تأثیر پیش‌تیمار آنزیمی با آمیلاز و پالایش بر ویژگی‌های آب‌گیری و فیزیکی خمیرکاغذ کارتن کنگره‌ای کهنه

ایمان اکبرپور[۱*]
حسین رسالتی[۲]

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

[۲] استاد، گروه تخصصی چوب و کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

مسئول مکاتبات:
inakbarpour@gau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۶

چکیده

در این پژوهش، اصلاح آنزیمی خمیرکاغذ کارتن کنگره‌ای کهنه (OCC) با آنزیم آمیلاز استخراج شده از *Bacillus* sp. مورد ارزیابی قرار گرفت. آنزیم آمیلاز در سطوح مختلف ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲و ۰/۳ درصد (بر اساس وزن خشک خمیرکاغذ بازیافتی) تحت شرایط ثابت درصد خشکی ۱۰ درصد، درجه حرارت $50^{\circ C}$، مدت زمان ۱ساعت و محدوده pH ۶/۹-۷ به خمیرکاغذ OCC افزوده شد. برای خنثی‌سازی آنزیم باقی‌مانده از ۰/۰۵ درصد پروکسید هیدروژن (براساس وزن خشک خمیرکاغذ) استفاده شد. پالایش خمیرکاغذ OCC پیش‌تیمار شده با سطوح مختلف آمیلاز در دور ثابت ۲۰۰۰ انجام شد. ویژگی‌های آب‌گیری و فیزیکی خمیرکاغذ OCC پیش‌تیمار شده در دو شرایط پالایش شده و پالایش نشده در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد (خمیرکاغذ تیمار نشده با آنزیم) ارزیابی شدند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که پیش‌تیمار آنزیمی با آمیلاز موجب بهبود درجهٔ روانی خمیرکاغذ به میزان ۲۲-۱۱ درصد نسبت به خمیرکاغذ شاهد شد. بیشترین درجهٔ روانی با استفاده از ۰/۲ درصد آمیلاز (۶۰۰ ml, CSF) به‌دست آمده است. پالایش خمیرکاغذهای پیش‌تیمار شده با آمیلاز و نمونه شاهد موجب کاهش درجهٔ روانی خمیرکاغذ شد اما با افزایش مصرف آمیلاز، قابلیت آب‌گیری خمیرکاغذ افزایش یافت. استفاده از آنزیم آمیلاز کاغذهای با ضخامت نسبی بیشتر، حجیم‌تر اما با مقاومت به عبور هوای مشابه نسبت به نمونه شاهد نتیجه داد. افزایش مصرف آمیلاز از ۰/۰۵ درصد به ۰/۳ درصد همراه با پالایش، موجب کاهش ضخامت و حجیمی و افزایش مقاومت کاغذ به عبور هوا شد. همچنین نتایج ارزیابی زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی خمیرکاغذ OCC پالایش نشده (در غلظت ثابت ۰/۱درصد) بر مقادیر ضخامت، حجیمی و مقاومت کاغذ به عبور هوا بیانگر آن است که مدت‌زمان ۹۰ دقیقه به‌عنوان زمان بهینه می‌باشد. به‌طورکلی تیمار ترکیبی آمیلاز (۰/۱-۰/۰۵ درصد) و پالایشPFI (دور ثابت۲۰۰۰) خمیرکاغذهای باکیفیت بهتری را به لحاظ ویژگی‌های آب‌گیری و فیزیکی نسبت به خمیرکاغذOCC نشان داد.

واژگان کلیدی: خمیرکاغذ OCC، آنزیم آمیلاز، پالایش خمیرکاغذ، قابلیت آب‌گیری، ویژگی‌های فیزیکی.

مقدمه

کارتن‌های کنگره‌ای کهنه[1] یکی از منابع عمده لیفی مورداستفاده در کاغذسازی بوده و حدود ۴۰ درصد از کاغذهای بازیافتی را شامل می‌شود [۱]. در حقیقت این کاغذ جایگزین بسیار عالی برای مواد چوبی می‌باشد زیرا به‌طور فراوان، گسترده و به‌آسانی در دسترس است. علاوه بر این مصرف خمیرکاغذ OCC مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی نیز دارد؛ اما از طرفی استفاده از خمیرکاغذهای بازیافتی همانند OCC به دلیل تغییرات عمده در کیفیت اتصال بین الیاف، کاهش طول الیاف و درنتیجه کاهش قابل‌توجه سرعت آب‌گیری موجب کاهش کیفیت محصول نهایی در فرآیند تولید می‌شود. لذا لازم است الیاف بازیافتی را اصلاح و قابلیت تولید کاغذ از آن را در سیستم کاغذسازی افزایش دهیم [۲ و ۳]. در طی چند دهه اخیر استفاده از آنزیم‌ها در صنعت خمیرکاغذ به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته و تولید فرآورده‌های جدید از آنها درحال‌توسعه می‌باشد [۴]. استفاده از آنزیم‌های آمیلاز برای اصلاح اندود نشاسته و زایلاناز برای کاهش مصرف مواد شیمیایی رنگ‌بری [۴ و ۵] از کاربردهای مهم در زمینه تیمارهای آنزیمی بودند. همچنین آنزیم‌های لیپاز برای کنترل قیر، استرازها برای کنترل مواد چسبناک و آمیلازها و سلولازها برای بهبود مرکب زدایی و اصلاح ویژگی‌های الیاف به‌عنوان عوامل شیمیایی عمده در بسیاری از واحدهای صنعت خمیر و کاغذ استفاده می‌شوند [۵ و ۶]. اعمال تیمارهای آنزیمی بر روی خمیرکاغذهای بازیافتی می‌تواند موجب اصلاح ویژگی‌های آب‌گیری و خواص فیزیکی آنها شود [۵]. آنزیم‌ها می‌توانند با حذف انتخابی نرمه‌های الیاف (به دلیل داشتن سطح ویژه بیشتر نسبت به 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 شوند [۴ و ۷]. استفاده از آنزیم‌ها نیازمند بهینه‌سازی شرایط فرآیندی است و این شرایط بستگی به نوع خمیرکاغذ مورداستفاده دارد [۵ و ۸]. به‌عنوان‌مثال تیمار آنزیمی ملایم با آنزیم‌های سلولاز می‌تواند با هیدرولیز انتخابی نرمه‌ها موجب بهبود قابلیت آب‌گیری خمیرکاغذ و بعضاً حتی حفظ و یا بهبود ویژگی‌های مقاومتی کاغذ شود [۴ و ۹].

