

بررسی تخریب زیستی لاستیک SMR پخت‌شده با هدف کاهش پسماندهای زیست محیطی: نقش سامانه پخت، پرکننده و روغن

سمیه محمدیان گزاز*

دانشیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵.

دریافت: فروردین ۱۴۰۱ بازنگری: مرداد ۱۴۰۱ پذیرش: شهریور ۱۴۰۱

doi 10.30495/JACR.2022.1956238.2030

20.1001.1.17359937.1401.16.3.4.0

چکیده

در این کار پژوهشی، اثر متغیرهای نوع سامانه پخت، مقدار و اندازه پرکننده و نوع روغن بر بازیافت و مقدار تخریب زیستی آمیزه‌های متفاوت بر پایه لاستیک طبیعی بررسی شد. مقدار تخریب آمیزه‌ها بر حسب سامانه پخت به ترتیب کارآمد، نیم‌کارآمد و معمولی افزایش یافت. با بالا رفتن مقدار ناخالصی، مقدار تخریب به صورت $SMR50 > SMR20 > SMR10$ افزایش پیدا کرد. با افزایش مقدار پرکننده دوده، تخریب آمیزه‌ها روند کاهشی نشان داد. همچنین، آمیزه حاوی دوده ریزتر (N330) نسبت به دوده درشت‌تر (N550)، در مقدار یکسان، تخریب کمتری داشت. کمینه مقدار سل در سامانه کارآمد دیده شد. همچنین، ترتیب مقدار سل در نمونه‌ها به صورت $SMR50 > SMR20 > SMR10$ بود. نمونه بدون دوده، بیشترین تخریب نهایی و بیشترین درصد سل را داشت.

واژه‌های کلیدی: لاستیک طبیعی، SMR، تخریب زیستی، سامانه پخت، دوده، روغن، بخش سل.

مقدمه

در این روش، ابتدا مواد پسماندی جمع‌آوری و سپس انواع متفاوت این مواد از هم جدا می‌شوند و پس از جدا کردن انواع آلودگی‌ها از آن‌ها، فرایند ادامه می‌یابد. برای بازیافت ضایعات لاستیکی سه روش عمده وجود دارد که شامل پودر کردن، تف‌کافت و واولکانش^۱ ضایعات لاستیکی است. نخستین مرحله فرایند بازیافت، خرد کردن لاستیک ضایعاتی است، زیرا

برای مدیریت لاستیک‌های پسماندی به‌طور عمده چند روش به‌کارگرفته شده است که شامل استفاده دوباره از تایرها، دفن کردن، سوزاندن و بازیافت است [۱]. در این میان، بازیافت بهترین شیوه است که نه تنها از نظر زیست‌محیطی روش بهتری از دو گزینه دیگر است، بلکه از نظر اقتصادی هم به‌دلیل حفظ منابع محدود فسیلی، مقرون به‌صرفه است.

1. Devulcanization

شیمیایی- مکانیکی- گرمایی [۱۰ و ۱۱]. در این روش‌ها از انرژی مکانیکی، انرژی گرمایی و یا عوامل واوولکانش برای واوولکانش ضایعات لاستیک استفاده می‌شود. با انجام فرایند واوولکانش، زنجیرهای آزاد کشپار^۱ دوباره ایجاد می‌شوند و قابلیت پخت دوباره لاستیک احیا شده وجود دارد. نتیجه‌های مشابه توسط پژوهشگران دیگری نیز به دست آمده است [۱۲ و ۱۳]. لاستیک طبیعی (NR^۳) با توجه به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، کاربرد گسترده‌ای در صنایع متفاوت دارد و درجه بندی آن بر مبنای ویژگی‌های کیفی و فنی به SMR^۴ معروف است. برخی از انواع SMR شامل SMR 10, 20, 50 است که تفاوت آن‌ها خلوص لاستیک و آلودگی مجاز در آن‌هاست که به ترتیب ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد هستند [۱۴]. لاستیک در حالت خام^۵ نرم است و برای تبدیل آن به فرآورده نهایی که مدول و قابلیت ارتجاعی مناسبی داشته باشد، لازم است که در بین زنجیرهای اصلی آن پیوندهای عرضی^۶ ایجاد شود. این عملیات طی فرایند ولکانش یا پخت^۷ با سامانه گوگردی یا غیرگوگردی انجام می‌شود.

سامانه پخت گوگردی شامل عامل پخت گوگرد، فعال کننده^۸ و شتاب دهنده است و بسته به نسبت گوگرد به شتاب دهنده (S/Acc)، شامل سه نوع کارآمد^۹ (S/Acc < 1)، نیم کارآمد^{۱۰} (S/Acc ≈ 1) و معمولی^{۱۱} (S/Acc > 1) است که تاثیرات متفاوتی بر ویژگی نهایی فرآورده خواهند داشت [۱۵ و ۱۶]. همان طور که اشاره شد، برای بازیافت پسماندهای لاستیکی نیاز است که پیوندهای عرضی بین زنجیرها تخریب شود. پس از انجام واوولکانش، با قراردادن نمونه

