

تولید الیاف نشاسته به روش ترریسی در حمام انعقاد چرخشی

Starch Fibers Production by Wet Spinning in Rotational Coagulation Bath

سیده سمانه سربها^۱، رامین خواجوی^{۲*}، امیرحسین برنج‌چی^۱، سپهر پورآریان^۲

۱ - تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی نساجی، صندوق پستی ۱۴۵۱۵-۷۷۵

۲ - تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، گروه مهندسی نساجی، صندوق پستی ۱۱۳۶۵-۴۴۳۵

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۸/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۱۰

چکیده

به علت پیچیدگی ساختار فضایی زنجیرها، دشواری تهیه محلول ریسندگی و ریسیدن آن، پژوهش‌های اندکی در زمینه تولید الیاف نشاسته انجام شده است. در این پژوهش، پس از انتخاب حلالی مناسب روشی نوین برای ریسیدن محلول ریسندگی بر اساس ترریسی در حمام انعقاد چرخشی ارائه شد. نشاسته گندم به عنوان ماده اولیه انتخاب و انحلال‌پذیری آن در حلال‌های مختلف شامل آب، آب-قلیاء، دی‌متیل سولفوکسید (DMSO) و آب - DMSO بررسی شد. در نهایت محلول‌های ریسندگی مناسب به داخل حمام انعقاد مخلوط آب - الکل در حال چرخش تزریق شدند و الیاف منقطع تولیدی به کمک صافی جمع‌آوری شدند. الیاف به وسیله میکروسکوپی الکترون پوششی، طیف‌سنجی زیرقرمز، پراش پرتو X و آزمون استحکام بررسی شدند. نتایج نشان داد، حلال DMSO در میان حلال‌های بررسی شده مناسب‌تر است. با استفاده از ترریسی در حمام انعقاد چرخشی الیاف منقطع نشاسته با ظرافت بین ۳-۵ μm تولید شد که دارای ساختار بی‌شکل بودند. الیاف تولیدی با توجه به طول و ظرافت پتانسیل بالقوه‌ای را برای کاربری در صنایع کاغذسازی و پزشکی دارند.

مقدمه

در ساختار آمیلوپکتین‌ها، این دسته از ترکیبات ظرفیت بیشتری را برای جذب آب نشان می‌دهند [۴]. نشاسته به عنوان منبعی غذایی و دارویی و نیز ماده‌ای صنعتی استفاده می‌شود. تولید سالانه محصولات نشاسته‌ای در حدود ۶۰ میلیون تن است [۳]. اولین کاربرد نشاسته به عنوان چسب در تولید کاغذ پاپیروس بوده است. در سال ۱۸۱۱، Kirchoff از نشاسته سیب‌زمینی به کمک عملیات اسیدی و آبکافت شکر تولید کرد [۱]. برای کاربردهای صنعتی، نشاسته طبیعی محدودیت‌هایی نظیر ناپایداری در برابر نیروهای برش و تجزیه‌پذیری در دماهای زیاد دارد. بنابراین، فرایندهای مختلفی برای رفع این محدودیت‌ها ارائه شده است، نظیر اصلاح فیزیکی (عملیات گرمایی تحت رطوبت و کشش)، اصلاح شیمیایی

نشاسته به عنوان هیدروکربن دوست‌دار محیط و زیست‌تخریب‌پذیر است که طی عملیات زیست‌شیمیایی از منابع مختلف کربوهیدراتی نظیر گندم، ذرت و برنج تهیه می‌شود. این ماده در گیاهان به شکل دانه‌هایی (گرانول) به ابعاد ۱ تا ۱۰۰ μm است که با عملیات فتوسنتز تولید شده و به عنوان منبع قابل توجهی از انرژی ذخیره شده برای هر دو نیاز کوتاه مدت (نشاسته گذرا در کلروپلاست برگ) و بلندمدت (ذخیره کربن برای نسل بعد) استفاده می‌شود [۱، ۲]. پلیمر نشاسته از دو نوع پلیمر گلوکوزیدی آمیلوز (۲۰ تا ۳۰٪) با ساختاری خطی و آمیلوپکتین به شکل شاخه‌ای شناسایی می‌شود [۳]. به دلیل زنجیرهای جانبی زیاد

کلمات کلیدی

الیاف نشاسته،
ترریسی،
حمام انعقاد چرخشی،
DMSO،
نشاسته گندم

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: khajavi@azad.ac.ir

کلرید، و قلیاهای NaOH، KOH، NH₃ و اتانول ۹۶٪ و DMSO از شرکت Merck تهیه شدند. آب مقطر از شرکت دماوند و اتانول ۹۰٪، متانول ۹۰٪، گلسیرین و استون (آزمایشگاهی) از کارخانه شمال غرب ایران خریداری شدند.

