



مروری بر خواص، کاربرد و روش‌های رنگ‌رزی پلی لاکتیک اسید

فائزه صحرایی اردکانی^۱، ابوالفضل زارع^{۲*}، محمد خواجه مهریزی^۳

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، صندوق پستی: ۷۴۱-۸۹۱۹۵.

۲-استادیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، صندوق پستی: ۷۴۱-۸۹۱۹۵.

۳-دانشیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، صندوق پستی: ۷۴۱-۸۹۱۹۵.

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۱/۳۰ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۷/۰۴/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۴/۳۰ در دسترس به صورت الکترونیک: ۹۷/۰۵/۰۳

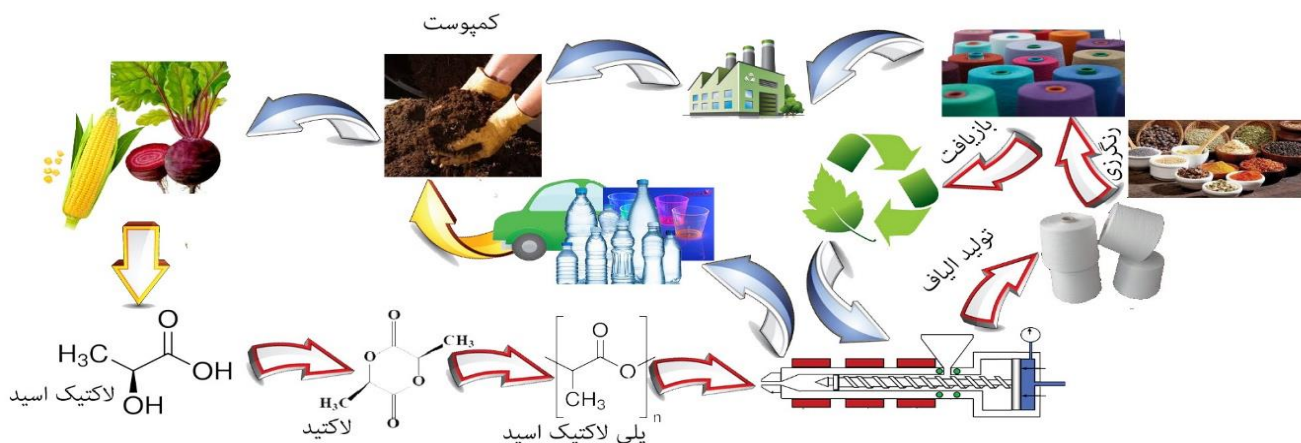
چکیده

افزایش گرمای جهانی و آلودگی محیط‌زیست سبب گردیده تا استفاده از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر گسترش یابد. یکی از مهم‌ترین پلیمر این دسته، پلی (لاکتیک اسید) (PLA) می‌باشد که می‌توان آن را با روش ذوب‌ریسی که به صرفه‌ترین روش در تولید الیاف بشراخت می‌باشد، تولید نمود. پلی(لاکتیک اسید) به عنوان یک لیف از خانواده پلی استرها جایگزین مناسب زیست تخریب پذیر برای پلی(اتیلن ترفتالات) (PET) در بسیاری از منسوجات فنی و پوشاک می‌باشد. اگرچه PLA در بسیاری از ویژگی‌ها شبیه پلی استر است ولی شرایط رنگ‌رزی متفاوتی از آن دارد. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که ایزوترم‌های جذب PLA با مواد رنگزای طبیعی و مصنوعی به ترتیب از ایزوترم نرنست و لانگمیور پیروی می‌کند. در این مقاله، تحولات اخیر در الیاف و منسوجات پلی (لاکتیک اسید) با مواد رنگزای دیسپرس، خمی، کاتیونی و طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی

الیاف پلی (لاکتیک اسید)، زیست تخریب‌پذیری، ذوب‌ریسی، مواد رنگزای مصنوعی، مواد رنگزای طبیعی، ایزوترم.

چکیده تصویری





A Review of the Properties, Application and Methods of Dyeing of Poly Lactic Acid

Faezeh Sahraey Ardakani, Abolfazl Zare*, Mohammad Khajeh Mehrizi
Textile Engineering Department, Yazd University, P.O. Box: 89195-741, Yazd, Iran.

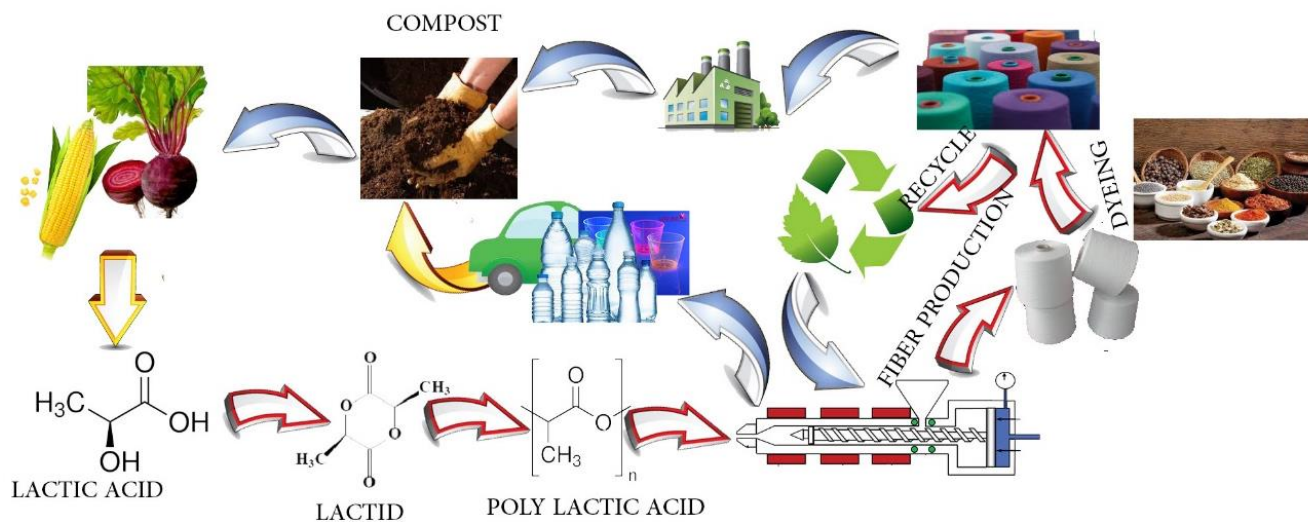
Abstract

The raising of global warming and environmental pollution has increased the use of biodegradable polymers. One of the most important polymers in this kind are poly (lactic acid) (PLA), which can be produced by the melting process which is the most efficient method for the fiber production. Poly (lactic acid) is a biodegradable alternative to poly (ethylene terephthalate) (PET), in many technical textiles and clothing products. Although PLA is similar to PET in various aspects, PLA has different dyeing conditions from it. The results of researches show that PLA absorption isotherm with natural and synthetic dyes follow from Nernst and Langmuir isotherms. This paper reviews the recent developments in the dyeing of PLA fibers and textiles with disperse, vat, cationic and natural dyes.

