بررسی قابلیت رنگ‌بری خمیرکاغذ مرکب‌زدایی شده با آنزیم همی‌سلولاز در مقایسه با فرآیند متداول شیمیایی

ایمان اکبرپور[۱]
علی قاسمیان[۲]
حسین رسالتی[۳]
احمدرضا سرائیان[۴]
احمد جهان لتیباری[۵]

[۱] استادیار، گروه تخصصی علوم و مهندسی کاغذ، دانشکدهٔ مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[۲] دانشیار، گروه تخصصی علوم و مهندسی کاغذ، دانشکدهٔ مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

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

[۴] دانشیار، گروه تخصصی علوم و مهندسی کاغذ، دانشکدهٔ مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[۵] استاد، دانشگاه آزاد اسلامی کرج، دانشکدهٔ چوب و کاغذ، کرج، ایران

مسئول مکاتبات:
inakbarpour@gau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۱

چکیده

در این پژوهش، قابلیت رنگ‌بری خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده با آنزیم همی‌سلولاز در مقایسه با روش متداول شیمیایی بررسی شد. در ابتدا، مخلوط خمیرکاغذ بازیافتی با آنزیم همی‌سلولاز در سطوح مختلف میزان مصرف و مدت زمان تیمار (تحت سایر شرایط ثابت فرآیندی) در محدودهٔ pH ۶/۵–۷ مرکب‌زدایی شدند و تیمارهای آزمایشی H_2T_3 (میزان مصرف: ۰/۲ درصد (براساس وزن خشک خمیرکاغذ بازیافتی)؛ زمان تیمار: ۶۰ دقیقه) و H_4T_2 (میزان مصرف: ۱ درصد؛ زمان تیمار: ۵۰ دقیقه) به‌عنوان بهترین تیمار انتخاب شدند. در ادامه، خمیرکاغذهای انتخابی با استفاده از پراکسید هیدروژن تحت شرایط ثابت فرآیندی رنگ‌بری شدند و قابلیت رنگ‌بری آن‌ها در مقایسه با خمیرکاغذهای متداول شیمیایی مقایسه شد. براساس نتایج به‌دست آمده، قابلیت رنگ‌بری خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده با همی‌سلولاز بهتر از خمیرکاغذهای رنگ‌بری شده پس از مرکب‌زدایی شیمیایی بوده و کاغذهای حاصل از درجه روشنی و سفیدی بیشتر و همچنین زردی کمتر برخوردار بودند اما ماتی این کاغذها در اثر رنگ‌بری کاهش یافت. همچنین خمیرکاغذهای پیش‌تیمار شده با آنزیم همی‌سلولاز، کاغذهای با شاخص‌های مقاومت به کشش و ترکیدگی بیشتری بعد از مرحله رنگ‌بری نشان دادند به‌طوری‌که در تیمارهای آنزیمی H_2T_3 و H_4T_2، میزان افزایش شاخص مقاومت به کشش به‌ترتیب ۱۳/۲۲ درصد و ۱۲/۵۹ درصد و افزایش شاخص مقاومت به ترکیدگی به‌ترتیب ۳/۶۶ و ۶/۲۲ درصد به‌دست آمد. این در حالی است که شاخص‌های مقاومت به کشش و ترکیدگی خمیرکاغذ مرکب‌زدایی شده شیمیایی بعد از رنگ‌بری به‌ترتیب به میزان ۱۰/۱۷ درصد و ۱۶ درصد بهبود یافتند. همچنین درصد کاهش شاخص مقاومت به پارگی کاغذ در تیمارهای آنزیمی H_2T_3 و H_4T_2 بعد از رنگ‌بری، به‌ترتیب ۱۲/۴۵ درصد و ۸/۰۶ درصد در مقایسه با خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده شیمیایی (۴/۴۴ درصد) تعیین شد. براساس نتایج کلی به‌دست آمده از مقایسه ویژگی‌های کیفی کاغذهای ساخته شده از خمیرکاغذهای مختلف رنگ‌بری شده با پراکسید هیدروژن، پیش تیمار آنزیمی H_2T_3 در مجموع قابلیت رنگ‌بری، ویژگی‌های نوری و مقاومتی به‌مراتب بهتری را نتیجه داده است.

واژگان کلیدی: کاغذهای بازیافتی، آنزیم همی‌سلولاز، قابلیت رنگ‌بری، کیفیت کاغذ.

