

تأثیر آرایش مارپیچ بر زمان اقامت نمونه در پخت زدایی آمیزه‌ی NR/SBR با اکسترودر دو مارپیچه

حمید یزدانی*

استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، yazdani@pnu.ac.ir

حورا فخاری

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، fakharii77@gmail.com

چکیده

انباشت پسماندهای پلیمری در محیط زیست تهدیدی برای زندگی انسان و دیگر موجودات کره زمین محسوب می‌گردد. همین موضوع سبب ضرورت بازیافت این گونه ضایعات می‌شود. در این مقاله، از روش پخت زدایی پیوسته توسط اکسترودر دو مارپیچه همسوگرد؛ برای بازیابی آمیزه‌ی لاستیکی NR/SBR استفاده شد. سپس زمان ماندگاری بر اساس آرایش مختلف مارپیچ و زوایای جزء آسیاب ساز؛ مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور المان های آسیاب ساز با زوایای گوناگون طراحی و در اکسترودر نصب شدند. در ادامه با در نظر گرفتن اکسترودر به عنوان یک راکتور پیوسته روابط و مدل‌هایی برای زمان اقامت و سایر پارامترهای موثر بر آن تعریف شد. با مطالعه دو مدل جامد و مایع (مذاب)؛ مشخص گردید که زمان اقامت فقط در قسمت مایع متأثر از آرایش مارپیچ خواهد بود. هدف از این پژوهش یافتن آرایش و زوایای بهینه، برای کاهش زمان اقامت می‌باشد، که بهبود کیفیت نمونه و کاهش مصرف انرژی را نیز در پی دارد. **واژه‌های کلیدی:** پخت زدایی، آرایش مارپیچ، اکسترودر، زمان اقامت، آسیاب‌ساز، آمیزه‌ی NR/SBR.

The Effect of Screw Configuration on Residence Time in Continuous Devulcanization of NR/SBR Mixture by Twin-Screw Extruder

H. Yazdani
H. Fakhari

Department of Chemical engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran
Department of Chemical engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran

Abstract

The accumulation of polymer waste in the environment is a threat to human life and other organisms on Earth. And it causes the necessity of recycling them. In this paper, a co-rotating twin-screw extruder was used to devulcanize the NR/SBR rubber compound. Then, the residence time was examined based on the different screw configurations and various angles of the kneading blocks. For this purpose, kneading elements were designed with different angles and set in the extruder. In the following, considering the extruder as a continuous reactor, equations and models for residence time and other parameters were defined. by studying solid and liquid (melt) models; It was found that the residence time is only affected by the spiral arrangement in the liquid part. This research aims to finding the optimal arrangement and angles to reduce the residence time, which improves quality and reduces energy consumption.

Keywords: Devulcanization, Screw Configuration, Extruder, Residence Time, Kneading elements, NR/SBR compound.

۱- مقدمه

بازیافت ضایعات لاستیکی علاوه بر از بین بردن مشکلات زیست محیطی ناشی از دفن و سوزاندن، به حفظ منابع ارزشمند نفتی و گازی نیز کمک می‌کند. از جمله روش‌های مدیریت این گونه ضایعات؛ گازی سازی و پخت زدایی می‌باشند. در فرایند گازی سازی، می‌توان از لاستیک‌های فرسوده؛ گازهای سنتزی (H₂) و سوخت‌های قابل استفاده تولید کرد [۱]. هم گاز کردن لاستیک‌های فرسوده با زیست توده، باعث افزایش راندمان و کاهش هزینه‌ها می‌شود [۳ و ۲]. اما این فرایند باعث انتشار CO₂ می‌شود، که اثرات منفی بر محیط زیست دارد [۴]. از این روی، پخت زدایی به عنوان یکی از بهترین راه‌های بازیابی لاستیک شناخته می‌شود [۵]. این فرایند؛ مزایایی چون کاهش هزینه نسبت به سنتز مجدد، تولید محصولات گوناگون و ایجاد اشتغال دارد، که آن را از لحاظ اقتصادی توجیه می‌کند. این روش اولین بارتوسط نیکلاس در سال ۱۹۷۲ ارائه شد [۶]. بنا بر ادعای او در این فرایند بیشتر پیوند های عرضی، بدون آن که زنجیره‌ی اصلی تخریب گردد، شکسته می‌شود [۷]. از جمله روش‌های مرسوم پخت زدایی؛ ترمومکانیکی،

ترموشیمیایی، فیزیکی-مکانیکی، بیولوژیکی، میکروویو و فراصوت می‌باشد [۱۲-۸]. یکی از رایج ترین دستگاه ها برای انجام روش ترمومکانیکی؛ اکسترودر نام دارد، که با اِعمال گرما و نیروی برشی بالا پیوندهای عرضی را می‌شکند [۱۳ و ۱۴]. در نتیجه ذرات خرد شده‌ی لاستیک، طی چند دقیقه پخت زدایی شده و مشابه یک آمیزه خام از دستگاه خارج می‌شود [۱۵]. اولین اکسترودر دومارپیچه در سال ۱۹۳۰ در کشور ایتالیا ساخته شد. که از مزایای بسیاری نسبت به نوع تک مارپیچه برخوردار بود، از جمله؛ تغذیه بهتر، اختلاط و انتقال گرمای مناسب‌تر، زمان اقامت کمتر و سرعت عمل بالا.

