

تأثیر فرایند بازیافت بر خواص فیزیکی و مکانیکی چندسازه‌های ساخته‌شده از آرد چوب- پلی‌اتیلن دانسیته سنگین

چکیده

در این تحقیق، تأثیرات فرایند بازیابی بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی چندسازه‌های چوب پلاستیک ساخته‌شده از آرد چوب- پلی‌اتیلن دانسیته سنگین بررسی شد. مواد چندسازه شامل آرد چوب، پلی‌اتیلن دانسیته سنگین و پلی‌اتیلن پیوند شده با مالئیک انیدرید (MAPE) بود که تحت تأثیر فرایند بازیابی تا ۴ مرحله بازیافت قرار گرفت. این کار در شرایط صنعتی انجام شد. روش‌های آنالیز متنوعی شامل آزمون خمشی، مدول الاستیسیته، مقاومت به ضربه و جذب آب بر طبق آزمون‌های استاندارد، اندازه‌گیری طول الیاف و نیز مطالعه مورفولوژی با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) جهت شناخت تأثیرات بازیافت بر چندسازه‌های آرد چوب- پلی‌اتیلن انجام شد. نتایج نشان داد که چندسازه‌های بازیابی شده در مقایسه با چندسازه‌های اولیه دارای مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته‌ی کمتری بودند. ولی چندسازه‌های یک‌بار بازیافت شده، نسبت به سایر نمونه‌ها دارای مقاومت به ضربه‌ی بیشتری بودند. همچنین نتایج نشان داد که چندسازه‌های بازیافتی در مقایسه با چندسازه‌های اولیه دارای جذب آب کمتری بودند.

واژگان کلیدی: چندسازه، بازیافت، آرد چوب، خصوصیات مکانیکی، خصوصیات فیزیکی.

الهام نادعلی^{۱*}

محمد لایقی^۲

قنبر ابراهیمی^۳

مهدی جنوبی^۴

مجید چهارمحالی^۵

^۱ دانشجوی دکتری گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۲ استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۳ استاد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۴ استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۵ فارغ التحصیل دکتری گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

مسئول مکاتبات:

e.nadali@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۲۳

مقدمه

الیاف طبیعی دارای مزایای متعددی از قبیل دانسیته- ی کم، مدول و مقاومت ویژه بالا، دسترسی آسان و گسترده می‌باشند و البته چالش‌هایی مانند دمای مجاز پایین‌تر برای فرورش، وجود مشکلاتی در پخش و پراکنش مناسب الیاف چوب در ماتریس پلیمر را در تولید چندسازه‌های پلاستیک الیاف طبیعی دارا هستند که در کنار این

موارد ذکر شده، مقرون به صرفه بودن آن‌ها از اهمیت به‌سزایی به لحاظ اقتصادی و صنعتی برخوردار است [۱]. مزیت اصلی چندسازه‌های پلاستیک الیاف طبیعی در مقایسه با سیستم‌های متداول گرماسخت، قابلیت بازیافت محصول طی فرایند ساخت (بازیافت درونی) و یا در مرحله‌ی بعدی پس از عمر مفید محصول است (بازیافت

^۱ Internal recycling

مقاومت به آب را افزایش داده و پایداری ابعادی را در چندسازه‌های ساخته شده از الیاف طبیعی پلی‌پروپیلن بهبود بخشیده است. این امر عمدتاً ناشی از پراکنش بهتر الیاف، دانسیته‌ی بالاتر، مقادیر کمتر خلل و فرج و حفره‌ها، کیفیت سطح مشترک بهتر و افزایش آب‌گریزی در چندسازه‌های بازیابی شده است [۲]. Beg و Pickering (۲۰۰۸) تأثیرات بازیابی چندسازه‌های پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف چوب را بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مطالعه کردند. مقاومت کششی و مدول یانگ از ۴۱ و ۳۸۵۳ مگاپاسکال در چندسازه‌های شاهد، به ۳۱ و ۳۸۰۰ مگاپاسکال بعد از ۸ بار بازیابی کاهش پیدا کرد. گزارش شد که تغییر خواص مکانیکی به احتمال زیاد ناشی از شکست الیاف در طی فرایند بازیابی بود که در نتیجه‌ی آن کاهش در طول متوسط الیاف از ۲/۳۶ میلیمتر در چندسازه‌های شاهد به ۰/۳۷ میلیمتر در الیاف استخراج شده در چندسازه‌های ۸ بار بازیابی وجود داشت [۸].

آزمون‌های استاتیکی متداول معمولاً برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی این چند سازه‌ها استفاده می‌شوند که به طور کلی شامل آزمون‌های ضربه، خمشی و کششی هستند.

بررسی سوابق تحقیق نشان می‌دهد که تحقیقات متعددی بر روی چندسازه‌های حاصل از پلیمرهای بازیافتی انجام شده است. در زمینه‌ی بازیافت خارجی نیز برخی محققین نتایجی را گزارش نموده‌اند؛ اما در ارتباط با بازیافت درونی چندسازه‌های چوب پلاستیک اطلاعات بسیار اندکی در سوابق تحقیق موجود است که آن‌هم در مقیاس آزمایشگاهی است. در این تحقیق، تأثیرات بازیابی درونی بر خواص خمشی، مدول الاستیسیته، مقاومت به ضربه و جذب آب چندسازه‌های آرد چوب- پلی‌اتیلن دانسیته سنگین مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق بر روی بازیافت مجدد چندسازه‌های ضایعاتی خط تولید کارخانه و با هدف صرفه‌جویی در مواد اولیه انجام شده و کار در مقیاس صنعتی است. نتایج این تحقیق می‌تواند امکان تولید چندسازه‌های دارای ویژگی‌های مناسب را با استفاده از مواد بازیافتی فراهم نماید و از طرفی یافته‌های این پژوهش از نظر زیست‌محیطی هم حائز اهمیت است.

