



تهیه و بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ PET/PEN جهت تولید بطری‌های چند بار مصرف

بهناز معمار ماهر

گروه مهندسی شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران
bmm1046@yahoo.com

رضا صادقی یامچی

گروه مهندسی شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران
MRSADEGHI_R@YAHOO.COM

زکيه جدالی

پرديس الزهرا(س) تبريز، واحد تبريز، دانشگاه فرهنگيان، تبريز، ايران
jedalizakhi@yahoo.com

چکیده

در این کار پژوهشی تهیه و بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی آمیخته پلی اتیلن ترفتالات/پلی اتیلن نفتالات انجام شد. آلیاژ PET/PEN با درصدهای وزنی مختلفی نسبت به هم شامل ۰/۱۰۰، ۷۵/۲۵، ۵۰/۵۰، ۲۵/۷۵، ۱۰۰/۰ درصد وزنی با استفاده از دستگاه اکسترودر ZSK در دمای ۲۸۰ و ۳۰۰ درجه سانتی گراد و در زمان اختلاط ۱۰ و ۳۰ دقیقه تهیه شده است. رفتار فیزیکی مکانیکی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تست کشش، ضربه و SEM مورد بررسی قرار گرفت و تغییرات به وجود آمده در ساختار مولکولی و زنجیره‌های پلیمری مشاهده شد. آلیاژ این دو پلیمر ذراتی مات با فاز ناسازگار می‌باشد که سعی و کوشش‌های فراوانی جهت تولید نوع شفاف آن شده است و رسیدن به خواص مطلوب مستلزم انجام فرآیندهای سازگاری بین این دو پلیمر می‌باشد. نتایج نشان داد PEN به دلیل ساختار مشابه با PET، توانایی ایجاد پیوندهای استر-استر و تولید کوپلیمر PET/PEN را دارا می‌باشد، اما استفاده از PEN برای تقویت PET به دلیل قیمت بالای PEN در ترکیب درصدهای بالاتر از ۲۵٪ مقرون به صرفه نمی‌باشد. به همین جهت ترکیب درصد ۷۵/۲۵ هم به دلیل داشتن خواص فیزیکی و مکانیکی نسبتاً مناسب و صرفه اقتصادی، ترکیب درصد بهینه برای آلیاژ PET/PEN در این تحقیق پیشنهاد شده است.

کلید واژه: پلی اتیلن ترفتالات، پلی اتیلن نفتالات، رفتار رئولوژیکی، خواص فیزیکی، آلیاژ.

مقدمه

پلی اتیلن ترفتالات (PET) به دلیل خواص حفاظتی خوبی که دارد یک ماده خیلی متداول برای بسته بندی مواد می باشد و به طور وسیعی در ساخت بطری های نوشیدنی مورد استفاده قرار می گیرد و به دلیل شفافیتی که می توان به آن داد در مواردی از این نظر جایگزین شیشه می شود. از طرفی به منظور ارتقاء این خواص (البته به جز شفافیت) می توان درصدی تبلور ایجاد کرد اما چون پایداری حرارتی کمی دارد پلی اتیلن نفتالات (PEN) جایگزین خوبی می تواند برای آن باشد. پلی اتیلن نفتالات دمای انقال شیشه ای بالاتری نسبت به پلی اتیلن ترفتالات دارا می باشد و در مقابل اکسیژن به میزان ۵ برابر پلی اتیلن ترفتالات مقاوم تر است و بنابراین از این می توان جهت ظروف آشامیدنی گرم استفاده کرد. اما به دلیل گران بودن پلی اتیلن نفتالات این ماده به صورت کوپلیمری با پلی اتیلن ترفتالات مورد استفاده قرار می گیرد و یکی از روش های دستیابی به خواص حرارتی و حفاظتی مطلوب آلیاژ کردن این دو به نسبت ترکیب درصد وابسته به خواص مورد نیاز می باشد. آلیاژ این دو پلیمر ذراتی مات با فاز ناسازگار می باشد که سعی و کوشش های فراوانی جهت تولید نوع شفاف آن شده است و چون رسیدن به خواص مطلوب مستلزم انجام فرآیندهای سازگاری بین این دو پلیمر می باشد بنابراین لازم است تا آنجا که امکان دارد میزان سازگاری بین این دو پلیمر افزایش یابد. روش های مختلفی جهت بالا بردن سازگاری وجود دارد که یکی از این روش ها شکست زنجیر و ترکیب مجدد آن است و این نوع شکست زنجیر و ترکیب مجدد را در این آلیاژ (پلی اتیلن ترفتالات / پلی اتیلن نفتالات) استری شدن یا استرولیز (تبادل استر) می نامند. این واکنش های تبادل از برهم کنش میان پلی اتیلن ترفتالات و پلی اتیلن نفتالات ایجاد می شوند و بدین ترتیب است که قسمتی از زنجیره های پلیمری هر دو پلیمر با هم تعویض می شود و با این تعویض آلیاژ به سمت کوپلیمر شدن میل می کند که در ابتدا به صورت کوپلیمری بلوکی است که

