

مروری بر تولید، خواص و کاربردهای الیاف پلی لاکتیک اسید

Review on Production, Properties, and Applications of Poly(lactic acid) Fibers

فرناز السادات فتاحی، اکبر خدایمی*، حسین ایزدان

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۳/۰۴

چکیده

در دنیای امروز حفاظت از محیط زیست موضوعی حائز اهمیت است، از طرفی، ذخایر پتروشیمی مانند نفت رو به کاهش است. در نتیجه، تولید پلیمرهای جدید از منابع گیاهی از اهداف مهم صنایع است. پلی لاکتیک اسید اولین الیاف سنتزی تولید شده از منابع تجدیدپذیر بوده و دارای مزایای زیست محیطی و کارایی عالی در منسوجات است. در حقیقت لیف حاصل، پلی میان الیاف طبیعی و سنتزی ایجاد کرده و کاربردهای گسترده‌ای از جمله مصارف پزشکی و دارویی، تولید فیلم و الیاف، صنایع بسته‌بندی، پوشاک خانگی و البسه را دربر می‌گیرد. در جدیدترین پژوهش‌ها، از نانوالیاف پلی لاکتیک اسید به‌عنوان سامانه‌ای جدید برای رهاش داروی کتوپروفن استفاده شده است. سهولت فرایند مذاب‌ریسی، تولید از منابع تجدیدپذیر و قابلیت تبدیل شدن به کود گیاهی (در پایان عمر مفید) موجب شده است که این الیاف مقبولیت فزاینده‌ای در صنایع نساجی به‌دست آورند. در این مقاله مروری، اطلاعاتی درباره روش تولید، خواص، کارایی و موارد مصرف الیاف پلی لاکتیک اسید ارائه شده که شامل آخرین پژوهش‌ها در این زمینه است.

مقدمه

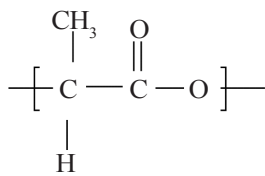
زیست تخریب‌پذیر با قابلیت‌های زیاد به‌شمار می‌آید. پلی لاکتیک اسید پلی‌استری خطی است که از منابع ۱۰۰٪ تجدیدپذیر تولید می‌شود [۳-۵]. پلی لاکتیک اسید در سال‌های اخیر در صنعت نساجی مورد توجه قرار گرفته و اولین لیف با قابلیت مذاب‌ریسی است که از منابع طبیعی تولید می‌شود (شکل ۱) [۷]. زنجیرهای مولکولی پلی لاکتیک اسید دارای ساختار فنی شکل هستند [۸]. این پلیمر سنتزی بر پایه لاکتیک اسید ($C_3H_6O_3$) است و از تخمیر منابع کشاورزی مانند ذرت به‌دست می‌آید. پلی لاکتیک اسید به‌سهولت با فرایند آبکافت، در شرایط مناسب، تخریب و تجزیه شده و سپس به کود تبدیل می‌شود [۳، ۹].

در دنیای امروز حفاظت از محیط زیست موضوعی حائز اهمیت است، از طرفی ذخایر پتروشیمی مانند نفت رو به کاهش است. در نتیجه، تولید پلیمرهای جدید از منابع گیاهی از اهداف مهم صنایع است. به‌تازگی پیشرفت‌های زیادی در کاربرد پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر رخ داده است [۱، ۲]. پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر در محیط‌های طبیعی، با شکست زنجیرهای درشت مولکول، به اجزای کوچک‌تر تبدیل می‌شوند. جدول ۱ انواع مختلف پلیمرهای طبیعی و سنتزی زیست تخریب‌پذیر را نشان می‌دهد [۲]. پلی لاکتیک اسید به دلیل خواص مکانیکی، زیستی و زیست تخریب‌پذیری خوب، از پلیمرهای

کلمات کلیدی

الیاف پلی لاکتیک اسید، زیست تخریب‌پذیر، الیاف سنتزی، فرایند تولید، خواص

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: khoddami@cc.iut.ac.ir



شکل ۱- ساختار پلی لاکتیک اسید [۷].

این دو ایزومر دارای خواص فیزیکی یکسان هستند، بجز اینکه شکل L نور قطبیده را در جهت عقربه‌های ساعت و شکل D آن را برخلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخاند [۱۱]. لاکتیک اسید ماده آغازگر در فرایند تولید پلی لاکتیک اسید است [۱۶]. دو روش اصلی برای تولید پلی لاکتیک اسید از مونومر لاکتیک اسید وجود دارد (شکل ۴). روش معمول تولید پلی لاکتیک اسید، پلیمر شدن تراکمی لاکتیک اسید است [۱۷]. این فرایند در خلأ و دمای زیاد انجام می‌شود. یک حلال نیز برای استخراج آب تولید شده، در واکنش تراکم، استفاده می‌شود. این روش تولید پلی لاکتیک اسید را کاروترز به کار برده است [۱۱]. محصول مولکولی متوسط کم (۲۰,۰۰۰-۱۰,۰۰۰ MW) است [۱۸-۲۰]. روش دوم، پلیمر شدن حلقه گشای دایمر حلقوی لاکتیک اسید (لاکتید) است [۲۱]. این روش به تولید پلیمری با وزن مولکولی زیادتر منجر شده و در شرایط ملایم‌تری انجام می‌شود [۲۲]. تولید لاکتید از لاکتیک اسید، سه شکل متفاوت ایزومر فضایی تولید می‌کند که عبارت از شکل‌های L، D و مزوست (شکل ۵) [۱۱، ۲۳].

