

## تأثیر پلی لاکتیک اسید بر خواص مکانیکی و فیزیکی چندسازه- چوب پلاستیک

## چکیده

در این پژوهش ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی چندسازه پلی لاکتیک اسید- آرد ساقه کلزا ساخته شده با استفاده از تکنیک قالب‌گیری فشاری مطابق با استانداردهای ASTM مورد بررسی قرار گرفت. طبق مشاهدات به دست آمده مشخص شد که با افزایش مقدار آرد ساقه کلزا، مدول گسیختگی، مقاومت کششی و مقاومت به ضربه بدون فاق چندسازه در مقایسه با PLA خالص کاهش و در مقابل ویژگی‌های الاستیک شامل مدول یانگ، مدول الاستیسیته خمشی و سختی سطح افزایش یافتند. همچنین، افزودن آرد ساقه کلزا موجب جذب آب و واکنشیدگی ضخامت این چندسازه گردید. بعلاوه، در مطالعه ویژگی‌های حرارتی توسط آزمون DSC افزایش معنی‌داری در درجه کریستالیت چندسازه ساخته شده مشاهده شد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان بیان داشت که استفاده از ساقه کلزا به عنوان یک منبع لیگنوسولوزی ارزان قیمت و تجدیدپذیر می‌تواند علاوه بر نقش پرکننده در ساخت محصولات چندسازه، موجب بهبود برخی خواص مکانیکی آن گردد.

**واژگان کلیدی:** چندسازه، پلی لاکتیک اسید، آرد ساقه کلزا، ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی، آزمون DSC.

معین دهقان<sup>۱\*</sup>

امیرحسین صادقی فرد<sup>۲</sup>

حبیب دهمرده<sup>۳</sup>

افسانه شهرکی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

<sup>۳</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

<sup>۴</sup> دانشجوی دوره دکتری تخصصی فرآورده‌های چندسازه چوب، دانشگاه زابل، زابل، ایران

مسئول مکاتبات:

[moein.dehghan@ut.ac.ir](mailto:moein.dehghan@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۴

## مقدمه

استفاده از الیاف طبیعی و پلیمرهای با منشأ زیستی برای ساخت چندسازه‌های زیستی به منظور حفظ سلامت محیط زیست و کاهش وابستگی به پلیمرهای مشتق شده از منابع نفتی، در سالیان اخیر بخش عمده از تحقیقات را به خود اختصاص داده است. در حقیقت باید عنوان کرد که اجزای تشکیل‌دهنده این محصول را می‌توان از منابع زیستی موجود و تجدیدپذیر در طبیعت استخراج نمود. وجه تمایز این نوع چندسازه‌ها با دیگر فرآورده‌های مشابه، تخریب کامل این محصول در خاک تحت شرایط کمپوست است که هیچ‌گونه آلودگی زیست‌محیطی به وجود

نمی‌آورد و از این رو هزینه‌های سنگین جمع‌آوری و بازیافت را در جوامع حذف نموده و کمک زیادی به بهبود اقتصاد آن‌ها، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه می‌نماید [۱، ۲، ۳]. پلی لاکتیک اسید، پلی‌هیدروکسی آلکان، سلولز استات و پلیمرهای بر پایه نشاسته از جمله پلیمرهای زیستی محسوب می‌شوند که می‌توان از آن‌ها در ساخت فرآورده‌های چندسازه استفاده نمود [۱].

پلی لاکتیک اسید یا PLA از خانواده پلیمرهای گرمانرم با پتانسیل تولید از منابع تجدیدپذیر گیاهی است که از ظرفیت تولید بالغ بر ۱۴۰۰۰۰ تن در سال برخوردار است [۴]. این پلیمر را می‌توان از عمده مواد دارای

استفاده نمود. [۱۵،۱۶]. اگرچه افزودن آرد یا الیاف لیگنوسلولزی به پلی لاکتیک اسید به عنوان یک تقویت کننده به منظور ساخت چندسازه به اثبات رسیده است [۱۷،۱۸]، اما این نکته حائز اهمیت است که خواص این نوع محصولات به شدت تحت تأثیر فصل مشترک (لایه بینابینی) بین پلیمر (غیر قطبی) و الیاف سلولزی (قطبی) قرار دارد. شکست در فرآورده‌هایی از این قبیل معمولاً در فصل مشترک پلیمر و الیاف اتفاق می‌افتد که برای رفع این عیب از مواد سازگار کننده مانند مالئیک انیدرید استفاده می‌گردد. [۱۹]. مالئیک انیدرید موجب تر شدن بهتر الیاف و همچنین پیوند هیدروژنی قوی بین الیاف و ماتریس پلیمری گردیده و خواص محصول نهایی را ارتقاء می‌بخشد [۲۰].

در زمینه ساخت چندسازه‌های زیستی با پلی لاکتیک اسید و الیاف لیگنوسلولزی و سازگار کننده بین آن‌ها مطالعاتی صورت پذیرفته است. PoHo and Lau (۲۰۱۴) در ارزیابی خواص چندسازه آرد بامبو و پلی لاکتیک اسید عنوان نمودند که استفاده از این گیاه تا ۷/۵ درصد بر اساس وزن خشک پلیمر و ۱/۱ مالئیک انیدرید به دلیل انتقال بهتر تنش از پلیمر به الیاف، موجب افزایش مقاومت‌های مکانیکی می‌شود. این در حالی است که با افزایش مقدار آرد بامبو، این ویژگی‌ها کاهش یافتند [۲۱]. در مطالعه‌ای که بر روی خواص مکانیکی و فیزیکی چندسازه ساخته شده از الیاف کنف و پلی لاکتیک اسید توسط Arao و همکاران (۲۰۱۵) صورت گرفت مشخص شد که افزودن الیاف لیگنوسلولزی موجب افزایش مقاومت به ضربه، مدول یانگ و همچنین جذب آب محصول می‌گردد. همچنین آن‌ها در تفسیر عکس‌های میکروسکوپ الکترونی عنوان کردند که فصل مشترک بین الیاف و پلیمر در اثر استفاده از مالئیک انیدرید بهبود یافته است [۲۲]. Birnin و همکاران (۲۰۱۶) نیز در پژوهشی که بر روی چندسازه الیاف نخل روغنی- پلی لاکتیک اسید انجام دادند، چنین بیان کردند که با افزودن الیاف نخل خرما، مدول گسیختگی و مقاومت کششی چندسازه کاهش یافته است اما مدول یانگ و خواص جذب آب و واکنشیدگی ضخامت محصول ساخته شده در مقایسه با پلیمر خالص افزایش می‌یابند