مقدمه

خمیرکاغذهای بازیافتی دارای قابلیت زه‌کش و سرعت آب‌گیری ضعیف و همچنین مقاومت کم در مقایسه با خمیرکاغذ بکر می‌باشند، بنابراین استفاده از الیاف بازیافتی در کاغذسازی موجب افت ویژگی‌های کیفی کاغذ نهایی خواهد شد [۱]. ویژگی‌های ضعیف الیاف بازیافتی عمدتاً به دلیل تغییرات ساختاری الیاف در طی خشک‌کردن بوده و حرکت پذیری ماشین کاغذ[1] به دلیل قابلیت زه‌کش کم[2] خمیرکاغذ بازیافتی می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد. روش‌های مختلفی برای بهبود ویژگی‌های خمیرکاغذهای بازیافتی مطرح شده و از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به اعمال تیمار مکانیکی، مواد افزودنی شیمیایی، تفکیک سازی[3] مخلوط کردن با خمیرکاغذ بکر، تیمارهای شیمیایی، تیمارهای آنزیمی و اصلاحات فرآیندی در کاغذسازی اشاره داشت [۲ و ۳]. در سال‌های اخیر استفاده از آنزیم‌ها در بازیافت کاغذهای باطله مختلف توسعه زیادی یافته است تا بتوان ضمن اصلاح الیاف بازیافتی، امکان استفاده مجدد از آن‌ها را در سیستم کاغذسازی افزایش داد. اعمال تیمارهای آنزیمی با حذف نرمه‌های الیاف و همچنین بهبود فیبریله شدن الیاف خمیرکاغذهای بازیافتی، موجب بهبود قابلیت آب‌گیری خمیرکاغذ، افزایش سرعت تولید ماشین کاغذ و بهبود ویژگی‌های مقاومتی کاغذ حاصل می‌شود [۴-۶]. نتایج ارزیابی استفاده از مخلوط آنزیم‌های سلولاز و همی‌سلولاز بر قابلیت مرکب‌زدایی و رنگ‌بری خمیرکاغذ روزنامه باطله بیانگر بهبود ویژگی‌های نوری و مکانیکی کاغذ حاصل است [۷]. به‌طور کلی مصرف ۰/۰۵ درصد برای خمیرکاغذ مرکب‌زدایی شده و رنگ‌بری نشده و مصرف ۰/۵ درصد برای خمیرکاغذ مرکب‌زدایی شده و رنگ‌بری شده قادر به تأمین مشخصات لازم به لحاظ ویژگی‌های کیفی برای کاغذ روزنامه مطابق با استاندارد SNI 14-0091-1998 بوده است [۷]. همچنین ارزیابی‌های انجام‌شده در رابطه با کارایی مرکب‌زدایی آنزیمی الیاف بازیافتی (شامل الیاف روزنامه، مجله و مقوای کارت رنگی[4]) توسط آنزیم‌های هیدرولیز کننده کربوهیدرات[5] شامل آنزیم‌های سلولاز (با فعالیت‌های اندوگلوکاناز و اگزوکلوکاناز) و همی‌سلولاز در مقایسه با آنزیم لاکاز بیانگر آن بوده که آنزیم‌های ذکر شده می‌توانند به‌طور مؤثر موجب مرکب‌زدایی این نوع خمیرکاغذها شوند [۸]. در مورد کاغذ روزنامه بازیافتی همراه با فرآیند شناورسازی، درجه روشنی کاغذ تا ۴-۳ درصد ایزو بهبود یافته و در مورد کاغذ مجله بازیافتی نیز با استفاده از آنزیم‌های هیدرولیز کننده کربوهیدرات، درجه روشنی تا ۲/۵ درصد ایزو افزایش یافت [۸-۱۰]. نتایج استفاده از آنزیم همی‌سلولاز در سطوح مختلف ۰/۱ (H_1)، ۰/۲ (H_2)، ۰/۵ (H_3) و ۱ درصد (H_4) و زمان‌های مختلف ۴۰ (T_1)، ۵۰ (T_2) و ۶۰ دقیقه (T_3) تحت شرایط ثابت خشکی ۱۰ درصد، درجه حرارت ۵۵-۶۰°C در محدوده pH ۶/۵-۷ بر ویژگی‌های کیفی کاغذ حاصل از مخلوط ۷۰ درصد خمیرکاغذ روزنامه و ۳۰ درصد مجله باطله نشان داد که در غلظت آنزیم ۰/۲ درصد و مدت‌زمان ۶۰ دقیقه (تیمار H_2T_3) و یا غلظت آنزیم ۰/۵ درصد و مدت‌زمان ۵۰ دقیقه (تیمار H_3T_2) می‌توان کاغذهای به‌مراتب روشن‌تر، سفیدتر و همزمان ماتی مناسب در مقایسه با خمیرکاغذ مرکب‌زدایی نشده (تیمار C_1) و خمیرکاغذ مرکب‌زدایی شده شیمیایی (تیمار C_2) تولید کرد. همچنین در تیمارهای H_2T_3 و H_3T_3، بیشترین میانگین شاخص مقاومت به کشش (۳۲/۲۷۱ و ۳۰/۰۱۷ نیوتن متر بر گرم)، طول پارگی (۳/۱۳۱ و ۲/۹۷۴ کیلومتر) و سفتی کاغذ (۳/۹۴ و ۴/۱۲ میلی نیوتن) و همچنین بیشترین شاخص مقاومت به ترکیدگی (۲/۷۳ و ۲/۴۷۵ کیلو پاسکال مترمربع بر گرم) به‌ترتیب در تیمارهای H_2T_3 و H_4T_2 و بیشترین شاخص مقاومت به پارگی (۷/۶۸۸ و ۷/۳۴ میلی‌نیوتن مترمربع بر گرم) در تیمارهای H_1T_1 و H_1T_2 مشاهده شده است که این مقادیر به‌مراتب مطلوب‌تر از کاغذهای حاصل از تیمارهای C_1 و C_2 می‌باشند [۹]. نتایج استفاده از سیستم لاکاز در حضور عوامل واسطه (LMS[6]) به‌تنهایی و یا در ترکیب با آنزیم‌های سلولاز و همی‌سلولاز بیانگر آن بوده که این سیستم در مرکب‌زدایی الیاف مجله و روزنامه مؤثر نبوده و منجر به تولید کاغذهای

[1] Paper machine runability
[2] Bad drainability
[3] Fractionation
[4] Printed cardboard
[5] Carbohydrate hydrolase
[6] Laccase mediator system

با درجه روشنی و شاخص جداسازی مرکب بدتر و یا کمتر می‌شود اما در مورد خمیرکاغذ مقوای کارت رنگی، مرکب‌زدایی با سیستم LMS منجر به کاغذهای با درجه روشنی بیشتر (تا حدود ۳ درصد ایزو) و غلظت‌های کمتر مرکب چاپ می‌شود [۱۰].

استفاده از آنزیم‌های همی‌سلولاز به‌عنوان یک روش مؤثر برای اصلاح ویژگی‌های الیاف بازیافتی مطرح شده و ویژگی‌های الیاف حاصل می‌توانند بهبود یابند لذا در این پژوهش، با استفاده از آنزیم همی‌سلولاز در سطوح مختلف مصرف و زمان‌های مختلف تیمار در مرحله مرکب‌زدایی مخلوط کاغذ روزنامه و مجله بازیافتی (به‌ترتیب با نسبت اختلاط ۳۰/۷۰ درصد)، بهترین شرایط تیمار آنزیمی انتخاب شدند. در ادامه، رنگ‌بری خمیرکاغذهای انتخابی با استفاده از پراکسید هیدروژن تحت شرایط ثابت انجام گرفت تا قابلیت رنگ‌بری خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده آنزیمی در مقایسه با خمیرکاغذ مرکب‌زدایی شده شیمیایی ارزیابی شود.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی کاغذهای باطله ONP[1] (کاغذ روزنامه باطله) و OMG[2] (کاغذ مجله باطله)

کاغذهای ONP (همشهری) و OMG (خانوادهٔ سبز) از دفاتر مرکزی شرکت‌های فروش کاغذ باطله خریداری شدند. درصد رطوبت کاغذهای باطله (پس از خرد شدن و تبدیل به ابعاد مناسب) مطابق با استاندارد T 412 om-02 آیین‌نامهٔ تاپی اندازه‌گیری شد. کاغذهای باطلهٔ خرد شده پس از خیساندن در آب به مدت ۲۴ ساعت، در داخل دستگاه پراکنده‌ساز به مدت ۱۵ دقیقه با تعداد دور ۳۹۷۵۰ (rpm=۲۶۵۰) و درصد خشکی ۳ درصد دفیبره شدند. خمیرکاغذ حاصل روی الک با مش ۲۰۰ آب‌گیری شده و در ادامه با استفاده از مواد شیمیایی و همچنین آنزیم همی‌سلولاز به‌طور جداگانه تیمار شدند.