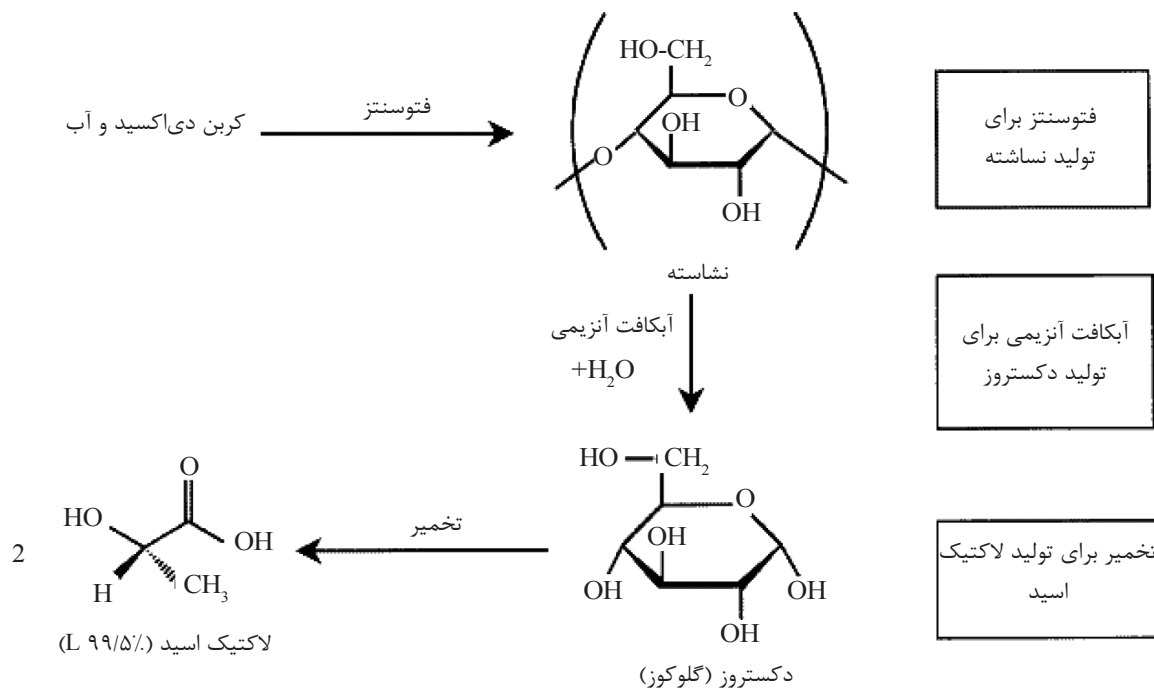
شکل‌های L و D از لحاظ نوری فعال هستند. مزو-لاکتید از نظر نوری غیرفعال است و دمای ذوب کمتری نسبت به لاکتیدهای فعال نوری دارد (شکل ۵) [۲۴، ۲۵]. ابتدا لاکتید خالص‌سازی می‌شود، سپس پلیمر شدن

جدول ۱- پلیمرهای طبیعی و سنتزی زیست‌تخریب‌پذیر [۶].

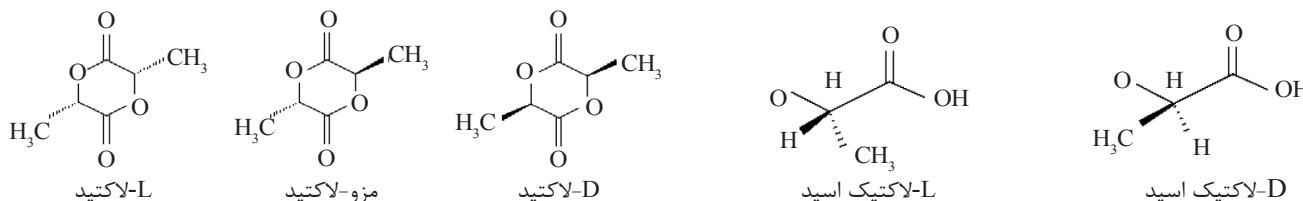
نوع پلیمر	ماهیت شیمیایی	پایه
پلی ساکاریدها	پیوندهای اتری	طبیعی
پروتئین‌ها	پیوندهای آمید	طبیعی
نوکلئیک اسیدها	نوکلئوتید	طبیعی
پلی استرها	$\text{---O---C(=O)---CH}_2\text{---}$	سنتزی
پلی انیدریدها	$\left(\text{---C---R---C(=O)---O} \right)_n$	سنتزی
پلی اوره‌ها	$\left(\text{---R---N---C---O---N---R} \right)_n$	سنتزی

