



دانشگاه گوارزی، منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

جلد بیست و چهارم، شماره اول، ۱۳۹۶

<http://jwfst.gau.ac.ir>

رفتار مکانیکی و مقاومت زیستی چوب پلیمر آکریلونیتریل اصلاح شده با آلکوکسی سیلان

فروهل سبحانی اسکویی^۱، *مریم قربانی^۲ و سید مجتبی امینی نسب^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ^۲دانشیار دانشکده منابع طبیعی،

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ^۳استادیار گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه کردستان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۱۵

چکیده

سابقه و هدف: اصلاح چوب با استفاده از مواد و روش‌های دوستدار طبیعت، خواص چوب را برای بسیاری از کاربردها بهبود می‌بخشد. پلیمرهای مصنوعی به‌طور گسترده‌ای برای اصلاح چوب مورد استفاده قرار گرفتند که در آن چوب به‌وسیله مونومرها اشباع و تبدیل مونومر به پلیمر منجر به تولید چوب-پلیمر گردید. در اصلاح با مونومر وینیلی آکریلونیتریل، گروه‌های هیدروکسیل دیواره همچنان آزاد بوده و قادر به جذب رطوبت هستند. بنابراین حضور ماده‌ای برای اصلاح با اثر جفت‌کنندگی دیواره که بتواند بین مونومر و دیواره ارتباط برقرار کند می‌تواند باعث افزایش عمر مفید چوب گردد. در این تحقیق اثر ترکیب ۳-تری‌متوکسی‌سیلیل پروپیل متاکریلات بر خواص مکانیکی و زیستی چوب‌پلیمر حاوی آکریلونیتریل بررسی گردید.

مواد و روش‌ها: الوار راست‌تار و فاقد عیب صنوبر، پس از خشک شدن به نمونه‌های آزمون مکانیکی و زیستی به‌ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D143 (۱۹۹۴) و EN 113 (۱۹۹۶) تبدیل شدند. نمونه‌های آزمونی در ۷ سطح شاهد، اصلاح‌شده با ترکیب سیلانی در زیرگروه‌های حاوی اتانول اسیدی تحت دمای ۱۱۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، اتانول حاوی آغازگر بنزوییل‌پراکساید و بدون آغازگر در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، آکریلونیتریل و سطح تلفیقی سیلان/آکریلونیتریل گروه‌بندی گردیدند. اشباع نمونه‌ها به روش خلاء-فشار در سیلندر آزمایشگاهی انجام شد. در پژوهش حاضر برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از آزمون آنالیز واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. همچنین گروه‌بندی میانگین‌ها نیز با آزمون چنددامنه‌ای دانکن انجام گردید.

یافته‌ها: بر اساس نتایج طیف‌سنجی زیرقرمز، اصلاح سیلان و حضور مونومر آکریلونیتریل در چندسازه تأیید شد. اصلاح سیلانی با تشکیل اتصالات عرضی، به افزایش مقاومت‌های مکانیکی چوب منتهی شد و در شرایط اسیدی و دمای بالاتر، بهبود معنی‌داری در مدول خمشی و سختی ایجاد گردید. افزودن آغازگر به اصلاح سیلانی موجب فعالیت بیشتر رادیکال‌های آزاد و پلیمر شدن بخشی از سیلان، علاوه‌بر اثر آن در اصلاح دیواره گردید. حضور پلیمر آکریلونیتریل در حفرات سلولی نیز به بهبود خواص مکانیکی انجامید. اصلاح تلفیقی با اصلاح دیواره، پر کردن حفره و برقراری پیوند در حضور جفت‌کننده سیلانی بین دیواره سلولی و پلیمر حفره‌ای، موجب توزیع یکنواخت‌تر نیرو و بهبود معنی‌دار اغلب مقاومت‌های مکانیکی در مقایسه با اصلاح منفرد با سیلان و آکریلونیتریل شد. حضور مونومر،

*مسئول مکاتبه: ghorbanimary@yahoo.com

مقاومت‌زیستی فرآورده حاصل را نیز بهبود بخشید. در محیط اسیدی، افزایش دما با اصلاح بیشتر دیواره‌ای، به افت معنی‌دار کاهش وزن انجامید. اصلاح سیلانی حاوی آغازگر، با اعمال هم‌زمان اصلاح دیواره‌ای و مسدود کردن فیزیکی مسیر ورود ریسه قارچ و رطوبت، به تنزل معنی‌دار کاهش وزن در مقایسه با سایر سطوح اصلاح منفرد منتهی شد. در اصلاح تلفیقی سیلان/ آکریلونیتریل، با ایجاد پیوند بین تعداد بیشتری سیلانول و گروه‌های هیدروکسیل چوب و حضور آکریلونیتریل در حفره، کمترین کاهش وزن در برابر پوسیدگی قارچی مشاهده شد.

نتیجه‌گیری کلی: ترکیب سیلانی باعث بهبود خواص مکانیکی و زیستی فرآورده چوب‌پلیمر حاصل از آکریلونیتریل گردید که این بهبود در دمای بیشتر و در شرایط اسیدی محسوس‌تر بود. اصلاح ترکیبی سیلان/ آکریلونیتریل بیشترین افزایش در اغلب خواص مکانیکی را ایجاد کرد. حضور آغازگر با کاهش وزن کمتر در تخریب قارچی، بهبود مقاومت زیستی در مقایسه با سایر سطوح اصلاح سیلانی را تشدید نمود. کمترین تخریب قارچی در اصلاح تلفیقی سیلان/ آکریلونیتریل اندازه‌گیری شد که علت آن را نیز می‌توان به پر شدن حفره و منافذ دیواره، رطوبت کمتر و در نهایت کاهش توانایی رشد، انتقال آنزیم و دسترسی ریسه‌های قارچ به دیواره نسبت داد.

واژه‌های کلیدی: آکریلونیتریل، ۳-تری‌متوکسی‌سیلیل پروپیل متاکریلات، چوب‌پلیمر، خواص‌زیستی، رفتار مکانیکی

مقدمه

ترکیبات تشکیل‌دهنده چوب با گروه‌های هیدروکسیل فراوان، آن را مستعد تغییر ابعاد، تخریب توسط میکروارگانیسم‌ها و کاهش عمر مفید چوب می‌نماید. اصلاح چوب با استفاده از مواد و روش‌های دوستدار طبیعت، بهبود خواص را در بسیاری از کاربردها به‌همراه دارد (۱۱ و ۱۳). یکی از روش‌های اصلاح، اشباع چوب به‌وسیله مونومرها و اعمال حرارت برای تهیه چوب‌پلیمر می‌باشد (۱۱). مونومر حفره‌ای آکریلونیتریل، مایعی شفاف است که به دلیل داشتن پیوند دوگانه و الکترونگاتیوی بالا، بسیار فعال می‌باشد (۱). تیمار چوب بلوط با کوپلیمر آلیل‌گلیسیدیل‌اتر^۱/ آکریلونیتریل نشان‌دهنده بهبود پایداری حرارتی فرآورده حاصل بوده است (۲۷). مونومرهای حفره‌ای با گروه‌های هیدروکسیل اجزای چوب پیوندی تشکیل نمی‌دهند. بنابراین، در چوب‌پلیمر حاوی مونومرهای وینیلی همچون آکریلونیتریل، به دلیل عدم اصلاح مکان‌های آب‌دوست

