Archive of SID

بهبود مقاومت لایه تر و خشک کاغذ حاصل از خمیرکاغذ شیمیایی- مکانیکی با استفاده از پلی‌آمید اپی‌کلروهیدرین و نانوالیاف سلولزی در مقایسه با خمیرکاغذ کرافت الیاف بلند وارداتی

سیّده فائقه موسوی[۱]
پژمان رضایتی چرانی[۲*]
محمدهادی مرادیان[۲]
قاسم اسدپور ابوتورابی[۳]

[۱] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، ایران

[۲] استادیار گروه مهندسی صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، ایران

[۳] استادیار گروه مهندسی صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه منابع طبیعی و کشاورزی ساری، ایران

مسئول مکاتبات:
rezayati@bkatu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹

چکیده

مقاومت کششی لایه‌تر کاغذ هنگام تولید در تناوب پارگی و قابلیت حرکت آن در ماشین کاغذ تأثیر دارد. در این پژوهش، امکان استفاده از نانوالیاف سلولزی (NFC) و پلی‌آمیداپی‌کلروهیدرین (PAE) در مقایسه با خمیرکاغذ کرافت الیاف بلند وارداتی (LF) برای بهبود خواص استحکامی لایه‌تر و ورق خشک کاغذهای دست‌ساز حاصل از خمیرکاغذ شیمیایی- مکانیکی (CMP) مورد بررسی قرار گرفت. خواص استحکامی لایه‌تر کاغذهای هرگز خشک نشده با ۳۵ درصد خشکی و کاغذهای هوا - خشک، از طریق آماده‌سازی سوسپانسیون خمیرکاغذ با افزودن ۰ و ۲۰ درصد کربنات کلسیم رسوبی، NFC (در ۲ سطح ۲ و ۳ درصد)، PAE (در ۳ سطح ۰/۵، ۰/۷ و ۱ درصد) و ۲۰ درصد LF مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین اثر تیمارهای حرارتی بر لایه‌تر کاغذهای حاوی ۳ درصد NFC و ۰/۷ درصد PAE در دماهای ۱۰۰ و ۱۳۰ درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزودن NFC همراه PAE باعث بهبود در ویژگی‌های استحکامی لایه‌تر و ورق خشک کاغذها می‌شود. در مورد لایه‌تر کاغذهای با ۳۵ درصد خشکی، تیمار مربوط به افزودن ۳ درصد NFC همراه ۱ درصد PAE انرژی جذب کششی (TEA) را ۸۵ درصد افزایش داد اگرچه این مقدار در حد تأثیر استفاده از ۲۰ درصد LF نبود (۱۱۷ درصد). در مورد کاغذهای هوا خشک، تیمار مربوط به افزودن ۳ درصد NFC و ۱ درصد PAE انرژی جذب کششی و مقاومت کششی کاغذ را در مقایسه با تیمار ۲۰ درصد LF به ترتیب ۳۵ درصد و ۱۸ درصد بیشتر بهبود داد. در اثر تیمارهای حرارتی کاغذهای حاصل از خمیرکاغذ حاوی ۳ درصد NFC و ۰/۷ درصد PAE، مقاومت کششی کاغذهای خشک شده در دماهای ۱۰۰ و ۱۳۰ درجه سلسیوس نسبت به کاغذ بدون تیمار حرارتی به ترتیب ۲۲ و ۲۲/۵ درصد افزایش یافت. به‌طورکلی با توجه به افزایش عملکرد مثبت استفاده از NFC به همراه PAE با اعمال تیمارهای حرارتی، استفاده توأم از ۳ درصد NFC و ۱ درصد PAE با خمیرکاغذCMP، قابلیت جایگزینی با ۱۵ درصد LF برای بهبود مقاومت لایه‌تر و ورق خشک کاغذ حاصل از خمیرکاغذ شیمیایی- مکانیکی را می‌تواند داشته باشد.

واژگان کلیدی: انرژی جذب کششی (TEA)، استحکام لایه‌تر و خشک کاغذ، خمیرکاغذ شیمیایی- مکانیکی (CMP)، پلی‌آمیداپی‌کلروهیدرین (PAE)، نانوالیاف سلولزی (NFC)

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

در فرآیندهای تولید کاغذ، تناوب پارگی‌های ورقه تر معمولاً وابسته به‌سرعت ماشین کاغذ و استحکام کششی ورق تر کاغذ است[۱]. استحکام کششی ورق تر کاغذ با استفاده از انواع افزودنی‌های مقاومت‌تر از خانواده بسپارهای طبیعی، مشتقات سلولز و بسپارهای سنتزی مثل اوره فرمالدهید، ملامین فرمالدهید، پلی‌آمین وآمید-اپی‌کلروهیدرین[1](PAE)، نشاسته دی آلدهید[2](DS) و پلی اتیلن‌ایمن[3](PEI) فراهم می‌شود[۲] که عموماً به سوسپانسیون خمیرکاغذ اضافه می‌شوند تا خواص استحکامی کاغذ تر را بهبود دهند. استفاده از افزودنی‌های مذکور معمولاً می‌تواند سبب بهبود محدود خواص استحکامی کاغذ خشک نیز شود[۳]. اما اگر مقاومت‌تر خیلی زیاد شود، بعدها مشکلات جدی در بازیافت آن بروز خواهد نمود که برای اجتناب از بروز آن‌ها مطالعه فرایند اصلاح مقاومت‌تر کاغذ ضروری است. معمولاً مقاومت‌تر کاغذ دو نوع متفاوت است. نوع اول مربوط می‌شود به مقاومت به کشش نوار کاغذ تر هرگز خشک نشده در ماشین کاغذ وقتی تحت کشش قرار می‌گیرد و نوع دوم مربوط می‌شود به توانایی محصول کاغذی برای حفظ مقاومت در صورت خیس شدن کامل با آب. در این تحقیق نوع اول مدنظر است. در حالت معمول، مولکول‌های آب فضای بین الیاف در بافت کاغذ را افزایش می‌دهند، به‌طوری‌که استحکام کاغذ ممکن است حداکثر به ۱۰ درصد استحکام کاغذ خشک برسد که ناشی از اصطکاک بین الیاف سلولزی با یکدیگر است[۴]. بهبود استحکام تر در کاغذ فقط با استفاده از رزین‌های ویژه مقاومت تر ایجاد می‌شود که می‌توانند به سوسپانسیون خمیرکاغذ اضافه شوند و یا روی سطح کاغذ آهاردهی و یا پوشش‌دهی شوند. این یعنی اینکه طیف وسیعی از رزین‌های مقاومت تر با شرایط کاتیونی، آنیونی و خنثی می‌توانند استفاده شوند. برای بهبود استحکام تر کاغذ لازم است با افزایش تعداد پیوندها یا تقویت و محافظت از پیوندهای موجود یا تشکیل پیوندهای مقاوم در برابر آب یا احاطه الیاف با تشکیل شبکه‌ای از مواد، اقدام نمود[۲, ۵, ۶]. رزین‌های مقاومت تر با دو مکانیسم الف- ایجاد شبکه‌ای به‌هم‌پیوسته در داخل و اطراف الیاف که از واکشیدگی و جذب آب توسط الیاف جلوگیری و پیوندهای هیدروژنی موجود بین الیاف را حفظ می‌کنند و ب- تشکیل پیوندهای کووالانسی جدید و مقاوم به آب بین الیاف که منجر به تشکیل شبکه الیاف می‌شوند به تقویت مقاومت کاغذ در حالت تر کمک می‌کنند[۷] که سرعت واکنش این رزین‌ها وابسته به دما، اسیدیته و مدت‌زمان واکنش است[۸]. اما برای افزایش مقاومت ورق تر کاغذ که هنوز خشک نشده، نمی‌توان از همه رزین‌های متداول جهت افزودن به سوسپانسیون خمیرکاغذ استفاده نمود. زیرا این رزین‌ها ابتدا لازم است در بافت کاغذ تحت گرما بس پاشیده شوند تا اتصالات مقاوم به نفوذ آب ایجاد کنند. به همین دلیل فقط برخی از رزین‌های مقاومت تر این قابلیت را دارند که بدون خشک شدن تحت تیمار گرمایی موجب بهبود مقاومت لایه تر کاغذ هرگز خشک نشده می‌شوند. از بین رزین‌های متداول، به دلیل اینکه اوره فرمالدهید، ملامین فرمالدهید در pH اسیدی حدود ۳/۸ تا ۵ و با غلظت زیاد قابل‌استفاده هستند، در سوسپانسیون خمیرکاغذ رقیق در ماشین‌های کاغذسازی مدرن امروزی به دلیل استفاده از پرکننده قابل‌حل در محیط اسیدی قابل توصیه نمی‌باشند اما PAE به دلیل اینکه در pH حدود ۵ تا ۹ در سوسپانسیون رقیق خمیرکاغذ قابل‌استفاده است بدون هیچ مشکلی قابل توصیه است[۹]. بر همین اساس یکی از مهم‌ترین رزین‌هایی عامل افزایش مقاومت تر در ماشین‌های کاغذسازی مدرن، PAE است که می‌تواند در شرایط قلیایی و خنثی و حتی در آب سرد استفاده شود بدون اینکه موجب کاهش انعطاف‌پذیری کاغذ تولیدی شود[۲, ۹-۱۳]. به‌منظور ارائه مقاومت تر، رزین PAE باید در سطح الیاف کاغذ حفظ شود. مکانیسم اصلی این ماندگاری جاذبه یونی بین گروه‌های کربوکسیل آنیونی در سطح الیاف و گروه‌های کاتیونی آزتیدینیوم از رزین PAE است. پس از تثبیت رزین PAE روی الیاف و تحکیم الیاف درون شبکه تر از طریق مکانیزم اتصال عرضی و پیوندهای دوگانه با سطح الیاف استحکامی را فراهم می‌کند که مولکول‌های آب قادر به نفوذ بین این