نشاسته مانند ذرت، سیبزمینی و چغندر قند استخراج نمود و به عنوان جایگزینی برای پلیمرهای با منشأ نفتی مورد استفاده قرارداد. PLA در شرایط ایده آل و استاندارد تجزیه شده و اثری از خود برجای نمی‌گذارد [۵،۶]. از جمله مزایای چندسازه‌های ساخته شده با پلی لاکتیک اسید این است که محصول ساخته شده از آن دارای ویژگی زیست تخریب پذیری بوده و همین ویژگی نگرانی‌های مربوط به آلودگی‌های زیست محیطی و هزینه سنگین بازیافت فرآورده‌های ساخته شده از آن را کاهش می‌دهد [۷]. ترکیب شیمیایی PLA علی‌رغم ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مناسب، پلیمری با خاصیت شکنندگی و ترد است که استفاده از الیاف لیگنوسلولزی به عنوان تقویت کننده می‌تواند تا حدودی این عیب مربوط به آن را بهبود بخشد [۸].

الیاف لیگنوسلولزی می‌تواند به عنوان جزئی دیگر از مواد تشکیل دهنده چندسازه‌های زیستی محسوب شود [۹]. قیمت کم، دسترس پذیری آسان، قابلیت تخریب بیولوژیکی، طبیعت، خواص حرارتی مطلوب، تجدیدپذیر بودن، عدم ایجاد سایش و خوردگی در ماشین آلات و عدم تولید مواد سمی بعد از سوختن را می‌توان از دلایل استفاده از این الیاف در ساخت این نوع فرآورده عنوان نمود [۱۰،۱۱]. توانایی الیاف طبیعی در جذب دی اکسید کربن که به کاهش نرخ آلودگی‌های زیست محیطی منجر می‌گردد را می‌توان از دیگر مزایای این الیاف برشمرد. [۱۲]

ساقه کلزا یکی از منابع لیگنوسلولزی است که تولید آن در دنیا به دلیل روی آوردن بشر به استفاده از روغن‌های گیاهی افزایش یافته است [۱۳]. اگرچه این گیاه می‌تواند برای مصارف مختلف مانند تولید خمیر کاغذ در صنایع کاغذسازی و مواد اولیه در واحدهای تولید فرآورده‌های چندسازه مورد استفاده قرار گیرد [۱۴]، اما بخش بسیاری از آن‌ها در مزارع باقی مانده و یا سوزانده می‌شوند. با توجه به پتانسیل تولید این گیاه در کشورهای دارای پیشینه کشاورزی قوی مانند ایران و همچنین ویژگی‌هایی مانند جرم مخصوص کم، قابلیت دسترسی آسان و قیمت مناسب می‌توان از این گیاه به عنوان بخشی از ماده اولیه مصرفی در تولید چندسازه‌های زیستی

در آن قرار گرفته و بعد از آن به وسیله آسیاب آزمایشگاهی به آرد تبدیل شدند. به منظور تعیین اندازه ذرات از الک ارتعاشی و ذراتی که از مش ۴۰ عبور کرده و داخل مش ۶۰ قرار گرفتند به منظور ساخت چندسازه استفاده گردید.

## روش

### فرآیند ساخت چندساز

به منظور کاهش رطوبت، پلی لاکتیک اسید، مالئیک انیدرید و آرد ساقه کلزا به مدت ۲۴ ساعت تحت حرارت ۴۰ درجه سانتی گراد در آن قرار گرفتند. مواد مورد استفاده پس از وزن سنجی، به وسیله اکسترودر دوماردون ناهمسوگرد Collin ساخت آلمان با پنج محدوده دمایی ۱۵۵، ۱۶۰، ۱۶۵، ۱۷۰، ۱۷۰ درجه سانتی گراد و سرعت ۷۰ دور در دقیقه اختلاط گردید و سپس به وسیله آسیاب نیمه صنعتی Wieser مدل Wg-Ls200/200 خرد شدند. برای ساخت نمونه‌های آزمونی با استفاده از روش قالب گیری فشاری، ذرات خرد شده ابتدا به مدت ۴ دقیقه در پرس گرم با دمای ۱۸۰ درجه سانتی گراد و فشار ۲۵ مگاپاسکال و پس از آن به مدت ۳ دقیقه تحت پرس سرد قرار گرفتند. بعد از آماده سازی، نمونه‌های آزمونی به منظور رسیدن به رطوبت تعادل به مدت ۱۴ روز در دمای  $20 \pm 2$  درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی  $65 \pm 3$  در اتاق کلیما قرار گرفتند. در جدول ۱ مشخصات و کدهای تیمارهای مختلف چندسازه‌های ساخته شده، نشان داده شده است. در این مطالعه برای تجزیه و تحلیل نتایج از طرح پایه کاملاً تصادفی برپایه آزمایش‌های فاکتوریل در سطح اطمینان آماری ۹۵٪ و از روش دانکن نیز به منظور گروه بندی میانگین‌ها استفاده شد.

[۲۳]. در گزارشی دیگر که توسط Yusoff و همکاران (۲۰۱۶) در رابطه با خواص مکانیکی چندسازه هیبریدی الیاف نارگیل، کنف، بامبو و اختلاط آن‌ها با پلی لاکتیک اسید به ثبت رسید، مشاهده شد که این الیاف موجب تقویت خواص مکانیکی پلی لاکتیک اسید گردیده و به تولید فرآورده‌ای با ویژگی‌های قابل قبول منجر شده است [۲۴].

با توجه به تحقیقات صورت گرفته، این مطالعه ضمن نگاه اجمالی به منابع موجود در کشور و ضرورت استفاده از منابع لیگنوسلولزی به عنوان مواد اولیه در صنعت چندسازه‌های زیستی، با هدف بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چندسازه ساخته شده با پلی لاکتیک اسید و آرد ساقه کلزا با استفاده از فرآیند قالب گیری فشاری به عنوان یکی از روش‌های متداول و مهم در تولید این نوع فرآورده صورت گرفته است.

