

بررسی خواص مکانیکی و رئولوژیکی چندسازه سه جزئی پلی پروپیلن - پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی - پودر چوب

الهام استادی^{۱*}، جلیل مرشدیان^۲ و یوسف جهانی^۳

*۱- نویسنده مسئول، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد صنایع پلیمر از پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی، تهران، پست الکترونیک: Ostadi.elham@gmail.com

۲- استاد، عضو هیئت علمی پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی، تهران

۳- دانشیار، عضو هیئت علمی پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی، تهران

تاریخ دریافت: بهمن ۱۳۹۲ تاریخ پذیرش: مهر ۱۳۹۳

چکیده

در این پژوهش اثر استفاده از پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی بر خواص مکانیکی و رئولوژیکی چندسازه پلی پروپیلن- پودر چوب بررسی شده است. چندسازه‌های پلی پروپیلن- پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی- پودر چوب، طی فرایندی دومارحله‌ای تهیه و اثر مقدار پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی در محدوده ۳۳-۱۰ درصد وزنی بر روی خواص چندسازه نهایی در ۵ تیمار بررسی شد. خواص مکانیکی با استفاده از آزمون کشش و مقاومت شکست به وسیله آزمون ضربه بررسی گردید. رفتار رئولوژیکی چندسازه‌ها با استفاده از دستگاه رئومتر در حالت نوسانی بررسی و خواص رئولوژیکی دینامیک مانند ویسکوزیته دینامیک، مدول ذخیره‌ای، مدول اتلافی و فاکتور اتلاف در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. در نتایج، افزایش سفتی چندسازه‌ها با اضافه کردن پلی اتیلن ترفتالات مشاهده گردید. همچنین در مقادیر کم پلی اتیلن ترفتالات، کاهش استحکام کششی نسبت به چندسازه پلی پروپیلن- چوب مشاهده گردید و با افزایش مقدار پلی اتیلن ترفتالات، استحکام کششی بیشتر شد. نمونه‌های حاوی پلی اتیلن ترفتالات، ویسکوزیته کمپلکس و مدول ذخیره‌ای بالاتری نسبت به چندسازه‌های بدون پلی اتیلن ترفتالات نشان دادند. همچنین مشاهده شد که فاکتور اتلاف در این چندسازه‌ها نسبت به چندسازه پلی پروپیلن- چوب پایین تر بود.

واژه‌های کلیدی: پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی، پلی پروپیلن، پودر چوب، خواص مکانیکی، رفتار رئولوژیکی.

مقدمه

در سال‌های اخیر، تمایل به مصرف چندسازه‌های چوب-پلاستیک به طور قابل توجهی افزایش یافته است و مقالات زیادی در این زمینه منتشر شده است. از جمله خواص مطلوب این چندسازه‌ها می‌توان به سختی و استحکام بالا، سبکی و قیمت پایین اشاره کرد. این چندسازه‌ها کاربرد گسترده‌ای در بخش‌های مختلف از جمله صنایع خودرو، ساختمان‌سازی و تجهیزات خانگی مانند مبلمان دارند (Hristov et al., 2004).

تحقیقات زیادی بر روی عوامل مؤثر بر خواص چوب-پلاستیک‌ها و به‌ویژه چندسازه‌های چوب - پلی‌الفین انجام شده است. از جمله این عوامل می‌توان فرمول‌بندی آمیزه، نوع و ساختار چوب، نوع و مقدار سازگارکننده، شرایط اختلاط و تکنیک‌های فرایند را نام برد (Stark, 2003). در سال‌های اخیر نیز گام‌های جدی‌تری برای حرکت به سوی راهبردهای جدید در مقوله این چندسازه‌ها برداشته شده که شامل به کار بردن پلیمرهای مهندسی به جای پلی‌الفین‌ها، استفاده از الیاف طبیعی دیگر غیر از

چندسازه مرجع پلی پروپیلن - پوسته برنج - مالتیک انیدرید پلی پروپیلن نداشت.

هدف از انجام این پروژه، ساخت و بررسی رفتار رئولوژیکی یک چندسازه سه جزئی جدید با اجزاء پلی پروپیلن، پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی و پودر چوب می باشد. یکی از دستاوردهای مهم این کار بررسی اثر استفاده از پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی به صورت یک فاز پراکنده مجزا غیر از چوب در ماتریس پلی الفینی است. ذکر این نکته ضروریست که نوآوری این تحقیق، اضافه شدن پودر چوب به آلیاژی ناهمگن از ماتریس پلی الفینی پلی پروپیلن و فاز پراکنده پلی اتیلن ترفتالات است که در پژوهش های دیگر که ماتریس اغلب یک پلیمر خالص می باشد، مشاهده نشده است.

مواد و روش ها

در این پژوهش، پلی پروپیلن به عنوان ماده زمینه چندسازه، یک هموپلیمر گرید^۱ تزریق با نام تجارتي J۱۵۰۰، دانسیته ۰/۹ گرم بر سانتیمتر مکعب و شاخص جریان مذاب ۱۱/۵ گرم بر ۱۰ دقیقه بوده است که از شرکت هیوندای کازمو کره جنوبی تهیه شد. پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی آسیابی، تکه های خرد شده بطری های تولیدی شرکت باروپلاستیک بود که مواد اولیه مورد استفاده در شرکت مذکور برای تولید بطری، پلی اتیلن ترفتالات گرید بطری زیمر پتروشیمی تندگویان می باشد. قبل از اختلاط، برای داشتن ذرات پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی با ابعاد یکنواخت تر، مواد آسیابی پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی مجدداً در خردکن خرد و از الک ۸ مش عبور داده شد. مالتیک انیدرید پلی پروپیلن MAPP، با نام تجارتي فیوزباند MD۳۵۳ با شاخص جریان مذاب ۴۵۰ گرم بر ۱۰ دقیقه در نقش سازگارکننده و محصول شرکت دوپونت آمریکاست. به علاوه اینکه ایرگانوکس ۱۰۱۰ محصول شرکت سبیا به عنوان پایدار کننده حرارتی به کار رفته است.

