

The Mechanical Properties of Recycled Polyethylene - Polyethylene Terephthalate Composites

Ehsan Avazverdi¹, Mojtaba Vandaland¹, and Alireza Shakeri^{2*}

1. Department of Polymer Engineering, Golestan University, P.O. Box: 115, Gorgan, Iran
2. School of Chemistry, College of Science, University of Tehran, P.O. Box: 11155-4563, Tehran, Iran

Received: 27 January 2014, accepted: 8 September 2014

ABSTRACT

Polyethylene terephthalate (PET), one of the thermoplastic polymers, is encountered with arduous problems in its recycling. After recycling, its mechanical properties drop dramatically and therefore it cannot be used to produce the products as virgin PET does. Polyethylene is a thermoplastic polymer which can be easily recycled using the conventional recycling processes. The decreased mechanical properties of virgin polyethylene due to the environmental factors can be improved by reinforcing fillers. In this paper, we studied the effects of adding recycled polyethylene terephthalate (rPET) as a filler, in various amounts with different sizes, on the physical and mechanical properties of recycled polyethylene. Composite samples were prepared using an internal mixer at temperature 185°C, well below rPET melting point (250°C), and characterized by their mechanical properties. To improve the compatibility between different components, PE grafted with maleic anhydride was added as a coupling agent in all the compositions under study. The mechanical properties of the prepared samples were performed using the tensile strength, impact strength, surface hardness and melt flow index (MFI) tests. To check the dispersity of the polyethylene terephthalate powder in the polyethylene matrix, light microscopy was used. The results showed that the addition of rPET improved the tensile energy, tensile modulus and surface hardness of the composites while reduced the melt flow index, elongation-at-yield, tensile strength and fracture energy of impact test. We could conclude that with increasing rPET percentage in the recycled polyethylene matrix, the composite became brittle, in other words it decreased the plastic behavior of recycled polyethylene. Decreasing particle size led to higher surface contacts, increased the mechanical properties and made the composite more brittle. The light microscopy micrographs of the samples showed a good distribution of small rPET particles in the polyethylene matrix.

Keywords:

polyethylene,
polyethylene terephthalate,
maleated polyethylene,
mechanical properties,
recycle

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: alireza.shakeri@khayam.ut.ac.ir

خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلی‌اتیلن - پلی‌اتیلن ترفتالات بازیافتی

احسان عوضوردی^۱، مجتبی وندالوند^۱، علیرضا شاکری^{۲*}

۱- گرگان، دانشگاه گلستان، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۱۵
۲- تهران، دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکده شیمی، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵

دریافت: ۹۲/۱۱/۷، پذیرش: ۹۳/۶/۱۷

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،
سال بیست و هفتم، شماره ۶،
صفحه ۳۸۹-۳۸۱، ۱۳۹۳
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883

چکیده

پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) از جمله پلاستیک‌های گرمانرم است که بازیافت آن با مشکلات متعددی روبه‌روست. به دلیل کاهش شدید خواص مکانیکی آن پس از بازیافت، نمی‌توان از آن برای تولید محصولاتی همانند محصولات بکر استفاده کرد. پلی‌اتیلن نیز از جمله پلیمرهای گرمانرم است که به راحتی بازیافت شده و می‌توان آن را با فرایندهای معمول بازیافت کرد. پلی‌اتیلن به علت عوامل محیطی که محصول اولیه در آن قرار دارد تا حدودی کاهش خواص مکانیکی نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از تقویت‌کننده‌ها خواص آن را اصلاح کرد. در پژوهش حاضر، اثر پرکننده پلی‌اتیلن ترفتالات بازیافتی (rPET) با مقدار و اندازه‌های مختلف بر خواص مکانیکی ماده حاصل مطالعه شد. کامپوزیت با مخلوطکن داخلی تهیه شد. برای اصلاح سازگاری بین ذرات از پلی‌اتیلن پیوندخورده با مالئیک انیدرید استفاده شد. بررسی خواص مکانیکی با آزمون‌های کشش، ضربه، سختی و شاخص جریان مذاب انجام شد. همچنین، برای بررسی شکل‌شناسی ذرات پلی‌اتیلن ترفتالات بازیافتی، میکروسکوپی الکترونی پویشی به کار گرفته شد. نتایج نشان داد، با افزایش درصد پلی‌اتیلن ترفتالات بازیافتی، انرژی شکست، سختی سطح و مدول کششی کامپوزیت افزایش و از طرفی شاخص جریان مذاب، ازدیاد طول تا نقطه تسلیم، استحکام کششی و نیز استحکام ضربه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش مقدار PET بازیافتی در ماتریس پلی‌اتیلن بازیافتی رفتار کامپوزیت شکننده‌تر شد. به عبارتی دیگر، این موضوع باعث کاهش رفتار پلاستیک در پلی‌اتیلن بازیافتی شد و نیز با کاهش اندازه ذرات و افزایش سطح تماس خواص مکانیکی به مقدار قابل توجهی افزایش یافت و نیز رفتار ماده شکننده‌تر شد.