خارجی). در حال حاضر مشکلات زیست محیطی به خصوص مشکل پر شدن سریع مکان‌های دفن زباله وجود دارد که به سرعت در سطح جهان در حال گسترش هستند. البته بسیاری از فرایندهای بازیابی نیازمند آسیاب زیاد و اختلاط در دمای بالا هستند که باعث تخریب خواص مواد چند سازه‌ای می‌شوند [۲]. در طی دو دهه‌ی گذشته، تحقیقات انجام شده بر این نکته تأکید داشتند که فرایندهای بازیابی متوالی در اثر اکسیداسیون حرارتی (طی فرایند بازیابی) باعث برش زنجیره‌ی ماتریس پلیمری شده که این امر هم در پلی‌پروپیلن تقویت شده و هم در پلی‌پروپیلن بکر و همین‌طور در چندسازه‌های حاصل از آن‌ها ایجاد می‌شود. این رفتار در اثر تخریب زنجیره‌ی پلیمری در مراحل حرارتی و تنش‌ی شدیدی است که طی فرایند بازیابی اعمال می‌شود [۳]. تخریب حرارتی می‌تواند از یک طرف باعث پیوند عرضی^۱ و برش زنجیره‌ی ماتریس پلیمری شود و از طرف دیگر باعث تخریب شیمیایی و ساختاری آرد چوب گردد [۴ و ۵]. سوابق تحقیق نشان می‌دهد که پلی‌پروپیلن به طور معنی‌داری دارای پایداری حرارتی کمتری نسبت به پلی‌اتیلن است [۶]. اگرچه برخی تحقیقات، نشان از افت خواص مکانیکی در اثر بازیابی دارد [۷-۹]، ولی برخی نیز نشان می‌دهد که بازیابی می‌تواند منجر به بهبود سفتی و مقاومت شود که این امر در اثر پراکنش بهتر الیاف در ماتریس پلیمری ایجاد می‌شود [۸ و ۱۰-۱۳]. کاظمی نجفی و همکاران (۲۰۰۶)، ویژگی‌های مکانیکی چندسازه‌های چوب پلاستیک ساخته شده از خاک اره و پلیمرهای بازیافتی را مورد بررسی قرار دادند. مواد به صورت فشاری قالب‌گیری و تبدیل به تخته شدند. خواص مکانیکی نمونه‌های دارای پلیمرهای بازیافتی مشابه با خواص چندسازه‌های ساخته شده از پلیمرهای بکر بود [۱۴]. همچنین تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت چندسازه‌های پلاستیک الیاف طبیعی بازیابی شده به عوامل متعددی از جمله کیفیت سطح مشترک، ترکیب شیمیایی مواد لیگنوسولولزی، طول الیاف، پراکنش الیاف و دانسیته وابسته است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که به طور کلی فرایند بازیابی،

¹ External recycling

² Crosslink

مواد و روش‌ها

آرد چوب صنوبر (WF) نیز از ضایعات کارخانه‌های چوب‌بری تهیه شد. پلی‌اتیلن پیوند شده با مالئیک انیدرید (MAPE) از محصولات شرکت کرانگین است. خصوصیات پلی‌اتیلن پیوند شده با مالئیک انیدرید (MAPE) در جدول ۲ آمده است.

پلی‌اتیلن سنگین (HDPE) مورد استفاده، EX5 از محصولات پتروشیمی مارون با شاخص جریان مذابی معادل ۸ gr/10min (۱۹۰°C و ۲/۱۶ kg) و با دانسیته ۰/۹۴۹ gr/cm³ بود. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ترموپلاستیک پلی‌اتیلن سنگین در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی پلیمر پلی‌اتیلن سنگین

ویژگی‌ها	واحد	استاندارد آزمایش	پلی‌اتیلن سنگین (EX5)
دانسیته	gr/cm ³	ASTM D792	۰/۹۴۹
شاخص جریان مذاب (190 °C/2.16 kg)	gr/10min	ASTM D1238	۸
مقاومت کششی در نقطه تسلیم	MPa	ASTM D638	¹ MD=18, ¹ TD=20
افزایش طول در نقطه شکست	%	ASTM D638	MD=400, TD=405

جدول ۲- خصوصیات پلی‌اتیلن پیوند شده با مالئیک انیدرید (MAPE)

ویژگی‌ها	واحد	استاندارد آزمایش	مقدار
شاخص مذاب (190 °C/2.16 kg)	gr/10min	ISO 1133	۰/۳
مالئیک	%	Titration	۱/۷
دانسیته	gr/cm ³	ISO 113301	۰/۹۲

سازه‌ی یک متری ساخته شد. بازیابی در دو مرحله انجام شد. ابتدا چندسازه‌ها با استفاده از دستگاه خردکن^۵، خرد و سپس توسط دستگاه پودرکن^۶، پودر شدند. پس از خشک کردن آن‌ها، داخل همان همزن و تحت همان شرایط اختلاط فراوری (بازیابی) شدند. شرایط اکسترودر در جدول ۴ آمده است. تمامی چندسازه‌های بازیابی شده و اصلی برای تولید چندسازه‌هایی با ضخامت ۱۲ میلی‌متر داخل اکسترودر قرار گرفتند. فرایند بازیابی ۴ مرتبه و هر بار با ۵ تکرار برای هر فرمول‌بندی انجام شد.

تهیه چندسازه‌ها

فرمول‌بندی چندسازه‌ها همان‌طور که در جدول ۳ آمده است به‌عنوان فرمول‌بندی اصلی تولید شد. چندسازه‌ها دارای ۶۵٪ وزنی آرد چوب صنوبر، ۳۲٪ پلی‌اتیلن دانسیته سنگین و ۳٪ پلی‌اتیلن پیوند شده با مالئیک انیدرید بود که به داخل مخزن دستگاه توربومیکسر^۳ (Suzhou DYUN recycling machinery Co. LTD) در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد و با سرعت ۲۰۰rpm برای مدت‌زمان ۱۰ دقیقه ریخته شدند تا اختلاط آن‌ها به‌طور کامل صورت گیرد. سپس مواد به داخل کیسه ریخته شده و کیسه‌ها وکیوم می‌شوند. پس‌ازاین مرحله، مواد مخلوط شده به داخل مخزن دستگاه اکسترودر دو ماردون غیر همسانگرد ۴ (Shanghai JWELL extrusion machinery Co. LTD) ریخته شدند. برای هر فرمول تعداد پنج چند-

¹ Transverse direction² Machine direction³ Turbo mixer⁴ Twin screw extruder⁵ Crusher⁶ Pullverizer

جدول ۳- فرمول‌های مختلف چندسازه‌ی چوب پلاستیک در حالت قبل و بعد از بازیابی

کد نمونه‌های چوب پلاستیک	مقدار آرد چوب (wt%)	مقدار پلی-اتیلن (wt%)	مقدار جفت کننده و مواد افزودنی* (wt%)	تعداد دفعات بازیابی
WFPEOrig	۶۵	۳۲	۳	۰
WFPERec1	۶۵	۳۲	۳	۱
PERec2 WF	۶۵	۳۲	۳	۲
WFPERec3	۶۵	۳۲	۳	۳
WFPERec4	۶۵	۳۲	۳	۴

* کارخانه‌ی تولیدکننده، جزییات را ارائه نمی‌دهد.