تولید پلی لاکتیک اسید

تولید پلی لاکتیک اسید از راه استخراج نشاسته از گیاهانی مانند ذرت و استخراج قند از گیاهانی مانند چغندر قند آغاز می‌شود [۱۰]. نشاسته را می‌توان از برنج، گندم، گندم سیاه و سیب‌زمینی شیرین نیز استخراج کرد. قند نیز از چغندر قند، آب پنیر و شیر و شیره قند قابل استخراج است. اگر تولید با استفاده از نشاسته انجام شود، نشاسته از راه فرایند آبکافت آنزیمی به قندهای قابل تخمیر (مانند گلوکوز و دکستروز) تبدیل می‌شود. میکرواورگانیسم‌ها قند را طی فرایند تخمیر شکسته، به قطعه‌های کوچک‌تر لاکتیک اسید تبدیل می‌کنند (شکل ۲) [۱۱-۱۳]. لاکتیک اسید دو ایزومر فضایی نوری فعال D (Dextro) و L (Levo) دارد (شکل ۳). تخمیر طبیعی معمولاً محصولی مخلوط از هر دو ایزومر لاکتیک اسید با نسبت تقریبی ۹۹/۵٪ (L) و ۰/۵٪ (D) تولید می‌کند [۱۵].



شکل ۲- تولید لاکتیک اسید از منابع تجدیدپذیر مانند ذرت [۱۴].



— نشان می‌دهد گروه متیل روی صفحه کاغذ است.

..... نشان می‌دهد گروه متیل زیر صفحه کاغذ است.

شکل ۳- دو ایزومر فضایی لاکتیک اسید [۲].

شکل ۵- شکل‌های مختلف ایزومرهای لاکتید [۲۳، ۲۴].

مکانیکی مناسب و زیست‌تخریب‌پذیری خوب، برای کاربرد در مهندسی بافت، رهایش کنترل شده دارو و نخ بخیه جراحی تولید می‌شود [۳۳-۳۶]. به تازگی از این ماده در تولید داربست برای رشد و تکثیر سلول‌ها استفاده شده است [۳۷]. پلی‌لاکتیک اسید تولید شده از مزو-لاکتید پلیمر بی‌شکل است. از طرفی، پلی‌D-لاکتیک اسید تا اندازه‌ای بلوری، نسبتاً سخت و دارای ساختار مولکولی منظم است [۱۱]. مقدار سختی، چقرمگی، دمای ذوب و درجه تبلور این پلیمر با افزودن واحدهای D-لاکتید و اختلاط با سایر پلی‌استرهای خطی مانند پلی‌کاپرولاکتون قابل کنترل است [۹، ۳۱]. سنتز پلی‌D-لاکتید-کو-E-کاپرولاکتون نشان داد، ساختار کوپلیمر و وزن مولکولی به شرایط کوپلیمر شدن بستگی دارد [۳۸]. به‌طور کلی کمپلکس‌های فضایی بر پایه پلی‌لاکتیک اسید، خواص مکانیکی، مقاومت گرمایی و آبکافتی و کارایی بسیار خوبی را نشان می‌دهند [۳۹].

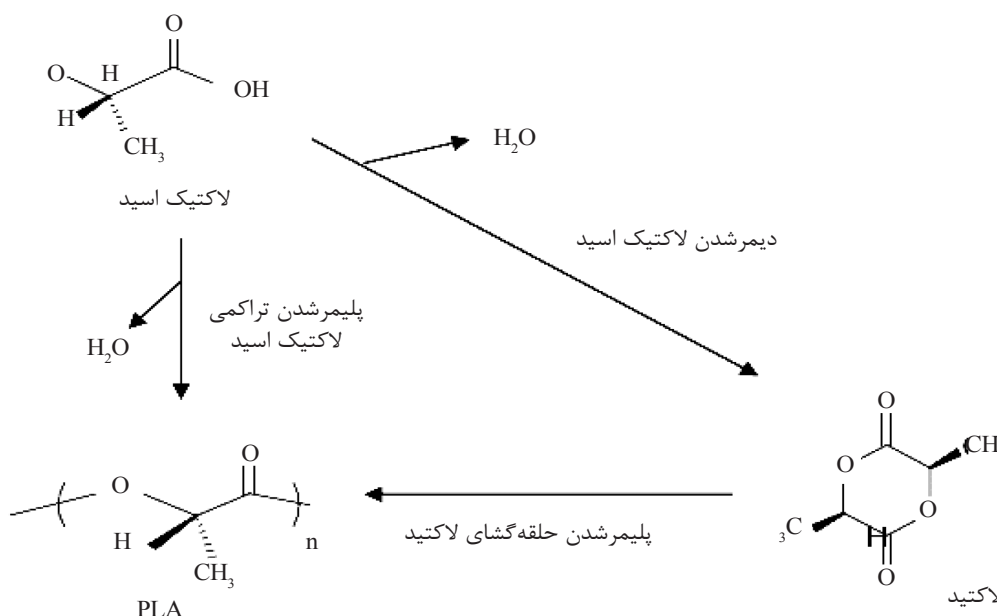
آثار زیست‌محیطی پلی‌لاکتیک اسید

می‌توان اذعان داشت، پلی‌لاکتیک اسید نسبت به پلی‌اتیلن ترفتالات، پلیمری سازگار با محیط زیست است. چرخه زندگی پلی‌لاکتیک اسید

