانی با استفاده از رویکردهای یک بعدی و دو بعدی نمایش داده شود [6،8،37،38]. این کار شامل ساده‌سازی مسیر ذره و انجام یک تحلیل حجم محدود است که نیازمند دانش درباره هندسه پیچ، خواص مواد و شرایط پردازش می‌باشد. ابزارهای مدل‌سازی اکستروژن رایج برای چنین تحلیل‌هایی شامل LUDOVICfi, Morex, SIGMA, and Akron-Co-Twin Scre می‌باشد [39-41]. پارامترهای اصلی فرآیند شامل فشار، دما، زمان ماند و نسبت پر شدن است.

LUDOVICfi نرم‌افزار شبیه‌سازی برای رفتار مکانیکی-حرارتی. به طور کلی در اکستروژن دوقلوی ماردونی و فرآیندهای بچ است. این رویکرد به صورت ۱ بعدی غیرایزوترمال در طول ماردون بوده و به کاربر این امکان را می‌دهد که تکامل پارامترهای اصلی فرآیند را محاسبه کند. در یک مطالعه اکستروژن با سرعت فوق‌العاده بالا [42] به عنوان مثال

LUDOVIC نرم‌افزار برای محاسبه پارامترهای جریان ترمومکانیکی برای پروفیل‌های مختلف ماردون استفاده شد و مشخص شد که همبستگی خوبی بین نتایج نظری و تجربی ارائه می‌دهد. ویلچینسکی و همکاران [9] از سیستم شبیه ساز

TWIN_CT مدل اکسترودر دوقلو با پیچ‌های متضاد برای انواع پیکربندی‌های پیچ استفاده کردند. این مدل سه ناحیه اصلی فرآیند را ارائه می‌دهد: انتقال جامد، ذوب و جریان مذاب. شبیه‌سازی این امکان را فراهم می‌کند که روند ذوب پلیمر، اکستروژن فشاری و پروفیل‌های دما، همچنین درجه پر شدن کانال پیچ در اکسترودر دوقلو با پیچ‌های متضاد پیش‌بینی شود [41]

FEM این مدل برای یک آرایش پیچ مدولار بسیار کارآمد است. تکنیکی مبتنی بر مدل‌سازی ۳ بعدی توسط ایشیکاوا و همکاران ارائه شده است [43] به عنوان یک مدل عددی برای اکسترودر دو پیچ هم‌چرخ است. این مدل ادعا می‌کند که ابزاری قدرتمند برای ارزیابی عملکرد مخلوط‌سازی است زیرا امکان تخمین پارامترهای مخلوط‌سازی مانند تنش و کرنش را فراهم می‌آورد.

مدل ذوب توسط ویلسینکی و وایت [37] توضیح می‌دهد که اثرات فشار در اثر دو پیچ در ذوب پلیمرها شکاف چگانه است. پلیمر ذوب می‌شود و از دستگاه غلتک خارج می‌شود.

شکاف-انتهای تحت فشار C فضای خالی- در یک جریان فشار. این مدل یک چارچوب نظری ارائه می‌دهد. توجیح استفاده از پیچ‌های ضدچرخش. ویلچینسکی و همکاران [9] رویکرد را تعمیم داد برای مدل‌سازی فرآیند پلاستیک برای تجهیزات تک پیچ و بارونسکی-پروبیست و همکاران [10] همین کار را برای اکستروژن دو پیچ انجام داده‌اند. در اکثر موارد، روش‌ها مشابه هستند با تغییرات جزئی، زمانی که در فرآیند تغییری ایجاد شود شرایط، همانطور که توسط ردل و همکاران نشان داده شده است، [39] برای خودکشیدن و اکسترودر پر شده. مواد پرکننده نسبت برای سیستم ناشناخته بود، بنابراین محاسبه به صورت معکوس از قالب تغذیه انجام شد. به دلیل دمای نامشخص محصول نهایی، از یک روش تکراری استفاده شد تا فشار، ضریب پر کردن و پروفیل‌های دما را محاسبه کند. دمای محاسبه شده در موقعیت جایی که ذوب شدن پایان می‌یابد با نقطه ذوب پلاستیک مورد استفاده مقایسه می‌شود. همگرایی محاسبات تکراری زمانی به دست می‌آید که دماها برابر باشند [5،9].

