

مقایسه فیلم نانوالیاف سلولز تولیدی به روش هواخشک و

خلأخشک حاصل از خمیر کاغذ کرافت رنگ‌بری نشده پوست کنف

- ❖ پژمان رضایتی چرانی*؛ استادیار گروه صنایع خمیر و کاغذ، دانشکده جنگل‌داری و محیط زیست، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران
- ❖ محمدرضا دهقانی فیروزآبادی؛ دانشیار گروه صنایع خمیر و کاغذ، دانشکده صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

چکیده

الیاف سلولز نانوفیبریله شده از خمیر کاغذ کرافت رنگ‌بری نشده پوست کنف تهیه و پس از ساخت فیلم‌های نانوالیاف سلولز هواخشک و خلأخشک ویژگی‌های کششی آن‌ها بررسی شد. قابلیت خمیر کاغذ رنگ‌بری نشده پوست کنف برای تولید نانوالیاف سلولز با استفاده از میکروسپال‌کننده مناسب است؛ به طوری که استفاده از تعلیق خمیر کاغذ با خشکی ۵/۵ درصد نیز قابلیت تولید نانوالیاف سلولز را دارد. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نشان‌دهنده تولید نانوالیاف سلولز با ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر بود. اگرچه دانسیته فیلم خلأخشک بیشتر از هواخشک بود (۱۱۰۵ در مقایسه با ۱۰۰۷ کیلوگرم بر متر مکعب)، شاخص مقاومت به کشش فیلم هواخشک بیشتر از خلأخشک به دست آمد (۱۴۸ در مقایسه با ۱۴۰ نیوتن متر بر گرم). همچنین مقاومت کششی، شاخص انرژی جذب کششی، و درصد کرنش فیلم هواخشک نیز بیشتر از فیلم خلأخشک بود. مدول کشسانی فیلم نانوالیاف سلولز خلأخشک بیشتر از هواخشک بود که انتظار می‌رود مرتبط با بیشتر بودن دانسیته آن باشد.

واژگان کلیدی: پوست کنف، خمیر کاغذ کرافت رنگ‌بری نشده، سلولز نانوفیبریله شده، فیلم نانوالیاف سلولز، میکروسپال‌کننده، ویژگی‌های مقاومتی.

مقدمه

اخیراً بررسی شده که نشان‌دهنده دستاوردهای جالب توجهی است [۹-۱۱]. در واقع نانوالیاف لیگنوسلولزی می‌تواند با استفاده از پیش‌تیمار مناسب و به دنبال آن همگن‌سازی با فشار زیاد تولید شود. معمولاً نانوسلولز لایه‌لایه شده به طور کامل از خمیر کاغذ کف، مشابه خمیر کاغذ چوب، حاوی میکروالیاف بلند (در دامنه میکرومتر) و نازک (قطر ۲۰-۱۰۰ نانومتر) است که ظاهری بسیار چسبناک و ژل‌مانند دارد [۱۲ و ۱۳].

تازه‌ترین تحقیقات نانوفناوری در زمینه نانوسلولز از یک سو بر یافتن روش‌های تولید با مصرف حداقل انرژی به صورت کارآمد، شامل انواع تیمارهای فیزیکی و شیمیایی و آنزیمی، قبل از همگن‌سازی، متمرکز شده‌اند و از سوی دیگر به دنبال اصلاح خصوصیات الیاف سلولز نانوفیبریله شده برای کاربردهای خاص با توجه به توانمندی‌های بالقوه آن‌اند [۸، ۹، ۱۰، ۱۴]. کاربردهای گزارش شده در موارد ثبت اختراع تولید و کاربرد الیاف سلولز نانوفیبریله شده از مصارف غذایی و پخش/امولسیون، پزشکی، داروسازی، و بهداشتی/جاذب تا به کارگیری در انواع نانوچندسازه‌ها و کاغذ و مقوا گسترده است. بررسی ویژگی‌های نانوالیاف سلولز به صورت سوسپانسیون یا ژل عمدتاً از طریق ارزیابی میزان تیرگی، میزان جذب آب، ویژگی‌های رئولوژی، و تصاویر الکترونی انجام می‌شود. بررسی ویژگی‌های نانوالیاف سلولز در حالت فیلم، که به آن معمولاً فیلم نانوالیاف سلولز گفته می‌شود، با مطالعه خواص فیزیکی-مکانیکی انجام می‌گیرد. در این تحقیق الیاف سلولز نانوفیبریله شده از خمیر کرافت رنگ‌بری نشده کف تهیه و فیلم‌های نانوالیاف سلولز خلأ خشک و

کف^۱ گیاهی یک‌ساله از خانواده مالواسه^۲ است. این گیاه بومی آفریقا خصوصیات مشابه پنبه و جوت دارد. مدت‌هاست این گیاه به منزله یکی از منابع غیر چوبی جهت تهیه خمیر کاغذ در بسیاری از نقاط جهان، به ویژه مالزی و تایلند، کشت می‌شود. این گیاه در مناطق مختلف ایران، از جمله گرگان و ورامین، قابل کشت است [۱]. اخیراً به استفاده از کف، به مثابه جایگزین مواد اولیه لیگنوسلولزی چوبی برای تهیه خمیر کاغذ، توجهی ویژه می‌شود [۲-۶]. طبق تازه‌ترین گزارش‌های تولید جهانی الیاف طبیعی، تولید جهانی کف ۱/۶ درصد است که پس از پنبه و جوت بیشترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد [۷].