[1] Polyamino Polyamide Epichlorohydrin
[2] Dialdehyde Starch
[3] Polyethyleneimine

www.SID.ir

Archive of SID

پیوندها را نخواهند داشت، در نتیجه استحکام‌تر در بخش توری و پرس ماشین کاغذ ایجاد می‌شود که با افزایش درصد خشکی افزایش می‌یابد [۹, ۱۴-۱۶]. اگرچه این رزین به‌عنوان عامل مقاومت تر دارای ویژگی‌های جذابی برای کاغذسازی است، اما استفاده از آن در مقادیر مصرف زیاد هنگام کاغذسازی، دارای چالش‌هایی هنگام خمیرسازی مجدد کاغذهای تولیدی است که خود موجب تحقیقات گسترده‌ای شده است که در آن پیشنهاد شده است از افزودنی‌های مواد شیمیایی مانند هیپوکلریت سدیم و پر سولفات‌ها در pH حدود ۱۰ و دمای حدود ۷۰ درجه سلسیوس[۱۷]، کلریت سدیم همراه هیدروکسید سدیم و پرسولفات سدیم[۱۸] و هیدروکسید سدیم، اسیدسولفوریک، پرسولفات پتاسیم و پراکسید هیدروژن [۱۹] در خمیرسازی مجدد این نوع کاغذها استفاده شود. نظر به اهمیت مصرف PAE در کاغذسازی برای بهبود مقاومت تر کاغذ هرگز خشک نشده و چالش‌های استفاده مقادیر بیشتر آن در خمیرسازی مجدد، در این تحقیق تأثیر استفاده از آن همراه با نانوالیاف سلولزی[1](NFC) به‌عنوان یک افزودنی پرطرفدار در تحقیقات کاغذسازی [۲۰-۲۲] مورد بررسی قرارگرفته است تا بتوان از طریق استفاده توأم PAE با NFC، ضمن کاهش مصرفPAE به مقاومت تر لازم رسید. دهه‌های اخیر NFC به‌عنوان یکی از جذاب‌ترین مواد نانو ساختار در زمینه‌های مختلف از جمله علوم کاغذسازی مورد توجه محققان قرارگرفته است که از آن برای بهبود ویژگی‌های کاغذ باهدف کاهش هزینه‌ها و دستیابی به خواص مناسب‌تر استفاده می‌شود. مثلاً، Hii و همکاران در سال (۲۰۱۲) NFC را به مقدار ۲/۵ و ۵ درصد با خمیرکاغذ ترمومکانیکی[2](TMP) رنگبری شده و کربنات کلسیم به‌عنوان پر کننده مخلوط کردند که در خمیرکاغذ حاصل سرعت زهکشی کاهش ولی خواص استحکامی آن بهبود یافت [۲۳]. همچنین، گزارش‌شده است که استفاده از NFC در ساخت کاغذ دست‌ساز، مقاومت کششی کاغذ دست‌ساز تر (رطوبت نسبی ۵۰ درصد) و خشک را افزایش می‌دهد، به‌طوری‌که می‌تواند جایگزینی برای پالایش بیشتر باشد[۲۴-۲۶]. در مورد استفاده از NFC در کاغذسازی یکی از چالش‌هایی که گزارش شده است افزایش زمان آبگیری است[۲۷]. گزارش شده است که استفاده از NFC به مقدار ۱ درصد و پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی به مقدار ۰/۱ درصد در خمیرکاغذ باگاس برای کاغذسازی در زمان آبگیری اثر منفی نخواهد داشت، ولی مقاومت به کشش به مقدار قابل توجهی بهبود می‌یابد[۲۸]. از این‌رو تولید به‌صرفه کاغذ با روش‌های نوین در صنایع کاغذ کشور برای کاهش یا حذف استفاده از خمیرکاغذ الیاف بلند وارداتی (LF[3]) از کشورهای مختلف امری ضروری است. خمیرکاغذ شیمیایی-مکانیکی(CMP) یکی از تولیدات صنایع خمیر و کاغذ مازندران محسوب می‌شود که با خواص استحکامی و فیزیکی محدود، حسب نیاز ضمن اعمال رنگبری محدود با حفظ لیگنین تا درجه روشنی حدود ۷۰ درصد و افزودن پرکننده‌هایی مثل کربنات کلسیم برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی محصول نهایی برای تأمین برخی از نیازهای محصولات کاغذی مصرفی کشور ایران به‌ویژه کاغذ روزنامه استفاده می‌شود. در واحدهای تولیدی محصولات کاغذی که از خمیرکاغذهای باکیفیت ضعیف استفاده می‌کنند معمولاً برای بهبود مقاومت ورق کاغذ تر در ماشین کاغذ جهت کاهش تعداد پارگی‌های متناوب کاغذ در صورت نیاز به افزایش سرعت ماشین کاغذ که سبب توقف ماشین کاغذ می‌شود و از یک‌سو و از سویی دیگر برای بهبود ویژگی‌های استحکامی محصول نهایی، معمولاً از LF به مقدار ۱۵ تا ۲۰ درصد در سوسپانسیون خمیرکاغذ نهایی استفاده می‌شود که با توجه به نرخ ارز هزینه‌های سنگین در بر دارد. نظر به اینکه، تنها یک تحقیق در مورد استفاده از NFC همراه با PAE به‌طور هم‌زمان بر الیاف خمیرکاغذ برای افزایش استحکام تر گزارش شده است[۲۹] که به بررسی عملکرد رفتاری PAE و NFC هنگام استفاده توأم در خمیرکاغذ کرافت پرداخته است و در داخل کشور نیز هنوز گزارشی در مورد خمیرکاغذ CMP منتشر نشده است. بنابراین در این پژوهش، بررسی امکان بهبود استحکام‌تر ورق کاغذ حین ساخت با استفاده از PAE همراه NFC مشابه استفاده از LF پرداخته شده است ضمن اینکه اثر دمای خشک کردن ورق کاغذ بر

[1] Nanofibrillated cellulose
[2] Thermo-mechanical pulp
[3] Imported long fiber pulp

www.SID.ir

Archive of SID

عملکرد این تیمارها در بهبود مقاومت کاغذ هنگام خشک کردن نیز ارزیابی شده است که می‌تواند روشی نوین برای بررسی رفتار تیمارها هنگام خشک‌کردن کاغذ باشد.

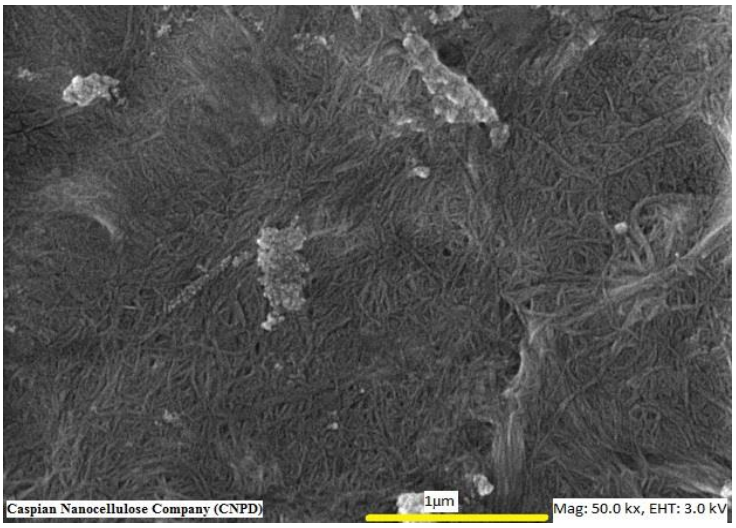
مواد و روش‌ها

مواد

در این تحقیق از خمیرکاغذ CMP صنعتی صنایع چوب و کاغذ مازندران با درجه روانی ۲۸۰ میلی‌لیتر (CSF)، بازده ۸۱ درصد و درجه روشنی ۷۰ درصد استفاده شد که قبل از مخلوط شدن این خمیرکاغذ با خمیرکاغذ برگشتی و خمیرکاغذ کرافت رنگبری نشده (LF) گونه نراد وارداتی از کشور روسیه (با ویژگی‌های جدول ۱) در مخزن مخلوط‌سازی نمونه برداشته شد. همچنین از LF نیز به‌صورت سوسپانسیون قبل از مخلوط شدن با CMP به‌صورت تصادفی نمونه‌برداری انجام گرفت. NFC از خمیرکاغذ سودا باگاس رنگبری شده تولیدی در کارخانه کاغذ پارس به روش مکانیکی با استفاده از فرآیند همگن‌ساز با توزیع ابعاد ۳۸-۴۰ نانومتر توسط شرکت صنعتی توسعه بسپارش نانو سلولز کاسپین تهیه شد (شکل ۱). همچنین بسپار PAE از شرکت کلارینت آلمان خریداری شد.