چوب و نیز تقویت کننده های معدنی مانند کربن و شیشه به همراه چوب در این چندسازه ها است (Jingchen *et al.*, 2000). با توجه به گسترش کاربرد انواع پرکننده های پلیمری در ماتریس ترموپلاستیک می توان حضور این مواد در کنار چوب و اثر آن بر خواص نهایی چندسازه را بررسی کرد. فرصت دیگری که با استفاده از پرکننده های پلیمری قابل بهره جستن است، امکان استفاده مجدد از مواد مصرف شده می باشد. از جمله این مواد می توان پلی اتیلن ترفتالات را نام برد. پلی اتیلن ترفتالات یک رزین ترموپلاستیک از خانواده پلی استرهاست که با توجه به شرایط فرایند دارای ساختاری آمورف یا نیمه بلورین است. این پلیمر کاربرد گسترده ای در صنایع الیاف و بسته بندی دارد. بخش اعظم تولید این پلیمر به مصرف صنعت الیاف (۶۰٪) و حدود ۳۰ درصد به تولید بطری مواد خوراکی و غیرخوراکی می رسد. متأسفانه امروزه، حجم گسترده ضایعات پلی اتیلن ترفتالات، به خصوص زباله های ناشی از بطری تبدیل به یک معضل زیست محیطی شده است. به عنوان نمونه، بر اساس آمار سال ۲۰۱۱، تنها در ایالات متحده آمریکا میزان ضایعات بطری از جنس پلی اتیلن ترفتالات بالغ بر ۵۴۷۸ میلیون پوند بوده که از این میزان، فقط ۲۹٪ مورد بازیافت قرار گرفته است. بنابراین، بازیافت و کاهش میزان ضایعات آن از نظر حفظ محیط زیست و منابع، از اهمیت فوق العاده ای برخوردار می باشد. PET بازیافتی در صنایع مختلفی مانند تولید فیلم، ورق و مصارف غیرخوراکی مانند بطری، شامپو و لوسیون مورد استفاده قرار می گیرد. با وجود اینکه اخیراً موارد استفاده از مواد ضایعاتی به جای پلیمر نو در چندسازه های چوب پلاستیک گزارش شده، اما در زمینه استفاده از پلی اتیلن ترفتالات در کامپوزیت های حاوی الیاف طبیعی، تحقیقات گسترده ای انجام نشده است. از جمله موارد مشاهده شده می توان تحقیق Jafarzadeh و همکارانش در سال ۲۰۰۶ در مورد اثر پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی بر خواص چندسازه پلی پروپیلن - پوسته برنج را نام برد. وی پلی پروپیلن، پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی و پوسته برنج را به همراه سازگارکننده مالتیک انیدرید پلی پروپیلن در دمای ذوب پلی پروپیلن فرایند کرد و چندسازه ای را تهیه نمود که به دلیل توزیع نامناسب پلی اتیلن ترفتالات، خواص مطلوبی در مقایسه با

۱- گرید مفهومی برای رجوع به پلیمرهایی از یک خانواده شیمیایی است که تفاوت آنها در پارامترهایی مانند وزن مولکولی، توزیع وزن مولکولی یا سایر پارامترهای ساختاری و نیز روش فرایند یا قالب گیری است. به عنوان مثال، گرید فیلم، گرید تزریق، گرید لوله و ...

که فرمول بندی آنها در جدول ۱ آمده است، بر اساس نسبت وزنی مورد نظر توزین و به صورت خشک کاملاً مخلوط شدند. سپس مواد افزودنی شامل سازگارکننده و پایدارکننده حرارتی، بر اساس معیار "قسمت در ۱۰۰ قسمت رزین" یا Phr^1 فاز پیوسته (پلی پروپیلن) اضافه گردید. اضافه شدن پلی اتیلن ترفتالات بر اساس درصد وزنی پلی پروپیلن انجام شد.

فرایند مخلوطها در اکسترودر دو پیچه در هم رونده همسوگرد *Werner Pfliderer* مدل *ZSK ۲۵* انجام شد و سرعت چرخش پیچ ۲۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. شرایط دمایی فرایند در جدول ۲ نشان داده شده است. دستگاه اکسترودر مجهز به سیستم مکش بود و بدین وسیله امکان خارج کردن رطوبت اضافی موجود در PET فراهم گردید. رشته های خروجی به وسیله خردکن *Weiser* مدل *WG-LS ۲۰۰/۲۰۰* به گرانول تبدیل شد.

تهیه چندسازه پلی پروپیلن - پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی - مالئیک انیدرید پلی پروپیلن - پودر چوب در این مرحله، گرانول های حاصل از مرحله اول، بعد از خشک شدن در دمای محیط با پودر چوب به میزان ۴۰ درصد وزنی به صورت فیزیکی مخلوط شد و فرایند مخلوطها همانند مرحله قبل، در اکسترودر دو پیچه انجام شد. دمای نواحی مختلف اکسترودر در این مرحله، بر اساس جدول ۳ و سرعت چرخش پیچ ۴۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. برای مقایسه، چندسازه پلی پروپیلن - مالئیک انیدرید پلی پروپیلن - پودر چوب نیز با ۴۰٪ وزنی چوب و Phr^1 ۴ مالئیک انیدرید پلی پروپیلن تهیه گردید. رشته های خروجی توسط دستگاه خردکن به گرانول تبدیل و گرانولها در آن با دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید.