به نظر می‌رسد فناوری نانو زندگی انسان را در آینده تغییر خواهد داد. البته هنوز آثار و توانمندی‌های نانوفناوری در زمینه تولیدات نانوالیاف سلولز کاملاً قابل پیش‌بینی نیست. با توجه به منشأ طبیعی، بدیهی است که نانوالیاف سلولز موادی کاملاً دوستدار محیط زیست و زیست تخریب پذیرند که ضمن جایگزینی با برخی تقویت‌کننده‌های مصنوعی می‌توانند از بار آلودگی محیط زیست بکاهند. در تهیه نانوالیاف سلولز، تاکنون، عمدتاً از خمیر کاغذ رنگ‌بری شده، حاصل منابع لیگنوسلولزی مختلف-مانند پنبه^۳، کف هندی^۴، کف، کتان، گندم، بامبو چغندر قند، الیاف باکتری، ساقه موز، الیاف چوب پهن‌برگان و سوزنی‌برگان-استفاده شده است [۸]. تهیه نانوالیاف سلولز از خمیر کاغذ رنگ‌بری نشده منابع لیگنوسلولزی

1. *Hibiscus cannabinus* L.
2. Malvaceae
3. Cotton
4. Jute

مایع پخت با آب گرم شست‌وشو شد. بر اساس استاندارد تاپی، آیین‌نامه شماره T236 cm-85، عدد کاپای خمیر کاغذ حاصل از پوست کنف اندازه‌گیری شد. بازده خمیر کاغذ حاصل از پوست کنف نیز به روش وزنی ۵۲/۵ درصد اندازه‌گیری شد.

تیمار آنزیمی خمیر کاغذ برای تولید

نانوالیاف سلولز

ابتدا درجه روانی خمیر کاغذ حاصل در اثر پالایش با پالایشگر پی‌اف‌آی از ۷۰۰ به ۴۰۰ میلی‌لیتر، استاندارد کانادا (CSF)، تقلیل داده شد. برای تیمار آنزیمی ۱۰۰ گرم خمیر کاغذ خشک ابتدا تا ۴ درصد خشکی رقیق شد و سپس به آن محلول بافر با pH ۷ اضافه شد. برای تهیه محلول بافر، از منوفسفات پتاسیم (KH_2PO_4) و فسفات دی‌سدیم (Na_2HPO_4) استفاده شد. از منوفسفات پتاسیم با وزن ملکولی ۱۳۶/۰۹ گرم و از فسفات دی‌سدیم با وزن ملکولی ۱۴۶/۹۶ گرم به ترتیب به مقدار ۱۱ و ۹ میلی‌مول استفاده شد.

۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد آماده و مقادیر مواد شیمیایی فوق به آن اضافه شد. سپس، خوب هم زده شد تا کاملاً حل شود. بعد از این مرحله، pH آن کنترل شد تا حدود ۷ باشد. به کمک میکروپیپت دیجیتالی مقدار ۰/۱۶۶۷ میکرولیتر به ازای هر گرم خمیر خشک از آنزیم اندوگلوکاناز^۱ برداشته و به محلول بافر اضافه شد. سپس، محلول فوق به خمیر کاغذ اولیه، که درصد خشکی حدود ۱۰ داشت، اضافه و هم زده شد و با افزودن آب اضافی درصد خشکی نهایی به ۴ رسانده

هواخشک ساخته شد. سپس، ویژگی‌های مقاومت‌های کششی آن‌ها ارزیابی شد. ویژگی‌های رئولوژی و تصاویر الکترونی قبلاً منتشر شده است [۱۵ و ۱۶].

مواد و روش‌ها

مواد

کنف استفاده‌شده در این تحقیق از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران- ورامین تهیه شد. پس از انتقال ساقه‌های قطع‌شده و جداکردن پوست از ساقه، نمونه‌هایی با طول ۴ سانتی‌متر تهیه شد.

خمیر کاغذسازی پوست کنف

خمیر کاغذسازی پوست کنف به روش کرافت انجام گرفت. مایع پخت مورد استفاده شامل هیدروکسید سدیم (NaOH) و سولفید سدیم (Na_2S) و آب معمولی بود. دما و زمان پخت به ترتیب ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۵۰ دقیقه نیز سولفیدته و قلیابیت فعال به ترتیب ۱۵ درصد و ۱۰۸ گرم در لیتر در نظر گرفته شد. پخت در یک دیگ ۲۱ لیتری آزمایشگاهی انجام شد. دیگ پخت شامل یک گرم‌کننده الکتریکی، یک موتور محرک، و سیستم‌های اندازه‌گیری دما و فشار است. در این تحقیق، برای هر عمل خمیر کاغذسازی معادل ۵۰۰ گرم نمونه پوست کنف کاملاً خشک داخل دیگ پخت ریخته شد. سپس، مایع پخت به آن اضافه و در آن بسته شد. نسبت مایع پخت به وزن خشک پوست کنف ۱۰ به ۱ در نظر گرفته شد. مدت زمان رسیدن دمای دیگ به دمای بیشینه پخت ۶۰ دقیقه بود. خمیر کاغذهای پخته‌شده تا حذف کامل

1. Monocomponent endoglucanase (Novozym 476, Novozym A/S)

مشروح این تبدیل در ذیل می‌آید:

مقداری خمیر کاغذ با آب مقطر به خشکی حدود ۱ درصد رقیق شد. متناسب با حجم سوسپانسیون به خمیر کاغذ رقیق شده، هیدروکلریک اسید ۰/۰۱ مولار اضافه شد. با افزودن هیدروکلریک اسید بیشتر، pH سوسپانسیون به عدد ۲ رسانده شد. سپس، سوسپانسیون به مدت ۳۰ دقیقه تحت همان اسیدیته باقی ماند. با آب مقطر کافی خمیر کاغذ شست و شو شد تا هدایت الکتریکی^۱ آب خروجی از خمیر کاغذ به کمتر از $5 \mu\text{S/cm}$ برسد. مجدداً خمیر کاغذ شسته شده به خشکی ۱ درصد رقیق شد و به منظور رسیدن pH آن به ۹، بی‌کربنات سدیم ۰/۰۰۱ مولار اضافه شد (در صورت نرسیدن pH به حدود ۹ از هیدروکسید سدیم ۰/۰۱ درصد استفاده می‌شد). سوسپانسیون حاصل به مدت ۳۰ دقیقه با همان شرایط باقی ماند (در صورت کاهش pH به کمتر از ۹، هیدروکسید سدیم اضافه می‌شد). پس از آن، سوسپانسیون مثل مرحله اول با آب مقطر فراوان شست و شو شد تا هدایت الکتریکی آن به کمتر از $5 \mu\text{S/cm}$ برسد.

عبور خمیر کاغذ از میکروسیال کننده جهت

تولید الیاف سلولز نانوفیبر یله شده

از خمیر کاغذهای به دست آمده از پوست کنف، پس از مرحله تبدیل به سدیمی و به دنبال آن ۱۰۰۰۰ دور پالایش، سوسپانسیون خمیر کاغذ با خشکی ۵/۵ درصد آماده شد. در این تحقیق، جهت عبور سوسپانسیون خمیر کاغذ از دستگاه همگن ساز

شد. سپس، سوسپانسیون آماده شده داخل کیسه نایلونی، که سه وزنه فلزی به زیر آن متصل بود، ریخته شد و سر کیسه با اتوپرس مسدود شد. کیسه محتوی خمیر کاغذ داخل حمام آب با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۱۲۰ دقیقه قرار گرفت. در مدت مذکور، هر ۳۰ دقیقه یک بار کیسه نایلونی از آب بیرون آورده و تکان داده شد و مجدداً داخل حمام مذکور قرار گرفت. پس از اتمام ۱۲۰ دقیقه، خمیر از کیسه خارج و با کمک کاغذ صافی درجه ۳ و قیف بوختر با حدود ۲ لیتر آب مقطر شست و شو داده شد. مجدداً ۲ لیتر محلول بافر مشابه شرایط مرحله نخست آماده و خمیر کاغذ درون آن ریخته شد. پس از رساندن درصد خشکی خمیر به ۴، مشابه مرحله اول داخل کیسه نایلونی ریخته شد. سپس، کیسه حاوی خمیر به حمام با دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد منتقل و به منظور اطمینان از از بین رفتن آنزیم ۴۰ دقیقه در آنجا نگهداری شد. در نهایت، خمیر کاغذ پس از شست و شو جهت استفاده برای مراحل بعدی در یخچال نگهداری شد.

تبدیل یون‌های کلسیمی ترکیبات خمیر کاغذ

به یون‌های سدیمی

به طور کلی خمیر کاغذ برای عبور از میکروسیال کننده (همگن ساز) با جایگزینی یون‌های کلسیمی قابل جایگزین، به وسیله یون‌های سدیمی، به دلیل واکنشیدگی بیشتر، بهتر پاسخ می‌دهد [۱۷]. بدین منظور، با افزودن هیدروکلریک اسید به خمیر کاغذ، یون‌های کلسیمی با یون‌های هیدروژنی جایگزین شد و سپس با افزودن بی‌کربنات سدیم (NaHCO_3) یون‌های سدیمی جایگزین یون‌های هیدروژنی شدند.

1. Conductivity
2. MicroSiemens

اتاق کلیما با دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۵۰ درصد قرار گرفت تا خشک شود.

فیلم خلاخشک

ابتدا سوسپانسیون الیاف سلولز نانوفیبریل‌شده با افزودن آب به درصد خشکی ۰/۱ رسانده شد و به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۵۰۰ دور در دقیقه هم زده شد. سپس، ۹۰ میلی‌لیتر سوسپانسیون الیاف سلولز نانوفیبریل‌شده درون استوانه مخصوص، با کاغذ صافی دارای منافذ ۰/۶۵ میکرونی در کف آن، به آرامی ریخته شد. برای ریختن سوسپانسیون درون استوانه، سعی شد با کمک میله‌ای سوسپانسیون طوری هدایت شود که حباب هوا درون آن ایجاد نشود. همچنین سعی شد استوانه مذکور کاملاً عمودی نگاه داشته شود تا ضخامت فیلم نهایی در نقاط مختلف یکسان تشکیل شود. سپس، با ایجاد خلأ، آب سوسپانسیون تا حد تشکیل یک فیلم تر به مدت ۴ ساعت مکش شد. فیلم از کاغذ صافی جدا و در جایگاه خاص استوانه شکل مهار شد و در دمای حدود ۵۱ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت داخل آون خشک شد. فیلم خشک‌شده از حالت مهار خارج شد و به اتاق کلیما انتقال یافت تا ویژگی‌های آن تعیین شود.