ساختار چوب، قدرت آب‌دوستی با کاهش سرعت جذب آب باقی می‌ماند (۱۵ و ۲۴). امکان تشکیل پیوند بین مونومرهای غیرقطبی و دیواره سلولی چوب طی اعمال اصلاح ترکیبی، موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خواهد شد (۲۵). جفت‌کننده‌ها با افزایش سازگاری و اتصال بین دیواره سلولی چوب و پلیمرهای حفره‌ای، نقش مهمی در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی چوب‌پلیمر ایفا می‌کنند (۴ و ۱۵). شنایدر و برینر (۱۹۸۵) در بررسی اثر جفت‌کنندگی ۳-تری‌متوکسی‌سیلیل پروپیل متاکریلات نشان دادند با افزایش WPG، ثبات ابعاد افزایش داشت (۲۶). دوی و ماجی (۲۰۱۳)، در اشباع چوب با کوپلیمر آکریلونیتریل/ استایرن و جفت‌کننده ۳-تری‌متوکسی‌سیلیل پروپیل متاکریلات اظهار داشتند حضور جفت‌کننده بهبود چشمگیری در خواص چوب‌پلیمر از جمله: مقاومت به آتش، مقاومت در برابر جذب آب و کارایی ضدواکسیدگی نشان داد (۷). نیکخواه شه‌میرزادی و همکاران (۱۳۹۴)، در اصلاح چوب صنوبر با مونومر متیل‌متاکریلات و

1- Allyl glycidyl ether

جفت‌کننده مالئیک‌انیدرید، بهبود خواص مکانیکی متعاقب کاهش قطبیت چوب، تشکیل پیوند عرضی بین چوب و پلیمر و انتقال یکنواخت‌تر تنش را گزارش کردند (۲۰). از جمله عوامل جفت‌کننده، ترکیبات سیلانی است که به‌طور گسترده برای اصلاح سطح بین مواد غیرمشابه استفاده می‌شود (۲). در اصلاح چوب با ۳- تری‌متوکسی‌سیلیل پروپیل‌متاکریلات، گروه‌های متوکسی به سیلانول هیدرولیز، و با گروه‌های هیدروکسیل دیواره سلولی چوب پیوند کوالانسی تشکیل می‌دهند (۱۰). میلیتز و همکاران (۲۰۰۴)، در بررسی اثر سه نوع ماده سیلانی به همراه کاتالیست اتانول اسیدی در تهیه چوب پلیمر اظهار داشتند خواص فیزیکی و زیستی چوب پلیمر در نمونه‌های حاوی ترکیب سیلانی افزایش داشت (۸). اصلاح چوب کاج با ترکیب سیلانی در تهیه چوب پلیمر متیل‌متاکریلات، نشان‌دهنده بهبود خواص فیزیکی چندسازه حاصل بود (۱۰). نیکخواه شه‌میرزادی و همکاران (۱۳۹۴) در بررسی اثر دما در اصلاح چوب با مالئیک‌انیدرید، کاهش محسوس‌تر گروه‌های هیدروکسیل و متعاقباً قطبیت چوب تحت دمای بالاتر، برقراری پیوندهای عرضی بیشتر و بهبود خواص مکانیکی را گزارش نمودند (۲۱). همچنین در محیط اتانول معمولی متعاقب واکنش‌های خودتراکمی، درشت مولکول‌های تشکیل شده قادر به نفوذ به دیواره سلولی و جلوگیری از واکنش آب با آن نمی‌باشند (۱۹). در تحقیقات گذشته اثر مثبت اصلاح

با ترکیب سیلانی بر ویژگی‌های چوب نشان داده‌شد، ولیکن تاکنون تحقیقی در خصوص چگونگی اثر شرایط مختلف اصلاح با سیلان بر ویژگی‌های فرآورده و ارزیابی اثر تلفیقی این ماده و مونومر آکریلونیتریل انجام نشده است. این احتمال وجود دارد که افزایش دما یا شرایط اسیدی در واکنش اصلاح دیواره با جفت‌کننده سیلانی، با بهبود جانشینی گروه‌های هیدروکسیل، اثر مطلوب‌تری بر خواص فرآورده داشته‌باشد. در پژوهش حاضر، با هدف اصلاح کارآمد، شرایط مختلف دما و اسیدیته در واکنش اصلاح چوب صنوبر با ترکیب سیلانی و اثر آن بر ویژگی‌های مکانیکی و زیستی فرآورده چوب‌پلیمر آکریلونیتریل ارزیابی گردید.

مواد و روش‌ها

گرده‌بینه‌های صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltooides*) که راست‌تار و فاقد هر گونه عیب بودند، به الوار تبدیل و پس از خشک شدن، به نمونه‌های آزمایشی تعیین خواص مکانیکی و زیستی به‌ترتیب بر اساس استانداردهای (۱۹۹۴) ASTM D143 و (۱۹۹۶) EN 113 تبدیل شدند (۲۸ و ۳۰). به‌منظور سهولت در انجام نتایج، از علامت اختصاری برای تیمار مطابق جدول ۱ استفاده شد: در این بررسی برای هر تیمار ۵ تکرار برای آزمون مکانیکی و ۱۰ تکرار برای آزمون زیستی تهیه گردید.

جدول ۱- کدگذاری سطوح مختلف تیمار.

Table 1. Coding different treatment levels.

نام کامل اصلاح Full name of modification	کد اصلاح Modification index
شاهد	Control
ترکیب سیلان / اتانول اسیدی / ۱۱۰ درجه‌سانتی‌گراد	MS/AEt/110
ترکیب سیلان / اتانول اسیدی / ۱۵۰ درجه‌سانتی‌گراد	MS/AEt/150
ترکیب سیلان / اتانول معمولی / ۱۵۰ درجه‌سانتی‌گراد	MS/Et/ 150
ترکیب سیلان / اتانول معمولی / بنزوییل پراکساید / ۱۵۰ درجه‌سانتی‌گراد	MS/Et/BP/150
آکریلونیتریل / بنزوییل پراکساید	Ac/BP
ترکیب سیلان / اتانول اسیدی / ۱۵۰ درجه‌سانتی‌گراد / آکریلونیتریل / بنزوییل پراکساید	MS/AEt/150/Ac/BP

اتانول وارد سیلندر گردید و متعاقباً فشاری معادل ۸ بار برای ۲ ساعت اعمال گردید. ترکیب سیلانی سطوح MS/Et/150 و MS/Et/BP/150 در اتانول معمولی و برای سطح MS/Et/BP/150 به میزان ۲ درصد وزنی ۳-تری متوکسی سیلیل پروپیل متاکریلات مورد استفاده در محلول، بنزوئیل پراکساید اضافه گردید. به منظور خروج حلال، نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در آن تحت دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس، نمونه‌های پیچیده در فویل برای سطح MS/AEt/110 تحت دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و سایر سطوح اصلاح با سیلان، تحت دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۶ ساعت قرار داده شدند. در مرحله دوم جهت رسیدن به ترکیب MS/AEt/150/Ac/BP و Ac/BP نیز به ترتیب نمونه‌های خشک شده MS/AEt/150 و نمونه‌های خشک فاقد اصلاح سیلانی، با آکریلونیتریل حاوی آغازگر بنزوئیل پراکساید به مقدار ۲ درصد وزنی مونومر به روش خلاء- فشار اشباع شدند. پس از اتمام فرآیند اشباع، به منظور پلیمریزاسیون مونومر، نمونه‌های پیچیده در فویل به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد، و سپس نمونه‌های بدون فویل به مدت ۲۴ ساعت، تحت دمای 103 ± 2 درجه سانتی‌گراد در آن قرار داده شدند. وزن و ابعاد خشک نمونه‌ها به ترتیب به وسیله ترازویی با دقت ۰/۰۰۱ گرم و کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شدند.

طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوریه (FTIR): برای ارزیابی ساختار شیمیایی نمونه‌های شاهد و تیمار شده به وسیله طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوریه پودر چوب با اندازه کوچکتر از مش ۸۰ تهیه شد. سپس قرص‌های کوچکی از آرد خشک چوب و

در این تحقیق از ۳- تری متوکسی سیلیل پروپیل متاکریلات به عنوان ترکیب سیلانی با جرم مولکولی ۲۴۸/۳۵ گرم بر مول، نقطه جوش ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و دانسیته ۱/۰۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب از شرکت سیگما آلد ریچ، مونومر وینیلی آکریلونیتریل تهیه شده از شرکت دایجونگ، با نقطه جوش ۷۷/۳ درجه سانتی‌گراد و دانسیته ۰/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و بنزوئیل پراکساید با دانسیته ۲۲/۱۹ سانتی‌متر مکعب و نقطه جوش ۱۱۲-۱۱۵ درجه سانتی‌گراد به عنوان آغازگر واکنش پلیمر شدن از شرکت مرک، استفاده شد. همچنین از اتانول به عنوان حلال با نقطه جوش ۷۸/۳ درجه سانتی‌گراد و دانسیته ۰/۷۹۳-۰/۷۹۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب و اسید هیدروکلریک با نقطه جوش ۸۵/۰۵ درجه سانتی‌گراد و دانسیته ۱/۴۹۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شد. این دو ماده از شرکت مرک تهیه گردیدند.

آماده‌سازی اصلاح‌کننده‌ها: در پژوهش حاضر از دو اصلاح‌کننده استفاده گردید. محلول ۳- تری متوکسی- سیلیل پروپیل- متاکریلات به عنوان اصلاح‌کننده اول، با غلظت ۲۰ درصد حجمی نسبت به حلال اتانول آماده گردید. برای اسیدی کردن اتانول، به ازای ۱ لیتر، ۱ میلی‌گرم (۲۰ قطره) اسید هیدروکلریک اضافه شد و pH محلول به ۱/۹۲ رسید (۸ و ۲۹). در سطح اصلاح سیلانی حاوی بنزوئیل پراکساید، نیز بنزوئیل پراکساید به میزان دو درصد وزنی سیلان مورد استفاده در محلول اضافه گردید. اصلاح‌کننده دوم، مونومر آکریلونیتریل حاوی دو درصد وزنی بنزوئیل پراکساید (آغازگر واکنش پلیمر شدن) بود.

اصلاح نمونه‌ها: فرآیند اصلاح با ترکیب سیلانی در حلال اتانول اسیدی به روش خلاء- فشار به وسیله سیلندر آزمایشگاهی انجام شد. پس از اعمال خلایی به اندازه ۰/۷- بار و به مدت ۳۰ دقیقه، محلول سیلان/

آماده‌سازی و استریل محیط کشت مالت آگار، قارچ پوسیدگی سفید به محیط کشت انتقال داده شد. در مرحله بعد، انتقال نمونه‌های چوبی استریل شده در اتوکلاو، به درون ظروف کوله حاوی قارچ انجام گردید و به مدت ۱۶ هفته در دمای 22 ± 1 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۷۵ درصد قرار داده شدند. پس از ۱۶ هفته نمونه‌ها از ظروف خارج شده و بعد از زدودن ریشه‌ها از سطوح، نمونه‌ها جهت تعیین رطوبت و کاهش وزن توزین و درون آون تحت دمای 103 ± 2 درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند.

نتایج و بحث

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از آزمون آنالیز واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. همچنین گروه‌بندی میانگین‌ها نیز با آزمون چنددامنه‌ای دانکن انجام گردید. بر اساس نتایج تجزیه واریانس، خواص مکانیکی و مقاومت به پوسیدگی سطوح مختلف تیمار اختلاف آماری معنی‌داری در سطح اعتماد ۹۵ درصد نشان دادند. مقادیر انحراف معیار و گروه‌بندی دانکن خواص مکانیکی و مقاومت به پوسیدگی تیمارها در جدول ۲ گزارش گردید.

برمیدپتاسیم تهیه گردید. در نهایت قرص‌های تهیه شده توسط دستگاه اسپکتروسکوپی ساخت شرکت Bruker، مدل VECTOR 22 مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج در طول موج $4000-500 \text{ cm}^{-1}$ ثبت شد.

آزمون مکانیکی: در این تحقیق اندازه‌گیری خواص مکانیکی شامل مقاومت خمشی، فشار موازی الیاف و سختی بر اساس استاندارد ASTM D143(۱۹۹۴) به‌وسیله دستگاه SANTAM- STM- 20 انجام گرفت. آزمون خمش روی نمونه‌هایی به ابعاد $25 \times 25 \times 410$ (شعاعی*مماسی*طول) میلی‌متر و با سرعت بارگذاری $1/3$ میلی‌متر بر دقیقه، آزمون فشار موازی الیاف روی نمونه‌هایی به ابعاد $25 \times 25 \times 100$ (شعاعی*مماسی*طول) میلی‌متر و سرعت بارگذاری $0/3$ میلی‌متر بر دقیقه و آزمون سختی نیز روی نمونه‌هایی به ابعاد $50 \times 50 \times 150$ (شعاعی*مماسی*طول) میلی‌متر و سرعت بارگذاری 6 میلی‌متر بر دقیقه انجام شد.