Keywords

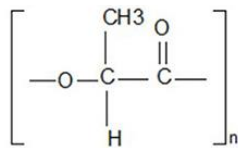
Poly (lactic acid) fiber, Biodegradability, Melt spinning, Synthetic dyes, Natural dyes, Isotherm

Graphical abstract



۱- مقدمه

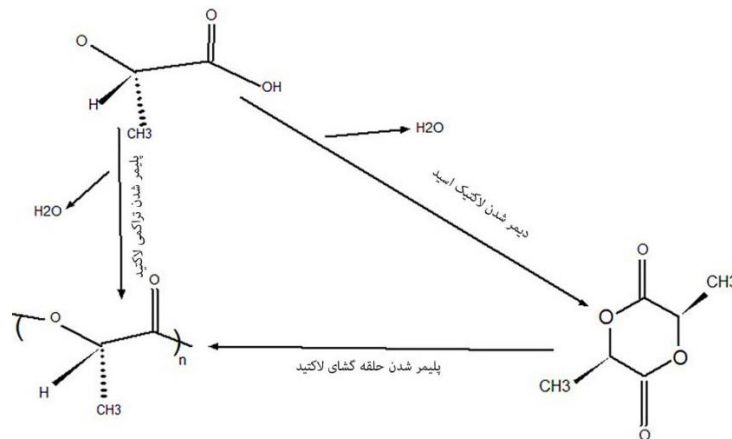
لاکتیک اسید و پلیمر شدن حلقه گشا است (شکل ۲). پلیمر شدن تراکمی لاکتیک اسید، در خلاء و دمای زیاد انجام می‌شود. یک حلال نیز برای استخراج آب تولید شده در واکنش تراکمی مورد نیاز می‌باشد. این روش تولید PLA را کاروترز به کار برده است. محصول به دست آمده، به علت مشکلات حذف آب و ناخالصی‌ها، دارای وزن مولکولی کم تا متوسط (M_w ۲۰۰۰۰-۱۰۰۰۰) به میزان کم‌تر استفاده می‌شود. روش دوم پلیمر شدن حلقه گشای دایمر حلقوی لاکتیک اسید است. این روش به تولید پلیمری با وزن مولکولی زیادتر منجر شده و در شرایط ملایم‌تری انجام می‌شود. تولید لاکتید از لاکتیک اسید، سه شکل متفاوت ایزومر فضایی تولید می‌کند که عبارت از ایزومرهای D، L و مزو لاکتید است (شکل ۳) [۳، ۴]. 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. با تولید کنترل شده ایزومرهای نوری لاکتیک اسید، می‌توان پلیمر با خواص متفاوتی را تولید کرد. نسبت ایزومرهای D و L و توزیع آنها در طول زنجیر پلیمری بر وزن مولکولی، تبلور و دمای ذوب محصول نهایی PLA اثر می‌گذارد. درجه تبلور PLA با افزایش ایزومر D لاکتید کاهش می‌یابد، به طوری که با افزایش D لاکتید (بیش از ۱۵٪) پلیمر بی‌شکل تولید می‌گردد.



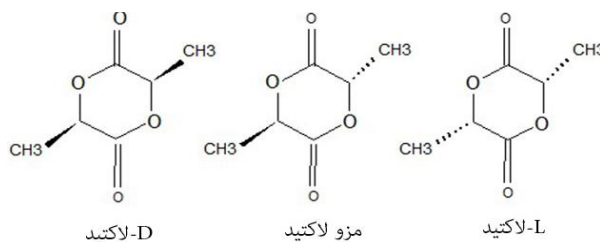
شکل ۱- (PLA) [۲].

امروزه استفاده از پلیمرهای مصنوعی به علت قیمت ارزان و خواص مکانیکی خوب مورد توجه قرار گرفته است، ولی به علت مسائل زیست محیطی علاقه به پلیمرهای زیست تخریب پذیر افزایش یافته است. یکی از این پلیمرها پلی (لاکتیک اسید) (PLA) می‌باشد. PLA یک پلی استر گرمانرم آلیفاتیک خطی بوده که از منابع تجدید پذیر مانند ذرت، چغندر قند، نیسکر و گندم حاصل می‌گردد. تولید PLA اولین بار توسط والس کاروترز^۱ در سال ۱۹۳۲ با استفاده از پلی‌ساکارید لاکتیک اسید انجام شد [۱]. در سال ۱۹۹۷ شرکت نیچر ورکس^۲ PLA را با استفاده از فرآیند ساده تخمیر و پلیمریزاسیون ذرت و نشاسته و چغندر قند تولید کرد. ساختار شیمیایی PLA در شکل ۱ نشان داده شده است [۲]. اگر تولید با استفاده از نشاسته انجام شود، نشاسته از راه فرآیند آبکافت آنزیمی به قندهای قابل تخمیر (مانند گلوکوز و دکستروز) تبدیل می‌شود. میکرواورگانیسم‌ها، قند را طی فرآیند تخمیر شکسته، به قطعه‌های کوچک‌تر لاکتیک اسید تبدیل می‌کنند. لاکتیک اسید از دو ایزومر فضایی نوری فعال D (dextro) و L (levo) تشکیل شده است. محصول تخمیر لاکتیک اسید معمولاً مخلوطی از هر دو ایزومر لاکتیک اسید با نسبت تقریبی ۹۹/۵٪ (L) و ۰/۵٪ (D) را تولید می‌کند. این دو ایزومرها دارای خواص فیزیکی یکسان هستند، به‌جز اینکه ایزومر L نور پلاریزه را در جهت عقربه‌های ساعت و ایزومر D برخلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخاند. دو روش اصلی برای تولید PLA از مونومر لاکتیک اسید، پلیمر شدن تراکمی

¹ Caroters
² Natural works



شکل ۲- روش پلیمر شدن برای تولید PLA [۳].



شکل ۳- شکل‌های مختلف ایزومر لاکتید [۴].

مقاله

درمانی مبتنی بر سلول برای بیماری‌های قلبی عروقی، بافت ماهیچه‌ای، بازسازی استخوان و غضروف و درمان‌های عصبی و ارتوپدی تولید شده است. کاربردهای PLLA به شکل میکرو ذرات تزریقی، برای بازسازی صورت انجام می‌گیرد. میکروذرات‌های PLLA همچنین به عنوان مواد مغذی در آمبولیزاسیون شریانی مورد استفاده قرار می‌گیرند که یک روش موثر برای درمان استاز و آسیب‌های وریدی، خونریزی عظیم و تومور است [۱۰]. میکروکپسول‌ها در سیستم‌های تحویل دارویی برای اعمال طولانی مدت انواع مختلفی از داروهای پزشکی مانند پیشگیری از بارداری، مسکن، بی حسی موضعی و واکسن استفاده می‌شود [۱۱]. در شکل ۴ برخی از کاربردهای متنوع PLA در پزشکی نشان داده شده است [۱۲].

۲-۳- کاربرد در بسته‌بندی

برای مدت زمان طولانی، پلیمرها اغلب در مواد بسته‌بندی معمولی مورد استفاده قرار می‌گرفتند زیرا آنها چندین ویژگی مانند نرمی، سبکی و شفافیت را دارند. تا به حال پلاستیک‌های پتروشیمی مانند PET، پلی وینیل کلراید، پلی اتیلن، پلی اتیلن با چگالی کم، پلی اتیلن با چگالی بالا، پلی پروپیلن، پلی استایرن و پلی آمید به عنوان مواد بسته‌بندی مورد استفاده قرار می‌گرفتند. استفاده روز افزون از ترکیبات مصنوعی در بسته‌بندی به علت در دسترس بودن، هزینه کم و به دلیل عملکرد خوب مکانیکی آنها مانند مقاومت کششی، مانع خوب برای اکسیژن، دی اکسید کربن و ترکیبات آروماتیک بیشتر می‌شود. با این حال افزایش استفاده از فیلم‌های بسته‌بندی مصنوعی به علت زیست‌تخریب پذیر نبودن آنها به مشکلات جدی محیط‌زیست منجر شده است [۱۳]. عملکرد مورد انتظار از مواد پلاستیکی زیستی مورد استفاده در کاربردهای بسته‌بندی مواد غذایی، حفاظت از آلودگی محیط‌زیست، حفظ کیفیت غذایی و ایمن بودن آن برای تمام مدت زمان نگهداری است. به دلیل زیست‌تخریب پذیر بودن PLA مشکلات آلودگی زیست‌محیطی را نخواهیم داشت. برای حفظ کیفیت مواد غذایی مهم‌ترین نکته کاهش ورود هوا به داخل بسته‌بندی است. برای ایجاد چنین شرایطی می‌توان از چند روش استفاده کرد یکی از روش‌ها، استفاده از نانو کامپوزیت PLA/سیلیکات برای کاهش ورود هوا است. روش دوم برای بهبود خواص ورود هوا استفاده از بلوک‌کننده‌های پرتو UV می‌باشد.