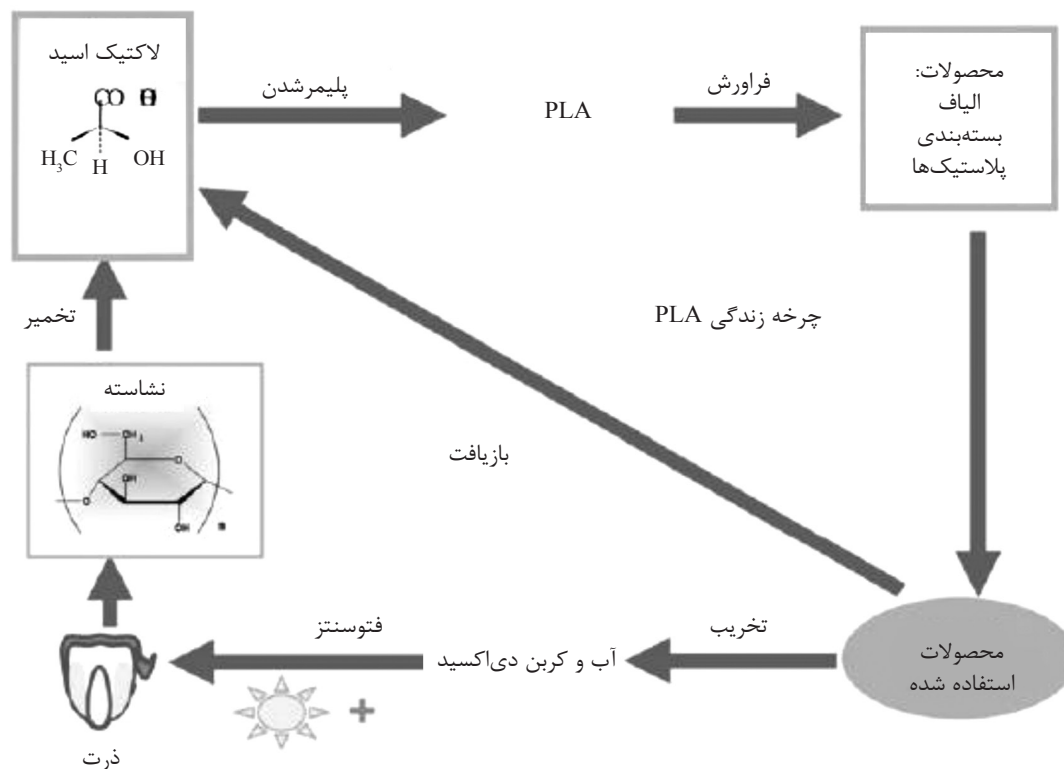
حلقه‌گشا تحت گرما و بدون وجود حلال انجام می‌شود (شکل ۴). پلیمر شدن حلقه‌گشای لاکتید بر اساس نوع ایزومری دایمر آغازگر واکنش، پلیمرهای فضایی متفاوتی را تولید می‌کند [۲۴، ۲۶]. تولید پلی‌لاکتیک اسید به روش لاکتید، باعث بهبود خواص پلیمر می‌شود که این موضوع با کنترل خواص نوری توده پلیمر حاصل می‌شود [۱۵].

با تولید کنترل شده ایزومرهای نوری لاکتیک اسید، خواص متفاوتی در پلیمر ایجاد می‌شود. مقادیر مختلفی از وزن مولکولی پلیمر با کنترل خلوص لاکتید، قابل تولید است. نسبت ایزومرهای D و L و توزیع آن‌ها در طول زنجیر پلیمر بر وزن مولکولی، تبلور و دمای ذوب محصول نهایی پلی‌لاکتیک اسید اثر گذارند [۲۷، ۲۸]. مقدار زیاد D-لاکتید می‌تواند برای تولید پلیمرهای بلوری استفاده شود [۲۹]. زمانی که مقدار D-لاکتید کمتر از ۲٪ باشد، پلیمری با درجه تبلور زیاد به دست می‌آید [۱۱].

درجه تبلور پلی‌لاکتیک اسید با افزایش ایزومر D-لاکتید کاهش می‌یابد، به طوری که پلیمر بی‌شکل با استفاده از مقدار نسبتاً زیاد D-لاکتید (بیش از ۱۵٪) تولید می‌شود [۱۱]. سرعت تبلور پلی‌D-لاکتید-کو-مزولاکتید با تغییر مقدار مزو-لاکتید در مخلوط پلیمر شدن تغییر می‌یابد. به طوری که با افزایش ۱٪ وزنی مزو-لاکتید زمان نیمه واکنش ۴۰٪ افزایش نشان داده است [۳۰]. مقدار تبلور و دمای ذوب پلی‌D-لاکتید خالص به ترتیب حدود ۳۷٪ و ۱۷۸-۱۷۵°C است [۳۱، ۳۲]. پلی‌D-لاکتید به علت خواص



شکل ۴- روش پلیمر شدن برای تولید پلی‌لاکتیک اسید [۲۴].



شکل ۶- چرخه زندگی پلی لاکتیک اسید [۱۱].

می شوند [۱۱]. به طور کلی، سرعت تخریب پلیمرهای زیست تخریب پذیر به شکل شناسی، تبلور و ساختار شیمیایی آنها برمی گردد [۴۶]. مواد از جنس پلی لاکتیک اسید، ابتدا از آبکافت و سپس با عملیات میکروبی، به کربن دی اکسید و آب که نیازهای اساسی برای رشد مواد جدید هستند، تجزیه می شوند [۱۱]. استفاده مؤثر از پلیمرهای زیست تخریب پذیر براساس کنترل زمان لازم برای تخریب است [۴۷].