آزمون مقاومت زیستی: مقاومت‌زیستی نمونه‌ها در معرض قارچ پوسیدگی سفید (*Trametes versicolor*) بر اساس استاندارد EN 113 (1996) تعیین شد. برای این منظور نمونه‌هایی به ابعاد $25 \times 15 \times 50$ (شعاعی*مماسی*طول) میلی‌متر، با ده تکرار برای هر سطح تیمار، تهیه شد. پس از

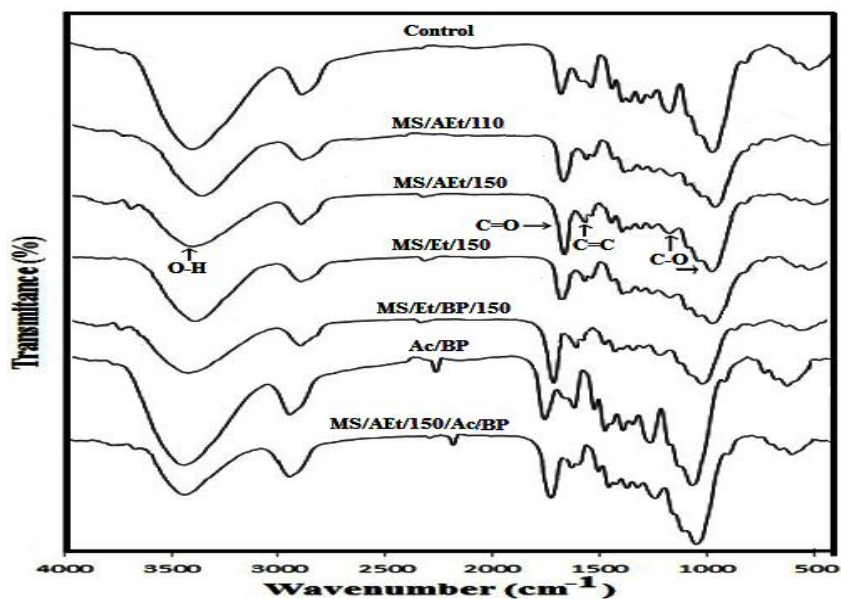
جدول ۲- میانگین نتایج خواص فیزیکی در سطوح مختلف تیمار.

Table 2. Averages of physical properties in different treatment levels.

MS/AEt/150/Ac/BP	Ac/BP	MS/Et/BP/150	MS/Et/150	MS/AEt/150	MS/AEt/110	شاهد Control	تیمار Treatment	ویژگی‌ها Properties
36.24 a (4.03)	26.50 b(1.91)	24.40 c (1.81)	17.97 c(1.18)	22.98 c (0.95)	24.04 b (1.15)	-	-	افزایش وزن Weight Percent Gain (%)
0.64 a(0.03)	0.56 b(0.03)	0.44 de(0.02)	0.41 c(0.03)	0.43 e(0.02)	0.46 d(0.01)	0.37 f(0.01)	-	دانسیته Density(gr/cm^3)
132.28 a(8.96)	97.84 b(7.11)	78.21 c(7.26)	82.41 c(3.70)	87.64 bc(3.13)	93.19 b(7.23)	-	-	ماندگاری Retention (Kg/m^3)

حروف انگلیسی معرف گروه‌بندی دانکن و اعداد داخل پرانتز معرف انحراف معیار است.

English letters indicate grouping Duncan and the numbers in parentheses represent standard deviation.



شکل ۱- طیف تبدیل فوریه زیرقرمز سطوح مختلف: سطوح شاهد و اصلاح شده.

Figure 1. FTIR different treatment levels: control and modified levels.

بدون تغییر گروه‌های هیدروکسیل بوده است (۲۵). پیک ناحیه 1732cm^{-1} مربوط به گروه کربونیل چوب است. در سطوح حاوی ترکیب سیلانی، با افزایش گروه‌های کربونیل پیوند شده با دیواره‌های سلولی چوب، شدت پیک گروه کربونیل در مقایسه با سطح شاهد افزایش یافت. شدت بیشتر این پیک در سطح سیلانی حاوی آغازگر احتمالاً به علت پلیمر شدن بخشی از سیلان در چوب است که با پلیمر شدن آکریلات به تکرار گروه کربونیل انجامید.

ایجاد پیک در ناحیه 2246cm^{-1} در تیمارهای حاوی مونومر آکریلونیتریل، مربوط به پیوند $(\text{C}\equiv\text{N})$ می‌باشد که در ساختار پلیمر آکریلونیتریل وجود دارد (۷). پیک‌های ناحیه 2950cm^{-1} و 1200cm^{-1} به ترتیب مربوط به ارتعاشات کششی پیوند (C-H) آلیفاتیک و ارتعاشات کششی پیوند (C-O) الکی و اتری و استری می‌باشد که در تمامی سطوح مشاهده شده است (۷).

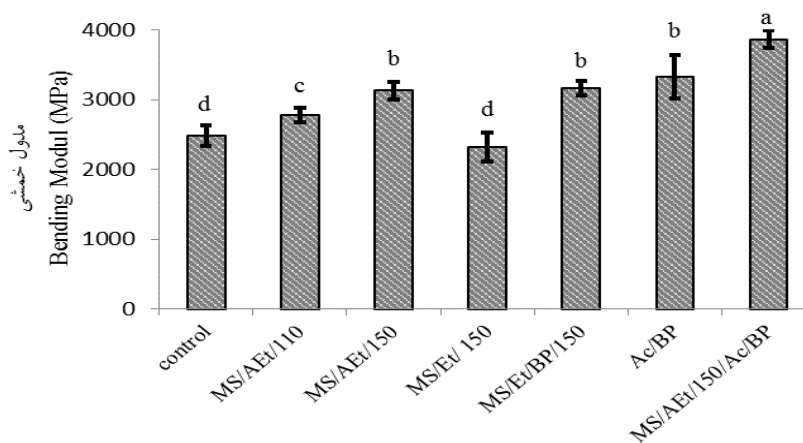
خواص خمشی: شکل ۲ و ۳ اثر سطوح مختلف اصلاح را بر مدول و مقاومت خمشی چوب صنوبر

طیف زیرقرمز: شکل ۱ طیف‌سنجی زیرقرمز نمونه‌های شاهد و سطوح مختلف اصلاح را نشان می‌دهد.

طبق نتایج طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوریه، پیک عدد موج 3421cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی گروه هیدروکسیل چوب می‌باشد که کمترین و بیشترین شدت آن به ترتیب مربوط به سطح تلفیقی MS/AEt/150/Ac/BP و سطح شاهد بود. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، افزایش دما باعث کاهش شدت پیک مربوط به گروه هیدروکسیل گردید، زیرا با افزایش دما گروه‌های هیدروکسیل بیشتری با ترکیب سیلانی وارد واکنش می‌شود (۲۱). علت کاهش شدت این پیک در شرایط اسیدی نسبت به شرایط خنثی را نیز می‌توان به بالا بودن سرعت واکنش سیلان‌ها با گروه‌های هیدروکسیل چوب در شرایط اسیدی نسبت داد (۸). عدم تغییر پیک مورد بررسی در تیمار AC/BP در مقایسه با شاهد نشان می‌دهد که گروه‌های هیدروکسیل دیواره سلولی آزاد بوده و حضور پلیمر تنها باعث پیر شدن حفره سلولی،

نشان داد. بر اساس نتایج، مدول خمشی در سطح تلفیقی MS/AEt/150/Ac/BP با ۵۵/۹۹ درصد افزایش در مقایسه با سطح شاهد، بیشترین بهبود را داشته است. بیشترین مقاومت خمشی در نمونه‌های