جدول ۱. ویژگی‌های خمیرکاغذ کرافت رنگبری نشده الیاف بلند

درجه روانی (ml)	دور پالایشگر (rpm)	انرژی مصرفی (Wh)	گراماژ (g/m2)	شاخص مقاومت پارگی (mNm^2/g)	شاخص مقاومت کششی (Nm/g)
٤٩٠	٥٤٠٠	٢١٠	٦٢/٦	١٠/٩	٩٣/٩



شکل۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی نانوالیاف سلولزی حاصل از خمیر رنگبری شده سودا باگاس به روش مکانیکی تهیه‌شده توسط شرکت توسعه بسپارش نانو سلولز کاسپین

www.SID.ir

Archive of SID

روش‌ها

با توجه به این‌که در صنایع چوب و کاغذ مازندران از پرکننده کربنات کلسیم با ماندگاری ۲۰ درصد در کاغذ نهایی استفاده می‌شود، تیمارهای سوسپانسیون خمیرکاغذ با این مقدار پرکننده انجام شد. طبق تیمارهای گروه اول اثر استفاده از LF، PAE و NFC بر درجه روانی خمیرکاغذ CMP بررسی شد. سپس با تیمارهای گروه دوم اثر افزودن درصدهای مختلف LF بر بهبود ویژگی‌های کششی تر کاغذ حاصل از خمیرکاغذ CMP بررسی شد. در ادامه تیمارهای گروه سوم به بررسی اثر استفاده از LF، PAE و NFC بر ویژگی‌های کششی تر کاغذ حاصل از خمیرکاغذ CMP اقدام شد. در ادامه تیمارهای منتخب از گروه سوم؛ به‌عنوان تیمارهای گروه چهارم برای بررسی ویژگی‌های استحکامی خشک کاغذ استفاده شد. در نهایت اثر تیمار منتخب برای بررسی اثر حرارت بر بهبود ویژگی‌های استحکامی کاغذ بررسی شد. برای ساخت کاغذهای ترکیبی در این تحقیق، ابتدا سوسپانسیون خمیرکاغذ دارای پرکننده کربنات کلسیم با ۰/۳ درصد خشکی، بدون ماده کمک ماندگاری، با دستگاه همزن با ۲۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۶۰ ثانیه هم زده شد. سپس سوسپانسیون NFC با همان درصد خشکی (۰/۳ درصد) که از قبل آماده‌شده بود، به مقدار لازم به سوسپانسیون خمیرکاغذ اضافه شد و به مدت ۶۰ ثانیه دیگر سوسپانسیون حاصل (با همان دور) هم زده شد. در ادامه PAE با غلظت ۱۲ درصد به سوسپانسیون اضافه و به مدت ۶۰ ثانیه دیگر با همان دور همزده شد و سپس مخلوط حاصل در داخل محفظه سیستم ساخت کاغذ دست‌ساز ریخته شد تا کاغذها طبق استاندارد TAPPI شماره T 205 sp-02 ساخته شوند. البته به علت نیاز به سنجش استحکام تر کاغذ و محدودیت حساسیت دستگاه سنجش مقاومت به کشش گراماژ کاغذها به‌جای روال متداول، $۱۲۰ gr/m^2$ انتخاب شد. توضیح اینکه کاغذهای تیمار افزودن ۲ درصد NFC به همراه ۱ درصد PAE به خمیرکاغذ شاهد (حاوی ۸۰ درصد خمیرکاغذ CMP و ۲۰ درصد کربنات کلسیم) به علت چسبندگی ورقه تر به توری دستگاه کاغذسازی آزمایشگاهی ساخته نشد و اندازه‌گیری استحکام در مورد آن انجام نشد. برای ساخت کاغذ با خشکی ۳۵ درصد، به‌جای ۲ مرحله پرس، فقط ۱ مرحله پرس اعمال شد (در این مرحله رطوبت کاغذ تر ۷۰ – ۶۵ درصد بود). شرایط تیمارها در جدول ۲ معرفی‌شده است. پس از خروج ورقه‌ها از پرس و متعادل‌سازی نمونه برای رسیدن به خشکی ۳۵ درصد، سنجش استحکام کششی انجام شد. توضیح اینکه به دلیل کم بودن مقاومت کششی ورق تر، پهنای نمونه‌های آزمون به جای ۱۵ میلی‌متر طبق استانداردهای آیین نامه TAPPI، ۲۵ میلی‌متر انتخاب شد و در نهایت بر اساس گراماژ و پهنای اعمال شده نتایج به‌صورت شاخص تبدیل شد. برای تهیه کاغذ با اعمال تیمار حرارتی- کاغذ مرطوب با خشکی ۳۵ درصد طی یک مرحله پرس ساخته شد و درون آون در دماهای ۱۰۰ و ۱۳۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۰ دقیقه قرار داده شد تا کاملاً خشک شود. خصوصیات خمیر و کاغذ شامل درجه روانی خمیرکاغذ، شاخص‌های مقاومت به پارگی، مقاومت به ترکیدگی و انرژی جذب کششی طبق استانداردهای آیین‌نامه TAPPI تعیین و مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور مقایسه میانگین‌های مقادیر خواص فیزیکی و مکانیکی کاغذها از آزمون تجزیه واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن با استفاده از نرم‌افزار SPSS[1]استفاده شد و با سطح اعتماد ۹۵ درصد مورد ارزیابی قرار گرفت و مقادیر معرفی‌شده به‌عنوان خطا بر اساس انحراف معیار[2]ترسیم شده است.

[1]Statistical package for social science
[2]Standard Deviation

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲. شرایط تیمارها در ارزیابی اثر درجه روانی، درصد LF، استفاده از PAE و NFC در مقایسه با L بر استحکام لایه تر و ورق خشک کاغذ

ردیف	گروه تیمار*	CMP(٪)	$CaCO_3$(٪)	PAE(٪)	NFC(٪)	LF(٪)
۱	۱،۲ و ۴	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
۲	۱،۲،۳ و ۴	۸۰	۲۰	۰	۰	۰
۳	۲	۷۰	۲۰	۰	۰	۱۰
۴	۲	۶۵	۲۰	۰	۰	۱۵
۵	۱،۲،۳ و ۴	۶۰	۲۰	۰	۰	۲۰
۶	۳ و ۴	۷۷/۵	۲۰	۰/۵	۲	۰
۷	۳	۷۷/۳	۲۰	۰/۷	۲	۰
۸	۱	۷۷	۲۰	۰	۳	۰
۹	۳ و ۱ و ۴	۷۶/۵	۲۰	۰/۵	۳	۰
۱۰	۳ و ۱ و ۴	۷۶/۳	۲۰	۰/۷	۳	۰
۱۱	۳ و ۱ و ۴	۷۶	۲۰	۱	۳	۰
۱۲	۱	۷۹	۲۰	۱	۰	۰

*: ۱: درجه روانی، ۲: اثر درصد LF، ۳: اثر ترکیبی PAE با NFC در مقایسه با LF بر استحکام کاغذ تر، ۴: اثر ترکیبی PAE با NFC در مقایسه با LF بر استحکام کاغذ خشک

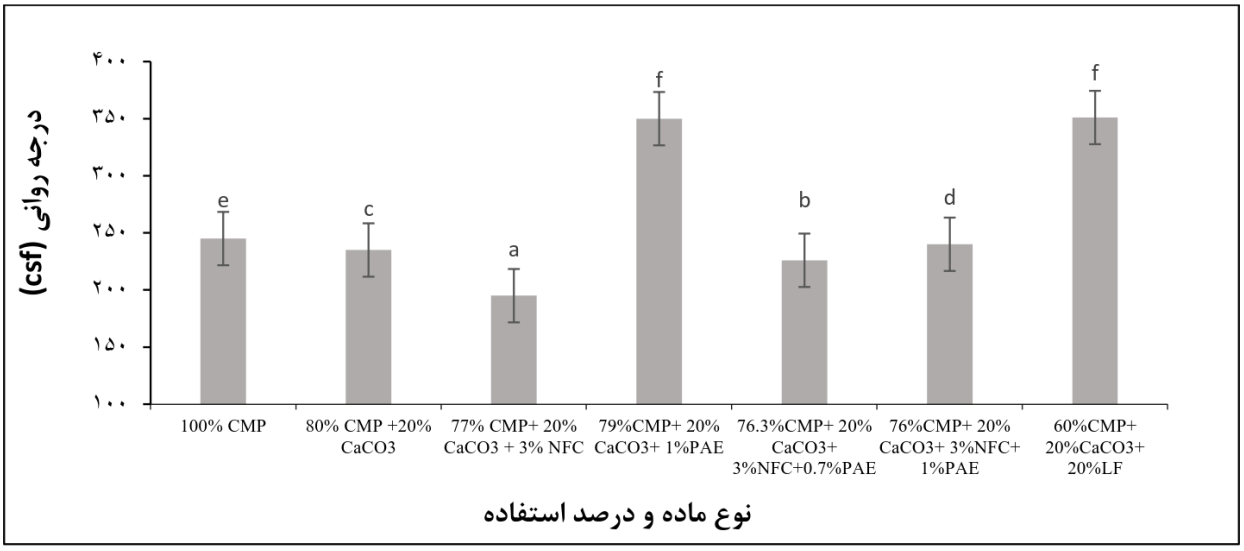
نتایج و بحث

افزودن NFC و PAE بر درجه روانی

بدیهی است سیستم اندازه‌گیری درجه روانی بیانگر سرعت زهکشی آب از دوغاب خمیرکاغذ در قسمت شکل‌گیری فرآیند تولید است که با افزودن ذرات ریز کربنات کلسیم به خمیرکاغذ CMP درجه روانی کم می‌شود که دلالت بر کاهش سرعت زهکشی است. PAE با قابلیت چسباندن ذرات به همدیگر سبب ایجاد کلوخه شده[۳۰] در نتیجه درجه روانی افزایش و زهکشی تسهیل می‌شود. افزودن NFC به سوسپانسیون خمیرکاغذ نیز مشابه ذرات ریز کربنات کلسیم در حالت بدون افزودن کمک نگه‌دارنده درجه روانی را کاهش می‌دهند[۲۷] در نتیجه سرعت زهکشی را کمتر می‌کند (شکل ۲). این نتایج نشان می‌دهد اگرچه افزودن ۱ درصد PAE سبب افزایش درجه روانی معادل استفاده از ۲۰ درصد LF می‌شود ولی استفاده توأم از PAE و NFC سبب رسیدن به درجه روانی حدود نمونه سوسپانسیون ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ CMP می‌شود. تصور می‌شود PAE با جذب NFC به‌صورت یک کمک نگه‌دارنده[۳۱] در سوسپانسیون خمیرکاغذ عمل نموده و موجب افزایش درجه روانی شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۲. استفاده از (CMP، NFC، PAE) بر درجه روانی خمیرکاغذ LF و خمیرکاغذ الیاف بلند