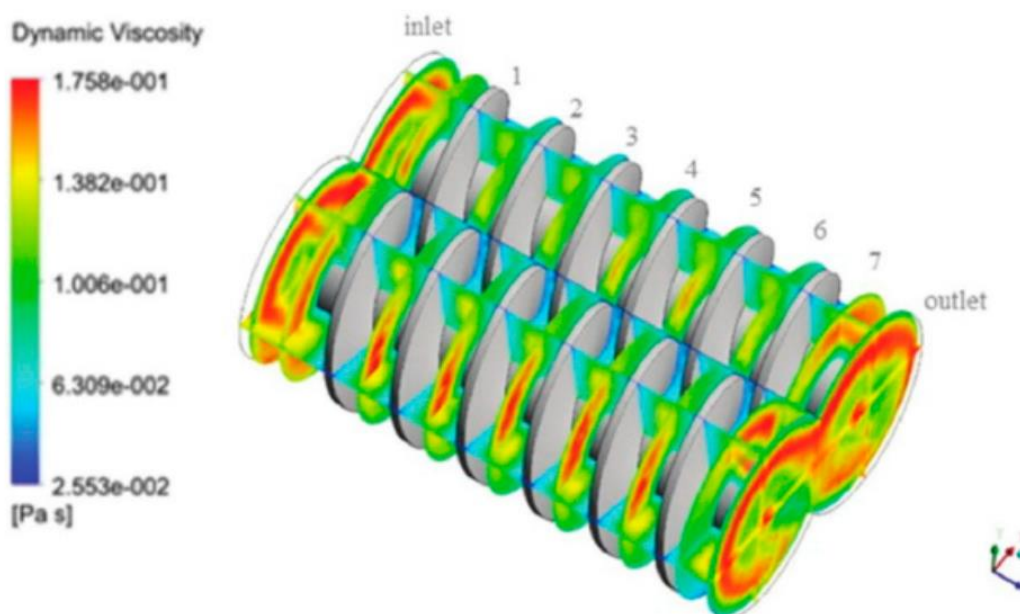
در یک تحلیل عددی از جریان پلیمرها در ماردون‌های چرخان، یک ماده در نظر گرفته می‌شود که در یک فرم مایع از ناحیه تغذیه [36]. از سوی دیگر، زمانی که ذوب شدن به طور تجربی مشاهده می‌شود این تحت تأثیر عواملی مانند نرخ تغذیه، سرعت پیچ و نرخ برش قرار دارد، که نشان می‌دهد ذوب یک فرآیند تدریجی است. آزمایشاتی که توسط لوواندوفسکی و همکاران انجام شده است. [5] ذوب شدن زودتر آغاز می‌شود زمانی که نرخ تغذیه به دلیل تشکیل سریع‌تر بستر پالت افزایش می‌یابد هنگامی که فضای خالی بیشتر پر شده‌اند و طول بستر پالت (لایه‌ای که توسط نیمه یا کاملاً ذوب‌شده تشکیل می‌شود، پلیمری که در سیلندر است) بلندتر است، ذوب کامل پلیمر به پیچ‌های بلندتری نیاز دارد. وقتی که سرعت ماردون در یک نرخ جریان ثابت افزایش می‌یابد، ذوب شدن زمان بیشتری می‌برد زیرا گرانول‌های پلیمر هستند به طور سریع‌تر منتقل می‌شود و درجه پر شدن کاهش می‌یابد [44]. از آنجایی که کمتر پر شده است، برای ذوب کامل، پیچ‌های که محفظه ی C کوتاه‌تری نیاز است.

مدل ویلچینسکی و همکاران [45] این دو را متمایز می‌کند مناطق ذوب: یک منطقه ذوب نیمه پر و یک منطقه ذوب کاملاً پر. بر اساس پدیده‌های ذوب، مدل‌های ریاضی برای ذوب در هر دو منطقه پیشنهاد شده است [5،6]. در ناحیه نیمه پر، تعادل انرژی بر روی یک حجم ابتدایی از ماده اعمال شد فرض این است که در این منطقه هیچ حرارتی ناشی از اصطکاک تولید

نمی‌شود حدود 80٪ از گرمای مورد نیاز برای ذوب یا جوشاندن مقدار، از گرمای تولید شده تأمین می‌شود سایش بین پیچ‌ها و لوله، که منجر به برش می‌شود. حرارت باقی‌مانده توسط منابع خارجی، مانند مجموعه‌هایی از بخاری‌های کارتریجی حرارتی که در شیارهای بدنه قرار دارند [14،46،47]. استفاده از نرم افزار، برای شبیه‌سازی فرآیندهای اکستروژن در هر دو اکسترودر پیچ‌تک و دوپیچ مورد استفاده است [5] میدان دما، فشار تغییرات در امتداد پیچ، الگوی جریان، زمان ماند، و نیروهای برش پیش‌بینی شدند. لوواندوفسکی و غیره [5]. و لوواندوفسکی [12] روشی را با استفاده از نانو سیالات کاملاً سه‌بعدی غیر نیوتنی به کار برده است. برای توصیف ویژگی‌های پمپاژ پیچ در یک اکسترودر دو پیچ متقابل چرخان با پلیمرها

FEM مدل‌سازی نتایج به صورت تجربی اعتبارسنجی شده‌اند. رفتار برشی غیرنیوتونی پلیمرهای ذوب شده معمولاً با مدل قدرت یا معادله لگاریتمی کلاین مدل‌سازی می‌شود. با این حال، پروفیل‌های فشار برای یک سیال نیوتونی و یک سیال غیرنیوتونی به طور کلی مشابه است و شیب فشار با کاهش شاخص مدل قدرت کاهش می‌یابد [5،12] یک نمونه از شبیه‌سازی مایعات مطالعه‌ی تألیفینی و همکاران است [49].