تیمار آنزیمی همی‌سلولاز و مرکب‌زدایی شیمیایی خمیرکاغذ بازیافتی

در تیمار آنزیمی از آنزیم همی‌سلولاز به شکل پودری استفاده شد (تهیه شده از شرکت تجاری Sigma Aldrich با کد تجاری H۷۶۴۹). محدودهٔ درجهٔ حرارت نگهداری این آنزیم ۸ درجهٔ سانتی‌گراد و فعالیت آن u/mg ۵ ≤ ذکر شده است. فعالیت 1 U آنزیم همی‌سلولاز به‌عنوان مقدار آنزیم لازم برای جداسازی یک میکرومول D-گالاکتوز از همی‌سلولز در مدت زمان یک ساعت، pH= ۵/۵ و دمای ۳۷ درجهٔ سانتی‌گراد تعریف شده است [۹]. در پایان تیمارهای آنزیمی، به‌منظور غیرفعال کردن آنزیم باقی‌مانده در خمیرکاغذ، از پراکسید هیدروژن به مقدار ۰/۰۵ درصد (براساس وزن خشک خمیرکاغذ) طی دورهٔ زمانی ۱۰ دقیقه استفاده شد. پس از انجام تیمارهای آنزیمی مختلف در سطوح مختلف ۰/۱ (H_1)، ۰/۲ (H_2)، ۰/۵ (H_3) و ۱ درصد (H_4) و زمان‌های مختلف ۴۰ (T_1)، ۵۰ (T_2) و ۶۰ دقیقه (T_3) تحت شرایط ثابت درصد خشکی ۱۰ درصد، درجه حرارت ۶۰°C-۵۵ در محدوده pH ۷-۶/۵، تیمارهای آزمایشی H_2T_3 (میزان مصرف ۰/۲ درصد و مدت زمان ۶۰ دقیقه) و H_4T_2 (میزان مصرف ۱ درصد و مدت‌زمان ۵۰ دقیقه) به‌عنوان تیمارهای بهینه انتخاب شدند. مرکب‌زدایی شیمیایی کاغذهای بازیافتی (سیستم متداول شیمیایی) با استفاده از مواد شیمیایی شامل ۱ درصد پراکسید هیدروژن، ۱ درصد هیدروکسید سدیم، ۲ درصد سیلیکات سدیم، ۰/۳ درصد عامل کی‌لیت کننده DTPA و ۰/۲ درصد عامل فعال‌ساز سطحی (Tween 80) تحت شرایط ثابت درصد خشکی ۱۰ درصد، درجهٔ حرارت ۵۵-۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد و مدت‌زمان ۲۰ دقیقه در کیسه‌های پلاستیکی[3] در داخل حمام آب گرم انجام گرفت (نمونه خمیرکاغذ C). مرکب‌زدایی خمیرکاغذهای پیش تیمار شده با مواد شیمیایی و آنزیم همی‌سلولاز، با استفاده از روش ترکیبی (فرآیندهای شستشو و شناورسازی) انجام گرفت. ابتدا شستشوی خمیرکاغذ بر روی الک بامش ۲۰۰ به مدت حدود ۱۰ دقیقه تحت‌فشار آب یکنواخت در زیر شیر آب صورت گرفته و سپس فرآیند شناورسازی در داخل سلول شناورسازی در زمان ۲۰ دقیقه، درصد خشکی ۰/۸٪ همراه با افزودن ۰/۳۳ درصد کلرید کلسیم و ۰/۲ درصد ماده فعال‌ساز پلی‌سوربات Tween 80 (براساس وزن

[1] Old newsprint
[2] Old magazine
[3] Plastic bags

خشک خمیرکاغذ) در محدوده pH ۸-۸/۵ انجام شد.

خمیرکاغذهای پیش‌تیمار شده با مواد شیمیایی و آنزیم با استفاده از روش ترکیبی (فرایندهای شستشو و شناورسازی) مرکب‌زدایی شدند. ابتدا شستشوی خمیرکاغذ روی الک بامش ۲۰۰ به مدت حدود ۱۰ دقیقه تحت‌فشار آب یکنواخت در زیر شیر آب (در مسیر شیر آب دستگاه فیلتر برای تصفیهٔ آب تعبیه شده است) و سپس فرآیند شناورسازی در داخل سلول شناورسازی (ظرفیت دستگاه: ۲۰ لیتر، سرعت همزن: ۱۳۰۰ دور در دقیقه و سرعت جریان هوا: ۱۰ لیتر در دقیقه) در زمان ۲۰ دقیقه، درصد خشکی ۰/۸ درصد با افزودن ۰/۳۳ درصد کلرید کلسیم و ۰/۲ درصد مادهٔ فعال‌ساز پلی‌سوربات Tween 80 (براساس وزن خشک خمیرکاغذ) در محدودهٔ pH ۸-۸/۵ انجام گرفت. خمیرکاغذهای شناورسازی شده پس از آب‌گیری روی الک بامش ۲۰۰ در کیسه‌های پلی‌اتیلنی قرار داده شدند و در ادامه رنگ‌بری آن‌ها با استفاده از سیستم پراکسید هیدروژن تحت شرایط ثابت فرآیندی انجام گرفت.

رنگ‌بری خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده

خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده با مواد شیمیایی و آنزیم همی‌سلولاز با مواد شیمیایی شامل ۲ درصد پراکسید هیدروژن، ۲ درصد هیدروکسید سدیم، ۲ درصد سیلیکات سدیم، ۰/۲ درصد کی‌لیت کننده DTPA و ۰/۱ درصد سولفات منیزیم در داخل کیسه‌های پلاستیکی مجزا و در حمام بخارآب تحت شرایط خشکی ۱۰ درصد، دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد طی مدت زمان ۲ ساعت رنگ‌بری شدند [۸-۹]. در فرآیند رنگ‌بری، خمیرکاغذ به‌طور متناوب و در فاصله زمانی مشخص به‌طور دستی هم زده شد تا مواد شیمیایی به‌طور یکنواخت در خمیرکاغذ پخش و پراکنش یابد. پس از رنگ‌بری، خمیرکاغذ بر روی الک بامش ۲۰۰ آب‌گیری و با استفاده از آب مقطر (تقریباً ۱۰ برابر حجمی) شستشو داده شد تا واکنش رنگ‌بری متوقف شود و از اثر زردشدگی[1] خمیرکاغذ ناشی از قلیای باقی‌مانده[2] جلوگیری شود [۱۱]. سپس خمیرکاغذ در داخل کیسه‌های پلاستیکی قرار داده‌شده و از آن‌ها کاغذ دست‌ساز استاندارد (۶۰ گرمی) ساخته شد. کاغذهای ساخته شده در دمای اتاق (به مدت ۲۴ ساعت) و سپس در اتاق کلیما (تحت شرایط استاندارد رطوبت نسبی ۲±۵۰ درصد و دمای ۱±۲۳ درجهٔ سانتی‌گراد) به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند و ویژگی‌های نوری و مقاومتی آن‌ها اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های نوری و مقاومتی کاغذ دست‌ساز

کاغذهای دست‌ساز استاندارد (۶۰ گرمی) با استفاده از دستگاه کاغذ ساز مدل PTI[3] مطابق با آیین‌نامهٔ sp-۰۲ T۲۰۵ ساخته شدند و ویژگی‌های نوری آن شامل درجهٔ روشنی، زردی و سفیدی (T۴۵۲ om-۰۲)، ماتی و ضریب جذب نور (T۴۲۵ om-۰۱) و ویژگی‌های مکانیکی شامل شاخص مقاومت به کشش، طول پارگی (T۴۹۴ om-۰۱)، شاخص مقاومت به پارگی (T۴۱۴ om-۰۴) و شاخص مقاومت به ترکیدگی (T۴۰۳ om-۰۲) اندازه‌گیری شدند. لازم به یادآوری است که اندازه‌گیری ویژگی‌های نوری کاغذ با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری سنجش نوری مدل ZB-A Colorimeter انجام گرفت.

تجزیه و تحلیل آماری

در این تحقیق از طرح کاملاً تصادفی برای مقایسه ویژگی‌های نوری و مقاومتی کاغذ حاصل از رنگ‌بری مخلوط خمیرکاغذ ONP و OMG مرکب‌زدایی شده (خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده شیمیایی و خمیرکاغذ انتخابی از تیمارهای بهینه همی‌سلولاز) با سیستم پراکسید هیدروژن استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS، تجزیه واریانس داده‌های حاصل (آزمون F) انجام گرفت و مقایسه میانگین‌ها داده‌ها نیز به کمک آزمون چند دامنه‌ای دانکن (DMRT) در سطح اطمینان آماری ۹۹ درصد صورت گرفت.

