یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

نانوسلولز در کاغذسازی

مژده مشکور[1]

استادیار گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

Email: M.Mashkour@gau.ac.ir

چکیده

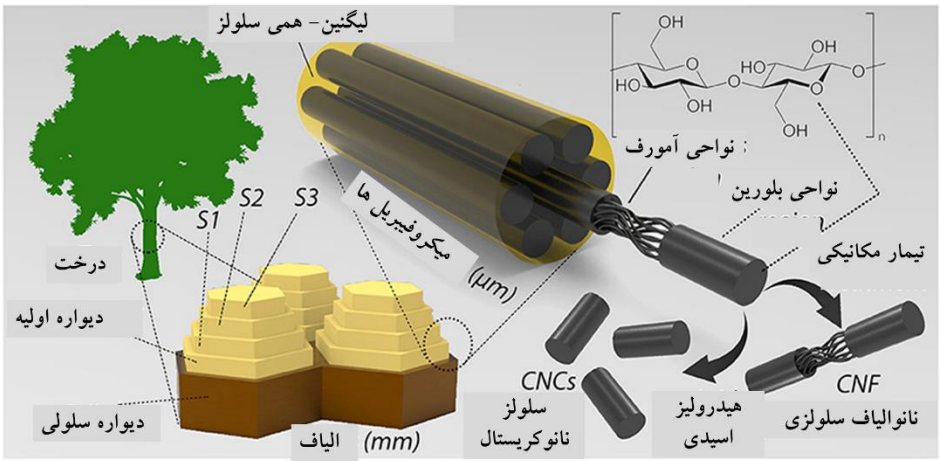
در فرآیند تولید کاغذ ، نانوالیاف سلولزی (NFC) یا در آغاز به دوغاب کاغذسازی اضافه می‌شوند یا به عنوان پوشش بیونانو، روی سطح کاغذ نهایی بکار برده می‌شوند. هدف اصلی در نظر گرفتن نانوسلولز به عنوان بیونانوفیلر، حفظ خواص استحکامی کاغذ پس از استفاده از پرکننده‌های معدنی مانند کربنات کلسیم می باشد. نانو سلولز همچنین به افزایش مقدار استفاده از پرکننده در ورق کاغذ بدون از افت ویژگی‌های مقاومتی کاغذ کمک می کند.

واژه‌های کلیدی

نانوالیاف سلولزی (NFC)، پوشش بیونانو، ویژگی‌های مقاومتی کاغذ

۱. مقدمه

نانوتکنولوژی در قرن ۲۱ ام، امید فراوانی برای تغییرات اساسی در مواد مورد استفاده و فرصت بزرگی برای خلق محصولات جدید در بخش‌های گوناگون صنعت جهانی ایجاد کرده است. در حال حاضر، آزمایشگاه های متعدد تحقیقات زیادی را در مورد تولید محصول از نانومواد (مانند پودرها ، لوسیون ها ، مایعات و الیاف) انجام داده که می توانند یا مستقیماً توسط مصرف کنندگان مورد استفاده قرار گیرند یا به عنوان مواد افزودنی مهم در محصولات سنتی بکار گرفته شوند. این نانوذرات ویژگی‌های بسیار مفیدی به محصولات جدید می‌دهند ، از این رو فن‌آوری های مورد استفاده برای تولید آنها اغلب متحول کننده تعریف می‌شوند. ارزش تولید جهانی نانومواد در سال ۲۰۱۰ به ۱/۷ میلیارد دلار رسیده است. پیش‌بینی می‌شود که بازار جهانی مواد نانو تا سال ۲۰۲۰ با افزایش ۲۳ درصدی به ۵/۸ میلیارد دلار برسد (۱). در حال حاضر ، تقاضای زیادی برای تولید محصولات با ارزش افزوده بالا از منابع تجدید پذیر وجود دارد که برای جایگزینی مواد با پایه نفتی برنامه‌ریزی شده‌اند. سلولز فراوان‌ترین پلیمر طبیعی است و می‌توان از آن برای پیشنهاد راه‌حل‌های منطقی برای این مسئله استفاده کرد (۲). سلولز به عنوان مهم‌ترین جزء اسکلت گیاهان، ماده خام پلیمری تقریبا بی پایان با ساختار و خواص جذاب است که امروزه به‌طور گسترده‌ای در صنعت استفاده می‌شود (۳). به لحاظ ساختاری، پلی‌ساکاریدی با ساختار نیمه‌بلورین است که واحد تکرار شونده آن شامل دو حلقه انیدروگلوکزی است که از طریق پیوند گلیکوزیدی β-۴،۱ به هم متصل هستند (۴، ۵). همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، دیواره‌های سلولی چوب با ماکروفیبرهای سلولز، همی‌سلولز و لیگنین ساخته می‌شوند که چندسازه لیفی سلولزی را تشکیل می‌دهد. این ماکروفیبرها از میکروفیبریل‌ها ساخته شده‌اند که خود نیز از نانوفیبریل‌های سلولزی تشکیل شده است. جالب توجه است که نانوفیبریل‌های سلولزی در یک ردیف دارای بخش بسیار منظم (بلورین) و بخش نامنظم (آمورف) می‌باشند (۳).