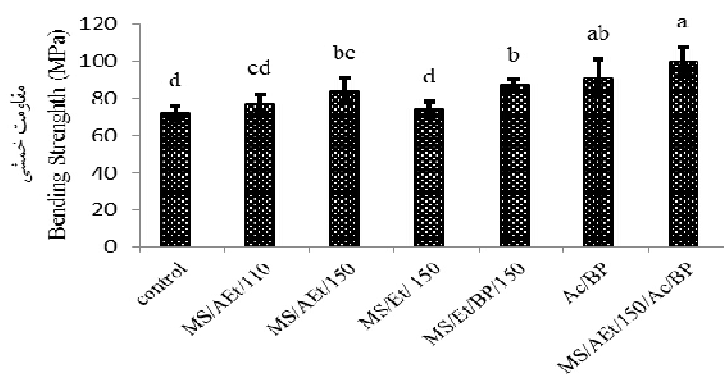
سطح تلفیقی MS/AEt/150/Ac/BP به مقدار ۹۹/۸۹ مگاپاسکال و کمترین مقاومت خمشی در نمونه‌های شاهد به مقدار ۷۱/۷۸ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد.



شکل ۲- مدول خمشی سطوح شاهد و اصلاح‌شده.

(حروف انگلیسی معرف گروه‌بندی دانکن می‌باشد.)

Figure 2. Bending modul of control and modified levels (English letters indicate Duncan grouping)



شکل ۳- مقاومت خمشی سطوح شاهد و اصلاح‌شده

(حروف انگلیسی معرف گروه‌بندی دانکن می‌باشد.)

Figure 3. Bending strength of control and modified levels (English letters indicate Duncan grouping)

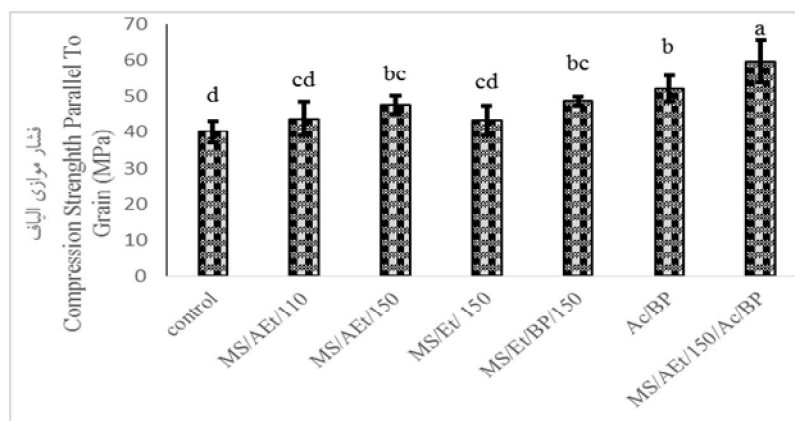
در سطح چوب با مونومرهای سیلانی و تشکیل اتصالات عرضی، به افزایش مقاومت‌های مکانیکی منتهی شد (۱۷). بهبود خواص مکانیکی می‌تواند به‌دلیل توزیع یکنواخت سیلان در دیواره باشد (۱۹).

در سطح اصلاح با اتانول معمولی بدون حضور آغازگر، مقاومت خمشی نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری نشان نداد. در اصلاح سیلان، افزایش دما از ۱۱۰ به ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در محیط اسیدی، به

حفره و برقراری پیوند در حضور جفت‌کننده سیلانی بین دیواره سلولی و پلیمر حفره‌ای، موجب توزیع یکنواخت‌تر نیرو و بهبود مقاومت خمشی در مقایسه با سطوح اصلاح سیلانی شد، که با سطح AC/BP اختلاف آماری معنی‌داری نشان نداد.

فشار موازی الیاف: میانگین فشار موازی الیاف در سطح شاهد ۴۰/۰۴ مگاپاسکال و در سطوح MS/Et/BP/150, Ac/BP, MS/AEt/150/Ac/BP, MS/AEt/150, MS/AEt/110, Control و MS/Et/150 به ترتیب ۴۸/۸۵، ۳۰/۱۱، ۲۱/۲۲، ۱۸/۹۰، ۸/۹۴ و ۷/۷۶ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (شکل ۴).

واکنش بیشتر پلی‌سیلوکسان‌ها با گروه‌های هیدروکسیل و تشکیل پیوندهای دوگانه منجر شد (۱۲). مقاومت کمتر در سطح MS/Et/150 را می‌توان به کندی واکنش اصلاح در شرایط خنثی نسبت داد که بهبود مقاومت خمشی معنی‌داری در مقایسه با سطح شاهد ایجاد نکرد. حضور اسید طی واکنش اصلاح، باعث افزایش سرعت واکنش سیلان‌ها با گروه‌های هیدروکسیل چوب شد. افزودن آغازگر به اصلاح سیلانی موجب فعالیت بیشتر رادیکال‌های آزاد و پلیمر شدن بخشی از سیلان، علاوه بر اثر آن در اصلاح دیواره گردید (۱۲). در سطوح حاوی آکریلونیتریل، حضور پلیمر در حفرات سلولی نیز به بهبود خواص خمشی انجامید. در سطح تلفیقی MS/AEt/150/Ac/BP، اصلاح دیواره، پر شدن



شکل ۴- اثر سطوح مختلف اصلاح بر مقاومت فشار موازی الیاف

(حروف انگلیسی معرف گروه‌بندی دانکن می‌باشد).

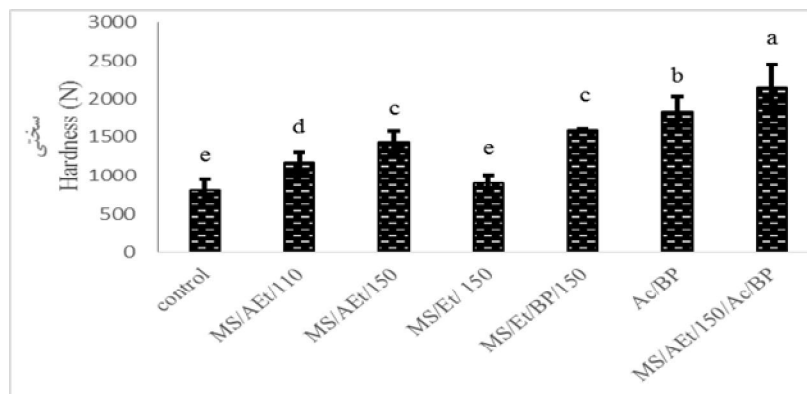
Figure 4. Effect of different modification levels on compression strength parallel to grain (English letters indicate Duncan grouping).