هر چه بیش تر رخ دهند کوپلیمر بلوکی به سمت کوپلیمر تصادفی میل می کند و به آن درجه تصادفی شدن می گویند و میزان درجه تصادفی شدن را می توان به وسیله طیف سنجی مادون قرمز آشکار کرد. پس از این واکنش ها و بالا رفتن درجه تصادفی خواص فیزیکی تغییر می کند و امتزاج پذیری بالا می رود. میزان تبادل استری و درجه تصادفی شدن افزایش می یابد و با افزایش زمان اختلاط میزان تبادل استری و درجه تصادفی شدن افزایش می یابد و با افزایش دمای اختلاط نیز درجه تصادفی شدن افزایش می یابد. حال با توجه به خواص مورد نیاز واکنش تبادل را تا درجه تصادفی شدن و میزان تبادل مطلوب پیشرفت می دهیم. استوارت و همکارانش در سال ۱۹۹۳ میلادی آمیخته واکنشی از پلی اتیلن ترفتالات و پلی اتیلن نفتالات را تهیه و اثر زمان آمیخته سازی، دما، ترکیب درصد اجزاء و کاتالیست را بر روی تبادل استری بوسیله H-NMR مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داده است که زمان و دمای اختلاط عوامل اصلی در کنترل میزان واکنش تبادل استری می باشد [۱]. لی و همکارانش در سال ۱۹۹۶ خواص امتزاج پذیری آمیخته های پلی اتیلن-ترفتالات/پلی اتیلن نفتالات تحت تأثیر واکنش های تبادل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج گزارش شده نشان داد آمیخته فیزیکی بدست آمده امتزاج ناپذیر بوده و هنگامی که RD به ۰/۵ می رسد، تبلور اتفاق نمی افتد و یک Tg بین Tg های هموپلیمرهای اولیه دیده می شود [۲]. سفا و بول در ۱۹۹۹ استفاده بطری های چند بار مصرف بر پایه پلی اتیلن ترفتالات و پلی اتیلن نفتالات را مورد مطالعه قرار داد [۳]. کیوتانی و سعید در ۱۹۹۹، خواص ساختاری، رئولوژیکی و مکانیکی آمیخته های سه جزئی از پلی اتیلن ترفتالات، پلی اتیلن نفتالات و پلیمر بلور مایع را مورد بررسی قرار داد. پلیمر بلور مایع در این تحقیق پاراهیدروکسی بنزوئیک اسید و ۶و۲ هیدروکسی نفتوئیک اسید می باشد [۴].