قابلیت بازیافت پلی لاکتیک اسید به ماده لاکتیک اسید با عملیات آبکافت، به کاهش حجم زباله‌ها منجر می شود. بازیافت پلی لاکتیک اسید با استفاده از آب در محدوده گسترده‌ای از دما انجام شده در نهایت لاکتیک اسید تولید می شود. این لاکتیک اسید در تولید پلی لاکتیک اسید جدید، استفاده می شود [۱۱].

عملکرد و خواص پلی لاکتیک اسید

منسوجات برپایه پلی لاکتیک اسید افزون بر مزایای زیست محیطی، عملکرد فنی بسیار خوبی نیز دارند [۴۸]. به عنوان لیف تولید شده از منابع گیاهی با قابلیت مذاب‌ریسی، پلی لاکتیک اسید بسیاری از خواص الیاف مصنوعی را دارد [۴۸، ۴۹]. خواص الیاف پلی لاکتیک اسید حدوداً میان خواص الیاف پلی آمید ۶ و پلی اتیلن ترفتالات است. از سوی دیگر، خواص مکانیکی این الیاف بسیار به پلی اتیلن ترفتالات معمولی نزدیک است [۳]. پلی لاکتیک اسید پلیمری نسبتاً سفت در دمای محیط است [۲۴]. اما، دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) در محدوده $65-55^\circ\text{C}$ دارد. پلی لاکتیک اسید تولید شده از مزو-لاکتید، دمای انتقال شیشه‌ای نسبتاً کم حدود 34°C را نشان می دهد [۵۰]. دمای ذوب پلی لاکتیک اسید که تنها دارای ایزومر

در شکل ۶ نشان داده شده است. مونومر پلی لاکتیک اسید پایدار است. پلی لاکتیک اسید، که ماده خام اولیه آن (مانند ذرت) تجدیدپذیر و غیرآلاینده است، استفاده از منابعی مانند نفت را به عنوان ماده اولیه محدود می کند [۴۰].

از آنجا که ذرت مصرفی در تولید الیاف پلی لاکتیک اسید، کمتر از ۰/۰۲٪ مقدار کل تولید جهانی آن است، با تولید الیاف پلی لاکتیک اسید از ذرت، بحران غذایی ایجاد نمی شود [۴۱]. پلی لاکتیک اسید از گیاهان تولید، پلیمر شده و به محصولات مدنظر فرآوری می شود. تولید پلی لاکتیک اسید نسبت به تولید پلیمرهای برپایه نفت ۲۵-۵۵٪ انرژی فسیلی کمتر و نیز ۲۰-۵۰٪ منابع سوخت فسیلی کمتر نیاز دارد [۱۴]. در نتیجه، انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتر شده و صرفه جویی قابل توجه در انرژی به دست می آید [۴۲].

پلی لاکتیک اسید مانند تمام پلیمرهای سنتزی در عملیات فرآوری مواد خام اولیه و تولید پلیمر، از سوخت‌های فسیلی استفاده می کند، ولی نقش مهمی در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی ایفا می کند. پلی لاکتیک اسید از مشکلات انباشت زباله‌های پلاستیکی جلوگیری می کند. در نتیجه، مزیت شایان توجهی نسبت به پلی اتیلن ترفتالات دارد [۴۲].

اگر پلی لاکتیک اسید و پلی D-لاکتیک اسید در معرض فرایند آبکافت قرار گیرند، با شکست گروه‌های استری، لاکتیک اسید زیست تخریب پذیر به دست می آید [۴۳]. محصولات تولید شده از پلی لاکتیک اسید در شرایط مناسب در پایان طول عمر خود، بازیافت می شوند [۴۴، ۴۵]. الیاف پلی لاکتیک اسید به عنوان الیاف طبیعی در شرایط معمولی پایدارند، اما در شرایط ویژه معمولاً دمای 60°C و رطوبت نسبی ۹۵-۹۰٪ کاملاً تجزیه

از یک رنگزای پراکنده با مقدار یکسان روی الیاف پلی لاکتیک اسید و پلی اتیلن ترفتالات با نمره نخ یکسان استفاده شود، به دلیل ضریب بازتاب کمتر پلی لاکتیک اسید، شیشه‌های عمیق تری در این الیاف نسبت به الیاف پلی اتیلن ترفتالات حاصل می‌شود. پلی لاکتیک اسید در برابر پرتو فرابنفش مقاومت زیادی دارد، به طوری که پس از مدت ۱۰۰h تابش لامپ آرک زنون بر الیاف، کاهش از دید طول مشاهده نمی‌شود [۱۱]. الیاف پلی لاکتیک اسید در زمینه‌های گوناگون، اعم از پزشکی و دارویی، فیلم و الیاف برای بسته‌بندی، لوازم خانگی و البسه به کار می‌روند [۵۴-۵۱، ۲۲].