دستگاه‌ها

برای مشاهده شکل‌شناسی ساختاری الیاف نشاسته از میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) مدل LEO 440 i مجهز به EDX-INCA OXFORD ساخت انگلستان استفاده شد. شناسایی گروه‌های عاملی موجود در ساختار الیاف و نیز نشاسته گرانول با استفاده از دستگاه FTIR مدل Thermo Nicolet-Nexus 870 ساخت آمریکا انجام شد. بدین منظور، نمونه‌ها با پودر پتاسیم برمید (KBr) مخلوط شدند و طیف‌های زیرقرمز در محدوده طیف بین ۴۰۰-۱۴۰۰۰ cm⁻¹ با دقت ۴ cm⁻¹ به دست آمد [۲۴-۲۶].

به منظور تعیین ساختار بلوری گرانول نشاسته و نیز الیاف نشاسته از دستگاه X-Ray مدل SEIMENS D500، آند از جنس مس با ولتاژ ۳۵ kV و جریان ۲۰ mA استفاده شد. به منظور پمپ‌کردن محلول ریسندگی به داخل حمام انعقادی از پمپ تخلیه ساخت شرکت Daimond مدل QB-60 با توان ۳۷۰ W و حجم ۳۵ L استفاده شد. خواص مکانیکی الیاف به وسیله دستگاه استحکام‌سنج مدل MICRO250 ساخت شرکت شرلی انگلستان اندازه‌گیری شد. ابعاد نمونه‌ها ۴×۱۰ mm و سرعت ازدیاد طول دستگاه روی ۵ mm/min تنظیم شد. نمونه‌ها ۳ مرتبه تحت آزمون سنجش استحکام قرار گرفتند و مقادیر میانگین برای هر پارامتر گزارش شد.

روش‌ها

بررسی مقدار انحلال‌پذیری در حلال‌های مختلف

بررسی مناسب بودن حلال‌های مختلف با استفاده از روش مشاهده میکروسکوپی تورم (به وسیله میکروسکوپ نوری) و رفتار حل‌شوندگی و توزین نشاسته انجام شد. برای مشاهده میکروسکوپی، گرانول‌های نشاسته روی لامل قرار گرفتند و پس از قرارگرفتن روی سکوی میکروسکوپ با قطره‌چکان به آنها آب و آب قلیایی اضافه شد. در روش توزین ابتدا وزن نمونه‌ها به وسیله ترازو به دست آمد و پس از قرارگیری به مدت ۱۵ min در حلال‌های مختلف، نمونه‌ها در دمای محیط قرار گرفتند. سپس، از روی صافی (فیلتر سلولوزی Whattman با مش ۵۰ و ۲۹۷ میکرون) عبور داده شدند و پس از خشک‌شدن مقدار کاهش وزن محاسبه شد تا مقدار نشاسته حل شده به دست آید.

جدول ۱- مشخصات محلول‌های ریسندگی منتخب.

شماره محلول	نشاسته (g)	NaOH (g)	آب (mL)	DMSO (g)	مجموع (g)
D1	۱۰	۰/۲۵	۶۹/۷۷	-	۱۰۰
D2	۱۰	-	-	۱۰	۲۰۲

(ایجاد پیوندهای عرضی بین زنجیرها، آبکافت اسیدی و اکسایش)، اصلاح زیستی (استفاده از آنزیم) و تغییر ژنتیک نشاسته. با انجام این نوع عملیات خواص نشاسته برای کاربرد در صنایعی نظیر کاغذسازی و نساجی ارتقا می‌یابد [۱۰-۱۵]. تا کنون تلاش‌های زیادی برای تولید الیاف نشاسته انجام شده که فقط تعداد کمی از آنها موفقیت‌آمیز بوده است.

شرکت‌های Champion و Nebraska در سال‌های ۱۹۶۷ و ۱۹۶۸ موفق به تولید الیاف نشاسته از منبع نشاسته با مقدار زیاد آمیلوز شدند. شرکت Champion فرایند تریسی را برای تولید الیاف نشاسته ارائه کرد. محلولی از ۴٪ w/w نشاسته و ۰/۸٪ w/w سدیم هیدروکسید تهیه شد و به آن محلول آمونیم سولفات تزریق شد. بدین روش رشته‌های لیف مانند کوتاه (الیاف منقطع) حاصل شد.

شرکت Nebraska با استفاده از فرایند مذاب‌ریسی محلول نشاسته زیر فشار و دمای ۱۷۰°C الیاف رشته‌ای نشاسته را تولید کرد. در مقایسه با الیاف تولیدی شرکت Champion، الیاف شرکت Nebraska ظریف‌تر بوده و محدوده قطر ۶۰-۱۳۰ μm داشتند. هر دو الیاف تولیدی تمایل به از دست‌دادن مقادیر قابل ملاحظه‌ای آب داشتند، به طوری که با افزایش مقدار آمیلوز نشاسته در ساختار پلیمر، مقدار تمایل به از دست‌دادن آب در الیاف نیز افزایش می‌یافت [۱۱]. نیروی گریز از مرکز نیرویی است که تمایل به انحراف جسمی در حال چرخیدن را از مرکز نقطه چرخش دارد. از آنجا که مسیر جسم همواره و به طور ثابت تغییر می‌یابد، منشأ ایجاد نیروی گریز از مرکز اینرسی جسم در حال چرخش است. به طور عمده این نیرو در دستگاه‌های در حال دوران همچون سانتریفوژها، پمپ‌های گریز از مرکز و دستگاه‌های مشابه به کار می‌رود [۱۲].