جدول ۴- شرایط اکسترودر برای ساخت چندسازه‌ی چوب پلاستیک

نوع پلیمر	دما در زون‌های مختلف (°C)					سرعت ماردون (rpm)	فرکانس ماردون (Hz)	فشار قالب (bar)
	۱	۲	۳	۴	۵			
HDPE	۱۸۰	۱۸۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۶۵	۱۳۵	۱۳/۶۰	۸

دور در دقیقه = rpm، هر تتر = Htz

روش‌ها

اندازه‌گیری طول الیاف

آزمایش ضربه ز ۷/۵ بود و از هر ترکیب ۵ نمونه مورد آزمون قرار گرفتند.

مقدار اندکی از مواد تشکیل‌دهنده‌ی چندسازه‌ی الیاف طبیعی- پلی‌اتیلن سنگین قبل و پس از بازیابی، در پی زایلن^۱ جوشان (۹۹/۹ درصد) حل و سپس الیاف از محلول ویسکوز جداسازی شد. بررسی طول الیاف توسط میکروسکوپ نوری Nikon با بزرگنمایی ۱۰۰ انجام شد و از هر فرمول، تعداد صد لیف مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

آزمون فیزیکی

اندازه‌گیری مقدار جذب آب مطابق با آیین‌نامه ۵۷۰- D استاندارد ASTM انجام شد. از هر ترکیب ۵ نمونه مورد آزمون قرار گرفتند. به‌این ترتیب که ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰°C، در اتو قرار داده شدند تا خشک شوند. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از اتو خارج شده و با یک ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم، وزن خشک اولیه‌ی نمونه‌ها اندازه‌گیری و یادداشت گردید. سپس نمونه‌ها به مدت ۲، ۴، ۶، ۸، ۲۴، ۴۸ ساعت و نیز تا زمانی که به وزن ثابتی برسند، در دمای محیط به حالت غوطه‌ور در آب در ظروف جذب قرار گرفتند. بعد از هر یک از مدت زمان‌های گفته‌شده نمونه‌ها از آب بیرون آورده شدند و وزن تر ثانویه‌ی آن‌ها با ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری و یادداشت گردید. سپس مجدداً در آب قرار داده شدند تا در زمان‌های ذکرشده‌ی بعدی، مجدداً وزن تر آن‌ها محاسبه گردد. درنهایت با داشتن داده‌های مربوط به وزن خشک و وزن تر، مقدار جذب آب نمونه‌ها مطابق رابطه‌ی (۱) محاسبه گردید.

آزمون‌های مکانیکی

آزمون‌های خمشی مطابق با آیین‌نامه D۷۹۰ استاندارد ASTM انجام شدند. ابعاد اسمی نمونه‌ها ۳۰۰×۳۰×۱۲mm بوده‌است. طول دهانه ۲۰۰ میلی‌متر و سرعت رأس بارگذاری ۵/۰۰ mm/min بود. آزمون‌های خمش سه‌نقطه‌ای توسط یک ماشین آزمون Instron مدل ۵۵۶۶ و سلول بار به ظرفیت ۱۰KN مجهز به سیستم جمع‌آوری کامپیوتری اطلاعات انجام شدند و از هر ترکیب، ۵ نمونه مورد آزمون قرار گرفتند.

آزمایش‌های ضربه‌ی ایزود بدون فاق (unnotched) مطابق با آیین‌نامه D-۲۵۶ استاندارد ASTM به‌وسیله یک دستگاه آزمایش ضربه Ceast مدل ۶۹۵۸ انجام شدند. ابعاد اسمی نمونه‌ها ۶۵×۱۳×۱۲mm بود. ظرفیت ماشین

$$100 \times (\text{وزن خشک} / \text{وزن خشک} - \text{وزن تر}) = \text{مقدار جذب آب}$$

(۱)

(به جز در مورد چهارمین بازیابی) از مقاومت خمشی نمونه ها کاسته است. مقدار مقاومت خمشی در نمونه های چندسازه ی پلی اتیلن سنگین، قبل از بازیابی $44/39 \text{ MPa}$ است که بعد از یک بار بازیافت، به $40/11 \text{ MPa}$ کاهش یافته است. این احتمالاً ناشی از شکست الیاف در طی اولین بازیافت است که منجر به کاهش طول الیاف می شود و بنابراین، این امر منجر به کاهش مقاومت خمشی می شود. نتایج مشابهی توسط Dikson و همکاران (۲۰۱۴) با مطالعه بر روی تأثیر بازیافت بر خواص مکانیکی پلی پروپیلن تقویت شده با خمیر چوب، کتان و الیاف شیشه گزارش شد [۷]. ویژگی موردنظر، در دومین و سومین بازیافت کاهش اندکی داشت که این را می توان به مقدار اندک کاهش طول الیاف در دومین و سومین بازیافت نسبت داد. نتایج حاصل از اندازه گیری طول الیاف نشان داد که بعد از بازیافت اول، طول الیاف کاهش قابل توجهی داشت. طول الیاف در چندسازه های پلی اتیلن سنگین قبل از بازیابی 463 میکرومتر بود که بعد از اولین بازیابی به 326 میکرومتر رسید اما مقدار کاهش آن در دومین و سومین بازیافت اندک بود (شکل ۲). در چهارمین مرتبه ی بازیافت، مقدار مقاومت خمشی نمونه ها افزایش یافته است. این احتمالاً ناشی از اتصال عرضی درون زنجیره ی پلی اتیلن است که در تعداد دفعات بازیابی بیشتر و تکراری اتفاق می افتد. وقتی تعداد دفعات بازیافت زیاد می شود، پلیمر پلی اتیلن شبکه ای^۱ می شود و پیوند عرضی شیمیایی بین زنجیره ها ایجاد می شود که سبب افزایش مقاومت خمشی در چهارمین بازیافت می شود.