نتایج تأثیر تیمار سلولاز بر روی خمیرکاغذ کرافت سوزنی‌برگ خشک نشده قبل و بعد از پالایش با سلولاز حاصل از *Trichoderma reesei cellulose* (*Celluclast*^{TM}) نشان داد که تیمار خمیرکاغذ کرافت رنگ‌بری و پالایش شده با سلولاز می‌تواند موجب افزایش قابلیت آب‌گیری خمیرکاغذ شود و پیش‌تیمار خمیرکاغذ پالایش نشده با سلولاز هم می‌تواند قابلیت پالایش‌پذیری را بهبود بخشد. همچنین با تفکیک‌سازی و ارزیابی کارآمدی تیمارهای آنزیمی در تعیین درجهٔ روانی خمیرکاغذ، اندوگلوکاناز نوع دوم (EG II) نقش کلیدی در قابلیت آب‌گیری و تغییرات قابلیت پالایش خمیرکاغذ دارد. در مقابل، سلوبیوهیدرولاز نوع ۱ (CBH I) به‌عنوان یک پروتئین سلولاز مهم، تأثیری بر میزان قابلیت آب‌گیری یا پالایش خمیرکاغذ نشان نداد [۱۰]. شواهد به‌دست آمده از تیمار آنزیمی خمیرکاغذ کرافت بازیافتی با آنزیم‌های سلولاز و همی‌سلولاز خالص سازی شده از *Trichoderma reesei* و ارزیابی تغییرات ویژگی‌های الیاف حاکی از آن است که اندوگلوکاناز نوع اول و دوم (EG I و EG II) به‌طور معنی‌داری درجهٔ روانی خمیرکاغذ را (حتی با میزان مصرف کم آنزیم) بهبود می‌بخشد و اثر EG II در یک مقدار مشخص از انحلال کربوهیدرات، مؤثرتر بوده است. ویژگی‌های آب‌گیری خمیرکاغذ درمجموع با استفاده از آنزیم‌های انتخابی می‌تواند بهبود یابد اما ظرفیت جذب آب الیاف استخوانی و خشک‌شده[2] نمی‌تواند با برخی از این آنزیم‌ها بازیابی شود [۱۱]. نتایج استفاده از آنزیم‌های تجاری مختلف در ارتقاء کیفیت الیاف بازیافتی OCC نشان می‌دهد که اعمال تیمارهای آنزیمی مختلف (مانند آنزیم‌های سلولاز، همی‌سلولاز و لاکاز) موجب بهبود قابلیت آب‌گیری خمیرکاغذ (به دلیل حذف انتخابی نرمه‌ها و لیگنین خمیرکاغذ) می‌شود. در اغلب موارد بهبود قابلیت آب‌گیری همراه با افت مقاومت کاغذ همراه بوده است [۶]. استفاده از اتصال‌دهنده‌های سلولزی[3] افزایش هم‌زمان قابلیت آب‌گیری و مقاومت خمیرکاغذ را نتیجه داد [۲].

[1] Old Corrugated Container (OCC)

[2] Dried hornified fibers

[3] Cellulose-binding domains

همچنین استفاده از تیمارهای آنزیمی با آنزیم‌های تخریب‌کننده کربوهیدرات (سلولاز و همی سلولاز) به‌تنهایی و یا صورت اختلاط، ظرفیت آب‌گیری خمیرکاغذ و درجهٔ روانی خمیرکاغذ را بهبود می‌بخشد [۴ و ۵].

آنزیم آمیلاز نقش مهمی را در صنایع مرتبط با فراوری نشاسته ایفا کرده و موجب هیدرولیز نشاسته می‌شود. نشاسته شامل ۲۵-۱۰٪ آمیلوز و ۶۰-۸۵٪ آمیلوپکتین است و این نسبت بستگی به منشأ گیاه دارد [۹]. به‌طورکلی ۳ نوع آنزیم آمیلاز وجود دارد: الف(α-آمیلاز که اتصالات ۱-α و۴ گلیکوزیدی را هیدرولیز می‌کند؛ ب) β-آمیلاز که پیوند ۱-α-۴- گلیکوزیدی نشاسته را از انتهای غیر احیا شونده هیدرولیز می‌کند. ج گلوکوآمیلاز پیوندهای ۱-α و۴ و ۱-α و۶ گلوکوسیداز نشاسته را هیدرولیز می‌کند. α-آمیلاز در بین آنزیم‌های آمیلاز، به دلیل ثبات حرارتی بیشتر و محدوده بهینه نزدیک به خنثی برای شرایط خمیرکاغذ بازیافتی مناسب است [۹]. نشاسته مصرفی در بخش آهارزنی می‌تواند در واحدهای تیمار پساب الیاف بازیافتی تجمع یابد و بر ویژگی‌های آب‌گیری آن مداخله کند و موجب افزایش تخلیه پساب به محیط‌زیست شود. در این مورد α- آمیلاز می‌تواند ویژگی‌های درجهٔ روانی خمیرکاغذ را همراه با کاهش ویسکوزیته آب برگشتی بهبود بخشد. نتایج تیمارهای آمیلاز نشان می‌دهد که قابلیت آب‌گیری خمیرکاغذ بازیافتی افزایش یافته و این به افزایش سرعت ماشین کاغذ منجر می‌شود [۱۲]. آنزیم‌های آمیلاز می‌توانند به‌طور مؤثر موجب تخریب آهار نشاسته شوند و به جداسازی ذرات مرکب از سطح الیاف کمک کنند [۵].

نتایج استفاده از اختلاط آنزیم‌های سلولاز و آمیلاز در مرکب زدایی زیستی خمیرکاغذهای چاپ لیزری نشان می‌دهد که این آنزیم‌ها کارآیی مرکب زدایی خوبی داشته و موجب بهبود درجه روشنی (۷۶/۹۳ درصد ایزو) می‌شوند. بر پایه همین گزارش، با اعمال تیمارهای مختلف آنزیمی می‌توان حتی به درجه روشنی نزدیک خمیرکاغذ چاپ‌نشده (۸۰/۴۸ درصد ایزو) نیز دست‌یافت [۱۳]. همچنین تأثیر تیمار آنزیمی همی سلولاز و اختلاط همی سلولاز و α-آمیلاز در نسبت مشخص بر سرعت آب‌گیری و مقاومت ورقه خمیرکاغذ بازیافتی حاکی از آن است که با افزایش مصرف همی سلولاز، سرعت آب‌گیری و شاخص‌های کشش و لهیدگی حلقوی کاهش می‌یابد. با کنترل مصرف آمیلاز در سطح 20IU (به ازای هر گرم خمیرکاغذ خشک)، سرعت آب‌گیری و شاخص‌های کشش و لهیدگی حلقوی می‌تواند با مقادیر مختلف آنزیم همی سلولاز بهبود یابد [۱۴و ۱۵]. نتایج تأثیر مخلوط آنزیم سلولاز و همی‌سلولاز بر الیاف خمیرکاغذOCC، لاینر کرافت و درصد کمی از کاغذ اداری سفید نشان داد که پیش‌تیمار آنزیمی الیاف بازیافتی، درجهٔ روانی اولیه خمیرکاغذ را بدون کاهش مقاومت کششی افزایش می‌دهد. در اغلب آزمایش‌های انجام‌شده با تیمارهای ترکیبی (آنزیم + پالایش)، شاخص مقاومت کششی بیشتر، بهبود معنی‌دار قابلیت آب‌گیری و حداقل مصرف انرژی ویژه پالایش در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد مشاهده شد [۱۶].