نتیجه‌گیری

منسوجات بر پایه پلی لاکتیک اسید افزون بر مزایای زیست‌محیطی، عملکرد فنی بسیار خوب نیز دارند. سهولت فرایند مذاب‌ریسی، طیف یکنواخت خواص، تولید از منابع تجدیدپذیر و قابلیت تبدیل شدن به کود گیاهی (در پایان عمر مفید) موجب شده است که این الیاف مقبولیت فزاینده‌ای در صنایع نساجی به دست آورند. مصرف الیاف پلی لاکتیک اسید در مقایسه با الیاف سنتزی متداول مانند پلی اتیلن ترفتالات، در مرحله اولیه قرار دارد، اما پتانسیل کاربرد الیاف پلی لاکتیک اسید در صنعت نساجی امیدوارکننده است. با توجه به مزایای زیست‌محیطی و عملکرد بسیار خوب در حیطه نساجی، انتظار می‌رود، استفاده از الیاف پلی لاکتیک اسید در آینده افزایش یابد.

مراجع

- Ouchi T. and Ohya Y., Design of lactide copolymers as bio-materials, *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.*, 42, 453-462, 2004.
- Gupta B., Revagade N., and Hilborn J., Poly(lactic acid) fiber: An overview, *Prog. Polym. Sci.*, 32, 455-482, 2007.
- Drumright R.E., Gruber P.R., and Henton D.E., Polylactic acid technology, *Adv. Mater.*, 12, 1841-1846, 2000.
- Bleach N., Tanner K., Kellomäki M., and Törmälä P., Effect of filler type on the mechanical properties of self-reinforced polylactide-calcium phosphate composites, *J. Mater. Sci., Mater. Med.*, 12, 911-915, 2001.
- Tsuji H., Ishida T., and Fukuda N., Surface hydrophilicity and enzymatic hydrolyzability of biodegradable polyesters: 1. Effects of alkaline treatment, *Polym. Int.*, 52, 843-852, 2003.
- Gupta B., Revagade N., and Hilborn J., Poly(lactic acid) fiber: An overview, *Prog. Polym. Sci.*, 32, 455-482, 2007.
- Avinc O., Khoddami A., and Hasani H., A mathematical model to compare the handle of PLA and PET knitted fabrics after different finishing steps, *Fibers Polym.*, 12, 405-413, 2011.
- Hoogsteen W., Postema A., Pennings A., Ten Brinke G., and Zugenmaier P., Crystal structure, conformation and morphology of solution-spun poly(L-lactide) fibers, *Macromolecules*, 23, 634-642, 1990.
- Tsuji H. and Ikada Y., Blends of aliphatic polyesters. II. Hydrolysis of solution-cast blends from poly(L-lactide) and poly(E-caprolactone) in phosphate-buffered solution, *J. Appl. Polym. Sci.*, 67, 405-415, 1998.
- Fattahi F., Izadan H., and Khoddami, A., Investigation into the effect of UV/Ozone irradiation on dyeing behaviour of poly(lactic acid) and poly(ethylene terephthalate) substrates, *Prog. Color; Color. Coat.*, 5, 15-22, 2012.

D یا L است، در محدوده $160-180^{\circ}\text{C}$ قرار دارد، در حالی که دمای ذوب کمپلکس فضایی پلی لاکتیک اسید حدود 220°C است. افزودن مزو-لاکتید می‌تواند دمای ذوب پلی لاکتیک اسید را حدود 50°C کاهش دهد [۱۱]. پلی لاکتیک اسید در دمای بیش از 190°C دمایی که در آن تخریب گرمایی پلی لاکتیک اسید آغاز می‌شود، کاهش شایان توجهی در وزن مولکولی نشان می‌دهد [۱۱].

خواص مکانیکی متفاوتی برای پلی لاکتیک اسید، از مواد نرم و کشسان تا مواد سفت و بسیار محکم می‌تواند به دست آید. اگر خواص مکانیکی بهتر پلی لاکتیک اسید نیاز باشد، پلیمر شبه بلوری نسبت به پلیمر بی شکل ترجیح داده می‌شود. درجه تبلور و وزن مولکولی پلیمر بر خواص مکانیکی آن اثر زیادی دارد. اگر وزن مولکولی پلی لاکتیک اسید افزایش یابد، استحکام کششی و مدول آن افزایش می‌یابد [۱۱].

در ادامه، برخی از خواص پلی لاکتیک اسید در مقایسه با پلی اتیلن ترفتالات بیان می‌شود. وزن مخصوص پلی لاکتیک اسید کمتر از پلی اتیلن ترفتالات است [۱۱]. تنوع ترکیب نوری پلی لاکتیک اسید امکان کنترل دمای ذوب در محدوده $130-175^{\circ}\text{C}$ را می‌دهد. دمای ذوب پلی لاکتیک اسید حدود 170°C است، در حالی که دمای ذوب پلی اتیلن ترفتالات حدود 260°C است. دمای ذوب کم الیاف پلی لاکتیک اسید، به دمای کم اتوی خانگی منجر می‌شود که محدودیت‌هایی را در مصارف خانگی ایجاد می‌کند. دمای اتوی لباس‌هایی که از جنس پلی لاکتیک اسید هستند، کمتر از پنبه و پلی اتیلن ترفتالات است [۱۱].