مطالعه مورفولوژی با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ (SEM)

نمونه ها به وسیله ی نیتروژن مایع منجمد شده و سپس شکسته شدند. سطوح شکسته شده به وسیله ی لایه ی نازک از طلا در دستگاه پوشاننده یونی Sputter coater مدل K 450X کمپانی Emitech ساخت انگلستان پوشش داده شدند. سپس میکروگراف های میکروسکوپ الکترونی با ولتاژ 20 Kv کیلوولت تهیه شدند. تصاویر سطح شکست مقاطع حاصل از نمونه ها توسط میکروسکوپ TESCAN مدل WEGA-II ساخت جمهوری چک تهیه شدند.

تحلیل آماری

نتایج آزمون های استاتیکی در قالب طرح کاملاً تصادفی بررسی گردیده است. جهت تجزیه و تحلیل داده ها از روش تجزیه واریانس یک طرفه استفاده شد و از آزمون چند دامنه ای دانکن برای جداسازی میانگین ها استفاده گردید. کلیه مقایسه ها در سطح 95% اعتماد انجام شده اند و از هر ترکیب ۵ نمونه مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

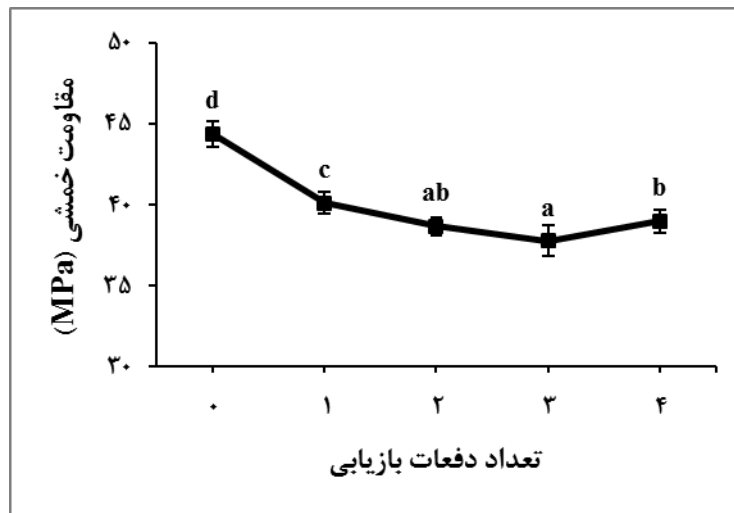
آزمون های مکانیکی

همان گونه که در شکل ۱ مشاهده می گردد در اثر بازیابی، مقاومت خمشی نمونه های چندسازه ی پلی اتیلن سنگین کاهش یافت. چنین نتیجه ای توسط Beg و Pickering (۲۰۰۸) نیز گزارش شده است. تجزیه واریانس داده های حاصل از آزمون مقاومت خمشی نشان می دهد که بین مقادیر مقاومت خمشی نمونه های چندسازه های پلی اتیلن سنگین قبل و پس از بازیابی در سطح اعتماد 95% ، اختلاف معنی داری وجود دارد. همچنین نتایج محاسبات آماری و گروه بندی میانگین ها نشان می دهد که بین مقادیر مقاومت خمشی نمونه ی چندسازه ی پلی اتیلن دانسیته سنگین در دفعات اول تا چهارم پس از بازیابی در سطح اعتماد 95% ، اختلاف معنی داری وجود دارد. مقادیر مقاومت خمشی از نمونه شاهد تا نمونه های پس از سومین بازیابی روند کاهشی دارند و این نشان می دهد که بازیابی

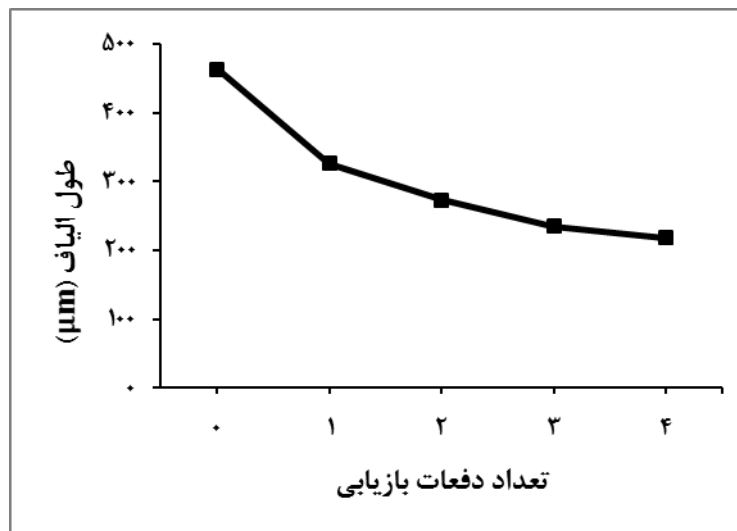
¹ Cross link

¹ P- xylene

² Scanning electron microscopy



شکل ۱- مقاومت خمشی چندسازه‌های آرد چوب- پلی اتیلن سنگین در حالت قبل و بعد از بازیابی



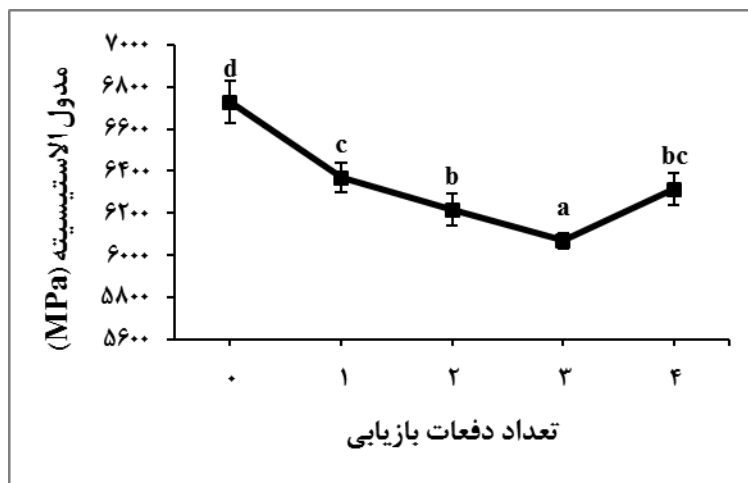
شکل ۲- طول الیاف چندسازه‌های آرد چوب- پلی اتیلن سنگین در حالت قبل و بعد از بازیابی