به‌طورکلی فرآیند بازیافت کاغذ علی‌رغم مزیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، به دلیل کوتاه شدن الیاف خمیرکاغذ و ایجاد نرمه‌ها، موجب افت کیفیت کاغذ حاصل، ویژگی‌های مقاومتی خمیرکاغذ و همچنین کاهش سرعت آب‌گیری آن می‌شود. در این راستا برای جایگزینی پالایش یا کاهش شدت آن می‌توان از آنزیم‌ها به‌عنوان یک راهکار مؤثر استفاده نمود. آنزیم‌ها می‌توانند عمل پالایش را با ملایمت بیشتر و کمک به حفظ میانگین طولی الیاف تأمین کنند. از طرف دیگر در خمیرکاغذ OCC، چسب نشاسته موجود در اتصالات لایه‌ای یا آهارزنی سطحی و یا نشاسته مصرفی برای بهبود مقاومت کاغذ می‌تواند طی هیدرولیز با آنزیم آمیلاز به‌عنوان یک عامل بالقوه فرآیندی در سیستم بازیافت استفاده شود. لذا در این پژوهش با توجه به اهمیت آنزیم‌ها در اصلاح ویژگی‌های خمیرکاغذ سازی، آنزیم تجاری آمیلاز در سطوح مصرف و زمان‌های مختلف به خمیرکاغذ بازیافتیOCC افزوده شد و تأثیر افزودن آن همراه با پالایش و بدون پالایش بر ویژگی‌های آب‌گیری و فیزیکی خمیرکاغذ حاصل ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

تهیه کاغذ باطله OCC و خمیرسازی آنها

کارتن‌های کنگره‌ای کهنه تهیه‌شده به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر خیسانده شدند و سپس در داخل

دستگاه پراکنده ساز به مدت ۳ دقیقه با تعداد دور ۳۰۰۰ (در هر دقیقه) و درصد خشکی ۵ درصد دفیبره شدند. خمیرکاغذ حاصل بر روی غربال بامش ۲۰۰ آب‌گیری شده و سپس با استفاده از آنزیم آمیلاز در داخل کیسه-های پلاستیکی در حمام آب گرم تیمار آنزیمی شدند.

پیش‌تیمار آنزیمی خمیرکاغذ OCC با آنزیم آمیلاز

پیش‌تیمار آنزیمی خمیرکاغذOCC با استفاده از آنزیم آمیلاز تجاری انجام شد. آنزیم آمیلاز (به‌صورت پودری) از شرکت Novozymes Sigma Aldrich تهیه شد. این آنزیم از باکتری(Bacillus sp.) Bacillus Stearothermophilus استخراج شده و فعالیت آنزیمی آن ۷۰۰EGU/mg می‌باشد. آنزیم آمیلاز در سطوح مختلف ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد (بر اساس وزن خشک خمیرکاغذOCC) در مدت‌زمان ثابت ۶۰ دقیقه، درصد خشکی ۱۰ درصد در محدوده ۷-۶/۹ pH به خمیرکاغذ OCC افزوده شد. همچنین در شرایط دیگر موردمطالعه، خمیرکاغذها در میزان مصرف ثابت آنزیم آمیلاز (میزان مصرف بهینه تعیین شده) در زمان‌های مختلف ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه به‌طور جداگانه تیمار شدند. در تمامی تیمارهای آنزیمی، خمیرکاغذ به‌طور دستی به‌طور متناوب (در فواصل ۱۰ دقیقه) هم‌زده می‌شد. پس از تیمارهای آنزیمی، خنثی‌سازی خمیرکاغذ به‌منظور غیرفعال نمودن آنزیم باقی‌مانده با استفاده از پروکسید هیدروژن به میزان ۰/۰۵ درصد (بر اساس وزن خشک خمیرکاغذ) انجام شد. از خمیرکاغذهای پیش‌تیمار شده با آمیلاز، کاغذهای دست‌ساز آزمایشگاهی (۱۲۰گرمی) ساخته شد ویژگی‌های فیزیکی آنها همراه ویژگی آب‌گیری خمیرکاغذ در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد (خمیرکاغذ تیمار نشده با آنزیم) مقایسه شدند.

پالایش خمیرکاغذ OCC

خمیرکاغذهای شاهد و پیش‌تیمار شده با سطوح مختلف آنزیم آمیلاز، با استفاده از دستگاه پالایشگر آزمایشگاهی PFI mill در دور ثابت ۲۰۰۰ پالایش شده و تأثیر عملیات پالایش نیز بر ویژگی‌های آب‌گیری و فیزیکی کاغذ حاصل ارزیابی شد. پالایش خمیرکاغذ مطابق با استاندارد T 247 om-85 آئین‌نامه تاپی[1] انجام شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی کاغذ دست‌ساز

کاغذهای دست‌ساز (۱۲۰ گرم بر مترمربع) مطابق شماره استاندارد T 205 sp-02 ساخته و گراماژ آنها مطابق با شماره استاندارد T 410 om- 02 آئین‌نامه تاپی تعیین شد. کاغذهای ساخته‌شده برای جلوگیری از تغییر شکل و چین‌خوردگی به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق (خشک‌کردن در هوای آزاد) خشک شدند و سپس به مدت ۲۴ ساعت در اتاق کلیما تحت شرایط استاندارد رطوبت نسبی ۲±۵۰ درصد و دمای ۱±۲۳ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. ویژگی‌های فیزیکی کاغذ شامل ضخامت و مقاومت به عبور هوا کاغذ و همچنین درجهٔ روانی (قابلیت آب‌گیری) خمیرکاغذ به ترتیب مطابق با استانداردهای T 411 om- 05، T 536 om- 02 و T 277 om- 04 آئین‌نامه تاپی در آزمایشگاه مهندسی چوب و کاغذ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان اندازه‌گیری شدند. حجیمی کاغذها نیز با توجه به نسبت ضخامت کاغذ به گراماژ کاغذ اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل آماری

در این تحقیق از طرح کاملاً تصادفی برای مقایسه داده‌های حاصل از اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی کاغذ و میزان آب‌گیری خمیرکاغذ OCC تیمارشده در سطوح مختلف مصرف آنزیم آمیلاز و مدت‌زمان‌های تیمار آنزیمی در دو حالت پالایش شده و پالایش نشده استفاده شد. آزمون تجزیه واریانس داده‌ها (آزمونF) با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS انجام گرفت و مقایسه میانگین‌ها داده‌ها نیز به کمک آزمون چند دامنه‌ای دانکن (DMRT) در سطح اطمینان آماری ۹۹ درصد صورت گرفت.

[1] TAPPI

نتایج

تأثیر پالایش و سطوح مختلف آنزیم آمیلاز بر ویژگی‌های خمیرکاغذ OCC

میزان آب‌گیری خمیرکاغذ

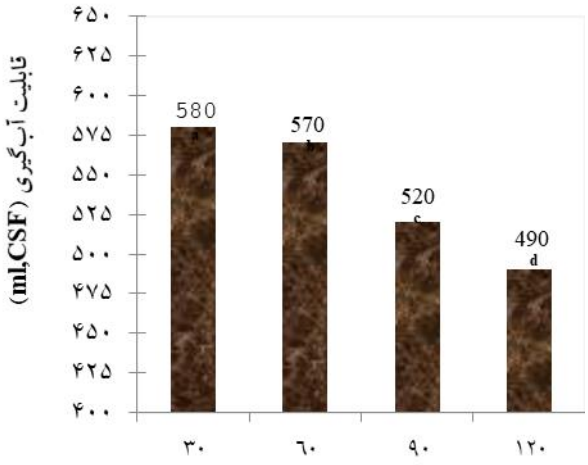
نتایج تأثیر سطوح مختلف آنزیم آمیلاز بر ویژگی‌های آب‌گیری خمیرکاغذOCC نشان داد که افزایش مصرف آمیلاز از ۰/۰۵ درصد به ۰/۳ درصد در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد موجب بهبود معنی‌دار سرعت آب‌گیری خمیرکاغذ می‌شود (شکل۱؛ جدول۱). درمجموع استفاده از ۰/۲ درصد آمیلاز با نرخ افزایش۲۱/۷ درصد، بیشترین درجهٔ روانی (CSF, ml ۶۰۰) را نتیجه داده است این در حالی است که با مصرف ۰/۳ درصد آمیلاز، این مقدار به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (CSF, ml ۵۵۰). به‌طورکلی شواهد حاصل نشان داد که با مصرف درصدهای مختلف آنزیم آمیلاز، درجهٔ روانی خمیرکاغذ به میزان ۱۱-۲۲ درصد در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد افزایش یافته است.