تعیین ویژگی‌های فیلم نانوالیاف سلولز

ضخامت فیلم نانوالیاف سلولز تهیه‌شده، طبق آیین‌نامه شماره T 404 om-97 استاندارد تاپی، با دستگاه ضخامت‌سنج تی‌جی‌تی^۳ با دقت ۰/۰۱ میکرومتر تعیین شد. اندازه‌گیری ویژگی‌های کششی (شاخص مقاومت به کشش، کرنش در نقطه شکست، شاخص

میکروسیال‌کننده، ابتدا از اتاقک‌هایی با قطر داخلی ۴۰۰ به ۲۰۰ در سه مرحله و بعد از ۲۰۰ به ۱۰۰ میکرون در پنج مرحله استفاده شد. در این تحقیق، فشار دستگاه برای اتاقک‌های ۴۰۰ به ۲۰۰ میکرون ۸۰ تا ۹۰ مگاپاسکال و برای اتاقک‌های ۲۰۰ به ۱۰۰ میکرون ۱۶۰ تا ۱۷۰ مگاپاسکال تنظیم شد. محصول تولیدی، که نانوسلولز یا بعضاً الیاف سلولز نانوفیبریل‌شده نامیده می‌شود، برای ساخت فیلم نانوالیاف سلولز به کار رفت. توضیح اینکه درصد رقیق‌تر نانوسلولز، پس از رقیق‌سازی، به کمک عبور از همگن‌ساز بدون فشار با اتاقک‌های کوچک‌تر تهیه شد.

میکروسکوپ الکترونی عبوری

مشاهدات میکروسکوپ الکترونی عبوری در ولتاژ ۱۵۰ کیلووات از نانوالیاف کنف با مدل فیلیپس^۱، ساخت کشور ژاپن، در پارک فناوری دانشگاه تهران انجام شد. برای این منظور، ابتدا یک قطره سوسپانسیون رقیق‌شده الیاف سلولز نانوفیبریل‌شده روی سطح یک پوشش کربنی قرار داده شد و پس از خشک‌شدن برای تصویربرداری به کار رفت.

تهیه فیلم نانوالیاف سلولز

فیلم هواخشک

ابتدا سوسپانسیون الیاف سلولز نانوفیبریل‌شده با افزودن آب به درصد خشکی ۰/۲ رسانده شد و به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۵۰۰ دور در دقیقه هم زده و درون ظرف^۲ مخصوص ریخته شد. سپس، ظرف در

1. Philips CM30 Analytical Transmission Electron Microscope
2. Petri Dish

3. Preset Measurement Length TJT Teknik AB

از نانوالیاف‌های تولیدی تمایل به چسبیدن به یک‌دیگر و تشکیل رشته‌های ضخیم‌تر دارند [۱۸] که بعضاً در شکل ۱ قابل تشخیص است. نانوالیاف سلولز از سوسپانسیون خمیرکاغذ با درصد خشکی بین ۱ تا ۵/۵ تولید شد. بررسی خصوصیات سوسپانسیون‌های به‌دست‌آمده به صورت ژل از میکروسیال‌کننده نشان‌دهنده دست‌یابی به نانوالیاف سلولز در همه موارد بود [۱۵].

فیلم نانوالیاف سلولز

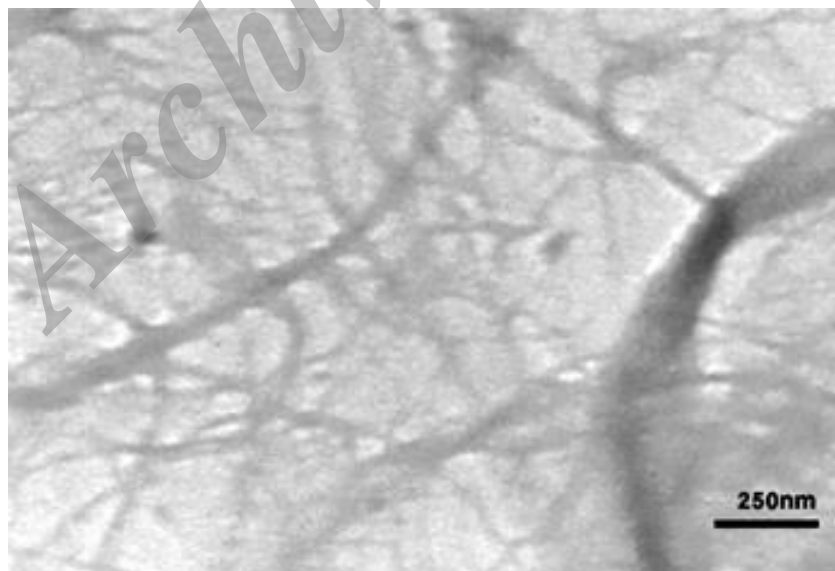
دو نوع فیلم نانوالیاف سلولز (هواخشک و خلأخشک) از نانوسلولز تولیدی ساخته و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن‌ها اندازه‌گیری شد (جدول ۱). نمودار مقاومت به کشش یک فیلم نانوالیاف سلولز هواخشک کنف از باب نمونه جهت درک بهتر توضیحات در شکل ۲ می‌آید.