تنش از ماده زمینه چوبی به علت حضور جفت‌کننده نسبت داد (۱۵). فقدان چسبندگی بین پلیمر و حفره در سطح AC/BP نسبت به تیمار MS/AEt/150/Ac/BP، از انتقال نیرو در ساختار چوب پلیمر ممانعت می‌کند (۲۶). در نمونه‌های تیمار AC/BP، پلیمر آکریلونیتریل در دیواره سلولی وجود

مقاومت فشاری تحت تاثیر اتصال بین الیاف است که واکنش‌دهی دیواره در صورت عدم برقراری اتصالات عرضی ممکن است موجب کاهش آن گردد (۵). در بین تیمارها، بیشترین میزان مقاومت مربوط به تیمار MS/AEt/150/Ac/BP است که دلیل این امر را می‌توان پر شدن حفرات سلولی با پلیمر و انتقال

انجامید. در سطح MS/Et/150 نیز کمترین مقاومت فشاری به مقدار ۴۳/۱۴ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. بین سطوح مختلف اصلاح سیلانی اختلاف آماری معنی‌داری مشاهده نگردید. شکل ۵ سختی نمونه‌های شاهد و سطوح مختلف اصلاح را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج بیش‌ترین سختی در سطح MS/AEt/150/Ac/BP به مقدار ۲۱۴۷/۳۱ نیوتن و کم‌ترین مقدار سختی در سطح شاهد به مقدار ۸۰۳/۰۹ نیوتن تعیین شد.

ندارد، اما حضور آن در حفره سلولی به‌عنوان مانع فیزیکی در برابر فشار وارد عمل کرده و باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های شاهد گردید (۲۲). بهبود مقاومت فشار موازی الیاف سطح MS/Et/BP/150 در مقایسه با شاهد را می‌توان به تشکیل پلیمر در حفره و برقراری پیوند شیمیایی با دیواره اصلاح‌شده نسبت داد که ساختار یکنواخت‌تری به‌وجود آورده است (۱۲ و ۲۶). اگرچه تیمار در سطح MS/AEt/150 باعث واکنش‌دهی دیواره سلولی چوب می‌شود، ولیکن برقراری اتصال عرضی به بهبود مقاومت فشار موازی الیاف در مقایسه با شاهد



شکل ۵- اثر سطوح مختلف اصلاح بر سختی

(حروف انگلیسی معرف گروه‌بندی دانکن می‌باشد).

Figure 5. Effect of different modification levels on hardness (English letters indicate Duncan grouping).

بیشتر سیلوکسان‌ها با گروه‌های هیدروکسیل دیواره سلولی و برقراری پیوندهای محکم‌تر در دمای بالاتر گردید. در سطح MS/Et/150 مقدار سختی کمتر از سایر سطوح اصلاح بود، زیرا در محیط خنثی و عدم حضور آغازگر واکنش اصلاح به‌کندی صورت می‌گیرد و گروه‌های هیدروکسیل کمتری درگیر شد. سختی در محیط اتانول اسیدی بیشتر از اتانول معمولی بود، چون حضور اسید به‌عنوان کاتالیزور، واکنش گروه‌های هیدروکسیل چوب با ترکیب سیلانی را تسریع می‌کند و در نتیجه باعث می‌شود که

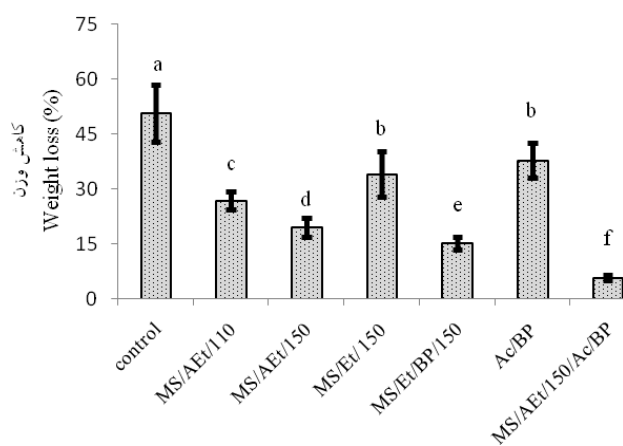
سختی حاکی از توانایی یک ماده برای مقاومت در برابر تغییر شکل است. سختی چوب پلیمر بستگی به سختی پلیمر و میزان جذب مونومر دارد. نوع پلیمر، اتصال‌دهنده‌های عرضی، روش و میزان پلیمرشدن روی سختی پلیمر تأثیر می‌گذارد. اصلاح با مونومر وینیلی، بهبود معنی‌داری در مقاومت به سختی چوب ایجاد کرد (۱۶).

افزایش دما از ۱۱۰ به ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در اصلاح سیلانی، افزایش سختی را به همراه داشت، زیرا افزایش دما باعث افزایش سرعت اصلاح، واکنش

پوسیدگی قارچی سطح MS/Et/150 نیز ۵۵/۴۸ درصد نسبت به سطح حاوی آغازگر و ۴۲/۹۸ درصد نسبت به سطح حاوی اتانول اسیدی بیشتر است. در محیط اتانول اسیدی، افزایش دما به ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با اصلاح بیشتر دیواره‌ای در مقایسه با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد، به افت معنی‌دار کاهش وزن انجامید. کاهش وزن نمونه‌های اصلاح‌شده در سطح MS/Et/150 (محیط خنثی) بیش از سایر سطوح اصلاح سیلانی بود و با سطح Ac/BP که فاقد اصلاح دیواره‌ای بود، اختلاف معنی‌داری نشان نداد. در سطح MS/Et/BP/150 نیز حضور آغازگر، با اعمال هم‌زمان اصلاح دیواره‌ای و مسدود کردن فیزیکی مسیر ورود ریسه قارچ و رطوبت، به تنزل معنی‌دار کاهش وزن در مقایسه با محیط‌های اسیدی منتهی شد.

گروه‌های هیدروکسیل بیشتر در واکنش شرکت کرده، و طی واکنش جانشینی هسته‌دوستی با خروج اجزای خنثی متانولی، پیوند کوالانسی Si-O-C تشکیل شود (۱۹). سطح تیمار MS/Et/BP/150 در مقایسه با سطوح MS/Et/150 و MS/AEt/110، با پلیمر شدن آکریلات‌ها در حضور آغازگر، که در نتایج طیف‌سنجی نیز با افزایش شدت پیک گروه کربونیل تأیید گردید، به بهبود سختی منتهی شد.

مقاومت زیستی: اصلاح با مونومر، مقاومت‌زیستی فرآورده حاصل را بهبود بخشید. کاهش وزن نسبت به وزن خشک چوب، از ۵۰/۶۲ درصد در سطح شاهد به ۵/۷۹ درصد در سطح MS/AEt/150/Ac/BP تنزل یافت، و افزایش دما از ۱۱۰ به ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، به دلیل بهبود مقاومت در برابر قارچ پوسیدگی سفید، منجر به افت ۳۸/۴۴ درصدی کاهش وزن گردید. کاهش وزن ناشی از



شکل ۶- اثر سطوح مختلف اصلاح بر کاهش وزن نمونه‌ها در معرض قارچ پوسیدگی سفید (حروف انگلیسی معرف گروه‌بندی دانکن می‌باشد).

Figure 6. Effect of different modification levels on samples weight loss exposed to white rot fungi (English letters indicate grouping Duncan).