درجهٔ روانی خمیرکاغذ پارامتر مهم در ارزیابی سرعت آب‌گیری خمیرکاغذ می‌باشد. این ویژگی در مورد خمیرکاغذهای بازیافتی مثل OCC که با مشکل زمان آب‌گیری مواجه می‌باشند، از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد [۱۷]. نتایج حاصل بیانگر آن است که آنزیم آمیلاز با هیدرولیز نشاسته موجود در ترکیب خمیرکاغذ OCC، قابلیت آب‌دوستی خمیرکاغذ را کاهش داده لذا انتظار می‌رود که با کاهش جذب آب خمیرکاغذ، درجهٔ روانی خمیرکاغذ بهبود یابد [۹ و ۱۰]. در درصدهای بیشتر آمیلاز مصرفی (۰/۳ درصد)، به نظر می‌رسد که میزان هیدرولیز ترکیبات نشاسته افزایش یافته و حتی بخشی از آنها ممکن است مجدداً در ترکیب خمیرکاغذ رسوب دهند لذا می‌توان استنباط نمود که رسوب مجدد ذرات نشاسته می‌تواند دلیل احتمالی کاهش درجهٔ روانی در سطح مصرف۰/۳ درصد آمیلاز باشد.

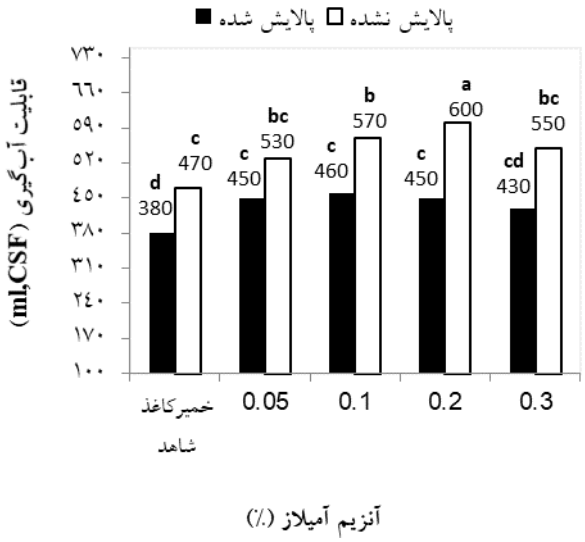
پالایش خمیرکاغذ OCC پیش‌تیمار شده با آمیلاز موجب کاهش ویژگی آب‌گیری خمیرکاغذ (کاهش درجهٔ روانی خمیرکاغذ) شده است. شدت کاهش درجهٔ روانی در سطوح مصرفی بیشتر آمیلاز بیشتر مشاهده شده است. با افزایش مصرف آنزیم از ۰/۰۵ درصد به ۰/۲ درصد (در خمیرکاغذ پالایش نشده) مقدار درجهٔ روانی به میزان ۸۰-۱۴۰ واحد افزایش یافت درحالی‌که افت درجهٔ روانی در اثر پالایش به میزان۹۰ واحد مشاهده شده است. افت بیشتر درجهٔ روانی با افزایش مصرف آمیلاز نشان می‌دهد که ظاهراً آنزیم آمیلاز بر روی هیدرولیز نشاسته و احتمالاً الیاف تأثیر گذاشته است درنتیجه طی پالایش، سطوح مصرفی بیشتر آمیلاز ضمن هیدرولیز بیشتر بر روی ترکیبات نشاسته، نرمه‌های بیشتری تولیدشده که درمجموع باوجود نشاسته‌های هیدرولیز شده و نرمه‌های زیاد منجر به کاهش درجهٔ روانی خمیرکاغذ شده است (شکل۱؛ جدول۱).

تأثیر مدت زمان تیمار آنزیمی با آمیلاز بر میزان آب‌گیری خمیرکاغذ

نتایج ارزیابی زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی آمیلاز (در غلظت ثابت ۰/۱ درصد) بر درجهٔ روانی (شاخص میزان آب‌گیری) خمیرکاغذهایOCC پالایش نشده نشان داد که افزایش زمان تیمار از۳۰ دقیقه به۱۲۰ دقیقه منجر به کاهش معنی‌دار آب‌گیری خمیرکاغذ در سطح اطمینان آماری ۹۹ درصد شد (جدول۱; شکل۲). مقادیر درجهٔ روانی (قابلیت آب‌گیری) خمیرکاغذ طبق گروه‌بندی دانکن در ۴ گروه مجزا قرارگرفته‌اند، به‌طوری‌که حداقل درجهٔ روانی در مدت‌زمان۳۰ دقیقه (CSF, ml ۵۸۰) و حداکثر درجهٔ روانی (CSF, ml ۴۹۰) نیز در زمان۱۲۰ دقیقه مشاهده شده است (جدول ۲). همان‌طور که مشاهده می‌شود، درجهٔ روانی خمیرکاغذ در زمان‌های طولانی‌تر (۱۲۰دقیقه) از خمیرکاغذ شاهد پالایش نشده به میزان ۲۰ واحد بیشتر است. به‌طورکلی افت درجهٔ روانی (قابلیت آب‌گیری) خمیرکاغذ در زمان‌های طولانی‌تر تیمار آنزیمی آمیلاز را می‌توان به هیدرولیز بیشتر نشاسته موجود در این نوع خمیرکاغذ نسبت داد. هیدرولیز و تجزیه نشاسته موجود در OCC و تبدیل آن به قندها ازیک طرف و از طرف دیگر جداسازی بیشتر ذرات مرکب چاپ طی خروج ذرات نشاسته می‌تواند تا حدی به افزایش احتمالی واکشیدگی و افزایش مقاومت‌ها منجر شود [۱۴ و ۱۵].



شکل۲- تاثیر زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی با آمیلاز بر میزان آب‌گیری خمیرکاغذ OCC پالایش نشده.



شکل۱- تاثیر درصدهای مختلف آنزیم آمیلاز بر میزان آب‌گیری خمیرکاغذ OCC.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس غلظت‌های مختلف آنزیم آمیلاز و پالایش بر ویژگی‌های خمیر و کاغذ