ANSYS FLUENT برای شبیه‌سازی یک مدل دینامیک سیال محاسباتی از منطقه تغذیه یک اکسترودر دو ماردون استفاده شد. شکل 1 ویسکوزیته‌ی ناحیه پیچ در منطقه تغذیه، یکی از نتایج شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

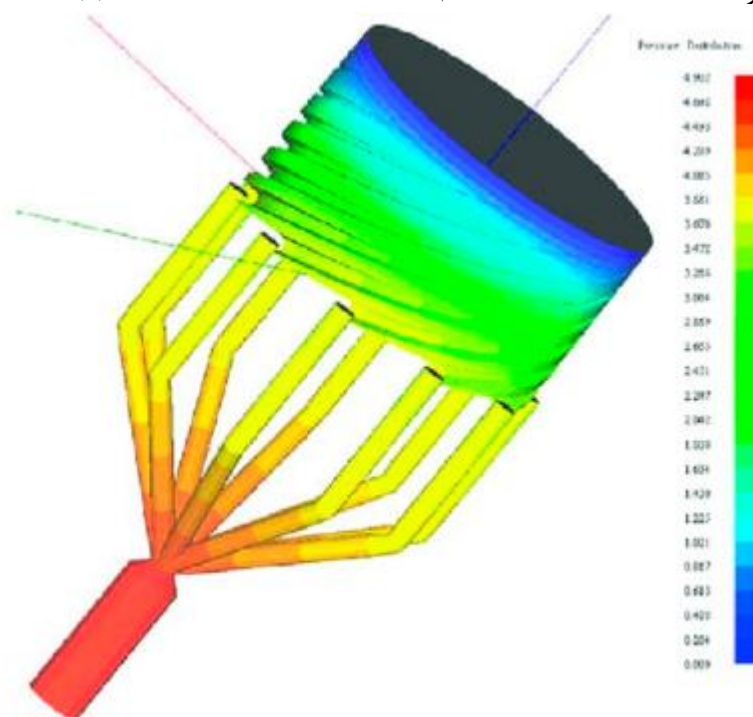


شکل 1. مدل محاسباتی میدان ویسکوزیته در ناحیه تغذیه اکستروژن دوقلو با ANSYS مدل سیال محاسباتی ویسکوزیته را نشان می‌دهد. [49]

به دلیل افزایش سریع کاربردهای جدید محصولات فیلم/ورق در زمینه‌های مختلف بسته‌بندی، صنایع الکترونیکی و نوری، بهره‌وری بالاتر با هزینه‌های تولید کمتر دارند زیرا برخی از پارامترها را نادیده گرفته‌اند فرآیند اکستروژن توسط مالک و همکاران بهینه‌سازی شد. [48] ترکیب عناصر ماردونی جلوبر و عقببر، لغزش دیواره باعث کاهش نرخ افزایش فشار عناصر ماردونی جلوبر و نرخ افت فشار عناصر ماردونی عقببر می‌شود که منجر به کاهش کلی فشار در بخش مخلوط می‌گردد. این امر نشان می‌دهد که می‌توان فرآیند را با کنترل رفتار لغزش دیواره مایع از طریق انتخاب مناسب بهینه کرد. نوع مواد، زبری سطح و دماها برای سطوح پیچ و سیلندر اکسترودر و قالب و قابلیت‌های بالاتر از جمله مهم‌ترین جهت‌ها برای توسعه



تکنولوژی اکستروژن فیلم/صفحه هستند [2]. مدل‌سازی فرآیند از اولین مدل‌های ریاضی و فیزیکی که توسط پییرسون و پتری ساخته شد [50،51] به استفاده از پلتفرم‌های مدل‌سازی مدرن تکامل یافته است. به عنوان مثال، ولاچوپولوس و سیدروپولوس [52] استفاده از SPIRALCAD ADVANCE نرم‌افزار برای شبیه‌سازی طراحی قالب مارپیچی برای اکستروژن فیلم بادی (شکل 2)



شکل 2 توزیع فشار پیش‌بینی شده توسط SPIRALCAD ADVANCE در مدل‌سازی فیلم پلیمر
blowing adapted from Vlachopoulos and Sidiropoulos [52] with permission from Elsevier, 2020