شکل ۱- ساختار سلسله مراتبی سلولز (۶)

۲. نانوسلولز و طبقه‌بندی آن

منظور از "نانوسلولز" عموماً ، مواد سلولزی است که حداقل یکی از ابعادشان در مقیاس نانومتری باشد. نانو سلولز به سلولز نانوفیبریله شده (NFC) و نانوکریستال‌های سلولزی (CNC) طبقه‌بندی می‌شود. هر دو آنها یا از مواد گیاهی یا غیر گیاهی مشتق می‌شوند (۷). سلولز نانوفیبریله شده (NFC) به الیاف سلولزی فیبریله شده تا حد دسترسی به دستجات میکروفیبریل سلولزی گفته می‌شود که قطرشان در حد نانومتری (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) و طولشان چند میکرومتر است. سلولز نانوفیبریله شده، نخستین بار در سال ۱۹۸۳ توسط توربالک و همکارانش با روش همگن‌سازی به دست آمد (۴). مهمترین ویژگی‌های این ماده که باعث مورد توجه قرار گرفتن آن شده است، شامل وزن سبک، ساختار شبکه‌ای، تجدیدپذیری، زیست تخریب پذیری، سختی و مقاومت زیاد، شفافیت، ظرفیت جذب آب بالا، اصلاح کننده خواص رئولوژیکی، سطح ویژه و نسبت منظر زیاد، واکنش‌پذیری زیاد و ویژگی‌های ممانعتی می‌باشد (۸). برای تولید سلولز نانوفیبریله از منابع سلولزی مختلف استفاده می‌شود. مهم‌ترین منبع صنعتی الیاف سلولزی و منبع اصلی استفاده شده برای تولید NFC،

چوب می باشد. نانوکریستال‌های سلولزی (CNC)، ذراتی میله مانند هستند که فقط دارای بخش‌های کریستالی (بلورین) می‌باشند. فرآیند اصلی برای جداسازی نانوکریستال‌های سلولزی از الیاف سلولزی، برپایه هیدرولیز اسیدی می‌باشد که الیاف سلولزی را بطور عرضی می‌شکنند. نواحی بی‌شکل سلولز که به عنوان معایب ساختاری عمل می‌کنند، به موجب شکست عرضی الیاف سلولزی به نانوذرات میله مانند حذف می‌شوند. این تغییر شامل شکستن مناطق بی‌شکل اطراف میکروفیبریل‌ها و بین آنهاست.، در حالیکه بخش‌های منظم و بلورین سالم باقی می‌مانند (۹) . نانوکریستال‌های سلولزی در مقایسه با NFC، انعطاف‌پذیری بسیار محدودی دارند، زیرا مناطق آمورف در آن‌ها وجود ندارد. نانوکریستال‌های سلولزی همچنین با عناوین نانوویسکرها[1]، نانو میله‌ها[2] و کریستال سلولزی میله‌ای شناخته می‌شوند. این ذرات صد درصد سلولزی هستند و تا حد زیادی بلوری می‌باشند. ناحیه بلورین آن‌ها بین ۵۴ تا ۸۸ درصد متغیر می باشد (۷).