سرعت تبلور پلی D لاکتید کو مزو لاکتید با تغییر مقدار مزو لاکتید در مخلوط پلیمر تغییر می‌یابد به طوری که با افزایش ۱٪ وزنی مزو لاکتید افزایش زمان نیمه واکنش صفر تا ۴۰٪ گزارش شده است [۳].

۲- خواص الیاف PLA

الیاف PLA در مقایسه با پنبه در خواص ضد چروک و مقاومت در برابر پرزدهی بازده بهتری را از خود نشان داده و خواص اشتعال‌پذیری کمتری نسبت به پنبه دارد. الیاف PLA در مقایسه با PET آب‌دوستی، انعطاف‌پذیری و رطوبت باز یافته بیشتر و چگالی، مقاومت در برابر سایش، ضریب شکست و دمای ذوب کمتری را از خود نشان می‌دهد.

از خواص دیگر PLA می‌توان به موئینگی و جذب رطوبت خوب، افتابش^۱ و زیر دست خوب، مقاومت در برابر چروک خوب، خواص خودتمیزشوندگی خوب، راحتی پوشش، مقاومت در برابر پرتو UV، استحکام کششی خوب، آبرفتگی قابل کنترل، آزادسازی بوی پایین، تولید دود کم روی شعله، زیست‌تخریبی در شرایط مناسب اشاره کرد [۶، ۵]. مقایسه ویژگی‌های مهم PLA با بعضی از الیاف دیگر در جدول ۱ آورده شده است [۷].

۳- کاربردهای PLA

۳-۱- کاربرد در پزشکی

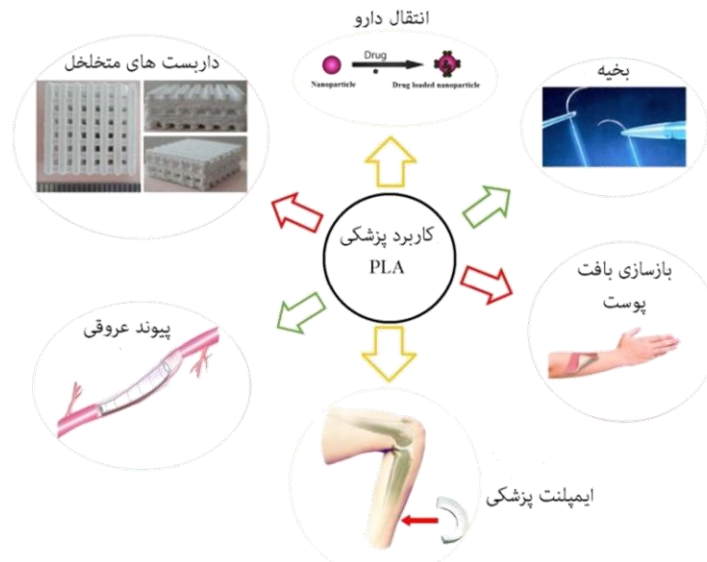
پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر جایگزین مناسب برای بهبود و توسعه برنامه‌های متعدد در پزشکی هستند. PLA از مواد زیستی پرترفدار است که دلیل آن، تبدیل مونومرها، به مواد خوراکی تجدیدپذیر غیرسمی است. انواع کاربرد های PLA شامل نخ بخیه تجزیه پذیر، داربست‌های متخلخل برای کاربردهای سلولی، نانوذرات و انتقال دارو می‌باشد [۸]. پلیمر PLA برای نخ بخیه استفاده می‌شود در صورتی که PLLA برای نخ بخیه مناسب نمی‌باشد زیرا تخریب آن آهسته می‌باشد، ولی برای کاربردهای که نیاز به نگهداری طولانی مدت دارند مانند بازسازی رباط، تاندون و استنت‌های جراحی عروقی و اورولوژی از PLLA استفاده می‌گردد [۹]. داربست‌های متخلخل سه‌بعدی PLA برای کشت انواع سلول‌های مختلف، با استفاده از ژن

^۱ Drape

جدول ۱ - مقایسه برخی از خواص PLA با دیگر الیاف [۷].

خواص	Nylon6,6	Nylon6	PAN	PET	PLA	Sorona3GT ^۲
گرانروی	۱/۱۴	۱/۱۴	۱/۱۸	۱/۳۸	۱/۲۵	۱/۳۳
دمای انتقال شیشه‌ای (°C)	۵۵-۴۰	۶۰-۴۰		۸۰-۷۰	۶۰-۵۵	۵۵-۴۵
دمای ذوب (°C)	۲۶۵	۲۲۰	۳۲۰	۲۶۰	۱۷۰-۱۶۵	۲۲۸
استحکام g/d	۱۰-۶	۵/۵	۴	۶	۶	۵-۴
رطوبت باز یافته %	۴	۴/۱	۲-۱	۰-۲/۴	۰-۴/۶	۰-۲/۳
برگشت‌پذیری (% کشش)	۸۹	۸۹	۵۰	۶۵	۹۳	۱۰۰
ضریب شکست	۱/۵۴	۱/۵۲	۱/۵۰	۱/۵۴	۱/۱-۳۵/۴۵	۱/۵۷

^۲ Copolymer 1,3-propanediol, terephthalic acid



شکل ۴- کاربرد های PLA در پزشکی [۱۱۲].

۴-۱-۱- ذوب‌ریسی

الینگ^۱ و همکارانش در سال ۱۹۸۲ ذوب‌ریسی PLLA^۲ با وزن مولکولی^۵ $\times 10^5$ ۳-۵ دالتون را در دمای ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد با سرعت کشش Cm/min ۳۵-۲۵ را انجام دادند. آن‌ها الیاف با مقاومت ۰/۵ GPa تولید کرده و بدین نتیجه رسیدند که با افزایش وزن مولکولی استحکام نیز افزایش می‌یابد [۱۹]. فامبری^۳ و همکارانش در سال ۱۹۹۶، ذوب‌ریسی PLLA با متوسط وزنی مولکولی ویسکوزیته ۳۳۰۰۰ را در سرعت‌های بالاتر از ۸-۱/۲۰ m/min انجام دادند. مدول و استحکام کششی را به ترتیب برابر ۵/۱ GPa و ۰/۲۱-به دست آوردند [۲۰]. یوان^۴ و همکارانش در سال ۲۰۰۰ الیاف PLLA را با فرآیند دو مرحله‌ای کشش ذوب‌ریسی کردند و سپس در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، بر روی الیاف کشش دوم اعمال شد. نتایج حاصل نشان داد که کشش گرم باعث افزایش استحکام کششی از ۳۰۰ به ۶۰۰ MPa و بلورینگی از ۵۰/۳ به ۶۳/۷٪ می‌شود [۲۱]. جوهن^۵ و همکارانش در سال ۲۰۱۲، اثر نانو الیاف سلولزی را بر روی خواص و فرآیند ذوب‌ریسی PLA مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ابتدا نانو الیاف‌های سلولزی با PLA مخلوط و سپس برای ذوب‌ریسی آماده نمودند. نتایج نشان داد که افزودن نانو الیاف سلولزی به PLA باعث افزایش زبری سطح، بلورینگی و پایداری حرارتی شده و همچنین باعث افزایش مقاومت خزش و کاهش جمع‌شدگی می‌گردد [۲۲]. ذاکر حسین^۶ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ خواص مکانیکی، بلورینگی و جذب رطوبت الیاف پلی لاکتیک اسید در کشش مذاب را مورد بررسی قرار دادند. مواد PLA در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شده و سپس در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد ذوب شدند و کشش‌های مختلف روی آن اعمال شد. سرعت کشش بالا باعث کاهش قطر و افزایش بلورینگی و در

روش دیگر برای کاهش ورود هوا افزایش تبلور PLA می‌باشد که با استفاده از نانو فناوری مثل تولید نانو کامپوزیت PLA/پاکتری سلولز و استفاده از نانو لوله‌های کربنی در PLA می‌توان آن را افزایش داد. برای ایمن بودن، احتمال انتقال مواد کم بوده و اگر نیز انتقالی وجود داشته باشد، لاکتیک اسید است که ۷۰۰ برابر کمتر از لاکتیک اسید موجود در شیر مادر است [۱۷-۱۴].