1.3 سیلندر

در دماهای بالا، چسبیدن پلیمر به سطح ورودی می‌تواند جریان مواد را محدود کرده و مشکلات انتقال ایجاد کند [24]. برای داشتن جریان ثابت مواد از قیف به داخل اکسترودر، باید فشردگی تدریجی در منطقه همگرایی در نظر گرفته شود و مقطع قیف دایره‌ای باشد. اکسترودرهای امروزی از طراحی میله‌ای مدولار برای اختلاط بهتر مواد در سیلندر استفاده می‌کنند. از انواع طراحی‌های مارپیچ ضخیم، نازک و ترکیبی ضخیم/نازک برای ساخت پیچ‌ها استفاده می‌شود که شرایط برش را با اندازه مارپیچ، دوران و سرعت کنترل می‌کنند. زینسکی و همکاران نیز در این زمینه تحقیقاتی انجام داده‌اند. [9،15،36،39] یک تکنیک پیشرفته برای مدل‌سازی جامع پیچ در فرآوری پلاستیک‌ها ارائه شده است که سیستم کامپیوتری چندمنظوره برای بررسی حمل و نقل، ذوب، مخلوط کردن، تولید فشار و عبور مواد از قالب اکسترودر را شامل می‌شود. در این روش، از الگوریتم‌های ژنتیکی برای بهبود عملکرد مدل‌ها و از سطح پاسخ برای ارائه مدل‌های ریاضی فرآیند استفاده شده است. این مطالعه بر اهمیت پیش‌بینی رفتار مواد، به ویژه خواص ذوب و ترمومکانیکی در حین فرآیند اکستروژن تأکید دارد. در داخل سیلندر اکسترودر، ماده پلیمری تحت تأثیر دما، سرعت ماردون و زمان قرار می‌گیرد که با



عنوان توزیع زمان ماند (RTD) شناخته می‌شود. فشار اطراف قالب تأثیر مستقیمی بر کیفیت محصول نهایی دارند زیرا زمان قرارگیری ماده در معرض دما را تعیین می‌کنند. برای بررسی RTD می‌توان از طیف‌سنجی نزدیک به مادون قرمز (NIR) استفاده کرد. به عنوان مثال، در پلی‌پروپیلن، می‌توان توزیع یک ماده جاذب UV را با اندازه‌گیری عدد موج و شدت یک پیک خاص در 6475 سانتی‌متر منفی یک، بررسی کرد. به طور خلاصه، فشار، اختلاط و هندسه برش بر RTD تأثیرگذار هستند. [53]

نکات کلیدی و جزئیات بیشتری را در مورد مدل‌سازی پیچ‌های اکسترودر و عوامل مؤثر بر فرآیند اکستروژن پلاستیک‌ها می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

تأثیرات طراحی پیچ و عناصر اختلاط بر زمان ماند (RTD) و زمان ماند متوسط (MRT):

- نوع، طول و موقعیت عناصر اختلاط: این عوامل به طور قابل توجهی بر RTD و MRT در اکسترودرهای دو ماردونه تأثیر می‌گذارند. به طور خاص، گنجانیدن عناصر مخلوط کننده در پروفیل پیچ، زمان اقامت را افزایش می‌دهد.
- عناصر پیچ معکوس: افزودن عناصر پیچ معکوس به افزایش MRT منجر می‌شود.
- فاصله عناصر اختلاط: هرچه فاصله عناصر اختلاط از قالب بیشتر باشد، MRT افزایش می‌یابد. همچنین افزایش فاصله بین دو عنصر اختلاط نیز باعث افزایش MRT می‌شود.
- طول عناصر اختلاط: افزایش طول عناصر اختلاط نیز موجب افزایش MRT می‌شود.
- نرخ جریان خوراک و سرعت ماردون: افزایش نرخ جریان خوراک و سرعت ماردون منجر به کاهش MRT می‌شود.
- محتوای رطوبت خوراک: کاهش محتوای رطوبت خوراک، MRT را افزایش می‌دهد.

عملکرد عناصر اختلاط:

- بلوک‌های ورز دهی و دیسک‌های جداگانه: این عناصر واحد اصلی اختلاط پراکنده را در اکسترودرها تشکیل می‌دهند. عملکرد آنها بستگی به پر شدن کامل با ماده دارد و ممکن است به صورت جزئی یا کامل باشد، و تحت تأثیر جریان ناشی از فشار قرار می‌گیرند.
- دیسک‌های ورز دهی و عناصر دنداندار: این عناصر برای برش و ترکیب مجدد جریان‌ها استفاده می‌شوند و با ارسال همزن‌های ترکیبی، منطقه مخلوط سازی قوی‌تری ایجاد می‌کنند.
- حرکت روتورهای مدولار: حرکت این روتورها فشارهای نوسانی ایجاد می‌کند.

ساختارهای نگهدارنده قالب:

- سیستم‌های مستقیم: در این سیستم‌ها، قالب به صورت خطی با پیچ اکسترودر قرار می‌گیرد.
- سیستم‌های کراس‌هد: در این سیستم‌ها، محصول اکسترودر شده در زاویه راست با پیچ خارج می‌شود و برای اعمال ترکیبات لاستیکی بر روی زیرلایه‌ها مانند سیم و کابل استفاده می‌شوند.