۳. کاربردهای نانوسلولز در کاغذسازی

امروزه استفاده از نانوسلولز رو به گسترش است و استفاده از آن منافع زیادی به لحاظ کیفی ایجاد کرده است (۱۰). علاوه بر این، نانوالیاف سلولزی یا در آغاز به دوغاب کاغذسازی اضافه می‌شوند یا به عنوان پوشش بیونانو روی سطح کاغذ نهایی بکار برده می‌شوند.

۱،۳. کاربرد نانوسلولز به عنوان افزودنی در کاغذسازی

نقش نرمه‌های لیفی در افزایش مقاومت پیوند بین الیاف در کاغذسازی، برای کاغذسازان به‌خوبی شناخته شده است. سلولز نانوفیبریله‌شده به‌عنوان یک عامل مقاومتی تر و خشک و عامل تقویت‌کننده برای افزایش مقاومت خمیرکاغذهای مختلف به‌ویژه خمیرهای تولیدشده با فرآیند گرمایی- مکانیکی عمل می‌کند (۱۱). در حقیقت سلولز نانوفیبریله‌شده به علت داشتن سطح ویژه بزرگ، نسبت منظر زیاد، میل ترکیبی زیاد با خمیر سلولزی همراه با توانایی تشکیل شبکه سه‌بعدی، منافع بسیار زیادی را برای بهبود مقاومت کاغذ در زمان اضافه شدن به دوغاب خمیر ایجاد می‌نماید (۱۲). تایپال و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که افزودن سلولز نانوفیبریله‌شده به سوسپانسیون خمیر، سبب کاهش سرعت زهکشی و افزایش مقاومت کاغذ می‌شود، به‌خصوص اگر از یک پلی‌الکترولیت کاتیونی به‌عنوان کمک‌نگهدارنده استفاده شود. این در حالی است که با انتخاب بهینه مواد و شرایط فرآیند می‌توان بدون کاهش محسوس سرعت زهکشی، ویژگی‌های مقاومتی را افزایش داد (۱۳). اثر پوشش‌دهی کاغذ و مقوا با سلولز نانوفیبریله‌شده بر بهبود مقاومت‌های مکانیکی و مقاومت به عبور هوای کاغذ و مقوا اثبات شده است (۱۴). همچنین اثر افزودن سلولز نانوفیبریله‌شده به سوسپانسیون کاغذسازی و بهبود مقاومت‌های کاغذ توسط محققان زیادی تأیید شده است (۱۱، ۱۵). نانوالیاف اصلاح شده شیمیایی به بهبود قابلیت ترشوندگی ، سازگاری ، آبگریزی و امکان تعامل الیاف نانو در ماتریس کاغذ کمک می کنند و باعث تغییر خواص سلولز می شوند (۱۶، ۱۷).