واژه‌های کلیدی

پلی‌اتیلن،
پلی‌اتیلن ترفتالات،
پلی‌اتیلن مالئات‌دارشده،
خواص مکانیکی،
بازیافت

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
alireza.shakeri@khayam.ut.ac.ir

مقدمه

پس از معرفی پلاستیک‌ها به بازارهای جهانی این ترکیبات به سرعت به مواد مطرحی برای تولید اشیاء و ظروف مختلف تبدیل شدند. خواص فیزیکی و شیمیایی پلاستیک‌ها نظیر استحکام، انعطاف‌پذیری، دوام، وزن کم و قابلیت ذوب باعث شد تا این مواد برای بسیاری از کاربردها، از قطعه‌های اتومبیل گرفته تا بطری‌ها و کیسه‌های پلاستیکی، ایده‌آل باشند. مواد پلیمری قابلیت تولید محصولات متنوع، ارزان، کارآمد و نیز قابلیت صرفه‌جویی انرژی را دارند [۱].

پلی‌اتیلن و پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) از پرمصرف‌ترین پلاستیک‌ها در زمینه‌های بسته‌بندی هستند که مصرف زیاد آنها باعث می‌شود تا سالانه حجم زیادی ضایعات پلیمری تولید شود. پلی‌اتیلن از جمله پلیمرهای گرمانرم است که می‌توان آن را با فرایندهای معمول به راحتی بازیافت کرد. البته به علت عوامل محیطی که محصول اولیه در آن قرار داشته است، تا حدودی کاهش خواص مکانیکی در آن مشاهده می‌شود که می‌توان با استفاده از تقویت‌کننده‌ها خواص مکانیکی آن را بهبود بخشید. PET از جمله پلاستیک‌های گرمانرم است که بازیافت آن با مشکلات متعددی روبه‌روست. به دلیل کاهش شدید خواص مکانیکی این پلیمر پس از بازیافت، نمی‌توان از آن برای تولید محصولاتی شبیه محصولات بکر استفاده کرد. از روش‌های تقویت خواص مکانیکی پلی‌اتیلن بازیافتی تولید کامپوزیت پلی‌اتیلن (PE) بازیافتی - پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) بازیافتی است [۲-۴]. مطالعه‌های بسیاری در زمینه اصلاح خواص پلی‌اتیلن با استفاده از PET انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود.

Shields و همکاران [۵] گذردهی اکسیژن در کامپوزیت‌های تقویت شده با میکروالیاف تهیه شده از آمیزه PE/PET را بررسی کرده و بهبود بسیار زیادی در خواص ممانعت گذردهی اکسیژن را گزارش کردند. یوسفی و همکاران [۶،۷] اثر نانوذرات خاک‌رس بر سازگاری آمیزه‌های PET/PET را مطالعه و گزارش کردند، پارامتر کلیدی در کارایی سازگارکننده نوع عامل اصلاح سطح است که با استفاده از نانوذرات خاک‌رس اندازه قطره‌های پلی‌اتیلن کاهش می‌یابد. Dai و همکاران [۸] خواص میکروکامپوزیت‌های پلی‌اتیلن و الیاف PET پر شده با دوده رسانای الکتریکی را با توزیع انتخابی دوده مطالعه کردند. آنها دریافتند، با افزایش زمان اختلاط مقدار مهاجرت دوده از پلی‌اتیلن به سطح مشترک و سپس به PET افزایش می‌یابد. شفایی و همکاران [۹] اثر سازگارکننده بر خواص الیاف بازیافتی آمیزه PET خالص و بازیافتی را مقایسه کرده و نشان دادند، با افزایش مقدار سازگارکننده قطره‌های PET در ماتریس PP ریزتر می‌شود. ولی، در نمونه‌های دارای PET بازیافتی در مقادیر بیشتر از ۵٪ وزنی

یکنواختی سطح مقطع الیاف کاهش می‌یابد.

عبادی و همکاران [۱۰] اثر سازگارکننده را بر خواص رئولوژیکی آمیزه PP/PET بررسی و گزارش کردند، با افزایش مقدار سازگارکننده خواص رئولوژیکی آمیزه به خواص رئولوژیکی PET نزدیک‌تر می‌شود و نیز با افزایش مقدار پیوند سازگارکننده روی قطره PET مقدار بلورینگی PP افزایش می‌یابد.

انتظام و همکاران [۱۱-۱۳] اثر سازگارکننده واکنشی را بر رئولوژی آمیزه PE/PET بررسی کرده و نشان دادند، در اثر استفاده از سازگارکننده قوی، نواحی فاز پراکنده شبکه سه‌بعدی تشکیل می‌دهند. همچنین، مقدار اضافی سازگارکننده درون ماتریس پلیمری میسل تشکیل می‌دهد. همچنین، آنها اثر جاگیری نانوذرات خاک‌رس را بر رئولوژی و شکل‌شناسی آمیزه پلی‌پروپیلن - پلی‌اتیلن ترفتالات مطالعه کردند و نشان دادند، در آمیزه‌های غنی از PP نانوذرات خاک‌رس روی سطح قطره‌های PET تجمع می‌یابند، در حالی که در آمیزه غنی از PET نانوذرات خاک‌رس افزون بر تجمع روی سطح مشترک، درون فاز غنی از PET نیز جای می‌گیرند. همچنین آنها بیان کردند، تغییر در رفتار رئولوژیکی ماده به دلیل تشکیل شبکه نانوذرات در هیبرید است. در تمام پژوهش‌های انجام شده در زمینه تهیه الیاف کامپوزیتی پلی‌اتیلن - PET، تهیه الیاف در دمای فرایندی PET یعنی بیش از ۲۵۰°C انجام شده است.