انرژی جذب انرژی کششی لایه تر کاغذهای‌تر هرگز خشک نشده

معمولاً شاخص مقاومت کششی لایه تر کاغذ هنگام تولید به‌منظور جلوگیری از پارگی نوارکاغذ در مناطق باز[1] ماشین کاغذ استفاده می‌شود که به علت اینکه کاغذ بدون حامل انتقال می‌یابد تحت کشیدگی[2] قرار می‌گیرد. در صورتی‌که میزان کشیدگی به بیش از حد قابل تحمل برسد نوار کاغذ پاره می‌شود[۳۲]. با توجه به اینکه کشیدگی در اثر نیروی کششی وارده به نوار کاغذ به وجود می‌آید، برای بررسی مقاومت به پارگی نوار کاغذ حین ساخت معمولاً به ارزیابی انرژی جذب کششی(TEA) به‌عنوان معیاری حاصل از ترکیب دو ویژگی مقاومت به کشش و میزان کشیدگی نوار کاغذ تر پرداخته می‌شود

اثر افزودن LF

معمولاً شاخص مقاومت کششی کاغذ تر با افزایش درصد LF روند افزایشی پیدا می‌کند[۳۳]. به‌طور کلی LF به علت طول زیاد و افزایش ضریب درهم رفتگی الیاف سبب افزایش پیوند شده و مقاومت‌ها را افزایش می‌دهد[۳۴]. بر طبق نتایج شکل ۳، TEA با افزودن کربنات کلسیم به خمیرکاغذ CMP کاهش می‌یابد اما با استفاده از LF، TEA افزایش‌یافته است که با افزودن۲۰ درصد LF به خمیرکاغذCMP دارای ۲۰ درصد کربنات کلسیم می‌توان به TEA معادل ۱۰۰ درصد خمیرکاغذ CMP رسید.

مقایسه افزودن NFC، PAE وLF

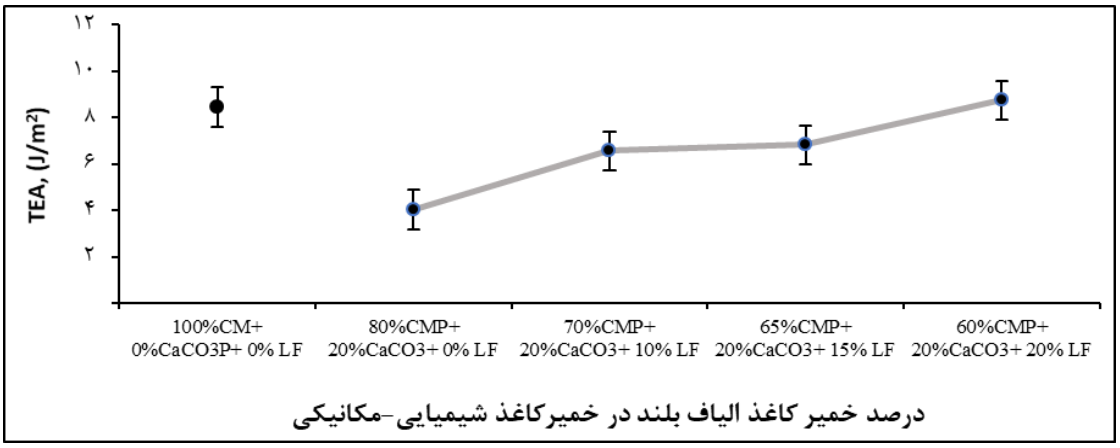
با افزودن NFC و PAE و LF به‌صورت جداگانه به خمیرکاغذ CMP دارای ۲۰ درصد پرکننده کربنات کلسیم TEA تر کاغذ هرگز خشک نشده با ۳۵ درصد خشکی افزایش یافت که این افزایش در مورداستفاده از LF بیشتر از بقیه بود. گروه‌بندی دانکن میانگین‌های تأثیر افزودن NFC و PAE و LF بر شاخص مقاومت کششی‌تر کاغذ دست‌ساز را در ۳ گروه مجزا قرار داده است. بر اساس نتایج شکل ۴ الف، با افزودن NFC به خمیرکاغذ CMP دارای ۲۰ درصد پرکننده کربنات کلسیم، TEA تر کاغذ افزایش معنی‌داری داشته است، این نتیجه توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است [۲۳, ۲۴]. در رابطه با علت افزایش محدود TEA در صورت افزودن NFC به نظر می‌رسد به دلیل عدم استفاده از کمک نگه‌دارنده بخشی از ذرات ریز خمیرکاغذ شامل نرمه‌ها و NFC از توری خارج‌شده است که در صورت ماندگاری می‌توانست سبب بهبود بیشتر این شاخص شود. در صورت افزودن ۱ درصد PAE به خمیرکاغذCMP دارای ۲۰ درصد پرکننده کربنات کلسیم، TEA تر کاغذ افزایش معنی‌داری نداشت.

[1] Open draw
[2] Elongation

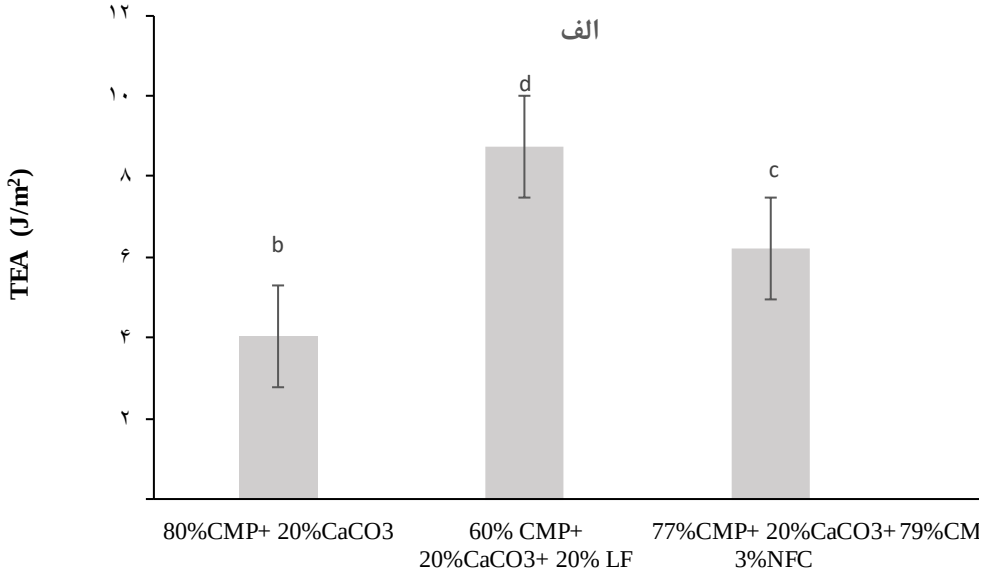
www.SID.ir

Archive of SID

درحالی‌که انتظار می‌رفت این مقدار بیش از مقدار به‌دست‌آمده باشد که محققین دیگر گزارش داده‌اند [۳۵, ۳۶]. این تناقض می‌تواند ناشی از اختلاف ترتیب افزودن PAE و NFC به سوسپانسیون خمیرکاغذ باشد. توضیح اینکه، استفاده از ۱ درصد PAE بدون NFC سبب بروز چسبندگی به توری ساخت کاغذ شد به‌طوری‌که جداسازی ورق‌تر کاغذ از توری با مشکلات جدی همراه بود که به نظر می‌رسد موجب اثر منفی در TEA کاغذ شده است. بر اساس این شرایط بهتر است در صورت استفاده از PAE برای بهبود TEA کاغذ، از مقادیر کمتر PAE استفاده شود تا مشکل چسبندگی بروز نکند و یا از یک ماده کمکی جانبی مثل NFC [۲۹] و یا کربوکسی متیل سلولز (CMC) [۱۵, ۳۷] استفاده شود.