۲،۳. کاربرد نانوسلولز به عنوان ماده پوشش‌دهی در کاغذسازی

به عنوان یک ماده پوشش‌دهنده، نانوالیاف سلولزی با توجه به اینکه بعد از ساخت کاغذ اضافه می‌شوند، مشکل آب‌گیری (زهکشی) را حل می‌کنند. همچنین می‌توان از آنها به عنوان فیلم‌های بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر و شفاف که ویژگی‌های ممانعتی بهتری دارند استفاده نمود (۱۸). مقدار ماده پوشش‌دهی به روش پوشش‌دهی بستگی دارد. انواع مختلفی از روش‌ها مانند اسپری، پوشش‌دهی با میله، رول و پرس آهارزنی برای اعمال نانوسلولز روی سطح کاغذ وجود دارند (۱۰). لاووین و همکاران (۲۰۱۱)، از پوشش‌دهی میله‌ای و پرس آهارزنی برای اعمال سلولز نانوفیبریله‌شده روی سطح کاغذ استفاده کردند. براساس نتایج حاصله، وزن پوشش ۷ و ۱۴ گرم بر مترمربع، به ترتیب برای ۵ و ۱۰ لایه NFC برای پوشش‌دهی میله‌ای حاصل شد، اما پرس آهارزنی وزن پوشش ۳ و ۴ گرم بر متر مربع را با ۵ و ۱۰ لایه NFC ایجاد می‌کند (۱۹). لاووین و همکاران (۲۰۱۴)، اثر پوشش NFC را بر روی سختی خمش، مقاومت فشاری و خواص ممانعتی مقوا بررسی کردند و فقط از روش پوشش‌دهی میله‌ای برای اعمال NFC روی مقوا استفاده کردند. نتایج نشان داد که سختی خمش و مقاومت فشاری در جهت ماشین ۳۰٪ افزایش یافته است. استفاده از NFC ضخامت مقوا را افزایش داد که موجب سختی خمش بیشتر شد. برعکس، ویژگی‌های ممانعتی مقوا ضعیف بودند و جذب آب برای مقوای پوشش‌دهی‌شده با NFC در این مطالعه بیشتر شد (۱۴).

---

[1] Nanowhiskers
[2] Nanorods

فوم NFC برای استفاده روی سطح پیشنهاد می‌شود، به شما کمک می‌کند تا وزن پوشش کم را با لایه پوشش‌دهی ضخیم‌تر بدست آورید (۱۰).

۴. ویژگی‌های ورق کاغذ

نانو سلولز بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی کاغذ تأثیر دارد. استفاده از نانوسلولز به عنوان ماده پرکننده و پوشش‌دهنده موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی کاغذ می‌شود. در این بخش ، به طور جداگانه به تأثیر نانوسلولز بر خواص کاغذ پرداخته شده است.

۱،۴. اثر نانوسلولز به عنوان یک ماده پرکننده روی ویژگی‌های کاغذ

نانوسلولز به عنوان یک ماده پرکننده می تواند به تنهایی یا با دیگر افزودنی ها در صنعت کاغذسازی استفاده شود. این ماده ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی کاغذ را بهبود می‌بخشد (۱۰).

۱،۱،۴. دانسیته

محققین مشاهده نمودند که با افزایش NFC به کاغذ، دانسیته کاغذ افزایش یافت. افزودن ۴٪ NFC در ورقه‌های TMP موجب افزایش ۴-۳۰ درصدی دانسیته شد (۱۱). مشکور و همکاران (۲۰۱۹) گزارش دادند که با افزودن ۱۰٪ NFC به خمیر الیاف بلند، دانسیته کاغذ به میزان ۱۵٪ افزایش یافت. NFC یک جزءسلولزی با ابعاد نانومتری می‌باشد که دارای سطح ویژه بالا و گروه‌های هیدروکسیل فراوان می‌باشد. به همین دلیل پیوندهای بین الیاف را افزایش داده و همچنین فضاهای خالی بین الیاف را در ورقه کاغذ پر می‌کند. این پدیده موجب افزایش دانسیته کاغذ می‌شود (۲۰).

۲،۱،۴. نفوذپذیری

محققان دریافته‌اند که نفوذپذیری هوا بسیار تحت تأثیر NFC می‌باشد. طبق نتایج تایپال و همکاران (۲۰۱۰)، با افزایش میزان NFC از ۰ به ۳۰٪ وزنی، نفوذپذیری هوا از ۱۴۵۰ به ۴۵۰ میلی‌لیتر در دقیقه کاهش یافت (۱۳). با افزودن NFC تا ۴٪، نفوذپذیری هوا به تدریج کاهش می‌یابد (۱۱). در حقیقت استقرار نانوالیاف در فضاهای خالی و خلل و فرج بین الیاف موجب پر شدن این فضاها، کاهش تخلخل کاغذ و در نهایت افزایش مقاومت کاغذ به عبور هوا می شود.