در این مطالعه از اکسترودر دومارپیچه برای و پخت زدایی آمیزه‌ی لاستیک طبیعی/لاستیک استایرن بوتادین، استفاده شده است [۱۶]. لاستیک طبیعی یا سپس - ۱ و ۴- پلی‌ایزوپرن؛ از فرآوری عصاره درخت رابر با بخار، و ترکیب آن با عوامل پخت، آنتی‌اکسیدان‌ها و پرکننده‌ها به دست می‌آید [۱۷]. لاستیک استایرن بوتادین نیز، یک کوپلیمر استایرن و بوتادین است، که مقاومتی مشابه لاستیک طبیعی دارد [۱۸]. برای تهیه‌ی چنین آمیزه‌ای؛ جورج و همکارانش از آسیاب دو غلطکه (با نسبت اصطکاک ۱:۱٫۴) استفاده کردند. سپس ترکیب را

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: yazdani@pnu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱

جدول ۱- مواد مصرفی برای تهیه آمیزه

Phr ^۱	مواد افزودنی ها
۵۰	لاستیک طبیعی
۵۰	استایرین- بوتادین لاستیک
۴۰	(دوده ۳۳۰) HAF
۳۰	(دوده ۵۵۰) FEF
۱۰	(روغن نفتنیک) Oil 250
۵	(اکسید روی) Zinc Oxide
۲	(اسید استارنیک) Stearic acid
۰/۷	MBT
۰/۵	CBS
۱	سولفور

۲-۲- عامل پخت زدایی

دی زایلن دی سولفاید با فرمول شیمیایی $C_8H_6S-SC_8H_6$ از شرکت بازیافت قم به عنوان عامل پخت زدایی در آزمایشات به کار گرفته شد.

۳-۲- تجهیزات

در این مقاله برای پخت زدایی آمیزه؛ از اکسترودر دومارپیچه درهم رونده همسوگرد^۲ مدل TSE۲۰، ساخت شرکت برابندر^۳ استفاده شد. این دستگاه دارای ۶ منطقه حرارتی با قابلیت تنظیم دما تا $400^{\circ}C$ می باشد. قطر مارپیچ در این اکسترودر ۲۰ میلی متر، نسبت طول به قطر مارپیچ (L/D) ۴۰ و حداکثر دور مارپیچ ۱۵۰ rpm می باشد. برای کاهش گشتاور در طول فرایند؛ دای دستگاه برداشته شد. دمای دو منطقه حرارتی اول، به منظور گرم کردن مقدماتی، $100-200^{\circ}C$ کمتر از ۳ منطقه بعدی تنظیم شدند.



شکل ۱- نمایی از اکسترودر دو مارپیچی همسوگرد

در دمای $150^{\circ}C$ تحت فشار پرس های هیدرولیک قرار دادند [۱۹].

هدف پژوهش جاری؛ طراحی مان های آسیاب ساز با زوایای گوناگون، به منظور بررسی تاثیر آرایش ها و برش های مختلف مارپیچ بر زمان اقامت آمیزه، می باشد. که مطالعه نتایج بررسی ها؛ می تواند به انتخاب طراحی بهینه در مقیاس صنعتی منجر شود. که باعث بهبود کیفیت، کاهش زمان فرایند و مصرف انرژی (در طولانی مدت) می شود. در این مقاله، برای محاسبه زمان اقامت؛ اکسترودر به عنوان یک راکتور پیوسته در نظر گرفته شد. همانگونه که پولسکیوئن و همکاران اکسترودر را یک راکتور ایده آل تعریف کردند. تا به کمک روش off line و درون خطی و یافتن پارامترهای گوناگون؛ ارتباطی میان زمان زمان اقامت و هندسه مارپیچ برقرار سازند [۲۰]. گستر و همکاران نیز برای محاسبه زمان اقامت در آرایش های گوناگون مارپیچ؛ probe هایی را در خروجی اکسترودر (مقابل جریان درگ) قرار دادند. سپس با رسم منحنی زمان اقامت بر حسب تعداد دور مارپیچ؛ میانگین زمان ماندگاری را در سرعت های مختلف، برای یک سیستم نیمه پر شده، تخمین زدند [۱۸]. بر اساس مطالعات میانگین زمان ماند در یک اکسترودر دو مارپیچ همسوگرد، با بررسی درجه پر شدن در ناحیه نیمه پر شده، تعداد محفظه های کاملاً پر و توان عملیات تعیین می شود [۲۱]. سوتانتو و همکارانش برای بدست آوردن رابطه سرعت مارپیچ و دیگر پارامتر های فیزیکی موثر بر پخت زدایی؛ مدلی طراحی کردند که با توجه به نرخ ورودی و دما پاسخ های متفاوتی دهد [۲۲ و ۲۳].