## مواد و روش‌ها

### مواد

PLA مورد استفاده در این تحقیق از نمایندگی شرکت Kia Chemie Paradise با دانسیته  $1/25 \text{ g/cm}^3$  و شاخص جریان مذاب  $5-20 \text{ g/10min}$  و نقطه ذوب  $120-140$  درجه سانتی گراد، ساخت کشور هلند تهیه شد. همچنین به منظور افزایش فصل مشترک بین پلیمر و الیاف از مالئیک انیدرید اصلاح شده با پلی پروپیلن ساخت شرکت کیمیا جاوید سپاهان و شاخص جریان مذاب  $10 \text{ g/10min}$   $84-91$  و به مقدار ثابت ۲٪ استفاده شد. ساقه‌های کلزا از مزارع زیر کشت این گیاه در شهرستان بهشهر تهیه و پس از دسته بندی به وسیله اره فلکه به ابعاد کوچک تر تبدیل و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد

جدول ۱- مشخصات و کد نمونه چندسازه‌های ساخته شده در این پژوهش

کد تیمار	پلی لاکتیک اسید (%)	آرد ساقه کلزا (%)	مالئیک انیدرید (%)
PLA	۱۰۰	۰	۰
PLA/W25	۷۳	۲۵	۲
PLA/W35	۶۳	۳۵	۲
PLA/W45	۵۳	۴۵	۲

## اندازه‌گیری خواص مکانیکی

به منظور ارزیابی خواص کششی و آزمون خمشی سه نقطه‌ای، به ترتیب از آیین‌نامه‌های D-638 و D-790 مصوب استاندارد ASTM از دستگاه Instron مدل ۱۱۲۲ ساخت کشور انگلستان و به ترتیب با سرعت‌های بارگذاری ۵ و ۲ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد. همچنین برای ارزیابی سختی سطح چندسازه‌ها از استاندارد ASTM D-2240 و دستگاه سختی سنج مدل LD-0551 ساخت کشور آلمان و برای تعیین مقاومت به ضربه بدون فاق از استاندارد ASTM D-256 و دستگاه ضربه دیجیتالی از نوع پاندولی Izod استفاده شد.

## خواص فیزیکی

خواص فیزیکی شامل جذب آب و واکنشیدگی ضخامت مطابق با استاندارد ASTM D-7031 اندازه‌گیری شدند. به این منظور نمونه‌هایی با ابعاد استاندارد تهیه و به مدت ۲۴ ساعت در آن با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. چندسازه‌های خشک‌شده بلافاصله توزین و ابعاد آن‌ها اندازه‌گیری و پس از آن در زمان‌های ۲ و ۲۴ ساعت، از آب خارج و وزن و ضخامت آن‌ها اندازه‌گیری شد.

گرماسنجی تفاضل پویشی<sup>۱</sup>

بررسی آنالیز حرارتی چندسازه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D-3418 انجام شد. در این آزمون به منظور صحت نتایج و رفع خطای احتمالی مربوط به حافظه دستگاه، از سیکل رفت و برگشت استفاده شد. به طوری که در ابتدا هر نمونه از ۲۵ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد گرمادهی و سپس با سرعت ۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد خنک و به مدت ۱۰ دقیقه در همین دما باقی ماند. در نهایت گرمادهی مجدد با سرعت ۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام و داده‌های موردنظر شامل دمای انتقال شیشه‌ای و نقطه ذوب از بررسی سیکل برگشت استخراج گردید. برای بررسی درجه کریستالیتته (X) از رابطه ۱ استفاده گردید [۲۶]. در این فرمول  $\Delta H_m$  انتالپی ذوب و f میزان PLA استفاده‌شده در ساخت چندسازه است.