تحلیل و بهینه‌سازی قالب:



- روش‌های المان محدود: این روش‌ها برای تحلیل و بهینه‌سازی ساختار قالب استفاده می‌شوند، به ویژه برای قالب‌های اکستروژن فلزی که تحت فشار و دمای بالا کار می‌کنند.
 - تأثیر سرعت ماردون: افزایش توان خروجی به طور خطی با افزایش سرعت ماردون افزایش می‌یابد و خروجی خاص به نظر می‌رسد مستقل از فشار باشد.
 - پروفایل‌های پیچیده قالب: استفاده از پروفایل‌های پیچیده قالب برای تولید محصولاتی با هندسه‌های پیچیده منجر به جریان نامتعادل مواد می‌شود.
- فیلم‌های چند لایه و اکستروژن مشترک:
- کاربرد در بسته‌بندی: فیلم‌های چند لایه به طور فزاینده‌ای در صنعت بسته‌بندی استفاده می‌شوند تا الزامات عملکرد خاصی را برآورده کنند.
 - اکستروژن مشترک: این روش برای تولید فیلم‌های دمیده چند لایه رایج است.
 - جریان یکنواخت: جریان یکنواخت ماده از طریق قالب برای کیفیت خوب محصول در اکستروژن پروفیل ضروری است. برای دستیابی به جریان یکنواخت، تغییراتی در شکل قالب، محل ورود، اندازه ورود و طول بلبرینگ محلی قابل اعمال است.
 - دینامیک سیالات محاسباتی (CFD): این روش برای مدل‌سازی جریان مواد و بهینه‌سازی فرآیند اکستروژن مشترک استفاده می‌شود.
 - پیوستگی سرعت و تنش: در مرز بین لایه‌های مجاور، سرعت و تنش‌ها باید پیوسته باشند.
 - اثر ویسکوزیته: ویسکوزیته پلیمرها بر شکل رابط، سرعت، فشار و نرخ برش در قالب تأثیر می‌گذارد، اما تأثیر کمی بر توزیع زمان اقامت دارد.
- مدل‌سازی توزیع فشار در قالب:
- ترکیبات پلیمری: مدل‌سازی توزیع فشار در قالب برای سه ترکیب مختلف پلیمری از جمله پلیمر در بستر و لایه درپوش انجام شده است.
 - LDPE: به عنوان نمونه، خواص LDPE در فرآیند اکستروژن مورد بررسی قرار گرفته است.
- این اطلاعات، دید جامعی از عوامل مؤثر بر فرآیند اکستروژن پلاستیک‌ها و اهمیت طراحی بهینه پیچ و قالب را ارائه می‌دهد. همچنین، استفاده از روش‌های شبیه‌سازی و مدل‌سازی در بهبود کیفیت و کارایی این فرآیند را نشان می‌دهد. [49، 64، 63، 62، 61، 59، 55، 54، 28، 60، 65]

نتیجه گیری

در سال‌های گذشته، تحقیقات متعددی بر روی فرآیند اکستروژن انجام شده است که در نهایت منجر به توسعه این فناوری در صنایع مختلف گردیده است. اگرچه اکستروژن به عنوان یک روش شناخته شده و متداول در تولید مواد و



محصولات صنعتی به شمار می‌آید، اما پیشرفت‌های مواد و تغییر نیازهای بازار، منجر به بروز چالش‌های جدیدی در این فرآیند شده است.

نقاط قوت و چالش‌ها در تحقیق بر روی اکستروژن:

1. تحقیقات مستمر در زمینه مکانیسم‌های ذوب و اختلاط:
 - بسیاری از پژوهشگران به بررسی عمیق مکانیسم‌های ذوب، اختلاط و اندازه‌گیری پلیمرها پرداخته‌اند که این تحقیقات به درک بهتر فرآیند کمک نموده است.
 - اما عمدتاً تمرکز بر روی پلیمرهای یک‌فازی بوده و تحقیقات در زمینه مواد چندفازی محدود است.
2. چالش‌های مواد چندفازی:
 - مواد چندفازی پیچیدگی‌های خاصی دارند که بهینه‌سازی خواص ساختاری آنها، به ویژه در اکستروژن محصولات مکانیکی، را دشوارتر می‌کند.
 - این پیچیدگی‌ها نیاز به راهکارهای نوآورانه و تجزیه و تحلیل‌های عمیق‌تری دارند که کمتر به آن پرداخته شده است.
3. بهینه‌سازی خواص ساختاری:
 - بهینه‌سازی خواص ساختاری به عنوان هدف نهایی در تولید محصولات مکانیکی مطرح است، اما به دست آوردن پارامترهای بهینه فرآیند بر اساس خواص مواد چندفازی، چالشی بزرگ است.
 - بهینه‌سازی اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های تجربی و تکراری، می‌تواند اهمیت زیادی در تعیین موفقیت اکستروژن داشته باشد.
4. پیچیدگی در یافتن روابط:
 - ایجاد روابط علمی بین خواص محصول و پارامترهای فرآیند، به ویژه زمانی که تنها داده‌های تجربی در دسترس باشد، پیچیده و پرهزینه خواهد بود.
 - برای غلبه بر این چالش، نیاز به روش‌های پیشرفته‌تری نظیر شبیه‌سازی‌های عددی و مدلسازی کامپیوتری احساس می‌شود که می‌تواند کارایی و دقت نتایج را افزایش دهد.