در تمام پژوهش‌های پیشین، ساخت سامانه‌های آمیزه‌ای پلی‌اتیلن - پلی‌اتیلن ترفتالات انجام شده است، اما در پژوهش حاضر تلاش شد تا در دمایی کمتر از دمای ذوب PET بدون ذوب ذرات PET کامپوزیت پلی‌اتیلن بازیافتی - پلی‌اتیلن ترفتالات بازیافتی ساخته شود. هدف از پژوهش پیش رو، بررسی اثر مقدار و اندازه ذرات خاک‌رس بر خواص مکانیکی کامپوزیت ذره‌ای پلی‌اتیلن بازیافتی - پلی‌اتیلن ترفتالات بازیافتی با وجود سازگارکننده پلی‌اتیلن پیوندخورده با مالئیک انیدرید بود.

تجربی

مواد

گرانول پلی‌اتیلن بازیافتی تهیه شده از فیلم پلی‌اتیلن بازیافتی نوع بادی با شاخص گرانیوز مذاب ۰/۵۰۹ g/10min و پلی‌اتیلن پیوندخورده با مالئیک انیدرید با مقدار ۱/۴٪ مالئیک انیدرید و شاخص جریان مذاب ۰/۵ g/10min از شرکت کرانگین ایران خریداری شد. بطری PET بازیافتی نوع بطری پرک شده از شرکت مازیاران گرگان تهیه شد.

دستگاه‌ها

از جذب رطوبت، پلی‌اتیلن بازیافتی تهیه شده نیز به مدت ۲۴ h درون خشک‌کن با دمای 60°C قرار گرفت. سپس، نمونه‌ها با ترکیب مواد تشکیل‌دهنده طبق جدول ۱ با مخلوط‌کن داخلی $\text{Brabender}^{\text{®}}$ تشکیل‌دهنده طبق جدول ۱ با سرعت 60 rpm به مدت ۵ min $\text{Plasti-Corder}^{\text{®}}$ در دمای 185°C با سرعت ۶۰ rpm به مدت ۵ min تهیه شدند. برای افزایش برهم‌کنش سطحی بین پلیمر ماتریس و پلیمر تقویت‌کننده از سازگارکننده پلی‌اتیلن پیوندخورده با مالئیک انیدرید به مقدار ۴٪ وزنی نسبت به تقویت‌کننده استفاده شد. سپس، نمونه‌های تهیه شده با آسیاب تا اندازه گرانول خرد شدند. نمونه‌های آزمون با پرس گرم در دمای 185°C به مدت ۳ min و با استفاده از قالب‌های دمبلی شکل طبق استاندارد ASTM D638 و قالب‌های نمونه آزمون ضربه شکاف‌دار براساس استاندارد ASTM D256، زیر فشار ۳۰ bar ذوب و شکل‌دهی شدند. پس از آن، بلافاصله زیر فشار ۱۵ bar پرس با جریان آب سرد 25°C تا رسیدن به دمای محیط خنک شدند.

نتایج و بحث

در این پژوهش، هفت متغیر بررسی شدند که داده‌های اندازه‌گیری شده طی آزمون‌ها در جدول ۲ آمده است.

آزمون کشش

در این آزمون، متغیرهای مدول کششی، استحکام کششی، انرژی شکست و ازدیاد طول تا نقطه تسلیم بررسی و مقدار بهبود یا کاهش خواص مکانیکی مطالعه شد. در شکل ۱ نمودار تغییرات مدول کششی پلی‌اتیلن بازیافتی پر شده با آرد PET در دو مش ۳۰ و ۶۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشهود است، مدول کششی در مش ۳۰ با افزایش مقدار PET کمی کاهش می‌یابد. این

آزمون کشش با دستگاه Universal تک‌ستونی محصول شرکت Gotech تایوان با حداکثر نیروی اعمال شده 500 kgf و حداکثر سرعت کشش 500 mm/min طبق استاندارد ASTM D638 با سرعت کشش 50 mm/min انجام شد. آزمون ضربه با دستگاه Analog Impact محصول شرکت Gotech تایوان و با پاندول $7/5\text{ J}$ طبق استاندارد ASTM D256 انجام شد. آزمون اندازه‌گیری شاخص جریان مذاب (MFI) با دستگاه MFI مدل SMF-300 براساس استاندارد ASTM D1238 و آزمون اندازه‌گیری سختی سطح با دستگاه سختی‌سنج Durometer مدل SHD-25 Shore D براساس استاندارد ASTM D2240 هر دو ساخت شرکت ستام ایران انجام شد. برای بررسی شکل‌شناسی سطح مقطع شکست، نمونه‌ها در نیتروژن مایع شکسته شدند. سپس، سطح مقطع شکست آنها با میکروسکوپ الکترونی پویشی مدل Vegall ساخت شرکت Tescan با حداکثر بزرگ‌نمایی $100000\times$ و قدرت تفکیک 50 nm مجهز به آشکارساز Back Scattered تصویربرداری شد. برای افزایش رسانایی سطح نمونه‌ها از پوشش‌دهی طلا استفاده شد.