با کاهش اندازه ذره‌ها، سطح افزایش می‌یابد و واکنش‌ها در حین فرایند بازیافت کامل تر انجام می‌شود. در ضمن از لاستیک پودر شده می‌توان در تهیه سایر فرآورده‌ها استفاده کرد. روش‌های متفاوتی برای خرد کردن لاستیک و کاهش اندازه ذره‌ها وجود دارد که شامل خرد کردن در دمای محیط [۲]، خرد کردن در محیط خیس [۳]، خرد کردن در محیط سرد [۴ و ۵] و خرد کردن با برش ازونی [۴] است. در روش پیرولیز، ضایعات لاستیک در معرض گرما زیاد قرار می‌گیرند و فرآورده‌های دیگر به دست می‌آید. روغن به دست آمده اجزای زیادی دارد که می‌توان با پالایش آن فرآورده‌هایی مانند روغن‌های دیزل، روان کننده‌ها و سایر روغن‌ها را تهیه کرد. این روغن درصد بالایی از هیدروکربن‌های آروماتیک بنزن، تولوئن و زایلن را دارد. به همین دلیل به آن روغن BTX^۱ گفته می‌شود. در فرایند واوولکانش شبکه‌های سه بعدی نامحلول و غیر قابل ذوب لاستیک به ساختار دو بعدی محلول، فرایندپذیر، نرم، قابل پخت دوباره و با مدول پایین تبدیل می‌شود که بسیاری از ویژگی لاستیک خام را دارد. واوولکانش لاستیک را به سه روش فیزیکی، شیمیایی و فیزیکی- شیمیایی می‌توان انجام داد. بیشتر پیوندهای عرضی در این فرایند شکسته می‌شود بدون اینکه زنجیر اصلی دچار تخریب شود [۶]. در واوولکانش به روش فیزیکی با اعمال یک انرژی، ساختار شبکه‌ای شکسته می‌شود و در صورتی که بتوان مقدار ویژه‌ای از انرژی را به شبکه لاستیک اعمال کرد، این امکان وجود خواهد داشت که تنها پیوندهای عرضی شکسته شود. روش‌های فیزیکی خود به چهار گروه قابل تقسیم هستند که شامل روش‌های مکانیکی، روش‌های گرمایی، روش فراصوت و روش مکانیکی- گرمایی هستند. روش‌های فیزیکی- شیمیایی نسبت به روش فیزیکی کامل تر و به سه شیوه متفاوت قابل انجام است: شیمیایی- مکانیکی [۷]، شیمیایی- گرمایی [۸ و ۹]،

1. Benzene-Toluene-Xylene 2. Elastomer 3. Natural Rubber 4. Standard Malaysian Rubber 5. Gum
6. Cross links 7. Curing 8. Activator 9. Efficient 10. Semi-Efficient 11. Conventional

لاستیکی در حلال مناسب، این دو بخش قابل حل (سُل) و غیر قابل حل (ژل) را می‌توان از یکدیگر جدا کرد. هرچه مقدار سل بیشتر باشد، بدین مفهوم است که پیوندهای عرضی بیشتری شکسته است [۱۷].

انجام پژوهش در زمینه بازیافت لاستیک، لازم و اجتناب‌ناپذیر است. در پژوهش پیشین نویسندگان این مقاله [۱۷]، واولکانش آمیزه لاستیکی EPDM با یک رانشگر^۱ به روش مکانیکی - گرمایی انجام شد و نتیجه‌های جالبی به‌دست آمد. لاستیک بازیافتی برای تهیه آمیزه جدید استفاده شد و اثر شرایط فرایند بر مقدار واولکانش در نمونه‌های متفاوت لاستیک بازیافتی از آزمون تورم و محاسبه درصد واولکانش و کسر وزنی سل بررسی شد. پیش‌ازاین نیز در یک مطالعه اثر نوعی باکتری بر بازیابی لاستیک فرسوده توسط پژوهشگران بررسی و اثرگذاری آن مشاهده شده است [۱۸]. با توجه به مسائل زیست‌محیطی، بررسی تخریب‌زیستی لاستیک و ساده‌تر کردن فرایند بازیافت یا تخریب بدون استفاده از فرایندهای انرژی‌بر و دستگاه‌ها، به‌عنوان رویکردی جدید در این پژوهش، محیط زیستی به‌عنوان بستری برای تخریب‌زیستی لاستیک به‌کارگرفته شده است. لاستیک موردنظر نیز لاستیک طبیعی انتخاب شده است که با توجه به آنکه منبع طبیعی دارد، آماده تخریب زیستی است. عوامل مهم در آمیزه لاستیکی به‌عنوان متغیرهای مورد مطالعه، در نظر گرفته شدند. محیط لجن فعال که حاوی مواد زیستی و باکتریایی متفاوت است، در برخی پژوهش‌ها برای بررسی زیست‌تخریب‌پذیری بسپارها به‌کارگرفته شده که شامل پلی پروپیلن/نشاسته/نانو خاک رس [۱۹] و آمیخته پلی (استیرن-اتیلن-پروپیلن-استیرن)/نشاسته [۲۰] بوده و اثر تخریب زیستی مناسبی داشته است. همچنین، در فعالیت پیشین [۲۱]، از همین محیط برای تخریب زیستی آمیخته‌های پلی‌آمید ۶/نشاسته گرم‌انرم استفاده شد که اثرگذاری آن

دوباره تأیید شد.

با توجه به عملکردی که در فعالیت‌های پیشین دیده شد، در این مطالعه نیز محیط لجن فعال برای تخریب آمیزه‌ها استفاده شد. تخریب آمیزه‌های متفاوت بر پایه انواع لاستیک طبیعی، در لجن فعال بررسی شد. متغیرهای نوع سامانه پخت، مقدار و اندازه ماده پرکننده و نوع نرم‌کننده بر مقدار تخریب زیستی این آمیزه‌ها مطالعه شد.

بخش تجربی

آمیزه‌سازی

جدول زیر فرمولاسیون و چگونگی نامگذاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. C، S و E به ترتیب نشان‌دهنده نوع سامانه پخت معمولی، نیم‌کارآمد و کارآمد است و اعداد ۱۰، ۲۰ و ۵۰، نماینده نوع SMR هستند. در چهار نمونه هم، اثر نوع و مقدار دوده^۲ در چند نمونه بررسی شده است. برای بررسی اثر نوع روان‌ساز مصنوعی و طبیعی در سه نمونه از انواع متفاوت SMR، حاوی سامانه پخت نیم‌کارآمد، روغن طبیعی ذرت (پسوند N) جایگزین روغن سنتزی در نمونه‌های نیم‌کارآمد (پسوند S) بدون دوده شد. آمیزه‌ها با غلطک polymix200L ساخت شرکت Schwabenthan تهیه شدند. عملیات آمیزه‌سازی به مدت ۱۵ تا ۲۰ دقیقه در دور ۱۵ rpm انجام شد.