1- Poly ethylene terephthalate (PET)

2- Poly ethylene naphthalenate (PEN)

مواد و روش‌ها

مواد مورد نیاز جهت تهیه نمونه‌ها عبارتند از:

- پلی‌اتیلن ترفتالات

پلی‌اتیلن ترفتالات به روش پلیمریزاسیون تراکمی ذوبی از ترفتالیک‌اسید یا دی‌متیل ترفتالات و اتیلن گلیکول تهیه می‌شود. این پلیمر برای اولین بار در دهه ۱۹۵۰ بطور مجزا در انگلستان و ایالات متحده به‌طور صنعتی جهت تولید الیاف مصنوعی مورد استفاده در صنایع نساجی تولید شد و پس از آن از اواخر ۱۹۷۰ با اصلاحات صورت گرفته بر روی ساختار این پلیمر برای استفاده در صنایع بسته‌بندی به عنوان بطری، فیلم، ظروف یکبار مصرف، صنایع الکترونیک جهت تولید فیلم‌های ذخیره‌سازی اطلاعات و... مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱: گرانول پلی‌اتیلن ترفتالات گرید BG781

PET پلیمر پلی‌اتیلن ترفتالات معمولاً به صورت چیپس یا گرانول، جهت عرضه به بازار تولید می‌شود. این پلیمر در حالت آمورف شفاف و در حالت بلوری تقریباً مات می‌باشد و با توجه به خصوصیات بسیار ویژه محصولات تولید شده از آن، رشد ظرفیت تولید شده در سطح جهان قابل ملاحظه می‌باشد. پلی‌اتیلن ترفتالات گرید ۷۸۱ بطری پتروشیمی تندگویان می‌باشد. کاربردهای گرید ۷۸۱ بسته بندی انواع آب‌های بدون گاز، در بطری‌های کوچک، بسته بندی مواد غذایی جامد و روغن‌های خوراکی غیر-معطر، بسته‌بندی کالاهای لوکس و فانتزی می‌باشد. از گرانول پلی‌اتیلن ترفتالات نوع فیلم جهت تولید فیلم‌های آرایش‌یافته دو محوری مورد استفاده در صنایع الکترونیک

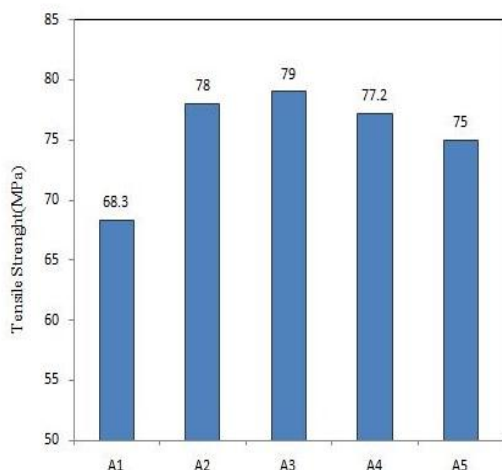
به منظور ذخیره‌سازی مغناطیسی داده‌ها و اطلاعات نظیر نوار، ویدئو، کاست‌های صوتی و... استفاده می‌شود.

- پلی‌اتیلن ترفتالات (۲ و ۶- دی‌متیل ترفتالات) PEN 71001 با وزن مولکولی کم‌تر از ۲۰۰۰۰ و گرانرایی ویژه کم‌تر از ۱/۳ از شرکت اس‌آ‌اس ۳ (صنایع پلی‌استر ترکیه) تهیه شده است. این پلیمر به طریق مشابه با پلی‌اتیلن ترفتالات سنتز می‌شود تنها اختلاف در دمای مرحله نهایی سپارش است که در پلی‌اتیلن ترفتالات ۱۰ تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد بالاتر است و این به دلیل دارا بودن نقطه ذوب بالاتر از پلی‌اتیلن ترفتالات است.