$$\text{رابطه ۱: } \% (X) = \frac{\Delta H_m}{93.7 \times f} \times 100$$

## نتایج و بحث

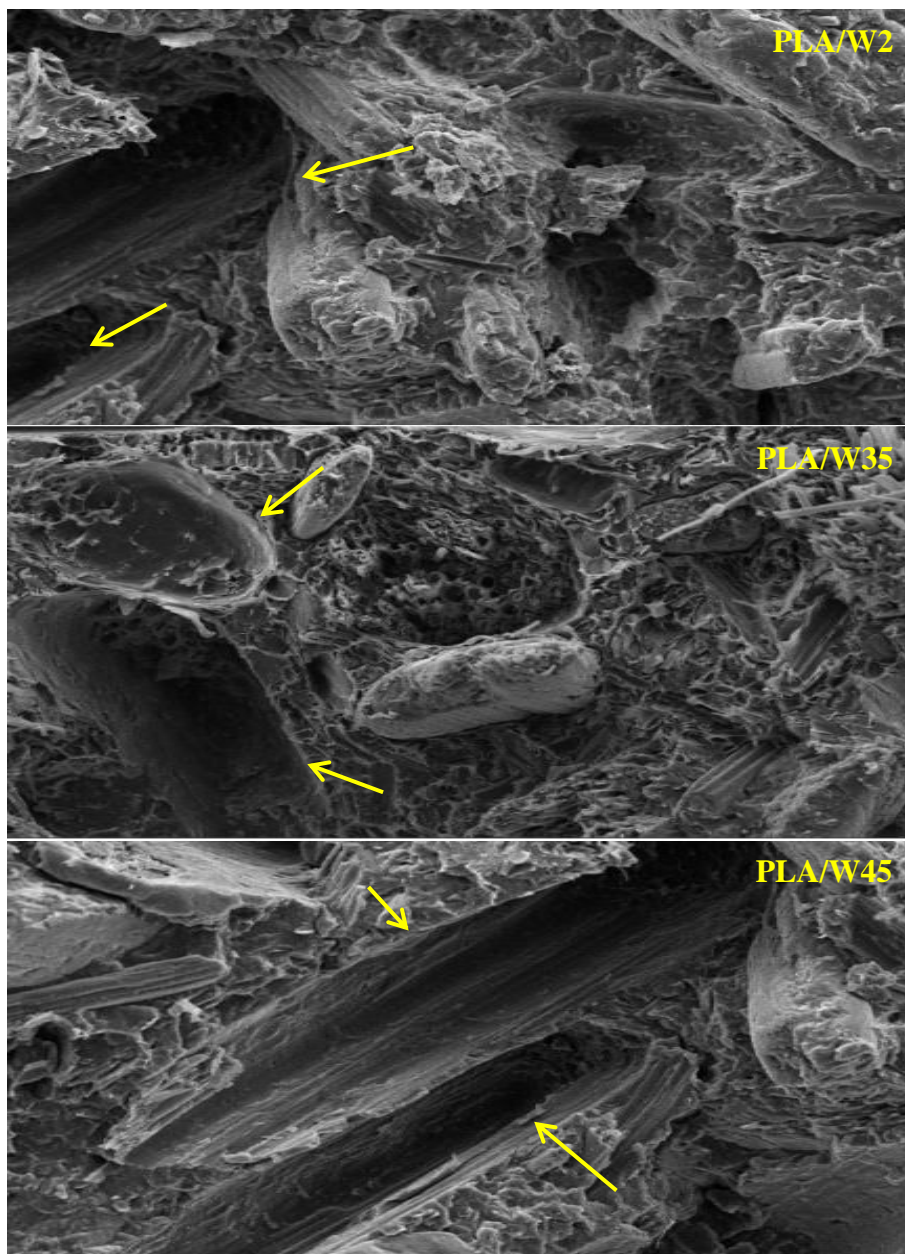
## مدول گسیختگی و مقاومت کششی

ویژگی‌های مکانیکی چندسازه ساخته شده به اختصار در جدول ۲ ذکر شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش میزان آرد ساقه کلزا، مدول گسیختگی و مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد (PLA) کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار مدول گسیختگی و مقاومت کششی مربوط به PLA خالص با میانگین ۱۶۰/۱۳ و ۴۸/۶۲ مگاپاسکال بود. درحالی‌که این ویژگی برای چندسازه ساخته شده با ۴۵٪ آرد ساقه کلزا به کمترین میزان خود رسید. در مجموع با افزودن الیاف لیگنوسلولوزی به پلیمر، به دلیل سطح ویژه زیاد ذرات و همچنین کاهش ماده زمینه (پلیمر) چسب کافی برای نگه‌داشتن الیاف در کنار یکدیگر وجود ندارد و توانایی انتقال تنش از پلیمر به الیاف کاهش می‌یابد [۲۱]. در گزارشی که توسط Rozman و همکاران (۲۰۰۱) به ثبت رسید، آن‌ها علت کاهش مدول گسیختگی و مقاومت کششی چندسازه پلی-پروپیلن-آرد نخل خرما را عدم توزیع مناسب ذرات عنوان نمودند که شانس قرار گرفتن آن‌ها را در کنار یکدیگر افزایش داده و به علت تمرکز ذرات در یک منطقه تنش مربوط به آن بخش بیشتر شده و در نتیجه چندسازه تحت نیروی کمتری گسیخته و شکسته می‌شود [۲۷]. همچنین Oksman و همکاران (۲۰۰۳) در بررسی ساخت چندسازه با PLA و الیاف طبیعی، دلیل ویژگی‌های مکانیکی ضعیف را به خواص شیمیایی الیاف و پلیمر نسبت دادند که موجب می‌شود اتصال هیدروژنی قوی بین الیاف و ماده زمینه به خوبی شکل نگیرد [۱۷]. همچنین نتایج مشابهی توسط Lee و همکاران (۲۰۰۴) در رابطه با ساخت محصولی از پلی‌پروپیلن-آرد چوب گزارش شده است [۲۸]. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی که از سطح شکست نمونه‌های شکسته شده تحت آزمون خمشی از هر سه تیمار تهیه شد و در شکل ۱ نشان داده شده است، مشخص گردید که شکست در این چندسازه در حد فاصل پلی‌لاکتیک اسید صورت گرفته است و این نشان می‌دهد اتصال بین این دو جزء به خوبی صورت نگرفته و

<sup>۱</sup> Differential scanning calorimetry

راحتی در اثر افزایش نیرو از پلیمر جدا شده که این عامل یکی از دلایل کاهش مقاومت های مکانیکی در این چند سازه می باشد.

همین عامل موجب کاهش مدول گسیختگی و مقاومت خمشی این چندسازه نسبت به پلی لاکتیک اسید خالص گشته است. در شکل ۱ و نقاطی که توسط فلش مشخص شده است به وضوح نشان می دهد که آرد ساقه کلزا به



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی ۵۰۰۰ از سطح شکست چندسازه پلی لاکتیک اسید- آرد ساقه کلزا برای تیمارهای مختلف



جدول ۲- ویژگی‌های مکانیکی چندسازه پلی لاکتیک اسید-آرد ساقه کلزا

کد تیمار	مدول گسیختگی (MPa)	مدول الاستیسیته خمشی (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مدول یانگ (MPa)	سختی سطح (Shore-D)	مقاومت به ضربه (J/cm <sup>2</sup> )
PLA	±۱۳/۱۶۰ (۲/۱۳)	±۶۳۵۱ (۲۸/۷۹)	±۶۲/۴۸ (۱/۸۶)	±۲۴۶۶ (۹۴/۳)	±۳۳/۷۱ (۱/۳۷)	±۳۳/۱ (۰/۱۴)
PLA/W25	±۶۳/۱۰۹ (۱/۰۶)	±۷۷۶۵ (۸/۵۳)	±۰۲/۴۴ (۱/۵۸)	±۶۰۶۷ (۳۱/۴۸)	±۳۳/۷۵ (۱/۳۷)	±۸۹/۰ (۰/۰۶)
PLA/W35	±۷۷/۱۰۰ (۱/۵۱)	±۷۹۴۰ (۱۹/۷۲)	±۷/۳۶ (۱/۳)	±۶۲۵۷ (۳۸/۰۶)	±۶۷/۷۷ (۱۰/۳)	±۶۸/۰ (۰/۰۸)
PLA/W45	±۴۵/۹۲ (۱/۲۸)	±۸۲۲۴ (۲۴/۰۱)	±۰۳/۳۳ (۱/۲۸)	±۶۹۲۶ (۳۴/۶۱)	±۶۳/۷۸ (۱/۳۷)	±۶۵/۰ (۰/۱۰)

### مدول الاستیسیته خمشی و مدول یانگ

در بررسی نتایج مربوط به مدول الاستیسیته خمشی و مدول یانگ چندسازه، همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، با افزایش مقدار آرد ساقه کلزا این ویژگی‌ها نسبت به PLA خالص افزایش قابل ملاحظه‌ای داشتند. مقدار مدول یانگ در نمونه پلیمر خالص (پلی لاکتیک اسید) ۲۴۶۶ مگا پاسکال بود در حالی که با افزودن مقدار آرد تا ۴۵٪ مقدار آن به ۶۹۲۶ مگا پاسکال رسید. در مشاهده نتایج مربوط به مدول الاستیسیته خمشی هم نتایج مشابهی به دست آمد. بدون شک ویژگی‌های الاستیسیته در چندسازه‌های چوب پلاستیک به خواص اجزای تشکیل دهنده آن برمی‌گردد [۲۳]. الیاف لیگنوسلولزی به دلیل ساختار لیفی و پیوندهای هیدروژنی محکم از مقاومت کششی بیشتری نسبت به پلی لاکتیک اسید برخوردارند [۲۵]. در نتیجه با افزایش الیاف این خواص بهبود می‌یابند. نتایج به دست آمده با گزارش‌های Lee و همکاران (۲۰۰۴) و Yusoff و همکاران (۲۰۱۶) همخوانی داشته است [۲۴، ۲۸]. افزودن الیاف طبیعی به پلیمر ترموپلاستیک منجر به افزایش چقرمگی (سفتی) و شکنندگی نمونه خواهد شد. این امر باعث می‌شود تا تغییر مکان چندسازه در اثر بارهای مکانیکی کاهش یابد و از آنجایی که مدول الاستیسیته رابطه بین تنش و کرنش در منطقه خطی منحنی مربوطه می‌باشد، لذا در اثر کاهش تغییر ابعاد که در مخرج کسر این رابطه می‌باشد، مدول الاستیسیته افزایش خواهد یافت.