مقدار مدول الاستیسیته در دومین و سومین بازیافت کاهش اندکی پیدا کرده که می‌تواند به مقدار جزئی کاهش طول الیاف در این بازیابی‌ها نسبت داده شود. در چهارمین مرتبه‌ی بازیافت، مقدار مدول الاستیسیته نمونه‌ها افزایش یافته است. این احتمالاً ناشی از شبکه‌ای شدن پلیمر است که در نتیجه‌ی آن بخش‌های کریستالی پلیمر رشد می‌کند. پدیده‌ی اشاره‌شده همراه با درهم‌رفتنی بهتر الیاف پلیمر ناشی از شبکه‌ای شدن می‌تواند منجر به بهبود مدول الاستیسیته‌ی چندسازه بعد از چهارمین بازیافت شود [۵]. نتایج حاصل از تحلیل آماری نشان می‌دهد که بین مقادیر مدول الاستیسیته نمونه‌ی چندسازه‌ی پلی اتیلن با دانسیته سنگین قبل و پس از بازیابی در سطح اعتماد ۹۵٪ اختلاف

شکل ۳، مقادیر مدول الاستیسیته در نمونه‌های چندسازه‌ی پلی اتیلن سنگین را قبل و پس از بازیابی نشان می‌دهد. مقدار مدول الاستیسیته در نمونه‌های چندسازه‌ی پلی اتیلن سنگین، قبل از بازیابی ۶۷۲۸ MPa است که بعد از بازیابی، این مقدار به ۶۳۶۸ MPa کاهش می‌یابد. سوابق تحقیق نشان می‌دهد که الیاف طبیعی، نقش تقویت-کنندگی را در چندسازه‌های پلیمری الیاف طبیعی ایفا می‌کند و ضریب لاغری الیاف، نقش اساسی در عملکرد تقویت‌کنندگی آن‌ها دارد؛ بنابراین کاهش ضریب لاغری ناشی از شکست الیاف در هنگام اولین بازیابی ممکن است دلیل کاهش اشاره‌شده در مدول الاستیسیته‌ی چندسازه‌های مورد مطالعه بعد از اولین بازیافت باشد [۱۵-۱۹].

چندسازه‌ی پلی‌اتیلن با دانسیته سنگین در اولین و چهارمین بازیابی، اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

معنی‌داری وجود دارد. همچنین بین نمونه‌ی چندسازه‌ی پلی‌اتیلن با دانسیته سنگین در اولین، دومین و سومین بازیابی، اختلاف معنی‌داری وجود دارد. ولی بین نمونه‌ی



شکل ۳- مدول الاستیسیته چندسازه‌های آرد چوب- پلی‌اتیلن سنگین در حالت قبل و بعد از بازیابی

در طی اولین بازیافت، طول الیاف در اثر فرسایش مکانیکی کاهش می‌یابد ولی سطوح الیاف نیز به میزان بیشتری توسط پلیمر پلی‌اتیلن مذاب پوشش داده می‌شود و این امر به نوبه‌ی خود چسبندگی بین سطحی را افزایش می‌دهد. در نتیجه انتقال تنش بهتر انجام شده و مقاومت به ضربه افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد دفعات بازیافت، در دومین و سومین بازیافت، مقدار مقاومت به ضربه کاهش پیدا کرد که علت این امر را می‌توان به غالب بودن اثر کاهش طول الیاف بر اختلاط پلیمر نسبت داد زیرا در طی اولین بازیافت، اختلاط پلیمر و الیاف طبیعی به میزان قابل توجهی انجام شده است و در نتیجه در دومین و سومین بازیافت، تأثیر مثبت اختلاط بر مقاومت به ضربه ناچیز خواهد بود و اثر کاهش طول الیاف غالب است که سبب کاهش مقاومت به ضربه می‌شود.

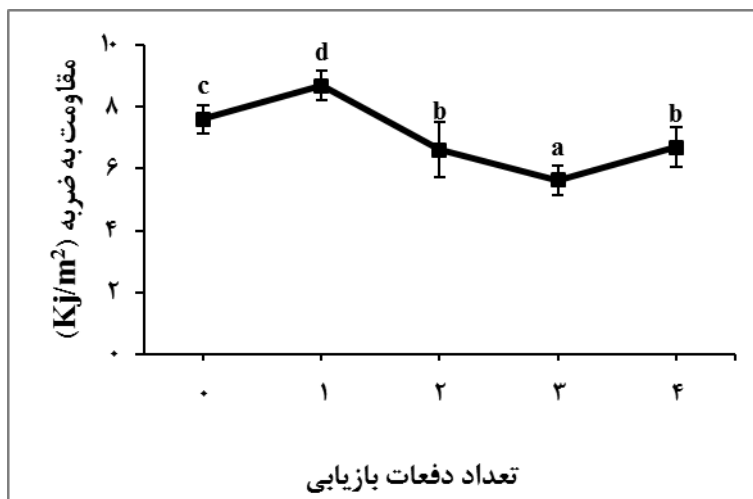
بعد از چهارمین بازیافت افزایش مقاومت به ضربه وجود دارد. همان‌طور که در بالا اشاره شد شبکه‌ای شدن پلیمر، پدیده‌ی غالب در بازیافت چهارم بود که باعث افزایش مقاومت به ضربه‌ی نمونه‌ها شد. در مطالعه‌ای که بر روی بازیابی تزریقی قالبی الیاف شاهده‌ان در چندسازه‌های پلی-پروپیلن بازیافتی انجام شد، Bourmaud و همکاران (۲۰۱۱) افزایش میزان مقاومت به ضربه چندسازه‌های پلاستیک الیاف طبیعی در اثر بازیابی را گزارش نمودند