۳،۱،۴. طول شکست

افزودن نانوسلولز موجب افزایش طول شکست می‌شود. طول شکست به درصد نانوسلولز در ورق کاغذ بستگی دارد. درصد بیشتر نانوسلولز موجب طول شکست بالاتر ورق کاغذ خواهد شد (۲۱).

۴،۱،۴. ویژگی‌های مقاومتی

NFC موجب بهبود ویژگی‌های مقاومتی ورقه‌های کاغذ می‌شود که توسط بسیاری از محققین اثبات شده است (۱۴، ۱۶، ۲۰). اریکسن و همکاران مشاهده نمودند که شاخص مقاومت کششی ورقه‌های TMP بعد از افزون ۴٪ NFC همراه با ذرات پرکننده به ورق کاغذ، افزایش یافت (۱۱). مشکور و همکاران (۲۰۱۵) دریافتند که با افزودن ۱۰٪ NFC، مقاومت به ترکیدن ورقه‌های کاغذ به مقدار ۲۹/۵ درصد افزایش یافت (۱۶). تایپال و همکاران ۳٪ NFC در ترکیب با ۱/۵ ٪ نشاسته کاتیونی به خمیر سوزنی‌برگ پالایش شده افزودند و مشاهده نمودند که مقاومت کششی ورقه‌های کاغذ افزایش یافت (۱۳). عوامل مؤثر روی مقاومت کششی ورقه کاغذ شامل طول، شکل، جهت‌گیری الیاف، سطح پیوند و مقاومت پیوند می‌باشند. اثر نانوالیاف سلولزی روی مقاومت کششی به مقدار نانوالیاف سلولزی، شدت فیبریله شدن، درجه پالایش خمیر، نوع و روش افزودن عوامل ماندگاری بستگی دارد (۱۱، ۱۴).

۵،۱،۴. ویژگی‌های نوری

اریکسن و همکاران مشاهده نمودند که افزودن ۴٪ NFC به ورقه‌های TMP ضریب شکست نور را به میزان ۲-۵ مترمربع بر کیلوگرم کاهش داد (۱۱). نانوالیاف سلولزی دانسیته و سطح پیوند را افزایش می‌دهند که موجب کاهش سطح ویژه نسبی و ضریب شکست نور می‌شود. بنابراین درجه روشنی و ماتی کاغذهای حاصله کاهش می‌یابد (۱۰).

۲,۴. اثر نانوسلولز به عنوان ماده پوشش‌دهنده روی ویژگی‌های کاغذ

۱,۲,۴. ویژگی‌های مقاومتی

سیورود و استنیوس (۲۰۰۹) متجه شدند که بعد از پوشش‌دهی با لایه NFC، شاخص کششی ۳۵-۴۰ نیوتن متر برگرم افزایش می‌یابد (۲۲). برودین و همکاران بیان نمودند که نانوالیاف تعداد بسیار زیادی پیوندهای بین فیبری ایجاد می‌کند، زیرا در مقایسه با الیاف خمیر فیبریل‌های بیشتری دارد. این پیوندها ویژگی‌های مقاومتی کاغذ را افزایش می‌دهد (۱۰).

۲,۲,۴. نرمی

NFC نرمی سطح را افزایش می‌دهد و کاربرد پوشش NFC بعد از پیش- پوشش‌دهی نرمی سطح کاغذ پوشش‌دهی‌ده با نانوالیاف را افزایش می‌دهد. فضاهای خالی ایجاد شده در محل تلاقی فیبر با فیبر توسط NFC پر می‌شوند و بنابراین NFC نرمی کاغذ را افزایش می‌دهد (۱۰).