جذب انرژی کششی، مقاومت کششی، مدول کشسانی، و شاخص سفتی کششی) فیلم‌های نانوالیاف سلولز طبق استاندارد ایزو ۲۰۰۵ انجام گرفت. نمونه‌ها به عرض ۶ میلی‌متر و طول ۵ سانتی‌متر با گوشه‌های قائم برش داده شد. فاصله دو دهانه تثبیت نمونه نیز ۳۰ میلی‌متر تنظیم شد. در نهایت، ویژگی‌های کششی در کرنش ۱ میلی‌متر بر دقیقه با دستگاه زوئیک^۲ تعیین شد.

یافته‌ها و بحث

تصاویر الکترونی نانوالیاف سلولز

الیاف پوست کنف، که در حالت معمولی قطری حدود ۱۶ میکرون دارند [۱]، پس از عبور از میکروسیال‌کننده به نانوالیافی با ابعاد زیر ۱۰۰ نانومتر تبدیل شدند که در تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (شکل ۱) به‌خوبی قابل تشخیص است. برخی



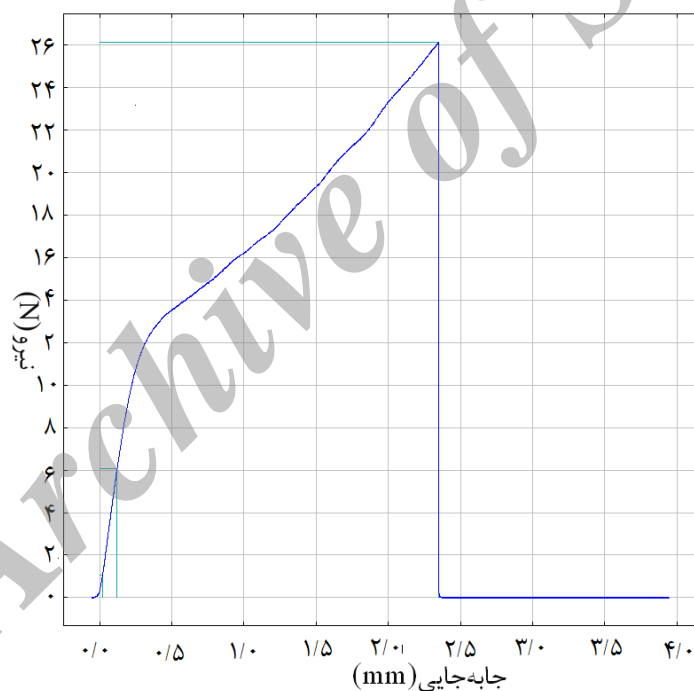
شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوالیاف سلولز حاصل از خمیر کرافت رنگ‌بری نشده پوست کنف

1. ISO/FDIS 1924-3:2005E

2. Zwick material tester, T1-FRxxMOD.A1K, model 2005

جدول ۱. ویژگی‌های فیلم نانوالیاف سلولز حاصل از خمیر کاغذ کرافت رنگ‌بری نشده پوست کنف

فیلم نانوالیاف سلولز		ویژگی
خلأخشک	هواخشک	
۵۸,۶	۳۰,۲	گراماژ (g.m^2)
۱۱۰۵	۱۰۰۷	دانسیته ظاهری (kg.m^3)
۱۴۰	۱۴۸	شاخص مقاومت کششی (Nm.g)
۱۴۹	۱۵۵	مقاومت کششی (Mpa)
۴,۹	۶	کرنش در نقطه شکست (%)
۸,۹۶	۸,۸۶	شاخص سفتی کششی (MNm.kg)
۹,۹	۸,۹	مدول کشسانی (Gpa)
۴۱۵	۵۱۹	شاخص جذب انرژی کششی (MJ.kg)



شکل ۲. منحنی مقاومت به کشش فیلم نانوالیاف سلولز هواخشک

نانوالیاف سلولز، به دلیل وجود شبکه پیوند هیدروژنی به شدت گسترده در ساختار آن‌ها، همواره بیشتر از کاغذ است که با افزایش چشمگیر سطح و نقاط تماس الیاف پس از تبدیل به نانوالیاف ایجاد می‌شود.

فیلم‌های نانوالیاف سلولز، به‌رغم عدم اعمال پرس در تولید آن‌ها، در مقایسه با کاغذهای معمولی، که تحت پرس قرار می‌گیرند، با وزن پایه برابر، دانسیته بیشتری دارد [۱۶]. مقاومت‌های فیلم

۱۴۶ نیوتن متر بر گرم گزارش دادند که کمتر از شاخص فیلم نانوالیاف سلولز ساخته شده از نانوالیاف کف تحقیق حاضر (۱۴۰ تا ۱۴۸ نیوتن متر بر گرم) است.

جدول ۲ مقادیر مقاومت به کشش فیلم نانوالیاف سلولز تولیدی در این تحقیق را در مقایسه با نتایج تحقیقات محققان پیشین نشان می‌دهد. مقاومت به کشش فیلم نانوالیاف سلولز حاصل از خمیر کاغذ رنگ‌بری نشده پوست کف تقریباً برابر و حتی بیشتر از فیلم نانوالیاف سلولز حاصل از خمیر کاغذ رنگ‌بری شده پهن‌برگ و سوزنی‌برگ است. این مقاومت همچنین تقریباً برابر با مقاومت به کشش سلوفان به مقدار ۱۰۴ تا ۱۵۴ مگاپاسکال است [۲۰].