آزمون‌ها

پخت

فرایند موفق لاستیک‌ها وابسته به فرایند پخت و واپایش آن است. بنابراین، مطالعه ویژگی پخت (زمان برشتگی، زمان پخت، گشتاور پخت و سرعت پخت) برای پیش‌بینی رفتار پخت آمیزه در حین فرایند امری اجتناب‌ناپذیر است. آزمون پخت در دمای ۱۵۰ °C، کرنش ۷٪ و فرکانس ۱ هرتز با رئومتر RPA 2000 ساخت شرکت α-

1. Extruder

2. Carbon black

technologies انجام شد. نمونه‌ها پیش از آزمون تخریب، پخت شدند. برای پخت آمیزه‌ها و تهیه ورق از آن‌ها، روش قالب‌گیری فشاری به‌کارگرفته شد. برای این منظور در دمای ۱۶۰ ° C به مدت ۱۵ تا ۲۰ دقیقه، یک پرس ۲۵ تنی ساخت شرکت Davenport به‌کارگرفته شد.

نمونه‌ها پیش از آزمون تخریب، پخت شدند. برای پخت آمیزه‌ها و تهیه ورق از آن‌ها، روش قالب‌گیری فشاری به‌کارگرفته شد. برای این منظور در دمای ۱۶۰ ° C به مدت ۱۵ تا ۲۰ دقیقه، یک پرس ۲۵ تنی ساخت شرکت Davenport به‌کارگرفته شد.

جدول ۱ فرمول‌بندی* آمیزه‌های تهیه‌شده

مواد**										سامانه پخت	نمونه
شتاب-دهنده	عامل پخت	فعال کننده		روان ساز		دوده		لاستیک			
CBS	گوگرد	روی اکسید	استتاریک اسید	روغن ذرت	روغن ۲۵۰	N550	N330	مقدار	نوع SMR		
۱	۲	۵	۲٫۵	-	۱۰	-	-	۱۰۰	۱۰	معمولی	۱۰C
۲	۲	۵	۲٫۵	-	۱۰	-	-	۱۰۰	۱۰	نیم کارآمد	۱۰S
۲	۱	۵	۲٫۵	-	۱۰	-	-	۱۰۰	۱۰	کارآمد	۱۰E
۱	۲	۵	۲٫۵	-	۱۰	-	-	۱۰۰	۲۰	معمولی	۲۰C
۲	۲	۵	۲٫۵	-	۱۰	-	-	۱۰۰	۲۰	نیم کارآمد	۲۰S
۲	۱	۵	۲٫۵	-	۱۰	-	-	۱۰۰	۲۰	کارآمد	۲۰E
۱	۲	۵	۲٫۵	-	۱۰	-	-	۱۰۰	۵۰	معمولی	۵۰C
۲	۲	۵	۲٫۵	-	۱۰	-	-	۱۰۰	۵۰	نیم کارآمد	۵۰S
۲	۱	۵	۲٫۵	-	۱۰	-	-	۱۰۰	۵۰	کارآمد	۵۰E
۲	۲	۵	۲٫۵	-	۱۰	-	۱۰	۱۰۰	۲۰	نیم کارآمد	۲۰S-۳۱۰
۲	۲	۵	۲٫۵	-	۱۰	-	۲۰	۱۰۰	۲۰	نیم کارآمد	۲۰S-۳۲۰
۲	۲	۵	۲٫۵	-	۱۰	-	۳۰	۱۰۰	۲۰	نیم کارآمد	۲۰S-۳۳۰
۲	۲	۵	۲٫۵	-	۱۰	۲۰	-	۱۰۰	۲۰	نیم کارآمد	۲۰S-۵۲۰
۲	۲	۵	۲٫۵	۱۰	-	-	-	۱۰۰	۱۰	نیم کارآمد	۱۰N
۲	۲	۵	۲٫۵	۱۰	-	-	-	۱۰۰	۲۰	نیم کارآمد	۲۰N
۲	۲	۵	۲٫۵	۱۰	-	-	-	۱۰۰	۵۰	نیم کارآمد	۵۰N

* نمونه‌ها برپایه مقدار از ۱۰۰ قسمت لاستیک (phr) فرموله شدند.

** لاستیک ساخت Malaysian Rubber، دوده ساخت پارس، روغن ۲۵۰ ساخت بهران، استتاریک اسید ساخت

Unichema، روی اکسید و گوگرد ساخت رنگینه پارس و شتاب‌دهنده ساخت شرکت بایر بودند.

ژل نمونه‌های تخریب‌شده، با حلال نفتا انجام و درصد وزنی سُل محاسبه شد. با محاسبه مقدار سل - ژل می‌توان مقدار تخریب پیوندهای عرضی را مقایسه کرد [۱۷].

زیست‌تخریب‌پذیری

برای بررسی مقدار تخریب، مقدار کاهش وزنی نمونه‌ها با زمان، به مدت ۹۰ روز، در محیط لجن فعال بر حسب تغییرهای درصد وزنی محاسبه شد. افزون‌برآن، در این پژوهش، پس از پایان زمان تخریب، جداسازی فازهای سل و

نتیجه‌ها و بحث

ویژگی پخت

فرایند موفق لاستیک‌ها به زمان، دما و سایر شرایط پخت در قالب بستگی دارد تا شکل‌گیری آمیزه لاستیکی به گونه‌ای مطلوب صورت پذیرد و ویژگی نهایی موردنظر به‌دست آید. از طرف دیگر پخت بایستی با سرعت مناسبی انجام شود تا فرایند از نظر اقتصادی نیز به‌صرفه باشد. بنابراین، مطالعه ویژگی پخت برای پیش‌بینی رفتار فرآورده نهایی از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است. در این مطالعه، آمیزه‌های متفاوت بر مبنای نوع SMR (ناخالصی در لاستیک)، نوع سامانه پخت (معمولی، نیم‌کارآمد، کارآمد)، اندازه و مقدار پرکننده دوده و نوع نرم‌کننده تهیه شدند. جدول ۲ نتیجه‌های مربوط به آزمون پخت این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، با تغییر سامانه پخت از معمولی به نیم‌کارآمد تا کارآمد، در همه آمیزه‌ها، گشتاور پخت و سرعت پخت افزایش یافته و زمان پخت کم‌تر شده است که به معنای تسریع واکنش پخت است. در سامانه پخت یکسان، با تغییر نوع لاستیک طبیعی از SMR10 به SMR20 و SMR50، گشتاور و سرعت پخت کاهش و زمان پخت افزایش یافته است. به احتمال وجود ناخالصی‌ها و مقدار مواد طبیعی مانند پروتئین‌ها، بر واکنش پخت اثرهای جانبی منفی داشته و چنین نتیجه‌ای به‌دست آمده است. در جدول مربوط، چهار ردیف آخر، اثر اندازه و مقدار دوده را بر فرایند پخت نشان می‌دهد. در نوع یکسان دوده (N330)، با افزایش مقدار دوده، مقدار گشتاور بالا می‌رود که این موضوع به‌دلیل آن است که ماده پرکننده به‌خودی‌خود مدول بالایی دارد و افزودن آن به لاستیک، موجب سفت‌تر شدن آمیزه و بالا رفتن گشتاور می‌شود. در دوده ریزتر، این افزایش چشمگیرتر است. با افزایش مقدار دوده و همچنین، ریزتر شدن آن (از N550 به N330)، سرعت پخت افزایش و زمان پخت کاهش یافته است. این موضوع می‌تواند به اثر سرعت‌بخشی دوده و کمک