برگشت‌پذیری کشسان، در از دید طول ۵٪ این لیف، بیشتر از پلی اتیلن ترفتالات است. خواص برگشت‌پذیری کشسان و حفظ تجعد، به حفظ حالت و مقاومت در برابر چروک منجر می‌شود. اگر

11. Avinc O. and Khoddami A., Overview of poly(lactic acid) (pla) fibre Part I: Production, properties, performance, environmental impact, and end-use applications of poly(lactic acid) fibres, *Fibre. Chem.*, 41, 391-401, 2009.
12. Avérous L., *Poly(lactic acid): synthesis, Properties and Applications*, Elsevier, Amsterdam, Monomers, polymers and composites from renewable resources, 3, 433-450, 2008.
13. Jamshidian M., Tehrani E.A., Imran M., Jacquot M., and Desobry S., Poly(lactic acid): Production, applications, nanocomposites, and release studies, *Compr. Rev. Food Sci. Food Safe.*, 9, 552-571, 2010.
14. Vink E.T., Rabago K.R., Glassner D.A., and Gruber P.R., Applications of life cycle assessment to nature works™ poly(lactide) (PLA) production, *Polym. Degrad. Stabil.*, 80, 403-419, 2003.
15. Sawyer D.J., Bioprocessing—no longer a field of dreams, *Macromol. Symp.*, 271-282, 2003.
16. Vert M., Lactide polymerization faced with therapeutic application requirements, *Macromol. Symp.*, 333-342, 2000.
17. Cheng Y., Deng S., Chen P., and Ruan R., Poly(lactic acid) (PLA) synthesis and modifications: A review, *Fron. Chemi China*, 4, 259-264, 2009.
18. Dorgan J.R., Lehermeier H.J., Palade L.I., and Cicero J., Poly(lactides): Properties and prospects of an environmentally benign plastic from renewable resources, *Macromol. Symp.*, 55-66, 2001.
19. Zhong W., Ge J., Gu Z., Li W., Chen X., Zang Y., and Yang Y., Study on biodegradable polymer materials based on poly(lactic acid). I. Chain extending of low molecular weight poly(lactic acid) with methylenediphenyl diisocyanate, *J. Appl. Polym. Sci.*, 74, 2546-2551, 1999.
20. Lunt J., Large-scale production, properties and commercial applications of poly(lactic acid) polymers, *Polym. Degrad. Stabil.*, 59, 145-152, 1998.
21. Gupta M. and Deshmukh V., Thermal oxidative degradation of poly(lactic acid), *Colloid Polym. Sci.*, 260, 514-517, 1982.
22. Auras R., Harte B., and Selke S., An overview of poly(lactides) as packaging materials, *Macromol. Biosci.*, 4, 835-864, 2004.
23. Nampoothiri K.M., Nair N.R., and John R.P., An overview of the recent developments in poly(lactide) (PLA) research, *Bioresource Technol.*, 101, 8493-8501, 2010.
24. Jacobsen S., Fritz H., Degée P., Dubois P., and Jérôme R., Poly(lactide) (PLA)-A new way of production, *Polym. Eng. Sci.*, 39, 1311-1319, 1999.
25. Ikada Y. and Tsuji H., Biodegradable polyesters for medical and ecological applications, *Macromol. Rapid Commun.*, 21, 117-132, 2000.
26. Jacobsen S., Fritz H.-G., Degée P., Dubois P., and Jérôme R., New developments on the ring opening polymerisation of poly(lactide), *Indu. Crops Prod.*, 11, 265-275, 2000.
27. Perepelkin K., Poly(lactide) fibres: Fabrication, properties, use, prospects. A review, *Fibre Chem.*, 34, 85-100, 2002.
28. Lehermeier H.J., Dorgan J.R., and Way J.D., Gas permeation properties of poly(lactic acid), *J. Membr. Sci.*, 190, 243-251, 2001.
29. Blackburn R.S., Zhao X., Farrington D.W., and Johnson L., Effect of D-isomer concentration on the coloration properties of poly(lactic acid), *Dyes and Pigments*, 70, 251-258, 2006.
30. Kolstad J.J., Crystallization kinetics of poly(L-lactide-co-meso-lactide), *J. Appl. Polym. Sci.*, 62, 1079-1091, 1996.
31. Schmack G., Tändler B., Vogel R., Beyreuther R., Jacobsen S., and Fritz H. G., Biodegradable fibers of poly(L-lactide) produced by high-speed melt spinning and spin drawing, *J. Appl. Polym. Sci.*, 73, 2785-2797, 1999.
32. Kricheldorf H.R., Syntheses and application of poly(lactides), *Chemosphere*, 43, 49-54, 2001.
33. Tsuji H. and Sumida K., Poly(L-lactide): V. Effects of storage in swelling solvents on physical properties and structure of poly(L-lactide), *J. Appl. Polym. Sci.*, 79, 1582-1589, 2001.
34. Ikada Y., Polymeric biomaterials research, *Adv. Eng. Mater.*, 1, 67-68, 1999.
35. Yuan X., Mak A. F., Kwok K., Yung B.K., and Yao K., Characterization of poly(L-lactic acid) fibers produced by melt spinning, *J. Appl. Polym. Sci.*, 81, 251-260, 2001.
36. Chen J.P. and Su C.H., Surface modification of electrospun PLLA nanofibers by plasma treatment and cationized gelatin immobilization for cartilage tissue engineering, *Acta Biomaterialia*, 7, 234-243, 2011.
37. Ma Z., Gao C., Yuan J., Ji J., Gong Y., and Shen J., Surface modification of poly-L-lactide by photografting of hydrophilic polymers towards improving its hydrophilicity, *J. Appl. Polym. Sci.*, 85, 2163-2171, 2002.
38. Baimark Y. and Molloy R., Synthesis and characterization of poly(L-lactide-co-ε-caprolactone) copolymers: Effects of stannous octoate initiator and diethylene glycol coinitiator concentrations, *Sci. Asia*, 30, 327-334, 2004.
39. Tsuji H., Poly(lactide) stereocomplexes: Formation, struc-