۲- بخش تجربی

۱-۲- مواد مورد استفاده

با توجه به اینکه اطلاعات اولیه در مورد مواد اولیه بسیار حائز اهمیت می باشد و در واقع تغییر ساختار بعد از پخت زدایی بر اساس آن می باشد، و از آنجایی که تقریباً ۷۰٪ لاستیک های سنتزی و طبیعی در صنعت تایر استفاده می شود؛ سعی شد آمیزه ای مشابه تایر های سنگین تهیه گردد و آزمایشات روی نمونه ی مذکور انجام شود. شتاب دهنده ها و عامل پخت (سولفور) به ترتیب از شرکت بایر آلمان و رنگیه پارس خریداری شدند. مواد پرکننده نیز از شرکت بهران و پارس لاستیک تامین گردید. هدف از افزودن پرکننده ها افزایش مدول الاستیسیته، استحکام و پایداری ابعادی می باشد [۲۴ و ۲۵]. آمیزه فوق بر طبق استاندارد ASTM ۱۵-۶۲۷D تهیه [۱۹] و تحت دمای $160^{\circ}C$ و فشار ۱۵۰ bar پخت شد [۲۶]. نمونه ی پخت شده پس از خرد شدن در آسیاب؛ به عنوان مواد اولیه برای انجام فرایند پخت زدایی در نظر گرفته شد.

^۱ Part per hundred rubbers

^۲ Intermeshing co-rotating twin screw extruder

^۳ Brabender

کانال‌ها بر نیروی برشی تاثیر قابل توجهی دارد. از طرفی میزان نیروی برشی مستقیماً متاثر از آرایش مارپیچ است. بنابراین با تغییر آرایش مارپیچ می‌توان نیروی برشی را کنترل نموده و به تبع آن فرایند پخت زدایی را هدایت کرد.

با توجه به شکل ۴؛ برای پی بردن به تأثیر تغییر شکل فضایی مارپیچ روی زمان اقامت، اجزای آسیب ساز در قسمت انتهایی مارپیچ (که زاویه ۴۵ درجه داشتند)، با اجزای آسیاب ساز زاویا ۶۰ و ۹۰ درجه تعویض شده است.

۴- محاسبه زمان اقامت آرایش‌های مختلف مارپیچ

در محاسبه زمان اقامت، باید به این نکته توجه داشت که؛ طراحی مختلف هر بخش از مارپیچ که آرایش و حجم متفاوت دارند، محاسبات را پیچیده‌تر می‌کند [۲۰]. اندازه گام‌ها، محل قرارگیری اجزای اختلاط و زاویه جزء آسیاب ساز، پارامترهای تأثیرگذار در محاسبه زمان اقامت می‌باشند. تا حد امکان سعی شد دیگر پارامترهای فرایندی همچون دما، فشار و دبی ورودی ثابت نگه داشته شود.

نظریه محاسبه زمان اقامت؛ زمان اقامت (τ) یک ماده در یک راکتور پیوسته از نسبت حجم موثر راکتور (V_R) به نرخ جریان (Q) محاسبه می‌گردد. حجم موثر راکتور نیز از حجم کل (V) و درجه پرشوندگی (f) بدست می‌آید.

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

$$V_R = V \cdot f \quad (2)$$

فاکتور پرشوندگی وابسته به آرایش مارپیچ، نرخ خوراک ورودی (Q) و سرعت مارپیچ می‌باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f = \frac{Q}{Q_{D,max}} \quad (3)$$

در معادله (۳)، $Q_{D,max}$ بیشینه‌ی جریان پسا می‌باشد.

اگر یک اکسترودر را بصورت یک راکتور پیوسته در نظر بگیریم حجم آن به گونه‌ی زیر خواهد بود:

$$V = A_1 \cdot l \quad (4)$$

در این رابطه A_1 ناحیه‌ای از فضای خالی اکسترودر و l طول اجزای مارپیچ می‌باشد.

با توجه به مقطع عرضی در یک اکسترودر دو مارپیچ همسوگرد برای اجزاء انتقال A_1 به صورت زیر تعریف می‌شود:

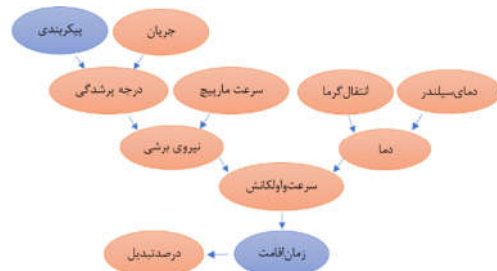
$$A_1 = (k_b - 2k_s)R_s^2 \quad (5)$$

در معادله‌ی بالا R_s شعاع خارجی مارپیچ می‌باشد، ثوابت k_b و k_s هم به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$k_s = n \left\{ \psi \left(\frac{C_L}{R_S} \right)^2 - \frac{C_L \sin \psi}{R_S} + \frac{\alpha}{2} \left[\left(\frac{C_L}{R_S} \right)^2 - 2 \frac{C_L}{R_S} + 2 \right] \right\} \quad (6)$$

$$k_b = 2(\pi - \psi) + \frac{C_L \sin \psi}{R_S} \quad (7)$$

$$\cos \psi = \frac{1}{2} \frac{C_L}{R_S} = \frac{1}{2} D_C \quad (8)$$



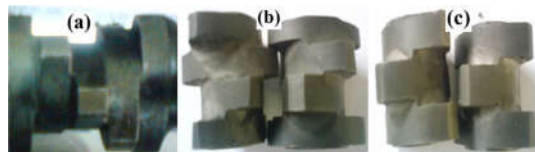
شکل ۲- پارامترهای مرتبط برای پخت زدایی با توجه به آرایش مارپیچ