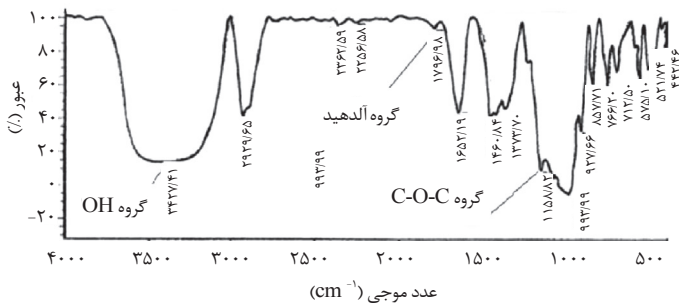
کاربرد نیروی گریز از مرکز در صنعت نساجی در خشک‌کن‌های سانتریفوژی و برای آبگیری پارچه‌هاست [۱۳]. همچنین، اندازه‌گیری مقدار جذب الیاف نساجی با بهره‌گیری از نیروی گریز از مرکز نیز گزارش شده است [۱۴].

سابقه پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد، در زمینه تولید الیاف نشاسته حجم کمی از اطلاعات وجود دارند و پژوهش‌های موجود نیز از روش‌های پیچیده‌ای استفاده می‌کند [۲۳-۱۵]. در پژوهش حاضر هدف ارائه روشی است که با پیچیدگی کم بتوان از نشاسته گندم به عنوان نشاسته‌ای معمول الیاف نشاسته تهیه کرد. بدین منظور، برای آرایش‌یافتگی بیشتر الیاف حین فرایند تولید لیف و قرارگیری آنها زیر کشش به کمک نیروی گریز از مرکز، روش تریسی در حمام انعقاد چرخشی استفاده شده است.

تجربی

مواد

نشاسته خالص و طبیعی گندم (وزن مولکولی برابر با ۳۴۲/۳۰ g/mol)، نمک‌های سدیم سولفات، آمونیم سولفات، منیزیم سولفات، مس سولفات و نمک‌های کلردار شامل کلسیم کلرید، روی کلرید، منیزیم



شکل ۳- طیف FTIR حاصل از نشاسته گرانول.

نتایج و بحث

بررسی مقدار انحلال پذیری در حلال‌های مختلف

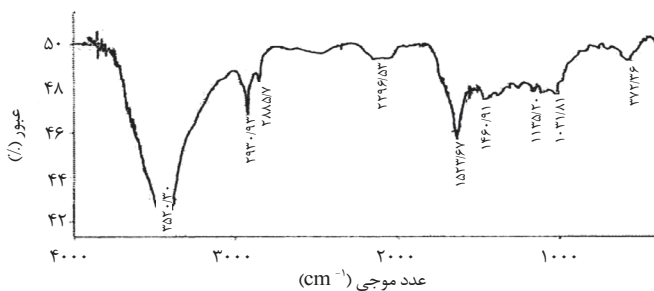
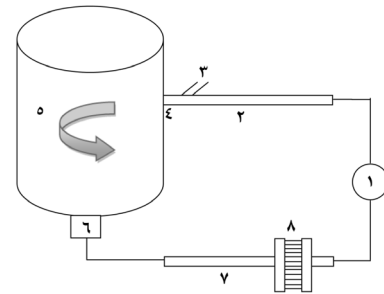
گرانول‌های نشاسته در آب سرد تغییر محسوسی نشان ندادند، اما هنگامی که در آب گرم قرار گرفتند مقداری متورم شده و در سدیم هیدروکسید به شدت متورم شدند. علت این موضوع آبکافت زنجیره‌های موجود در بخش‌های داخلی و سطح موجود در نشاسته است.

با افزایش دما (در آب گرم)، انرژی جنبشی زنجیره‌های پلیمری افزایش یافته و این موضوع منجر به افزایش تحرک زنجیره‌ها (یا افزایش تحرک گرمایی زنجیره‌ها) می‌شود. در نتیجه با افزایش دما فاصله بین زنجیره‌ها افزایش یافته و نفوذ مولکول‌های آب به داخل ساختار پلیمری راحت‌تر می‌شود. این مسئله منجر به بیشتر شدن مقدار آبکافت زنجیره‌های نشاسته گرانول می‌شود. با وجود قلیا در محیط واکنش به دلیل در دسترس بودن زنجیره‌ها و فضاهای موجود بین آنها، سدیم در بین زنجیره‌ها قرار می‌گیرد.