- آماده سازی نمونه‌ها

یکی از روش‌های دستیابی به ماده‌ای که نسبت به پلی‌اتیلن ترفتالات ارزان‌تر باشد ولی خواص حفاظتی و حرارتی بالا داشته باشد، آلیاژ کردن پلی‌اتیلن ترفتالات و پلی‌اتیلن-ترفتالات می‌باشد. به هر حال آلیاژ این دو پلیمر ذرات مات با فاز ناسازگار را منجر می‌شود. سعی و کوشش در تولید فیلم و ظروف شفاف از آلیاژ پلی‌اتیلن ترفتالات و پلی‌اتیلن ترفتالات در طول ده سال منجر به پیشرفت‌هایی شده است اما هنوز فرآیند تجاری که برای تولید این ذرات به طور گسترده استفاده شود وجود ندارد. ابتدا مواد اولیه پلی‌اتیلن ترفتالات و پلی‌اتیلن ترفتالات تهیه شده به مدت ۲۴ ساعت در داخل دستگاه آون در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت تا کاملاً خشک شوند و اثرات ناشی از رطوبت باعث نتایج اشتباهی نشود. پس از خشک شدن کامل، جهت به دست آوردن درصدهای مورد نیاز، مواد با استفاده از ترازوی دیجیتال به نسبت مورد نیاز توزین و به صورت یکنواخت با هم مخلوط و سپس به کیف تغذیه در چند مرحله وارد شدند. نمونه‌ها در درصدهای مختلف وزنی نسبت به هم (۱۰۰/۰، ۲۵/۷۵، ۵۰/۵۰، ۷۵/۲۵، ۰/۱۰۰) با استفاده از اکسترودر آزمایشگاهی در ۲۸۰

مشاهده می‌شود که مقاومت کششی پلی‌اتیلن ترفتالات خالص $68/3 \text{ Mpa}$ و مقاومت کششی پلی‌اتیلن نفتالات خالص 75 Mpa می‌باشد که دلیل این اختلاف ساختار مقاوم زنجیر پلیمری PEN نسبت به PET می‌باشد. به هنگام آلیاژ کردن PET و PEN از ترکیب درصدهای مختلف آن‌ها استفاده شده است. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش ۲۵ درصدی PEN به PET، مقاومت کششی به صورت چشم‌گیری افزایش پیدا می‌کند و به عدد ۷۸ مگاپاسگال می‌رسد که افزایش ۱۵٪ را نمایان می‌کند. با افزایش درصد پلی‌اتیلن نفتالات به ۵۰٪ وزنی، مقاومت کششی به نقطه اوج خود می‌رسد و به عدد ۷۹ مگاپاسگال میل می‌کند. دلیل این افزایش در این ترکیب درصد را می‌توان در تعداد واکنش‌های استر-استر بین واحد پلیمری پلی‌اتیلن ترفتالات و پلی‌اتیلن نفتالات جستجو کرد.



شکل ۲: تغییرات مقاومت کششی آلیاژهای PET/PEN در ترکیب درصدهای مختلف

واحدهای $\text{CH}_2\text{-CH}_2$ یک زنجیر پلیمری منعطف می‌باشد که به هنگام کشش ازدیاد طول از خود نشان داده و باعث افزایش مقاومت کششی آلیاژ می‌شود. با افزایش بیش‌تر درصد وزنی پلی‌اتیلن نفتالات به پلی‌اتیلن ترفتالات خالص و رسیدن ترکیب درصد به ۷۵٪ وزنی، گروه‌های سخت فنلی حاوی دو حلقه بنزن چسبیده به هم که مربوط به ساختار مولکولی پلی‌اتیلن نفتالات می‌باشد افزایش پیدا

درجه‌سانتی‌گراد تا ۳۰۰ درجه‌سانتی‌گراد طبق جدول ۱ تهیه شدند.

مخلوط به دست آمده به صورت یک رشته مذاب از دای اکسترودر خارج و به دلیل اینکه شکل جامد به خود بگیرد، از داخل حوضچه آب که نقش سیستم خنک‌کنندگی را ایفا می‌کند، عبور می‌کند. سپس رشته‌های جامد به دست آمده از داخل دستگاه آسیاب عبور داده شد تا شکل گرانول را داشته باشند.