شکل ۴ مقاومت به ضربه‌ی چندسازه‌های الیاف طبیعی پلی‌اتیلن دانسیته سنگین را قبل و بعد از بازیابی نشان می‌دهد. تحلیل آماری نشان می‌دهد که بین مقادیر مقاومت به ضربه‌ی نمونه‌های چندسازه‌های الیاف طبیعی پلی‌اتیلن سنگین قبل و پس از بازیابی در سطح اعتماد ۹۵٪، اختلاف معنی‌داری وجود دارد. همچنین تجزیه واریانس داده‌های حاصل از آزمون مقاومت به ضربه نشان می‌دهد که بین مقادیر مقاومت به ضربه‌ی نمونه‌ی چندسازه‌ی پلی‌اتیلن سنگین در دفعات اول تا چهارم پس از بازیابی در سطح اعتماد ۹۵٪، اختلاف معنی‌داری وجود دارد. مقدار مقاومت به ضربه در نمونه‌های چندسازه‌ی پلی-اتیلن سنگین، قبل از بازیابی $7/60 \text{ KJ/m}^2$ است که بعد از اولین بازیابی، این مقدار به $8/69 \text{ KJ/m}^2$ افزایش یافته است. در طی فرایند بازیافت، دو پدیده‌ی کاهش طول الیاف در اثر فرسایش مکانیکی و بهبود اختلاط پلیمر و الیاف (پوشانده شدن سطح الیاف توسط پلیمر^۱) به صورت هم‌زمان اتفاق می‌افتد؛ که این دو پدیده، تأثیر متضادی در مقاومت به ضربه‌ی چندسازه‌های الیاف طبیعی پلی‌اتیلن دارند، به عبارت دیگر کاهش طول الیاف اثر منفی و بهبود اختلاط اثر مثبت دارد.

¹ Wetting

ضربه مشاهده نمودند. باین‌حال داده‌های مقاومت به ضربه‌ی گزارش‌شده در ارتباط با چندسازه‌های الیاف طبیعی بازیافتی نسبتاً کم است [۲۰].

[۱۴]. گزارش‌های متفاوتی در خصوص مقاومت به ضربه چندسازه‌های الیاف طبیعی در سوابق تحقیق وجود دارد. Sobczak و همکاران (۲۰۱۳) هنگام بررسی چندسازه‌های الیاف طبیعی، روندهای نسبتاً متناقضی را در مقاومت به



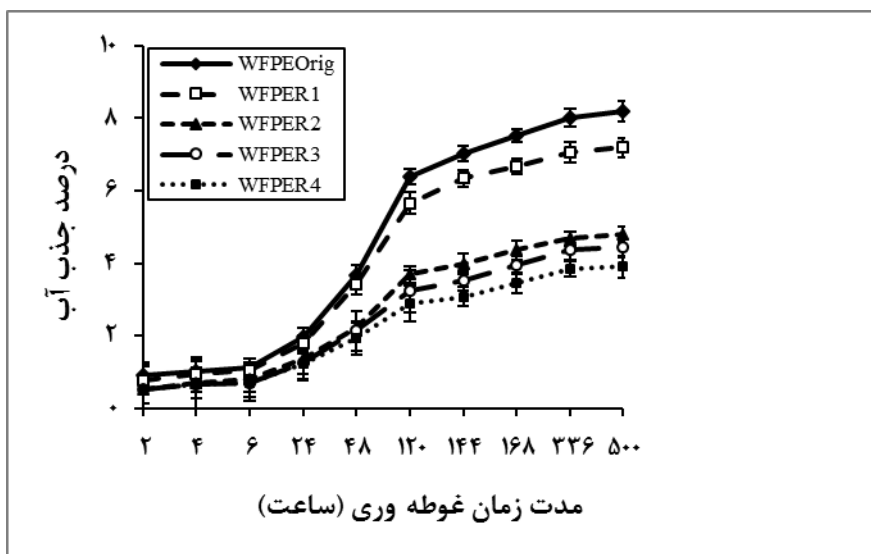
شکل ۴- مقاومت به ضربه چندسازه‌های آرد چوب- پلی اتیلن سنگین در حالت قبل و بعد از بازیابی

پوشانده شدند جذب آب کم‌تری دارند و به همین دلیل چهارمین بازیافت کمترین درصد جذب آب را در مقایسه با بقیه‌ی نمونه‌ها نشان داد.

همچنین همی‌سلولزهای موجود در الیاف طبیعی دارای گروه‌های هیدروکسیل فراوان هستند و در نتیجه همی‌سلولز آب‌دوست‌ترین جزء سازنده‌ی چندسازه‌ها است که نسبت به تخریب حرارتی نیز بسیار آسیب‌پذیر است. سوابق تحقیق نشان داد که بازیابی منجر به تخریب و از بین رفتن بخش‌های همی‌سلولز می‌شود [۲]. مواد هنگام بازیابی در نتیجه‌ی از دست دادن بخش‌های همی‌سلولز آب‌گریزتر می‌شوند که نشان‌گر طبیعت کمتر آب‌دوست محصولات بازیابی شده است. پس بازیافت از نظر جذب آب در چندسازه‌های الیاف طبیعی پلی‌اتیلن، مشکلی را ایجاد نمی‌کند.

خواص فیزیکی

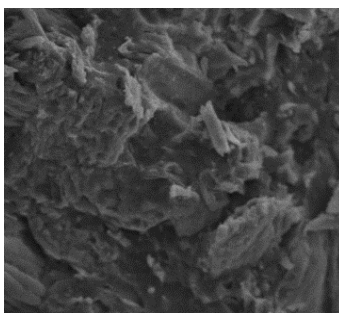
همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود بیشترین درصد جذب آب مربوط به نمونه‌ی قبل از بازیابی و کمترین درصد جذب آب مربوط به نمونه‌ی چندسازه‌ی پس از چهارمین بازیابی است. هرچه زمان قرار گرفتن نمونه‌ها در آب بیشتر شود، درصد جذب آب توسط نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد تا زمانی که نمونه‌ها از آب اشباع شوند. نمونه‌هایی که تعداد دفعات بیشتری بازیابی شده‌اند، درصد جذب آب کمتری دارند و زودتر به اشباع می‌رسند. چندسازه‌ی بکر در مقایسه با بازیافتی‌ها، الیاف بکر و خلل و فرج بیشتر دارند که این امر باعث افزایش جذب آب آن‌ها می‌شود. در اثر بازیافت، پلیمر به منافذ موجود در دیواره و نیز حفرات سلولی الیاف چوبی چندسازه نفوذ می‌کند که در اثر آن جذب آب در نمونه‌های بازیافتی کمتر می‌شود. علاوه بر این، الیافی که به‌خوبی توسط مذاب پلیمر