پودر چوب مورد استفاده نیز از آسیاب خاکاره نراد حاصل شد. گونه نراد، سرده ای از درختان همیشه سبز و سوزنی برگ و از دسته مخروطیان است. همچنین با استفاده از الک آزمایشگاهی ۴۰ مش، پودر چوبی با ابعاد یکنواخت تر بدست آمد. مقدار رطوبت چوب مورد استفاده، با توجه به شرایط نگهداری بین ۵-۲ درصد متغیر بود. البته تغییر مقدار رطوبت بر نتایج اثرگذار می باشد.

آماده سازی مواد اولیه

با توجه به تفاوت دمای فرایند پلی اتیلن ترفتالات و پودر چوب، فرایند تک مرحله ای آنها در دمای ذوب پلی پروپیلن سبب شد که ذرات درشت و ذوب نشده پلی اتیلن ترفتالات به صورت ماکروسکوپی قابل مشاهده باشند. بنابراین، ابتدا آلیاژهای پلی پروپیلن - پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی - مالئیک انیدرید پلی پروپیلن در دمای فرایند پلی اتیلن ترفتالات تهیه شد و بعد در فرایندی جداگانه و در دمای فرایند چوب، پودر چوب به مخلوط های فوق اضافه و چندسازه نهایی تهیه گردید. از آنجاکه پلی اتیلن ترفتالات نسبت به رطوبت بسیار حساس است، عدم رطوبت گیری پیش از انجام فرایند و حتی رطوبت موجود در چوب، سبب تسریع هیدرولیز و افت وزن مولکولی آن در دمای بالا می شود. بنابراین، حضور رطوبت می تواند عاملی برای بیشتر شکسته شدن زنجیرهای پلی اتیلن ترفتالات باشد و به سازگاری و برهم کنش بیشتر آن با چوب و یا MAPP کمک کند. همچنین زنجیرهای با طول کوتاه تر می توانند بر خواصی مانند فرایندپذیری مؤثر باشند. به همین دلیل، فرایند خشک کردن پلی اتیلن ترفتالات و نیز پودر چوب پیش از فرایند، از مراحل ساخت حذف گردید.

تهیه آلیاژ پلی پروپیلن - پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی - مالئیک انیدرید پلی پروپیلن در مرحله اول، ابتدا مواد مورد نیاز برای تهیه آلیاژها،

۱- Phr (Parts per Hundred) یک مقیاس وزنی برای بیان میزان هر

یک از اجزا نسبت به پلیمر ماتریس می باشد.

جدول ۱- شرح اجزاء تشکیل دهنده آلیاژهای PP/W- PET/MAPP

ردیف	PP (% وزنی)	W-PET (% وزنی)	ایرگانوکس (Phr)	MAPP (Phr)
۱	۹۰	۱۰	۰/۱	۴
۲	۸۳	۱۷	۰/۱	۴
۳	۷۵	۲۵	۰/۱	۴
۴	۶۷	۳۳	۰/۱	۴

۱- پیشوند W در ابتدای PET علامت اختصاری برای پلی اتیلن ترفتالات ضایعانی (Waste) است.

۲- چندانسازهای PP/W-PET/MAPP/Wood با افزودن ۴۰٪ وزنی پودر چوب به نمونه‌های این جدول تهیه گردیده است.

۳- پایدارکننده و سازگارکننده بر اساس Phr ماتریس اضافه شده‌اند.

جدول ۲- شرایط دمایی تهیه آلیاژهای PP/W- PET/MAPP در اکسترودر

ناحیه دمایی ^۱	۱	۲	۳	۴	۵	۶
دما (درجه سانتی‌گراد)	۱۵۰	۲۳۵	۲۵۵	۲۶۵	۲۷۰	۲۷۵

جدول ۳- شرایط دمایی تهیه چندانسازهای PP/W- PET/MAPP/Wood

در اکسترودر

ناحیه دمایی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
دما (درجه سانتی‌گراد)	۱۵۰	۱۸۰	۱۸۵	۱۹۰	۲۰۰	۱۹۵

جدول ۴- شرایط دمایی تزریق نمونه‌های آزمون کشش

ناحیه دمایی	۱	۲	۳
دما (درجه سانتی‌گراد)	۱۶۵	۱۸۵	۱۹۵

میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. مقاومت ضربه نمونه‌های شکاف‌دار در حالت آیزود، بر اساس استاندارد *ASTM D256* در دستگاه از نوع پاندولی و در دمای محیط اندازه‌گیری شد. خواص رئولوژیکی مذاب نمونه‌ها، با استفاده از دستگاه رئومتر *(MCR300, Physia)* در حالت نوسانی تعیین گردید. خواص دینامیک بین دو صفحه موازی با قطر ۲۵ و فاصله ۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. مقدار کرنش در تمام محدوده فرکانس اعمالی ۰/۱ درصد، دما ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و محدوده فرکانس ۱۰۰-۰/۱ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شد.

پردازش آماری داده‌ها

برای بررسی و مقایسه خواص مکانیکی نمونه‌ها از نتایج آزمون ۵ نمونه مختلف متوسط (*average*) گرفته شد و

ساخت نمونه‌های آزمون‌ها

نمونه‌های آزمون کشش با استفاده از دستگاه تزریق، در شرایط دمایی جدول ۴ و فشار ۱۰۰ بار و نمونه‌های آزمون رئولوژی به‌وسیله دستگاه پرس در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۵ مگاپاسکال، با صفحات موازی با ابعاد $۲۵ \times ۱/۵$ میلی‌متر تهیه شد.

آزمون‌ها

آزمون کشش مطابق استاندارد *ASTM D638* به‌وسیله دستگاه تنسومتر *Instron Universal* و با سرعت ۱۰

۱- دستگاه‌های فرایند پلیمرها مانند اکسترودر یا تزریق از چند ناحیه (zone) دمایی مختلف تشکیل شده که عملیات ذوب جامد، انتقال مذاب، فشردگی و اختلاط در این نواحی انجام می‌شود.