جدول ۱- شرایط آماده‌سازی آلیاژ برای PET/PEN

کد نمونه‌ها	درصد ترکیب آلیاژ	دمای اختلاط	زمان اختلاط
A1	۱۰۰/۰	۳۰۰	۳۰
A2	۷۵/۲۵	۳۰۰	۳۰
A3	۵۰/۵۰	۳۰۰	۳۰
A4	۲۵/۷۵	۳۰۰	۳۰
A5	۰/۱۰۰	۳۰۰	۳۰
A6	۷۵/۲۵	۳۰۰	۱۰
A7	۷۵/۲۵	۳۰۰	۲۰
A8	۷۵/۲۵	۳۰۰	۳۰
A9	۷۵/۲۵	۲۸۰	۳۰

گرانول به دست آمده برای هر ترکیب درصد را جداگانه در داخل آون به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌دهیم تا رطوبت به طور کامل از بین رفته و کاملاً خشک شود و اثرات ناشی از رطوبت باعث ایجاد حباب در زمان قالب‌گیری نگردد. پلی‌اتیلن ترفتالات در زمان خروج از دای اکسترودر به صورت شرگی خارج می‌شود که این یکی از مشکلات مهم در زمان فرآیند پلی-اتیلن ترفتالات می‌باشد که باید با یک سیستم خنک‌کننده تبدیل به حالت جامد شود که بدون وان آب خنک این امکان سخت می‌شود.

یافته‌ها و بحث

از بررسی آزمون کشش و داده‌های مربوط به مقاومت کششی آلیاژهای پلی‌اتیلن ترفتالات و پلی‌اتیلن نفتالات

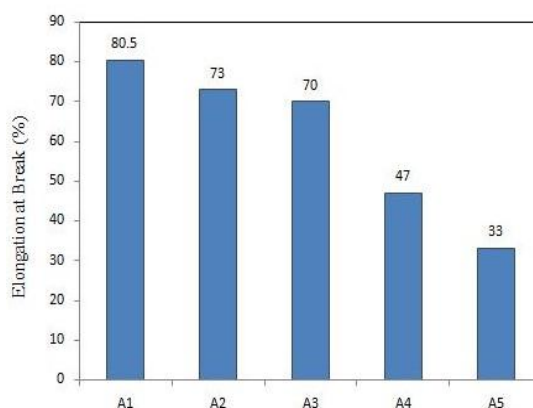
شکست از خود نشان داده است و در حدود ۸۰/۵٪ افزایش طول پیدا می‌کند. توجه دیگر برای رفتار A₁ نمودار تنش- کرنش مربوط به این آلیاژ است. بنابر تعریف مدول الاستیک که همان نسبت تنش بر کرنش می‌باشد، با افزایش این نسبت ازدیاد طول یا همان کرنش کاهش پیدا می‌کند و این رفتار با توجه به ساختار مولکولی و زنجیره- های پلیمری پلی اتیلن ترفتالات و پلی اتیلن نفتالات قابل توجه است.

در بررسی آلیاژهای A₂، A₃، A₄ و A₅ مشاهده می‌شود که ازدیاد طول در نقطه شکست مرتباً با افزایش درصد وزنی پلی اتیلن نفتالات کاهش یافته است. آلیاژ A₅ در نمودار شکل ۳ به دلیل ساختار سخت پلی اتیلن نفتالات، بالاترین مدول را از خود نشان داده بود که به هنگام ازدیاد طول پایین‌ترین کرنش را از خود نشان داده است. اثر افزایش پلی اتیلن نفتالات به پلی اتیلن ترفتالات را تنها می‌توان در مقاومت کششی مشاهده نمود که یکی از خواص مهم در ساخت بطری محسوب می‌شود.

برای بررسی مورفولوژی آلیاژ پلی اتیلن ترفتالات و پلی اتیلن نفتالات از ترکیب درصد ۷۵/۲۵ آلیاژ PET/PEN استفاده شده است. نمونه‌های حاوی این ترکیب درصد در آزمون ضربه مورد تنش قرار گرفته و پس از اعمال سطح شکست توسط میکروسکوپ الکترونی پویشی مورد بررسی قرار گرفته است. دلیل انتخاب این ترکیب درصد بهینه بودن آن از بعد اقتصادی و قیمت تمام شده آلیاژ و همچنین تاثیر تغییر زمان اختلاط بر روی امتزاج پذیری پلی اتیلن ترفتالات و پلی اتیلن نفتالات می‌باشد. با افزایش زمان اختلاط توزیع ذرات پلی اتیلن نفتالات در ماتریس پلی اتیلن ترفتالات بهبود یافته و سطح شکست نمونه‌هایی که زمان اختلاط بالاتری داشته‌اند، زبرتر شده است. شکل ۴- الف پخش ذرات پلی اتیلن نفتالات در ماتریس پلی اتیلن ترفتالات در زمان اختلاط ۱۰ دقیقه را نشان می‌دهد.