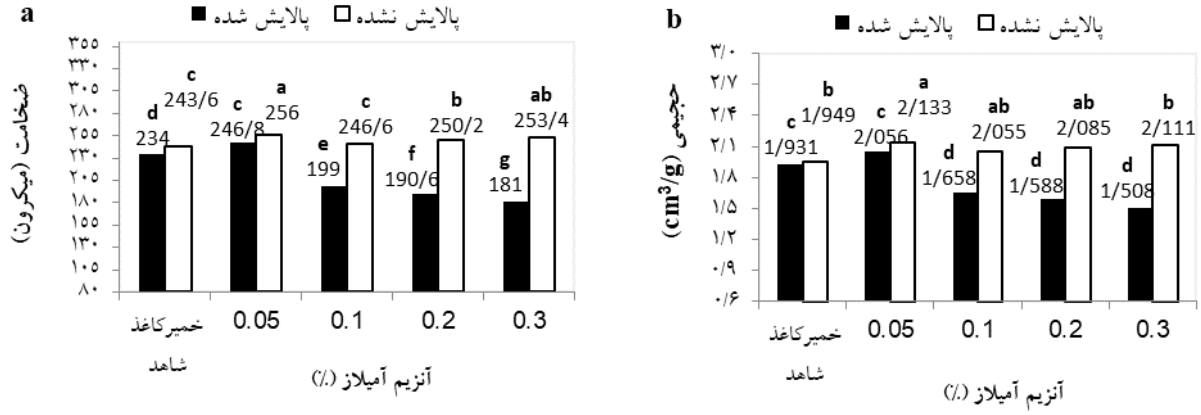
ویژگی‌ها / متغیرها	منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F محاسبه‌شده	سطح معنی‌داری
ضخامت کاغذ	تیمار	۴۰۲۸/۳	۹	۱۰۲۴/۶۵	۹/۵۲	۰/۰۰۰۱
	خطا	۲۰۰۱/۸	۲۰	۸۹/۵۱۱		
	کل	۶۰۳۰/۱	۲۹			
حجیمی کاغذ	تیمار	۹/۲۵۸	۹	۰/۰۹۵۷	۱۳/۰۸	۰/۰۰۰۲
	خطا	۳/۱۹۴	۲۰	۰/۰۰۶		
	کل	۱۲/۴۵۲	۲۹			
مقاومت کاغذ به عبور هوا	تیمار	۱۶/۳۲۱	۹	۱/۸۱۴۵	۶/۰۱	۰/۰۰۵۲
	خطا	۷/۰۰۱	۲۰	۰/۴۱۲۷		
	کل	۲۳/۳۲۲	۲۹			
درجهٔ روانی خمیرکاغذ	تیمار	۲۱۸۹۳	۹	۶۲۴۰	۷۴۰۶	۰/۰۰۰۱
	خطا	۱۱۲۵۴	۲۰	۳		
	کل	۳۳۱۴۷	۲۹			

جدول۲- نتایج تجزیه واریانس زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی با آمیلاز بر ویژگی‌های خمیر و کاغذ

ویژگی‌ها / متغیرها	منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F محاسبه‌شده	سطح معنی‌داری
ضخامت کاغذ	تیمار	۳۹۹/۶	۳	۱۳۳/۲	۱۱/۳۶	۰/۰۰۰۳
	خطا	۱۸۷/۶	۸	۱۱/۷۲۵		
	کل	۵۸۷/۲	۱۱			
حجیمی کاغذ	تیمار	۰/۰۲۷۸	۳	۰/۰۰۹۲	۱۱/۳۶	۰/۰۰۰۳
	خطا	۰/۰۱۳	۸	۰/۰۰۰۸		
	کل	۰/۰۴۰۹	۱۱			
مقاومت کاغذ به عبور هوا	تیمار	۲/۸۹۳۲	۳	۰/۹۶۴۴	۳/۶۸	۰/۰۶۲۳
	خطا	۲/۰۹۴۱	۸	۰/۲۶۱۷		
	کل	۴/۹۸۷۴	۱۱			
درجهٔ روانی خمیرکاغذ	تیمار	۱۶۲۰۰/۸	۳	۵۴۰۰	۵۴۰۰	۰/۰۰۰۱
	خطا	۸	۸	۱		
	کل	۱۶۲۰۸	۱۱			

ضخامت و حجیمی کاغذ

به‌طورکلی افزایش مصرف آنزیم آمیلاز از ۰/۰۵ درصد به ۰/۳ درصد اختلاف معنی‌دار ضخامت و حجیمی کاغذ را نشان نداد هرچند استفاده از ۰/۱ درصد آمیلاز کمترین ضخامت (۲۴۶/۶ میکرون) و کمترین حجیمی (cm^3/g ۲/۰۵۵) را در بین تیمارهای آنزیمی نتیجه داده است. همچنین در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد، استفاده از آمیلاز تا سطح مصرف ۰/۱ درصد تأثیر معنی‌داری را ازنظر آماری بر ضخامت و حجیمی کاغذ نداشته اما در درصدهای بیش از ۰/۱ درصد، بین مقادیر ضخامت و حجیمی کاغذ اختلاف معنی‌داری در سطح اطمینان آماری ۹۹ درصد وجود دارد (جدول ۱). درمجموع استفاده از آنزیم آمیلاز منجر به افزایش ضخامت کاغذ شده اما ازنظر آماری، با استفاده از ۰/۱ درصد آمیلاز (در شرایط پالایش نشده) می‌توان کاغذ با ضخامت و حجیمی معادل خمیرکاغذ شاهد (در شرایط پالایش نشده) رسید. همچنین نتایج به‌دست آمده نشان داد که پالایش خمیرهای کاغذ OCC پیش‌تیمار شده با آمیلاز موجب کاهش قابل‌توجه ضخامت (شکل ۳_a) و کاهش حجیمی کاغذ (شکل ۳_b) حاصل شد. با افزایش مصرف آمیلاز نقش پالایش در کاهش ضخامت کاغذ جدی‌تر بوده و در سطوح مصرفی بیشتر می‌توان به کاغذهای به‌مراتب با ضخامت و حجیمی کمتر حتی در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد رسید. همچنین شدت کاهش ضخامت و حجیمی کاغذ با استفاده از سطوح مختلف آمیلاز در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد بیشتر بوده است. بر اساس شواهد به‌دست آمده استنباط می‌شود که پیش‌تیمار خمیرکاغذ OCC با سطوح مختلف آنزیم آمیلاز می‌تواند پالایش‌پذیری آن را افزایش درنتیجه کاغذهای با ضخامت و حجیمی کمتر (درنتیجه مقاومت‌های بهتر) را نتیجه دهد.

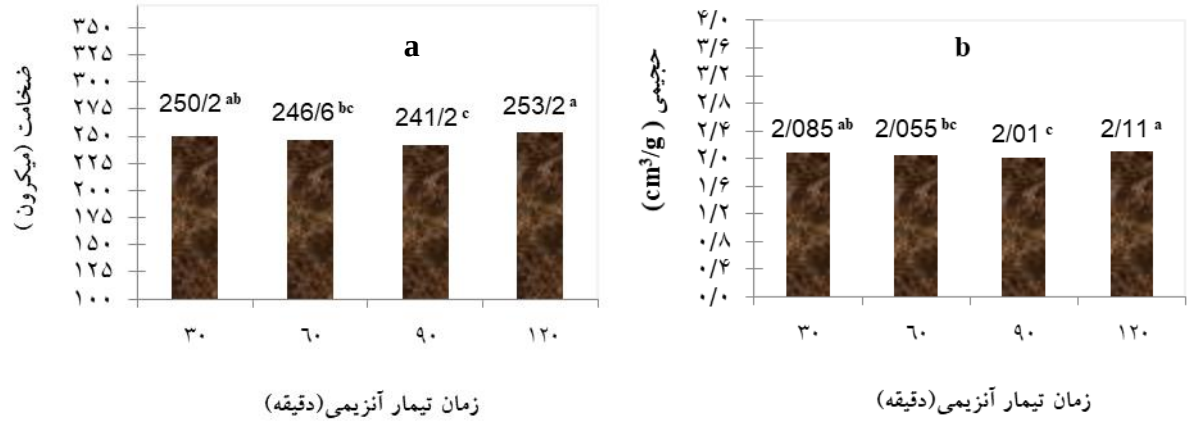


شکل۳- تأثیر درصدهای مختلف آنزیم آمیلاز بر ضخامت (a) و حجیمی (b) خمیرکاغذ OCC.