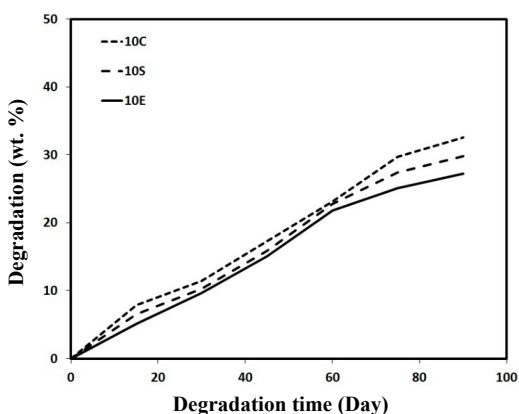
آن به پدیده انتقال گرما از دستگاه به آمیزه مربوط باشد.

جدول ۲ ویژگی‌های پخت آمیزه‌ها

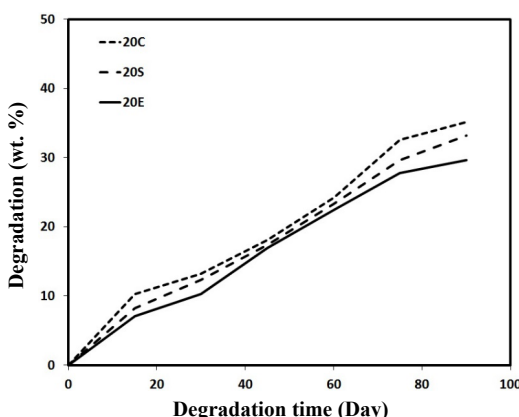
نمونه	گشتاور نهایی (dN.m)	زمان پخت (دقیقه)	سرعت پخت (dN.m/min)
۱۰C	۶٫۸	۷٫۹۲	۱٫۸۳
۱۰S	۷٫۱	۶٫۸۷	۲٫۱۲
۱۰E	۸٫۳	۶٫۱۲	۲٫۷۳
۲۰C	۵٫۷	۸٫۱۴	۱٫۷۰
۲۰S	۶٫۵	۷٫۱۰	۱٫۸۵
۲۰E	۷٫۹	۶٫۳۳	۲٫۶۱
۵۰C	۴٫۵	۹٫۲۰	۱٫۴۱
۵۰S	۵٫۲	۸٫۱۰	۱٫۷۶
۵۰E	۶٫۴	۶٫۹۰	۱٫۹۲
۲۰S-۳۱۰	۶٫۶	۶٫۵۵	۱٫۸۱
۲۰S-۳۲۰	۹٫۳	۶٫۲۷	۲٫۳۰
۲۰S-۳۳۰	۱۱٫۰	۶٫۱۲	۲٫۴۴
۲۰S-۵۲۰	۸٫۲	۶٫۴۱	۲٫۰۵
۱۰N	۷٫۳	۶٫۳۲	۲٫۳۴
۲۰N	۶٫۴	۷٫۷۲	۱٫۸۶
۵۰N	۵٫۳	۷٫۸۷	۱٫۸۸

تخریب زیستی با زمان

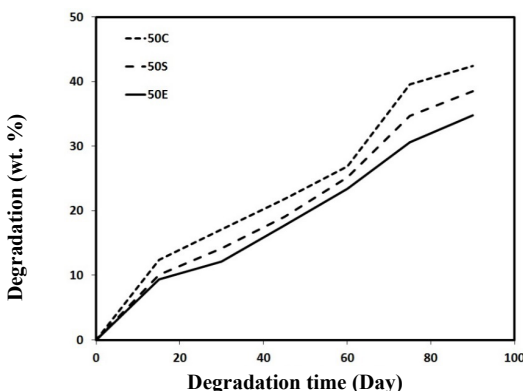
در شکل‌های ۱ تا ۳، مقدار تخریب وزنی نمونه‌ها (درصد افت وزنی) بر حسب زمان، به ترتیب برای SMR10، SMR20 و SMR50 آورده شده است که هر شکل حاوی سامانه پخت‌های متفاوت است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر سه شکل، مقدار تخریب آمیزه‌ها بر حسب سامانه پخت به ترتیب کارآمد، نیم‌کارآمد و معمولی افزایش می‌یابد. نکته جالب آن است که تفاوت مشاهده شده در زمان‌های طولانی‌تر، بیشتر است. همان‌طور که پیش از این اشاره شد، در سامانه پخت‌های متفاوت، نوع یا طول پیوندهای عرضی گوگردی ایجادشده با هم متفاوت است که می‌تواند بیشتر پلی‌سولفیدی (سامانه معمولی)، دی‌سولفیدی