۳-۳- کاربرد در نساجی

PLA برای کاربرد الیاف مناسب می‌باشد زیرا توانایی جذب ترکیبات آلی و خواص موئینگی را دارد. از آنجایی که الیاف PLA نسبتاً قطبی است می‌تواند جذب رطوبت خوبی را داشته باشد که برای استفاده به‌عنوان دستمال مرطوب، گزینه مناسبی می‌باشد. از PLA به‌دلیل خواص موئینگی در محافظ مچ بند دستگاه فشار خون برای کاهش حساسیت پوستی، صافی‌های آب و محصولات یک‌بار مصرف استفاده می‌شود. PLA در صنایع پوشاک به علت خواص موئینگی و راحتی، جایگزین مناسبی به جای الیاف مصنوعی مانند نایلون و پلی استر می‌باشد. PLA و پنبه/PLA برای لباس‌های ورزشی به علت عایق حرارتی و جذب عرق خوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین در ژاکت به علت انعطاف‌پذیری بالا در پرده‌ها، روبالشتی و قالیچه به دلیل استحکام و خواص ضدچروک مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۸]. کاربردهای دیگر آن عبارتند از: تجهیزات خودروها به علت خواص موئینگی و ثبات نوری خوب، چادر و چترها به علت بازگشت پذیری الاستیسیته و مقاومت در برابر پروتو UV و همچنین در کیسه‌های خواب به علت عایق حرارتی بودن [۵].

۴- روش‌های تولید و رنگریزی

۴-۱- تولید PLA

الیاف PLA به روش‌های ذوب‌ریسی، خشک‌ریسی، ترریسی، ژل‌ریسی و الکتروریسی تولید می‌شود که روش‌های متداول آن، روش ذوب‌ریسی و الکتروریسی است که در ادامه بررسی می‌شوند.

¹ Eling

² Poly L-lactic acid (PLLA)

³ Fambri

⁴ Yuan

⁵ John

⁶ Zakir Hossaina

مقاله

شرایط قلیایی شدید باشد [۲۹]. اسشیر^۶ و همکارانش در سال ۲۰۰۱ روی کاربرد و قدرت رنگی دیسپرس در پارچه PLA تحقیق کردند آنها بدین نتیجه رسیدند که در رنگرزی PLA، استفاده از کریر، یکنواخت‌کننده و ضدکف‌ها توصیه نمی‌شود. مواد رنگزای با ساختار خطی رمق کشی خوبی بر روی پارچه‌های PLA از خود نشان می‌دهند [۳۰]. یانگ^۷ و همکارانش در سال ۲۰۰۳، میزان رمق کشی چند ماده رنگزای دیسپرس، بین دو لیف PLA و PET را مورد بررسی قرار دادند، رمق کشی، ثبات شستشو، ثبات سایشی و ضریب شکست PET نسبت به PLA بالاتر بوده در حالی که در ثبات نوری تفاوت کمی داشتند [۳۱]. کارست^۸ و همکارانش در سال ۲۰۰۴ با استفاده از عامل حلالیت، توضیح جذب رنگزای دیسپرس در PLA را مورد بررسی قرار دادند. مشخص شد رنگزاهای پارامتر انحلال پذیری نزدیک به PLA تمایل به جذب بهتر ماده رنگزا در دمای ۱۱۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد دارند [۳۲]. چویی^۹ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ PLA را با ۲۰ ماده رنگزای دیسپرس رنگرزی کردند. آنها گزارش کردند رنگ پذیری و ثبات شستشویی پارچه‌های PLA از PET کمتر است [۳۳]. بچ^{۱۰} و همکارانش در سال ۲۰۰۶ رنگرزی PLA در محلول دی اکسید کربن فوق بحرانی را مورد بررسی قرار دادند. بررسی مطالعات آنها نشان داد میزان تخریب لیاف PLA رنگرزی شده در آب بیشتر از محلول دی‌اکسید کربن فوق بحرانی است و ثبات شستشویی و مالشی خوب تا خیلی خوب را از خود نشان می‌دهد [۳۴]. هی^{۱۱} و همکارانش در سال ۲۰۱۰ در مورد سنتز و استفاده مواد رنگزا دیسپرس آزو و آنتراکینون زرد برای لیاف PLA تحقیق نمودند. ماهیت آلکیل زنجیره ای متصل به حلقه فنیل ماده رنگزای دیسپرس در شکل ۶ بر روی رمق کشی ماده رنگزا و خواص ثبات شستشو تاثیر قابل توجهی دارد [۳۵]. چویی و همکارانش در تحقیق دیگری در سال ۲۰۱۰ خصوصیات رنگرزی دیسپرس جدید آزو از نفتالیمید و ثبات رنگی روی لیاف PLA مورد بررسی قرار دادند. فتالیمیدها توانایی برای تولید مواد رنگزای با ثبات بالا برای PLA را دارند [۳۶]. بیلال^{۱۲} و همکارانش در سال ۲۰۱۱ بر روی تغییرات ساختاری در حین رنگرزی PLA با مواد رنگزای دیسپرس تحقیق و بررسی کردند. در این مطالعه رنگرزی آنها مشخص شد رمق کشی حمام رنگ چند درجه بالاتر از T_g شروع شده است و به طور پیوسته با افزایش دمای رنگرزی رمق کشی نیز افزایش می‌یابد [۳۷]. آوینس^{۱۳} و همکارانش در سال ۲۰۱۱ تحقیقی برای رسیدن به حداکثر ثبات شستشویی پارچه PLA رنگرزی شده با تنظیم میزان هوادهی در طول حذف ماده رنگزای سطحی انجام دادند [۳۸]. نتایج بدست‌آمده نشان داد که کاهش میزان هوا باعث افزایش ثبات شستشویی شده است، زیرا وجود اکسیژن هوا مقداری از دی تیونیت سدیم را مصرف کرده و استفاده از حداقل هوا باعث کاهش مواد شیمیایی می‌شود [۳۸].

نتیجه افزایش خواص کششی شد. افزایش دمای کشش باعث کاهش بلورینگی و در نتیجه کاهش مقاومت کششی شد [۲۳]. بایکوس^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۶ بهبود رنگ‌پذیری پلی لاکتیک اسید با استفاده از نانو ذرات آمینو فنیل در طول ذوب‌ریسی را مورد بررسی قرار دادند. افزایش در صد بلوری شدن و استحکام کششی با افزایش نانو ذرات همراه است و باعث کاهش جذب مواد رنگزای دیسپرس نیز گردید [۲۴]. کارخانسیس^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ در مورد اکستروژن فیلم تحت فشار پلی لاکتیک اسید بدون افزایش استحکام مذاب تحقیق کردند. آنها متوجه شدند کنترل نامناسب PSR (نسبت غلظت برداشت و سرعت اکستروژر) و فشار هوا باعث ایجاد فیلم ناپایدار شده و منجر به کاهش نقطه ذوب، ایجاد حباب و رزونانس کشش می‌شود [۲۵].