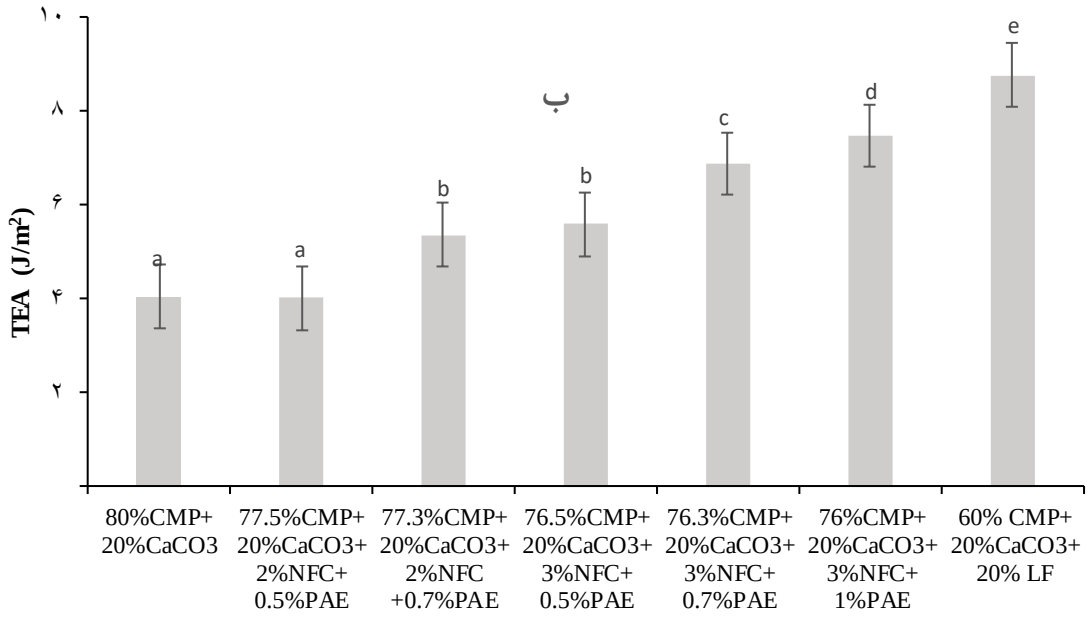


شکل۳. درصدهای مختلف اختلاط خمیرکاغذ الیاف بلند (LF) با خمیرکاغذ CMP بر شاخص جذب انرژی کششی ورقه‌های کاغذ تر هرگز خشک نشده با ۳۵ درصد خشکی.



www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴. افزودن NFC و PAE و خمیرکاغذ الیاف بلند (LF) به‌تنهایی (الف) و NFC و PAE همراه هم (ب) در خمیرکاغذ CMP بر TEA کاغذ تر هرگز خشک نشده.

مقایسه افزودن NFC به همراه PAE نسبت به LF

طبق شکل ۴ب با افزودن NFC همراه PAE به خمیرکاغذ CMP دارای ۲۰ درصد پرکننده کربنات کلسیم، TEA تر کاغذهای هرگز خشک نشده با خشکی ۳۵ درصد حداکثر تا ۸۵ درصد افزایش یافت. گروه‌بندی دانکن میانگین‌های تأثیر افزودن NFC همراه PAE بر TEA تر کاغذها را در ۵ گروه مجزا قرار داده است. بر اساس این نتایج اثرات متقابل استفاده توأم از NFC و PAE بر TEA مثبت بوده است به‌طوری‌که استفاده توأم از NFC و PAE موجب افزایش TEA شده است، اگرچه هنوز به مقدار استفاده از ۲۰ درصد LF (۱۱۷ درصد) نرسیده است ولی توانسته است به آن نزدیک شود اگرچه این مقدار، بیشتر از مقدار حاصل از افزودن ۱۵ درصد LF (۶۹ درصد) طبق شکل ۲ بود. در واقع بهترین تیمار در مورد TEA لایه تر کاغذ با PAE و NFC در مقایسه با ۲۰ درصد LF به میزان حدود ۳۷ درصد کمتر بود. برای بیان روشن‌تر، اقدام به ارزیابی شاخص مقاومت کششی تر کاغذ طبق تیمارهای ردیف ۵ و ۱۱ جدول ۲ شد که نتایج نشان داد با استفاده از ۱ درصد PAE و ۳درصد NFC می‌توان معادل استفاده از ۲۰ درصد LF به مقادیر بیشتری از شاخص مقاومت کششی تر (۰/۹۹ در مقایسه با ۰/۹۳ نیوتن متر بر گرم) در کاغذ دست یافت. این نتایج نشان می‌دهد با توجه به بیشتر بودن شاخص مقاومت کششی لایه تر کاغذ با استفاده از NFC همراه PAE نسبت به استفاده از LF، علت کم بودن TEA در صورت استفاده از NFC همراه PAE نسبت به استفاده از LF، ناشی از کمتر بودن درصد کشیدگی[1] در صورت استفاده توأم از NFC و PAE نسبت به استفاده از LF بوده است. بر اساس نتایج، درصد کشیدگی مربوط به استفاده از ۲۰ درصد LF ۳۵ درصد بیشتر از شرایط استفاده توأم از ۳ درصد NFC و ۱ درصد PAE بود(۴,۷۸ در برابر ۳,۵۳). تصور می‌شود با توجه به اثرات متقابل مثبت استفاده از NFC همراه PAE بر TEA بتوان با افزایش مصرف این

[1] Elongation

www.SID.ir

Archive of SID

دو افزودنی و یا اصلاحاتی در روند استفاده از این دو افزودنی مثلاً افزودن ابتدا PAE به سوسپانسیون و بعد NFC به بهبود بیشتری در TEA تر کاغذ دست‌یافت[۲۹]. نتایج تائید می‌کند که افزودن NFC همراه PAE سبب بهبود در TEA تر کاغذ می‌شود که دلیل آن احتمالاً افزایش پیوندهای بین الیاف و تقویت پیوندهای موجود باشد به‌طوری‌که NFC از طریق سطح ویژه زیاد مشابه کربوکسی متیل سلولز موجب افزایش جذب PAE و درنهایت بهبود بیشتر مقاومت کششی تر کاغذ و در نهایت بهبود TEA تر کاغذ می‌شود[۱۵, ۳۷, ۳۸].

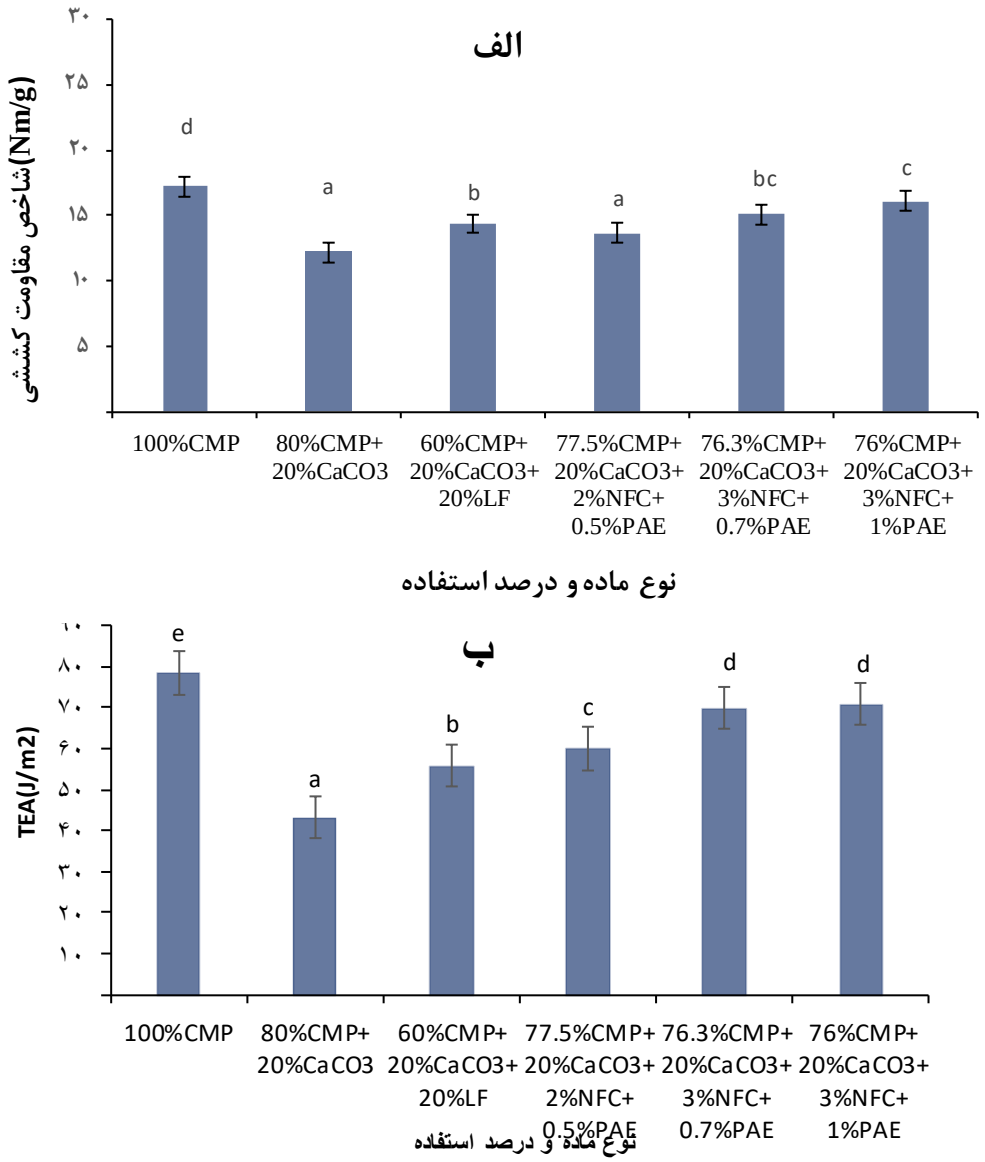
افزودن NFC به همراه PAE بر شاخص استحکام کاغذهای هوا خشک

