نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۶۷، شماره ۱، بهار ۱۳۹۲
ص۱۳۳-۱۴۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۳/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۲۶

تأثیر آنزیم سلولاز بر ویژگی‌های فیزیکی و قابلیت زه‌کش خمیرکاغذ OCC

❖ **ایمان اکبرپور*؛** دانشجوی دکتری صنایع خمیر و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکدهٔ مهندسی چوب و کاغذ، گروه صنایع خمیر و کاغذ، گرگان، ایران.
❖ **حسین رسالتی؛** استاد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکدهٔ مهندسی چوب و کاغذ، گروه صنایع خمیر و کاغذ، گرگان، ایران.

Archive of SID

چکیده

این تحقیق برای ارزیابی پتانسیل آنزیم سلولاز در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و قابلیت زه‌کش خمیرکاغذ OCC انجام شد. خمیرکاغذ OCC با درصد خشکی ۱۰ درصد، تحت شرایط ثابت درجهٔ حرارت ۵۰°C، مدت‌زمان ۶۰ دقیقه، و محدودهٔ pH ۵/۵ـ۴/۵ در سطوح مختلف ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، و ۰/۵درصد (براساس وزن خشک خمیرکاغذ) با آنزیم سلولاز پیش‌تیمار شد. همچنین، خمیرکاغذهای OCC در زمان‌های مختلف ۳۰، ۹۰، ۱۲۰، و ۱۵۰ دقیقه در غلظت ثابت سلولاز (۰/۳ درصد) به‌طور مجزا پیش‌تیمار آنزیمی شدند. در ادامه، خمیرکاغذهای پیش‌تیمارشده با آنزیم، در دور ثابت ۲۰۰۰ پالایش مکانیکی شدند. نتایج نشان داد پیش‌تیمار آنزیمی بدون اعمال پالایش موجب افزایش درجهٔ روانی خمیرکاغذ به میزان حدود ۲۲ درصد در مقایسه با نمونهٔ شاهد (خمیرکاغذ تیمارنشده با درجهٔ روانی CSF, ۴۷۰ ml) شد. استفاده از ۰/۳ و ۰/۵ درصد به‌طور مشترک بیشترین درجهٔ روانی (CSF, ۶۰۰ ml) را نتیجه داد. با افزایش مصرف آنزیم سلولاز از ۰/۰۵ درصد به ۰/۳ درصد، کاغذهای با ضخامت کمتر و دانسیتهٔ بیشتر حاصل آمد و در مصرف بیشتر (۰/۵ درصد) دانسیتهٔ کاغذ کاهش یافت. در خمیرکاغذ OCC پالایش‌نشده، استفاده از زمان کوتاه‌تر تیمار آنزیمی (۳۰ تا ۶۰ دقیقه)، خمیرکاغذهای با دانسیته و مقاومت به عبور هوای بیشتری را نتیجه داد. حداکثر درجهٔ روانی خمیرکاغذ (CSF, ۶۴۵ ml) در مدت‌زمان ۹۰ دقیقه به‌دست آمد. افزایش مصرف آنزیم همراه با پالایش، موجب بهبود درجهٔ روانی خمیرکاغذ شد و بهترین سطح مصرف آنزیم در محدودهٔ ۰/۱ـ۰/۰۵ درصد پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: آنزیم سلولاز، پالایش خمیرکاغذ، خمیرکاغذ OCC، قابلیت زه‌کش، ویژگی‌های فیزیکی.

* نویسندهٔ مسئول تلفن: ۰۹۱۱۳۵۳۴۸۰۹
Email: iman.akbarpour@gmail.com

www.SID.ir

مقدمه

خمیرکاغذهای بازیافتی، به‌ویژه کارتن‌های کنگره‌ای کهنه (OCC)[1]، به‌دلیل فراوانی، تنوع فراوان، و در دسترس‌بودن زیاد جایگزین بسیار مناسبی برای مواد چوبی‌اند و مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی زیادی دارند. استفاده از خمیرکاغذ OCC به‌دلیل تغییرات عمده در کیفیت اتصال بین الیاف و همچنین مقاومت زیاد به زه‌کش موجب کاهش کیفیت خمیرکاغذ نهایی می‌شود [۱، ۲].

آنزیم‌ها به‌عنوان فرآوردهٔ سبز و ترکیب طبیعی مزیت مهمی در فرایند بازیافت کاغذ باطله دارند و اثر مخرب زیست‌محیطی کمی دارند. نیز پتانسیل زیادی برای حل مشکلات مربوط به استفاده از الیاف بازیافتی دارند؛ به‌طوری که چندین آزمایش صنعتی، کارآمدی تیمار آنزیمی در مرکب‌زدایی، اصلاح ویژگی‌های الیاف، بهبود قابلیت زه‌کش، پالایش خمیرکاغذ، و کنترل مواد چسبنده را در عمل‌آوری الیاف بازیافتی گزارش کرده‌اند [۳ــ۶]. در فرایند پالایش، عمل لیفچه‌ای‌شدن الیاف صورت می‌گیرد و این عمل با برش الیاف و کوتاه‌شدن نسبی طول الیاف همراه است که در اکثر موارد، به‌ویژه در مورد خمیرکاغذ OCC، بسیار نامطلوب تلقی می‌شود. بنابراین، ریزلیفچه‌ای‌شدن الیاف بدون گذراندن پالایش‌های مکانیکی زیاد اهمیت چشمگیری دارد، زیرا با وجود چنین ضعف‌هایی، اگر تحت تأثیر پالایش زیاد قرار گیرد، میزان نرمهٔ الیاف هم زیاد می‌شود و در نتیجه به تولید خمیرکاغذی بسیار ضعیف و با خواص آب‌گیری نامطلوب منجر می‌شود. از این رو، برای کاهش یا خنثی‌کردن آثار پالایش هم می‌توان از آنزیم‌ها به‌عنوان راهکاری مؤثر استفاده کرد، زیرا آنزیم‌ها می‌توانند عمل پالایش را با ملایمت بیشتر و در عین حال با حفظ میانگین طول الیاف تأمین کنند. بنابراین، پالایش آنزیمی می‌تواند جایگزین پالایش مکانیکی و موجب کاهش انرژی مصرفی پالایش شود که در توجیه اقتصادی واحدهای تولیدی ارزش زیادی دارد [۵].

بررسی‌های به‌عمل‌آمده از تیمار آنزیمی (آنزیم غنی از سلولاز)[2] و تیمار مکانیکی بر خمیرکاغذ شیمیایی در دو نوع ترکیب خمیرکاغذ کرافتِ هرگز رنگبری‌نشده[3] و خمیرکاغذ کرافتِ کمی رنگبری‌شده[4] نشان داد تیمار آنزیمی بی اینکه موجب کاهش معنی‌داری طول الیاف شود، زمان پالایش را کوتاه‌تر می‌کند و میزان زه‌کش بهتری را نتیجه می‌دهد [۷].