روش‌ها

از آنجا که پرک‌های بطری PET بازیافتی تهیه شده شامل قطعه‌های درب و برجسب بود، در مرحله اول به روش غوطه‌وری در آب و با توجه به اختلاف چگالی PET و پلی‌اتیلن قطعه‌های ناخالصی تولید شده از سایر پلیمرها تفکیک شد. سپس، برای از بین بردن چربی و چسب موجود روی پرک‌ها، پرک‌های PET در سه مرحله با مواد شوینده شسته شدند. سپس، پرک‌های PET به مدت ۲۴ h در خشک‌کن با دمای 80°C خشک شدند. پس از آن، پرک‌های خشک شده با آسیاب خرد و به آرد تبدیل شدند. آرد PET تهیه شده با الک با مش‌های ۳۰ و ۶۰ از هم تفکیک شد. برای جلوگیری

جدول ۱- نوع و درصد مواد تشکیل‌دهنده نمونه‌ها.

مقدار پلی‌اتیلن بازیافتی (%)	PE-g-MA(%)	PET(%)	مش	علامت اختصاری
۹۴/۸	۰/۲	۵	۳۰	۵-۳۰
۸۴/۴	۰/۶	۱۵		۱۵-۳۰
۷۴	۱	۲۵		۲۵-۳۰
۹۴/۸	۰/۲	۵	۶۰	۵-۶۰
۸۴/۴	۰/۶	۱۵		۱۵-۶۰
۷۴	۱	۲۵		۲۵-۶۰

جدول ۲- داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمون‌ها.

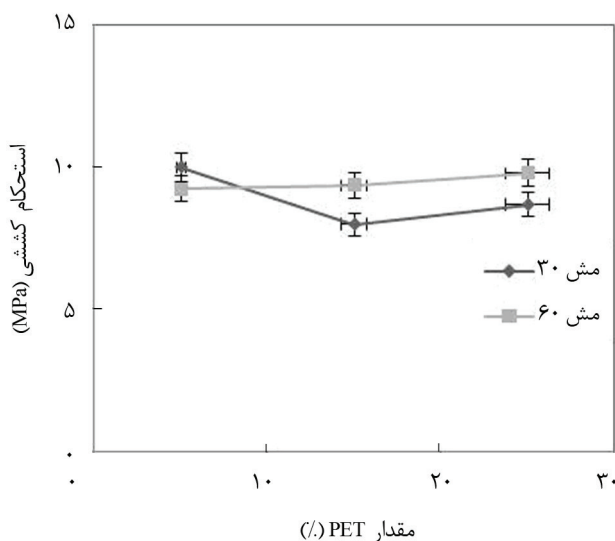
کد نمونه	مدول کششی (MPa)	استحکام کششی (MPa)	انرژی شکست (J)	ازدیاد طول تا نقطه تسلیم (%)	استحکام ضربه‌ای (J/m)	MFI (g/10min)	سختی (shore D)
۵-۳۰	۱۴۰/۱۶	۹/۹۹	۱۴/۵۵	۱۴/۱۵	۹/۸۹	۰/۵	۴۹/۸۳
۱۵-۳۰	۱۳۰/۳۷	۷/۹۸۶	۸/۶۲	۱۳/۹۰	۷/۱۳	۰/۳۶۵	۵۳/۱۶
۲۵-۳۰	۱۲۷/۷۶	۸/۶۸	۴/۸۱	۱۱/۵۵	۶/۵۳	۰/۲۶۱	۵۲/۸
۵-۶۰	۱۴۴/۴۹	۹/۲۴۳	۲۴/۹۴	۱۴/۳۰	۱۳/۱۷	۰/۳۲۵	۵۳
۱۵-۶۰	۱۴۶/۷۴	۹/۳۵۳	۱۶/۴۶	۱۲/۳۱	۴/۹۶	۰/۲۵۴	۵۳
۲۵-۶۰	۱۸۸/۹۴	۹/۷۸۶	۳/۹۱	۸/۶۳	۲/۸۶	۰/۲۲	۵۵/۳۳

داده‌ها میانگین حسابی سه تکرار برای هر نمونه است.

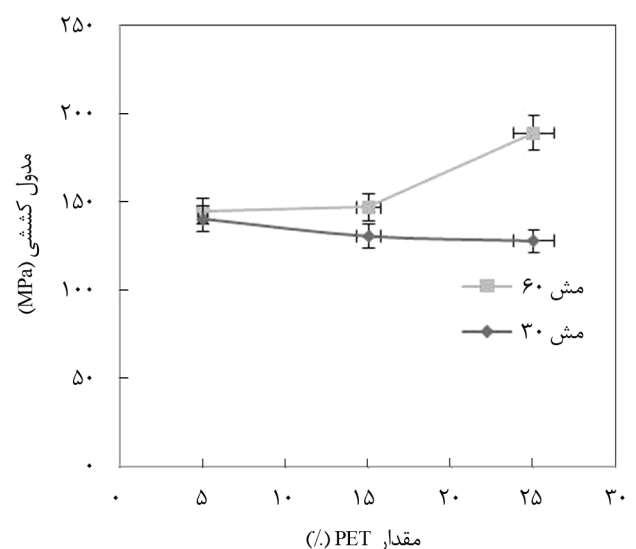
شکل ۲ تغییرات استحکام کششی کامپوزیت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در مش ۳۰ با افزایش مقدار PET ابتدا استحکام کششی کاهش یافته و سپس شروع به افزایش می‌کند. این رفتار نشان‌دهنده وجود دو سازوکار رقابتی است. سازوکار اول افزایش نقاط تمرکز تنش با افزایش مقدار PET و سازوکار دوم افزایش استحکام به واسطه افزودن PET است که استحکام و مدول کششی بسیار بیشتری نسبت به پلیمر ماتریس دارد. در مقادیر کمتر از ۱۵٪ سازوکار اول غالب است، ولی با افزایش مقدار PET سازوکار دوم مؤثرتر شده است. اما، در مش ۶۰ با افزایش مقدار PET استحکام کششی افزایش می‌یابد. زیرا، با کاهش اندازه ذرات اثر سازوکار اول به شدت کاهش یافته است. ولی، سازوکار دوم نه تنها کاهش پیدا نکرده، بلکه با کاهش اندازه ذرات و افزایش سطح تماس