روزنه‌های دیواره، سدی در راه نفوذ و حرکت ریسه‌های قارچ ایجاد می‌کند. پر شدن گذرگاه‌های فوق، موجب کند شدن حرکت مولکول‌های آب و کاهش نم‌پذیری چوب‌پلیمر می‌شود، که به جلوگیری

دلیل مقاومت به پوسیدگی چوب‌پلیمر سمیت مونومرهای به‌کار رفته نیست، زیرا پس از تبدیل مونومر به پلیمر، این سمیت از بین می‌رود، بلکه وجود پلیمر در داخل حفره‌های سلولی و ریز

وزن بیشتری مشاهده شد. این نشان‌دهنده حضور بیشتر ترکیبات سیلانی در حفره نسبت به دیواره است (۱۲). در سطح MS/AEt/150/Ac/BP سیلانول‌های بیشتری با گروه‌های هیدروکسیل چوب پیوند ایجاد می‌کنند و حضور آکریلونیتریل در حفره نیز باعث پایداری نمونه‌ها در برابر قارچ می‌گردد، بنابراین بیشترین و مؤثرترین حفاظت در برابر پوسیدگی قارچی در نمونه‌های تیمار تلفیقی MS/AEt/150/Ac/BP مشاهده شد.

نتیجه‌گیری کلی

استفاده از ترکیب سیلانی و مونومر آکریلونیتریل باعث بهبود خواص مکانیکی و زیستی فرآورده حاصل گردید. در بین سطوح مختلف تیمار، بیشترین بهبود خواص مکانیکی را تیمار ترکیب سیلانی و آکریلونیتریل، به‌علت برهمکنش بیشتر سیلانول‌های ترکیب سیلانی با گروه‌های هیدروکسیل چوب و همچنین حضور آکریلونیتریل در حفره سلول چوبی تعیین شد. در بررسی مقاومت در برابر پوسیدگی از طریق تعیین کاهش وزن و رطوبت نمونه‌ها در معرض قارچ پوسیدگی سفید *Trametes versicolor*، سطح تلفیقی سیلان و آکریلونیتریل افزایش محسوسه نسبت به شاهد داشت که علت آن را می‌توان به پر شدن حفره و منافذ دیواره، رطوبت کمتر و در نهایت کاهش توانایی رشد، انتقال آنزیم و دسترسی ریشه‌های قارچ به دیواره نسبت داد.

از رشد و گسترش قارچ‌ها می‌انجامد (۱۱). نمونه‌های تیمارهای MS/Et/150 و Ac/BP بیشترین کاهش وزن را بعد از سطح شاهد نشان دادند. مونومر وینیلی آکریلونیتریل با قطبیت کمتر از چوب، با گروه‌های هیدروکسیل پلیمر سلولز تعامل کمی داشته و تنها حفره‌های سلولی را پر می‌کند. در این صورت دیواره سلولی توانایی جذب آب و بستر مناسب برای رشد قارچ را داراست. این نتیجه با گزارش کاکي و قربانی (۱۳۹۲) مطابقت دارد (۱۴). کاهش وزن نمونه‌های اصلاح شده با سیلان کمتر از اصلاح با آکریلونیتریل بود، زیرا آلکوکسی‌سیلان‌ها با نفوذ به دیواره سلولی و ایجاد واکنش‌دهی، باعث پر شدن منافذ ریز دیواره و کاهش دسترسی میسیلیوم‌های قارچ به دیواره سلول چوبی می‌گردند که سرعت تخریب قارچی را کند می‌نمایند (۱۸). از سوی دیگر واکنش گروه‌های هیدروکسیل با سیلان، موجب کاهش جذب رطوبت و بهبود مقاومت در برابر پوسیدگی می‌گردد. کاهش وزن ناشی از تخریب قارچی با افزایش دما از ۱۱۰ به ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، در نتیجه واکنش بیشتر آلکوکسی‌سیلان‌ها با گروه‌های هیدروکسیل چوب، کاهش یافت. همچنین حضور آغازگر با پلیمر شدن بخشی از سیلان در منافذ، علاوه بر اصلاح دیواره‌ای، به کاهش معنی‌دار افت وزن در مقایسه با سایر سطوح اصلاح سیلانی منتهی شد. نکته قابل توجه این که در سطح اصلاح با دمای کمتر و همچنین سطح اصلاح حاوی اتانول معمولی علی‌رغم WPG بالا، کاهش

منابع

1. Bader, M., and Wrbitzky, R. 2006. Follow-up biomonitoring after accidental exposure to acrylonitrile- Implications for protein adducts as a does monitor for short-term exposure. *Toxicology Letters*. 162: 2.125-131.
2. Bengtsson, M., and Oksman, K. 2006. Silan cross-linked wood plastic composites: Processing and properties. *Composites Science and Technology*. 66: 2177-2186.
3. Bodirlau, R., Teaca, C.A., and Spiridon, I. 2009. Preparation and characterization of composites comprising modified hard wood and wood polymers/poly (vinyl chloride). *Bioresources*. 4: 4.1285-1304.

4. Das, O., Sarmah, A.K., and Bhattacharyya, D. 2015. A sustainable and resilient approach through biochar addition in wood polymer composites. *Science of Total Environment*. 15: 326-336.
5. Devi, R.R., and Maji, T.K. 2002. Studies of properties of rubber wood with impregnation of polymer. *Bulletin of Materials Science*. 25: 6.527-531.
6. Devi, R.R., and Maji, T.K. 2011. Preparation and Characterization of Wood/Styrene-Acrylonitrile Copolymer/MMT Nanocomposite. *Journal of Applied Polymer Science*. 122: 2099–2109.
7. Devi, R., and Maji, T. 2013. In-Situ Polymerized Wood Polymer Composite: effect of additives and nanoclay on the thermal, mechanical properties. *Material Research*. 16: 04.954-963.
8. Donath, S., Militz, H., and Mai, C. 2004. Wood modification with Alkoxysilanes. *Wood Science Technology*. 38: 555-566.
9. Ellis, D.W. 2000. Wood-Polymer Composites: Review of processes and properties, *Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology*. Section A. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 353: 1.75-84.
10. Elvy, Sh.B., Dennis, G.R., and NG, L.T. 1995. Effects of coupling agent on the physical properties of wood-polymer composites. *Journal of Materials Processing Technology*. 48: 365-371.
11. Habibzadeh, D., Omidvar, A., Mastery Farahani, M., and Mashkoo, M. 2013. Introduction of wood-polymer composite and its use as an eco-friendly product. In: *The Second National Conference of Sustainable Development of Agriculture and Healthy Environment*. Sept. 12 Hamedan, Iran. 10p.
12. Hill, C.A.S., Mastery Farahani, M.R., and Hale, M.D.C. 2004. The use of organo alkoxysilane coupling agents for wood preservation. *Holzforschung*. 58: 316-325.
13. Jahantigh, H., Omidvar, A., and Khazaian, A. 2013. Distribution of Polymer in environmentally friendly modified wood. In: *The first national conference of protection and planning of environment*. Feb. 21 Hamedan, Iran. Pp: 1-6.
14. Kaki, R., and Ghorbani, M. 2013. Investigation of Water Absorption and Dimensional Stability of Beech Impregnated with Methylmethacrylate. *Iranian Journal of Natural Resources*. 66: 3.329-338. (In Persian)
15. Li, Y., Meng, X., Li, J., and Liu, Y. 2010. Performance of Wood-Polymer Composite Prepared by In-situ Polymerization of Styrene. *Applied Mechanics and Materials*. 26-28: 181-185.
16. Meyer, J. 1981. Wood-Polymer Materials: State of the Art. *Wood Science Technology*. 14: 2.49-54.
17. Militz, H., Donath, S., and Mai, C. 2006. Creating water-repellent effects on wood by treatment with silanes. *Holzforschung*. 60: 40-46.
18. Militz, H., and Mai, C. 2004. Modification of wood with silicon compounds. Treatment systems based on organic silicon compounds– a review. *Wood Science and Technology*. 37: 453-461.
19. Militz, H., Xie, Y., Hill, C.A.S., Zefang, X., and Mai, C. 2010. Silane coupling agents used for natural fiber/ polymer composites. *Composites: Part A*. 41: 806-819.
20. Nikkha, A., Ghorbani, M., and Amininasab, S.M. 2015. Investigation on the mechanical and decay resistance properties of wood modified with maleic anhydride and methyl metacrylate. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*. 30: 3.491-502. (In Persian)
21. Nikkha, A., Ghorbani, M., and Amininasab, S.M. 2015. Determination the optimal conditions of poplar wood treatment with maleic anhydride and physical characteristics of the product. Accepted in *Journal of Wood and Forest Science and Technology*. (In Persian)