### مقاومت به ضربه

در ارزیابی مقاومت به ضربه بدون فاق چندسازه ساخته شده مشاهده شد که با افزایش میزان آرد ساقه کلزا این ویژگی کاهش می‌یابد. بیشترین میزان مقاومت به

ضربه مربوط به پلیمر PLA خالص و کمترین آن مربوط به چندسازه ساخته شده با ۴۵٪ آرد ساقه کلزا بود. مقاومت در برابر ضربه بیان‌کننده مقدار انرژی لازم برای شکست است؛ و ماده‌ای که در مقابل شکست مقاومت بیشتری از خود نشان دهد، از قدرت جذب انرژی بیشتری برخوردار خواهد بود [۲۹]. حضور مواد لیگنوسلولزی مناطقی را در ماتریس پلیمری به وجود می‌آورد که موجب تمرکز بیشتر تنش در پلیمر گشته و نقاط شروع شکست را ایجاد می‌کند و این مسئله بیان‌کننده این موضوع است که شکست در چندسازه‌های چوب پلاستیک آسان‌تر اتفاق می‌افتد [۱۹]. تفسیر این موضوع را این‌گونه می‌توان عنوان کرد که چندسازه‌های چوب پلاستیک خاصیت شکننده‌تری نسبت به پلیمر دارند. به‌طور کلی می‌توان گفت که با توجه به ماهیت ترد مواد لیگنوسلولزی و ساختمان نرم و انعطاف‌پذیر پلیمر، جذب انرژی در مواد نرم بهتر از مواد ترد اتفاق می‌افتد. مشاهدات Bataille و همکاران (۱۹۹۸) و Chotirat و همکاران (۲۰۰۷) این نتایج را تصدیق می‌کند [۳۰، ۳۱].

### سختی سطح

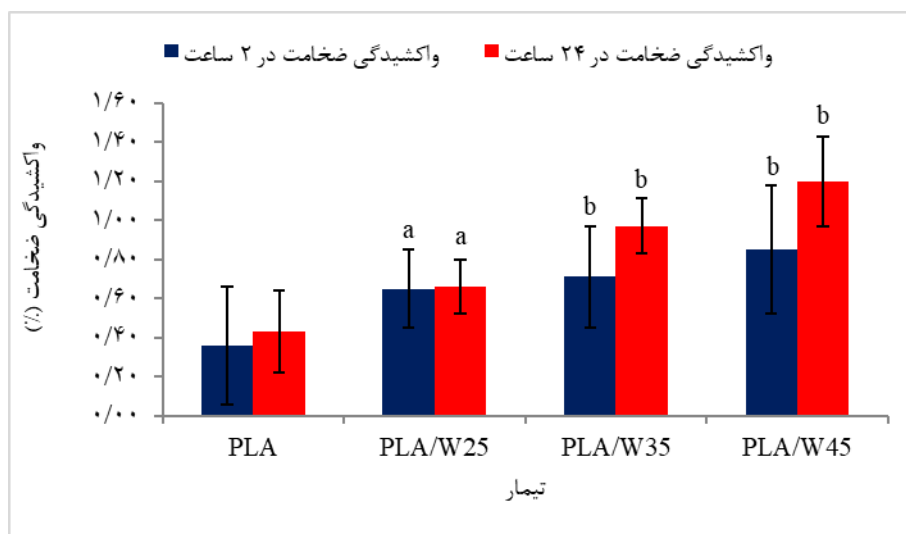
همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود، افزودن آرد ساقه کلزا موجب افزایش سختی سطح چندسازه حاصل شده است. کمترین مقدار سختی سطح مربوط به پلیمر خالص (PLA) ۷۱/۳۳ و بیشترین مقدار آن مربوط به چندسازه ساخته شده با ۴۵٪ آرد بود. سختی سطح، بیانگر مقاومت یک ماده در برابر نفوذ یک جسم سخت را نشان می‌دهد و با تعیین درجه سختی می‌توان به کاربرد و روش فرآوری محصول تولید شده پی برد [۳۲]. سختی چندسازه‌های چوب پلاستیک ارتباط مستقیمی با نوع مواد بکار رفته در ساختار تشکیل‌دهنده آن دارد. وجود مواد

اکسیژن) یک مولکول به قطب مثبت (اتم هیدروژن) مولکول دیگر می‌چسبد و با تشکیل پیوند هیدروژنی، چند مولکول به یکدیگر متصل می‌شوند. از آنجائی که سطح الیاف سلولزی دارای موقعیت‌های واکنش‌پذیر است و تمایل زیادی برای جذب مولکول‌های آب دارد، هنگامی که آب مایع در مجاورت آن‌ها قرار گیرد با نیروی بسیار زیادی (نیروی حاصل از پیوند هیدروژنی بین مولکول‌های آب و گروه‌های هیدروکسیل آزاد دیواره سلول‌های چوبی) جذب الیاف می‌شوند [۳۵]. Oksman و همکاران (۱۹۹۸) در خاصیت جذب آب چندسازه‌های چوب پلاستیک عنوان کردند که اگر فصل مشترک میان الیاف و پلیمر به‌خوبی شکل نگیرد، در فصل مشترک پلیمر و الیاف حفراتی در مقیاس میکروسکوپی شکل می‌گیرد که تجمع آب در آن مناطق سبب جذب آب و واکنشیدگی ضخامت چندسازه می‌گردد که تفسیر فوق با توجه به نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی، همان‌طور که در شکل ۱ مشهود است به اثبات می‌رسد [۱۷]. همچنین به نظر می‌رسد در فرآیند ساخت محصولات چوب پلاستیک فرمول ساخت از اهمیت بالایی برخوردار است. هنگامی که مقدار پرکننده (آرد) افزایش می‌یابد، به تبع آن مقدار ماده زمینه (پلیمر) کاهش یافته و چسب کافی برای پوشش دهی بهتر الیاف در مقابل رطوبت و همچنین جلوگیری از جذب آب و واکنشیدگی ضخامت آن‌ها وجود ندارد. نتایج فوق با یافته‌های Herrera و همکاران (۲۰۰۸) و Sukmawan and Takagi (۲۰۱۵) مطابقت داشت [۳۴،۳۶].