تمام موارد ذکر شده منجر به تورم شدید گرانول نشاسته در آب گرم و در قلیا می‌شود. در آب سرد به واسطه واکنش‌های ایجاد شده بین گروه‌های الکلی و در نتیجه کوتاه شدن زنجیره‌ها و حرکت، بی‌نظمی زیاد است [۲۹-۲۷]. در حلال DMSO چه در حالت سرد یا گرم بدون ایجاد تورم نشاسته حل شده و گرما به عنوان تسریع کننده عمل می‌کند.

میکروسکوپی الکترون پویشی

شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی الکترون پویشی (SEM) را از شکل شناسی الیاف نشاسته حاصل از محلول‌های D_1 و D_2 نشان می‌دهد. با توجه

شکل ۴- طیف FTIR نمونه حاصل از تزریق D_1 به حمام انعقاد.

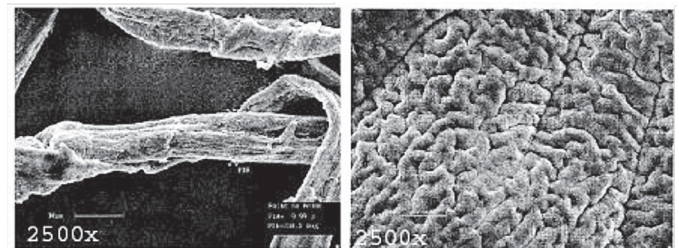
شکل ۱- طرح‌واره دستگاه آزمایشگاهی برای ریسیدن الیاف: (۱) پمپ، (۲) کانال خروجی، (۳) محل تزریق محلول‌های ریسندگی، (۴) محل ورود کانال به استوانه (کانال به داخل استوانه با زاویه وارد می‌شود تا محلول حمام انعقاد به طور چرخشی داخل استوانه به حرکت درآید)، (۵) حمام انعقاد استوانه‌ای شکل، (۶) محل خروج محلول حمام انعقاد، (۷) کانال خروجی و (۸) فیلتر و محل جمع‌آوری الیاف.

محلول‌های ریسندگی

با توجه به نتایج انحلال پذیری در اینجا صرفاً مشخصات دو محلول ریسندگی ارائه شده است که حلال‌های آن نتایج مناسب‌تری نسبت به سایر حلال‌ها در آزمون‌های تورم و انحلال پذیری نشان دادند (جدول ۱). شایان ذکر است، محلول‌های ریسندگی با حرف D و اندیس کدگذاری شدند. طرز تهیه محلول ریسندگی بدین شکل بود که نشاسته با همزدن در دمای 80°C و به‌طور تدریجی اضافه شد.

تولید الیاف

برای تولید الیاف از مجموعه‌ای آزمایشگاهی شامل پمپ، کانال‌های ورودی و خروجی (هر یک به طول ۱م) و حمام انعقاد استوانه‌ای (به قطر ۶۰ cm) استفاده شد. ابتدا محلول حمام انعقاد از مخلوط آب - اتانول (به نسبت حجمی ۸۰/۲۰) تهیه شد. این محلول به وسیله پمپ با سرعت جریان 35 L/min پس از عبور از کانالی ۱ متری در داخل حمام انعقاد استوانه‌ای شکل به چرخش در آمد و مجدداً از راه دریچه تخلیه در کف استوانه و کانالی دیگر به ورودی پمپ وارد شد. برای تزریق محلول‌های ریسندگی به حمام انعقاد در ابتدای کانال خروجی پمپ (۱۰ cm از انتهای کانال) دریچه ورودی تعبیه شد. برای جمع‌آوری الیاف در انتهای کانال ورودی پمپ تخلیه صافی پلی‌آمیدی با مش $2 \mu\text{m}$ قرار داده شد تا بتواند الیاف را جمع‌آوری کند. الیاف به روش دستی با سرنگ به مجاری ورودی تزریق و در فواصل زمانی از روی فیلتر جمع‌آوری شدند (شکل ۱).



(ب)

(الف)

شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی الکترون پویشی از لیف حاصل از تزریق محلول ریسندگی به داخل حمام انعقاد: (الف) D_1 و (ب) D_2 .

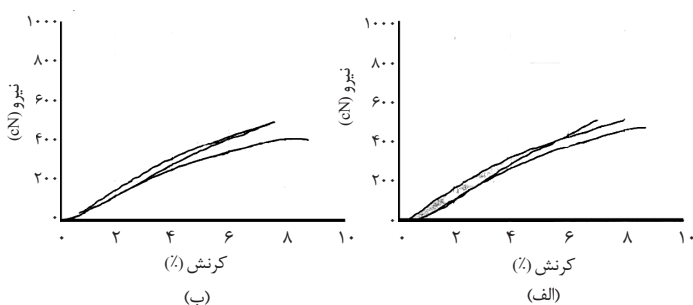
پیک موجود در $1652/19 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به حلقه گلوکوز است و در ناحیه 1158 cm^{-1} پیک گروه‌های C-O-C نمایان می‌شود [۲۳]. از ناحیه 1200 cm^{-1} به بعد مربوط به ناحیه اثر انگشت است که می‌توان صرفاً آن را با ناحیه اثر انگشتی طیف FTIR حاصل از نشاسته الیاف مقایسه کرد. نتایج FTIR حاصل از طیف‌سنجی نشاسته به شکل الیاف (تزریق D_1 به حمام انعقاد) در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شدت پیک گروه هیدروکسیل کم شده است. این مسئله می‌تواند به تغییرات ساختاری ایجاد شده در الیاف به علت واکنش با ترکیب قلیایی (NaOH) نسبت داده شود.