۳- طراحی اجزاء آسیاب ساز

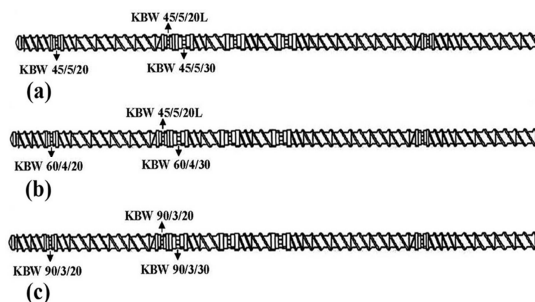
برای مشاهده تأثیر تغییر آرایش مارپیچ بر زمان اقامت، که از پارامترهای مهم و اثرگذار در ساختار لاستیک پخت زدایی شده می‌باشد، سه جزء آسیاب ساز^۱ با زوایای ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در قسمت‌های مورد نظر مارپیچ قرار داده شدند. ژانگ و همکارانش نیز در شبیه سازی عددی برای محاسبه‌ی زمان اقامت؛ زوایای فوق را برای دیسک‌ها در نظر گرفتند [۲۳].

جزء آسیاب ساز ۴۵ درجه، در مارپیچ اصلی اکسترودر برابندر موجود بوده. ولی اجزاء آسیاب ساز ۶۰ و ۹۰ درجه برای انجام همین پژوهش طراحی و ساخته شدند.

اجزاء آسیاب ساز ساخته شده با زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه و همچنین جزء آسیاب ساز ۴۵ درجه (که روی مارپیچ اصلی سوار بوده) در اشکال زیر نشان داده شده اند.



شکل ۳- بخش a: جزء ۴۵ درجه، b: جزء ۶۰ درجه، c: جزء ۹۰ درجه



شکل ۴- آرایش‌های مارپیچ: a: میزان برش پایین، b: میزان برش بالا متوسط، c: میزان برش بالا

در اکسترودر؛ مواردی همچون سرعت مارپیچ و میزان پر شدگی

¹ kneading element

پارامتر C_L حد واسط فاصله بین محور مارپیچ و ψ زاویه جزء آسیاب ساز می باشد.

دو مدل متفاوت برای محاسبه زمان اقامت بر پایه شکل فیزیکی مواد در اکسترودر، استفاده شده. که عبارتند از:

۱- مدل جامد ۲- مدل مایع (مذاب)

تفاوت مدل جامد و مدل مایع در محاسبه نرخ جریان حجمی (Q) و ظرفیت ماکسیمم جریان دراگ می باشد. برای مدل جامد معادله ۱ بصورت زیر می شود:

$$\tau = \frac{V_R}{Q} = \frac{V_{section} f}{Q_{solid}} = \frac{A_1 d l f}{Q_{solid}} \quad (9)$$

در معادله (۹) طول المان و Q_{solid} جریان حجمی است. با فرض این که آمیزه ریز شده رفتاری شبیه به ذرات جامد خواهد داشت؛ نرخ حجمی خوراک از نسبت از نسبت نرخ جرمی ورودی و چگالی مواد ورودی مطابق معادله (۱۰) محاسبه می گردد:

$$Q_{solid} = \frac{\dot{M}}{\rho_{bulk}} \quad (10)$$

در بخشی از اکسترودر که پلیمر بصورت مایع (مذاب) عمل می کند، می توان زمان اقامت را بصورت زیر بیان نمود:

$$\tau = \frac{V_R}{Q} = \frac{V_{section} f}{Q_{liquid}} = \frac{A_1 d l f}{Q_{liquid}} \quad (11)$$

$$Q_{liquid} = \frac{\dot{M}}{\rho_{rubber}} \quad (12)$$

حال به منظور محاسبه زمان اقامت مواد در اکسترودر همسوگرد دو مارپیچه با $L/D = 40$ ، برای لاستیک پخت زدایی شده با چگالی $1/2 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ و همچنین چگالی توده $0/51 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ برای لاستیک بازافتی خرد شده فرضیاتی را برای ساده کردن مسئله در نظر می گیریم:

۱- مارپیچ به سه قسمت تقسیم شده است:

الف) قسمت اول از ابتدای پیچ تا طولی برابر 535 میلی متر (دوسوم مارپیچ) می باشد، که در این قسمت جریان بصورت جامد برای مواد در نظر گرفته می شود که از مدل جامد برای محاسبه زمان اقامت استفاده شده است [۱۴].

ب) قسمت دوم از انتهای قسمت اول شروع شده تا انتهای مارپیچ می باشد، که در این قسمت جریان را بصورت مذاب در نظر گرفته شده و از مدل مایع برای محاسبه زمان اقامت استفاده شده است.

ج) انتهای مارپیچ، که شامل اجزای آسیاب ساز قابل تعویض است، به عنوان قسمت سوم فرض شد.

۲- جهت محاسبه زمان اقامت روابط ذکر شده در بالا طبق مراجع [۱۰ و ۱۵] مورد استفاده قرار گرفته شد. همچنین درجه پرشدگی (برای اجزای آسیاب ساز چپگرد) و فشار معادل ۱ منظور گردیده است.

۳- با توجه به اینکه میزان دبی ورودی برای هر سه آرایش مارپیچ یکسان و برابر با $M_1 = 0.372 \frac{\text{g}}{\text{min}} = 6.2 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ می باشد ولی میزان دبی خروجی به دلیل زمان های اقامت متفاوت برای سه آرایش مختلف مارپیچ، متفاوت و کمتر از میزان دبی ورودی است [۹ و ۱۰].