استفاده از آنزیم آمیلاز در خمیرکاغذ OCC پالایش نشده همراه با کاهش ضخامت موجب کاهش نسبی حجیمی کاغذ شده است هرچند که اختلاف این مقادیر در بعضی تیمارهای آنزیمی (مانند حداقل و حداکثر آنزیم مصرفی) از نظر آماری، معنی‌دار نبوده است. با استفاده از ۰/۱ درصد آمیلاز (در بین تیمارهای مختلف آنزیمی) می‌توان کاغذهای با ضخامت و حجیمی مشابه با خمیرکاغذ شاهد دست‌یافت. آنزیم‌های آمیلاز می‌توانند به‌طور مؤثر موجب تخریب آهار نشاسته شوند و به جداسازی ذرات مرکب از سطح الیاف کمک کنند [۵]. در این تحقیق آنزیم آمیلاز مصرفی موجب هیدرولیز چسب‌های نشاسته بین لایه فلوتینگ و لاینر شده درنتیجه با هیدرولیز ذرات نشاسته، انتظار می‌رود که میزان اتصالات بین الیاف نیز دستخوش تغییر شود بنابراین با کاهش قابلیت اتصال و تعداد اتصال بین الیاف، کاهش ضخامت کاغذ و به‌تبع آن حجیم‌تر شدن کاغذ توجیه‌پذیر می‌باشد. پالایش خمیرکاغذهای پیش‌تیمار شده با سطوح مختلف آمیلاز، موجب کاهش ضخامت درنتیجه کاهش حجیمی کاغذ شد. در اثر پالایش، بخشی از الیاف خمیرکاغذ به نرمه تبدیل‌شده لذا وجود نرمه‌های بیشتر در ترکیب خمیرکاغذ همراه با افزایش سطح ویژه الیاف، میزان اتصالات بین الیاف و استحکام شبکه کاغذ را افزایش داده و ضخامت کاغذ کاهش می‌یابد. افزایش مصرف آمیلاز در مرحله پیش‌تیمار آنزیمی خمیرکاغذ OCC شدت تغییرات ضخامت و مقاومت به عبور هوای کاغذ را در اثر پالایش افزایش داده و در سطوح مصرفی بیشتر آمیلاز، می‌توان به کاغذهای با حجیمی به‌مراتب کمتر رسید این در حالی است که میزان کاهش ضخامت کاغذ و افزایش مقاومت به عبور هوای کاغذ در خمیرکاغذ شاهد بسیار کمتر مشاهده شده است. از نتایج به‌دست آمده می‌توان استنباط نمود که پیش‌تیمار آنزیمی با آمیلاز نقش مؤثری را در بهبود پالایش‌پذیری خمیرکاغذ داشته است.

تأثیر مدت‌زمان تیمار آنزیمی با آمیلاز بر ضخامت و حجیمی کاغذ

نتایج بررسی تجزیه واریانس اثر زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی آمیلاز در غلظت ثابت ۰/۱ درصد بر مقادیر ضخامت و حجیمی کاغذ حاصل از خمیرکاغذهای OCC پالایش نشده حاکی از آن است که افزایش زمان تیمار از ۳۰ دقیقه به ۱۲۰ دقیقه تأثیر معنی‌داری بر مقادیر ضخامت و حجیمی کاغذ در سطح اطمینان آماری۹۹ درصد داشته است (جدول۱؛ شکل‌های $۴_{a,b}$). مطابق با نتایج گروه‌بندی دانکن، مقادیر ضخامت و حجیمی کاغذ در ۳ گروه مجزا قرارگرفته‌اند، به‌طوری‌که حداقل ضخامت و حجیمی در مدت‌زمان ۹۰ دقیقه (به‌ترتیب ۲۴۱/۲ µm و ۲ cm^3/g) و حداکثر ضخامت و حجیمی (به ترتیب ۲۵۳/۲ µm و ۲/۱۰۹ cm^3/g) در زمان ۱۲۰ دقیقه مشاهده شده است.



شکل۴- تأثیر زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی با آمیلاز بر ضخامت (a) و حجیمی (b) خمیرکاغذ OCC پالایش نشده

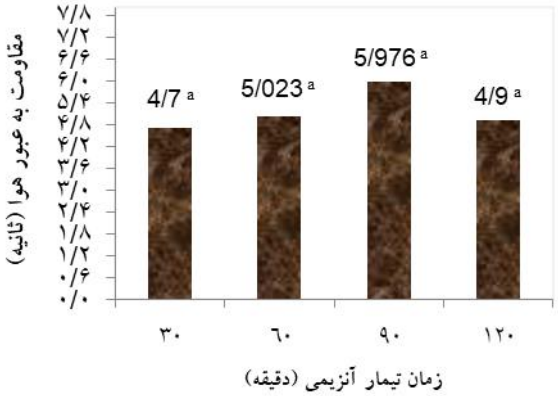
نتایج ارزیابی سطوح مختلف زمانی در تیمار آنزیمی خمیرکاغذ OCC پالایش نشده با آمیلاز در غلظت ثابت ۰/۱ درصد بر مقادیر ضخامت، حجیمی و مقاومت کاغذ به عبور هوا بیانگر آن است که مدت‌زمان ۹۰ دقیقه به‌عنوان زمان بهینه است. در زمان‌های خیلی کوتاه (کمتر از۹۰ دقیقه)، کاغذهای ضخیم‌تر، حجیم‌تر و با مقاومت به عبور هوای کمتر مشاهده شده است (جدول۲). همچنین افزایش مدت‌زمان تیمار آمیلاز منجر به کاهش معنی‌دار درجهٔ روانی خمیرکاغذ شده و زمان‌های کوتاه‌تر درجهٔ روانی بیشتر درنتیجه قابلیت آب‌گیری بهتری را نشان داد. ذرات نشاسته موجود در الیاف خمیرکاغذ بازیافتی می‌تواند توسط آمیلاز هیدرولیز شود و درجه تک پاشیدگی[1] می‌تواند افزایش یابد درنتیجه سرعت آب‌گیری و مقاومت ورقه کاغذ بهبود می‌یابد [۱۵]. از طرف دیگر نتایج مطالعات اندک اخیر در رابطه با استفاده از آنزیم آمیلاز بر ویژگی‌های خمیرکاغذ نشان داد که با استفاده از آنزیم تجاری آمیلاز حاصل از *Termamyl* هیچ تغییری در درجهٔ روانی و حتی مقاومت کاغذ مشاهده نشده است [۲]. بر اساس نتایج مطالعات منتشرشده، α- آمیلاز نقش مثبت در مرکب زدایی کاغذهای بازیافتی دارد اما مکانیسم دقیق آن مشخص نشده که آیا مکانیسم مشابهی با سلولاز دارد یا نه [۱۰]. در زمان‌های طولانی‌تر به نظر می‌رسد که ذرات نشاسته هیدرولیز شده در ترکیب خمیرکاغذ مجدداً رسوب داده و در کاهش درجهٔ روانی خمیرکاغذ مؤثر بوده‌اند. لازم به یادآوری است که تیمار آنزیمی در مدت‌زمان ۲۰ دقیقه هم انجام‌شده و درجهٔ روانی کمتر از ۵۸۰ml, CSF مشاهده شده است.