آزمون تجزیه واریانس تک راهی (one way) در قالب طرح کاملاً تصادفی در سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده شد.

چوب را نشان می‌دهد.

نتایج

جدول ۵ خواص کششی اندازه‌گیری شده برای پلی‌پروپیلن خالص و پلی‌اتیلن ترفتالات ضایعاتی و چندسازه پلی‌پروپیلن - مالئیک انیدرید پلی‌پروپیلن - پودر

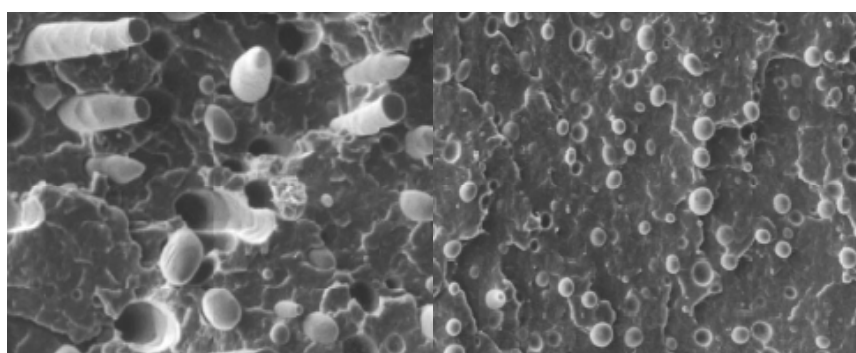
جدول ۵- خواص کششی PP، PET، W- و چندسازه PP/MAPP/Wood

ماده	استحکام کششی (مگاپاسکال)	مدول کششی (مگاپاسکال)	ازدیاد طول در شکست (%)
PP	۳۲/۸	۱۱۲۰	۲۳۷*
W-PET	۲۰	۱۵۰۰	۱
PP/MAPP/Wood	۳۹/۹	۲۲۴۸	۲/۸۹۸

* مقدار گزارش شده برای پلی‌پروپیلن ازدیاد طول در پارگی است.

جدول ۶- اثر افزودن MAPP بر استحکام کششی مخلوط‌های PP/W-PET

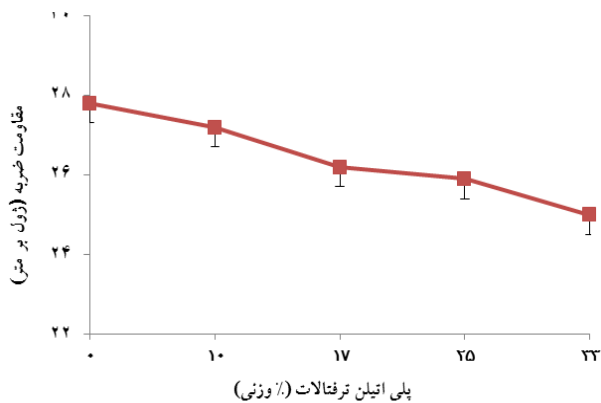
مقدار W-PET (% وزنی مخلوط)		استحکام کششی با سازگارکننده (MPa)		استحکام کششی بدون سازگارکننده (MPa)	
مقدار	انحراف معیار	مقدار	انحراف معیار	مقدار	انحراف معیار
۱۰	۰/۲	۳۳	۰/۲	۳۱/۹	۰/۸
۱۷	۰/۴	۳۳/۸	۰/۴	۳۱/۲	۰/۲
۲۵	۰/۳	۳۴/۲	۰/۳	۳۰/۴	۰/۶
۳۳	۰/۵	۳۵/۱	۰/۵	۲۹/۵	۰/۶



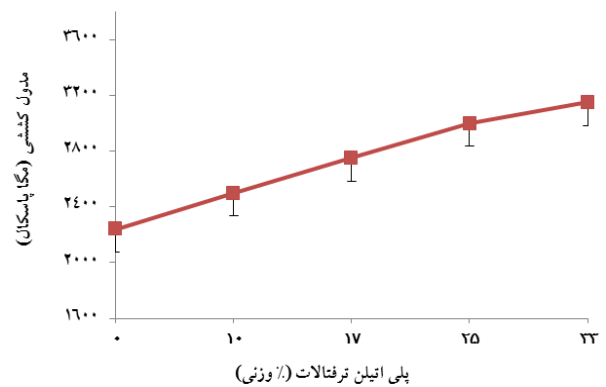
(ب)

(آ)

شکل ۱- تصاویر SEM سطح شکست نمونه PP/W-PET (آ) سازگار نشده، (ب) سازگار شده (بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰ برابر)



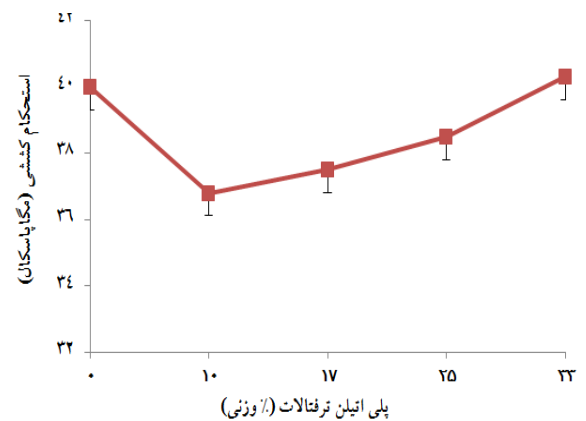
شکل ۵- تغییرات مقاومت ضربه با مقدار پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی



شکل ۲- تغییرات مدول کششی با مقدار پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی

جدول ۷- مقاومت ضربه W-PET, PP و چندسازه

PP/MAPP/Wood	
ماده	مقاومت ضربه (ژول بر متر)
PP	۱۳
W-PET	۱۷
PP/MAPP/Wood	۲۷/۶۳



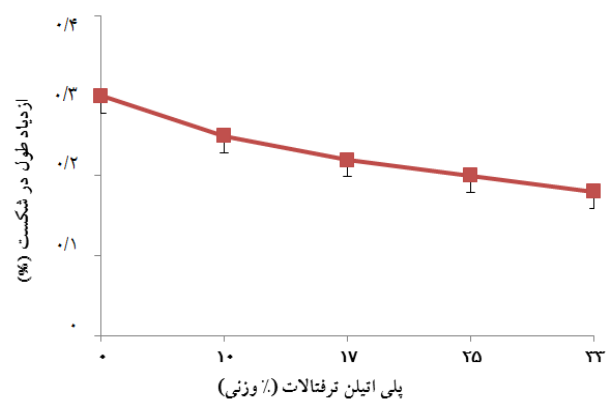
شکل ۳- تغییرات استحکام کششی با مقدار پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی

در شکل ۱، تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) مخلوط‌های پلی پروپیلن-پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی برای مشاهده نقش سازگارکننده MAPP نشان داده شده است.

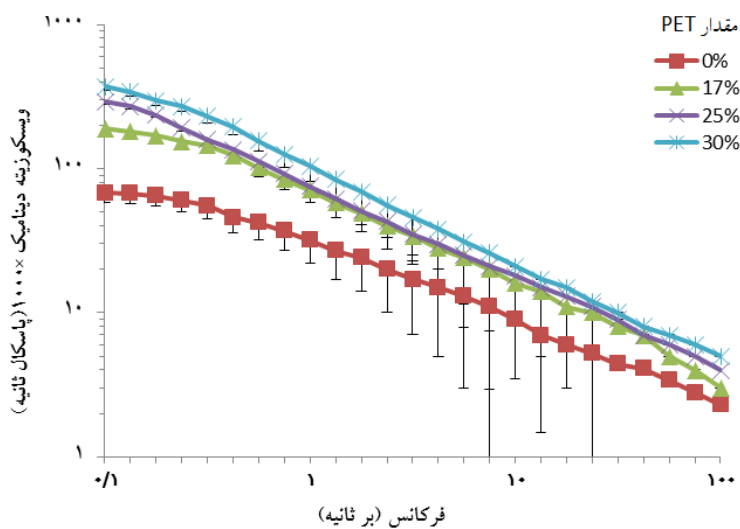
در شکل‌های ۲ تا ۴، مدول کششی، استحکام کششی و ازدیاد طول در نقطه شکست برای چندسازه‌های پر شده با پودر چوب و PET ضایعاتی به صورت تابعی از مقدار پلی اتیلن ترفتالات نشان داده شده است.

در جدول ۷، مقاومت ضربه اندازه‌گیری شده برای پلی پروپیلن خالص و پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی و چندسازه پلی پروپیلن- مالتیک انیدرید پلی پروپیلن-پودر چوب نشان داده شده است.

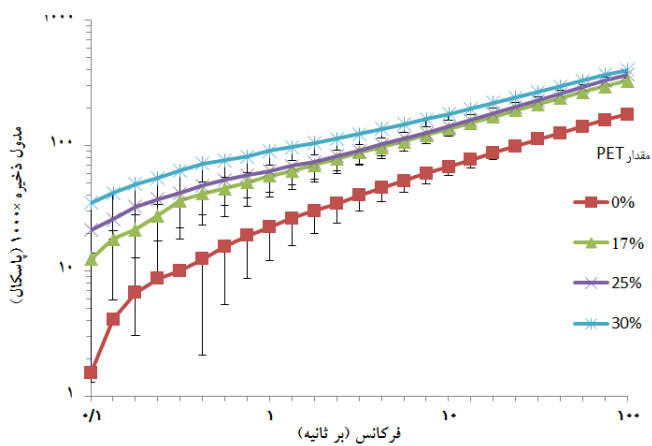
در شکل‌های ۶ تا ۹ تغییرات ویسکوزیته دینامیک، مدول ذخیره‌ای، مدول اتلافی و فاکتور اتلاف برای چندسازه‌ها در مقادیر مختلف پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی نشان داده شده است.



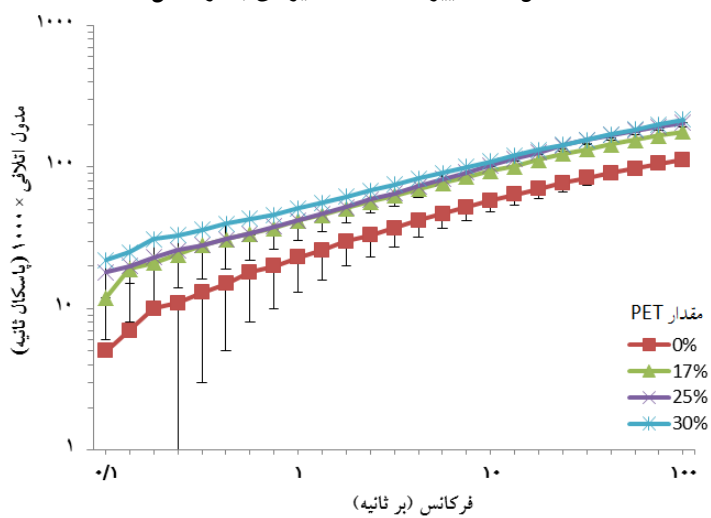
شکل ۴- تغییرات ازدیاد طول در شکست با مقدار پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی



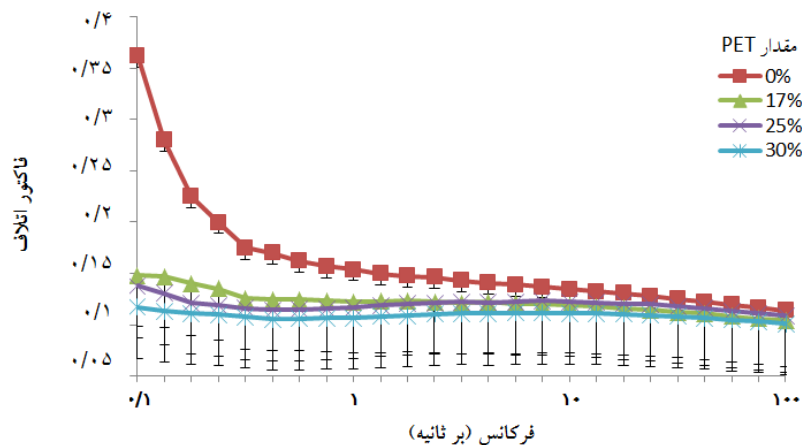
شکل ۶- تغییرات ویسکوزیته دینامیک با فرکانس



شکل ۷- تغییرات مدول ذخیره‌ای با فرکانس



شکل ۸- تغییرات مدول اتلافی با فرکانس



شکل ۹- تغییرات فاکتور اتلاف با فرکانس

بحث

خواص کششی

با توجه به جدول ۵، افزودن پودر چوب به پلی پروپیلن در حضور پلی پروپیلن عامل دار شده MAPP بهبود استحکام و مدول کششی و کاهش ازدیاد طول در پارگی پلی پروپیلن را به همراه داشته است و نتایج مشابه پیش از این توسط محققان بی شماری از جمله Hristov و همکارانش (۲۰۰۴) و نیز Bledzki و همکاران (۲۰۰۴) گزارش شده است. این نتایج را می توان به نقش سازگارکننده MAPP در نزدیک شدن انرژی سطح ماتریس غیر قطبی PP و چوب به عنوان یک ماده قطبی نسبت داد که برهم کنش بین سطحی و اتصالات در سطح دو فاز را به دنبال دارد. در حقیقت، با بهبود تنش بین سطحی، خواص مکانیکی تقویت می شود. البته بهبود خواص چندسازه پلی پروپیلن - چوب به وسیله MAPP هدف این بررسی نبوده است. آنچه در این تحقیق بدان پرداخته می شود مقایسه خواص کامپوزیت پلی پروپیلن - پودر چوب - پلی پروپیلن عامل دار شده با خواص چندسازه پلی پروپیلن - پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی - پودر چوب - پلی پروپیلن عامل دار شده می باشد.

همان گونه که در جدول ۶ مشاهده می شود، اضافه کردن سازگار کننده MAPP، مقدار استحکام کششی را در درصدهای مختلف پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی بهبود داده است. یعنی با استفاده از سازگار کننده، می توان بدون افت استحکام کششی، مقدار پلی اتیلن ترفتالات را افزایش داد که نشانه سازگار شدن دو فاز PP و PET است. افزایش

استحکام کششی در حضور سازگارکننده، نشانه بهبود چسبندگی فازهای ناسازگار است. به عبارت دیگر، عواملی مانند کاهش ابعاد نواحی فاز پراکنده پلی اتیلن ترفتالات در حضور MAPP و بهتر شدن مورفولوژی، کمتر شدن حجم حفره ها و انتقال تنش بهتر را به دنبال داشته است. چنگ و همکارانش با مشاهده بهبود استحکام کششی در مخلوط PP/PET، واکنش استری شدن گروه انیدریدی مالئیک انیدرید پلی پروپیلن با گروه های انتهایی پلی استر در فصل مشترک پلی پروپیلن و پلی اتیلن ترفتالات را عامل کاهش تنش بین سطحی و چسبندگی بیشتر فازها دانسته اند. سانگ و پانگ هم مالئیک انیدرید پلی پروپیلن را بر کاهش تنش بین سطحی در آلیاژ پلی پروپیلن - پلی اتیلن ترفتالات و افزایش استحکام کششی مؤثر دانسته اند. تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی در شکل ۱ تأیید می کند که MAPP سبب کاهش اندازه نواحی PET و یکنواختی توزیع شده است.

شکل ۲ افزایش مدول کششی با افزایش مقدار پلی اتیلن ترفتالات را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، مقاومت چندسازه ها در برابر تغییر شکل با افزایش مقدار پلی اتیلن ترفتالات ضایعاتی بیشتر شده است. این مشاهده تأیید می کند که مدول آمیزه ها به طور مستقیم تابع کسر حجمی فیلر در سیستم است. زیرا در دمای آزمون کششی، ذرات توزیع شده پلی اتیلن ترفتالات در زیر دمای انتقال شیشه ای خود می باشند و به همین دلیل به صورت پرکننده های سخت عمل می کنند و باعث افزایش مدول می شوند. البته افزایش مدول کششی

شکل ۵ مقاومت به ضربه چندسازه‌های PP/W-PET/MAPP/Wood را در مقادیر مختلف پلی‌اتیلن ترفتالات نشان می‌دهد. مقاومت ضربه چندسازه‌های حاوی پلی‌اتیلن ترفتالات نسبت به چندسازه PP/MAPP/Wood روند کاهشی دارد. در بررسی Hristov و همکاران (۲۰۰۴) نیز نتایج مشابه گزارش شده است. با افزایش مقدار پلی‌اتیلن ترفتالات، چندسازه سفت‌تر و شکننده‌تر می‌گردد و محدودیت ایجاد شده برای سگمنت‌های پلیمر مانع اتلاف انرژی توسط آنها می‌شود و در نتیجه مقاومت در برابر ضربه کاهش می‌یابد (Bledzki, et al., 2004).