نتایج استفاده از آنزیم‌های تجاری مختلف در ارتقای کیفیت الیاف بازیافتی OCC نشان داد تمامی تیمارهای آنزیمی به‌کارگرفته‌شده قادر به بهبود قابلیت زه‌کش خمیرکاغذند. در اکثر موارد، این بهبود با افت مقاومت کاغذ نیز همراه بوده است [۸]. همچنین، تأثیر تیمار آنزیمی و پالایش الیاف دست دوم (تیمار الیاف با آنزیم سلولاز تجاری به‌تنهایی و در ترکیب با مرحلهٔ پالایش) را بر بهبود خواص خمیرکاغذ بازیافتی برای تولید کاغذ مقوا نشان داد که سلولاز قابلیت آب‌گیری الیاف بازیافتی را به‌طور مؤثر بهبود می‌بخشد، اما این بهبودی همراه با اثر جدی بر مقاومت خمیرکاغذ بوده است. این اثر به عمل آنزیم بر روی سطح الیاف، پوست‌کنی[5] بیرونی فیبریل‌های سلولزی آب‌دوست، هیدرولیز نرمه‌ها، و تغییر خواص سطحی الیاف نسبت داده شده است [۹].

نتایج بررسی تأثیر دو نوع آنزیم تجاری Pergalase A40(مخلوط سلولاز و همی‌سلولاز حاصل از قارچ Trichoder reesei) و همچنین IndiAge Super L (اندوگلوکاناز خالص III) بر درجهٔ روانی خمیرکاغذ و ویژگی‌های مکانیکی

1. Old Corrugated Container

2. Cellulase-rich enzyme
3. Never bleached kraft pulp (NBKP)
4. Low bleached kraft pulp (LBKP)
5. Debarking

Archive of SID

www.SID.ir

کاغذهای بازیافتی نشان داد که آنزیم Indiage Super L در بهبود درجهٔ روانی مؤثرتر است. همچنین، بر اثر تیمار آنزیمی با هر دو نوع آنزیم، شاخص پارگی کاهش یافت، در حالی که نفوذپذیری هوا، مقاومت‌های کششی، و ترکیدگی بهبود یافتند [۱۰]. نتایج مطالعات آزمایشگاهی استفاده از آنزیم‌های همی‌سلولاز تجاری در مخلوط خمیرکاغذ پهن‌برگ رنگبری‌شدهٔ صنعتی، شامل آکاسیا و مخلوط پهن‌برگان گرمسیری، نشان داد تیمار آنزیمی موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی (۶ـ۳۰ درصد) و بهبود درجهٔ روانی و ویژگی‌های مقاومتی خمیرکاغذ می‌شود [۱۱].

بررسی تأثیر مخلوط آنزیم سلولاز و همی‌سلولاز بر مخلوطی از الیاف خمیرکاغذ OCC، لاینر کرافت، و درصد کمی کاغذ اداریِ سفید نشان داد پیش‌تیمار آنزیمی الیاف بازیافتی درجهٔ روانی اولیهٔ خمیرکاغذ را بدون کاهش مقاومت کششی افزایش می‌دهد. در اکثر آزمایش‌های انجام‌شده با تیمارهای ترکیبی (آنزیم + پالایش)، شاخص مقاومت کششی بیشتر، بهبود معنی‌دار قابلیت زه‌کش، و حداقل مصرف انرژی ویژهٔ پالایش در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد مشاهده شد [۱۲].

ارزیابی‌های انجام‌شده در مورد تأثیر دو نوع آنزیم تجاری Celluclast 1.5 L® (مخلوط سلولاز) و Viscozyme L® (مخلوط آنزیم‌های تجزیه‌کنندهٔ کربوهیدرات)[1] بر ویژگی‌های مقاومتی خمیرکاغذ کرافت رنگبری‌شدهٔ گونهٔ اکالیپتوس گلوبولوس[2] با استفاده از مقادیر مختلف آنزیم و زمان‌های مختلف واکنش نشان داد تیمار آنزیمی ویژگی‌های مقاومتی خمیرکاغذ را تحت تأثیر قرار نداد و کمی افزایش اتصال داخلی الیاف مشاهده شد [۱۳].

با توجه به اینکه استفاده از آنزیم‌های سلولزی مثل سلولاز در اصلاح و بهبود ویژگی‌های الیاف کاغذ بازیافتی به‌طور گسترده افزایش یافته است، در این تحقیق آنزیم سلولاز در درصدهای مختلف ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، و ۰/۵ درصد به خمیرکاغذ OCC افزوده شد و تأثیر سطوح مختلف آنزیم مصرفی در حالت بدون پالایش و حالت پالایش‌شده (۲۰۰۰ دور) بر ویژگی‌های فیزیکی و قابلیت آبگیری خمیرکاغذ ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

تهیهٔ خمیرکاغذ از OCC

کارتن‌های کنگره‌ای کهنهٔ تهیه‌شده پس از خیس‌خوردن به مدت ۲۴ ساعت، در دستگاه پراکنده‌ساز به مدت ۳ دقیقه با تعداد دور ۳۰۰۰ و درصد خشکی ۵ درصد دفیبره شدند. پس از آب‌گیری خمیرکاغذ حاصل بر روی غربال با مش ۲۰۰، تیمارهای آنزیمی با سلولاز در داخل کیسه‌های پلاستیکی در حمام آب گرم تحت شرایط مشخص انجام گرفت.

تیمار آنزیمی با سلولاز

آنزیم‌های تجاری سلولاز به‌صورت محلول از شرکت Sigma Adrich تهیه شد. میکروارگانیسم تولیدکنندهٔ آنزیم سلولاز از قارچ مولد پوسیدگی سفید[3] و فعالیت آن ۷۰۰ EGU/mg بود. خمیرکاغذ OCC تهیه‌شده تحت شرایط ثابت درصد خشکی ۱۰ درصد، درجهٔ حرارت ۵۰°C، به مدت ۱ ساعت، و محدودهٔ pH ۵/۵ـ۴/۵ با استفاده از آنزیم سلولاز در سطوح مصرف ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، و ۰/۵ درصد (به‌ازای وزن خشک خمیرکاغذ) پیش‌تیمار آنزیمی شدند. همچنین، خمیرکاغذ OCC به‌طور جداگانه در زمان‌های مختلف ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، و ۱۵۰ دقیقه در

1. Carbohydrolases
2. Eucalyptus globulus
3. Trichoderma reesei

Archive of SID

غلظت ثابت سلولاز ۰/۳ درصد تیمار آنزیمی شدند. در تمامی تیمارهای آنزیمی تنظیم pH خمیرکاغذ با استفاده از محلول اسید سولفوریک ۴ نرمال انجام شد. در پایان تیمارهای آنزیمی برای غیرفعال‌کردن آنزیم باقیمانده در خمیرکاغذ، از پراکسید هیدروژن به میزان ۰/۰۵ درصد (براساس وزن خشک خمیرکاغذ) طی زمان ۱۰ دقیقه استفاده شد. خمیرکاغذ حاصل بر روی مش ۲۰۰ آب‌گیری شد و سپس از آن‌ها کاغذ دست‌ساز آزمایشگاهی ساخته شد.