شکل ۱ مقدار تخریب آمیزه‌ها با زمان برای لاستیک طبیعی نوع SMR10



شکل ۲ مقدار تخریب آمیزه‌ها با زمان برای لاستیک طبیعی نوع SMR20



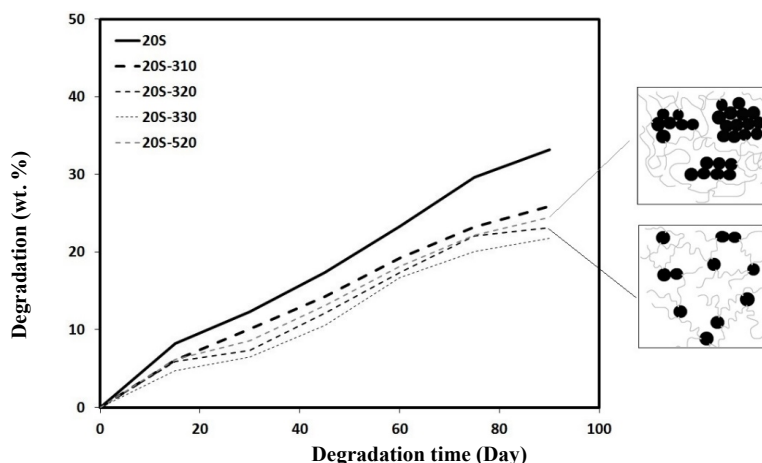
شکل ۳ مقدار تخریب آمیزه‌ها با زمان برای لاستیک طبیعی نوع SMR50

(سامانه نیم کارآمد) و مونوسولفیدی (سامانه کارآمد) باشد. رفتار تخریبی این سه نوع پیوندهای عرضی با همدیگر متفاوت هستند. امکان تخریب پیوندها به ترتیب مونو، دی و پلی سولفیدی بالاتر می‌رود. بنابراین، مطابق آنچه که در نمودارها مشاهده می‌شود، سامانه پخت معمولی بیشترین تخریب و سامانه پخت کارآمد کمترین تخریب را دارد. با افزایش ناخالصی به‌ویژه در SMR50، حساسیت تخریبی آمیزه به نوع سامانه پخت، مشخص‌تر می‌شود. با افزایش مقدار ناخالصی، مقدار تخریب افزایش می‌یابد و این تفاوت در مقدار تخریب زیستی، در زمان‌های بالاتر، بیشتر می‌شود. به احتمال، با توجه به آنکه ناخالصی‌های لاستیک طبیعی از جنس پروتئین، چربی، ریزه‌چوب و مواد طبیعی هستند، در لاستیک دارای ناخالصی بیشتر، تخریب زیستی بالاتری دیده می‌شود، چرا که باکتری‌های موجود در لجن فعال، راحت‌تر می‌توانند آن‌ها را هضم و تخریب کنند. هرچه زمان بالاتر می‌رود، با توجه به تحلیل تدریجی آمیزه و خردتر شدن آن، دسترسی به این ناخالصی‌ها بیشتر و در نتیجه اثر نوع SMR، مشخص‌تر است. از سوی دیگر با مقایسه این سه شکل، مشخص می‌شود که مقدار اثرگذاری نوع لاستیک طبیعی، در نوع سامانه معمولی (پلی سولفیدی) و دو نوع سامانه پخت دیگر، نیم کارآمد (دی سولفیدی) و کارآمد (مونوسولفیدی)، متغیر است. تأثیر نوع SMR و مقدار ناخالصی آن، به ترتیب از معمولی، نیم کارآمد و کارآمد رو به کاهش است. این مساله به احتمال به دلیل نوع پیوندهای عرضی در این ساختارها است.

لاستیک جذب‌شده بر سطح دوده، امکان تخریب به‌دلیل جلوگیری این پیوندها، کاهش می‌یابد. هرچه مقدار دوده بیشتر شود یا دوده ریزتری استفاده شود، مقدار این پیوندها و برهم‌کنش‌ها نیز بیشتر می‌شود، بنابراین، همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده شد، مقدار تخریب افت می‌کند.

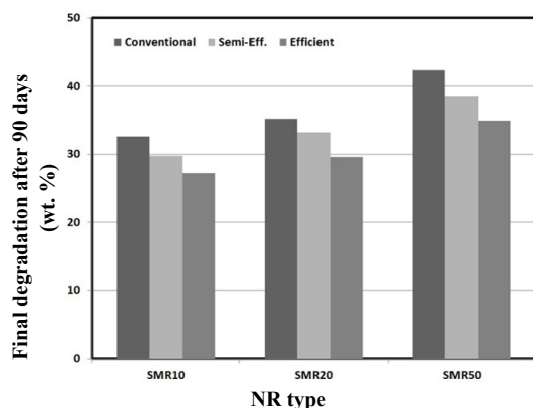
برای بررسی اثر نوع روان‌ساز مصنوعی و طبیعی در نمونه‌های حاوی سامانه پخت نیم‌کارآمد، روغن طبیعی ذرت (پسوند N) جایگزین روغن سنتزی در نمونه‌های نیم‌کارآمد (پسوند S) فاقد دوده شد که نتیجه‌های مشخص‌تری دیده شود. در شکل ۵، اثر روغن مصنوعی و طبیعی برای انواع متفاوت SMR بر تخریب زیستی نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودارهای نمونه‌های متفاوت معلوم است، نمونه‌های حاوی روغن طبیعی، سرعت و مقدار بالاتری از بازیافت زیستی را دارند. می‌توان نتیجه گرفت که روغن طبیعی که منشأ زیستی دارد، نسبت به روغن سنتزی، ویژگی زیست‌تخریب‌پذیری بهتری دارد.