مراجع

1. Chokshi, R.; Zia, H. Hot-Melt Extrusion Technique: A Review. *Iran. J. Pharm. Res.* 2004, 3. [[CrossRef](#)]
2. Sakai, T. Screw extrusion technology—Past, present and future. *Polimery/Polymers* 2013, 58. [[CrossRef](#)]
3. Leistritz, P.; Burghauser, F. German Patent 699 757 1940. *Ger. Pat.* 1939, 682, 787.
4. Cope, C.W. Polymer and Wood Flour Composite Extrusion. U.S. Patent 5,847,016, 8 December 1998.
5. Lewandowski, A.; Wilczyński, K.; Wilczyński, K.J.; Nastaj, A. A composite model for an intermeshing counter-rotating twin-screw extruder and its experimental verification. *Polym. Eng. Sci.* 2015, 55, 2838–2848. [[CrossRef](#)]



6. Wilczyński, K.; Nastaj, A.; Wilczyński, K.J. Melting model for starve fed single screw extrusion of thermoplastics. *Int. Polym. Process.* 2013, 28, 34–42. [[CrossRef](#)]
7. Altinkaynak, A.; Gupta, M.; Spalding, M.A.; Crabtree, S.L. An investigation of the effect of screw geometry on melting in a single-screw extruder. In Proceedings of the Annual Technical Conference—ANTEC, Conference Proceedings, Orlando, FL, USA, 16–20 May 2010. *Polymers* 2020, 12, 1306 12 of 14
8. Tadmor, Z. Fundamentals of plasticating extrusion. I. A theoretical model for melting. *Polym. Eng. Sci.* 1966, 6, 185–190. [[CrossRef](#)]
9. Wilczyński, K.; Nastaj, A.; Lewandowski, A.; Wilczyński, K.J. Multipurpose Computer Model for Screw Processing of Plastics. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 2012, 51, 626–633. [[CrossRef](#)]
10. Baronsky-Probst, J.; Möltgen, C.V.; Kessler, W.; Kessler, R.W. Process design and control of a twin screw hot melt extrusion for continuous pharmaceutical tamper-resistant tablet production. *Eur. J. Pharm. Sci.* 2016, 87, 14–21. [[CrossRef](#)]
11. Laske, S.; Witschnigg, A.; Selvasankar, R.K.; Holzer, C. Measuring the residence time distribution in a twin screw extruder with the use of NIR-spectroscopy. *J. Appl. Polym. Sci.* 2014, 131. [[CrossRef](#)]
12. Lewandowski, A. Closely Intermeshing Counter-Rotating Twin Screw Extrusion of Polymers. *Chall. Mod. Technol.* 2011, 2, 36–40.
13. Jiang, Q.; Yang, J.; White, J.L. Simulation of screw pumping characteristics for intermeshing counter-rotating twin screw extruders. *Polym. Eng. Sci.* 2011, 51, 37–42. [[CrossRef](#)]
14. Shah, A.; Gupta, M. Comparison of the flow in co-rotating and counter-rotating twin-screw extruders. In Proceedings of the Annual Technical Conference—ANTEC, Conference Proceedings, Chicago, IL, USA, 16–20 May 2004.
15. Senanayake, S.A.M.A.N.S.; Clarke, B. A Simplified twin screw co-rotating food extruder: Design, fabrication and testing. *J. Food Eng.* 1999, 40, 129–137. [[CrossRef](#)]
16. Christiano, J.P. Examination of the performance of a high speed single screw extruder for several different extrusion applications. In Proceedings of the Annual Technical Conference—ANTEC, Conference Proceedings, Orlando, FL, USA, 2–4 April 2012.
17. Lebaal, N. Robust low cost meta-modeling optimization algorithm based on meta-heuristic and knowledge databases approach: Application to polymer extrusion die design. *Finite Elem. Anal. Des.* 2019, 162, 51–66.



[CrossRef]

18. Giles, H.F.; Wagner, J.R.; Mount, E.M. *Extrusion: The definitive Processing Guide and Handbook*;

William Andrew Inc.: Norwich, NY, USA, 2005; ISBN 0815514735.

19. Kostic, M.M.; Reifschneider, L.G. Design of Extrusion Dies. In *Encyclopedia of Chemical Processing*;

Taylor & Francis: Oxfordshire, UK, 2006; pp. 633–649.

20. Sakai, T.; Hashimoto, N.; Kobayashi, N. Experimental comparison between counter-rotation and co-rotation

on the twin screw extrusion performance. In Proceedings of the Annual Technical Conference—Society of

Plastics Engineers, Los Angeles, CA, USA, 4–7 May 1987.

21. White, J.L.; Kim, E.K. *Twin Screw Extrusion: Technology and Principles*; Hanser Publications: Cincinnati, OH,

USA, 1991.

22. Padmanabhan, B. Understanding the Extruder Processing Zone: The heart of a twin screw extruder.

Plast. Addit. Compd. 2008, 10, 30–35. [CrossRef]

23. Janssen, L.P.B.M.; Hollander, R.W.; Spoor, M.W.; Smith, J.M. Residence time distributions in a plasticating

twin screw extruder. *AIChE J.* 1979, 25, 345–351. [CrossRef]

24. Rauwendaal, C. *Polymer Extrusion: Fifth Edition*; Carl Hanser Verlag GmbH Co KG: Munich, Germany, 2014;

ISBN 9781569905166.