پالایش خمیرکاغذ

خمیرکاغذهای OCC پیش‌تیمارشده با سطوح مختلف آنزیم سلولاز به کمک پالایشگر آزمایشگاهی PFI mill در دور ثابت ۲۰۰۰ پالایش شدند تا تأثیر پالایش به‌طور جداگانه بر ویژگی‌های کیفی خمیرکاغذهای پیش‌تیمارشده با آنزیم ارزیابی شود. پالایش خمیرکاغذ مطابق با استاندارد تاپی[1] آیین‌نامهٔ T۲۴۷ om-۸۵ انجام شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی کاغذ دست‌ساز

ساخت کاغذهای دست‌ساز (۱۲۰ گرمی) مطابق با آیین‌نامهٔ T۲۰۵ sp-۰۲ و تعیین وزن پایه با آیین‌نامهٔ T۴۱۰ om-۰۲ استاندارد تاپی انجام شد. ویژگی‌های فیزیکی کاغذ شامل ضخامت، مقاومت به عبور هوا، و همچنین درجهٔ روانی خمیرکاغذ (به‌عنوان شاخص ارزیابی قابلیت زه‌کش خمیرکاغذ) به‌ترتیب طبق آیین‌نامهٔ T۴۱۱ om-۰۵، T۵۳۶ om-۰۲، و T۲۲۷om-۰۴ استاندارد تاپی اندازه‌گیری شدند. دانسیتهٔ کاغذها نیز با توجه به نسبت وزن پایهٔ کاغذ به ضخامت آن اندازه‌گیری شدند.

1. TAPPI

آنالیز آماری

از طرح کاملاً تصادفی برای مقایسهٔ داده‌های حاصل از اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی کاغذ و ویژگی آب‌گیری خمیرکاغذ OCC تیمارشده در سطوح مختلف مصرف آنزیم سلولاز و همچنین زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی استفاده شد. تجزیهٔ واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS انجام شد و مقایسهٔ میانگین آن‌ها به کمک آزمون دانکن در سطح اطمینان آماری ۹۹ درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

ارزیابی پالایش و سطوح مختلف آنزیم سلولاز

ضخامت و دانسیتهٔ کاغذ

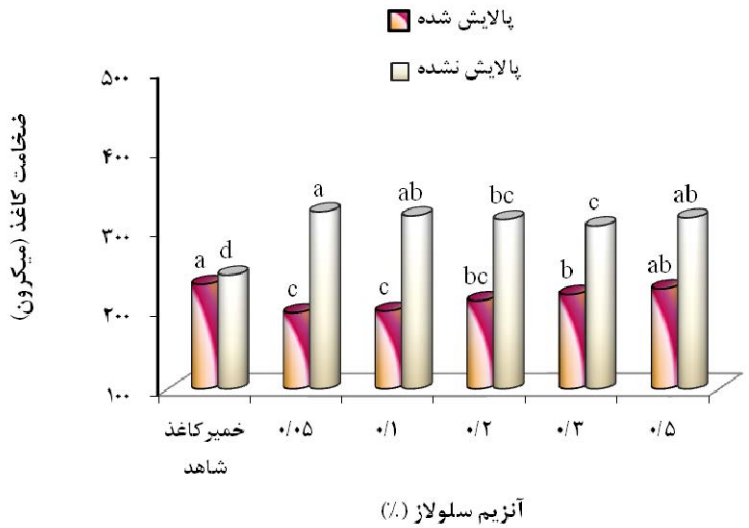
نتایج تجزیهٔ واریانس برای خمیرکاغذهای پیش‌تیمارشده ولی پالایش‌نشده نشان داد استفاده از آنزیم سلولاز در سطوح مختلف موجب حجیم‌ترشدن معنی‌دار (سطح اطمینان آماری ۹۹ درصد) کاغذ یعنی افزایش ضخامت کاغذ در مقایسه با کاغذ نمونهٔ شاهد می‌شود (شکل ۱). افزایش مصرف آنزیم سلولاز از ۰/۰۵ درصد به ۰/۳ درصد به کاهش ضخامت کاغذ منجر شد، اما با استفاده از ۰/۵ درصد، ضخامت کاغذ به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. آزمون دانکن نشان داد که فقط بین مقادیر ضخامت و دانسیتهٔ کاغذ در سطح مصرف ۰/۰۵ با ۰/۳ و همچنین ۰/۰۵ با ۰/۵درصد سلولاز معنی‌دار است. در مجموع، می‌توان گفت با استفاده از ۰/۳درصد سلولاز می‌توان به ضخامت و دانسیتهٔ نزدیک به خمیرکاغذ شاهد رسید، اما این مقدار همچنان در مقایسه با ضخامت کاغذ شاهد کمتر است.