با توجه به بند سوم فرضیات، دبی جرمی ورودی به بخش جامد مارپیچ ($\dot{M}_{i,solid}$) در کل بخش جامد مارپیچ ثابت می ماند. ولی دبی جرمی ورودی به بخش مذاب مارپیچ ($\dot{M}_{i,melt}$) با توجه به تغییرات

اجزای آسیاب ساز (که در بخش مذاب قرار دارد)، در کل طول این بخش ثابت نمی ماند و دچار تغییر شده که این تغییر را در دبی مذاب خروجی شاهد هستیم و باید آن را در معادلات استفاده شده برای محاسبه زمان اقامت در ناحیه مذاب بصورت زیر لحاظ نمود:

با توجه به معادله (۱۱): زمان اقامت در اجزای معمولی

$$d\tau = \frac{A_1 d l f}{Q_{liquid}} \quad \text{می باشد. همچنین بر اساس توضیحات بند دوم؛ } f=1 \text{ در نظر گرفته شد. در نتیجه:}$$

$$t = \frac{A_1 d l \times 1}{(Q_{liquid} = Q_i)} \quad (13)$$

در رابطه ی فوق A_1 و $d l$ مقادیر ثابت برای هر جزء می باشند. بنابراین در این رابطه زمان اقامت (t) به مقدار دبی ورودی (Q_i) به قسمت مذاب وابسته است. که Q_i هم باید با توجه به میزان دبی خروجی (Q_o) برای هر آرایش مارپیچ، تصحیح گردد. برای اصلاح دبی ورودی برای هر آرایش مارپیچ از ضریب f' استفاده شده است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$t = \frac{A_1 d l \times 1}{(Q_{liquid} = Q_i)} \times f' \quad (14)$$

$$f' = \frac{Q_i}{Q_{o, \text{configure}(i), i=1,2,3}} \quad (15)$$

۵- نتایج و بحث

با استفاده از معادلات مذکور؛ زمان اقامت برای قسمت های مختلف مارپیچ و آرایش های گوناگون بدست آمد (جدول ۲ و ۳). میزان دبی خروجی و ضریب تصحیح دبی نیز در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۲- زمان اقامت محاسبه شده در اکسترودر برای آرایش های

مختلف مارپیچ در قسمت جامد و مذاب

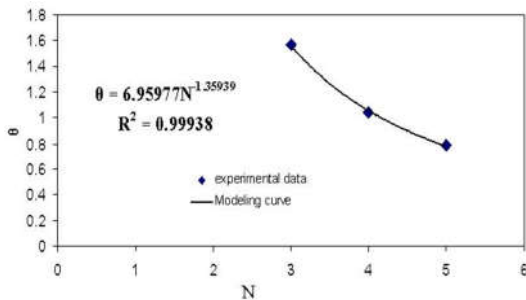
نوع آرایش مارپیچ در قسمت جامد ^۱	مشخصات اجزای تشکیل دهنده قسمت جامد مارپیچ	زمان اقامت در قسمت جامد
برش پائین، برش متوسط و برش بالا	$TE(20) + 20/1 m TE(30) + 30/3 m TE(30) + 40/1 m PE(R) + 50/1 m KE(45^\circ)$	۳/۲۵ دقیقه
نوع آرایش مارپیچ در قسمت مذاب	مشخصات اجزای تشکیل دهنده قسمت مذاب مارپیچ	زمان اقامت در قسمت مذاب
برش پایین	$0/15 m TE(30) + 0/1 m TE(20) + 0/1 m PE(R) + 0/5 m KE(45^\circ) + 60/2 m KE(45^\circ)$	۶/۱۶ دقیقه
برش متوسط	$0/15 m TE(30) + 0/1 m TE(20) + 0/1 m PE(R) + 0/5 m KE(60^\circ) + 0/2 m KE(45^\circ)$	۶/۳۶ دقیقه
برش بالا	$0/15 m TE(30) + 0/1 m TE(20) + 0/1 m PE(R) + 0/7 m KE(90^\circ)$	۶/۷۵ دقیقه

^۱ آرایش در قسمت جامد برای هر سه برش بدون تغییر و یکسان است.

^۲ $TE(20)$: طول جزء انتقال (جزء معمولی) با گام 20 میلی متر

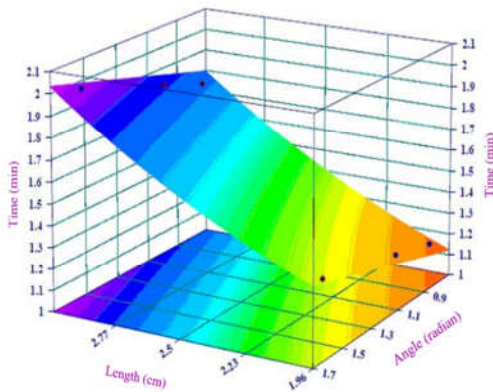
^۳ $TE(30)$: طول جزء انتقال (جزء معمولی) با گام 30 میلی متر

با استفاده از مقادیر جدول ۵؛ ارتباط بین زاویه دیسک و تعداد دیسک‌های استفاده شده در هر جزء آسیاب ساز در شکل زیر نشان داده شده است. $\theta = 6.95977N - 1.35939$



شکل ۵- نمودار دو بعدی زاویه دیسک (θ) بر حسب تعداد دیسک (N) اجزاء آسیاب ساز قسمت مذاب ماریچ

حال با استفاده از نرم افزار Table curve 3D داده های بدست آمده در جدول ۵ را در نمودار سه بعدی زمان اقامت بر حسب طول و زاویه دیسک رسم نموده.