موضوع می‌تواند ناشی از عدم دربرگرفتن ذرات PET به وسیله ماتریس پلی‌اتیلن باشد که منجر به ایجاد فضاهای خالی و فاصله بین ذرات آبریز پلی‌اتیلن و ماده قطبی PET می‌شود و مدول نمونه حاصل کاهش می‌یابد. در مش ۶۰، با افزایش مقدار PET ابتدا افزایش محسوسی در مدول مشاهده نمی‌شود، اما با افزایش مقدار پرکننده PET مدول افزایش می‌یابد.

دلیل افزایش مدول را می‌توان به وجود ذرات سفت پرکننده PET و نیز برهم‌کنش مناسب بین ذرات PET ماتریس نسبت داد. نتایج مشابهی را ابراهیمی و همکاران [۱۴] برای آمیزه PP/PET/MA-PP نیز گزارش کردند. درضمن باید توجه داشت، خواص کشسانی ماده کامپوزیت حاصل، نه تنها به خواص اجزا و مقدار مواد تشکیل‌دهنده بلکه به شکل‌شناسی ماده حاصل نیز بستگی دارد [۱۵].



شکل ۲- استحکام کششی پلی‌اتیلن بازیافتی پر شده با آرد PET بازیافتی برحسب تغییر مقدار PET در ماتریس.



شکل ۱- مدول کششی پلی‌اتیلن بازیافتی پر شده با آرد PET بازیافتی برحسب تغییر مقدار PET در ماتریس پلی‌اتیلن.

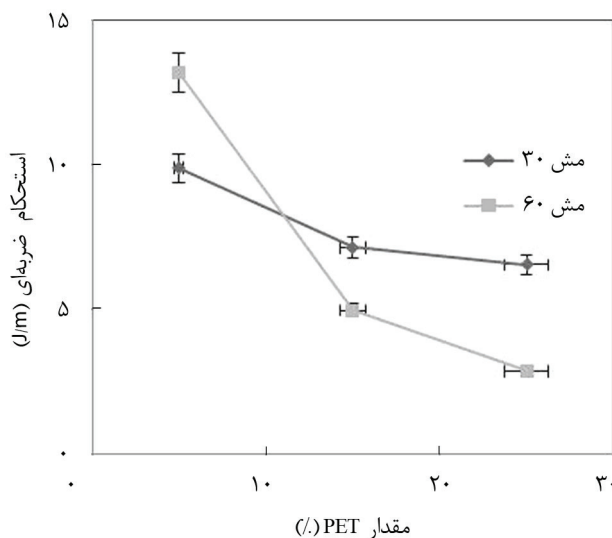
اندازه ذرات بزرگ‌تر شده است.

به‌نظر می‌رسد، در مقادیر کم با کاهش اندازه ذرات چون انتقال تنش بین ماتریس و ذرات بهبود می‌یابد، انرژی لازم برای شکست نمونه به‌شدت افزایش یافته است. افزایش مقدار PET، سبب تغییر تدریجی رفتار از چقرمه به شکننده می‌شود، ولی چون درگیری زنجیرها با ذرات با اندازه کوچک‌تر، به واسطه سطح تماس بزرگ‌تر، بسیار بیشتر است. بنابراین، در مش ۶۰ این تغییر رفتار با سرعت شدیدتری رخ داده است. شکل ۴ نمودار تغییرات ازدیاد طول تا نقطه تسلیم برحسب تغییرات مقدار PET را برای مش‌های ۳۰ و ۶۰ نشان می‌دهد.