۱-۲-۴- الکترورسی

یانگ^۳ و همکارانش در سال ۲۰۰۴ با استفاده از فرآیند الکترورسی، میکرو و نانو لیاف پلی لاکتیک اسید تولید نموده و سپس پتانسیل آنها برای استفاده در مهندسی بافت عصبی مورد بررسی قرار دادند. آنها غلظت‌های ۳، ۲، ۱٪ محلول پلیمری را در حلال‌های N-N دی متیل فرم آمید (DMF) /دی کلرو متان (DCM) الکترورسی کردند. قطر لیاف بدست‌آمده برای غلظت ۲٪، ۵۰۰ تا ۵۵۰ نانومتر و برای غلظت ۵٪، ۸۰۰ تا ۳۰۰۰ نانومتر شد و قطر لیاف با افزایش غلظت، افزایش یافت. رشد سلول در PLA خوب بوده و گزینه مناسبی برای استفاده در مهندسی بافت بود [۲۶]. ثویو^۴ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ تاثیر حرارت روی الکترورسی مذاب PLA را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که الکترورسی مذاب می‌تواند یک روش قابل قبول برای تولید لیاف PLA در مقیاس میکرون باشد [۲۷]. کاساسولا^۵ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ بر روی اثر محلول‌های مختلف روی ریخت‌شناسی و قطر لیاف PLA در الکترورسی مطالعه کردند. آنها از حلال‌های مختلف مانند استن، دی اکسان، تتراهیدروفوران، دی کلرو متان، کلروفرم، دی متیل فرمامید و دی متیل استامید استفاده کردند. در بین حلال‌های استفاده شده تنها استفاده از استن، باعث تولید نانوالیاف شد (شکل ۵) [۲۸].

۲-۲-۴- رنگرزی PLA

PLA را می‌توان به صورت لیاف و نخ رنگرزی کرد هر چند رنگرزی لیاف بسیار رایج نیست. پارچه‌های PLA را می‌توان با مواد رنگزای طبیعی و مصنوعی رنگرزی کرد. مواد رنگزای مصنوعی شامل مواد رنگزای دیسپرس، کاتیونی، خمی می‌باشد [۲۹].

۱-۲-۴- رنگرزی PLA با مواد رنگزای دیسپرس

رنگرزی PLA معمولاً با مواد رنگزای دیسپرس انجام می‌گیرد و نباید در

⁶ Scheyer

⁷ Yang

⁸ Karst

⁹ Choi

¹⁰ Bach

¹¹ He

¹² Bilal

¹³ Avinc

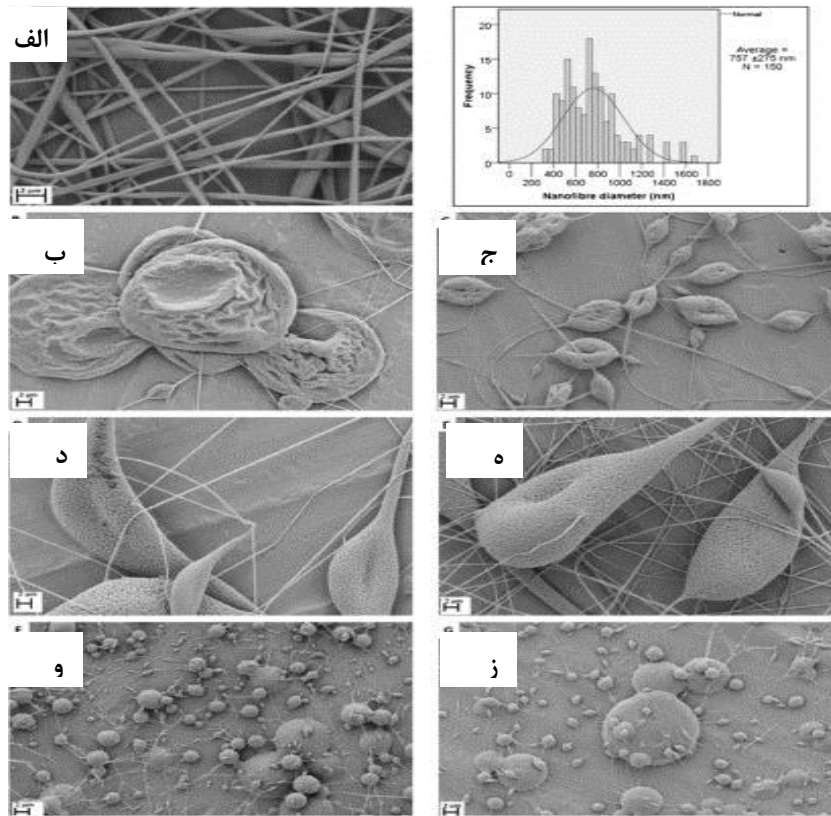
¹ Baykuş

² Karkhanis

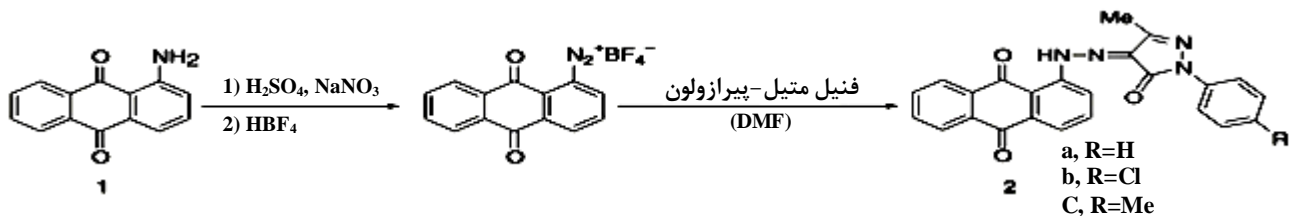
³ Yang

⁴ Zhou

⁵ Casasola



شکل ۵- تاثیر حلال بر روی ساختار الیاف الکتروسی شده: (الف) استن، (ب) دی اکسان، (ج) تترا هیدرو فوران، (د) دی کلرو متان، (ه) کلرو فرم، (و) دی متیل فرمامید، (ز) دی متیل استامید [۲۸].



شکل ۶- سنتز ماده رنگزای anthraquinone azo [۳۵].

انجام دادند. تمام رنگزاها ثابت رنگی، ثابت شستشو و مالشی خوب از خود نشان دادند [۴۱]. سیسودیا^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ رفتار رنگزای دیسپرس و خواص ثباتی الیاف PLA را مورد بررسی قرار دادند. رنگزاهای ازو دارای انرژی متوسط، نتایج خوبی را به همراه داشتند در حالیکه رنگزاهایی با ساختار بنزو دیو فورانون باعث عملکرد رنگی ضعیف در PLA می‌گردد [۴۲]. آوینس و همکارانش در سال ۲۰۰۶ در مورد شرایط قلیایی حذف ماده رنگزا سطحی برای PLA با ماده رنگزای دیسپرس مطالعه نمودند. به دلیل حساسیت PLA به قلیا یک نسخه بهینه برای PLA پیشنهاد کردند که شامل ۲ g/l سدیم کربنات و ۲ g/l دی تیونیت سدیم به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد (برای حذف ماده رنگزا PLA نباید از دمای T_g بالاتر رود) است [۴۳]. بوکینشاو و همکارانش در سال ۲۰۰۸، حذف ماده رنگزای

برکینشاو^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ در مورد رنگزای PLA با شش ماده رنگزای دیسپرس با استفاده از امواج فراصوت تحقیق و بررسی کردند. استفاده از امواج فراصوت باعث تقویت قدرت رنگی سه ماده رنگزا از شش ماده رنگزا مورد استفاده شده است [۳۹]. فیو^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ در مورد فناوری رنگزای و تکمیل پارچه های PLA بر روی پنج ماده رنگزای مختلف دیسپرس تحقیق کردند. آنها شرایط بهینه برای رنگزای شامل ۱٪ ماده رنگزای دیسپرس، سدیم لیگن سولفونات ۲ g/l، مواد فعال سطح ۵/۵ g/l، L:R ۱:۲۰ را به دست آوردند [۴۰]. لی^۳ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ یک مطالعه به منظور بهینه سازی رنگزای ماده رنگزای آبی ۵۶ و زرد ۵۴ در PLA در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد در مدت زمانهای بین ۶۰-۲۰ دقیقه