البته، مقاومت فیلم نانوالیاف سلولز ساخته شده عمدتاً به میزان نانوفیبریله شدن خمیر کاغذ بستگی دارد. ضمن اینکه آثار ترکیب شیمیایی و مورفولوژی اولیه الیاف خمیر کاغذ نیز در درجات بعدی حائز اهمیت است [۸ و ۱۹].

بر اساس نتایج جدول ۱، شاخص مقاومت به کشش فیلم نانوالیاف سلولز حاصل از کف (۱۴۰-۱۴۸ نیوتن متر بر گرم) بیشتر از شاخص مقاومت به کشش کاغذهای متداول به دست آمد که در دامنه ۱۰ تا ۱۰۰ نیوتن متر بر گرم است [۲۰]. سیورود و استینیوس [۲۰] طی تحقیقی شاخص مقاومت به کشش فیلم نانوالیاف سلولز حاصل از خمیر کاغذ سولفیت کاملاً رنگ‌بری شده نوئل را در دامنه ۱۲۹ تا

جدول ۲. مقاومت به کشش فیلم نانوالیاف سلولز تولیدی به روش خلأ خشک حاصل از منابع لیگنوسلولزی مختلف

منبع	سیستم تولید	مقاومت به کشش (MPa)	ماده لیگنوسلولزی مصرفی برای تولید فیلم نانوالیاف سلولز
در این تحقیق	میکروسیال کننده	۱۳۳-۱۶۶	خمیر کاغذ کرافت رنگ‌بری نشده پوست کف
در این تحقیق	میکروسیال کننده	۱۴۰-۱۸۰	خمیر کاغذ کرافت رنگ‌بری نشده پوست کف (هوا خشک)
[۹]	ولی بیتر	۱۲۰	خمیر کاغذ کرافت رنگ‌بری نشده سوزنی برگ
[۹]	ولی بیتر	۱۰۵	خمیر کاغذ کرافت رنگ‌بری شده سوزنی برگ
[۲۰]	میکروسیال کننده	۱۰۴-۱۵۴	خمیر کاغذ سولفیت رنگ‌بری سوزنی برگ
[۲۱]	میکروسیال کننده	۲۱۱	خمیر کاغذ سولفیت رنگ‌بری سوزنی برگ
[۹]	ولی بیتر	۵۵	ترمومکانیکی سوزنی برگ
[۲۲]	میکروسیال کننده	۱۲۹-۲۱۴	حل شونده سوزنی برگ
[۹]	ولی بیتر	۹۱	خمیر کاغذ کرافت رنگ‌بری شده پهن‌برگ
[۲۳]	سوپر آسیاب	۷۷	خمیر کاغذ سودا رنگ‌بری شده کاه برنج
[۲۴]	سوپر آسیاب	۱۱۰	خمیر کاغذ کرافت رنگ‌بری شده باگاس

سوزنی‌برگ در محدوده ۱۰/۴-۱۳/۷ گیگاپاسکال گزارش شده است [۲۵]. سیورود و استینیوس نیز مدول کشسانی فیلم‌های نانوالیاف سلولز خلأخشک حاصل از خمیر کاغذ سولفیت نئول کاملاً رنگ‌بری شده را ۱۵/۷-۱۷/۵ گیگاپاسکال گزارش کردند [۲۰]. به نظر می‌رسد، تفاوت مقادیر به‌دست‌آمده در این تحقیق با نتایج دو تحقیق یادشده ناشی از تفاوت گونه و روش آماده‌سازی الیاف و نانوالیاف سلولز باشد.

شاخص سفتی کششی وابستگی مستقیمی با دانسیته دارد و از طریق شیب منحنی مقاومت به کشش محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، در صورت مقاومت بیشتر به کشش، تحت مقدار کرنش ثابت، شیب منحنی در ناحیه خطی افزایش خواهد داشت که نشان‌دهنده سفتی زیاد شبکه است. به نظر می‌رسد بیشتر بودن این ویژگی در فیلم‌های نانوالیاف سلولز خلأخشک در مقایسه با هواخشک مربوط به اختلاف دانسیته آن‌ها باشد.

شاخص جذب انرژی کششی نیز، که تابعی از حداکثر نیروی لازم برای پارگی کاغذ تحت کشش است، ویژگی مهمی است که برای کنترل پارگی کاغذ همراه مقاومت به کشش ارزیابی می‌شود. این شاخص به درصد کرنش در ناحیه پارگی کاغذ وابسته است. بنابراین، همان‌طور که انتظار می‌رفت، شاخص جذب انرژی کششی فیلم‌های هواخشک، به دلیل درصد کرنش زیاد، بیشتر از فیلم‌های نانوالیاف سلولز خلأخشک (۵۱۹ در مقایسه با ۴۱۴ مگاژول بر کیلوگرم) و بیش از ۴۰۰ برابر کاغذهای ساخته‌شده در این تحقیق (۱ مگاژول بر کیلوگرم)، به نقل از رضایتی چرانی [۱۶]، به دست آمد.