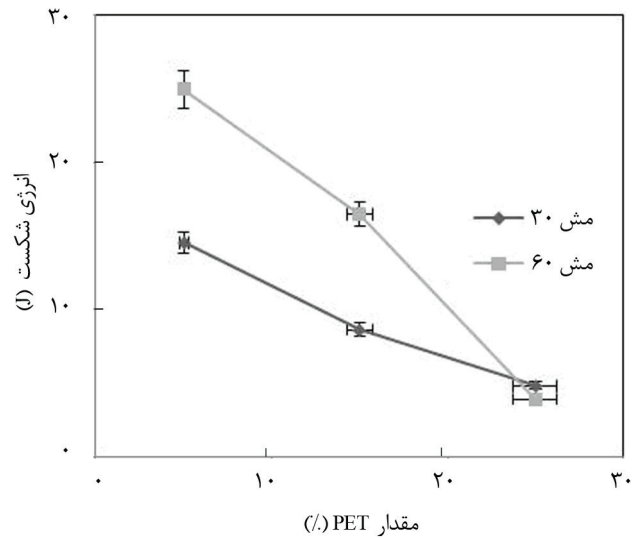
همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش اندازه ذرات بر اثر افزایش درگیری بین ذرات و ماتریس مقدار ازدیاد طول کاهش یافت. همچنین، افزایش مقدار در هر دو اندازه نمونه PET سبب افزایش شکنندگی و سخت‌تر شدن نمونه شده و ازدیاد طول کاهش یافته است. همین‌طور با کاهش اندازه ذرات و در نتیجه آن افزایش سطح تماس بین ذرات و زنجیرهای پلیمری PE، کاهش شدیدتری در ازدیاد طول تا نقطه تسلیم مشاهده شده است.

آزمون ضربه

شکل ۵ نمودار، تغییرات استحکام ضربه‌ای را برای پلی‌اتیلن بازیافتی پرشده با آرد PET در دو مش ۳۰ و ۶۰ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، استحکام ضربه‌ای با افزایش مقدار PET در ماتریس کاهش یافت. اما، این کاهش در اندازه کوچک‌تر ذرات با شدت بیشتری رخ داده است.



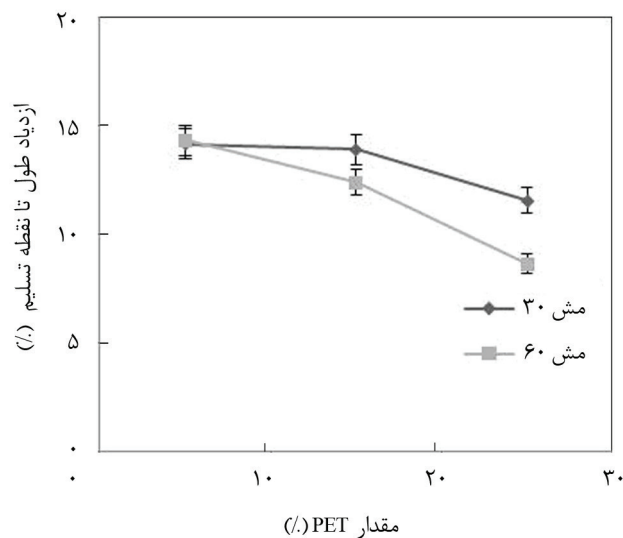
شکل ۵- استحکام ضربه‌ای (آزمون ضربه) پلی‌اتیلن بازیافتی پرشده با آرد PET بازیافتی برحسب تغییر مقدار PET در ماتریس.



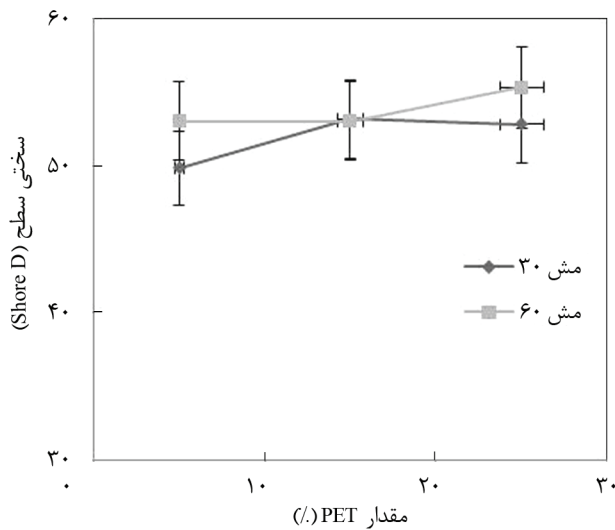
شکل ۳- انرژی شکست پلی‌اتیلن بازیافتی پرشده با آرد PET بازیافتی برحسب تغییر مقدار PET در ماتریس.

بین ماتریس و ذرات، عمل دربرگرفتن ذرات PET به علت سطح کوچک‌تر این ذرات بهبود یافته و انتقال تنش از ماتریس پلی‌اتیلن به ذرات سفت PET بیشتر شده است.

شکل ۳ تغییرات انرژی لازم برای شکست نمونه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش اندازه ذرات انرژی شکست تغییری حدوداً ۲/۵ برابر در ۵٪ از پرکننده PET نشان داده است. اما، با افزایش مقدار PET افزایش انرژی شکست کاهش می‌یابد تا در ۲۵٪ انرژی شکست نمونه با اندازه ذرات کوچک‌تر کمتر از نمونه با