⁴ Sisodia

¹ Burkinshaw

² Fu

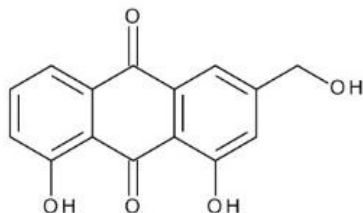
³ Lee

مقاله

نمونه‌های رنگی با ثبات رنگی بالا را تولید نمایند [۵۱]. سریوماوم^۸ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ بر روی رنگرزی و خواص طیف‌سنجی مواد رنگزای طبیعی روی PLA و PET تحقیق کردند. مواد رنگزایی که حلالیت پایین‌تری داشته باشد مانند زرد چوبه و کاسومونار، رمق‌کشی و جذب بهتری دارد [۵۲]. یوجین^۹ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به مطالعه روی خواص رنگرزی الیاف PLA و ابریشم با مواد رنگزای طبیعی پرداختند. تنها ماده رنگزای زرد چوبه خواص رنگی خوب را برای PLA و ابریشم از خود نشان داد. در حالی که بقیه مواد رنگزا ساختار ضعیفی داشتند. تنها برای زرد چوبه قادر به استفاده از مخلوط PLA/ابریشم بودند [۵۳]. سیدارکت^{۱۰} و همکارانش در سال ۲۰۱۴ بر روی رمق‌کشی رنگرزی PLA با مواد رنگزای طبیعی ایندیگو به دست آمده از تینکتوریا ایندیگو، تحقیق کردند. حداکثر جذب ماده رنگزا در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶۰ دقیقه بود [۵۴]. آنها بدین نتیجه رسیدند که نانو ذرات POSS باعث افزایش رنگ‌پذیری PLA برای تمام مواد رنگزای طبیعی مورد استفاده می‌شود [۵۵].

۴-۳- سینتیک و ترمودینامیک و ایزوترم رنگرزی PLA

وو^{۱۱} و همکارانش در سال ۲۰۱۳ روی سینتیک و ترمودینامیک رنگرزی الیاف PLA با زرد چوبه مطالعه کردند. آن‌ها گزارش کردند رنگرزی زرد چوبه روی PLA از ایزوترم نرست پیروی می‌کند (نمودار ۱). پیش‌بینی بر اساس سطح ملکولی برای جذب و انتشار پلی لاکتیک اسید با مواد رنگزای دیسپرس تحقیق کردند. مواد رنگزا از ایزوترم لانگمیور و نرست پیروی می‌کنند. تمایل ذاتی استاندارد رنگرزی با افزایش دما از ۸۰ به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت [۵۶]. ایکسو^{۱۲} و همکارانش در سال ۲۰۱۵ در مورد مدل‌های جذب هر سه ماده رنگزا کمتر از ۱۰٪ است و می‌توان آن را به عدم وجود گروه‌های فعال آروماتیک در PLA نسبت داد [۵۷]. ایکسو و همکارانش در سال ۲۰۱۶ در مورد ترمودینامیک و سینتیک جذب پلی لاکتیک اسید با ماده رنگزای دیسپرس تحقیق کردند [۵۸]. آن‌ها تغییرات آنتروپی و آنتالپی هر ماده رنگزا را مورد بررسی قرار دادند. کاهش آنتروپی نشان‌دهنده کاهش آزادی و تشکیل پیوند بین لیف و ماده رنگزا است و کاهش آنتالپی نشان‌دهنده تعاملات بیشتر بین ماده رنگزا و لیف است [۵۸].



شکل ۷- ساختار شیمیایی امودین [۵۰].

سطحی الیاف PLA با استفاده از امواج فراصوت را مطالعه کردند. نتایج به دست آمده آن‌ها در ۶۰ درجه سانتی‌گراد در حضور و غیاب امواج فراصوت اثر بخشی خاصی را نشان نداد [۴۴]. آوینس و همکارانش در سال ۲۰۱۱ در مورد حذف رنگ سطحی پارچه‌های PLA تحت شرایط اسیدی و قلیایی بررسی کردند. در این مطالعه بدین نتیجه رسیدند که اعمال فرآیند‌های حذف ماده رنگزا تغییر فام قابل توجهی نداشته است در حالیکه شرایط قلیایی و اسیدی در استفاده از پاک‌کننده باعث بهبود ثبات شستشویی شده است و هیچ کدام از روش‌های حذف مواد رنگزای سطحی روی PLA اثر مخربی نداشته است [۴۵]. بیاتی^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۸ بر روی رنگرزی الیاف PLA باز یافت شده با ماده رنگزای دیسپرس با مصرف پایین انرژی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند با افزایش دما و زمان رنگرزی رمق‌کشی نیز افزایش می‌یابد [۴۶].

۴-۲-۲- رنگرزی الیاف PLA با رنگزای خمی

ساوادا^۲ و همکارانش در سال ۲۰۰۷ به بهینه‌سازی^۳ رنگرزی PLA با مواد رنگزای خمی پرداختند. با افزایش دما رنگرزی، جذب مواد رنگزا، افزایش یافته و افزایش زمان رنگرزی جذب ماده رنگزا را کاهش می‌دهد [۴۷]. برکینشاو و همکارانش در سال ۲۰۱۳ رنگرزی PLA با مواد رنگزای خمی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ثبات شستشویی^۴ برای سه ماده رنگزای خمی در ۵۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش دما (۶۰، ۸۰، ۹۸ و ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد) افزایش یافت [۴۸].

۴-۲-۳- رنگرزی الیاف PLA با مواد رنگزای کاتیونی

کو^۵ و همکارانش در سال ۲۰۰۹ اصلاح سطح PLA با پرتو UV/O₃ را مورد مطالعه قرار دادند. اصلاح UV می‌توان منجر به تجزیه پیوند استری و افزایش سطح اکسیژن در سطح PLA شود از این رو فیلم‌های اصلاح‌شده با ماده رنگزای کاتیونی قابلیت رنگرزی در دمای پایین را دارند. همچنین بهبود رنگ‌پذیری فیلم‌های اصلاح‌شده را می‌توان به ایجاد پیوند های یونی بین مواد رنگزای کاتیونی و سطح آنیونی PLA نسبت داد [۴۹].

۴-۲-۴- رنگرزی الیاف PLA با مواد رنگزای طبیعی

اسریوماوس^۶ و همکارانش در سال ۲۰۱۱ بر روی خواص رنگرزی و طیف‌سنجی زردچوبه روی PLA و PET تحقیق کردند. نتایج نشان داد که برای K/S برابر ۱۰، میزان غلظت ماده رنگزای زرد چوبه مورد استفاده برای PET بیشتر از PLA می‌باشد [۵۰]. وو^۷ و همکارانش در سال ۲۰۱۱ قابلیت رنگرزی PLA با ماده رنگزای امودین (شکل ۷) را بررسی کردند و توانستند

1 Bayati
2 Sawada
3 Optimization
4 Washing fastness
5 Koo
6 Sriumaroum
7 Wu

⁸ Sriumaoum

⁹ Ujjin

¹⁰ Sidarkote

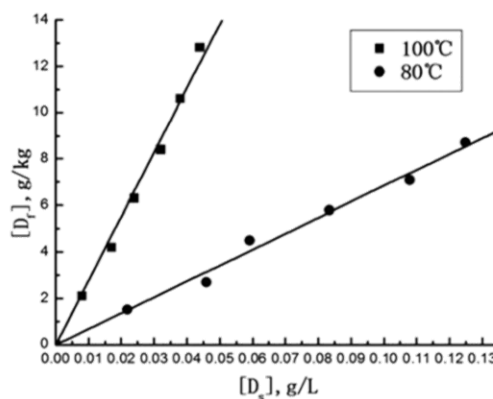
¹¹ Wu

¹² Xu

پترسون^۳، از خود نشان می‌دهد [۵۹].