بر اساس نتایج جدول ۱، مقایسه دانسیته فیلم‌های نانوالیاف سلولز هواخشک و خلأخشک نشان می‌دهد دانسیته فیلم‌های نانوالیاف سلولز هواخشک حدود ۱۳ درصد کمتر از خلأخشک است. این عامل می‌تواند ناشی از نبود مکش اولیه جهت خروج آب از فیلم نانوالیاف سلولز باشد که در حالت خلأخشک وجود دارد. همچنین درصد کرنش فیلم‌های نانوالیاف سلولز هواخشک در مقایسه با فیلم‌های نانوالیاف سلولز خلأخشک کمی بیشتر بود (۶ در مقایسه با ۴/۹) که به نظر می‌رسد ناشی از فرایند خشک‌کردن آن‌ها باشد. در این میان، همان‌طور که انتظار می‌رفت، درصد کرنش هر دو فیلم‌های نانوالیاف سلولز بیشتر از کاغذهای دست‌ساز (۲/۹۰) به دست آمد [۱۶].

بر اساس نتایج، در صورت تهیه فیلم‌های نانوالیاف سلولز هواخشک در مقایسه با شرایط خلأخشک می‌توان به شاخص‌های مقاومتی بهتری دست یافت. البته، مدول کشسانی و شاخص سفتی کششی فیلم‌های نانوالیاف سلولز خلأخشک بیشتر از هواخشک به دست آمد که دلیل احتمالی آن زیادتر بودن دانسیته فیلم‌های نانوالیاف سلولز خلأخشک و شرایط خشک‌کردن است. مدول کشسانی فیلم‌های نانوالیاف سلولز حاصل از خمیر کاغذ رنگ‌بری نشده پوست کنف ۸/۹۲-۹/۹۰ گیگاپاسکال به دست آمد که حدود سه برابر مدول کشسانی کاغذهای تهیه‌شده از همان خمیر کاغذ (۳/۲۹ گیگاپاسکال)، به نقل از رضایتی چرانی، بود و این وضعیت می‌تواند ناشی از شبکه نانو ساختاری مقاوم فیلم نانوالیاف سلولز در مقایسه با ساختار متخلخل کاغذ دست‌ساز باشد [۱۶]. این ویژگی برای نانوالیاف حاصل از خمیر کاغذ حل‌شونده کرافت

نتیجه‌گیری

در این پژوهش نانوالیاف سلولز از خمیر کاغذ کرافت پوست کنف تهیه و فیلم نانوالیاف سلولز هواخشک و خلأخشک ساخته شد. سپس ویژگی‌های کششی بررسی شد. بر اساس نتایج، قابلیت خمیر کاغذ رنگ‌بری نشده پوست کنف برای تولید نانوالیاف سلولز با روش آماده‌سازی خمیر کاغذ به‌کاررفته از طریق میکروسیال‌کننده مناسب است؛ به طوری که از سوپانسیون خمیر کاغذ با درصد خشکی ۵/۵ درصد نیز نانوسلولز تولید شد. دانسیته، شاخص سفتی کششی، و مدول کشسانی فیلم نانوالیاف سلولز خلأخشک بیشتر از هواخشک به دست آمد؛ ولی شاخص مقاومت به کشش، مقاومت کششی، درصد کرنش، و شاخص انرژی کششی فیلم نانوالیاف سلولز هواخشک بیشتر از خلأخشک بود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان کمال سپاسگزاری خود را از بخش شیمی کاغذ و میکروبیولوژی مرکز خمیر و کاغذ، اینوونتیا، و دانشگاه کی-تی-اچ سوئد، جهت حمایت تجهیزاتی، و ستاد ویژه فناوری نانو ریاست جمهوری، به جهت مشارکت در حمایت مالی، ابراز می‌دارند. به‌ویژه از پروفیسور تام لیندستروم^۱، دکتر علی نادری، خانم اوسا بلادمو^۲، و گامبرگ گلاذ نوردمارک^۳ به سبب مساعدت و راهنمایی علمی در مرکز تحقیقاتی خمیر و کاغذ سوئد تشکر و قدردانی می‌کنند.