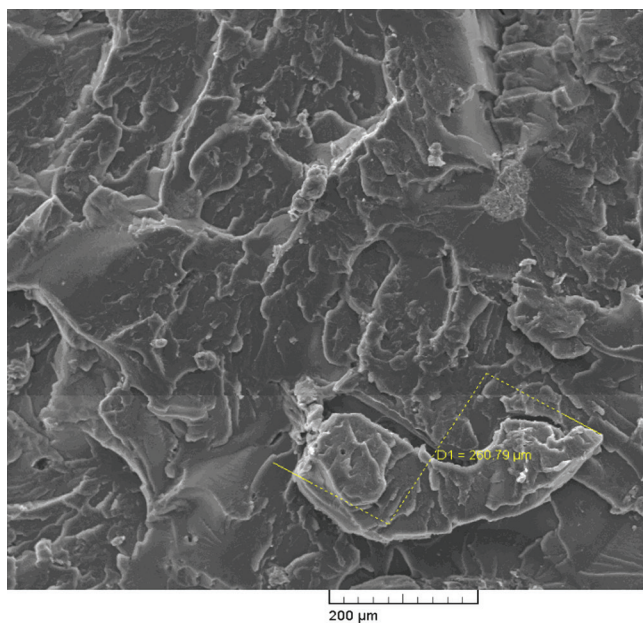
شکل ۴- ازدیاد طول تا نقطه تسلیم پلی‌اتیلن بازیافتی پرشده با آرد PET بازیافتی برحسب تغییر مقدار PET در ماتریس.



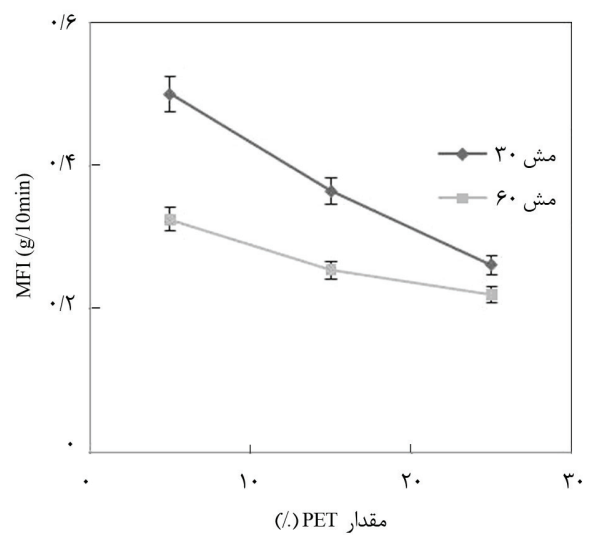
شکل ۷- سختی پلی‌اتیلن بازیافتی پر شده با آرد PET بازیافتی بر حسب تغییر مقدار PET در ماتریس.

آزمون شاخص جریان مذاب

شکل ۶ تغییرات شاخص جریان مذاب را برای پلی‌اتیلن پر شده با آرد PET در دو مش ۳۰ و ۶۰ نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشهود است، با افزایش مقدار PET در ماتریس پلی‌اتیلن شاخص جریان مذاب به شدت کاهش یافت که این موضوع بر اثر افزودن ماده غیرسیال PET در دمای 190°C به پلیمر است. در این دما، ذرات پرکننده هنوز به شکل ذرات جامد هستند که در نتیجه آن با

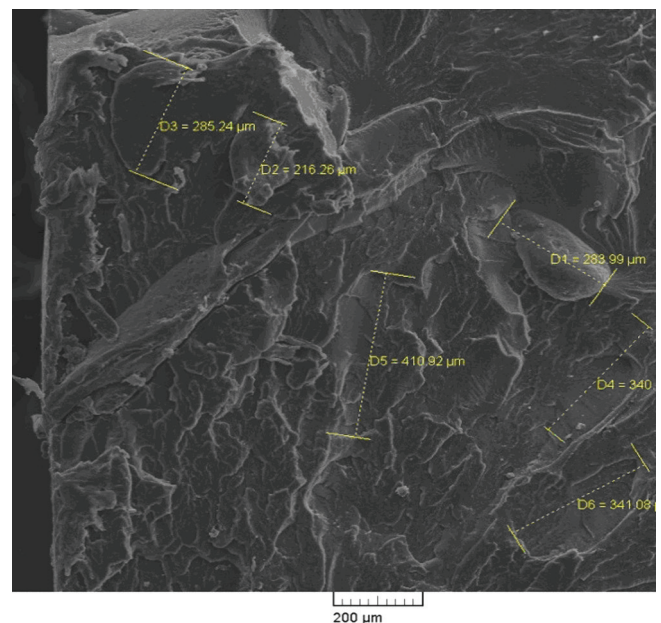


(ب)



شکل ۶- MFI پلی‌اتیلن بازیافتی پر شده با آرد PET بازیافتی بر حسب تغییر مقدار PET در ماتریس.

در اندازه ذرات بزرگ‌تر با افزایش درصد پرکننده در ماتریس افزون بر افزایش شکنندگی در اثر کاهش درگیری زنجیر با ذرات PET پدیده تمرکز تنش نیز عاملی برای شکست قطعه در آزمون است. اما، با کاهش اندازه ذرات افزون بر افزایش درگیری زنجیر با ذرات، بر اثر افزایش مقدار پرکننده، سطح تماس نیز به شدت افزایش یافته است. این عامل نیز بر افزایش شدیدتر شکنندگی مؤثر بوده که این افزایش شدیدتر شکنندگی در شکل ۵ به وضوح قابل مشاهده است.



(الف)

شکل ۸- تصویر SEM شکل‌شناسی سطح مقطع شکست نمونه‌ها: (الف) نمونه ۶۰-۵ و (ب) نمونه ۳۰-۵.