نتایج تأثیر پالایش خمیرهای کاغذ OCC پیش‌تیمارشده با سطوح مختلف سلولاز نشان داد

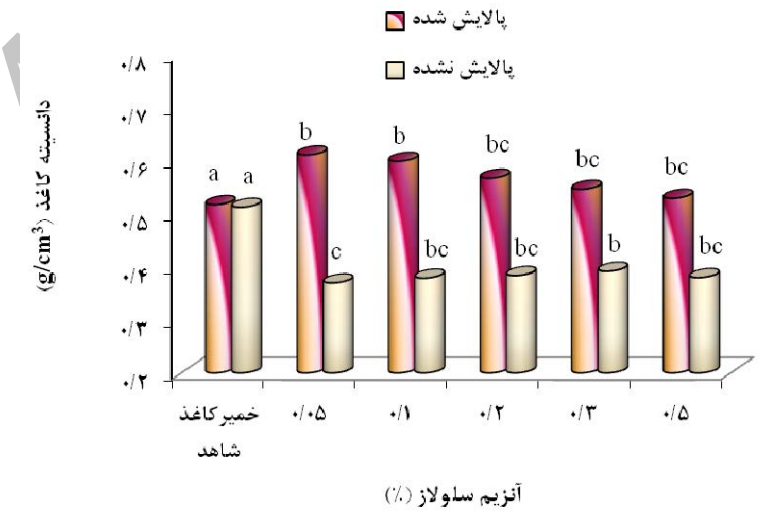
Archive of SID

www.SID.ir

اعمال پالایش (۲۰۰۰ دور) موجب کاهش چشمگیر ضخامت کاغذها شد. هرچه مصرف آنزیم سلولاز افزایش یافت، پالایش خمیرکاغذ موجب حجیم‌ترشدن کاغذ در نتیجهٔ افزایش ضخامت کاغذ شد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که طی پالایش، افت ضخامت و افزایش دانسیتهٔ کاغذ در سطوح مختلف تیمارهای آنزیمی به‌مراتب بیشتر از خمیرکاغذ شاهد است. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، درصد مصرف کمتر آنزیم سلولاز در پیش‌تیمار (۰/۰۵ یا ۰/۱ درصد) عکس‌العمل بهتری را نسبت به پالایش نشان داد و کاغذهای حاصل از آن‌ها دانسیتهٔ بیشتری در مقایسه با کاغذهای نمونهٔ شاهد دارند. بنابراین، گفتنی است مصرف کم آنزیم قبل از پالایش خمیرکاغذ OCC به پالایش‌پذیری بهتر آن کمک می‌کند و درصدهای بیشتر بر دانسیتهٔ نهایی کاغذ تأثیر منفی خواهد داشت.



شکل ۱. تأثیر درصدهای مختلف آنزیم سلولاز بر ضخامت خمیرهای کاغذ OCC پالایش‌نشده و پالایش‌شده با ۲۰۰۰ دور

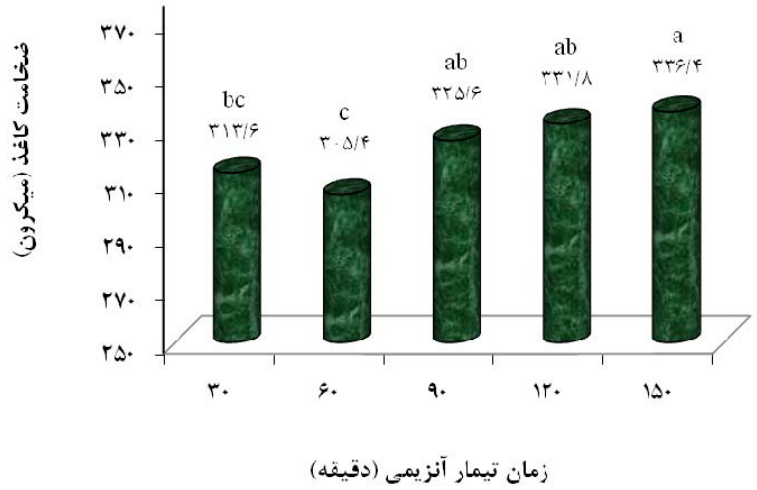


شکل ۲. تأثیر درصدهای مختلف آنزیم سلولاز بر دانسیتهٔ خمیرهای کاغذ OCC پالایش‌نشده و پالایش‌شده با ۲۰۰۰ دور

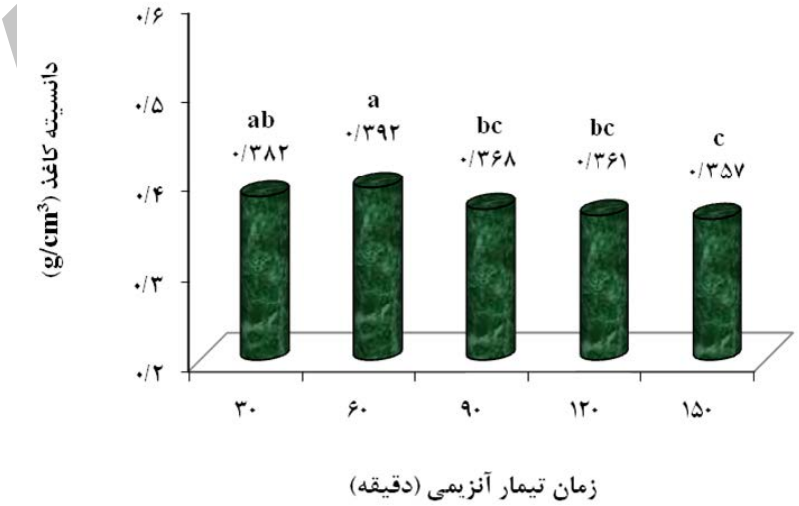
www.SID.ir

تأثیر زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی بر ضخامت و دانسیته

نتایج تجزیهٔ واریانس زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی سلولاز (غلظت ثابت ۰/۳ درصد) بر ضخامت و دانسیتهٔ کاغذهای حاصل از خمیرکاغذ OCC پالایش‌نشده نشان داد افزایش زمان تیمار از ۳۰ دقیقه به ۱۵۰ دقیقه اثر معنی‌داری بر ضخامت و دانسیتهٔ کاغذ در سطح اطمینان آماری ۹۹ درصد دارد (شکل‌های ۳ و ۴). آزمون دانکن این مقادیر را در ۳ گروه مجزا قرار داده است؛ به‌طوری که حداقل ضخامت و حداکثر دانسیته در زمان‌های کوتاه‌تر (۳۰ و ۶۰ دقیقه) مشاهده شده است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که در زمان‌های بیش از ۶۰ دقیقه اثر تخریبی بیشتر شده است؛ بنابراین، ضخامت کاغذ به‌طور صعودی افزایش و به تبع آن دانسیته کاهش یافته است.



شکل ۳. تأثیر زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی با سلولاز بر ضخامت خمیرکاغذ OCC پالایش‌نشده



شکل ٤. تأثیر زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی با سلولاز بر دانسیتهٔ خمیرکاغذ OCC پالایش‌نشده