۳,۲,۴. ممانعت نسبت به هوا

NFC استفاده شده به عنوان فیلم یا پوشش روی ویژگی ممانعت به هوا مؤثر می‌باشد و نفوذپذیری به هوا را کاهش می‌دهد. زمانیکه کاغذ با ۵ لایه NFC توسط پوشش‌دهنده میله‌ای پوشش داده می‌شود، ویژگی‌های ممانعت به هوا را تا ۹۰ درصد بهبود می‌بخشد (۱۹). تحقیقات سیورود و استنیوس حاکی از اثر وزن پوشش روی نفوذپذیری هوا می‌باشد. نویسندگان از وزن پوشش ۲ تا ۸ gr/m^2 روی کاغذ پایه استفاده کردند و نفوذپذیری هوا از ۶۵۰۰۰ به ۳۳۰۰۰ nm/Pas برای کاغذ پایه کاهش یافت. فیلم‌های NFC نفوذپذیری هوا را تا بیش از ۱۰ nm/Pas کاهش می‌دهند. فضاهای خالی کاغذ با NFC پر می‌شود که به عنوان مانعی برای نفوذپذیری هوا عمل می‌کند (۱۰).

۴,۲,۴. ممانعت نسبت به اکسیژن

محققین در ارتباط با تأثیر فیلم‌ها، ورقه‌ها و پوشش‌های NFC روی کاهش سرعت انتقال اکسیژن (OTR) یا نفوذپذیری به اکسیژن گزارش داده‌اند. سیورود و استنیوس (۲۰۰۹) مقادیر OTR ۱۷-۱۸ ml/m^2 day را برای فیلم‌های NFC تیمار شده بطور مکانیکی با وزن پایه ۱۷-۲۹ gr/m^2 در رطوبت نسبی ۰ درصد روی سطح رویی و ۵۰٪ روی سطح زیرین اندازه‌گیری کرده‌اند (۲۲).

۵,۲,۴. ممانعت به روغن

مقاومت به روغن برای برخی از مواد بسته‌بندی مواد غذایی اجباری می‌باشد. آولین و همکاران (۲۰۱۰)، روغن کرچک و ترپنتین را به درون ورقه های پوشش داده شده با NFC و بدون پوشش نفوذ دادند. نویسندگان دریافتند که ورقه‌های پوشش داده شده با NFC در مقایسه با نمونه های فاقد پوشش دارای ویژگی مقاومت به روغن بیشتری بودند. حتی ورقه با مقدار پوشش بیشتر دارای مقاومت بیشتر در برابر روغن و نفوذپذیری هوای کمتری بود (۲۳). از آنجا که فضاهای خالی و منافذ توسط NFC بخوبی مسدود می‌شود، ظرفیت انتقال روغن کاغذ کاهش می‌یابد.

۵. نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر مواد سازگار با محیط زیست که دارای کاربردهای مختلفی می‌باشند، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. سلولز فراوان‌ترین پلیمر زیستی در سطح کره زمین است که از منابع لیگنوسلولزی مختلف استخراج می‌شود. یکی از مهمترین مشتقات سلولزی، سلولز نانوفیبریله‌شده است. امروزه محققین تحقیقات زیادی در ارتباط با استفاده از نانوالیاف سلولزی در کاغذسازی انجام داده‌اند. نانوالیاف سلولزی موجب افزایش دانسیته و ویژگی‌های مقاومتی کاغذ می‌شوند. اما ماتی و تخلخل کاغذ کاهش می‌یابد. این تغییرات با کنترل مقدار و درجه فیبریله‌شدن نانوالیاف سلولزی تنظیم می‌شود. نانوالیاف سلولزی همچنین به بازیابی ویژگی‌های مقاومتی کاغذ که به واسطه استفاده از انواع مختلف پرکننده کاهش یافته، کمک می‌کنند.