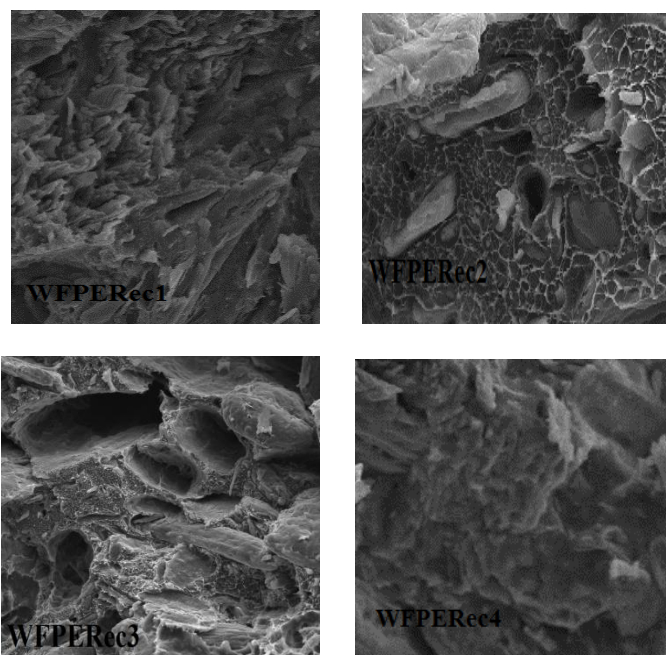
شکل ۵- مقدار جذب آب چندسازه‌های آرد چوب- پلی اتیلن سنگین قبل و بعد از بازیابی

پلیمر پلی اتیلن پس از سومین بازیافت، وجود حفرات متعدد در سطح را نشان می‌دهد که سبب کاهش خواص مکانیکی می‌شود. عدم جدایش الیاف از ماتریس در چندسازه‌ی الیاف طبیعی پلیمر پلی اتیلن سنگین پس از چهارمین بازیابی نشان‌دهنده‌ی بهبود قابل توجه در توزیع یکنواخت و چسبندگی مناسب بین الیاف و ماتریس در چندسازه‌ی الیاف طبیعی پلیمر پلی اتیلن سنگین پس از چهارمین بازیابی است که سبب بهبود خواص مکانیکی شد.

شکل ۶ نمونه‌ی چندسازه‌ی حاصل از الیاف طبیعی پلیمر پلی اتیلن قبل از بازیافت را نشان می‌دهد و در شکل ۷ نمونه‌های چندسازه‌های الیاف طبیعی پلیمر پلی اتیلن پس از بازیافت باهم مقایسه شده است. در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) خارج شدن الیاف از ماتریس در اثر بازیابی قابل مشاهده است؛ بنابراین در طی شکسته شدن نمونه‌ها، الیاف به راحتی از ماتریس خارج شده و سبب ایجاد منافذ در سطح شکست نمونه‌ها می‌شود. سطح شکست نمونه‌ی چندسازه‌ی الیاف طبیعی



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی چندسازه‌ی آرد چوب- پلی اتیلن سنگین بازیافت نشده (بکر)



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی چندسازه‌های آرد چوب- پلی اتیلن سنگین پس از یک تا چهار بار بازیافت

نتیجه‌گیری

کریستالی پلیمر است. پدیده‌ی اشاره‌شده همراه با درهم‌رفتنی بهتر الیاف پلیمر ناشی از کراس‌لینک می‌تواند منجر به بهبود مدول الاستیسیته‌ی چندسازه بعد از چهارمین بازیافت شود.

- مقدار مقاومت به ضربه در نمونه‌های چندسازه‌ی پلی- اتیلن سنگین بعد از اولین بازیابی افزایش یافت. در طی اولین بازیافت، طول الیاف در اثر فرسایش مکانیکی کاهش می‌یابد ولی سطوح الیاف به میزان بیشتری توسط پلیمر پلی اتیلن مذاب پوشش داده می‌شود و این امر به نوبه‌ی خود چسبندگی بین سطحی را افزایش می‌دهد. در نتیجه انتقال تنش بهتر انجام شده و مقاومت به ضربه افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد دفعات بازیافت، مقدار مقاومت به ضربه کاهش پیدا کرد که علت این امر را می‌توان به غالب بودن اثر کاهش طول الیاف بر اختلاط پلیمر نسبت داد. بعد از چهارمین بازیافت، کراس‌لینک منجر به بهبود مقاومت به ضربه‌ی چندسازه‌های پلی اتیلن می‌شود.
- هرچه تعداد دفعات بازیابی بیشتر می‌شود، درصد جذب آب کمتر می‌شود. در اثر بازیافت، پلیمر به منافذ موجود در دیواره و نیز حفرات سلولی الیاف چوبی چندسازه نفوذ می‌کند و الیاف به خوبی توسط مذاب پلیمر پوشانده می‌شوند و در نتیجه درصد جذب آب در

در این تحقیق چندسازه‌های آرد چوب- پلی اتیلن، ساخته و سپس چهار بار بازیابی شدند. تأثیرات بازیابی (بازیابی درونی) بر خواص فیزیکی و مکانیکی چندسازه‌های آرد چوب- پلی اتیلن بازیافتی بررسی و با چندسازه‌ی اصلی مقایسه شده و نتایج زیر به دست آمد.

- مقاومت خمشی چندسازه‌های پلی اتیلن با دانسیته سنگین پس از بازیابی (به جز در مورد چهارمین بازیابی) کاهش پیدا کرد. این ناشی از شکست الیاف در طی بازیابی و در نتیجه کاهش طول الیاف و کاهش مقاومت خمشی است. افزایش مقاومت خمشی در چهارمین مرتبه‌ی بازیافت، ناشی از اتصال عرضی درون زنجیره‌ی پلی اتیلن در اثر تعداد دفعات بازیابی بیشتر است.
- مدول الاستیسیته‌ی چندسازه‌های پلی اتیلن با دانسیته سنگین پس از بازیابی (به جز در مورد چهارمین بازیابی) کاهش پیدا کرد. کاهش نسبت ضریب لاغری الیاف ناشی از شکست الیاف در هنگام اولین بازیابی می‌تواند دلیل کاهش مدول الاستیسیته‌ی پس از یک بار بازیابی باشد. در چهارمین مرتبه‌ی بازیافت، مقدار مدول الاستیسیته نمونه‌ها افزایش می‌یابد که ناشی از کراس‌لینک پلیمر و در نتیجه‌ی آن رشد بخش‌های

ی تخریب و از بین رفتن بخش‌های همی سلولز آب-گریزتر می‌شوند که نشان‌گر طبیعت کمتر آب‌دوست محصولات بازیابی شده است.