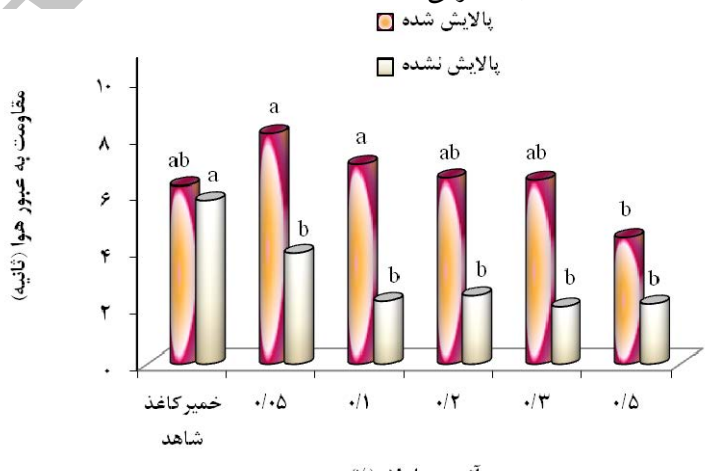
www.SID.ir

مقاومت کاغذ به عبور هوا

نتایج تجزیهٔ واریانس استفاده از تأثیر سطوح مختلف آنزیم سلولاز بر مقاومت به عبور هوای کاغذ در مقایسه با نمونهٔ شاهد نشان داد سلولاز موجب کاهش معنی‌دار مقاومت به عبور هوای کاغذ در سطح اطمینان آماری ۹۹ درصد شد (شکل ۵). افزایش مصرف آنزیم سلولاز از ۰/۰۵ درصد به ۰/۵ درصد تأثیر معنی‌داری را بر مقادیر مقاومت کاغذ به عبور هوا نشان نداد، اما در مجموع درصدهای کمتر آنزیم سلولاز (۰/۰۵ یا ۰/۱ درصد) مقاومت به عبور هوای تا حدودی بیشتر را نتیجه داد. همچنین، اعمال پالایش بر خمیرکاغذهای OCC پیش‌تیمارشده با سطوح مختلف سلولاز موجب افزایش چشمگیر مقاومت کاغذ به عبور هوا شد (شکل ۵). مقدار افزایش مقاومت به عبور هوا در خمیرهای کاغذ تیمارشده با آنزیم به‌مراتب بیشتر از نمونهٔ شاهد است. این نتیجه بیانگر آن است که آنزیم سلولاز بر میزان فیبریله‌شدن و میکروفیبریل‌های سطحی الیاف خمیرکاغذ قبل از پالایش اثر گذاشته و به پالایش‌پذیری بهتر خمیرکاغذ کمک کرده است. با افزایش مصرف آنزیم سلولاز (بیش از ۰/۰۵ درصد)، پالایش تأثیر منفی بر مقاومت کاغذ به عبور هوا نشان داده و این نشانگر آن است که در درصدهای مصرفی زیاد آنزیم، پالایش اثر تخریبی بیشتری بر روی الیاف دارد. به‌طور کلی، اعمال پیش‌تیمار آنزیمی با ۰/۰۵ یا ۰/۱ درصد سلولاز همراه با پالایش مکانیکی، خمیرکاغذ با مقاومت به عبور هوای بیشتری نتیجه خواهد داد.

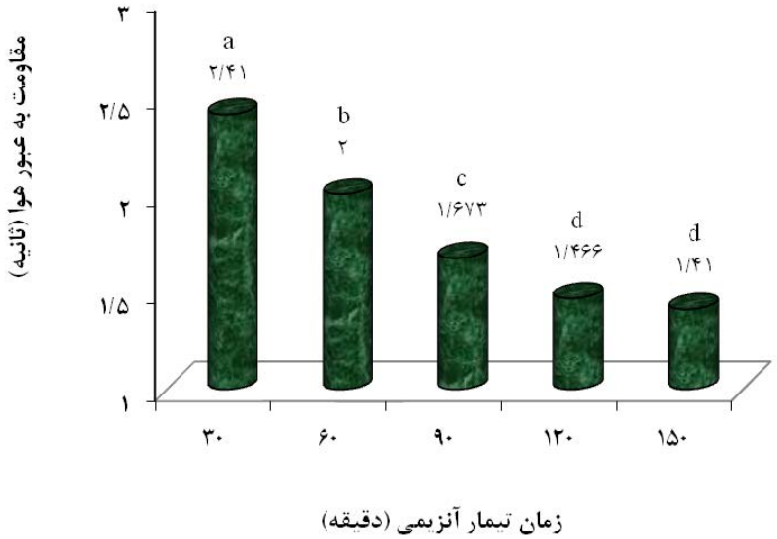
تأثیر زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی بر مقاومت به عبور هوا

نتایج به‌دست‌آمده از تجزیهٔ واریانس زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی سلولاز (غلظت ثابت ۰/۳ درصد) بر مقاومت به عبور هوای کاغذهای ساخته‌شده از خمیرکاغذ OCC پالایش‌نشده حاکی از آن است که با افزایش زمان تیمار از ۳۰ دقیقه به ۱۵۰ دقیقه، مقاومت به عبور هوا به‌طور معنی‌داری (سطح اطمینان آماری ۹۹ درصد) افزایش یافت و آزمون دانکن این مقادیر را در ۴ گروه مجزا قرار داده است (شکل ۶). مشابه با نتایج ضخامت و دانسیتهٔ کاغذ، بیشترین مقاومت به عبور هوا مربوط به زمان‌های کوتاه‌تر (به‌ترتیب ۳۰ و ۶۰ دقیقه) بود و زمان‌های طولانی‌تر به کاهش چشمگیر مقاومت به عبور هوا منجر شد. در زمان‌های تیمار آنزیمی طولانی‌تر، چون کاغذها حجم ویژهٔ بیشتر و خلل و فرج بیشتری دارند، مدت‌زمان عبور هوا کمتر است.



شکل ۵. تأثیر درصدهای مختلف آنزیم سلولاز بر مقاومت به عبور هوای خمیرهای کاغذ OCC پالایش‌نشده و پالایش‌شده با ۲۰۰۰ دور

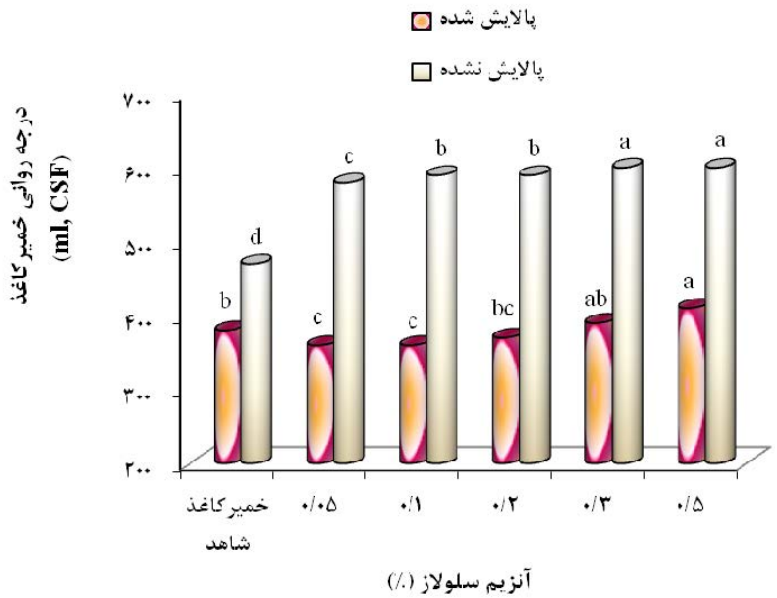
Archive of SID
www.SID.ir



شکل ٦. تأثیر زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی با سلولاز بر مقاومت به عبور هوای خمیرکاغذ OCC پالایش‌نشده