با تزریق سدیم هیدروکسید به محیط واکنش، گروه‌های Na^+ با گروه‌های H موجود در الکل‌های نوع اول و دوم جایگزین شده و ترکیبی مشابه با آلکان‌ها ایجاد می‌شود. پیک موجود در محدوده $1523/67 \text{ cm}^{-1}$ بلندتر و وسیع‌تر از ماده اولیه می‌شود و پس از عمل‌آوری کردن محلول ریسندگی به دست آمده با محلول انعقاد، مقداری از گروه‌های Na دوباره جایگزین شده و پیوندهای هیدروژنی جدیدی در محل‌های جدید به وجود می‌آید [۲۷].

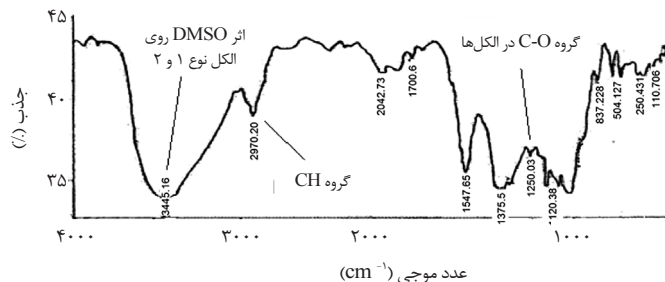
نتایج FTIR حاصل از نشاسته به شکل الیاف (تزریق D_2 به حمام انعقاد) در شکل ۵ آمده است. با مقایسه این شکل با شکل ۳ مشاهده می‌شود که از شدت پیک گروه‌های OH کم شده است. در این ناحیه عدد موجی ($3445/16 \text{ cm}^{-1}$) پیک تیزتر شده که می‌تواند به علت وجود بقایای حلال DMSO در الیاف تولیدی باشد. این ترکیب روی الکل‌های نوع اول، دوم و سوم اثرگذار است.

در ناحیه $2970/20 \text{ cm}^{-1}$ ، پیک موجود مربوط به گروه‌های CH است. نتایج نشان می‌دهد، پس از تولید الیاف بدون تغییر باقی می‌مانند. به علت وجود DMSO در محیط واکنش ممکن است، بعضی از گروه‌های CH_2OH با گروه‌های متیل سولفینیل متان ($(\text{CH}_3)_2\text{S}=\text{O}$) در اثر گرما پیوند برقرار کرده و به واسطه خروج مولکول‌های آب، پیوندهای دوگانه‌ای ایجاد شوند.

پیک‌های $1700/6$ و $2042/73 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به احتمال باقی‌ماندن گروه‌های $\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_3$ است. پیک موجود در $1547/65 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به وجود گروه‌های CH_2 متصل به گروه‌های هیدروکسیل است. در ناحیه $1250/03 \text{ cm}^{-1}$ پیک موجود بیانگر وجود گروه‌های C-O و در نتیجه الکل است [۲۷].



شکل ۷- نمودارهای تنش - کرنش الیاف نشاسته حاصل از تزریق محلول ریسندگی به داخل حمام انعقاد در حال چرخش: (الف) محلول D_1 و (ب) محلول D_2 .

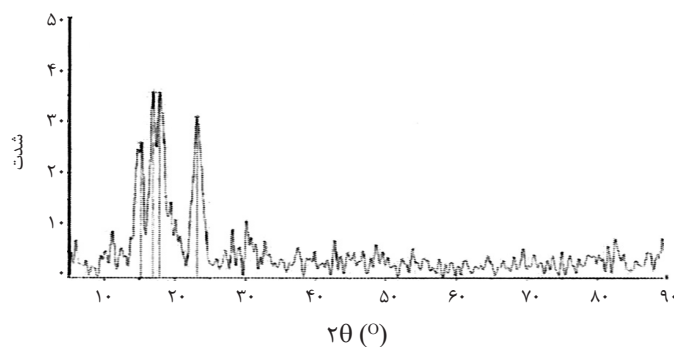


شکل ۵- طیف FTIR حاصل از تزریق D_2 به حمام انعقاد.