مقاومت کاغذ به عبور هوا

نتایج حاصل از تأثیر سطوح مختلف آنزیم آمیلاز بر مقاومت به عبور هوای کاغذ نشان داد که افزایش مصرف آنزیم آمیلاز از ۰/۰۵ درصد به ۰/۱ درصد اثر معنی‌داری بر مقاومت به عبور هوا دارد اما در درصدهای بیشتر از ۰/۱ درصد، هیچ اختلاف معنی‌داری ازنظر کاهش مقادیر مقاومت کاغذ به عبور هوا مشاهده نشده است. همچنین در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد، تنها استفاده از ۰/۰۵ درصد آمیلاز منجر به افزایش معنی‌دار مقاومت کاغذ به عبور هوا شده و استفاده از درصدهای بیشتر ازنظر آماری اختلاف معنی‌داری را با خمیرکاغذ شاهد نشان نداد. درمجموع نتایج نشان می‌دهد که با تیمارهای آنزیمی با آمیلاز می‌توان به مقادیر مقاومت به عبور هوای مشابه و یا حتی بیشتر از خمیرکاغذ شاهد رسید. به‌طورکلی هرچه کاغذ نسبت به عبور هوا مقاومت بیشتری از خود نشان دهد می‌توان گفت که ساختار کاغذ فشرده‌تر و دارای دانسیته کلی بیشتر می‌باشد. پالایش خمیرکاغذهای OCC

[1]Degree of homodisperse

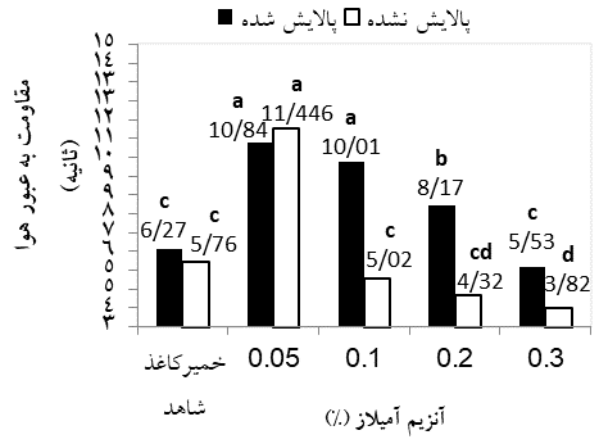
پیش‌تیمار شده با سطوح مختلف آمیلاز موجب افزایش مقاومت کاغذ به عبور هوا شد (شکل۵). با افزایش مصرف آمیلاز تا ۰/۳ درصد، تأثیر پالایش در بهبود مقاومت کاغذ به عبور هوا کاهش‌یافته و درصدهای کمتر آمیلاز (۰/۰۵ و ۰/۱ درصد) نتیجه بهتری (افزایش مقاومت به عبور هوا) را ازنظر مقادیر مقاومت به عبور هوا نشان داد. به‌طورکلی با انجام پالایش۲۰۰۰ دور و اعمال تیمار آنزیمی آمیلاز در سطوح کم‌مصرف آنزیم (سطح مصرف ۰/۲-۰/۰۵ درصد) می‌توان کاغذهای به‌مراتب مقاوم‌تر به عبور هوا در مقایسه با نمونه خمیرکاغذ شاهد تولید نمود.



شکل۶- تاثیر زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی با آمیلاز بر مقاومت به عبور هوای خمیرکاغذ OCC پالایش نشده.

تأثیر مدت‌زمان تیمار آنزیمی با آمیلاز بر مقاومت کاغذ به عبور هوا

همان‌طور که در جدول ۲ و شکل۱۰ مشاهده می‌شود، افزایش مدت‌زمان تیمار آنزیمی آمیلاز در غلظت ثابت ۰/۱ درصد تأثیر معنی‌داری را بر مقادیر مقاومت کاغذ به عبور هوا در خمیرکاغذهای OCC پالایش نشده نشان نداد (جدول۱; شکل ۶). بیشترین مقاومت به عبور هوا (۵/۹۷۶ ثانیه) در مدت‌زمان ۹۰ دقیقه تیمار آنزیمی به‌دست آمده است.



شکل۵- تاثیر درصدهای مختلف آنزیم آمیلاز بر مقاومت به عبور هوای خمیرکاغذ OCC.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اصلاح خمیرکاغذ OCC با استفاده از تیمار آنزیمی با آمیلاز (استخراج شده از *Bacillus* sp.) در سطوح مختلف مصرف آمیلاز و زمان‌های مختلف تیمار آنزیمی همراه با پالایش خمیرکاغذ انجام شد و تأثیر آنها بر ویژگی‌های آب‌گیری و فیزیکی خمیرکاغذ حاصل ارزیابی شد. استفاده از آنزیم آمیلاز در سطوح مختلف موجب بهبود معنی‌دار قابلیت آب‌گیری خمیرکاغذ OCC شده است به‌طوری‌که با استفاده از ۰/۲ درصد آنزیم می‌توان با نرخ افزایش۲۱/۷ درصد، به حداکثر درجهٔ روانی CSF, ۶۰۰ ml دست‌یافت. این در حالی است که در درصدهای بیشتر آمیلاز مصرفی (۰/۳درصد)، افزایش قابلیت جذب آب خمیرکاغذ و درنتیجه کاهش درجهٔ روانی خمیرکاغذ مشاهده شده است. استفاده از آنزیم آمیلاز در خمیرکاغذ OCC پالایش نشده همراه با کاهش ضخامت موجب افزایش حجیمی کاغذ شده است هرچند که اختلاف این مقادیر در برخی تیمارهای آنزیمی (مانند حداقل و حداکثر آنزیم مصرفی) ازنظر آماری، معنی‌دار نبوده است. با استفاده از ۰/۱ درصد آمیلاز (در بین تیمارهای مختلف آنزیمی) می‌توان به کاغذهای با ضخامت و حجیمی مشابه با خمیرکاغذ شاهد دست‌یافت. نتایج ارزیابی سطوح مختلف زمانی در تیمار آنزیمی خمیرکاغذ OCC پالایش نشده با آمیلاز در غلظت ثابت ۰/۱ درصد بر مقادیر ضخامت، حجیمی و مقاومت کاغذ به عبور هوا

بیانگر آن است که مدت‌زمان ۹۰ دقیقه به‌عنوان زمان بهینه است. در زمان‌های کمتر از ۹۰ دقیقه، کاغذهای ضخیم‌تر، حجیم‌تر و با مقاومت به عبور هوای کمتر نتیجه شده است. همچنین افزایش مدت‌زمان تیمار آمیلاز منجر به کاهش معنی‌دار درجهٔ روانی خمیرکاغذ شده و زمان‌های کوتاه‌تر، درجهٔ روانی بیشتر و درنتیجه قابلیت آب‌گیری بهتری را نشان داد. ذرات نشاسته موجود در الیاف خمیرکاغذ بازیافتی می‌تواند توسط آمیلاز هیدرولیز شود و درنتیجه سرعت آب‌گیری و مقاومت ورقه کاغذ می‌تواند بهبود یابد. در زمان‌های طولانی‌تر به نظر می‌رسد که ذرات نشاسته هیدرولیز شده در ترکیب خمیرکاغذ مجدداً رسوب داده و همین مورد در کاهش درجهٔ روانی خمیرکاغذ مؤثر بوده است.