کرده و واکنش‌های استریفیکاسیون نسبت به ترکیب درصد ۵۰: ۵۰ کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه گروه‌های CH₂-CH₂ واقع در زنجیره‌های پلیمری که حالت انعطاف- پذیری داشته‌اند کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه مقاومت کششی کاهش می‌یابد. نمودار آلیاژ A₅ که در شکل ۲ نشان داده شده است، مربوط به مقاومت کششی پلی اتیلن- نفتالات خالص است. مقاومت کششی به دلیل ساختار مستحکم واحد پلیمری نسبت به پلی اتیلن ترفتالات خالص در این آلیاژ افزایش پیدا می‌کند اما مقدار مقاومت کششی پلی اتیلن نفتالات خالص به دلیل پایین بودن گروه‌های منعطف CH₂-CH₂ در ساختار آن پایین‌تر از نمونه‌های A₂، A₃ و A₄ می‌باشد.

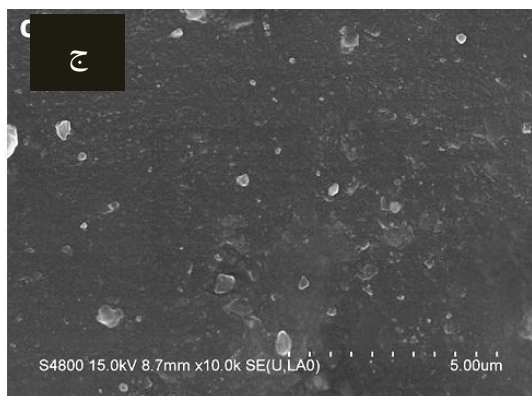
از بررسی نتایج به دست آمده از آزمون کشش و همچنین مطالعه داده‌های مربوط به ازدیاد طول در نقطه شکست برای هر یک از آلیاژها مشخص شد که آلیاژ به دست آمده از پلی اتیلن ترفتالات خالص (شکل ۳)، ازدیاد طول بالاتری را نسبت به سایر آلیاژهایی که در آن‌ها درصد وزنی از جزء پلی اتیلن نفتالات وجود دارد را نشان می‌دهد. دلیل این امر را می‌توان به افزایش مدول آلیاژها با افزایش مقدار پلی اتیلن نفتالات نسبت داد.



شکل ۳: نمودار ازدیاد طول مربوط به نمونه‌های آلیاژ PET/PEN

مدول پلی اتیلن ترفتالات خالص کم‌تر از سایر نمونه‌ها می‌باشد. اما به دلیل ساختار منعطف و پایین بودن مدول الاستیک به هنگام آزمون کشش، آلیاژ مربوط به پلی اتیلن- ترفتالات خالص ازدیاد طول قابل ملاحظه‌ای را در نقطه

۲۵ درصد وزنی از ذرات پلی اتیلن نفتالات در ۷۵ درصدی از ماتریس پلی تیلن ترفتالات در زمان اختلاط ۳۰ دقیقه و دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد را نشان می‌دهد.