قابلیت زه‌کش (درجهٔ روانی) خمیرکاغذ

تجزیهٔ واریانس مقادیر درجهٔ روانی خمیرکاغذهای پیش‌تیمارشده با سطوح مختلف سلولاز و نمونهٔ شاهد نشان داد استفاده از آنزیم سلولاز موجب بهبود معنی‌دار قابلیت زه‌کش و درجهٔ روانی خمیرکاغذ می‌شود (شکل ۷). سطوح مصرفی بیشتر سلولاز (۰/۳ و ۰/۵ درصد) به‌طور مشترک بیشترین درجهٔ روانی (۶۰۰ ml, CSF) را نتیجه دادند. این مقدار بهبود حاکی از افزایش حدود ۲۲ درصد درجهٔ روانی در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد (۴۷۰ ml, CSF) است. به‌طور کلی، آنزیم‌ها با عمل هیدرولیز انتخابی نرمه‌ها و خروج آن‌ها از اجزای خمیرکاغذ موجب بهبود قابلیت زه‌کش خمیرکاغذ می‌شوند.



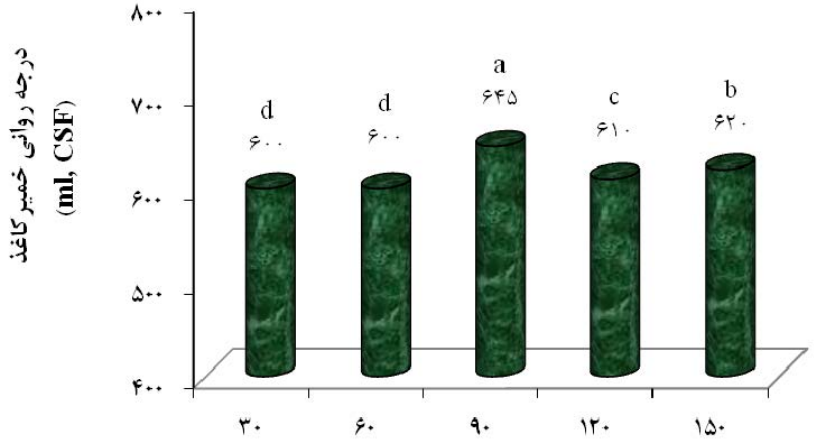
شکل ۷. تأثیر درصدهای مختلف آنزیم سلولاز بر درجهٔ روانی خمیرهای کاغذ OCC پالایش‌نشده و پالایش‌شده با ۲۰۰۰ دور

www.SID.ir

نتایج تأثیر پالایش خمیرکاغذهای OCC نشان داد پیش‌تیمار آنزیمی با سلولاز در بهبود درجهٔ روانی خمیرکاغذ مؤثر است (شکل ۷). با توجه به اینکه در جریان پالایش، بخشی از الیاف خمیرکاغذ به نرمه تبدیل می‌شود، در نتیجه، کاهش درجهٔ روانی خمیرکاغذ به‌دلیل افزایش میزان نرمه‌های تولیدی و افزایش جذب آب خمیرکاغذ توجیه‌پذیر است. افت درجهٔ روانی بر اثر پالایش خمیرکاغذ شاهد خیلی کمتر از خمیرکاغذهای پیش‌تیمارشده با سلولاز بود. با اعمال پیش‌تیمار آنزیمی سلولاز در سطوح مختلف همراه با پالایش می‌توان حدود ۱۹۰ تا ۲۳۰ واحد درجهٔ روانی را کاهش داد؛ در حالی که در مورد نمونهٔ شاهد، افت درجهٔ روانی بر اثر پالایش حدود ۹۰ واحد است. با افزایش مصرف آنزیم، اعمال پالایش مکانیکی خمیرکاغذ موجب بهبود درجهٔ روانی می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، استنباط می‌شود نقش آنزیم سلولاز در هیدرولیز نرمه‌های خمیرکاغذ به‌ظاهر بیشتر از ایجاد نرمه‌های تولیدی در جریان پالایش بوده و در نتیجه درجهٔ روانی بهبود یافته است.

تأثیر زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی بر قابلیت زه‌کش خمیرکاغذ

شواهد حاصل از بررسی اثر زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی سلولاز (غلظت ثابت ۰/۳ درصد) نشان داد افزایش زمان تیمار آنزیمی با سلولاز، تغییر معنی‌دار درجهٔ روانی خمیرکاغذهای OCC پالایش‌نشده را در سطح اطمینان آماری ۹۹ درصد نتیجه داده است (شکل ۸). آزمون دانکن درجهٔ روانی خمیرکاغذها را در ۴ گروه مجزا قرار داده؛ به‌طوری که حداکثر درجهٔ روانی در مدت‌زمان ۹۰ دقیقه (۶۴۵ ml, CSF)، و کمترین مقدار آن به‌طور مشترک در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه (۶۰۰ ml, CSF) به‌دست آمده است. این نتایج بیانگر آن است که در زمان‌های کوتاه‌تر تیمار آنزیمی، مقدار اثر آنزیم در هیدرولیز نرمه‌ها بیشتر از اثر فیبریله‌شدن است. بنابراین، با جداشدن نرمه‌های بیشتر (به‌دلیل سطح ویژهٔ بیشتر)، قابلیت آب‌دوستی خمیرکاغذ کاهش و در نتیجه درجهٔ روانی خمیرکاغذ بهبود یافت. اما در زمان طولانی‌تر، اثر آنزیم بیشتر ایجاد نرمه بر اثر مکانیسم تخریبی است؛ در نتیجه، در زمان‌های طولانی‌تر (۱۲۰ و ۱۵۰ دقیقه) درجهٔ روانی روند کاهشی را نتیجه داده است.



شکل ۸. تأثیر زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی با سلولاز بر درجهٔ روانی خمیرکاغذ OCC پالایش‌نشده