شکل ۶- نمودار سه بعدی زمان اقامت بر حسب طول و زاویه دیسک اجزاء آسیاب ساز قسمت مذاب ماریچ مطابق با استفاده از نرم افزار Table curve 3D

نرم افزار Table curve 3D ابزار مدلسازی آسان و سریع برای مجموعه داده های پیچیده است. که امکان پیدا کردن معادلات ایده آل برای توصیف داده های تجربی سه بعدی را فراهم می‌کند. نرم افزار رابطه (۱۶) را مطابق با نمودار سه بعدی شکل ۶ (که به کمک داده های قبلی رسم شده) بدین صورت طراحی نموده است:

$$t = 0.857814470 + 0.062661922 L^{2.5} + 0.238985856 \theta^{0.5} \ln \theta = a + bL^{2.5} + c\theta^{0.5} \ln \theta \quad (16)$$

$$t = \text{residence time (min)}, L = \text{length (cm)}, \theta = \text{angle (radian)}$$

$$a = 0.857814470 [\text{min}], b = 0.062661922 [\text{min}/\text{cm}^{2.5}],$$

$$c = 0.238985856 [\text{min}/(\text{radian})^{0.5} \ln(\text{radian})]$$

سپس با استفاده از معادله (۱۶) و اعداد محاسبه شده برای زمان اقامت در جدول ۳ مقدار خطای نسبی برای مقادیر محاسبه شده و مقادیر مدل با استفاده از رابطه (۱۷) در جدول ۶ گزارش می‌شود.

$mPE (R)^\circ$: طول جزء فشار (جزء معکوس) با گام ۲۰ میلی‌متر
 $mKE (45^\circ)^\circ$: طول جزء آسیاب ساز با زاویه 45°
 $mKEL (45^\circ)^\circ$: طول جزء آسیاب ساز چپ گرد با زاویه 45°

جدول ۳- زمان اقامت محاسبه شده در اکسترودر برای آرایش‌های

مختلف ماریچ

نوع آرایش	زمان اقامت برای کل ماریچ (دقیقه)
آرایش برش پایین	۹/۴
آرایش برش متوسط	۹/۶
آرایش برش بالا	۹/۹۹

جدول ۴- متوسط میزان دبی خروجی اندازه گیری شده از سه آرایش

ماریچ

نوع آرایش	\dot{M}_0 (g/min)	\dot{M}_0 (g/h)	Q_0 (cm ³ /min)	Q_0 (cm ³ /h)	f'
برش پایین	۵/۹۲	۳۵۵	۴/۹۳	۲۹۵/۹۳	۱/۰۴۸۷
برش متوسط	۵/۶۷	۳۴۰	۴/۷۳	۲۸۳/۳۳	۱/۰۹۴۲
برش بالا	۵/۲۵	۳۱۵	۴/۳۸	۲۶۲/۵	۱/۱۸۱۷

۵-۱- مدلی برای ارتباط طول و زاویه آسیاب ساز با زمان

اقامت

زمان اقامت با توجه به طول و زاویه دیسک برای هر جزء در قسمت مذاب ماریچ محاسبه، و در جدول ۵ گزارش شده است.

جدول ۵- مشخصات و زمان اقامت برای هر جزء در قسمت مذاب

ماریچ

Element name	N	L (cm)	θ (radian)	Residence time (min)
KE _{۲-۵/۴۵}	۵	۲	۰/۷۸۵	۱/۱۷۷۳
KE _{۲-۴/۶۰}	۴	۲	۱/۰۴۷	۱/۲۲۸
KE _{۲-۳/۹۰}	۳	۲	۱/۵۷	۱/۳۲۶۶
KE _{۲-۵/۴۵}	۵	۳	۰/۷۸۵	۱/۷۶۶
KE _{۲-۴/۶۰}	۴	۳	۱/۰۴۷	۱/۸۴۳
KE _{۲-۳/۹۰}	۳	۳	۱/۵۷	۱/۹۸۹۹

N: تعداد دیسک‌ها در جزء، L: طول جزء و θ : زاویه دیسک‌ها نسبت به هم دیگر در هر جزء

$$\text{Relative error} = \left[\frac{|(t_{\text{exp}} - t_m)|}{t_m} \right] \times 100 \quad (17)$$

جدول ۶- مقادیر درصد خطای نسبی برای زمان‌های اقامت بدست آمده برای اجزاء آسیاب ساز

درصد خطای نسبی	t_m (min)	t_{exp} (min)	θ (radian)	L (cm)
۱/۳۸	۱/۱۶۱	۱/۱۷۷۳	۰/۷۸۵	۲
۰/۳۷	۱/۲۲۴	۱/۲۲۸	۱/۰۴۷	۲
۱/۵۶	۱/۳۴۷	۱/۳۲۶۶	۱/۵۷	۲
۰/۹۸	۱/۷۸۳	۱/۷۶۶	۰/۷۸۵	۳
۰/۱۵	۱/۸۴۶	۱/۸۴۳	۱/۰۴۷	۳
۱/۰۲	۱/۹۶۹	۱/۹۸۹۹	۱/۵۷	۳

t_{exp} : زمان اقامت محاسبه شده برای هر اجزاء آسیاب‌ساز مطابق جدول ۴
 t_m : زمان اقامت محاسبه شده برای هر جز آسیاب ساز مطابق رابطه ۱۲