-
1. Tom Lindström
 2. Åsa Blademo
 3. Gunborg Glad- Nordmark

References

- [1]. Faezipour, M., Hamzeh, Y., and Mirshokraii, S. A. (2000). Evaluation of kenaf as a raw material in paper manufacturing pulp. *Iranian Journal Natural Resource*, 53(3): 239-250.
- [2]. Hossain, M. D., Hanafi, M. M., Jol, H., and Hazandy, A. H. (2011). Growth, yield and fiber morphology of kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) grown on sandy bris soil as influenced by different levels of carbon. *African Journal of Biotechnology*, 10(50): 10087-10094.
- [3]. Bahtoe, A., Zargari, K., and Baniani, E. (2012). An Investigation on Fiber Production of Different Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) Genotype. *World Applied Sciences Journal*, 16(1): 63-66.
- [4]. Shakhes, J., Dehghani-Firouzabadi, M. R., Rezayati-Charani, P., and Zeinaly, F. (2010). Evaluation of harvesting time effects and cultivars of Kenaf on papermaking. *BioResources*, 5(2): 1268-1280.
- [5]. Villar, J. C., Revilla, E., Gómez, N., Carbajo, J. M., and Simón, J. L. (2009). Improving the use of kenaf for kraft pulping by using mixtures of bast and core fibers. *Industrial crops and products*, 29: 301-307.
- [6]. Mossello, A. A., Harun, J. Tahir, P. M., Resalati, H., Ibrahim, R., Fallah Shamsi, S. R., and Mohammmed, A. Z. (2010). A Review of Literatures Related of Using Kenaf for Pulp Production (Beating, Fractionation, and Recycled Fiber). *Modern Applied Science*, 4(9): 21-29.
- [7]. Johansson, C., Bras, J., Mondragon, I., Nechita, P., Plackett, D., Šimon, P., Svetec, D. G., Virtanen, S., Baschetti, M. G., Breen, C., Clegg, F., and Aucejok, S. (2012). Renewable fibers and bio-based materials for packaging applications- a review of recent development. *BioResources*, 7(2): 2506-2552.
- [8]. Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindström, T., Ankerfors, M., Gray, D., and Dorri, A. (2011). *Nanocelluloses: A New Family of Nature-Based Material*. *Angewandte Chemie International Edition*, 50: 5438-5466.
- [9]. Spence, K. L., Venditti, R. A., Habibi, Y., Rojas, O. J., and Pawlak, J. J. (2010). The effect of chemical composition on microfibrillar cellulose films from wood pulps: Mechanical processing and physical properties. *Bioresource Technology*, 101: 5961-5968.
- [10]. Spence, K. L., Venditti, R. A., Habibi, Y., Rojas, O. J., and Pawlak, J. J. (2010). Aspects of raw materials and processing conditions on the production and utilization of microfibrillated cellulose. In: *International conference on nanotechnology for the forest products industry*. Otaniemi, Espoo, Finland.
- [11]. Spence, K. L., Venditti, R. A., Rojas, O. J., Habibi, Y., and Pawlak, J. J. (2010). The effect of chemical composition on microfibrillar cellulose films from wood pulps: Water interactions and physical properties for packaging applications. *Cellulose*, 17: 835-848.
- [12]. Jonoobi, M., Harun, J., Shakeri, A., Misra, M., and Oksmand, K. (2009). Chemical composition, crystallinity, and thermal degradation of bleached and unbleached Kenaf bast (*Hibiscus cannabinus*) pulp and nanofibers. *BioResources*, 4(2): 626-639.
- [13]. Jonoobi, M., Harun, J., Tahir, P. M., Shakeri, A., SaifulAzry, S., and Davoodi Makinejad M. (2011). Physicochemical characterization of pulp and nanofibers from kenaf stem. *Materials Letters*, 65: 1098-1100.
- [14]. Stenstad, P., Andresen, M., Tanem, B. S., and Stenius, P. (2008). Chemical surface modifications of microfibrillated cellulose. *Cellulose*, 15: 35-45.

- [15]. Rezayati Charani, P., Dehghani-Firouzabadi, M., Afra, E., and Shakeri, A. (2013). Rheological characterization of high concentrated MFC gel from kenaf unbleached pulp. *Cellulose*, 20(2): 727-740.
- [16]. Rezayati Charani, P., Dehghani-Firouzabadi, M., Afra, E., Blademo, Å., Naderi, A., and Lindström, T. (2013). Production of microfibrillated cellulose from unbleached kraft pulp of Kenaf and *Scotch pine* and its effect on the properties of hardwood kraft: microfibrillated cellulose paper. *Cellulose*, 20(5): 2559-2567.
- [17]. Ankerfors, M. and Lindstrom, T. (2011). Method for providing a nanocellulose involving modifying cellulose fibers. US Patent Application Publication, 2011/0036522 A1. 2p.
- [18]. Pääkkö, M., Ankerfors, M., Kosonen, H., Nykänen, A., Ahola, S., Österberg, M., Ruokolainen, J., Laine, J., Larsson, P. T., Ikkala, O., and Lindström, T. (2007). Enzymatic hydrolysis combined with mechanical shearing and high-pressure homogenization for nanoscale cellulose fibrils and strong gels. *Biomacromolecules*, 8: 1934-1941.
- [19]. Siro, I. and Plackett, D. (2010). Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: a review. *Cellulose*, 17: 459-494.
- [20]. Syverud, K. and Stenius, P. (2009). Strength and barrier properties of MFC films. *Cellulose* 16: 75-85.
- [21]. Sehaqui, H., Liu, A., Zhou, Q., and Berglund, L. A. (2010). Fast Preparation Procedure for Large, Flat Cellulose and Cellulose/Inorganic Nanopaper Structures. *Biomacromolecules*, 11(9): 2195-2198.
- [22]. Henriksson, M., Henriksson, G., Berglund, L. A., and Lindström, T. (2007). An environmentally friendly method for enzyme-assisted preparation of microfibrillated cellulose (MFC) nanofibers. *European Polymer Journal*, 43: 3434-3441.
- [23]. Hassan, M. L., Mathew, A. P., Hassan, E. A., El-Wakil, N. A., and Oksman, K. (2012). Nanofibers from bagasse and rice straw: process optimization and properties. *Wood Science and Technology*, 46: 193-205.
- [24]. Hassan, E. A., Hassan, M. L., and Oksman, K. (2011). Improving bagasse pulp paper sheet properties with microfibrillated cellulose isolated from xylanase-treated bagasse. *Wood and fiber science*, 43(1): 76-82.
- [25]. Henriksson, M., Berglund, L. A., Isaksson, P., Lindström, T., and Nishino, T. (2008). Cellulose Nanopaper Structures of High Toughness. *Biomacromolecules*, 9: 1579-1585.