خواص رئولوژیکی

همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد، در تمام مقادیر پلی‌اتیلن ترفتالات، مقدار ویسکوزیته دینامیک چندسازه PP/MAPP/Wood افزایش یافته است. علت بالاتر بودن ویسکوزیته دینامیک در چندسازه‌های حاوی پلی‌اتیلن ترفتالات، ممانعت مکانیکی ذرات سخت و ذوب نشده پلی‌اتیلن ترفتالات در مقابل جریان مذاب است (Hristov و همکاران، ۲۰۰۶). البته مشاهده رفتار غیر نیوتنی در ناحیه نیوتنی (*viscosity up-turn*) و در فرکانس‌های پایین با افزایش مقدار پلی‌اتیلن ترفتالات ارتباط مستقیم با افزایش مقدار فیلر دارد.

در شکل‌های ۷ و ۸ تغییرات مدول ذخیره‌ای و اتلافی برحسب فرکانس نشان داده شده است. این نمودارها، حکایت از افزایش مدول ذخیره‌ای و اتلافی در چندسازه‌های حاوی پلی‌اتیلن ترفتالات ضایعاتی نسبت به چندسازه PP/MAPP/Wood در تمام فرکانس‌ها دارد. همچنین در فرکانس‌های بالا، رفتار در تمام نمونه‌ها تقریباً یکسان است. اما در فرکانس‌های پایین‌تر، با افزایش درصد پلی‌اتیلن ترفتالات ضایعاتی، شیب مدول کاهش می‌یابد و ایجاد ناحیه پلاتو در قسمت نیوتنی نشانگر رفتار شبه جامد است که با افزایش مقدار PET ضایعاتی قوت پیدا می‌کند.

Hristov و همکارانش (۲۰۰۶) این رفتار را به جامد شدن زنجیرهای پلی‌پروپیلن روی سطح ذرات پلی‌اتیلن ترفتالات و تشکیل لایه‌ای با مدول بالا از ماتریس در اطراف این ذرات نسبت داده‌اند. به عبارت دیگر، تشکیل احتمالی ساختارهای متصل فیلر-ماتریس و فیلر-فیلر (Inter connective filler structure) به رفتار شبه جامد در

پلی‌پروپیلن به‌وسیله پلی‌اتیلن ترفتالات نیز توسط Bataille و همکارانش (۱۹۸۹) گزارش شده است.

همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، با اضافه شدن پودر چوب به آلیاژهای حاوی پلی‌اتیلن ترفتالات، در مقادیر کم W-PET استحکام کششی کمتر از حالتی است که پودر چوب به پلی‌پروپیلن خالص افزوده می‌شود و با افزایش مقدار پلی‌اتیلن ترفتالات ضایعاتی بر استحکام کششی چندسازه‌ها افزوده شده است.

روند افزایشی استحکام کششی با افزایش مقدار پلی‌اتیلن ترفتالات تأیید می‌کند که PET فقط نقش فیلر ندارد و انتقال تنش در عرض سطح مشترک فازها به‌خوبی انجام شده است. افت استحکام کششی در چندسازه حاوی ۱۷٪ وزنی PET نسبت به چندسازه فاقد PET نشان می‌دهد که احتمالاً در چندسازه با مقادیر پایین پلی‌اتیلن ترفتالات، چوب و پلی‌اتیلن ترفتالات به صورت دو فیلر مجزا عمل می‌کنند و توزیع ذرات یکنواخت نیست. به عبارت دیگر، در مقادیر کم PET، فازهای غیریکنواخت‌تری در سیستم وجود دارد و احتمال برهم‌کنش‌های دوتایی پلی‌پروپیلن-چوب و پلی‌پروپیلن-پلی‌اتیلن ترفتالات بیش از تشکیل فصل مشترک قوی میان سه جز است. بنابراین، پاسخ نمونه در برابر اعمال تنش یکنواخت نیست. درحالی‌که با افزایش مقدار PET، یکپارچگی و یکنواختی فازی بیشتر و رفتار چندسازه در برابر تنش یکنواخت‌تر می‌گردد. به‌طوری‌که بهبود استحکام کششی پلی‌پروپیلن به‌وسیله پلی‌اتیلن ترفتالات به‌وسیله Song و همکاران (۲۰۰۱) و Santos و همکاران (۲۰۰۳) نیز گزارش شده است.

شکل ۴ نیز کاهش ازدیاد طول در شکست چندسازه‌ها را با افزایش میزان پلی‌اتیلن ترفتالات ضایعاتی نشان می‌دهد. به‌طورکلی پلی‌اتیلن ترفتالات قابلیت تغییر فرم بسیار کمتری نسبت به پلی‌پروپیلن دارد و با ایجاد محدودیت در حرکت زنجیرهای پلی‌پروپیلن، امکان کرنش آنها را کم می‌کند (Oyman et al., 1999; Bledzki et al., 2004 و Santos et al., 2003).

مقاومت ضربه

مقایسه نتایج در جدول ۷ نشان می‌دهد که چندسازه PP/MAPP/Wood مقاومت ضربه بهتری نسبت به PP خالص و PET ضایعاتی دارد.

یکنواختی فازی بیشتر پیشنهاد می‌شود.