۵-۲- تأثیر برش و زمان اقامت بر ساختار نمونه

زمانی که نمونه‌ها تحت برش بالا قرار می‌گیرند؛ باندهای دوگانه‌ی بیشتری می‌شکنند و زنجیره‌های NR به زنجیره‌های کوتاه‌تر تبدیل می‌گردد. این امر منجر به انحلال بیشتر NR در حلال و افزایش نسبت $\frac{NR}{SBR}$ می‌شود [۲۷]. افزایش این نسبت باعث کاهش کسر وزنی سل و افزایش گرانبوی می‌شود. کاهش کسر وزنی سل به این معناست که مقداری از SBR به خوبی پخت زدایی نشده و به صورت زل باقی مانده است. علت این امر زمان اقامت بیشتر و نرخ برش بالاتر در این نوع آرایش است. این موضوع می‌تواند سبب کاهش فرایند پذیری نمونه و تاثیر منفی فرایند شود. هرچند این موضوع با افزودن عوامل شیمیایی تا حد زیادی قابل جبران است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، زمان اقامت برای آرایش‌های مختلف ماریچ و زوایای گوناگون آسیاب ساز محاسبه شد. بر اساس نتایج محاسبات؛ محرز گردید که زمان اقامت نمونه و میزان پرشدگی کانال‌ها متأثر از آرایش ماریچ (شامل زوایای آسیاب ساز و محل قرارگیری اجزا) می‌باشد. لذا با تغییر آرایش ماریچ می‌توان سرعت فرایند پخت زدایی را کنترل کرد. کوتاه‌ترین زمان اقامت کل برای برش بالا بدست آمد. مطالعه‌ی مدل‌های جامد و مایع نشان داد که؛ زمان ماند برای قسمت جامد در هر سه آرایش یکسان و فارغ از آرایش ماریچ می‌باشد. در حالی که زمان اقامت قسمت مذاب؛ برای هر آرایش مقدار متفاوتی داشت. با بررسی تاثیر طول و زاویه دیسک؛ مشخص شد که جزء $20/5/45$ KE با طول ۲cm کمترین زمان ماند را در میان‌ها دارد. (۱/۱۷ دقیقه). در ادامه مشخص شد که؛ افزایش نرخ برش می‌تواند بر فرایند پذیری نمونه نیز اثر منفی داشته باشد، زیرا با کاهش کسر وزنی سل و افزایش گرانبوی؛ شانس پخت زدایی مطلوب را از نمونه سلب می‌کند. به طور کلی می‌توان گفت کاهش برش ماریچ و به دنبال آن کاهش زمان اقامت تأثیری مثبت بر روند پخت زدایی نیز خواهد داشت.

با در نظر داشتن این که اکثر تایرهای پخته شده‌ی مصرفی در صنعت تایر، خواص فیزیکی نسبتاً مشابهی دارند؛ می‌توان از نتایج بدست آمده برای لاستیک‌هایی با فرمولاسیون تقریباً مشابه که چگالی نزدیک به هم دارند استفاده نمود.

۷- نمادها

τ	زمان اقامت در راکتور پیوسته
V_R	حجم موثر راکتور
Q	جریان حجمی
V	حجم راکتور
f	درجه پرشدگی
A_i	ناحیه‌ای از فضای خالی
l	طول اجزای ماریچ
dl	المان
C_L	حد واسط فاصله بین محور ماریچ
R_s	شعاع بیرونی ماریچ
\dot{M}	جریان جرمی
f'	ضریب تصحیح دبی
ρ_{bulk}	چگالی توده ورودی
ρ_{rubber}	چگالی لاستیک پخت زدایی شده
$Q_{D,\text{max}}$	بیشینه ظرفیت جریان پسا
ψ	زاویه جز آسیاب ساز

۸- مراجع

- [1] Oboirien B.O., North B.C., A Review of Waste Tyre Gasification. Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol 5(5), pp. 5169-5178, 2017
- [۲] غلامیان ا، محمودی م،، زارع و، معرفی و بهینه سازی یک سیستم ترکیبی جدید با سوخت زیست توده از دید قانون دوم ترمودینامیک. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ج. ۴۷، ش. ۲، ص ۱۶۹-۱۶۱، ۱۳۹۶.
- [۳] مرتضایی م، رحیمی م، تحلیل انرژی و زیست محیطی سیستم تولید سه گانه برپایه پیل سوختی اکسید جامد به همراه گازی سازی. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ج. ۴۸، ش. ۲، ص ۳۲۸-۳۱۷، ۱۳۹۷.
- [۴] چمنی ف، بیکی ح، شبیه سازی و بهینه سازی فرایند ریفرمینگ گاز طبیعی با بخار آب و اصلاح مجدد جهت کاهش CO_2 . مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ج. ۵۱، ش. ۴، ص ۳۲۲-۳۱۵، ۱۴۰۰.
- [5] Akca E., Gursel A. and Sen, N., A review on devulcanization of waste tire rubber. Periodicals of engineering and natural sciences, Vol. 6, No. 1, pp. 154-160, 2018.
- [6] Nicholas, P. P., Devulcanized Rubber Composition and Process for Preparing Same. Us Patent, pp. 4161- 464, 1979.
- [7] Nicholas P. P., The scission of polysulfide crosslinks in scrap rubber particles through phase transfer catalysis. Rubber Chemistry and Technology, Vol. 55, No. 5, pp. 1499-1515, 1982.
- [8] Simon D. Á., and Bárány T., Effective thermomechanical devulcanization of ground tire rubber with a co-rotating twin-screw extruder. Polymer Degradation and Stability, Vol. 190, pp. 109626, 2021.
- [9] Simon D. Á., Pirityi D., Tamás-Bényei P. and Bárány T., Microwave devulcanization of ground tire rubber and applicability in SBR compounds. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 137, No. 6, pp. 48351, 2020.