25. Wolf, D.; Holin, N.; White, D.H. Residence time distribution in a commercial twin-screw extruder.

Polym. Eng. Sci. 1986, 26, 640–646. [CrossRef]

26. Shon, K.; Chang, D.; White, J.L. A Comparative Study of Residence Time Distributions in a Kneader,

Continuous Mixer, and Modular Intermeshing Co-Rotating and Counter-Rotating Twin Screw Extruders.

Int. Polym. Process. 1999, 14, 44–50. [CrossRef]

27. Oh, S.I.; Wu, W.T.; Tang, J.P. Simulations of cold forging processes by the DEFORM system. *J. Mater.*

Process. Technol. 1992, 35, 357–370. [CrossRef]

28. Thompson, M.R.; Sun, J. Wet granulation in a twin-screw extruder: Implications of screw design. *J. Pharm. Sci.*

2010, 99, 2090–2103. [CrossRef]

29. Sui, G.; Fuqua, M.A.; Ulven, C.A.; Zhong, W.H. A plant fiber reinforced polymer composite prepared by a

twin-screw extruder. *Bioresour. Technol.* 2009, 100, 1246–1251. [CrossRef]

30. Hausnerova, B.; Honkova, N.; Lengalova, A.; Kitano, T.; Saha, P. Rheology and fiber degradation during

shear flow of carbon-fiber-reinforced polypropylenes. *Polym. Sci. Ser. A* 2006, 48, 951–960.

[CrossRef]

Polymers 2020, 12, 1306 13 of 14



31. Kye, H.; White, J.L. Simulation of continuous polymerization in a modular intermeshing co-rotating twin screw extruder: Application to caprolactam conversion to polyamide 6. *Int. Polym. Process.* 1996, *11*, 129–138. [[CrossRef](#)]
32. White, J.L.; Chen, Z. Simulation of non-isothermal flow in modular co-rotating twin screw extrusion. *Polym. Eng. Sci.* 1994, *34*, 229–237. [[CrossRef](#)]
33. Chen, Z.; White, J.L. Simulation of Non-isothermal Flow in Twin Screw Extrusion. *Int. Polym. Process.* 1994, *9*, 310–318. [[CrossRef](#)]
34. Bang, D.S.; White, J.L. An improved flow simulation model for a tangential counter-rotating twin screw extruder. *Int. Polym. Process.* 1996, *11*, 109–114. [[CrossRef](#)]
35. Hong, M.H.; White, J.L. Simulation of Flow in an Intermeshing Modular Counter-rotating Twin Screw Extruder: Non-Newtonian and Non-Isothermal Behavior. *Int. Polym. Process.* 1999, *14*, 136–143. [[CrossRef](#)]
36. Yacu, W.A. Modeling a twin screw co-rotating extruder. *J. Food Process. Eng.* 1985, *8*, 1–21. [[CrossRef](#)]
37. Wilczynski, K.; White, J.L. Melting Model for Intermeshing Counter-Rotating Twin-Screw Extruders. *Polym. Eng. Sci.* 2003, *43*, 1715–1726. [[CrossRef](#)]
38. Bawiskar, S.; White, J.L. Solids Conveying and Melting in a Starve Fed Self-wiping Co-rotating Twin Screw Extruder. *Int. Polym. Process.* 1995, *10*, 105–110. [[CrossRef](#)]
39. Redl, A.; Morel, M.H.; Bonicel, J.; Vergnes, B.; Guilbert, S. Extrusion of wheat gluten plasticized with glycerol: Influence of process conditions on flow behavior, rheological properties, and molecular size distribution. *Cereal Chem.* 1999, *76*, 361–370. [[CrossRef](#)]
40. Kim, B.J.; White, J.L. Continuous polymerization of lactam-lactone block copolymers in a twin-screw extruder. *J. Appl. Polym. Sci.* 2003, *88*, 1429–1437. [[CrossRef](#)]
41. Wilczynski, K.; White, J.L. Modeling of twin-screw extrusion. Part I. A model of counter-rotating extrusion. *Polimery* 2008, *53*, 754–759. [[CrossRef](#)]
42. Farahanchi, A.; Sobkowicz, M.J. Kinetic and process modeling of thermal and mechanical degradation in ultrahigh speed twin screw extrusion. *Polym. Degrad. Stab.* 2017, *138*, 40–46. [[CrossRef](#)]
43. Ishikawa, T.; Amano, T.; Kihara, S.I.; Funatsu, K. Flow patterns and mixing mechanisms in the screw mixing element of a co-rotating twin-screw extruder. *Polym. Eng. Sci.* 2002, *42*, 925–939. [[CrossRef](#)]
44. Akdogan, H. Pressure, torque, and energy responses of a twin screw extruder at high moisture contents.