بهرتر و بیشتر به وسیله ماتریس پلیمری دربرگرفته شده و در اثر شکست ذره در ماتریس باقی‌مانده است (شکل ۸ - الف). همان‌طور که در شکل ۸ - ب مشاهده می‌شود، در نتیجه شکست ذرات PET از ماتریس کنده شدند و حفره‌های ناشی از این ذرات در ماتریس باقی مانده است، زیرا ذرات با اندازه بزرگ‌تر برهم‌کنش سطحی ضعیفی‌تری با ماتریس پلیمری دارند.

نتیجه‌گیری

از دو ماده پلاستیکی بازیافتی (PE و PET) در دمای فرایندی پلی‌اتیلن کامپوزیت تهیه شد. آرد PET به‌عنوان پرکننده در ماتریس پلی‌اتیلن بازیافتی باعث تقویت برخی از خواص مکانیکی پلی‌اتیلن شد. به‌طوری که با افزایش مقدار ذرات PET سختی سطح و مدول کششی پلی‌اتیلن افزایش یافت. از طرفی، شاخص جریان مذاب، ازدیاد طول تا نقطه تسلیم و نیز انرژی شکست در آزمون ضربه، کاهش نشان داد. همچنین نتایج نشان داد، با کاهش اندازه ذرات PET خواص مکانیکی کامپوزیت حاصل افزایش می‌یابد، به‌طوری که در مقدار یکسان از ذرات پرکننده PET ذرات با مش ۶۰ خواص مکانیکی بهتری نسبت به کامپوزیت‌های پر شده با ذرات با مش ۳۰ داشته‌اند.

مراجع

- Vilaplana F. and Sigbritt K., Quality Concepts for the Improved Use of Recycled Polymeric Materials, *Macromol. Mater. Eng.*, **293**, 274-297, 2008.
- Evstatiev M., Fakirov S., Krasteva B., Friedrich K., Covas J.A., and Cunha A.M., Recycling of Poly(ethylene terephthalate) as Polymer-Polymer Composites, *Polym. Eng. Sci.*, **42**, 826-835, 2002.
- Noskov D.V., Ovchinnikova G.P., and Artemenko S.E., Evaluation of Recyclability of Secondary Polymers, *Plast. Massy*, **8**, 45-46, 2002.
- Pluta M., Bartzak Z., Pawlak A., Galeski A., and Pracella M., Phase Structure and Viscoelastic Properties of Compatibilized Blends of PET and HDPE Recyclates, *J. Appl. Polym. Sci.*, **82**, 1423-1436, 2001.
- Shields R.J., Bhattacharyya D., and Fakirov S., Oxygen Permeability Analysis of Microfibril Reinforced Composites from PE/PET Blends, *Composites: Part A*, **39**, 940-949, 2008.
- Yousfi M., Soulestin J., Vergnes B., Lacrampe M.F., and Krawczak P., Compatibilization of Immiscible Polymer Blends by Organoclay: Effect of Nanofiller or Organo-Modifier?, *Macromol. Mater. Eng.*, **298**, 757-770, 2013.
- Yousefi M., Soulestin J., Vergnes B., Lacrampe M.F., and Krawczak P., Morphology and Mechanical Properties of PET/PE Blends Compatibilized by Nanoclays: Effect of Thermal Stability of Nanofiller Organic Modifier, *J. Appl. Polym. Sci.*, **128**, 1288-1295, 2013.
- Dai K., Xu X.B., and Li Z.M., Electrically Conductive Carbon Black (CB) Filled In Situ Microfibrillar Poly(ethylene terephthalate) (PET)/Polyethylene (PE) Composite with a Selective CB Distribution, *Polymer*, **48**, 849-859, 2007.

9. Shafaii S. and Golshan Ebrahimi N., Comparison of Compatibilizer Effect on Blend Fibers Including Virgin and Recycled PET, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **20**, 133-145, 2007.
10. Ebadi H., Yousefi A.A., and Oromiehie A., Comparison of Compatibilizer Effect on Blend Fibers Including Virgin and Recycled PET, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **16**, 381-390, 2003.
11. Entezam M., Khonakdar H.A., and Yousefi A.A., Nanoclay Localization Effect on Melt Rheological Behavior and Microstructure of PP/PET Blend, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **26**, 57-72, 2013.
12. Entezam M., Khonakdar H.A., Yousefi A.A., Jafari S.H., Wagenknecht U., and Heinrich G., Dynamic and Transient Shear Start-Up Flow Experiments for Analyzing Nanoclay Localization in PP/PET Blends: Correlation with Microstructure, *J. Macromol. Mater. Eng.*, **298**, 113-126, 2013.
13. Entezam M., Khonakdar H.A., Yousefi A.A., Jafari S.H., Wagenknecht U., Heinrich G., and Kretzschmar B., Influence of Interfacial Activity and Micelle Formation on Rheological Behavior and Microstructure of Reactively Compatibilized PP/PET Blends, *J. Macromol. Mater. Eng.*, **297**, 312-328, 2012.
14. Ebrahimihan F., Ebrahimi N.G., and Mehrabzadeh M., Preparation and Properties PP/PET Blend, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **12**, 167-175, 1999.
15. Maksimov R.D., Merii Meri R., Kalnin M., and Zicans J., Mechanical Properties of Polyethylene and Poly(ethylene terphthalate) Blends, *Mech. Compos. Mater.*, **39**, 189-196, 2003.