22. Omidvar, A., and Talaeepour, S. 2007. Investigation of physical properties of wood-polymer composites from palownia, aspen, maple, and hornbeam species. *Pajouhesh and Sazandegi*. 77: 85-91. (In Persian)
23. Pavia, D.L., Lampman, G.M., Kriz, G.S., and Vyvyan, J.A. 2008. Introduction to spectroscopy. Brooks Cole, USA, 745p.
24. Rowell, R.M. 2006. Advances and Challenges of Wood Polymer Composites. In 8th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium. November 20 -23. Kuala Lumpur, Malaysia.
25. Saiful Islam, Md., Hamdan, S., Jusoh, I., Rahman, Md.R., and Talib, Z.A. 2011. Dimensional Stability and Dynamic Young's Modulus of Tropical Light Hardwood Chemically Treated with Methyl Methacrylate in Combination with Hexamethylene Diisocyanate Cross-Linker. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 50: 3900–3906.
26. Schneider, M.H., and Brebner, K.I. 1985. Wood-polymer combinations: Bonding of alkoxy silane coupling agents to wood. *Wood Science and Technology*. 19: 1.75-81.
27. Solpan, D., and Guven, O. 1998. Comparison of the dimensional stabilities of oak and cedar wood preserved by in situ copolymerization of allylglycidyl ether with acrylonitrile and methyl methacrylate. *Die Angew Makromol Chem*. 259: 33-37.
28. Standard test method for small clear specimens of timber. Designation, West Conshohocken, American Society for Testing and Materials, ASTM- D143 Standard, 1994.
29. Terziev, N., and Panov, D. 2009. Study on some alkoxy silanes used for hydrophobation and protection of wood against decay. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 63: 456-461.
30. Wood preservatives. Method of test for determining the protective effectiveness against wood destroying basidiomycetes- Determination of the toxic values. Beuth Verlag GmbH, Berlin, European standards, EN 113, 1996.



Mechanical behavior and biological resistance of Acrylonitrile wood-polymer modified with alkoxy silan

F. Sobhani Oskouie¹, *M. Ghorbani² and S.M. Amininasab³

¹M.Sc. Student of Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, ²Associate Prof., Dept., of Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University,

³Assistente Prof., Dept., of Chemistry, Kurdistan University

Received: 02/24/2016 ; Accepted: 11/05/2016

Abstract

Background and objectives: Wood modification with eco-friendly materials and methods improves the wood properties for many applications. Synthetic polymers are widely used for wood modification via wood impregnation with unsaturated monomers. Results in the fabrication of wood-polymer composites (WPC) through in-situ polymerization within wood pores. In modification with the Acrylonitrile vinyl monomer, the hydroxyl group of the cell wall are free and they could absorb moisture. So, a modifier presence with coupling effect between monomer and cell wall, could increase the wood service life. In this research, the effect of 3-(trimethoxysilyl) propyl methacrylate on mechanical and biological properties of Acrylonitrile wood-polymer was investigated.

Material and Methods: Mechanical and biological test samples were prepared from straight grain and no defect timber of dried Poplar wood according to ASTM-D143 and EN113 standards respectively. Test samples were divided in 7 levels: control, modified with silane compound in subgroups of acidified Ethanol at 110 and 150°C, ethanol with and without Benzoyl peroxide as initiator at 150°C, Acrylonitrile/Benzoyl Peroxide and combined level of silane/Acrylonitrile/ Benzoyl Peroxide. Sample's impregnation was carried out using vacuum-pressure method in the laboratory cylinder. Statistical analyses of mechanical and biological data were conducted using complete randomized design. Means of each treatment were compared according to Duncan multiple range tests.

Results: Silane modification and Acrylonitrile presence in the composite were confirmed by infrared spectroscopy. Silane modification led to increase in mechanical strength of wood due to crosslink formation, and also created significant improvement in flexural modulus and hardness at acidic conditions and higher temperature. Adding initiator to silane modification, in addition to the cell wall modification, resulted in more activity in the free radicals and polymerization the part of silane in the lumens. The presence of Acrylonitrile in the lumen enhanced the mechanical properties. Combined modification by modifying the cell walls, filling cavities and linking between lumen polymer and cell wall in the presence of silane coupling agent, caused the more uniform distribution of force and significant improvement in the most mechanical strength compared to single modification with silane and acrylonitrile. Also, presence of monomer improved the biological resistance of the resultant product. In acidic condition, higher temperature with further cell wall modification led to the significant decline of weight loss. Compared to the other single modifications, Silane modification containing initiator, with cell wall modification and physical blocking the entrance path of fungal hyphae and humidity, significantly decreased the decay weight loss. The combined Silan/Acrylonitrile modification showed the lowest weight loss exposed to fungal decay due to the linking between more silanol and hydroxyl groups of wood and acrylonitrile presence in the lumens.

Conclusion: Silane compound enhanced the mechanical and biological properties of Acrylonitrile wood-polymer, which the improvement was more obvious at the higher temperature and under acidic conditions. Combined Silane/Acrylonitrile modification created maximum improvement in the most mechanical properties. Presence of a initiator with less weight loss exposed to fungal degradation, intensified bio-resistance compared to other silane modifications. Combined Silane/Acrylonitrile modification was presented the less fungal degradation that can be attributed to filling lumen and cell wall pores, less moisture and finally reduction of hyphae development, enzymes transfer and fungal hyphae access through the wood cell wall.

Keywords: Acrylonitrile, 3-(trimethoxysilyl) propyl methacrylate, Wood-polymer, Biological properties, Mechanical behavior

*Corresponding author: ghorbani_mary@yahoo.com