[1] Yellowing effect
[2] Residual alkali
[3] Paper Testing Association

نتایج و بحث

ارزیابی قابلیت رنگ‌بری خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده با همی‌سلولاز

بررسی ویژگی‌های نوری و مقاومتی کاغذ

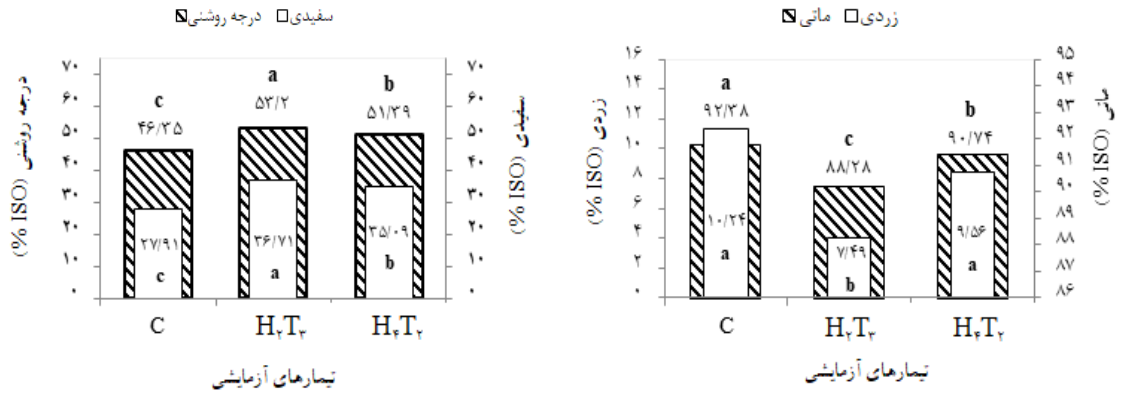
ویژگی‌های نوری

ارزیابی نتایج تأثیر رنگ‌بری با پراکسید هیدروژن بر ویژگی‌های نوری کاغذهای حاصل از تیمارهای بهینه همی‌سلولاز (شامل تیمارهای H_2T_3 و H_4T_2) در مقایسه با خمیرکاغذ حاصل از روش متداول شیمیایی حاکی از آن است که تأثیر رنگ‌بری بر ویژگی‌های نوری کاغذ معنی‌دار است (شکل۱) به‌طوری‌که طی رنگ‌بری، ویژگی‌های نوری کاغذ (به‌جز ماتی) بهبود قابل‌توجهی یافته است. در این پژوهش افزایش درجه روشنی کاغذ بعد از رنگ‌بری در تیمارهای آنزیمیH_2T_3 و H_4T_2 به‌ترتیب ۱۵/۹۴ درصد (از ۴۳/۷۳ به ۵۲/۰۲۸ درصد ایزو) و ۱۷/۰۶ درصد (از ۴۰/۹۹ به ۴۹/۴۲۶ درصد ایزو) بوده و زردی کاغذ نیز به‌ترتیب به میزان ۱۶/۷ درصد (از ۱۰/۴۲۱ به ۸/۶۸ درصد ایزو) و ۷/۷۲ درصد (از ۱۱ به ۱۰/۱۵ درصد ایزو) کاهش یافت. همچنین سفیدی کاغذ به‌عنوان یکی از شاخص‌های نوری کاغذ نیز طی رنگ‌بری با پراکسید هیدروژن افزایش‌یافته به‌طوری که این افزایش به‌ترتیب در تیمارهای H_2T_3 و H_4T_2 در حدود ۱۰/۱۶ درصد (از ۳۲/۴۱۹ به ۳۸/۳۱۳ درصد ایزو) و ۲۸/۳۲ درصد (از ۲۲/۰۱۷ به ۳۰/۷۱۶ درصد ایزو) تعیین شد. همچنین رنگ‌بری خمیرکاغذهای پیش‌تیمار شده آنزیمی و شیمیایی منجر به کاهش ماتی کاغذ شده است به‌طوری‌که این کاهش در تیمارهای H_2T_3 و H_4T_2 و نمونه شاهد به‌ترتیب ۵/۴۷ درصد (از ۹۱/۴۶۰ به ۸۶/۴۵۳ درصد ایزو)، ۵/۳۳ درصد (از ۹۳/۶۷ به ۸۸/۶۷ درصد ایزو) و ۶/۰۷ درصد (از ۹۸/۳۵ به ۹۲/۳۸ درصد ایزو) به‌دست آمد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود قابلیت رنگ‌بری خمیرکاغذهای پیش تیمار شده با همی‌سلولاز به‌مراتب بهتر از نمونه شاهد (خمیرکاغذ رنگ‌بری شده پس از مرکب‌زدایی شیمیایی) بوده و کاغذهای حاصل از درجه روشنی و سفیدی بیشتر و همچنین زردی کمتر برخوردار بوده اما ماتی این کاغذها کمتر از نمونه شاهد بوده که با توجه به درجه روشنی و سفیدی بیشتر این کاغذها در اثر خروج لیگنین قابل توجیه است. در ارتباط با موضوعیت این پژوهش چندین مطالعه در سطح بین‌المللی انجام گرفته است که نتایج گزارش شده قابل‌مقایسه با این تحقیق است. به‌عنوان مثال نتایج بررسی تیمار خمیرکاغذ بازیافتی با آنزیم‌های زایلاناز و سیستم LMS به‌طور مجزا و ترکیبی نشان داد که با استفاده از این آنزیم‌ها، درجه روشنی کاغذ بعد از رنگ‌بری با پراکسید هیدروژن (در مقایسه با خمیرکاغذ مرکب‌زدایی شده) به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بهبودیافته و استفاده از ترکیب آنزیمی همی‌سلولاز-LVS کاغذهای با درجه روشنی به‌مراتب بهتری را نسبت به تیمارهای مجزا نتیجه داده است [۱۲-۱۳]. در این پژوهش نیز بهبود ویژگی‌های نوری (درجه روشنی و سفیدی) کاغذهای مرکب‌زدایی شده با آنزیم همی‌سلولاز پس از رنگ‌بری با پراکسید هیدروژن مشاهده شده است اما شدت بهبود آن به دلیل استفاده از تنها یک آنزیم در بخش مرکب‌زدایی نسبتاً کمتر بوده است. از طرف دیگر در صورت استفاده از آنزیم سلولاز و همی‌سلولاز به‌طور مجزا، افزایش درجه روشنی به‌طور مشابه حدود ۷ درصد ایزو بیان شد و با استفاده از ترکیب سلولاز- LVS (۵۵/۹ درصد ایزو) و همی‌سلولاز- LVS (۶۰/۴ درصد ایزو)، درجه روشنی کاغذ بعد رنگ‌بری به حدود ۱۱ تا ۱۳ واحد ایزو و در صورت استفاده از آنزیم لاکاز درجه روشنی حدود ۱۰ واحد افزایش خواهد یافت. همچنین درجه روشنی خمیرکاغذ مرکب‌زدایی شده شیمیایی بعد رنگ‌بری با پراکسید هیدروژن حدوداً ۴ واحد افزایش یافته است [۱۳]. این در حالی است که در این پژوهش، درصد افزایش درجه روشنی و سفیدی کاغذ پس از رنگ‌بری با پراکسید هیدروژن در بهترین تیمار آنزیمی همی‌سلولاز به‌ترتیب ۱۵/۹۴ درصد و ۲۸/۳۲ درصد تعیین شده است. از طرف دیگر نتایج ارزیابی قابلیت رنگ‌بری خمیرکاغذ روزنامه بازیافتی (با چاپ لترپرس و فلکسوگرافی) مرکب‌زدایی شده با سلولاز و همی‌سلولاز (زایلاناز) نشان داد که قابلیت رنگ‌بری خمیرکاغذهای پیش تیمار شده با آنزیم‌ها (با پراکسید هیدروژن) قابل مقایسه و بعضاً بهتر از روش متداول شیمیایی است به‌طوری‌که در کاغذ روزنامه چاپ لترپرس میزان افزایش درجه روشنی در خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده با سلولاز، همی‌سلولاز و روش شیمیایی به‌ترتیب ۶/۹ درصد (حدود ۷ واحد)، ۶/۳ درصد (حدود ۷ واحد) و ۶ درصد