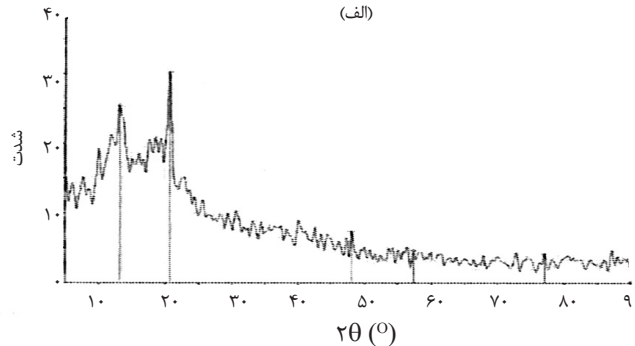
به شکل ۲-الف استفاده از محلول ریسندگی D_1 منجر به رشد ذرات نشاسته به شکل میسلی می‌شود. همچنین، خطوط باریک موجود در ساختار لیف در شکل ۲-ب نشان‌دهنده ساختار لیفچه‌ای الیاف در صورت استفاده از محلول ریسندگی D_2 است. در هر دو تصویر الیاف تولیدی دارای ظرافتی در ابعاد میکرومتر است.

طیف‌سنجی زیرقرمز

طیف FTIR حاصل از نشاسته گرانول در شکل ۳ آمده است. پیک پهن موجود در $3427/41 \text{ cm}^{-1}$ به علت وجود گروه‌های OH نوع اول و دوم در نشاسته است. پیک در عدد موجی $2929/65 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به گروه‌های CH موجود در حلقه گلوکوز و گروه CH_2OH متصل به آن است که به شکل پیک باریک‌تری نمایان شده است. عدد موجی $1796/98 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به گروه‌های آلدیدی با شدت کم است.



(الف)



(ب)

شکل ۶- الگوی پراش پرتو X: (الف) نشاسته گرانول و (ب) نشاسته به شکل الیاف (تزریق D_2 به حمام انعقاد).

جدول ۲- نتایج مربوط به استحکام الیاف نشاسته حاصل از تزریق محلول‌های ریسندگی به داخل حمام انعقاد در حال چرخش.

نمونه	نیروی پارگی (cN)	ازدیاد طول (%)	کار تا پارگی (cN.m)	استحکام (cN/Tex)	مدول اولیه (cN/Tex)
۱	۴۷۴/۳۳	۷/۸۲۹۶	۰/۲۰۹۴	۳/۳۹۷۹	۵۴/۹۴۵
۲	۴۸۹/۹۰	۷/۹۰۰۰	۰/۲۰۱۹	۵/۷۰۱۶	۹۶/۴۵

پراش پرتو X

نتایج پراش پرتو X حاصل از نشاسته گرانول و نیز نشاسته به شکل الیاف (تزریق D_2 به حمام انعقاد) در شکل ۶ ارائه شده است. شایان ذکر است، با بررسی الگوهای پراش پرتو X نمونه الیاف حاصل از محلول ریسندگی D_1 هیچ تفاوت آشکاری با الگوی پراش الیاف نشاسته حاصل از تزریق محلول ریسندگی D_2 به داخل حمام انعقاد مشاهده نشد. بنابراین، صرفاً نتایج مربوط به نمونه الیاف حاصل از محلول ریسندگی D_2 ارائه شده است. با توجه به پیک‌های موجود در شکل ۶ - الف ملاحظه می‌شود، در نشاسته سه ناحیه بلوری (A، B و C) وجود دارد. نشاسته گندم دارای ساختار بلوری A (نوع تک‌شیب) و نوع C (ترکیبی از ساختارهای بلوری A و B) است. نواحی بلوری A دارای پیک‌های بلندتری بوده در حالی که نواحی بلوری B که به شکل بلورهای شش‌ضلعی هستند و امکان جذب آب را نیز فراهم می‌آورند، دارای پیک‌های کوتاه‌تری اند [۱، ۲]. با توجه شکل ۶ - الف پیک‌های بلند شاخص نواحی بلوری نشاسته گرانول دارای $d_{max} - fit$ معادل $5/2181$ و 2θ برابر با $16/9781$ درجه است [۱]. در الگوی پراش نشاسته به شکل الیاف (شکل ۶ - ب) مشاهده می‌شود، پیک‌ها در مقایسه با نمودارهای نشاسته گرانول پهن‌تر بوده و از ارتفاع آنها کاسته شده است. نکته قابل توجه اینکه پیک‌های مزبور بر خلاف نشاسته گرانول، در ناحیه بعد از 2θ برابر 20° تشکیل شده‌اند. علت این موضوع می‌تواند به واسطه استفاده از الکل و آب و همچنین افزایش دما هنگام استفاده از حلال DMSO حین فرایند تولید نشاسته به شکل لیف باشد. از همه مهم‌تر علت این مسئله می‌تواند به قرارگیری الیاف زیر کشش به واسطه اثر حمام انعقاد چرخشی و نیروی گریز از مرکز نسبت داده شود. تمام این موارد منجر به تغییر ساختار بلوری الیاف تولیدی می‌شود.