هرچه تعداد گوگرد در این پل‌های عرضی بیشتر شود، هم فضای بیشتری برای نفوذ باکتری‌ها موجود است و هم به‌دلیل تخریب راحت‌تر پیوند عرضی، دسترسی به ناخالصی‌ها ساده‌تر می‌شود. برای بررسی اثر مقدار و نوع پرکننده دوده، یکی از نمونه‌ها (نمونه حد متوسط، 20S)، انتخاب شد و با افزودن مقادیر متفاوت دوده و استفاده از دو نوع متفاوت دوده N330 و N550 اثر این پرکننده بر رفتار تخریب‌زیستی آمیزه بررسی شد. شکل ۴، اثر نوع و مقدار دوده را بر مقدار تخریب آمیزه 20S با زمان نشان می‌دهد. با افزایش مقدار پرکننده دوده، مقدار تخریب کاهش می‌یابد. همچنین، آمیزه حاوی دوده ریزتر (N330) نسبت به دوده درشت‌تر (N550)، در مقدار دوده یکسان ۲۰phr، تخریب کمتری نشان می‌دهد. این مشاهده را می‌توان با توجه به برهم‌کنش‌های دوده-لاستیک، تحلیل کرد که به‌طور طرحواره در حالت تجمع‌یافته و پراکنده دوده در لاستیک، در شکل نشان داده شده است. با افزایش مقدار این برهم‌کنش‌ها و مقدار



شکل ۴ اثر مقدار و نوع دوده بر مقدار تخریب آمیزه‌ها با زمان در نمونه 20S (سامانه پخت نیم‌کارآمد) SMR20

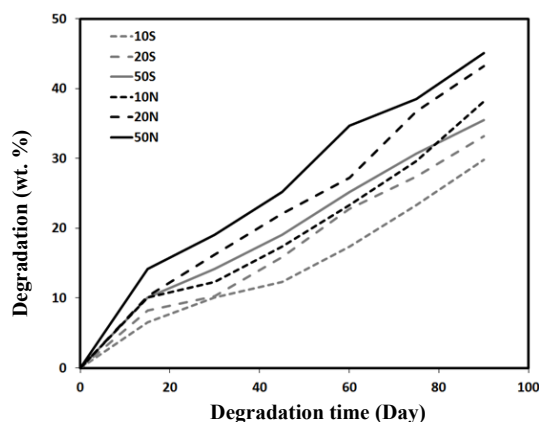
افزایش می‌یابد، که با توجه به پایه زیستی این ناخالصی‌ها، قابل توجه است.



شکل ۶ اثر سامانه پخت و نوع لاستیک طبیعی بر تخریب نهایی آمیزه‌ها پس از ۹۰ روز

درصد مقدار سل استخراج شده از باقی مانده نمونه‌ها پس از تخریب، محاسبه و در شکل ۷ بر حسب سامانه پخت و نوع لاستیک طبیعی ترسیم شده است. کمینه مقدار درصد سل در سامانه کارآمد دیده می‌شود. به دلیل اینکه در این سامانه پیوندهای عرضی به‌طور عمده از نوع مونوسولفیدی یا تک گوگردی هستند، دسترسی به پیوند عرضی مشکل‌تر و همچنین، شکستن پیوند عرضی دشوارتر است. حال آنکه در سامانه معمولی، عکس این مطلب صادق است و با وجود پیوندهای پلی‌سولفیدی یا چندگوگردی، بیشترین شکست پیوندهای عرضی اتفاق می‌افتد و بالاترین درصد سل به دست می‌آید.

با افزایش ناخالصی در لاستیک، امکان تخریب به‌طور عمومی بالاتر می‌رود و در نتیجه، پیوندهای عرضی بیشتری نیز می‌شکنند. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، درصد سل به ترتیب از SMR10، SMR20 تا SMR50، افزایش دارد.

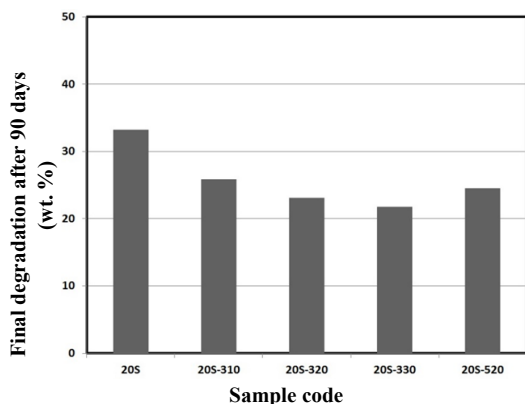


شکل ۵ درصد وزنی تخریب زیستی نمونه‌ها با زمان؛ مقایسه روغن مصنوعی و طبیعی

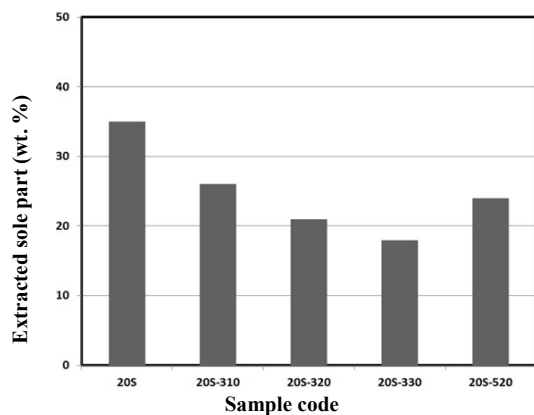
مقدار بازیابی

لاستیک شبکه‌ای شده، قابلیت انحلال در حلال را نداشته و فقط با جذب مقداری حلال متورم می‌شود، در حالی که لاستیک خطی، در حلال مناسب قابل حل است. پس از تخریب لاستیک، وقتی باقی مانده آن را در حلال قرار دهیم، بخشی که پیوندهای عرضی آن تخریب نشده است، در حلال حل نشده و به صورت نرم و متورم درمی‌آید که به بخش ژل معروف است، در حالی که بخشی که پیوندهای عرضی آن شکسته شده، در حلال حل می‌شود که به آن بخش سل می‌گویند. پس از قرارگیری در حلال، با محاسبه مقدار نسبت وزنی نمونه که در حلال حل شده است، می‌توان درصد وزنی سل را به دست آورد. در اینجا این کمیت محاسبه و به همراه مقدار تخریب نهایی نمونه‌ها پس از ۹۰ روز، ارائه شده است. شکل ۶ اثر سامانه پخت و نوع لاستیک طبیعی را بر تخریب نهایی آمیزه‌ها پس از ۹۰ روز نشان می‌دهد. با تغییر سامانه پخت به ترتیب کارآمد، نیم کارآمد و معمولی مقدار تخریب نهایی بالا می‌رود. این موضوع مرتبط با طول‌تر شدن پیوندهای عرضی گوگردی به ترتیب ذکر شده است. همچنین، با افزایش ناخالصی در گرید لاستیک طبیعی از SMR10، SMR20 تا SMR50، مقدار تخریب نهایی،

است. همان‌طور که در شکل ۹ مشهود است، درصد سل به‌ترتیب با افزایش مقدار دوده از ۱۰ phr تا ۳۰ phr، و با تغییر دوده از N550 به N330 (در ۲۰phr) کاهش یافته است.