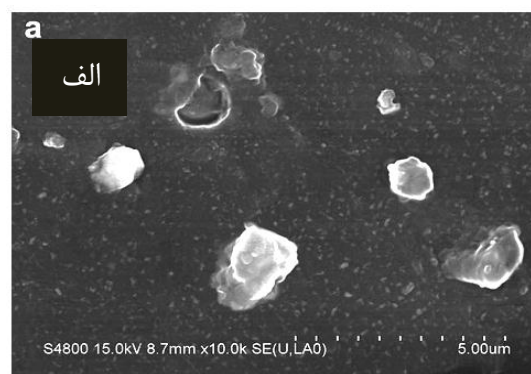


شکل ۴-ج: مورفولوژی سطح شکست آلیاژ ۷۵/۲۵ PET/PEN در زمان اختلاط ۳۰ دقیقه در دمای ۳۰۰ درجه

در این میکروگراف توزیع کاملاً یکنواخت و همگن ذرات پلی اتیلن نفتالات در ماتریس پلی اتیلن ترفتالات مشهود است. هم‌چنین سطح زیر مشاهده شده گویای پیوندهای درون مولکولی و بین مولکولی از جمله پیوندهای استری شدن است. در این حالت نیروی سطح مشترک بین دو جزء افزایش یافته است. از این رو زمان اختلاط ۳۰ دقیقه و دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد برای تهیه نمونه‌های آلیاژ بهینه شناخته شده است و تمامی نمونه‌ها در این دما و زمان به دست آمده است.

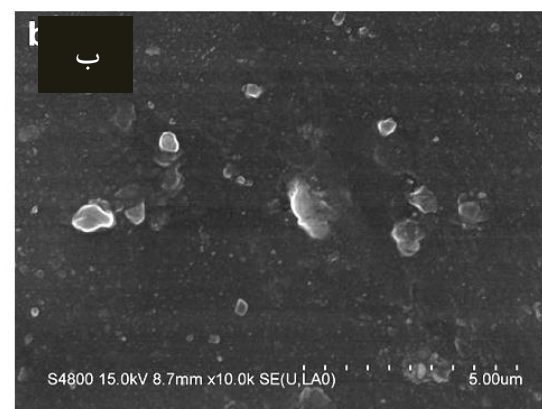
نتیجه‌گیری

از تحلیل و بررسی نتایج به دست آمده از آزمون‌های خواص فیزیکی و مکانیکی می‌توان مشاهده کرد که با افزایش PEN به PET در اکثر موارد خواص فیزیکی و مکانیکی بهبود یافته است. این افزایش خواص در بعضی از ترکیب درصدها از جمله ۵۰/۵۰ و ۷۵/۲۵ آلیاژ PET/PEN نمایان‌تر است که در این ترکیب درصدها خواص فیزیکی و مکانیکی نسبتاً بهتری در مقایسه با نمونه خالص پلیمری دارا می‌باشد. PET خالص به تنهایی در بعضی از واکنش‌های شکل‌دهی پلیمرها از جمله بطری‌های مایعات خواص



شکل ۴-الف: مورفولوژی سطح شکست آلیاژ ۷۵/۲۵ PET/PEN در زمان اختلاط ۱۰ دقیقه در دمای ۳۰۰ درجه

در شکل الف ذرات درشت پلی اتیلن نفتالات که زمان کافی برای پخش و ایجاد پیوند بین مولکولی در داخل ماتریس پلی اتیلن ترفتالات را نداشته‌اند، کاملاً مشهود است. هم‌چنین سطح شکست نمونه مربوط صاف و صیقلی می‌باشد که نشان دهنده پیوندهای ضعیف واندروالسی میان ذرات پلی اتیلن ترفتالات و پلی اتیلن نفتالات می‌باشد.



شکل ۴-ب: مورفولوژی سطح شکست آلیاژ ۷۵/۲۵ PET/PEN در زمان اختلاط ۲۰ دقیقه در دمای ۳۰۰ درجه

در شکل ۴-ب زمان اختلاط از ۱۰ دقیقه به ۲۰ دقیقه افزایش یافته است و ذرات کلوخه‌ای مشاهده شده در شکل الف نسبتاً کوچک‌تر و همگن‌تر شده و به سمت امتزاج‌پذیری و توزیع یکنواخت‌تر ذرات و در نتیجه به سمت افزایش پیوندهای بین مولکولی علاوه بر پیوندهای واندروالسی سوق پیدا کرده است. شکل ۴-ج توزیع ذرات

[6] Tharmapuram, S.R. and Jabarin, S.A., 2003, Processing characteristics of pet/pen blends, part 2: Rheology and degradation kinetics. *Advances in Polymer Technology*, 22(2): 147-154.