خواص مکانیکی الیاف تولیدی

نتایج آزمون استحکام برای نمونه‌های الیاف نشاسته حاصل از تزریق محلول‌های ریسندگی D_1 و D_2 به داخل حمام انعقاد چرخشی در شکل ۷ و جدول ۲ ارائه شده است. شایان ذکر است، در صورت عدم استفاده از حمام انعقاد چرخشی دسترسی به ساختار لیفی میسر نبود. بنابراین، ارائه نتایج مربوط به الیاف نشاسته حاصل از تزریق محلول‌های ریسندگی به داخل حمام انعقاد بدون چرخش ممکن نیست. نتایج نشان می‌دهد، نوع حلال انتخابی حین فرایند تولید اثر بسزایی روی خواص مکانیکی الیاف دارد. با توجه به نتایج جدول ۲ ملاحظه می‌شود، در صورت استفاده از حلال DMSO الیاف حاصل از مدول و استحکام بیشتری برخوردارند. علت این مسئله به دلیل وجود قلیا در محلول

ریسندگی D_1 است. همان‌طور که در بخش بررسی مقدار انحلال‌پذیری در حلال‌های مختلف شرح داده شد، در صورت استفاده از قلیا در محلول ریسندگی گرانول نشاسته به دلیل آبکافت زنجیرهای پلیمری در بخش‌های داخلی و سطحی به شدت متورم می‌شود [۲۹]. بنابراین به واسطه شکست زنجیرهای پلیمری حین عملیات قلیایی، هنگام ورود محلول ریسندگی به داخل حمام انعقاد ساختار لیفی به صورت ناقصی شکل می‌گیرد که این مسئله منجر به خواص مکانیکی کمتر لیف حاصل در مقایسه با الیاف حاصل از تزریق محلول ریسندگی D_2 به داخل حمام می‌شود. پیش‌تر نیز اشاره شد، گرانول نشاسته در حلال DMSO متورم نمی‌شود که این مسئله باعث می‌شود تا خواص مکانیکی الیاف بهبود یابد.

نتیجه‌گیری

نشاسته پلیمری طبیعی، تجزیه‌پذیر و سازگار با محیط زیست است. این پلیمر تا کنون کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف نظیر صنایع غذایی و پزشکی داشته و با توجه به محدودیت منابع سلولوزی، پتانسیل بسیاری برای کاربردهای نوین نظیر صنایع کاغذسازی نشان می‌دهد. برای کاربرد در این صنایع نیاز است، نشاسته به الیاف بسیار ظریف تبدیل شود که به علت ساختار و انحلال‌ناپذیری آن تهیه الیاف ظریف دارای محدودیت‌های فراوانی است. در این پژوهش، اثر نیروی گریز از مرکز در شکل‌گیری ساختار لیفی نشان داده شد و با استفاده از روش تریسی داخل حمام انعقاد چرخشی سعی شد تا علاوه بر ارائه روشی ساده شکل‌شناسی، ساختار بلوری و استحکام الیاف نشاسته در نتیجه حل شدن گرانول نشاسته در محلول آب قلیایی و دی‌متیل سولفو کسید بررسی و مقایسه شود. نتایج آزمون تورم مؤید یافته‌های حاصل از آزمون استحکام بود، چرا که مشخص شد، به دلیل آبکافت نشدن زنجیرهای پلیمری موجود در ساختار گرانول نشاسته و متورم نشدن آن هنگام انحلال در حلال دی‌متیل سولفو کسید، انعقاد لیف در حمام انعقاد بهتر انجام شده و منجر به تولید الیافی با خواص مکانیکی بهتر می‌شود. این پژوهش موجب دستیابی به فرایندی شد که می‌تواند به‌طور پیوسته و در یک سامانه بازیافتی، الیاف کوتاه و ظریفی را در حد میکرون ایجاد کند. این فرایند می‌تواند به‌طور صنعتی اجرا شود، به نحوی که محلول انعقاد همیشه در یک روند چرخه‌ای به مکان اول باز می‌گردد. این مسئله از نظر صنعتی مقرون به صرفه است و در نهایت الیافی با ظرفیت $3-5 \mu m$ به‌دست می‌آید که برای کاربرد در صنایع کاغذسازی بسیار مناسب است.