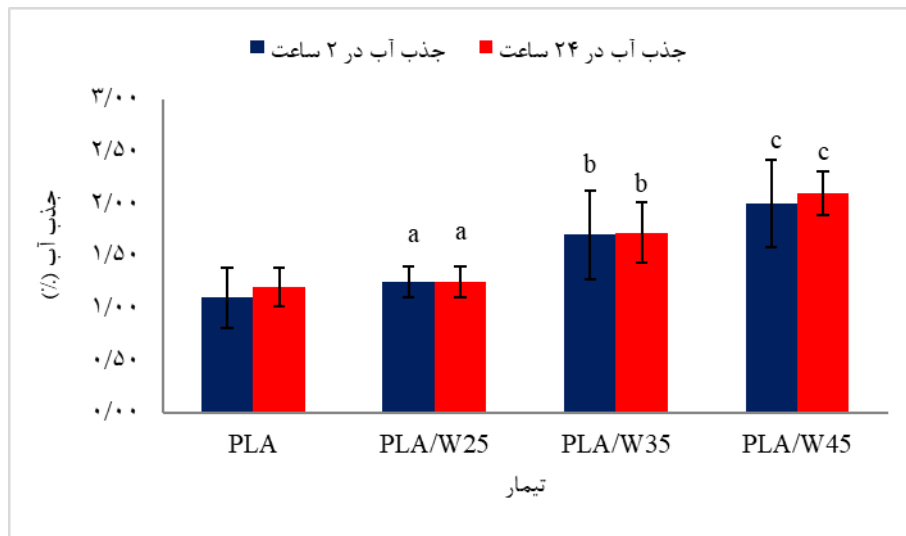
لیگنوسلولزی در ترکیب چندسازه باعث افزایش سفتی محصول شده که توسط الاستیسیته خمشی تایید گردید و متعاقباً سختی آن افزایش می‌یابد [۲۷]. Yuan and Misra (۲۰۰۶) در مطالعه‌ای تأثیر تقویت‌کننده‌های لیگنوسلولزی بر سختی سطح چندسازه چوب پلاستیک را بررسی کردند و عنوان کردند که افزودن ماده لیگنوسلولزی به ماده زمینه (پلیمر) موجب بهبود سختی سطح این چندسازه می‌گردد [۳۳].

### جذب آب و واکنشیدگی ضخامت

همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود میزان جذب آب و واکنشیدگی ضخامت چندسازه در مقایسه با PLA خالص در زمان‌های ۲ و ۲۴ ساعت افزایش یافته است. بیشترین میزان جذب آب و واکنشیدگی ضخامت مربوط به فرآورده ساخته شده با ۴۵٪ آرد ساقه کلزا بود. البته تفاوت معنی‌داری به لحاظ آماری در مدت ۲ و ۲۴ ساعت مشاهده نشد. کمترین میزان جذب آب مربوط به PLA بود که به خاصیت غیر قطبی و غیر آب‌دوست آن برمی‌گردد. الیاف طبیعی به دلیل دارا بودن سطح بسیار زیاد گروه‌های هیدروکسیل و خاصیت آب‌دوست اجزا تشکیل‌دهنده آن به‌ویژه همی سلولزها و نواحی آمورف سلولز از جذب آب بالایی برخوردارند [۳۴]. مولکول‌های آب، برخلاف اینکه از نظر بار الکتریکی خنثی هستند، به علت توزیع نامتقارن بارهای مثبت و منفی، مولکول‌هایی قطبی به شمار می‌آیند. بدین ترتیب، قطب منفی (اتم



شکل ۱- واکنشیدگی ضخامت چندسازه پلی‌لاکتیک اسید- آرد ساقه کلزا در تیمارهای مختلف



شکل ۲- میزان جذب آب چندسازه پلی لاکتیک اسید- آرد ساقه کلزا در تیمارهای مختلف

لیگنوسلولزی به علت خاصیت بلورین و کریستالی خود، موجب تشکیل یک لایه بلورین در ساختار چندسازه می گردند که نتیجه آن افزایش خواص کششی و میزان سفتی محصول تولیدی است [۳۸]. Tokoro و همکاران (۲۰۰۸) و Quan و همکاران (۲۰۰۵) نیز در مطالعاتی که بر روی خواص حرارتی چندسازه های ساخته شده با PLA و الیاف طبیعی داشتند عنوان کردند که وجود الیاف لیگنوسلولزی به علت خاصیت بلورین خود موجب تشکیل یک بخش بلورین در فصل مشترک الیاف و پلیمر می گردند که به موجب آن درجه کریستالینیت، خواص کششی و سختی چندسازه افزایش می یابد [۳۸، ۳۹].

### ویژگی های حرارتی

برخی از ویژگی های حرارتی به دست آمده از آزمون DSC در جدول ۳ نشان داده شده است. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود اختلاف چندانی در دمای ذوب (Tm) و دمای انتقال شیشه ای (Tg) بین چندسازه های ساخته شده و PLA خالص دیده نشد اما در مقایسه با درجه کریستالینیت، این ویژگی افزایش زیادی نسبت به PLA داشت. بیشترین درجه کریستالینیت مربوط به نمونه ساخته شده با ۴۵٪ آرد ساقه کلزا با ۵۴/۲۵٪ بود. اما با کاهش مقدار اختلاط تا صفر درصد این ویژگی کاهش یافت. افزایش در درجه کریستالینیت به خاصیت کریستالی و سفت مواد لیگنوسلولزی برمی گردد [۳۷]. وجود الیاف

جدول ۳- ویژگی های حرارتی چندسازه پلی لاکتیک اسید- آرد ساقه کلزا

کد تیمار	Tg	Tm	X (%)
PLA	۱۵۴	۵۶	۱۵/۷
PLA/W25	۱۵۱	۵۹	۴۰/۷۳
PLA/W35	۱۵۶	۶۱	۴۳/۸
PLA/W45	۱۵۳	۵۸	۵۴/۲۵