- [10] De Sousa F. D., Scuracchio C. H., Hu G. H. and Hoppe S., Devulcanization of waste tire rubber by microwaves. *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 138, pp. 169-181, 2017.
- [11] Seghar S., Asaro L., Rolland-Monnet M. and Hocine N. A., Thermo-mechanical devulcanization and recycling of rubber industry waste. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 144, pp. 180-186, 2019.
- [12] Simon D. Á. and Bárány T., Effective thermomechanical devulcanization of ground tire rubber with a co-rotating twin-screw extruder. *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 190, pp. 109626, 2021.
- [13] Fukumori K. and Matsushita M., Material recycling technology of crosslinked rubber waste. *R&D Review of Toyota CRDL*, Vol. 38, No. 1, pp. 39-47, 2003.
- [14] Maridass B. and Gupta B. R., Performance optimization of a counter-rotating twin-screw extruder for recycling natural rubber vulcanizates using response surface methodology. *Polymer Testing*, Vol. 23, No. 4, pp. 377-385, 2004.
- [15] Sutanto P., Picchioni F. and Janssen LP B M., The Use of Experimental Design to Study the Responses of Continuous Devulcanization Process. *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 102, pp. 5028-5038, 2006.
- [16] Mousa A. and Karger-Kocsis J., Rheological and thermodynamical behavior of styrene/butadiene rubber-organoclay nanocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 286, No. 4, pp. 260-266, 2001.
- [17] Ortega Alvarez, L., Chain dynamics in crosslinked filled and unfilled polymer blends of different miscibility, Ph.D. thesis, 2018.
- [18] Gasner G. E., Bigio D., Marks C., Magnus F. and Kiehl C., A new approach to analyzing residence time and mixing in a co-rotating twin-screw extruder. *Polymer Engineering & Science*, Vol. 39, No. 2, pp. 286-298, 1999.
- [19] George S. C., Ninan K. N., Groeninckx G. and Thomas S., Styrene-butadiene rubber/natural rubber blends: morphology, transport behavior, and dynamic mechanical and mechanical properties. *Journal of applied polymer science*, Vol. 78, No. 6, pp. 1280-1303, 2000.
- [20] Poulesquen A., Vergnes B., Cassagnau P., Michel A., Carneiro O. S. and Covas J. A., A study of residence time distribution in co-rotating twin-screw extruders. Part II: experimental validation. *Polymer Engineering & Science*, Vol. 43, No.12, pp. 1849-1862, 2003.
- [21] Van Der Goot A. J., Poorter, O. and Janssen L. P. B. M., Determination of the degree of fill in a counter-rotating twin-screw extruder. *Polymer Engineering & Science*, Vol. 38, No. 7, pp. 1193-1198, 1998.
- [22] Sutanto P., Picchioni F. and Janssen L. P. B. M., Modelling a continuous devulcanization in an extruder. *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, No. 21, pp. 7077-7086, 2006.
- [23] Zhang X. M., Feng L. F., Chen W. X. and Hu G. H., Numerical simulation and experimental validation of mixing performance of kneading discs in a twin-screw extruder. *Polymer Engineering & Science*, Vol. 49, No. 9, pp. 1772-1783, 2009.
- [۲۴] فورگی نژاد ا.، امام م.، طاهری م.، استفاده از امواج فراصوت و پردازش تصویر در تحلیل فرمول بندی لاستیک تقویت شده با نانو رس. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ج. ۴۸، ش. ۲، ص ۲۲۷-۲۱۹، ۱۳۹۷.
- [۲۵] دانش پایه س.، قاسمی ف.، قاسمی ا.، بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های سه‌تایی پلی پروپیلن-پلی اتیلن-نانو ذرات اکسید تیتانیوم به کمک روش روبه پاسخ. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ج. ۴۶، ش. ۴، ص ۱۰۱-۹۳، ۱۳۹۵.
- [26] Klat D., Karimi H., Lacayo J., Phase Morphology of NR/SBR Blends: Effect of Curing Temperature and Curing Time. *Journal of Polymers*, 2018.
- [27] Nunes A. T., Santos R. E. D., Pereira J. S., Barbosa R. and Ambrósio, J.D., Characterization of waste tire rubber devulcanized in twin-screw extruder with thermoplastics. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, Vol. 34, No. 3, pp. 143-157, 2018.