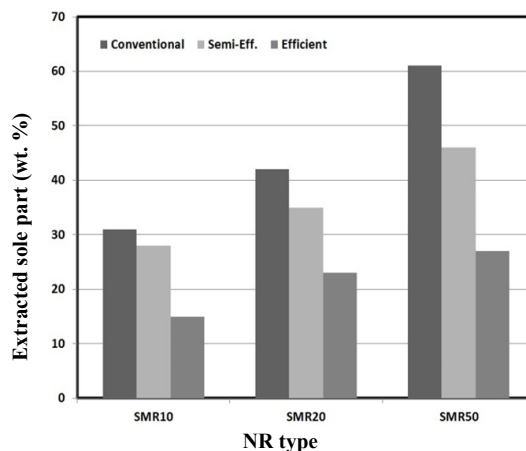


شکل ۸ اثر نوع و مقدار دوده بر مقدار تخریب نهایی آمیزه‌ها پس از ۹۰ روز



شکل ۹ اثر نوع و مقدار دوده بر درصد سل باقی‌مانده در نمونه به‌جای‌مانده پس از تخریب طی ۹۰ روز

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، اثر روغن مصنوعی و طبیعی برای انواع متفاوت SMR به‌ترتیب بر تخریب نهایی آمیزه‌ها پس از ۹۰ روز و درصد مقدار سل استخراج شده از باقیمانده نمونه‌ها پس از تخریب را نشان می‌دهد. همان‌طور که



شکل ۷ اثر سامانه پخت و نوع لاستیک طبیعی بر درصد سل باقی‌مانده در نمونه به‌جای‌مانده پس از تخریب طی ۹۰ روز

شکل‌های ۸ و ۹ به‌ترتیب تخریب نهایی آمیزه‌ها پس از ۹۰ روز و درصد مقدار سل استخراج شده از باقی‌مانده نمونه‌ها پس از تخریب را برحسب نوع و مقدار دوده برای آمیزه 20S نشان می‌دهد. با افزایش مقدار پرکننده دوده، تخریب نهایی کاهش می‌یابد. همچنین، آمیزه حاوی دوده ریزتر (N330) نسبت به دوده درشت‌تر (N550)، تخریب نهایی کمتری دارد. این روند به علت افزایش مقدار برهم‌کنش‌های دوده-لاستیک و مقدار لاستیک جذب‌شده روی دوده، به‌ترتیب یادشده است. چون هرچه مقدار دوده بیشتر شود یا دوده ریزتری استفاده شود، مقدار این پیوندها و برهم‌کنش‌ها بیشتر می‌شود. روند به‌نسبت مشابهی برای درصد سل مشاهده می‌شود. نمونه فاقد دوده، بیشترین تخریب نهایی و بیشترین درصد سل را دارد. درحالی‌که کمترین مقدار درصد سل در بیشترین مقدار از دوده ریز N330 دیده می‌شود. در آمیزه‌های حاوی دوده، در مقدار یکسان دوده، نوع دوده ریزتر نسبت به نوع درشت‌تر (نمونه 20S-320 نسبت به نمونه 20S-520)، درصد سل کمتری دارد. همان‌طور که امکان تخریب به‌طورعمومی با تغییر در مقدار و اندازه ذره دوده تغییر می‌کند، تخریب پیوندهای عرضی نیز تابع روند مشابهی

شد. انواع متفاوت لاستیک طبیعی SMR، حاوی مقدار ناخالصی متفاوت در نظر گرفته شدند و متغیرهای نوع سامانه پخت گوگردی، زمان تخریب و حضور ماده پرکننده دوده بر مقدار تخریب زیستی این آمیزه‌ها مطالعه شد و نتیجه‌های زیر به دست آمد:

- با تغییر سامانه پخت از معمولی به نیم‌کارآمد تا کارآمد، در همه موارد، گشتاور و سرعت ولکانش بالا رفت و زمان پخت کم شد. در سامانه پخت یکسان، با تغییر نوع لاستیک طبیعی از SMR10 به SMR20 و SMR50، پخت‌ها به نسبت کندتر شد. افزایش مقدار دوده و همچنین، ریزتر شدن آن، موجب پخت سریع‌تری شد.

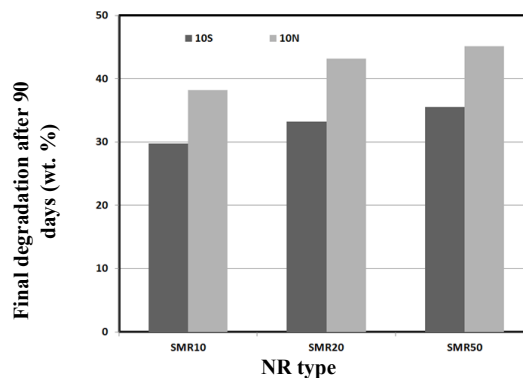
- مقدار تخریب زیستی برای سامانه‌های پخت متفاوت به ترتیب کارآمد، نیم‌کارآمد و مکارآمدی افزایش نشان داد. این تفاوت در زمان‌های طولانی‌تر، مشخص‌تر بود. در ناخالصی بیشتر، حساسیت تخریبی آمیزه به نوع سامانه پخت، بیشتر بود. با افزایش مقدار ناخالصی، درصد تخریب بالا رفت که در زمان‌های بالاتر، چشمگیرتر بود. در مقدار بیشتر پرکننده دوده، مقدار تخریب کاهش یافت. در ضمن، آمیزه دارای دوده ریزتر در مقایسه با دوده درشت‌تر، دچار تخریب کمتری شد.