(حدود ۵ واحد) و در چاپ فلکسوگرافی به‌ترتیب ۷/۱ درصد (حدود۶-۷ واحد)، ۶/۹ درصد (حدود ۶-۷ واحد) و ۴/۹ درصد (حدود ۵ واحد) گزارش شده است [۱۳ و ۱۴]. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نیز کاملاً مطابقت و همخوانی با نتایج این پژوهش دارد و حتی شدت بهبود درجه روشنی و سفیدی کاغذ نیز به‌مراتب بیشتر است. همچنین براساس گزارش‌های منتشر شده، افزایش مصرف همی‌سلولاز ۳۸/۶۸u به ۱۰۰u در مرکب‌زدایی منجر به بهبود قابل‌توجه درجه روشنی و ویژگی‌های فیزیکی- مکانیکی کاغذ شده و بعد از رنگ‌بری با پراکسید نیز، درجه روشنی کاغذ به میزان ۲ درصد افزایش یافت. آنزیم‌های همی‌سلولاز (زایلاناز) با تأثیر بر روی خمیرکاغذ بازیافتی و جداسازی زایلن و بازتر شدن الیاف، امکان حمله شیمیایی و یا دسترس‌پذیری[1] الیاف توسط مواد شیمیایی و یا آنزیم را در توالی‌های مختلف رنگ‌بری میسر می‌سازد [۱۵]. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نیز نشان داد که آنزیم همی‌سلولاز در مقایسه با روش متداول شیمیایی قابلیت رنگ‌بری بهتری داشته و این نتایج با دستاوردهای گزارش‌شده توسط Xu و همکاران (۲۰۱۱) [۱۳] در مورد کاغذ روزنامه بازیافتی کاملاً مطابقت دارد. آنزیم همی‌سلولاز با شکستن کمپلکس لیگنین- کربوهیدرات به آزاد شدن لیگنین در مرحله مرکب‌زدایی درنتیجه به خروج آسان‌تر آن‌ها توسط مواد شیمیایی رنگ‌بری کمک می‌کند و همین مسئله به بهبود ویژگی‌های نوری کاغذ منجر خواهد شد. همچنین در تحقیق Xu و همکاران (۲۰۰۶) نتایج رنگ‌بری کاغذ روزنامه بازیافتی با آنزیم‌های مختلف حاکی از آن است که استفاده از سیستم همی‌سلولاز ویژگی‌های نوری بهتری را بعد از رنگ‌بری در مقایسه با تیمار متداول شیمیایی نشان داد [۱۶] که با توجه به بهبود اغلب شاخص‌های نوری کاغذ (به‌جز ماتی و زردی) با نتایج این پژوهش همخوانی و مطابقت دارد.

استفاده از آنزیم‌های همی‌سلولاز مثل زایلاناز منجر به جداسازی همی سلولزهای سطحی (زایلان) الیاف می‌شود و در شرایط شدید ممکن است همی سلولزهای جداشده بر سطح الیاف رسوب داده شوند که این ترکیبات رسوب داده شده را می‌توان در بخش رنگ‌بری مجدداً با زایلاناز خارج کرد و هزینه مواد شیمیایی رنگ‌بری را کاهش داد [۱۷]. به‌طور کلی با افزایش میزان مصرف آنزیم همی‌سلولاز و همچنین مدت‌زمان تیمار آنزیمی، شدت تغییرات مجموع ویژگی‌های نوری کاغذ کمی بیشتر شده است و این می‌تواند نشانگر آن باشد که شدت تأثیر آنزیم بر جدا شدن فیبریل‌ها و ظاهر شدن میکروفیبریل‌های سطحی الیاف درنتیجه خروج آسان‌تر مرکب چاپ از ترکیب کاغذ افزایش می‌یابد. از طرف دیگر می‌توان انتظار داشت که با تشدید شرایط تیمار آنزیمی، امکان خارج شدن گروه‌های کروموفور (رنگ‌ساز) از خمیرکاغذ می‌تواند بیشتر رخ دهد، لذا بهبود درجه روشنی و سفیدی کاغذ می‌تواند قابل توجیه باشد. در این راستا نتایج گزارش شده در مورد مرکب‌زدایی و قابلیت رنگ‌بری کاغذ روزنامه باطله با مخلوط آنزیم‌های سلولاز- همی‌سلولاز حاکی از آن بوده که استفاده از مخلوط آنزیم موجب افزایش ویژگی‌های نوری (بعد از مرکب‌زدایی و رنگ‌بری) و مکانیکی کاغذ (تنها بعد از مرکب‌زدایی) می‌شود. در مجموع میزان مصرف ۰/۰۵ درصد برای خمیرکاغذ مرکب‌زدایی شده و رنگ‌بری نشده و مصرف ۰/۵ درصد برای خمیرکاغذ مرکب‌زدایی شده و رنگ‌بری شده برای تأمین نیازمندی‌های کاغذ روزنامه (مطابق با استاندارد SNI 14-0091-1998) توصیه شده است [۷].

[1] Accessibility



شکل ۱- تأثیر رنگ‌بری با پراکسید بر ویژگی‌های نوری خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده با آنزیم همی‌سلولاز و مرکب‌زدایی شده شیمیایی