[7] Wu, W., Wagner, M.H., Qian, Q., Pu W., Kheirandish, S., 2006, Morphology and barrier mechanism of biaxially oriented poly(ethylene terephthalate)/poly(ethylene 2,6-naphthalate) blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 101(3): 1309-1316.

[8] Golriz, M., Khonakdar, H.A., Jafari, S.H., Oromiehie A., Abedini, H., 2008, An improved non-isothermal kinetic model for prediction of extent of transesterification reaction and degree of randomness in pet/pen blends. *Macromolecular Theory and Simulations*, 17(4-5): 241-251.

[9] Khonakdar, H.A., Golriz, M., Jafari S.-H., Wagenknecht, U., 2009, Correlation of sequence block lengths and degree of randomness with melt rheological properties in pet/pen blends, *Macromolecular Materials and Engineering*, 294(4): 272-280.

مکانیکی قابل قبولی را از خود نشان می‌دهد اما در مواردی هم چون بطری‌های چند بار مصرف که نیاز به مقاومت فیزیکی و مکانیکی بالاتری است، خواص PET خالص جوابگوی تولید این قطعات نخواهد بود. به همین جهت استفاده از PEN به عنوان تقویت‌کننده PET برای افزایش مدول، مقاومت کششی و ضربه‌پذیری، نفوذپذیری در مقابل اکسیژن پیشنهاد مناسبی می‌باشد. در بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی می‌توان بیان کرد با افزایش پلی‌اتیلن- نفتالات که خواص فیزیکی و مکانیکی بالاتری نسبت به پلی‌اتیلن ترفتالات دارد، خواص مکانیکی از جمله مقاومت کششی و خمشی، ضربه، ازدیاد طول در نقطه شکست، مدول کششی بهبود می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به ساختار مولکولی پلی‌اتیلن نفتالات که در زنجیره مولکولی خود دارای یک حلقه بنزن بیش‌تری نسبت به پلی‌اتیلن ترفتالات دارا می‌باشد، مرتبط دانست.

PEN به دلیل ساختار مشابه با PET، توانایی ایجاد پیوندهای استر- استر و تولید کوپلیمر PET/PEN را دارا می‌باشد. اما استفاده از PEN برای تقویت PET به دلیل قیمت بالای PEN در ترکیب درصدهای بالاتر از ۲۵٪ مقرون به صرفه نمی‌باشد. به همین جهت ترکیب درصد ۷۵/۲۵ هم به دلیل داشتن خواص فیزیکی و مکانیکی نسبتاً مناسب و صرفه اقتصادی، ترکیب درصد بهینه برای آلیاژ PET/PEN در این تحقیق پیشنهاد شده است.

منابع

- [1] Stewart M.E., Cox A.J., Naylor D.M., 1993, Reactive processing of poly(ethylene 2,6-naphthalen dicarboxylate) /poly (ethylene terephthalate) blends. *Polymer*, 34:4060-7.
- [2] Sang Cheol, L., Kwan Han, Y., Hyun Park, II, Ho Cheol K. and Tae Won, S., 1997, Phase behaviour and transesterification in poly(ethylene 2,6-naphthalate) and poly(ethylene terephthalate) blends. *Polymer*, 38(19): 4831-4835.
- [3] Safa, H.L. and F. Bourelle., 1999, Studies on polyester packaging. Effects of basic washing on multi-use pet and pen bottles. *Packaging Technology and Science*, 12(2): 67-74.
- [4] Kyotani, M. and Saeed A., 1999, Structural, rheological, and mechanical properties of ternary blends of pen, pet, and liquid crystalline polymer. *Polymer Engineering & Science*, 39(8): 1480-1488.
- [5] Tharmapuram, S.R. and Jabarin S.A., 2003, Processing characteristics of pet/pen blends, part 1: Extrusion and transesterification reaction kinetics. *Advances in Polymer Technology*, 22(2): 137-146.