استحکام کششی

PAE علاوه بر اینکه به‌عنوان رزین استحکام تر کاغذ محسوب می‌شود سبب بهبود استحکام خشک کاغذ نیز می‌باشد[۱۴, ۳۵]. تأثیر مثبت NFC نیز در تقویت مقاومت‌کششی کاغذ خشک قبلاً گزارش شده است[۲۵, ۲۹, ۳۸]. اثرات مثبت استفاده توأم PAE و NFC در سوسپانسیون خمیرکاغذ نیز قبلاً گزارش شده است[۱۵, ۲۶, ۲۹]. با توجه به شکل۵ الف استحکام کششی کاغذ حاصل ازCMP با افزودن ۲۰ درصد کربنات کلسیم کاهش می‌یابد که معمولاً با استفاده از LF بخشی از این افت جبران می‌شود. طبق این نتایج، افزودن NFC همراه PAE به خمیرکاغذ CMP دارای ۲۰ درصد پرکننده کربنات کلسیم نیز می‌تواند مقاومت کششی کاغذ خشک را افزایش دهد. گروه‌بندی آماری دانکن میانگین‌های تأثیر افزودن NFC به همراه PAE بر شاخص مقاومت کششی خشک کاغذ دست‌ساز را در ۴ گروه قرار داده است. بر طبق این نتایج تیمار حاوی ۳ درصد NFC به همراه ۱ درصد PAE، شاخص مقاومت کششی را ۱۲ درصد بیش از تیمار ۲۰ درصد LF در سوسپانسیون خمیرکاغذ CMP، بهبود داد است. معمولاً برای تولید کاغذ از کربنات کلسیم به‌عنوان پرکننده برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی کاغذ و کاهش هزینه‌های تولید استفاده می‌شود که منتهی به افت ویژگی‌های استحکامی تر و خشک کاغذ می‌شود. استفاده از۲۰ درصد کربنات کلسیم در بافت کاغذ منتهی به افت ۳۰ درصدی این شاخص در کاغذ خشک شده است (از ۱۷/۲۱ به ۱۲/۱۸)، که در صنایع کاغذسازی معمولاً برای جبران این افت از عوامل مقاومت خشک و تر مثل LF استفاده می‌کنند. طبق شکل ۵، می‌توان نتیجه گرفت استفاده از ۳ درصدNFC همراه ۱ درصد PAE قابلیت جایگزینی با۲۰ درصد LF در کاغذسازی به‌طور موفقیت‌آمیزی وجود دارد. بررسی نتایج TEA نیز دلالت بر بیشتر بودن اثر مثبت استفاده توأم NFC و PAE در مقایسه با LF به مقدار ۳۵ درصد (۶۴ درصد در مقابل ۲۹ درصد) در جبران بخشی از افت TEA ناشی از استفاده از کربنات کلسیم در سوسپانسیون خمیرکاغذ CMP دارد (شکل ۵ ب).

www.SID.ir

Archive of SID



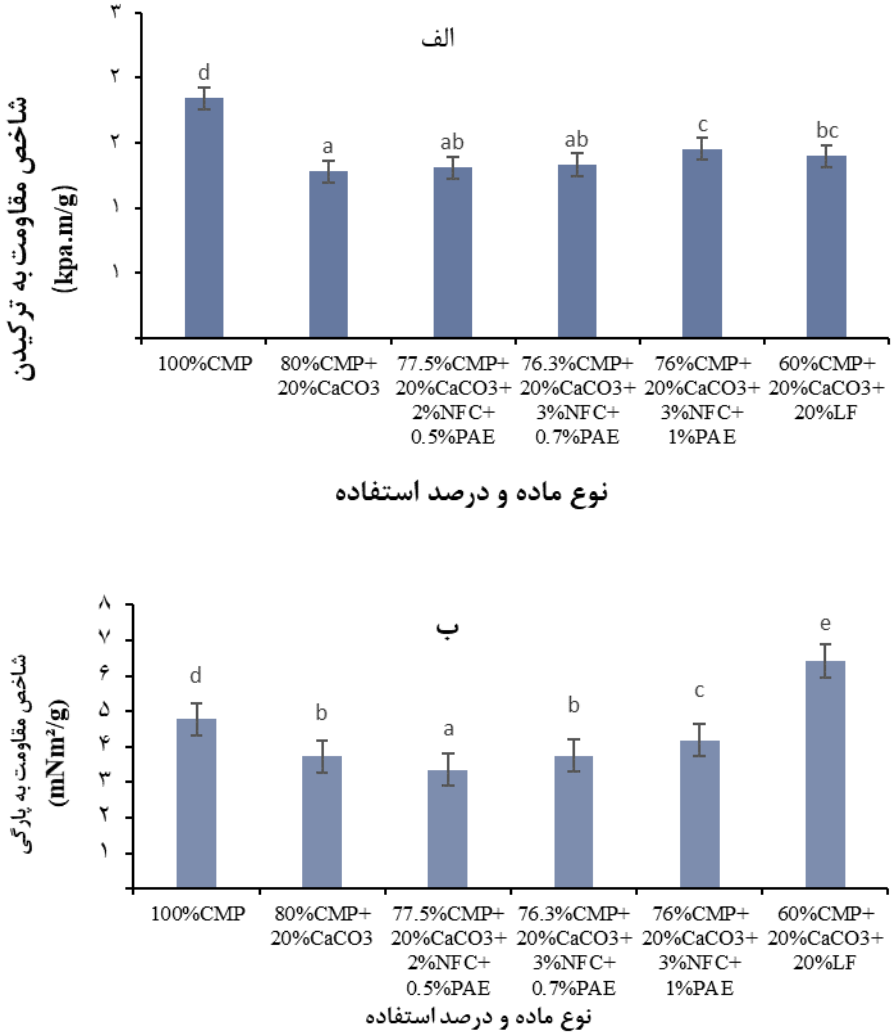
شکل۵. افزودن NFC و PAE به خمیرکاغذ CMP بر شاخص مقاومت کششی(الف) و TEA (ب) کاغذ دست‌ساز.

شاخص مقاومت به ترکیدن

مطابق شکل ۶ الف در صورت استفاده از ۲۰ درصد کربنات کلسیم، شاخص مقاومت به ترکیدگی حدود ۳۰ درصد افت نشان داده است که مشابه روند افت شاخص مقاومت کششی کاغذ است که با افزودن ۲۰ درصد LF بخشی از آن جبران می‌شود. افزودن NFC و PAE به دلایل مشابه که برای شاخص مقاومت کششی بیان شد، سبب بهبود مقاومت به ترکیدگی کاغذ می‌شود این موضوع توسط محققین دیگر نیز اثبات‌شده است[۳۵]. بر طبق این نتایج تیمار حاوی ۱ درصد PAE همراه ۳ درصد NFC نیز نسبت به کاغذ شاهد، شاخص مقاومت به ترکیدگی را به مقدار ۱۳ درصد افزایش داده است که ۴ درصد بیشتر از بهبود حاصل از شاخص مقاومت به ترکیدگی خمیرکاغذ حاوی ۲۰ درصد LF است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۶. افزودن NFC و PAE به خمیرکاغذ CMP بر شاخص مقاومت به پارگی (الف) و شاخص مقاومت به ترکیدن(ب) کاغذ خشک دست-ساز.

شاخص مقاومت به پارگی

معمولاً مقاومت به پارگی را به تعداد کل الیاف شرکت‌کننده در پارگی (گسیختگی)، استحکام تک‌تک الیاف، قدرت اتصال فیبر به فیبر مربوط می‌دانند. بر این اساس، طی عمل پارگی دو اتفاق رخ می‌دهد: ۱- باز شدن اتصالات بین الیاف و ۲- گسیختگی الیاف. در کل، دومین عامل کمتر از اولین عامل رخ می‌دهد. طبق شکل ۶ ب، استفاده از ۲۰ درصد کربنات کلسیم در بافت کاغذ منتهی به افت ۲۲ درصدی این شاخص شد که مشابه روند افت شاخص مقاومت کششی کاغذ است این شاخص با افزودن ۲۰ درصد LF علاوه بر جبران افت ناشی از استفاده از پرکننده، نزدیک به ۵۰ درصد بهبود یافت. در خصوص عملکرد PAE و NFC، بدیهی است که ضمن تبدیل الیاف به NFC، به دلیل کاهش طول و قطر آن‌ها شاخص مذکور به‌شدت کاهش می‌یابد، از این‌رو می‌توان انتظار افت مقاومت به پارگی را در صورت جایگزینی بخشی از الیاف با NFC در ساخت کاغذ داشت[۳۹] و PAE در عوض به دلیل ساختار بسپاری خود و گزارش تحقیقات پیشین می-تواند نقشی مثبت در بهبود مقاومت‌های مکانیکی مثل کشش و پارگی ایجاد کند[۴۰]. همچنین اگر چه انتظار می‌رفت با افزودن NFC در بافت کاغذ، این شاخص کاهش یابد ولی در استفاده توأم آن با PAE بخشی از این افت جبران شده و در نهایت توانسته است سبب بهبود شاخص مقاومت به پارگی شود. بر اساس ادامه نتایج شکل ۶ ب، در صورت استفاده از ۱ درصد PAE و ۳ درصد NFC، شاخص مقاومت به پارگی به میزان ۱۲ درصد نسبت به