- ture, properties, degradation, and applications, *Macromol. Biosci.*, 5, 569-597, 2005.
40. Dugan J.S., Novel properties of PLA fibers, *Int. Nonwovens J.*, 10, 29-33, 2001.
 41. Sawada K. and Ueda M., Optimization of dyeing poly(lactic acid) fibers with vat dyes, *Dyes and Pigments*, 74, 81-84, 2007.
 42. Jacobsen S., Fritz H., Degée P., Dubois P., and Jérôme R., Single-step reactive extrusion of PLLA in a corotating twin-screw extruder promoted by 2-ethylhexanoic acid tin (II) salt and triphenylphosphine, *Polymer*, 41, 3395-3403, 2000.
 43. García C.G., Ferrus L.L., Moratal D., Pradas M.M., and Sánchez M.S., Poly(L-lactide) substrates with tailored surface chemistry by plasma copolymerisation of acrylic monomers, *Plasma Processes and Polymers*, 6, 190-198, 2009.
 44. Vink E.T., Rábago K., Glassner D.A., Springs B., O'Connor R.P., Kolstad J., and Gruber P.R., The sustainability of natureworks™ polylactide polymers and Ingeo™ polylactide fibers: An update of the future, *Macromol. Biosci.*, 4, 551-564, 2004.
 45. Hiljanen-Vainio M., Varpomaa P., Seppälä J., and Törmälä P., Modification of poly(L-lactides) by blending: Mechanical and hydrolytic behavior, *Macromol. Chem. Phys.*, 197, 1503-1523, 1996.
 46. Miyata T. and Masuko T., Crystallization behaviour of poly(L-lactide), *Polymer*, 39, 5515-5521, 1998.
 47. Arias V., Höglund A., Odellius K., and Albertsson A.-C., Tuning the degradation profiles of poly(l-lactide)-based materials through miscibility, *Biomacromolecules*, 15, 391-402, 2013.
 48. Eren H.A., Avinc O., Uysal P., and Wilding M., The effects of ozone treatment on polylactic acid (PLA) fibres, *Text. Res. J.*, 81, 1091-1099, 2011.
 49. Avinc O. and Khoddami A., Overview of poly(lactic acid) (PLA) fibre, *Fibre Chem.*, 42, 68-78, 2010.
 50. Li S., Tenon M., Garreau H., Braud C., and Vert M., Enzymatic degradation of stereocopolymers derived from L-, DL- and meso-lactides, *Polym. Degrad. Stabil.*, 67, 85-90, 2000.
 51. Hsu S.H. S.H., and Chen W.C., Improved cell adhesion by plasma-induced grafting of L-lactide onto polyurethane surface, *Biomaterials*, 21, 359-367, 2000.
 52. Tsuji H., In vitro hydrolysis of blends from enantiomeric poly(lactide)s, Part 1. Well-stereo-complexed blend and non-blended films, *Polymer*, 41, 3621-3630, 2000.
 53. Yang X., Kang S., Yang Y., Aou K., and Hsu S. L., Raman spectroscopic study of conformational changes in the amorphous phase of poly(lactic acid) during deformation, *Polymer*, 45, 4241-4248, 2004.
 54. Xu X., Yang Q., Wang Y., Yu H., Chen X., and Jing X., Biodegradable electrospun poly(L-lactide) fibers containing antibacterial silver nanoparticles, *Eur. Polym. J.*, 42, 2081-2087, 2006.

Review on Production, Properties, and Applications of Poly(lactic acid) Fibers

Farnaz Sadat Fattahi, Akbar Khoddami*, and Hossein Izadian

Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, P.O. Box: 84156-83111, Isfahan, Iran

Received 16 April 2014; Accepted 25 May 2015

Abstract

There is a high demand in the textile industries for environment friendly processes with minimum wastewater generation. In addition, the reduction of oil reservoirs has led to an increased interest in production of biodegradable polymers from renewable natural resources like plants. Poly-lactic-acid (PLA), the first synthetic fiber produced from renewable materials, combines ecological advantages with excellent performance for textile application. PLA actually fills the gap between synthetic and natural fibers and has found a wide range of applications, from medical and pharmaceutical applications to environmentally benign film and fibers for packaging, and clothing. In recent research studies, PLA nanofibers have been used as a new system for drug delivery. PLA has found a growing demand in textile industries as a result of its renewable source origin, ease of melt spinning and process-ability and ease of composting and recycle-ability. This review provides an up-to-date information about production, properties, performance and applications of PLA fibers.

Keywords

poly(lactic acid) fibers,
biodegradable,
synthetic fibers,
production process,
properties

(*) Address Correspondence to A. Khoddami, Email: khoddami@cc.iut.ac.ir