استفاده از پراکسید هیدروژن در رنگ‌بری خمیرکاغذ بازیافتی با توجه به افزایش آب‌دوستی، انعطاف‌پذیری و سطح اتصال بین الیاف درنتیجه انحلال قلیایی لیگنین با توجه به قرارگیری بیشتر الیاف در معرض محیط قلیایی منجر به بهبود درجه روشنی و ویژگی‌های مقاومتی خمیرکاغذهای رنگ‌بری شده نسبت به خمیرکاغذ مرکب‌زدایی شده می‌شود. در رنگ‌بری با پراکسید هیدروژن به دلیل تخریب گروه‌های رنگ‌ساز موجود در ساختار لیگنین ضمن واکنش یون پرهیدروکسیل (HOO^-) به‌عنوان عامل اصلی تخریب گروه‌های رنگ‌ساز، با ترکیب لیگنین، منجر به بهبود ویژگی‌های نوری کاغذ (بهبود درجه روشنی و کاهش زردی) می‌شود به‌طوری‌که هرچه میزان مصرف پراکسید هیدروژن طی فرآیند رنگ‌بری و یا مدت‌زمان رنگ‌بری افزایش یابد، به دلیل افزایش مقدار گروه‌های کربوکسیل خمیرکاغذ و غلظت یون HOO^- و واکنش بیشتر با لیگنین درنتیجه افزایش میزان تخریب گروه‌های رنگ‌ساز لیگنین، میزان بهبود ویژگی‌های نوری نیز بیشتر خواهد بود [۱۱ و ۱۸]. از طرف دیگر رنگ‌بری با پراکسید هیدروژن همراه با توسعه سطح اتصال بین الیاف و کاهش تفرق و شکست نور الیاف منجر به کاهش ماتی کاغذ می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، استفاده از آنزیم همی‌سلولاز در مرکب‌زدایی خمیرکاغذ بازیافتی منجر به بهبود معنی‌دار ویژگی‌های نوری کاغذ بعد از فرآیند رنگ‌بری شده به‌طوری‌که آنزیم همی‌سلولاز در مرکب‌زدایی خمیرکاغذ بازیافتی به نظر می‌رسد نقش بیشتری در تخریب ساختار لیگنین (در مقایسه با روش متداول شیمیایی) داشته درنتیجه طی فرآیند رنگ‌بری، لیگنین و یا سایر ترکیبات رنگی بیشتری می‌توانند توسط عامل لیگنین‌زدایی HOO^- از خمیرکاغذ خارج شوند درنتیجه ویژگی‌های نوری مطلوب‌تری حاصل شده است. کاهش ضریب جذب نور کاغذهای ساخته‌شده بعد از رنگ‌بری با پراکسید هیدروژن (در مقایسه با خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده) می‌تواند گویای این امر باشد که طی مرحله رنگ‌بری، لیگنین و یا سایر ترکیبات رنگی خارج شده‌اند لذا کاغذهای با ماتی و ضریب جذب نور کمتر حاصل شده است (ضریب جذب نور در مورد نمونه خمیرکاغذهای H_2T_3 و H_4T_2 به‌ترتیب ۸/۷۲ m^2/kg و ۹/۴۳ m^2/kg به‌دست آمده است درحالی‌که برای نمونه خمیرکاغذ C این مقدار ۱۱/۵۷ m^2/kg تعیین شد. از طرف دیگر افت ماتی کاغذها بعد رنگ‌بری را می‌توان به توسعه سطح اتصال بین الیاف (ضمن خروج لیگنین) درنتیجه کاهش ضریب پخش نور کاغذ نسبت داد. خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده با آنزیم همی‌سلولاز در مجموع بعد از رنگ‌بری، ماتی و ضریب جذب نور کمتری را در مقایسه با روش متداول شیمیایی نشان دادند و این نتیجه بیانگر خروج بیشتر گروه‌های رنگ‌ساز لیگنین و سایر ترکیبات رنگی خمیرکاغذ درنتیجه بهبود درجه روشنی و سفیدی کاغذ است [۹].

ویژگی‌های مقاومتی

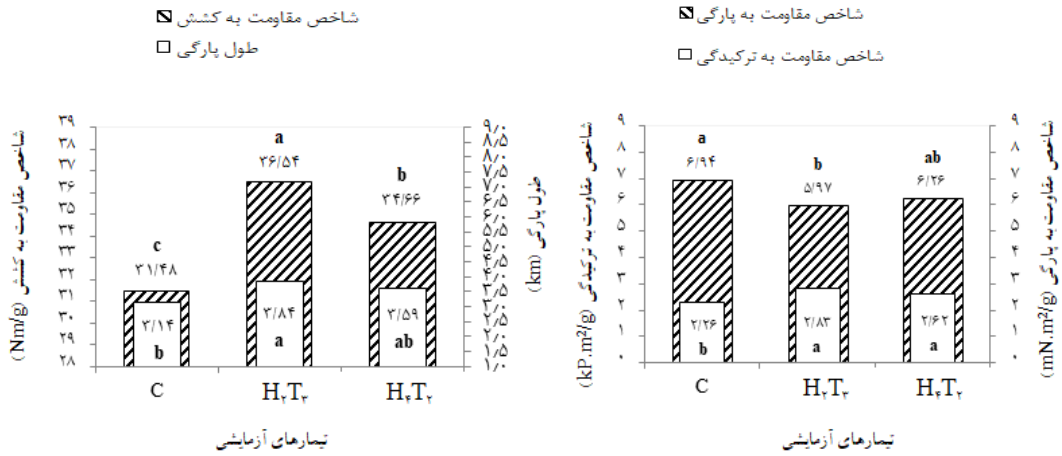
نتایج ارزیابی تأثیر رنگ‌بری با پراکسید هیدروژن بر ویژگی‌های شاخص‌های مقاومت به کشش خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده با آنزیم همی‌سلولاز و روش متداول شیمیایی نشان داد که این ویژگی به‌طور مثبت تحت تأثیر قرارگرفته و اختلاف این مقادیر به لحاظ آماری در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بوده است (جدول ۱۰ پیوست). درمجموع نتایج به‌دست آمده بیانگر آن است که استفاده از آنزیم همی‌سلولاز در مرحله مرکب‌زدایی در مقایسه با مواد شیمیایی متداول (سیستم متداول صنعتی)، کاغذهای با شاخص‌های مقاومت به کشش و ترکیدگی بیشتری را بعد از مرحله رنگ‌بری نتیجه داده است (شکل ۲). شاخص مقاومت به کشش کاغذ حاصل از خمیرکاغذ مرکب‌زدایی شده شیمیایی بعد از رنگ‌بری به میزان ۱۰/۱۷ درصد و شاخص مقاومت به ترکیدگی کاغذ به میزان ۱۶ درصد بهبود یافته اما این شاخص‌ها به لحاظ کمی در مقایسه با سایر تیمارهای آنزیمی مورد بررسی کمتر می‌باشند. در تیمارهای آنزیمی H_2T_3 و H_4T_2، درصد افزایش شاخص مقاومت به کشش به‌ترتیب ۱۳/۲۲ درصد و ۱۲/۵۹ درصد و درصد افزایش شاخص مقاومت به ترکیدگی به‌ترتیب به میزان ۳/۶۶ درصد و ۶/۲۲ درصد به‌دست آمد.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، رنگ‌بری خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده با آنزیم همی‌سلولاز درمجموع منجر به تولید کاغذهای با شاخص مقاومت به کشش به‌مراتب بیشتر شده است. در رنگ‌بری با پراکسید هیدروژن دو دلیل برای بهبود ویژگی‌های مقاومتی کاغذ وجود دارد که عبارت‌اند از: الف- درهم‌ریختگی[1] حفره الیاف در اثر لیگنین‌زدایی و انحلال سایر ترکیبات چوب مانند همی‌سلولز، سطح تماس بین الیاف را افزایش داده درنتیجه با تقویت اتصال بین الیاف، ویژگی‌های مقاومتی کاغذ مثل شاخص‌های مقاومت به کشش و ترکیدگی بهبود می‌یابد. ب- محیط قلیایی فرآیند رنگ‌بری موجب افزایش واکشیدگی الیاف سلولزی و سطح ویژه الیاف شده درنتیجه مقاومت کلی کاغذ بهبود می‌یابد [۱۴ و ۱۹]. نتایج بررسی کریستالیته خمیرکاغذ رنگ‌بری شده از کاغذ روزنامه باطله نشان داد که در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد، کریستالیته الیاف به دلیل انحلال سلولز منطقه آمورف یا انحلال و افت ترکیبات غیرسلولزی (مانند همی سلولزها و لیگنین) طی فرآیند رنگ‌بری افزایش می‌یابد [۱۴]. زمانی که میزان مصرف پراکسید هیدروژن و هیدروکسید سدیم به ۴ درصد و ۲ درصد افزایش یابد، شاخص کریستالیته الیاف به‌ترتیب ۳/۴ و ۳/۸ درصد افزایش یافت. همچنین ویژگی‌های مرفولوژیکی سطح الیاف خمیرکاغذهای رنگ‌بری شده با پراکسید هیدروژن در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای نشان داد به‌طوری‌که سطح الیاف خمیرکاغذ بعد از رنگ‌بری زبرتر شده و فیبریل‌های بیشتری هم در سطح الیاف مشاهده شده است و این نتیجه می‌تواند بیانگر لیگنین‌زدایی در سطح الیاف باشد [۱۴]. بنابراین افزایش نسبی کریستالیته الیاف خمیرکاغذ و همچنین توسعه فیبریل‌های سطحی الیاف طی فرآیند رنگ‌بری با پراکسید هیدروژن می‌تواند ازجمله دلایل احتمالی بهبود شاخص‌های مقاومت به کشش و ترکیدگی خمیرکاغذ رنگ‌بری شده باشد.