۵- نتیجه گیری

PLA بعنوان یک پلیمر زیست تخریب پذیر دارای خواص مکانیکی و عملکردی خوب بوده و بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این پلیمر به دلیل داشتن خاصیت زیست تخریب پذیری و زیست سازگاری در کاربردهایی همچون بسته بندی مواد غذایی، زمینه های زیست پزشکی همچون نخ بخیه قابل جذب، داربست های متخلخل برای رشد سلول ها، انتقال دارو و غیره مورد استفاده قرار می گیرد. گزارشات بر روی روش های مختلف تولید الیاف PLA نشان دهنده این است که روش های ذوب ریزی و الکتروریسی بیشتر مورد استفاده است. در رنگرزی الیاف PLA بیشتر از ماده رنگرزی مصنوعی به علت نزدیک بودن خواص آن به PET استفاده می شود. در حالی که رنگرزی با مواد رنگرزی طبیعی نیز به موفقیت های کمی در طیف رنگی، ثبات و خواص رنگی به دست آورده است. با توجه به محدودیت تولید جهان در محصولات مصنوعی به احتمال زیاد در آینده نزدیک، PLA جایگزین سهم قابل توجهی از پلی استر خواهد شد.



نمودار ۱- ایزوترم جذب ماده رنگرزی زرد چوبه روی PLA [۵۶].

بیاتی^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۶ بر روی سینتیک رنگرزی الیاف PLA بازیافت شده از پرک ظروف پلاستیکی با ماده رنگرزی دیسپرس قرمز ۱۶۷ تحقیق کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش دمای رنگرزی مدل ویکر استاف^۲، روند پله ای مطلوب تری را در افزایش قدرمطلق ثابت سینتیک رنگرزی، نسبت به مدل

³ Patterson

¹ Bayati

^۲ Vickerstaf

۶- مراجع

- D. W. Farrington, J. Lunt, S. Davies, R. S. Blackburn, "Biodegradable and Sustainable Fibres" Woodhead. Publish, England, 2005.
- P. R. Gruber, "Cargill dow LLC", J. Ind. Ecol. 7, 209-213, 2003.
- ف. فتاحی، ا. خدای و ح. ایزدان. "مروری بر تولید، خواص و کاربردهای الیاف پلی لاکتیک اسید"، مجله علوم و فناوری نساجی، ۱۷-۱۱(۱)، ۵۹-۱۳۹۴.
- ش. بیاتی و م. ع. توانایی. "مروری بر خصوصیات رنگرزی و ثباتی الیاف پلی لاکتیک اسید"، نشریه علمی و ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۵، ۷۳-۵۹، ۱۳۹۴.
- J. Lunt, A. L. Shafer, "Polylactic acid polymers from com. Applications in the textiles industry", J. Coat. Fabric. 29, 191-205, 2000.
- NatureWorks "Basic fiber properties" Ingeo technical bulletin, s/Fact_Sical_Rhttp://www.natureworkslc.com/~media/Technrecesous heets /Fibers/FactSheet_Fiber_Yar n_Basi cFiberPropert, 2005.
- J. V. Kurian, "A New Polymer Platform for the Future — Sorona from Corn Derived 1,3-Propanediol", J. Polym. Environ. 13, 159-167, 2005.
- R. Auras, B. Harte, S. Selke, "An overview of polylactides as packaging materials", Macromol. Biosci. 4, 835-864, 2004.
- L. Dürselen, M. Dauner, H. Hierlemann, H. Planck, L. E. Claes, A. Ignatius, "Resorbable polymer fibers for ligament augmentation", J. Biomed. Mater. Res. A. 58, 666-672, 2001.
- A. J. Lasprilla, G. A. Martinez, B. H. Lunelli, A. L. Jardini, R. Maciel Filho, "Poly-lactic acid synthesis for application in biomedical devices—A review", Biotechnol. Adv. 30, 321-328, 2012.
- M. L. Tan, P. F. Choong, C. R. Dass, "Recent developments in liposomes, microparticles and nanoparticles for protein and peptide drug delivery", Peptides, 31, 184-193, 2010.
- M. A. Ghalia, Y. Dahman, "Biodegradable poly (lactic acid)-based scaffolds: synthesis and biomedical applications", J. Polym. Res. 5, 24-74, 2017.
- E. Castro-Aguirre, F. Iñiguez-Franco, H. Samsudin, X. Fang, R. Auras, "Poly (lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life", Adv. Drug Deliv. Rev. 107, 333-366, 2016.
- V. Siracusa, I. Blanco, S. Romani, U. Tylewicz, P. Rocculi, M. D. Rosa, "Poly (lactic acid)-modified films for food packaging application: Physical, mechanical, and barrier behavior", J. Appl. Polym. Sci. 125, 390-401, 2012.
- L. T. Lim, R. Auras, M. Rubino, "Processing technologies for poly (lactic acid)", Prog. Polym. Sci. 33, 820-852, 2008.
- M. Jamshidian, E. A. Tehrani, M. Imran, M. Jacquot, & S. Desobry, "Poly-Lactic Acid: production, applications, nanocomposites, and release studies". Compr. Rev. Food. Sci. F. 9, 552-571, 2010.
- M. J. Galotto, P. A. Ulloa, D. Hernández, F. Fernández Martín, R. Gavara, A. Guarda, "Mechanical and thermal behaviour of flexible food packaging polymeric films materials under high pressure/temperature treatments". Packag. Technol. Sci. 21, 297-308, 2008.
- E. Castro-Aguirre, F. Iñiguez-Franco, H. Samsudin, X. Fang, R. Auras, "Poly (lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life", Adv. Drug Deliv. Rev. 107, 333-366, 2016.