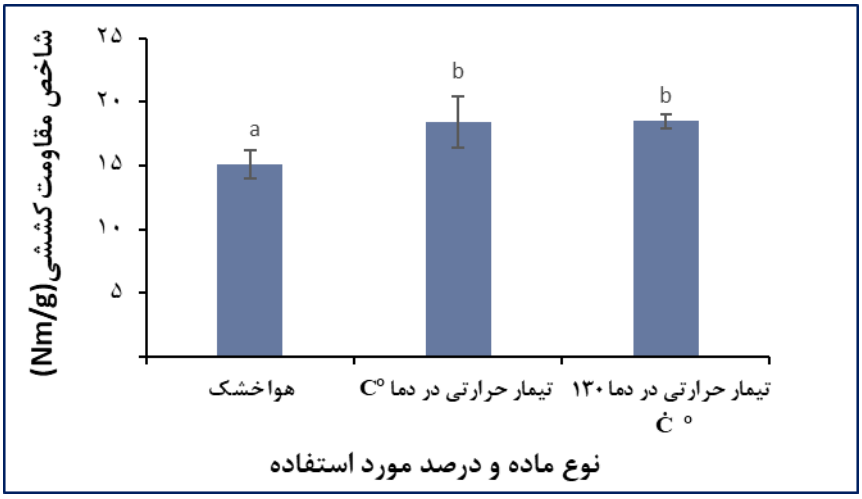
www.SID.ir

Archive of SID

کاغذ حاصل از خمیرکاغذ شاهد افزایش‌یافته است. باوجوداین نمی‌توان از طریق افزودن PAE و NFC انتظار دست‌یابی به شاخص مقاومت به پارگی معادل استفاده از LF را داشت.

تأثیر تیمار حرارتی خشک‌کردن بر شاخص مقاومت کششی کاغذهای خشک

با توجه به این‌که در حین ساخت کاغذ در بخش خشک‌کن ماشین کاغذ حرارت به کاغذ اعمال می‌شود و حرارت نیز در عملکرد PAE مؤثر است[۱۵]، برای ارزیابی تأثیر تیمار حرارتی بر میزان اثرگذاری PAE و NFC هنگام ساخت کاغذ بر ویژگی‌های استحکامی خشک کاغذ، ترکیب سوسپانسیون کاغذها طبق شرایط تیمار ردیف ۱۰ جدول ۲ آماده شدند و هنگام خشک شدن تیمار حرارتی دریافت کردند. بر اساس نتایج شکل ۷ با استفاده از تیمار حرارتی ۱۰۰ و ۱۳۰ درجه سلسیوس شاخص مقاومت کششی کاغذ خشک به ترتیب ۲۲ و ۲۲/۵ درصد بهبود نسبت به کاغذ هوا خشک داشته است. این تأثیر می‌تواند در اثر واکنش بین NFC و یون‌های آزتیدینیوم مشتق شده از PAE در اثر حرارت باشد. مشابه این اثر در واکنش بین کربوکسی متیل سلولز با یون‌های آزتیدینیوم مشتق شده از PAE که قبلاً گزارش‌شده است می‌باشد[۱۵]. همچنین با مقایسه اثر دو دمای مورد استفاده در تیمار حرارتی کاغذهای ساخته شده بر شاخص مقاومت کششی به‌نظر می‌رسد دمای بیش از ۱۰۰ درجه سلسیوس تأثیر مثبت قابل توجه‌ای در کاغذ ایجاد نمی‌کند. ارزیابی نتایج آماری هم دلالت بر عدم معنی-داری اثرات این دو دما دارد اگرچه نسبت به شرایط هوا خشک معنی‌دار بود. بنابراین انتظار می‌رود در اثر تیمار حرارتی امکان ایجاد پیوندهای استری از طریق گروه‌های هیدروکسیل افزایش‌یافته در نتیجه شاخص مقاومت کششی بهبود معنی‌داری نسبت کاغذهای هوا خشک همان تیمار داشته است.



شکل ۷. اثر تیمار حرارتی بر شاخص مقاومت کششی کاغذ خشک دست‌ساز (۷۶/۳ درصد خمیرکاغذCMP، ۲۰ درصد کربنات کلسیم، ۳ درصد NFC، ۰/۷ درصد PAE).

بر اساس ارزیابی‌های انجام‌شده از طریق مقایسه کلی میزان شاخص‌های موردبررسی به‌دست‌آمده با افزودن PAE و NFC در مقایسه با افزودن ۲۰ درصد LF به خمیرکاغذ شاهد می‌توان پیشنهاد نمود که ۰/۷ درصد PAE همراه با ۳ درصد NFC می‌تواند به‌عنوان جایگزین ۲۰ درصد LF در ساخت کاغذ شاهد برای تأمین مقاومت تر و خشک کاغذ به کار گرفته شود.

www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی استفاده از NFC همراه PAE به‌منظور جایگزینی با LF برای بهبود انرژی جذب کششی تر کاغذ هرگز خشک نشده با ۳۵ درصد خشکی و امکان حذف آن از فرآیند تولید کارخانه چوب و کاغذ مازندران انجام شد. بر اساس نتایج حاصل، افزودن NFC و PAE، هر یک به‌طور مجزا، سبب افزایش جزئی TEA لایه تر کاغذ شد. افزودن NFC همراه PAE سبب بهبود در TEA لایه تر کاغذ می‌شود که معادل افزودن ۱۵ درصد خمیر الیاف بلند بود. در بخش استحکام خشک نیز افزودن NFC همراه PAE می‌تواند سبب افزایش شاخص‌های مقاومت‌های کششی و ترکیدگی کاغذ مشابه تیمار حاوی ۲۰ درصد LF شود. مقاومت به پارگی نیز اگرچه با افزودن ۳ درصد NFC همراه ۱ درصد PAEنسبت به نمونه سوسپانسیون خمیرکاغذ CMP حاوی ۲۰ درصد کربنات کلسیم بهبود می‌یابد ولی به مقاومت تیمار حاوی ۲۰ درصد LF نمی‌رسد. تیمار حرارتی کاغذهای مرطوب حاوی NFC همراه PAE در دماهای ۱۰۰ و ۱۳۰ درجه سلسیوس، می‌تواند سبب بهبود معنی‌دار شاخص مقاومت کششی کاغذ نسبت به کاغذ بدون تیمار حرارتی برای خشک شدن شود. به‌طورکلی در مقیاس آزمایشگاهی، استفاده توأم از NFC و PAE امکان جایگزینی با ۱۵ درصد LF با حفظ مقاومت تر ورق کاغذ وجود دارد و برای ویژگی‌های استحکامی خشک کاغذ این شرایط حتی قابل جایگزین به‌جای استفاده از ۱۵ درصد LF است.

سپاسگزاری

این تحقیق در قالب پایان‌نامه دانشجویی با حمایت مالی دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان در سال۱۳۹۵ انجام شده و بدین‌وسیله از آن دانشگاه و همچنین صنایع چوب و کاغذ مازندران برای در اختیار قرار دادن مواد اولیه تشکر می‌شود.

منابع

[1] Hamzeh, Y., Sabbaghi, S., Ashori, A., Abdulkhani, A. and Soltani, F., 2013. Improving wet and dry strength properties of recycled old corrugated carton (OCC) pulp using various polymers. Carbohydrate polymers, 94(1): 577-583.

[2] Lindström, T., Wågberg, L. and Larsson, T., 2005. On the nature of joint strength in paper-A review of dry and wet strength resins used in paper manufacturing. In: 13th fundamental research symposium. Cambridge, UK: The Pulp and Paper Fundamental Research Society,1: 457-562.

[3] Mirshokraei, S., 2003. Pulp and paper Technology. Second edition, Aeezh, 501p. (translated to Persian).

[4] Salmen, N.L., 1985. Mechanical properties of wood fibers and papers, in Cellulose Chemistry and its Applications, eds Nevell, T.P. and Zeronian, S.H., Ellis Horwood, Chichester, Ch. 20, 505–530.

[5] Yang, D., DiFlavio, J.L., Gustafsson, E. and Pelton, R., 2018. Wet-peel: a tool for comparing wet-strength resins. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 33(4): 632-646.

[6] Belle, J. and Odermatt, J., 2016. Initial wet web strength of paper. Cellulose, 23(4): 2249-2272.

[7] Hamzeh, Y., and Rostampour, A., 2008. Principals of papermaking chemistry. University of Tehran press, Tehran. 424p.

[8] Lu, C., Grigoriev, V., Nguyen, D. and Rosencrance, S., Kemira Oyj, 2014. Polyamine polyamidoamine epihaloohydrin compositions and processes for preparing and using the same. U.S. Patent 8,742,030.

[9] Dunlop-Jones, N., 2014. Wet-strength chemistry. In: Paper Chemistry, Head of Department of Paper Science University of Manchester Institute of Science and Technology, 247p.

www.SID.ir

Archive of SID

[10] Obokata, T., Yanagisawa, M. and Isogai, A., 2005. Characterization of polyamideamine-epichlorohydrin (PAE) resin: Roles of azetidinium groups and molecular mass of PAE in wet strength development of paper prepared with PAE. Journal of applied polymer science, 97(6): 2249-2255.