- کمترین مقدار درصد سل در سامانه کارآمد دیده شد. همچنین، درصد سل با افزایش مقدار ناخالصی در لاستیک طبیعی، افزایش داشت. نمونه فاقد دوده، بالاترین تخریب نهایی و بیشترین درصد سل را داشت. در حالی که در آمیزه‌های حاوی دوده، کمترین درصد سل در مقدار بیشینه دوده مشاهده شد. در درصد ثابت دوده، دوده ریزتر نسبت به درشت‌تر، درصد سل کمتر داشت.

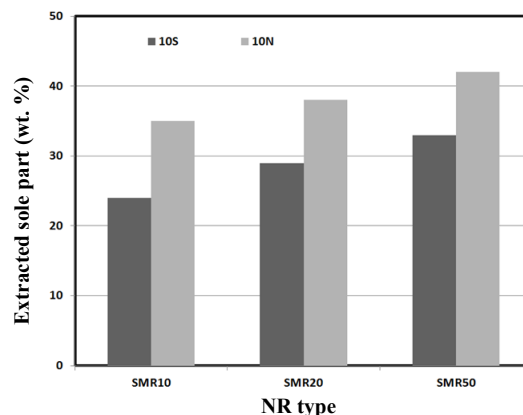
- جایگزین کردن روغن سنتزی با روغن طبیعی، موجب بهبود تخریب زیستی آمیزه‌ها شد. نمونه‌های حاوی روغن طبیعی، مقدار و سرعت تخریب بالاتری داشتند و درصد سل و تخریب نهایی آن‌ها بالاتر بود.

سال شانزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱

به‌طور کامل مشهود است، با استفاده از روغن طبیعی، هر دوی این کمیت‌های بازیافتی در بازیافت زیستی، افزایش مشخصی داشته‌اند. این نتیجه به دلیل آن است که روغن طبیعی که منشاء زیستی دارد، نسبت به روغن سنتزی، ویژگی زیست‌تخریب‌پذیری بهتری دارد.



شکل ۱۰ مقایسه اثر روغن مصنوعی و طبیعی بر تخریب نهایی آمیزه‌ها پس از ۹۰ روز



شکل ۱۱ مقایسه اثر روغن مصنوعی و طبیعی بر درصد سل باقی‌مانده پس از تخریب طی ۹۰ روز

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بازیافت آمیزه‌های متفاوتی بر پایه لاستیک طبیعی، در محیط زیستی شبیه‌سازی‌شده، بررسی

نشریه پژوهش‌های کاربردی در شیمی (JARC)

مراجع

- [1] Ramezani, E.; "Rubber recycling and using of recycled rubber", RIERCO Pub., Iran, 2001.
- [2] Lee, T.; Millns, W.; U.S. Patent 4049588, 1997.
- [3] Klingensmith, W.; Rubber World 203, 16-21, 1991.
- [4] Myhre, M.; MacKillop, D.A.; Rubber Chemistry and Technology 75, 429-474, 2002.
- [5] Leyden, J.J.; Rubber World 203, 28-29, 1991.
- [6] Nicholas, P.; Rubber Chemistry and Technology 55, 1493-1499, 1992.
- [7] Martiznes, D.F.; U.S. Patent 5304576, 1994.
- [8] Banbury, F.H.; Comes, D.A.; Chmuck, C.S.; U.S. Patent 2461192, 1999.
- [9] Mouri, M.; Okamoto, H.; Matsushita, M.; Honda, H.; Owaki, M.; International Polymer Science and Technology 27, 23-28, 2002.
- [10] Maridass, B.; Gupta, B.R.; Polymer Testing 23, 377-385, 2004.
- [11] Karrabi, M.; Mohammadian, S.; Iran Rub. Mag. 59, 143-147, 2000.
- [12] Sutanto, P.; Picchioni, F.; Janssen, L.P.B.M.; Dijkhuis, K.A.J.; Dierkes, W.K.; Noordermeer, J.W.M.; Journal of Applied Polymer Science 102, 5948-5957, 2006.
- [13] Motiei, F.; Malekzade, M.; J. Appl. Res. Chem. 8, 25-32, 2014.
- [14] Mohammadian, S.; "Rubber Engineering", PNU Pub., Iran, 2017.
- [15] Karrabi, M.; Mohammadian, S.; Iranian J. Pol. Sci. Tech. 19, 483-475, 2006.
- [16] Mohammadian, S.; Iran Rub. Mag. 85, 47-51, 2017.
- [17] Karrabi, M.; Mohammadian, S.; Pashaei, F.; J. Appl. Res. Chem. 11, 35-40, 2017.
- [18] Mansoori Rad, M.; Razzaghi Kashani, M.; Moosavi, S.M.; Iranian J. Pol. Sci. Tech. 27, 395-407, 2014.
- [19] Hanifi, S.; Ahmadi, Sh.; Oroomiei, A.; Iranian J. Pol. Sci. Tech. 26, 139-148, 2013.
- [20] Rahmi, S.; ehsani, P.; Ghasemi, I.; Azizi, H.; Karrabi, M.; Iranian J. Pol. Sci. Tech. 29, 311-321, 2016.
- [21] Mohammadian, S.; Khoshhal, A.; Malek, A.; Iranian J. Chem. Eng. 37, 237-250, 2018.

Study on the biodegradation of SMR rubber to reduce the environmental wastes: The effects of curing system, filler and oil

S. Mohammadian-Gezaz*

Associate professor, Department of Chemical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran, P.O. Box 19395-3697.

Abstract: In this work, the effects of the various parameters such as type of curing system, amount of filler, and type of oil were studied on the biodegradation of natural rubber (NR). The amount of degradation increased in the order of the efficient, semi-efficient and conventional curing system. NR degradation with the NR grade (based on the SMR types) was changed as $SMR50 > SMR20 > SMR10$ due to the higher impurity. By increasing the carbon black level, degradation decreased. The negative effect of the carbon black on the degradation was more obvious for the finer carbon black (N330) with respect to the coarser one (N550), at the same level. The lowest sole fraction was achieved for efficient curing system. Moreover, the sole fraction increased by NR type as $SMR50 > SMR20 > SMR10$. Unfilled NR had the higher degradation amount and the higher sole fraction.

Keywords: Natural rubber, SMR, Biodegradation, Curing system, Carbon black, Oil, Sole fraction.