مراجع

1. Warzburger O.B., *Handbook of Modified Starches: Properties and Uses*, CRC, Florida, 1986.
2. Tetlow I.J. and Emes M.J., Starch biosynthesis in higher plants: The enzymes of starch synthesis, *Comp. Biotech.*, 4, 47-65, 2011.
3. Meuser F., Manners D.J., and Seibel W., *Handbook of Plant Polymeric Carbohydrates*, Vol 134, Royal Society of Chemistry, London, 1993.
4. Zhou J., Song J., and Parker R., Structure and properties of starch-based foams prepared by microwave heating from extruded pellets, *Carbohydr. Polym.*, 63, 466-475, 2006.
5. Chung H.J., Hoover R., and Liu Q., The impact of single and dual hydrothermal modifications on the molecular structure and physicochemical properties of normal corn starch, *Int. J. Biol. Macromol.*, 44, 203-210, 2009.
6. Namazi H., Fathia F., and Dadkhah A., Hydrophobically modified starch using long-chain fatty acids for preparation of nanosized starch particles, *Sci. Iran.*, 18, 439-445, 2011.
7. Besheer A., Hause G., Kressler J., and Mäder K., Hydrophobically modified hydroxyethyl starch, synthesis, characterization, and aqueous self-assembly into nano-sized polymeric micelles and vesicles, *Biomacromolecules*, 8, 359-367, 2007.
8. Lu D.R., Xiao C.M., and Xu S.J., Starch-based completely biodegradable polymer materials, *Express Polym. Lett.*, 3, 366-375, 2009.
9. Smith A.M., The biosynthesis of starch granules, *Biomacromolecules*, 2, 335-341, 2001.
10. Rahman S., Li Z., Batey I., Cochrane M.P., Appels R., and Morell M., Genetic alteration of starch functionality in wheat, *J. Cereal Sci.*, 31, 91-110, 2000.
11. BeMiller J. and Whistler R., *Handbook of Starch: Chemistry and Technology*, 3rd ed., Academic, New York, 1984.
12. Centrifugal force, en.wikipedia.org/wiki/Centrifugal_force, (last visited 12 February 2013).
13. Weihui W., Guangzhong H., and Min Z., Refined cotton centrifugal dewatering process and key technology, *Adv. Mat. Res.*, 179-180, 1124-1129, 2011.
14. Lord J., A centrifuge method for measuring the absorbency of textile fibres: Part I. The development of a centrifuge method for the determination of the absorbency of scoured fibers, *J. Text. Ins. Trans.*, 55, 272-277, 1964.
15. Guimarães J.L., Wypych F., Saul C.K., Ramos L.P., and Satyanarayana K.G., Studies of the processing and characterization of corn starch and its composites with banana and sugarcane fibers from Brazil, *Carbohydr. Polym.*, 80, 130-138, 2010.
16. Müller C.M.O., Laurindo J.B., and Yamashita F., Effect of cellulose fibers on the crystallinity and mechanical properties of starch-based films at different relative humidity values, *Carbohydr. Polym.*, 77, 293-299, 2009.
17. Ma X., Yu J. and Kennedy J.F., Studies on the properties of natural fibers-reinforced thermoplastic starch composites, *Carbohydr. Polym.*, 62, 19-24, 2005.
18. Müller C.M.O., Laurindo J.B., and Yamashita F., Effect of cellulose fibers addition on the mechanical properties and water vapor barrier of starch-based films, *Food Hydrocolloid.*, 23, 1328-1333, 2009.
19. Gilfillan W.N., Nguyen D.M.T., Sopade P.A., and Doherty W.O.S., Preparation and characterisation of composites from starch and sugar cane fibre, *Ind. Crops Prod.*, 40, 45-54, 2012.
20. Duanmu J., Gamstedt E.K., Pranovich A., and Rosling A., Studies on mechanical properties of wood fiber reinforced cross-linked starch composites made from enzymatically degraded allylglycidyl ether-modified starch, *Composites, Part A: Appl. Sci. Manufact.*, 41, 1409-1418, 2010.
21. Bénézet J.C., Stanojlovic-Davidovic A., Bergeret A., Ferry L., and Crespy A., Mechanical and physical properties of expanded starch, reinforced by natural fibres, *Ind. Crops Prod.*, 37, 435-440, 2012.
22. Zhang Y., Thompson M., and Liu Q., The effect of pea fiber and potato pulp on thermal property, surface tension, and hydrophilicity of extruded starch thermoplastics, *Carbohydr. Polym.*, 86, 700-707, 2011.
23. Kocer H.B., Cerkez I., Worley S.D., Broughton R.M., and Huang T.S., Cellulose/starch/HALS composite fibers extruded from an ionic liquid, *Carbohydr. Polym.*, 86, 922-927, 2011.
24. Goelzer F.D.E., Faria-Tischer P.C.S., Vitorino J.C., Sierakowski M.R., and Tischer C.A., Production and characterization of nanospheres of bacterial cellulose from Acetobacterxylinum from processed rice bark, *Mat. Sci. Eng. C*,

- 29, 546-551, 2009.
25. Pandey L.K., Saxena C., and Dubey V., Studies on pervaporative characteristics of bacterial cellulose membrane, *Sep. Pur. Tech.*, 42, 213-218, 2005.
26. Alexander S. and Robert H., *Handbook of Biopolymers for Medical and Pharmaceutical Application*, Volume 1, Wiley-VCH, UK, 2005.
27. Uthumporn U., Shariffa Y.N., Fazilah A., and Karim A.A., Effects of NaOH treatment of cereal starch granules on the extent of granular starch hydrolysis, *Coll. Polym. Sci.*, 290, 1481-1491, 2012.
28. Sadeghi M. and Hosseinzadeh H., Synthesis and swelling behavior of starch-poly(sodium acrylate-co-acrylamide) superabsorbent hydrogel, *Turk J. Chem.*, 32, 375-388, 2008.
29. Rachtanapun P., Simasatitkul P., Chaiwan W., and Wathanaworasakun, Y., Effect of sodium hydroxide concentration on properties of carboxymethyl rice starch, *Int. Food Res. J.*, 19, 923-931, 2012.