[11] Su, J., Mosse, W.K., Sharman, S., Batchelor, W. and Garnier, G., 2012. Paper strength development and recyclability with polyamideamine-epichlorohydrin (PAE). BioResources, 7(1): 0913-0924.

[12] Onur, A., Shanmugam, K., Ng, A., Garnier, G. and Batchelor, W., 2019. Cellulose fibre-perlite depth filters with cellulose nanofibre top coating for improved filtration performance. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 583:123997.

[13] Onur, A., Ng, A., Garnier, G. and Batchelor, W., 2019. The use of cellulose nanofibres to reduce the wet strength polymer quantity for development of cleaner filters. Journal of cleaner production, 215: 226-231.

[14] Thorn, I., and Au, C.O., 2009. Applications of wet-end paper chemistry. Springer. 215p.

[15] Siqueira, E.J., Salon, M.C.B., Belgacem, M.N., and Mauret, E., 2015. Carboxymethylcellulose (CMC) as a model compound of cellulose fibers and polyamideamine epichlorohydrin (PAE)–CMC interactions as a model of PAE–fibers interactions of PAE-based wet strength papers. Journal of Applied Polymer Science, 132(26):1-10.

[16] Obokata, T., and Isogai, A., 2007. The mechanism of wet-strength development of cellulose sheets prepared with polyamideamine-epichlorohydrin (PAE) resin. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 302(1-3): 525-531.

[17] Espy, H.H. and Geist, G.W., 1993. Persulfates as repulping reagents for neutral/alkaline wet-strength broke. Tappi journal, 76(2):139-142.

[18] Gigac, J., Fiserova, M. and Osvaldik, Z., 2005. Recycling of wet-strength paper. Wood Research, 50(3): 73-83.

[19] Siqueira, E., Naoui, W., Marlin, N., Schott, S., and Mauret, E., 2018. Effect of chemical additives on the degradation of polyamideamine-epichlorohydrin (PAE) films and PAEbased papers made from bleached kraft pulps. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 28(4): 529-540.

[20] Hubbe, M.A., 2019. Nanocellulose, cationic starch and paper strength. Appita Journal, 72(2): 82-94.

[21] Lengowski, E.C., Júnior, E.A.B., Kumode, M.M.N., Carneiro, M.E. and Satyanarayana, K.G., 2019. Nanocellulose in the paper making. In: Sustainable Polymer Composites and Nanocomposites, Springer, Cham. 1027-1066.

[22] Kim, K.M., Lee, J.Y., Jo, H.M. and Kim, S.H., 2019. Cellulose Nanofibril Grades' Effect on the Strength and Drainability of Security Paper. BioResources, 14(4): 8364-8375.

[23] Hii, C., Gregersen, Ø.W., Chinga-Carrasco, G., and Eriksen, Ø., 2012. The effect of MFC on the pressability and paper properties of TMP and GCC based sheets. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 27(2): 388-396.

[24] Sehaqui, H., Zhou, Q., and Berglund, L.A., 2013. Nanofibrillated cellulose for enhancement of strength in high-density paper structures. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 28(2):182-189.

[25] 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.

[26] Su, J., Zhang, L., Batchelor, W., and Garnier, G., 2014. Paper engineered with cellulosic additives: effect of length scale. Cellulose, 21(4): 2901-2911.

[27] Taipale, T., Österberg, M., Nykänen, A., Ruokolainen, J. and Laine, J., 2010. Effect of microfibrillated cellulose and fines on the drainage of kraft pulp suspension and paper strength. Cellulose, 17(5):1005-1020.

www.SID.ir

Archive of SID

[28] Petroudy, S.R.D., Syverud, K., Chinga-Carrasco, G., Ghasemain, A., and Resalati, H., 2014. Effects of bagasse microfibrillated cellulose and cationic polyacrylamide on key properties of bagasse paper. Carbohydrate polymers, 99: 311-318.

[29] Ahola, S., Österberg, M., and Laine, J., 2008. Cellulose nanofibrils—adsorption with poly (amideamine) epichlorohydrin studied by QCM-D and application as a paper strength additive. Cellulose, 15(2): 303-314.

[30] Su, J., Mosse, W.K., Sharman, S., Batchelor, W.J. and Garnier, G., 2013. Effect of tethered and free microfibrillated cellulose (MFC) on the properties of paper composites. Cellulose, 20(4): 1925-1935.

[31] Pourmousa, S. and Yadollahi, R., 2013. Optimization of the performance of PAE resin combined with retention aid and CMC in tissue paper production using deinked pulp. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 28(3): 477-497.

[32] Lindqvist, H., Salminen, K., Kataja-aho, J., Retulainen, E., Fardim, P. and Sundberg, A., 2012. The effect of fibre properties, fines content and surfactant addition on dewatering, wet and dry web properties. Nordic Pulp & Paper Research Journal, *27*(1): 104-111.

[33] Sood, Y.V., Pande, P.C., Tyagi, S., Payra, I. and Kulkarni, A.G., 2005. Quality improvement of paper from bamboo and hardwood furnish through fiber fractionation. Journal of Scientific and Industrial Research (JSIR),64(04): 299-305

[34] Larsson, P.T., Lindström, T., Carlsson, L.A., and Fellers, C., 2018. Fiber length and bonding effects on tensile strength and toughness of kraft paper. Journal of Materials Science, 53(4): 3006-3015.

[35] Yadollahi, R., Hamzeh, Y., Mahdavi, H., and Pourmousa, S., 2014. Synthesis and Evaluation of Glyoxalated Polyacrylamide (GPAM) as a Wet and Dry-Strengthening Agent of Paper. Science and Technology, 27(2):121-129.

[36] Alince, B., Vanerek, A., de Oliveira, M.H., and van de Ven, T.G., 2006. The effect of polyelectrolytes on the wet-web strength of paper. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 21(5): 653-658.

[37] Gernandt, R., Wågberg, L., Gärdlund, L., and Dautzenberg, H. (2003). Polyelectrolyte complexes for surface modification of wood fibres: I. Preparation and characterisation of complexes for dry and wet strength improvement of paper. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 213(1): 15-25.

[38] Eriksen, O., Syverud, K., and Gregersen, O. (2008). The use of microfibrillated cellulose produced from kraft pulp as strength enhancer in TMP paper. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 23(3): 299-304.

[39] Hadilam, M. M., Afra, E., and Yousefi, H. (2013). Effect of cellulose nanofibers on the properties of bagasse paper. JFWP, 66(3): 351-366.

[40] Hamzeh, Y., Yadollahi, R., Mahdavi, H., and Pourmousa, S., 2015. Effect of Application Method of Wet Strength Additives on Paper Properties. JFWP, 68(3): 469-478.

www.SID.ir

Archive of SID

Improvement of wet and dry layer strengths of paper from chemi-mechanical pulp using polyamide epichlorohydrin and cellulose nanofibers vs imported long fiber Kraft pulp

Abstract

The wet layer tensile strengths of the paper during production affects the frequency of breaking and its runability in the papermachine. In this study, the possibility of using cellulose nanofibers (NFC) and polyamide epichlorohydrin (PAE) vs imported long fiber kraft pulp (LF) was investigated to improve the wet and dry layer strengths of handsheet papers made from chemi-mechanical pulp (CMP). Strength properties of never-dried wet layer of papers with 35% consistency and air-dried papers were evaluated by pulp suspention and addition of 0 and 20% mineral calcium carbonate, NFC (at 2 levels, 2% and 3%), PAE (at 3 levels, 0.5%, 0.7% and 1%) and 20% of LF. Also, the effect of thermal treatments on the wet layer strength of papers containing 3% NFC and 0.7% PAE at 100 and 130 °C tempratures was evaluated. Results showed that the addition of NFC together with PAE improves the wet and dry layer strength properties of papers. In the case of wet layers of papers with 35% consistency, the addition of 3% NFC together with 1% PAE increased the tensile absorption energy (TEA) to 85%, although this was not as effective as using 20% LF (117%). In the case of air-dried papers, addition of 3% NFC and 1% PAE improved the papers TEA and tensile strength by 35% and 18%, respectively compairing with the addition of 20% LF. As a result of thermal treatments at 100 and 130 °C, the tensile strength of dried papers increased to 22 and 22.5%, respectively compared with the non-thermal treated papers. Overall, due to the positive performance of using NFC and PAE with thermal treatments, the combined use of 3% NFC and 1% PAE in CMP can be replaced by 15% LF to improve wet and dry papers strengths.

Keywords: Tensile energy absorption (TEA), Wet and Dry paper strength, Polyamide epichlorohydrin (PAE), Nanofibrillated Cellulose (NFC), Chemi-mechanical pulp (CMP).

S. F. Mousavi[1*]
P. Rezayati-Charan[2*]
M. H. Moradian[3]
G. Asadpour[4]

[1] MSc student, Department of Cellulose Industries Engineering, Natural resources faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

[2] Department of Cellulose Industries Engineering, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

[3] Assistant professor, Department of Cellulose Industries Engineering, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

[4] Assistant professor, Department of wood and paper engineering, Sari agriculture and natural resources university (SANRU), Sari, Iran

Corresponding author:
p.rezayati@gmail.com

Received: 2020/03/03
Accepted: 2020/06/18

www.SID.ir