رنگ‌بری خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده به روش‌های مختلف منجر به کاهش شاخص مقاومت به پارگی کاغذ شده و درصد کاهش پارگی در خمیرکاغذهای مختلف موردبررسی متفاوت بوده است. درصد افت شاخص مقاومت به پارگی در خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده با آنزیم‌ها در مجموع کمی کمتر از خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده با مواد شیمیایی متداول بوده است (شکل ۲). این نتیجه بیانگر آن است که طی مرکب‌زدایی با آنزیم‌ها، الیاف خمیرکاغذ بیش از مواد شیمیایی متداول مرکب‌زدایی تحت تأثیر قرار گرفته و طی رنگ‌بری با پراکسید هیدروژن کمی بیشتر تخریب شده‌اند و یا این‌که پس از رنگ‌بری، سطح تماس بین الیاف در خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده با آنزیم‌ها نسبتاً بیشتر افزایش یافته درنتیجه با افزایش سطح اتصال بین الیاف، شاخص مقاومت به پارگی کاغذ با افت بیشتری مواجه شده است. در تیمارهای آنزیمی همی‌سلولاز یعنی H_2T_3 و H_4T_2، درصد کاهش شاخص مقاومت به پارگی کاغذ به‌ترتیب ۱۲/۴۵ درصد و ۸/۰۶ درصد تعیین شده است این در حالی است که درصد افت پارگی کاغذ پس از رنگ‌بری

[1] Collapse

خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده شیمیایی (۴/۴۴ درصد) کمتر بوده و این نتیجه می‌تواند بیانگر آن باشد که الیاف این خمیرکاغذها با توجه به تخریب احتمالی کمتر در مرحله مرکب‌زدایی به مواد شیمیایی رنگ‌بر حساسیت کمتری نشان دادند. در این رابطه Chen و همکاران (۲۰۱۵) گزارش دادند که پس از رنگ‌بری خمیرکاغذ روزنامه بازیافتی با پراکسید هیدروژن، شاخص مقاومت به پارگی کاغذ با افت حدود ۲ واحد، به‌طور متوسط ۸ درصد کاهش یافت اما افزایش شاخص مقاومت به کشش کاغذ (درنتیجه توسعه سطح اتصال بین الیاف) حدود ۲۲ درصد حاصل شد. در این رابطه نتایج بررسی متوسط طول الیاف و میزان نرمه خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده پس از رنگ‌بری با پراکسید هیدروژن نیز حاکی از آن بوده که متوسط طول الیاف و میزان نرمه خمیرکاغذ کمی کاهش می‌یابد لذا می‌توان انتظار داشت که تحت شرایط مطلوب در رنگ‌بری با پراکسید هیدروژن، افزایش سطح اتصال بین الیاف به‌مراتب بیشتر از اثر تخریبی آن بر مقاومت ذاتی الیاف بوده اما تحت شرایط شدید رنگ‌بری، نسبت کاهش مقاومت ذاتی الیاف به دلیل کاهش متوسط طول الیاف بیشتر از بهبود احتمالی سطح اتصال بین الیاف خواهد بود چون الیاف کوتاه‌تر در مقایسه با الیاف بلندتر مقاومت کمتری به پارگی نشان می‌دهد لذا شاخص مقاومت به پارگی کاغذ کاهش می‌یابد [۱۴].



شکل۲- تأثیر رنگ‌بری با پراکسید بر ویژگی‌های مقاومتی خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده با آنزیم همی‌سلولاز و مرکب‌زدایی شده شیمیایی

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر استفاده از پیش تیمار آنزیمی به‌عنوان یک راه‌کار مؤثر برای اصلاح ویژگی‌های الیاف بازیافتی مطرح شده است. در این پژوهش، قابلیت رنگ‌بری خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده با آنزیم همی‌سلولاز (تحت شرایط بهینه تعیین شده) با استفاده از سیستم رنگ‌بری با پراکسید هیدروژن در مقایسه با روش متداول شیمیایی ارزیابی شد. براساس نتایج به‌دست آمده، خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده به روش‌های آنزیمی و شیمیایی، ویژگی‌های متفاوتی را طی فرآیند رنگ‌بری نشان داد به‌طوری که قابلیت رنگ‌بری خمیرکاغذهای مرکب‌زدایی شده با همی‌سلولاز بهتر از خمیرکاغذهای رنگ‌بری شده پس از مرکب‌زدایی شیمیایی بوده و کاغذهای حاصل از درجه روشنی و سفیدی بیشتر و همچنین زردی کمتر برخوردار بودند اما ماتی این کاغذها در اثر رنگ‌بری کاهش یافته که با توجه به خروج احتمالی بیشتر گروه‌های رنگ‌ساز لیگنین و سایر ترکیبات رنگی و همچنین توسعه بیشتر سطح اتصال بین الیاف و بهبود درجه روشنی و سفیدی کاغذ قابل توجیه می‌باشد. اعمال پیش‌تیمار آنزیمی همی‌سلولاز (H_2T_3 تیمار آزمایشی) قبل از مرحله رنگ‌بری، به‌نظر می‌رسد نقش بیشتری در تخریب ساختار لیگنین داشته درنتیجه طی فرآیند

رنگ‌بری، لیگنین و یا سایر ترکیبات رنگی بیشتری از خمیرکاغذ خارج می‌شوند درنتیجه ویژگی‌های نوری مطلوب‌تری حاصل شده است. همچنین با استفاده از پیش تیمار آنزیمی همی‌سلولاز در مرحله مرکب‌زدایی، کاغذهای با شاخص‌های مقاومت به کشش و ترکیدگی بیشتری بعد از مرحله رنگ‌بری در مقایسه با مواد شیمیایی متداول حاصل شده است. رنگ‌بری خمیرکاغذ مرکب‌زدایی شده شیمیایی منجر به بهبود ۱۰/۱۷ درصد و ۱۶ درصد در شاخص‌های مقاومت به کشش و ترکیدگی کاغذ شده اما این شاخص‌ها به‌لحاظ کمی در مقایسه با سایر تیمارهای آنزیمی همی‌سلولاز کمتر می‌باشند. این درحالی است که در تیمارهای آنزیمی H_2T_3 و H_4T_2، میزان افزایش شاخص مقاومت به کشش به‌ترتیب ۱۳/۲۲ درصد و ۱۲/۵۹ درصد و درصد افزایش شاخص مقاومت به ترکیدگی به‌ترتیب به میزان ۳/۶۶ و ۶/۲۲ درصد به‌دست آمد. آنزیم‌های همی‌سلولاز با تأثیر بر روی خمیرکاغذ بازیافتی و جداسازی زایلن و بازتر شدن الیاف، امکان حمله شیمیایی و یا دسترس‌پذیری الیاف توسط مواد شیمیایی رنگ‌بر را میسر می‌سازد. براساس نتایج کلی به‌دست آمده از مقایسه ویژگی‌های کیفی کاغذهای ساخته شده از خمیرکاغذهای مختلف رنگ‌بری شده، تیمار آنزیمی H_2T_3 در مجموع ویژگی‌های نوری و مقاومتی به‌مراتب بهتری را نتیجه داده است.