19. B. Eling, S. Gogolewski, A. J. Pennings, "Biodegradable materials of poly (l-lactic acid): 1. Melt-spun and solution-spun fibres", *Polym.* 23, 1587-1593, **1982**.
 20. L. Fambri, A. Pegoretti, R. Fenner, S. D. Incardona, C. Migliaresi, "Biodegradable fibres of poly (L-lactic acid) produced by melt spinning", *Polym.* 38, 79-85, **1997**.
 21. X. Yuan, A. F. Mak, K. W. Kwok, B. K. Yung, K. Yao, "Characterization of poly (L-lactic acid) fibers produced by melt spinning", *J. Appl. Polym. Sci.* 81, 251-260, **2001**.
 22. M. J. John, R. Anandjiwala, K. Oksman, A. P. Mathew, "Melt-spun polylactic acid fibers: Effect of cellulose nanowhiskers on processing and properties", *J. Appl. Polym. Sci.* 127, 274-281, **2013**.
 23. K. M. Z. Hossain, A. J. Parsons, C. D. Rudd, I. Ahmed, W. Thielemans, "Mechanical, crystallisation and moisture absorption properties of melt drawn polylactic acid fibres", *Eur. Polym. J.* 53, 270-281, **2014**.
 24. O. Baykuş, Ş. D. Dogan, U. Tayfun, A. Davulcu, M. Dogan, "Improving the dyeability of poly (lactic acid) fiber using octa (aminophenyl) POSS nanoparticle during melt spinning", *J. Text. Inst.* 108, 569-578, **2017**.
 25. S. S. Karkhanis, N. M. Stark, R. C. Sabo, L. M. Matuana, "Blown film extrusion of poly (lactic acid) without melt strength enhancers", *J. Appl. Polym. Sci.* 134, **2017**.
 26. F. Yang, R. Murugan, S. Wang, S. Ramakrishna, "Electrospinning of nano/micro scale poly (L-lactic acid) aligned fibers and their potential in neural tissue engineering", *Biomaterials*, 26, 2603-2610, **2005**.
 27. H. Zhou, T. B. Green, Y. L. Joo, "The thermal effects on electrospinning of polylactic acid melts", *Polym.* 47, 7497-7505, **2006**.
 28. R. Casasola, N. L. Thomas, A. Trybala, S. Georgiadou, "Electrospun poly lactic acid (PLA) fibres: effect of different solvent systems on fibre morphology and diameter", *Polym.* 55, 4728-4737, **2014**.
 29. T. Hussain, M. Tausif, M. Ashraf, "A review of progress in the dyeing of eco-friendly aliphatic polyester-based polylactic acid fabrics", *J. Clean. Prod.* 108, 476-483, **2015**.
 30. L. E. Scheyer, A. Chiweshe, "Application and Performance of Disperse Dyes on Polylactic Acid (PLA) Fabric", *AATCC. Rev.* 1, **2001**.
 31. Y. Yang, S. Huda, "Comparison of disperse dye exhaustion, color yield, and colorfastness between polylactide and poly (ethylene terephthalate)", *J. Appl. Polym. Sci.* 90, 3285-3290, **2003**.
 32. D. Karst, Y. Yang, "Using the solubility parameter to explain disperse dye sorption on polylactide", *J. Appl. Polym. Sci.* 96, 416-422, **2004**.
 33. J. H. Choi, W. Y. Seo, "Coloration of poly (lactic acid) with disperse dyes. 1. Comparison to poly (ethylene terephthalate) of dyeability, shade and fastness", *Fiber. Polym.* 7, 270-275, **2006**.
 34. E. Bach, D. Knittel, E. Schollmeyer, "Dyeing poly (lactic acid) fibres in supercritical carbon dioxide", *Color. Technol.* 122, 252-258, **2006**.
 35. L. He, L. Lu, S. Zhang, H. S. Freeman, "Synthesis and application of yellow azo-anthraquinone disperse dyes for polylactide fibres", *Color. Technol.* 126, 92-96, **2010**.
 36. J. H. Choi, H. Y. Lee, A. D. Towns, "Dyeing properties of novel azo disperse dyes derived from phthalimide and color fastness on poly (lactic acid) fiber", *Fiber. Polym.* 11, 199-204, **2010**.
 37. M. B. Bilal, P. Viallier-Raynard, B. Haidar, G. Colombe, A. Lallam, "A study of the structural changes during the dyeing process of Ingeo™ fibers of poly (lactic acid)", *Text. Res. J.* 81, 838-846, **2011**.
 38. O. Avinc, "Maximizing the wash fastness of dyed poly (lactic acid) fabrics by adjusting the amount of air during conventional reduction clearing", *Text. Res. J.* 81, 1158-1170, **2011**.
 39. S. M. Burkinshaw, D. S. Jeong, "The dyeing of poly (lactic acid) fibres with disperse dyes using ultrasound: Part 1-Initial studies", *Dyes. Pigm.* 92, 1025-1030, **2012**.
 40. Z. J. Fu, H. F. Huang, L. S. Yu, H. Wang, "Research on dyeing and finishing technology of polylactic acid fiber", *Appl. Mech. Mater.* 364, 660-663, **2013**.
 41. S. H. Lee, W. S. Song, "Dyeing properties on polylactic acid (PLA) fabrics by disperse dyes", *J. Korean Soc. Cloth. Text.* 37, 952-961, **2013**.
 42. N. Sisodia, D. M. Parmar, "Dyeing behavior and fastness properties of corn (PLA) fiber", *J. Polym. Text. Eng.* 1, 1-7, **2014**.
 43. O. Avinc, J. Bone, H. Owens, D. Phillips, M. Wilding, "Preferred alkaline reduction-clearing conditions for use with dyed Ingeo poly (lactic acid) fibres", *Color. Technol.* 122, 157-161, **2006**.
 44. S. M. Burkinshaw, D. S. Jeong, "The clearing of poly (lactic acid) fibres dyed with disperse dyes using ultrasound. Part 1: Colorimetric analysis", *Dyes Pigm.* 77, 171-179, **2008**.
 45. O. Avinc, "Clearing of dyed poly (lactic acid) fabrics under acidic and alkaline conditions", *Text. Res. J.* 81, 1049-1074, **2011**.
 46. S. Bayati, M. A. Tavanaie, "Dyeing of recycled Poly (lactic acid) fibers from disposable packages flake with low energy consumption and effluent", *J. Clean. Prod.* 176, 382-390, **2018**.
 47. K. Sawada, M. Ueda, "Optimization of dyeing poly (lactic acid) fibers with vat dyes", *Dyes Pigm.* 74, 81-84, **2007**.
 48. S. M. Burkinshaw, D. S. Jeong, T. I. Chun, "The coloration of poly (lactic acid) fibres with indigoid dyes: Part 2: Wash fastness", *Dyes Pigm.* 97, 374-387, **2013**.
 49. G. H. Koo, J. Jang, "Surface modification of poly (lactic acid) by UV/Ozone irradiation", *Fiber. Polym.* 9, 674-678, **2008**.
 50. V. Sriumaroum, S. Liprapan, B. Siriphet, S. Jantip, P. Suwanruji, "Study on Spectroscopic and Dyeing Characteristics of Curcumin on Poly (lactic acid) and Poly (ethylene terephthalate) Fabrics", *Adv. Mater. Res.* 233, 1384-1387, **2011**.
 51. J. H. Wu, J. Ke, "Dyeability of PLA fabric with natural dye Emodin", *Adv. Mater. Res.* 183, 2000-2004, **2011**.
 52. V. Sriumaoum, J. Suesat, P. Suwanruji, "Dyeing and spectroscopic properties of natural dyes on poly (Lactic Acid) and poly (Ethylene Terephthalate) fabrics", *Int. J. Bioscience*, 2, 155, **2012**.
 53. S. Ujjin, S. Jantip, "Study on the dyeing properties of poly (lactic acid) and silk yarns with natural dyes", *Adv. Mater. Res.* 486, 384-387, **2012**.
 54. R. Sidarkote, P. Suwanruji, J. Suesat, "Exhaust dyeing Poly (Lactic acid) fabrics with Indigo dye obtained from Indigofera tinctoria", *Adv. Mater. Res.* 1025, 531-534, **2014**.
 55. O. Baykuş, I. T. Celik, S. D. Dogan, A. Davulcu, M. Dogan, "Enhancing the dyeability of poly (lactic acid) fiber with natural dyes of alizarin, lawsone, and indigo", *Fiber. Polym.* 18(10), 1906-1914, **2017**.
 56. J. Wu, H. Guo, J. Ke, J. Fan, "Studies on kinetic and thermodynamic parameters of natural dye curcumin on PLA fibre", *Indian. J. Fiber. Text. Res.* 38, 424-426, **2013**.
 57. S. Xu, J. Chen, B. Wang, Y. Yang, "Molecular surface area based predictive models for the adsorption and diffusion of disperse dyes in polylactic acid matrix", *J. Colloid. Interface. Sci.* 458, 22-31, **2015**.
 58. S. X. Xu, J. G. Chen, L. Y. Chen, B. J. Wang, Y. Q. Yang, "Sorption Thermodynamic and Kinetic Study of Polylactic Acid Fibers with Disperse Dyes in Non-Aqueous Medium". *Key. Eng. Mater.* 671, 121-132, **2016**.
۵۹. ش. بیاتی و م. ع. توانایی، "مطالعه سینتیک رنگرزی یاف پلی لاکتیک اسید بازیافت شده از پرک ظروف پلاستیکی با رنگزای دیسپرس قرمز"، دهمین کنفرانس ملی مهندسی نساجی، ایران، ۱۳۹۵.