۶. منابع

1. Lucintel, B., 2020. Global Nanomaterials Opportunity and Emerging Trends, http://www. lucintel. com/ com/ lucintelbrief/globalnanomaterialsopportunity-final. pdf. (accessed on 15 January 2020).
2. Nechyporchuk, O., Mohamed Naceur Belgacem, M., Bras, J., 2016. Production of cellulose nanofibrils: a review of recent advances, Industrial Crops and Products, 93, 2-25.
3. Kim, J.H., Shim, B.S., Kim, H.S., Lee, Y.J., Min, S.K., Jang, D., Abas, Z., Kim, J., 2015. *Review of nanocellulose for sustainable future materials*, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2, 197-213.
4. Brinchi, L., Cotana, F., Fortunati, E., Kenny, J.M., 2013. Production of nanocrystalline cellulose from lignocellulosic biomass: technology and applications, Carbohydrate Polymers, 94, 154-169.
5. Moon, R.J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., Youngblood, J., 2011. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites, Chemical Society Reviews, 40, 3941-3994.
6. Titton Dias, O.A., Konar, S., Leao, A.L., Yang, W., Tjong, J., Sain, M., 2020. Current state of applications of nanocellulose in flexible energy and electronic devices, Frontiers in Chemistry, 8, 420.
7. TAPPI. Proposed New TAPPI Standard: Standard terms and their definition for cellulose nanomaterial. Draft for review, WI 3021.
8. Siró, I., Plackett, D., 2010. Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: a review, Cellulose, 17, 459-494.
9. Habibi, Y., 2014. Key advances in the chemical modification of nanocelluloses, Chemical Society Reviews, 43, 1519-1542.
10. Brodin, FW., Gregersen, O.W., Syverud, K., 2014. Cellulose nanofibrils: challenges and possibilities as a paper additive or coating material—a review, Nordic Pulp and Paper Research Journal29, 156–166.
11. Eriksen, O., Syverud, K., Gregersen, O., 2008. The use of microfibrillated cellulose produced from kraft pulp as strength enhancer in TMP paper, Nordic Pulp & Paper Research Journal, 23, 299-304.
12. Kalia, S., Boufi, S., Celli, A., Kango, S., 2014. Nanofibrillated cellulose: surface modification and potential applications, Colloid and Polymer Science, 292, 5-31.
13. Taipale, T., Österberg, M., Nykänen, A., Ruokolainen, J., Laine, J., 2010. Effect of microfibrillated cellulose and fines on the drainage of kraft pulp suspension and paper strength, Cellulose, 17, 1005-1020.
14. Lavoine, N., Bras, J., Desloges, I., 2014a. Mechanical and barrier properties of cardboard and 3D packaging coated with microfibrillated cellulose, Journal of applied polymer science, 131, 40106.
15. Hassan, M.L., Bras, J., Mauret, E., Fadel, S.M., Hassan, E.A., El-Wakil, N.A., 2015. Palm rachis microfibrillated cellulose and oxidized-microfibrillated cellulose for improving paper sheets properties of unbeaten softwood and bagasse pulps, Industrial Crops and Products, 64, 9-15.
16. Mashkour, M., Afra, E., Resalati, H., Mashkour, M., 2015. Moderate surface acetylation of nanofibrillated cellulose for the improvement of paper strength and barrier properties, RSC Advances, 5, 60179– 60187.
17. Missoum, K., Martoïa, F., Belgacem, M.N., Bras, J., 2013. Effect of chemically modified nanofibrillated cellulose addition on the properties of fiber -based materials, Industrials Crops and Products, 48, 98–105.
18. Boufi, S., Gonzalez, I., Delgado-Aguilar, M., Tarres, Q., Pelach, M.A., Mutje, P., 2016. Nanofibrillated cellulose as an additive in papermaking process: a review, Carbohydrate Polymer, 154, 151–166.
19. Lavoine, N., Desloges, I., Khelifi, B., Bras, J., 2014b. Impact of different coating processes of MFC on barrier and mechanical properties, Journal Material Sciences, 49, 2879–2893.
20. Mashkour, M., Afra, E., Resalati, H., 2019. Direct esterification of reinforced papers by immersion method and evaluation of their properties, Wood Science and Technology, 53, 1035-1050.
21. Gonzalez, I., Vilaseca, F., Alcala, M., Pelach, M.A., Boufi, S., Mutje, P., 2013. Effect of the combination of biobeating and NFC on the physico-mechanical properties of paper, Cellulose, 20, 1425–1435.
22. Syverud, K., Stenius, P., 2009. Strength and barrier properties of MFC films, Cellulose, 16, 75–85.
23. Aulin, C., Gallstedt, M., Lindstrom, T., 2010. Oxygen and oil barrier properties of microfibrillated cellulose films and coatings, Cellulose, 17, 559–574.