Archive of SID
www.SID.ir

نتیجه‌گیری

استفاده از آنزیم سلولاز در خمیرکاغذ OCC بدون اعمال پالایش موجب ضخیم‌ترشدن، حجیم‌ترشدن، و مقاومت کمتر کاغذ به عبور هوا شد. کاهش دانسیته و مقاومت به عبور هوا را می‌توان به کاهش احتمالی نرمه‌های خمیرکاغذ بر اثر مکانیسم هیدرولیز انتخابی توسط آنزیم سلولاز نسبت داد؛ به‌طوری که به‌دلیل کاهش نرمه‌های الیاف و کاهش اتصالات بین الیاف، دانسیتهٔ کاغذ و به تبع آن مقاومت به عبور هوای کاغذ کاهش می‌یابد. به‌طور کلی، تیمارهای آنزیمی با سلولاز عامل تخریب‌کنندهٔ الیاف گزارش شده و موجب کاهش مقاومت کاغذ می‌شود. تیمارهای سلولزی با سلولاز فقط در بعضی موارد، آن هم به‌طور نادر می‌تواند کمی تغییرات مطلوب در مورفولوژی الیاف، یعنی انعطاف‌پذیری و قابلیت درهم‌ریختگی الیاف[1] ایجاد کند که این تغییرات موجب بهبود شکل‌پذیری الیاف[2]، اتصال بین الیاف، و استحکام شبکهٔ ورقهٔ کاغذ می‌شود [۱]. تیمار سلولاز موجب هیدرولیز میکروفیبریل‌های سطحی الیاف شد که این موجب می‌شود الیاف ساختار نرم‌تر و حجیم‌تری پیدا کند که در نتیجهٔ این تغییرات، خمیرکاغذ پالایش‌پذیرتر می‌شود [۷]. زمانی که مصرف آنزیم سلولاز از ۰/۰۵ درصد به ۰/۳درصد افزایش یافته، به‌نظر می‌رسد سلولاز با توسعهٔ فیبریله‌شدن و افزایش میکروفیبریل‌های سطحی و انعطاف‌پذیری الیاف، کیفیت اتصال و تعداد اتصالات بین الیاف را بهبود بخشیده و در نتیجه کاهش ضخامت، افزایش دانسیته، و مقاومت به عبور هوای کاغذ را می‌توان به این دلایل نسبت داد.

درجهٔ روانی شاخص ظرفیت جذب و نگه‌داری آب الیاف و سرعت آب‌گیری خمیرکاغذ است. این شاخص در مورد خمیرکاغذهای OCC، که نرمهٔ بیشتر و همچنین مشکل زمان آب‌گیری دارند، اهمیت بیشتری دارد [۱۴]. استفاده از سطوح مختلف سلولاز موجب بهبود درجهٔ روانی خمیرکاغذ به میزان حدود ۲۲ درصد در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد شده است. شایان ذکر است آنزیم‌ها با عمل هیدرولیز انتخابی نرمه‌ها (ترکیبات با سطح ویژه و قابلیت دسترس‌پذیری بیشتر) و خروج آن‌ها از اجزای خمیرکاغذ موجب کاهش جذب آب آن در نتیجهٔ بهبود قابلیت زه‌کش می‌شوند. زمانی که مصرف آنزیم افزایش یافت، می‌توان استنباط نمود که شدت عمل هیدرولیز نرمه‌ها هم کمی افزایش یافته است و بنابراین می‌توان بهبود معنی‌دار درجهٔ روانی را انتظار داشت. بهبود درجهٔ روانی خمیرکاغذ OCC با نتایج سایر محققان در مورد خمیرکاغذ OCC [۵، ۱۲] و همچنین نتایج گزارش‌شده در مورد خمیرکاغذ APMP صنوبر [۷] مطابقت دارد. افزایش درجهٔ روانی می‌تواند قابلیت واحدهای آماده‌سازی الیاف بازیافتی و در نتیجه سرعت ماشین کاغذ و میزان رقیق‌سازی خمیرکاغذ را در هدباکس افزایش دهد و در نهایت کاغذ با کیفیت بهتری نتیجه دهد. علاوه بر این، افزایش درجهٔ روانی با استفاده از تیمارهای آنزیمی تحت شرایط بهینه می‌تواند آثار ثانویهٔ سودمندی مثل افزایش قابلیت اعتماد[3] ماشین کاغذ را داشته باشد [۵].

ارزیابی به‌عمل‌آمده از تأثیر زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی سلولاز در غلظت ثابت سلولاز ۰/۳ درصد بر مقادیر ضخامت، دانسیته، و مقاومت کاغذ به عبور هوا در خمیرکاغذ OCC پالایش‌نشده حاکی از آن است که در مدت‌زمان ۶۰ دقیقه، کاغذهای با دانسیته و مقاومت به عبور هوای بیشتر مشاهده شده است. در زمان‌های ۳۰ تا ۶۰ دقیقه، اثر آنزیم بر

1. Collapsibility
2. Conformability
3. Reliability

Archive of SID
www.SID.ir

هیدرولیز انتخابی نرمه‌ها و هم‌زمان فیبریله‌شدن الیاف خمیرکاغذ بود و در نتیجه با بهبود انعطاف‌پذیری الیاف، ضخامت کاغذ کاهش و دانسیتهٔ آن افزایش یافت؛ در حالی که در زمان‌های طولانی‌تر، می‌توان انتظار داشت که مقدار اثر آنزیم سلولاز بر روی الیاف و ایجاد نرمه‌ها بیشتر باشد. به همین دلیل، آنزیم در سطوح زمانی خیلی بیشتر موجب حجیم‌ترشدن کاغذ و کاهش مقاومت به عبور هوا شد. از طرف دیگر، افزایش مدت‌زمان تیمار آنزیمی سلولاز از ۳۰ به ۹۰ دقیقه به افزایش درجهٔ روانی خمیرکاغذهای OCC پالایش‌نشده منجر شد، اما در زمان‌های طولانی‌تر، درجهٔ روانی کمی کاهش یافت. به‌نظر می‌رسد در زمان‌های کوتاه‌تر، آنزیم بیشتر بر روی نرمه‌ها، یعنی بخش‌های با سطح ویژه و قابلیت دسترس بیشتر الیاف عمل کرده و با هیدرولیز آن‌ها موجب کاهش قابلیت جذب خمیرکاغذ و در نتیجه افزایش درجهٔ روانی شده است. این در حالی است که با طولانی‌ترشدن زمان تیمار آنزیمی (یعنی ۱۲۰ و ۱۵۰ دقیقه)، اثر آنزیم بر روی فیبریله‌شدن الیاف بیشتر یا ایجاد نرمه بر اثر مکانیسم تخریبی الیاف (کاهش متوسط طول الیاف) است و به همین دلیل درجهٔ روانی خمیرکاغذ در زمان‌های طولانی‌تر (۱۲۰ و ۱۵۰ دقیقه) کاهش یافت.