منابع

[1] Akbarpour, I. and Resalati, H., 2013. The effect of cellulase enzyme on physical properties and drainability of OCC pulp. Iranian Journal of Forest and Wood Products, 67(1):133-145. (In Persian)

[2] Akbarpour, I. and Resalati, H., 2011. The Effect of different concentrations of cellulase enzyme on optical and physical properties of ONP deinked pulp. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 2(1):1-15. (In Persian)

[3] Bajpai, P.K., 2010. Solving the problems of recycled fiber processing with enzymes. Bioresources, 5(2): 1-15.

[4] Akbarpour, I., Ghasemian, A., Resalati, H. and Saraeian, A., 2018. Biodeinking of mixed ONP and OMG waste papers with cellulase. Cellulose Journal, 25(2): 1265-1280.

[5] Akbarpour, I., and Resalati, H., 2022. The effect of enzymatic pre-treatment with amylase and refining on the physical and dewatering properties of OCC pulp. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 12(4):507-519. (In Persian)

[6] Bhardwaj, N.K., Bajpai, P. and Bajpai, P.K., 1996. Use of enzyme modification of fibers for improved breathability. Journal of Biotechnology, 51:21-26.

[7] Rismijana, J., Nasomei, L. and Pitriyani, T., 2003. Penggunaan Enzim Selulase-Hemiselulase pada Proses Deinking Kertas Koran Bekas. Jurnal Matematika dan Sains, 8(2): 67-71.

[8] Zhang, X., Renaud, S. and G Paice, M., 2011. Cellulase deinking of fresh and aged recycled newsprint/magazines (ONP/OMG). Enzyme and Microbial Technology Journal, 43(2):103-108.

[9] Akbarpour, I., Ghasemian, A., Resalati, H., Saraeyan, A.R. and Jahan Latibari, A., 2016. Upgrading the qualitative characteristics of mixed recycled ONP and OMG pulps with Hemicellulase. Journal of Forest and Wood Products, 69 (3): 585-602. (In Persian)

[10] Ibara, D., Monte, M.C., Blanco, A., Martinez, A.T. and Martinez, M.J., 2012. Enzymatic deinking of secondary fibres: cellulases/hemicellulases versus laccase mediator system. Indian Microbiology and Biotechnology Journal, 39, 1–9.

[11] Bhardwaj, N.K. and Nguyen, K.L., 2005. Charge aspects of hydrogen peroxide bleached de-inked pulps. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 262:232–237.

[12] Kapoor, M., Kapoor, R.K. and Kuhad, R.C., 2007. Differential and synergistic effects of xylanase and laccase mediator system (LMS) in bleaching soda and waste pulps. Journal of Microbiology, 103:305–317.

[13] Xu, Q.H., Wanga, Y.P., Qin, M.H., Fu, Y.J., Li, Z.Q., Zhang, F.S. and Li b, J.H., 2011. Fiber surface characterization of old newsprint pulp deinked by combining hemicellulase with laccase-mediator system. Bioresource Technology, 102:6536–6540.

[14] Chen, Y.M., Wan, J.Q., Ma, Y.W. and Lv, H.L., 2010a. Modification of properties of old newspaper pulp with biological method. Bioresource Technol., 101 (18):7041-7045.

[15] Virk, A.P., Puri, M., Gupta, V., Capalash, N. and Sharma, P., 2013. Combined enzymatic and physical deinking methodology for efficient eco-friendly recycling of old newsprint. PLOS ONE Journal, 8(8): 1-8.

[16] Xu, Q.H., Qin, M.H., Shi, S.L. and Fu, Y.J., 2006. Structural changes in lignin during the deinking of old newsprint with laccase-violuric acid system. Enzyme and microbial technology, 39:969–975.

[17] Blomstedt, M., Asikainen, J., Lahdeniemi, A., Ylonen, T., Paltakari, J. and Hakala, T.K. (2010). Effect of xylanase treatment on dewatering properties of birch kraft pulp. BioResources, 5(2):1164-1177. 1164.

[18] Gullichsen, J. and Hannu, P., 2000. Recycled fiber and deinking, 2nd Edition, 215 pp.

[19] Lee, C.K., Ibrahim, D., Ibrahim, Ch. and, Rosli, W.D.W., 2011. Enzymatic and chemical deinking of mixed office wastepaper and old Newspaper: paper quality and effluent characteristics. BioResources, 6(4):3859-3875.

Investigation on the bleachability of hemicellulase-deinked pulp versus chemical deinking process

Abstract

In this study, the ability to bleaching hemicellulase-deinked pulp was investigated in comparison with conventional chemical method. Initially, the mixed recycled pulp pre-treated with hemicellulase enzyme at different usage and treatment times (under other constant process conditions) at pH range 6.5-7 was bleached and experimental runs included H_2T_3 (usage 0.2% (based on dry weight of recycled pulp); treatment time 60 minutes) and H_3T_2 (usage 0.5%; treatment time 50 minutes) were selected as the best treatments. Then, the selected pulps were bleached using hydrogen peroxide under constant process conditions and their bleachability was compared with conventional chemical pulp. Based on the results achieved, the bleachability of hemicellulase-deinked pulps was better than that of chemically deinked pulp, and the resulting papers had a higher brightness and whiteness as well as less yellowness, but the opacity of these papers was decreased during bleaching. Also, pre-treated pulps with hemicellulase showed the papers with higher tensile and burst indices after bleaching stage so that for H_2T_3 and H_3T_2 enzymatic runs, the increase in tensile index was 13.22% and 12.59%, and in burst index was 3.66% and 6.22%, respectively. However, the tensile and burst indices for chemically deinked pulp after bleaching were improved by 10.17% and 16%, respectively. Also, the reduction in paper tear index for H_2T_3 and H_3T_2 enzymatic runs after bleaching was 12.45% and 8.06%, respectively, compared with chemically deinked pulp (4.44%). Based on the overall results obtained by comparing the quality properties of papers made from different pulps bleached with hydrogen peroxide, the H_2T_3 run has resulted in more bleachability and much better optical and strength properties.

Keywords: Recycled papers, Hemicellulase, Bleachability, Paper quality.

A. Akbarpour[1*]
A. Ghasemian[2]
H. Resalati[3]
A. R. Saraeyan[4]
A. J. Latibari[5]

[1] Assistant Prof., Dept. of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

[2] Associate Prof., Dept. of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

[3] Prof., Dept. of Wood and Paper, Faculty of Wood and Paper Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran

[4] Associate Prof., Dept. of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

[5] Prof., Faculty of Wood and Paper Engineering, Azad University, Karaj, Iran

Corresponding author:
inakbarpour@gau.ac.ir

Received: 2022/07/11
Accepted: 2022/09/12