## نتیجه‌گیری

متفاوت آرد ساقه کلزا در ساختار چندسازه موجب تغییر در فرآیند شکست می‌شوند. به‌عنوان نتیجه کلی می‌توان بیان داشت که چندسازه‌های ساخته شده نسبت به پلی‌لاکتیک اسید محکم‌تر و دارای سفتی بیشتری بودند. درحقیقت کلمه محکم به موادی اطلاق می‌شود که یک شکست آن تدریجی باشد و تحت بارگذاری به‌صورت آنی ترک و شکست در آن اتفاق نیافتد که این امر با افزایش خواص الاستیک چندسازه تصدیق شد. با توجه به مشکلات زیست‌محیطی پیرامون بشر و نیاز حتمی به استفاده از منابع تجدیدپذیر با خواص زیست‌تخریب‌پذیری به نظر می‌رسد استفاده از الیاف لیگنوسلولزی مانند ساقه کلزا و پلی‌لاکتیک اسید به‌عنوان یک پلیمر قابل‌استخراج از منابع طبیعی کمک زیادی در جهت حفظ سلامت محیط‌زیست و توسعه پایدار کشورها ایفا نماید.

## سپاس‌گذاری

ضمن تشکر و قدردانی از کلیه اساتید و دوستانی که ما را در پیشبرد این هدف یاری نمودند به عرض می‌رساند این پژوهش با همکاری دانشکده مهندسی مکانیک و شیمی پلیمر دانشگاه فردوسی مشهد و با حمایت گروه کارخانجات پاک چوب صورت پذیرفت.

در این پژوهش تاثیر مقادیر آرد ساقه کلزا در سه سطح اختلاط ۰/۲۵، ۰/۳۵ و ۰/۴۵ بر ویژگی‌های مکانیکی، فیزیکی و حرارتی چندسازه پلی‌لاکتیک اسید- آرد ساقه کلزا ساخته شده به روش قالب‌گیری فشاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که افزودن آرد ساقه کلزا تا میزان ۰/۴۵، موجب افزایش مدول الاستیسیته، مدول یانگ، سختی سطح و درجه کریستالینیته چندسازه می‌گردد. همچنین در بررسی جذب آب و واکشیدگی ضخامت در زمان‌های ۲ و ۲۴ ساعت، نتایج به‌دست‌آمده حاکی از افزایش وزن و تغییر در ثبات ابعادی چندسازه به دلیل عدم اتصال مناسب بین پلی‌لاکتیک‌اسید و آرد ساقه کلزا و وجود تخلخل و حفرات در چند سازه با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی در مقایسه با PLA خالص بوده‌است. در سطوح مختلف اختلاط، بیشترین مقاومت کششی، مدول گسیختگی و مقاومت به ضربه برای چندسازه ساخته‌شده با ۰/۲۵ آرد ساقه کلزا به دست آمد درحالی‌که بیشترین مقادیر مدول یانگ، مدول الاستیسیته خمشی، جذب آب، واکشیدگی ضخامت و درجه کریستالینیته مربوط به تیماری بود که در آن ۰/۴۵ آرد ساقه کلزا استفاده شده است. در واقع مقادیر

## منابع

- [1] Mohanty, A. K., Misra, M. and Hinrichsen, G., 2000. Biofibers, biodegradable polymers and bio composites: an overview. *Macromolecular materials and Engineering*, 276(1), 1-24.
- [2] Ohkita, T. and Lee, S. H., 2005. Crystallization behavior of poly (butylene succinate)/corn starch biodegradable composite. *Journal of applied polymer science*, 97(3), 1107-1114.
- [3] Sujaritjun, W., Uawongsuwan, P., Pivsa-Art, W. and Hamada, H., 2013. Mechanical property of surface modified natural fiber reinforced PLA biocomposites. *Energy Procedia*, 34, 664-672.
- [4] Meinander, K., Niemi, M., Hakola, J. S. and Selin, J. F., 1997. Polylactides-degradable polymers for fibres and films. In *Macromolecular Symposia*, 123 (1), 147-153.
- [5] Shen, L., Worrell, E. and Patel, M., 2010. Present and future development in plastics from biomass. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(1), 25-40.
- [6] Mathew, A. P., Oksman, K. and Sain, M., 2005. Mechanical properties of biodegradable composites from poly lactic acid (PLA) and microcrystalline cellulose (MCC). *Journal of applied polymer science*, 97(5), 2014-2025.

- [7] Mukherjee, T. and Kao, N., 2011. PLA based biopolymer reinforced with natural fibre: a review. *Journal of Polymers and the Environment*, 19(3), 714-725.
- [8] Huda, M. S., Mohanty, A. K., Drzal, L. T., Schut, E. and Isra, M., 2005. Green” composites from recycled cellulose and poly (lactic acid): Physico-mechanical and morphological properties evaluation. *Journal of Materials Science*, 40(16), 4221-4229.
- [9] Sharma, R., Raghupathy, V. P., Rao, S. S. and Shubhanga, P., 2015. Review of recent trends and developments in biocomposites. In *International Conference on Recent Developments in Structural Engineering*.
- [10] Espert, A., Vilaplana, F. and Karlsson, S., 2004. Comparison of water absorption in natural cellulosic fibers from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties, *Composites. Part A.*, 35(11): 1267–1276.
- [11] Bledzki, AK., Reihmane, S. and Gassan, J., 1998. Thermoplastics reinforced with wood fillers: a literature review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*; 37(4): 451–68.
- [12] La Mantia, F. P. and Morreale, M., 2011. Green composites: A brief review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(6), 579-588.
- [13] Mahdavi, S., Habibi, M. R., Fakhryan, A. and Salehi, K., 2009. Comparative study on fiber dimension, density and chemical components of two varieties of rapeseed straw. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 24(1): 36-43. (In Persian).
- [14] Enayati, A. A., Hamzeh, Y., Mirshokraei, S. A. and Molaii, M., 2009. Papermaking potential of canola stalks. *BioResources*, 4(1), 245-256.
- [15] Safarik, I., Lunackova, P., Mosiniewicz-Szablewska, E., Weyda, F. and Safarikova, M., 2007. Adsorption of water-soluble organic dyes on ferrofluid-modified sawdust. *Holzforschung*, 61(3), 247-253.
- [16] Mohnty, A. K., Misra, M., Drzal, L. T., Selke, S. E., Harte, B. R. and Hinrichsen, G., 2005. *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites: An Introduction*. Natural Fibers, Biopolymers and Bio composites, Taylor & Francis: Boca Raton.
- [17] Oksman, K., Skrifvars, M. and Selin, J.F., 2003. Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. *Composites Science and Technology*, 63(9): 1317-1324.
- [18] Sanadi, A. R., Caulfield, D. F. and Rowell, R.M., 1994. Reinforcing polypropylene with natural fiber. *Plastic Engineering*, 1(4): 27-28.
- [19] Oksman, K. and Lindberg, H., 1998. Influence of thermoplastic elastomers on adhesion in polyethylene-wood flour composites. *Journal of Applied Polymer. Science*.68 (11): 1845-1855
- [20] Turku, I., and Karki, T., 2013. Research progress in wood-plasti Nano composites: A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 27(2), 180–204.
- [21] Ho, M. P., Lau, K. T., Wang, H. and Hui, D., 2015. Improvement on the properties of polylactic acid (PLA) using bamboo charcoal particles. *Composites Part B: Engineering*, 81, 14-25.
- [22] Arao, Y., Fujiura, T., Itani, S. and Tanaka, T., 2015. Strength improvement in injection-molded jute-fiber-reinforced poly lactide green-composites. *Composites Part B: Engineering*, 68, 200-206.
- [23] Birnin-Yauri, A. U., Ibrahim, N. A., Zainuddin, N., Abdan, K., Then, Y. Y. and Chieng, B. W., 2016. Enhancement of the Mechanical Properties and Dimensional Stability of Oil Palm Empty Fruit Bunch-Kenaf Core and Oil Palm Mesocarp-Kenaf Core Hybrid Fiber-Reinforced Poly (lactic acid) Biocomposites by Borax Decahydrate Modification of Fibers. *BioResources*, 11(2), 4865-4884.