پالایش به‌عنوان مهم‌ترین تیمار مکانیکی در کاغذسازی، نقش مؤثری بر ویژگی‌های فیزیکی ورقهٔ کاغذ دارد. از مهم‌ترین تأثیرات پالایش بر ویژگی‌های ساختاری کاغذ علاوه بر کاهش درجهٔ روانی خمیرکاغذ، می‌توان به افزایش مقاومت به عبور هوا و دانسیتهٔ کاغذ بر اثر افزایش میزان پالایش اشاره کرد [۳، ۴]. با توجه به اینکه در جریان پالایش، بخشی از الیاف خمیرکاغذ به نرمه تبدیل می‌شود، در نتیجه کاهش درجهٔ روانی خمیرکاغذ به‌دلیل افزایش میزان نرمه‌های تولیدی و افزایش جذب آب خمیرکاغذ توجیه‌پذیر است (اثر فیبریله‌شدن داخلی و خارجی). از طرف دیگر، نرمه‌های حاصل از پالایش (عمدتاً شامل فیبریل‌های آزادشده از سطح الیاف) به‌دلیل سطح ویژهٔ بسیار بیشتر در مقایسه با الیاف پالایش‌نشده، موجب افزایش اتصال بین الیاف کاغذ در نتیجهٔ افزایش مقاومت به عبور هوای آن می‌شود. انجام پیش‌تیمار آنزیمی موجب شکافتن[1] الیاف و افزایش میزان پیچش[2] آن می‌شود و در نتیجه از شکست بیشتر الیاف طی پالایش بعدی می‌کاهد و ویژگی‌های مقاومتی آن را افزایش می‌دهد [۷]. زمانی که پالایش خمیرکاغذ OCC همراه با تیمارهای آنزیمی باشد، ویژگی‌های فیزیکی بهتری در مقایسه با نمونهٔ شاهد به‌دست خواهد آمد [۵]. نتایج این تحقیق با نتایج تحقیقات باجپای [۵] و کانگ [۱۵] مطابقت دارد. با توجه به افزایش اتصالات داخلی کاغذ، دانسیته و مقاومت ورقهٔ کاغذ افزایش می‌یابد [۶]. با افزایش مصرف آنزیم سلولاز، تأثیر تخریبی تیمار مکانیکی پالایش بر الیاف بیشتر خواهد شد و در نتیجه ساختار الیاف پیش‌تیمارشده با آنزیم، بیشتر تحت تأثیر پالایش قرار می‌گیرد. بنابراین، با تخریب بیشتر ساختار الیاف، شبکهٔ الیاف سست می‌شود که موجب حجیم‌ترشدن بیشتر کاغذ می‌شود. این نتایج با نتایج مطالعات دنیس و همکاران [۱۰] و گیل و همکاران [۱۳] مطابقت دارد. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان داد افت درجهٔ روانی بر اثر پالایش خمیرکاغذ شاهد خیلی کمتر از خمیرکاغذهای پیش‌تیمارشده با سلولاز است. بر اثر پالایش خمیرکاغذهای پیش‌تیمارشده با سطوح مختلف سلولاز، درجهٔ روانی حدود ۱۹۰ تا ۲۳۰ واحد کاهش یافت؛ در حالی که در مورد نمونهٔ شاهد، افت درجهٔ روانی بر اثر پالایش حدود ۹۰ واحد است.

در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت استفاده از

1. Split
2. Torsion

Archive of SID
www.SID.ir

آنزیم سلولاز به‌دلیل اثر تخریبی بر روی الیاف OCC و همچنین اثر هیدرولیز روی نرمه‌های خمیرکاغذ، موجب حجیم‌ترشدن کاغذ می‌شود، اما با افزودن مصرف آن تا سطح ۳/ ۰درصد، به‌دلیل نقش آنزیم در فیبریله‌کردن الیاف و تقویت اتصالات بین الیاف، می‌توان به لحاظ فیزیکی به کاغذ نزدیک با خمیرکاغذ شاهد رسید. اعمال پالایش مکانیکی در مورد خمیرکاغذهای پیش‌تیمارشده با مصرف کم سلولاز (۰/۱ــ۰/۰۵ درصد) کاغذهای با کیفیت فیزیکی به‌مراتب بهتری را نتیجه داده است. همچنین، با استفاده از سلولاز می‌توان درجهٔ روانی خمیرکاغذ را به‌طور چشمگیر (حدود ۲۲ درصد) افزایش داد. پیش‌تیمارهای آنزیمی خمیرکاغذ OCC می‌تواند اثر مثبت در پالایش‌پذیری آن داشته باشد و با افزایش مصرف سلولاز می‌توان درجهٔ روانی خمیرکاغذ را در سطح پالایش ثابت بهبود بخشید.

Archive of SID

www.SID.ir

References

[1]. Pala, H., Lemos, M.A., Mota, M., and Gama, F.M. (2001). Enzymatic upgrade of old containers. Journal of Enzyme and Microbial Technology, 29:274-279.

[2]. Ren, J. L., Peng, F., and Sun, R. C. (2009). The effect of hemicellulosic derivatives on the strength properties of old corrugated container pulp fibres. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 3(1):62–68.

[3]. Akbarpour, I. (2009). Enzymatic deinking of old newspaper. M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 121pp.

[4]. 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.

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

[6]. Verma, P., Bhardwaj N.K., and Chakraborti S.K. (2010). Enzymatic upgradation of secondary fibers. Indian Pulp and Paper Technical Association (IPPTA) Journal, 22(4):133-136.

[7]. Yang, G., Lucia, L.A., Chen, J., Cao, X., and Liu, Y. (2011). Effect of enzyme treatment on the beatability of fast-growing poplar pulp. Bioresources, 6(3):2568-2580.

[8]. Pala, H., Lemos, M.A., Mota, M., and Gama, F.M. (2001). Enzymatic upgrade of old containers. Journal of Enzyme and Microbial Technology, 29:274-279.

[9]. Pala, H., Mota, M., and Gama, F.M. (2002). Refining and enzymatic treatment of secondary fibers for paperboard production: cyberflex measurement of fiber flexibility. Cost E20-Wood Fiber Cell Wall Structure, 4p.

[10]. Dienes, D., Egyházi, A., and Réczey, K. (2004). Treatment of recycled fiber with trichoderma cellulases. Journal of Industrial Crops and Products, (20):11–21.

[11]. Tripathi, S., Nirmal, Sh., Mishra, O., Bajpai, P., and Bajpai, P.K. (2008). Enzymatic refining of chemical pulp. Indian Pulp and Paper Technical Association (IPPTA) Journal, 20(3):129-132.

[12]. Maximino, M.G., Taleb, M.C., Adell, A.M., and Formento, J.C. (2011). Application of hydrolytic enzymes and refining on recycled fibers. Journal of Cellulose Chemistry and Technology, 45(5-6):397-403

[13]. Gil, N., Gil, C., Amaral, M.E., Costa, A.P., and Duarte, A.P. (2009). Use of enzymes to improve the refining of a bleached Eucalyptus Globulus kraft pulp. Biochemical Engineering Journal, 46:89-95.

[14]. Mirshokrai, A. (2001). *Guide to Waste Paper*. Tehran Aiezh Press. 2nd Edition., 140pp.

[15]. Kang, T. (2007). Role of external fibrillation in pulp and paper properties. Doctoral Thesis. Helsinki University of Technology, Laboratory of Paper Printing Technology Reports, Series A 28.

Archive of SID

www.SID.ir