منابع مورد استفاده

- Bataille, P., Boisse, S. and Schreiber, H., P., 1989. Mechanical Properties & Permeability of PP & PET Mixtures. *Polymer Engineering & Science*, 27(9), 622-626.
- Bledzki, A.K. and Faruk, O., 2004. Wood Fiber Reinforced Polypropylene Composites: Effect of Fiber Geometry and Coupling Agent on Physico-Mechanical Properties. *Applied Composite Materials*, 40, 365-379.
- Cheung M. K., Chau D., 1997. Mechanical & Rheological Properties of PET/PP Blends, *Polymer International*, 43,281-287, 1997
- Guo, R. and Azaiez, J., 2005. Rheology of Fiber Filled Polymer Melts: Role of Fiber-Fiber Interactions & Polymer-Fiber Coupling. *Polymer Engineering & Science*, 45,385-399.
- Hristov, V., Krumova, M., Vasileva, St. and Michler, G., 2004. Modified Polypropylene Wood Flour Composites. II. Fracture, Deformation and Mechanical Properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 1286-1292.
- Hristov, V. and Takacs, E., Vlachopoulos, J., 2006. Surface Tearing & Wall Slip Phenomena in Extrusion of Highly Filled HDPE/WF Composites. *Polymer Engineering & Science*, 46, 1204-1214.
- Jafarzade, F., Oromieh, A. and Ershad, Langeroodi, M., 2006. Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene/Recycled Polyethylene Terephthalate/Chopped Rice Husk Composites, Iran Polymer and Petrochemical Institute, 2008. *Journal of Applied Polymer Science*, 110, 1979-1985.
- Jingchen, W., Demei, Y., Chan, C., M., Kim, J. and Mai, Y., M., 2000. Effect of Fiber Pretreatment Condition on the Interfacial Strength & Mechanical Properties of Wood-Fiber/PP Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 76, 1000-1010.
- Oyman, Z.O. and Tincer, T., 2003. Melt BLending of PET with PP in the Presence of Silane Coupling Agent. *Journal of Applied Polymer Science*, 89, 1039-1048.
- Stark, N., 2003. Effect of Wood Fiber Characteristics on Mechanical Properties of Wood/Polypropylene Composites, 2003. *Wood & Fiber Science*, 32(5), 167-174.
- Song, M. and Pang, Y., 2001. Correlation among Morphology, Interface & Mechanical Properties: Experimental Studies, *Journal of Macromolecular Science-Physics*, B40 (6), 1153-1167.
- Santos, P. and Pezzin, S.H., 2003. Mechanical Properties of PP Reinforced with Recycled PET Fibers. *Journal of Materials Processing Technology*. 143-144, 517-520.

چندسازه منجر شده است. همچنین، Guo و همکارانش (۲۰۰۵)، سختی ذاتی ذرات فیبر را عاملی دیگر برای بیشتر بودن مدول ذخیره‌ای می‌دانند.

همچنین وابستگی فاکتور اتلاف به فرکانس در شکل ۹ نشان داده شده است. فاکتور اتلاف که از نسبت مدول اتلاfi (G'') به مدول ذخیره‌ای (G') بدست می‌آید، نماینده سفتی نسبی ماده است (Guo *et al.*, 2005). همان‌گونه که در شکل مشخص است، حضور ذرات سخت پلی‌اتیلن ترفتالات سبب محدودیت برای ماکرومولکول‌های پلیمر شده و از مقدار فاکتور اتلاف ($\tan \delta$) کاسته است که این نتایج با مشاهدات مربوط به مدول استاتیک و دینامیک و نیز نتایج مربوط به مقاومت ضربه همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری نهایی

مطالعه خواص مکانیکی چندسازه‌های پلی‌پروپیلن-پودر چوب حاوی پلی‌اتیلن ترفتالات ضایعاتی نشان می‌دهد که با افزودن پلی‌اتیلن ترفتالات ضایعاتی در مقادیر متوسط به چندسازه پلی‌پروپیلن - چوب - مائیک انیدرید پلی‌پروپیلن، خواص مکانیکی و ضربه نزدیکی زیادی با چندسازه فاقد پلی‌اتیلن ترفتالات ضایعاتی دارد و افت خواص قابل توجه نیست که نشانه برهم‌کنش مؤثر میان فازهاست. همچنین مشاهده رفتار شبه جامد (الاستیک) و کاهش اتلاف مشاهده شده در مطالعات رئولوژیکی تأییدکننده نتایج حاصل از آزمون کششی و ضربه است و افزایش ویسکوزیته با افزایش مقدار پلی‌اتیلن ترفتالات نشان‌دهنده برهم‌کنش میان ذرات چوب و پلی‌اتیلن ترفتالات و نیز با ماتریس و در حقیقت دلیل بر وجود یک شبکه فیزیکی به هم متصل در ساختار چندسازه می‌باشد.

کارهای آینده

با توجه به اینکه در این بررسی تا حدود ۳۳٪ وزنی پلی‌پروپیلن از پلی‌اتیلن ترفتالات ضایعاتی استفاده شده است، اثر افزایش میزان پلی‌اتیلن ترفتالات به مقادیر بالاتر از میزان مذکور قابل بررسی است. همچنین جستجوی روش‌های فرایندی مؤثرتر برای حصول یکپارچگی و

The influence of using waste PET on the mechanical and rheological properties of wood flour filled PP composites

E. Ostadi^{1*}, J. Morshedian² and Y. Jahani³

1*- Corresponding author , MSc., Iranian Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

Email: Ostadi.elham@gmail.com

2-Professor, Iranian Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

3-Associate Professor. Iranian Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

Received: Feb., 2013

Accepted: Oct., 2014

Abstract:

In this research the influence of using waste Poly Ethylene Terephthalate on the mechanical and rheological properties of wood flour filled PP composites has been studied. PET contents varied from 10-33 wt%. Mechanical properties were characterized by tensile testing, while their fracture resistance was determined by impact measurements. The melt rheological behavior of the composites was also studied by a rheometer in the oscillatory mode and dynamic rheological properties such as complex viscosity, storage modulus, loss modulus and damping factor were evaluated at 190°C. The results showed that stiffness increases by adding waste Poly Ethylene Terephthalate. PET when added in low concentrations, caused tensile strength to be lower than that of PP composites filled with pure wood flour. Increasing the concentration of waste PET, led to composites with higher tensile strength. The samples containing waste PET showed higher complex viscosity and storage modulus than composite without PET. Likewise, it was observed that the damping factor in the PP/Wood composite decreased by incorporating waste PET to the composition.

Keywords: Waste polyethylene terephthalate, polypropylene, wood flour, mechanical properties, rheological behavior.