Food Res. Int. 1996, 29, 423–429. [[CrossRef](#)]

45. Wilczyński, K.J.; Nastaj, A.; Lewandowski, A.; Wilczyński, K. A composite model for starve fed single screw

extrusion of thermoplastics. *Polym. Eng. Sci.* 2014, 54, 2362–2374. [[CrossRef](#)]

46. Breitenbach, J. Melt extrusion: From process to drug delivery technology. *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 2002, 54,

107–117. [[CrossRef](#)]

47. Puaux, J.P.; Bozga, G.; Ainser, A. Residence time distribution in a corotating twin-screw extruder. *Chem. Eng.*

Sci. 2000, 55, 1641–1651. [[CrossRef](#)]

48. Malik, M.; Kalyon, D.M.; Golba, J.C. Simulation of co-rotating twin screw extrusion process subject to

pressure-dependent wall slip at barrel and screw surfaces: 3D FEM analysis for combinations of forward and reverse-conveying screw elements. *Int. Polym. Process.* 2014, 29, 51–62.

[[CrossRef](#)]

49. Tagliavini, G.; Solari, F.; Montanari, R. CFD simulation of a co-rotating twin-screw extruder: Validation

of a rheological model for a starch-based dough for snack food. In Proceedings of the International Food

Operations and Processing Simulation Workshop, FoodOPS 2016, Larnaca, Cyprus, 26–28 September 2016.

50. Pearson, J.R.A.; Petrie, C.J.S. The flow of a tubular film. Part 1. Formal mathematical representation.

J. Fluid Mech. 1970, 40, 1–19. [[CrossRef](#)]

51. Pearson, J.R.A.; Petrie, C.J.S. The flow of a tubular film Part 2. Interpretation of the model and discussion of

solutions. *J. Fluid Mech.* 1970, 42, 609–625. [[CrossRef](#)]

52. Vlachopoulos, J.; Sidiropoulos, V. Polymer Film Blowing: Modeling. In *Reference Module in Materials Science*

and Materials Engineering; Elsevier Ltd.: Amsterdam, The Netherlands, 2017; ISBN 9780080523583.

53. Wilczyński, K.; Lewandowski, A.; Wilczyński, K.J. Experimental study for starve-fed single screw extrusion

of thermoplastics. *Polym. Eng. Sci.* 2012, 52, 1258–1270. [[CrossRef](#)]

54. Gautam, A.; Choudhury, G.S. Screw configuration effects on residence time distribution and mixing in

twin-screw extruders during extrusion of rice flour. *J. Food Process. Eng.* 1999, 22, 263–285. [[CrossRef](#)]

55. Kao, S.V.; Allison, G.R. Residence time distribution in a twin screw extruder. *Polym. Eng. Sci.* 1984, 24,

645–651. [[CrossRef](#)]

Polymers 2020, 12, 1306 14 of 14

56. Altomare, R.E.; Ghossi, P. An Analysis of Residence Time Distribution Patterns in A Twin Screw Cooking

Extruder. *Biotechnol. Prog.* 1986, 2, 157–163. [[CrossRef](#)]



57. Van Zuilichem, D.J.; Jager, T.; Stolp, W. Residence time distributions in extrusion cooking. Part II: Single-screw extruders processing maize and soya. *J. Food Eng.* 1988, 7, 197–210. [[CrossRef](#)]
58. Van Zuilichem, D.J.; Jager, T.; Stolp, W.; de Swart, J.G. Residence time distributions in extrusion cooking. Part III: Mathematical modelling of the axial mixing in a conical, counter-rotating, twin-screw extruder processing maize grits. *J. Food Eng.* 1988, 7, 197–210. [[CrossRef](#)]
59. Gogoi, B.K.; Yam, K.L. Relationships between residence time and process variables in a corotating twin-screw extruder. *J. Food Eng.* 1994, 21, 177–196. [[CrossRef](#)]
60. Bravo, V.L.; Hrymak, A.N.; Wright, J.D. Numerical simulation of pressure and velocity profiles in kneading elements of a co-rotating twin screw extruder. *Polym. Eng. Sci.* 2000, 40, 525–541. [[CrossRef](#)]
61. Crowther, B.G. *Rubber Extrusion: Theory and Development*; Rapra Technology Limited: Akron, OH, USA, 1998.
62. Gonçalves, N.D.; Teixeira, P.; Ferrás, L.L.; Afonso, A.M.; Nóbrega, J.M.; Carneiro, O.S. Design and optimization of an extrusion die for the production of wood-plastic composite profiles. *Polym. Eng. Sci.* 2015, 55, 1849–1855. [[CrossRef](#)]
63. Xianghong, W.; Guoqun, Z.; Yiguo, L.; Xinwu, M. Numerical simulation and die structure optimization of an aluminum rectangular hollow pipe extrusion process. *Mater. Sci. Eng. A* 2006, 435, 266–274. [[CrossRef](#)]
64. Mount, E., III. Coextrusion equipment for multilayer flat films and sheets. In *Multilayer Flexible Packaging*, 2nd ed.; Wagner, J.R., Ed.; William Andrew Publishing: Norwich, NY, USA, 2010.
65. Gupta, M. Three dimensional simulation of coextrusion in a complex profile die. In Proceedings of the