نمونه‌های بازیابی شده کمتر می‌شود. چهارمین بازیافت کمترین درصد جذب آب را در مقایسه با بقیه‌ی نمونه‌ها نشان داد. مواد هنگام بازیابی در نتیجه

منابع

- [1] Muthuraj, R., Misra, M. and Mohanty, AK., 2015. Studies on mechanical, thermal, and morphological characteristics of biocomposites from biodegradable polymer blends and natural fibers. *Biocomposites Design and Mechanical Performance*. Woodhead Publishing Series, 93-140.
- [2] Tajvidi, M. and Takemura, A., 2010. Recycled Natural Fiber Polypropylene Composites: Water Absorption/Desorption Kinetics and Dimensional Stability. *Journal of Polymer Environment*, 18: 500–509.
- [3] Kord, B. and Kord, B., 2016. Influence of type and content of chemical foaming agent on the dynamic mechanical properties of high density polyethylene-flax fiber composites. *Iranian Journal of wood and paper industries*, 7(2):179-191. (In Persian).
- [4] Soccalingame, L., Bourmaud, A., Perrin, D., Benezet, J-C. and Bergeret, A., 2015. Reprocessing of wood flour reinforced polypropylene composites: impact of particle size and coupling agent on composite and particle properties. *Polymer Degradation and Stability*, 113: 72-85.
- [5] Bahlouli, N., Pessey, D., Raveyre, C., Guillet, J., Ahzi, S., Dahoun, A. and Hiver, JM., 2012. Recycling effects on the rheological and thermomechanical properties of polypropylene-based composites. *Materials and Design*, 33: 451-458.
- [6] Teuber, L., Osburg, V-S., Toporowski, W., Militz, H. and Krause, A., 2015. Wood polymer composites and their contribution to cascading utilization. *Journal of Cleaner Production*, Doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.009.
- [7] Dickson, AR., Even, D., Warnes, JM. and Fernyhough, A., 2014. The effect of reprocessing on the mechanical properties of polypropylene reinforced with wood pulp, flax or glass fibre. *Composites Part A*; 61: 258- 267.
- [8] Beg, MDH. and Pickering, KL., 2008. Reprocessing of wood fibre reinforced polypropylene composites. Part I: Effects on physical and mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*;39 (7): 1091–100.
- [9] Lopez, JP., Girones, J., Mendez, JA., Puig, J. and Pelach, MA., 2012. Recycling ability of biodegradable matrices and their cellulose-reinforced composites in a plastic recycling stream. *Journal of Polymer Environment*, 20(1): 96–103.
- [10] Bakkal, M., Bodur, MS., Berkalp, OB. and Yilmaz, S., 2012. The effect of reprocessing on the mechanical properties of the waste fabric reinforced composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(11): 2541–2548.
- [11] Ausias, G., Bourmaud, A., Coroller, G. and Baley, C., 2013. Study of the fibre morphology stability in polypropylene-flax composites. *Polymer Degradation and Stability*, 98(6): 1216–1224.
- [12] Sarabi, MT., Behravesh, AH., Shahi, P. and Soury, E., 2012. Reprocessing of extruded wood– plastic composites; mechanical properties. *Journal Biobased Materials and Bioenergy*, 6(2): 221–229.
- [13] Kraiem, D., Pimbert, S., Ayadi, A. and Bradai, C., 2013. Effect of low content reed (*Phragmites australis*) fibers on the mechanical properties of recycled HDPE composites. *Composites Part B–Engineering*; 44(1): 368–374.

- [14] Najafi, SK., Hamidinia, E. and Tajvidi, M., 2006. Mechanical Properties of Composites from Sawdust and Recycled Plastics. *Journal of Applied Polymer Science*; 100: 3641–3645.
- [15] Bourmaud, A., Le Duigou, A. and Baley, C., 2011. What is the technical and environmental interest in reusing a recycled polypropylene-hemp fibre composite? *Polymer Degradation and Stability*, 96: 1732–1739.
- [16] Srebrenskoska, V., Gaceva, GB., Avella, M., Errico, ME. and Gentile, G., 2008. Recycling of polypropylene-based eco-composites. *Polymer International*; 57: 1252–1257.
- [17] Kurniawana, D., Kimb, BS., Leea, HY. and Lima, JY., 2013. Effects of repetitive processing, wood content, and coupling agent on the mechanical, thermal, and water absorption properties of wood/polypropylene green composites. *Journal of Adhesive Science and Technology*; 27(12): 1301–1312.
- [18] Shahi, P., Behraves, AH., Daryabari, SY. and Lotfi, M., 2012. Experimental investigation on reprocessing of extruded wood flour/HDPE composites. *Polymers and polymer Composites*; 33(5): 753–763.
- [19] Guo, QP., Cheng, B., Kortschot, M., Sain, M., Knudson, R. and Deng, J., 2010. Performance of long Canadian natural fibers as reinforcements in polymers. *Journal of Reinforced Plastic Composites*; 29(21): 3197–3207.
- [20] Sobczak, L., Brüggemann, O. and Putz, RF., 2013. Polyolefin composites with natural fibers and wood-modification of the fiber/filler-matrix interaction. *Journal of Applied Polymer Science*; 127(1): 1–17.

Effect of recycling process on physical and mechanical properties of wood flour high-density polyethylene composites

Abstract

This paper reports the effects of recycling on physical and mechanical properties of wood flour high-density polyethylene composites (HDPE). Composite materials containing HDPE, wood flour, and Maleic Anhydride polyethylene (MAPE) were manufactured and subjected to a recycling process up to four times grinding and reprocessing under industrial conditions. A wide range of analytical methods including bending tests, modulus of elasticity, impact strength, water absorption tests, fiber length measurement and also scanning electron microscopy were employed to understand the effects of recycling on wood flour-HDPE composites. The results revealed that the recycled composites had low bending strength and modulus of elasticity values, compared with the reference counterparts, whereas the once recycled composite showed a high impact strength compared with both the reference and other more recycled composites. Results, as well, indicated that generally the recycled composites had low water absorption values as compared with the reference ones.

Keywords: composites, recycling, wood flour, mechanical properties, physical properties.

E. Nadali^{1*}
M. Layeghi²
Gh. Ebrahimi³
M. Jonoobi⁴
M. Chaharmahali⁵

¹ PhD student., Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

² Assistant Prof., Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

³ Professor, Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

⁴ Assistant Prof., Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

⁵ PhD, Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Corresponding author:
e.nadali@yahoo.com

Received: 2016/07/07
Accepted: 2016/09/13