- [24] Yusoff, R. B., Takagi, H. and Nakagaito, A. N., 2016. Tensile and flexural properties of polylactic acid-based hybrid green composites reinforced by kenaf, bamboo and coir fibers. *Industrial crops and products*, 94, 562-573.
- [25] Sjostrom, E., 2013. *Wood chemistry: fundamentals and applications*. Elsevier. 276p
- [26] Nyambo, C., Mohanty, A. and Misra, M., 2010. Polylactide-based renewable green composites from agricultural residues and their hybrids. *Biomacromolecules*, 11: 1654–1660.
- [27] Rozman, H. D., Tay, G. S., Kumar, R. N., Abusamah, A., Ismail, H. and Ishak, Z. M., 2001. Polypropylene–oil palm empty fruit bunch–glass fibre hybrid composites: a preliminary study on the flexural and tensile properties. *European Polymer Journal*, 37(6), 1283-1291.
- [28] Lee, S. Y., Yang, H. S., Kim, H. J., Jeong, C. S., Lim, B. S. and Lee, J. N., 2004. Creep behavior and manufacturing parameters of wood flour filled polypropylene composites. *Composite Structures*, 65(3-4), 459-469.
- [29] Jozsef, B., 1982. *Mechanics of wood and wood composites*, 646p.
- [30] Bataille, P., Richard, L. and Sapieh, S., 1989. Effect of cellulosic fibers in polypropylene composites. *Journal of Polymer Composites*, 10(2): 118-124.
- [31] Chotirat, L., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2007. On adhesion mechanisms and interfacial strength in acrylonitrile–butadiene–styrene/wood sawdust composites. *International journal of adhesion and adhesives*, 27(8), 669-678.
- [32] Parsapajouh, D., 2009. *Wood Technology*, Tehran University Publications, Tehran, 404 p. (In Persian).
- [33] Yuan, Q. and Misra, R.D.K., 2006. IMPact fracture behavior of clay-reinforced polypropylene nanocomposites. *Journal of Polymer Science* (47) 4421-4433.
- [34] Herrera-Estrada, L., Pillay, S. and Vaidya, U., 2008. *Banana Fiber Composites for Automotive and Transportation Applications*. Automotive. composites conference and exhibition. P.18.
- [35] Skaar, C., 1988. *Wood-water relations*. Springer Verlag: Berlin, etc, 283, 352-3.
- [36] Sukmawan, R. and Takagi, H., 2015. Strength evaluation of cross-ply green composite laminates reinforced by bamboo fiber. *Composites Part B* 84 9-16.
- [37] Krishnaprasad, R., Veena, N. R., Maria, H. J., Rajan, R., Skrifvars, M. and Joseph, K., 2009. Mechanical and thermal properties of bamboo microfibril reinforced polyhydroxybutyrate biocomposites. *Journal of Polymers and the Environment*, 17(2), 109-114.
- [38] Quan, H., Li, Z. M., Yang, M. B. and Huang, R., 2005. On transcrystallinity in semi-crystalline polymer composites. *Composites Science and Technology*, 65(7-8), 999-1021.
- [39] Tokoro, R., Vu, D. M., Okubo, K., Tanaka, T., Fujii, T. and Fujiura, T., 2008. How to improve mechanical properties of polylactic acid with bamboo fibers. *Journal of materials science*, 43(2), 775-787.

## Effect of poly lactic acid on the physical and mechanical properties of wood plastic composite

### Abstract

In the present research, the mechanical and physical properties of poly lactic acid-canola stem flour composites made by compression molding technique were studied according to ASTM standards. According to the results, it was found that modulus of rupture, tensile strength and impact strength were decreased by increasing the amount of canola stem flour in comparison with pure poly lactic acid (PLA) composites. In contrast, the elastic properties including Young's modulus, flexural modulus, and surface hardness increased. The addition of canola stem flour also increased water absorption and thickness swelling. Furthermore, a significant increase in the composite crystallinity degrees was observed in the study of thermal properties by DSC test. It can be concluded that the use of canola stem as a cheap and renewable lignocellulose source can improve some mechanical properties of the composites, as well as having a filler role in making composites.

**Keywords:** composite, poly lactic acid, canola stem flour, mechanical and physical properties, DSC test.

M. Dehghan<sup>1\*</sup>  
A. H. Sadeghi Fard<sup>2</sup>  
H. Dahmardeh<sup>3</sup>  
A. Shahreki<sup>4</sup>

<sup>1</sup> M.S. Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

<sup>2</sup> M.S. Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

<sup>3</sup> M.S. Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

<sup>4</sup> Ph.D. Student, wood composite products, Zabol university, Zabol, Iran

Corresponding author:  
[Moein.dehghan@ut.ac.ir](mailto:Moein.dehghan@ut.ac.ir)

Received: 2019/01/08

Accepted: 2019/03/05