با افزایش مصرف آنزیم آمیلاز از ۰/۰۵ به ۰/۳ درصد، اثر پالایش در کاهش درجهٔ روانی جدی‌تر بوده و در درصدهای بیشتر آمیلاز، افت درجهٔ روانی ناشی از پالایش بیشتر بوده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از این تحقیق می‌توان پیش‌بینی کرد که میزان نرمه‌های ایجادشده در اثر تیمار مکانیکی پالایش باید بیشتر از میزان هیدرولیز ذرات نشاسته در اثر آمیلاز بوده باشد درنتیجه انتظار می‌رود که نسبت افت درجهٔ روانی خمیرکاغذ در اثر پالایش بیش از سطوح مصرفی زیاد آمیلاز در اثر هیدرولیز ترکیبات نشاسته باشد. پالایش خمیرکاغذهای پیش‌تیمار شده با سطوح مختلف آمیلاز، موجب کاهش ضخامت درنتیجه کاهش حجیمی کاغذ شد.

در اثر پالایش، بخشی از الیاف خمیرکاغذ به نرمه تبدیل‌شده لذا وجود نرمه‌های بیشتر در ترکیب خمیرکاغذ همراه با افزایش سطح ویژه الیاف، میزان اتصالات بین الیاف و استحکام شبکه کاغذ را افزایش داده و ضخامت کاغذ کاهش می‌یابد. افزایش مصرف آمیلاز در مرحله پیش‌تیمار آنزیمی خمیرکاغذOCC شدت تغییرات ضخامت و مقاومت به عبور هوای کاغذ را در اثر پالایش افزایش داده و در سطوح مصرفی بیشتر آمیلاز، می‌توان به کاغذهای با حجیمی به‌مراتب کمتر دست‌یافت این در حالی است که میزان کاهش ضخامت کاغذ و افزایش مقاومت به عبور هوای کاغذ در خمیرکاغذ شاهد بسیار کمتر مشاهده شده است. از نتایج به‌دست آمده می‌توان استنباط نمود که پیش‌تیمار آنزیمی با آمیلاز نقش مؤثری را در بهبود پالایش‌پذیری خمیرکاغذ داشته است. به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از آنزیم آمیلاز پتانسیل مناسبی را در اصلاح خمیرکاغذ بازیافتی OCC دارد به‌طوری‌که با انجام پیش‌تیمار تیمار آنزیمی همراه با حفظ ویژگی‌های فیزیکی کاغذ نهایی، قابلیت آب‌گیری خمیرکاغذ درنتیجه سرعت ماشین کاغذ را می‌توان افزایش داد. از طرف دیگر پالایش خمیرکاغذOCC بعد از یک مرحله پیش‌تیمار آنزیمی با آمیلاز (یعنی ترکیب تیمار آنزیمی و پالایش) به‌مراتب خمیرکاغذهای با مشخصات فیزیکی و قابلیت آب‌گیری مطلوب‌تری را در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد نتیجه خواهد داد.

منابع

[1] Guo, W.J., Wang, Y., Wan, J.Q. and Ma, Y.W., 2011. Effcets of slushing process on the pore structure and crystallinity in old corrugated container cellulose fiber. Journal of Carbohydrate. Polymer, 83(1):1-7.

[2] 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.

[3] 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.

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

[5] Aehle, W., 2007. Enzymes in Industry-production and applications. 3rd ed., Wiley-VCH Verlag. 64p.

[6] 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)

[7] Bajpai, P.K., 2010. Solving the Problems of Recycled Fiber Processing with Enzymes. Journal of Bioresources, 5(2):1-15.

[8] Verma, P., Bhardwaj N.K. and Chakraborti, S.K., 2010. Enzymatic Upgradation of Secondary Fibers. Journal of Ippta., 22(4):133-136.

[9] Sing, R. and Bhardwaj, N.K., 2011. Enzymatic Treatment of Secondary Fibers for Improving Drainage: An Overview. Journal of Ippta, 23(2):121-126.

[10] Kamaya, Y., 1996. Role of endoglucanase in enzymatic modification of bleached Kraft pulp. J. Ferm. Bioeng., 82 (6):549–553.

[11] Oksanen, T., Pere, J., Paavilainen, L., J Buchert, J. and Viikari, L., 2000. Treatment of Recycled Kraft Pulps with Trichoderma Reesei Hemicellulases and Cellulases. Journal of Biotechnology,78:39-48.

[12] Kenealy, W.R. and Jeffries, T.W., 2003. Enzyme processes for pulp and paper: a review of recent developments. In Wood deterioration and preservation: advances in our changing world. Washington, DC: American Chemical Society: Distributed by Oxford University Press, 2003. ACS symposium series; 845: 210-239.

[13] Zhen-ying, S., Shi-jin, D., Qiu-shun, L.I., Tian-qi, Z. and Hong-yan, W., 2009. Mixture of cellulase and amylase for deinking of laser printed paper. Chemical engineering Journal, China, www.CNKI.com, 11p.

[14] Yi, J., Ji-xue, Y., Yong, X. and Xiang-yang, S., 2005. A contrastive analysis on the modified secondary stock of amylase and hemicellulase. China Pulp & Paper Industry, Chinese Journal, cnki: ISSN:1007-9211.0.2005-06-017.

[15] Yi, J., Ji-xue, Y., Yong, X. and Xiang-yang, S., 2005. The effect of amylase to the modification of secondary stock. China Pulp & Paper Industry, Chinese Journal, CNKI: SUN: COKE.0.2005-05-013.

[16] 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.

[17] 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)

The effect of enzymatic pre-treatment with amylase and refining on the physical and dewatering properties of OCC pulp

Abstract

In the current research, enzymatic modification of OCC pulp with *Bacillus* sp. amylase was evaluated. Amylase was added at different levels of 0.5, 0.1, 0.2 and 0.3% (based on oven-dried weight of recycled paper) to OCC pulp under constant conditions included consistency of 10%, temperature of 50°C, time duration of 1 hour, and at a pH range of 6.9-7. To neutralize the residual enzyme, hydrogen peroxide 0.05% (based on oven-dried weight of pulp) was applied. The refining of pre-treated OCC pulp with different levels of amylase was done at the constant revolution of 2000. The dewatering and physical properties of amylase pre-treated OCC pulps as compared to control pulp (non-treated pulp with enzyme) for two refined and unrefined conditions were evaluated. Obtained results showed that amylase pre-treatment improved pulp freeness by 11-22% compared with the control sample. The highest freeness (600 ml, CSF) was achieved with 0.2% amylase. Refining of both amylase pre-treated OCC pulp and the control sample reduced the pulp freeness, but dewatering capability increased with an increase in amylase usage. The use of Amylase resulted in a paper with slightly higher caliper, higher bulk, but similar air resistance, compared with control run. An increase in amylase usage from 0.5% to 0.3% along with refining decreased caliper and bulk and increased air resistance of paper. Also, the results of the evaluation of different times of amylase treatment of unrefined OCC pulp (at a constant concentration of 0.1%) on a caliper, bulk as well as air resistance indicated that the duration of 90 minutes was the optimal time. In general, the combined treatment of amylase (0.05-0.1%) and PFI refining (at the constant revolution of 2000) indicated the pulps with better quality in terms of dewatering and physical characteristics in comparison with control OCC pulp.

Keywords: OCC pulp, Amylase, Pulp refining, Dewatering capability, Physical properties.

I. Akbarpour[1*]
H. Resalati[2]

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

[2] Prof., Dept. of Wood and Paper, Faculty of Wood and Paper Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources (SUASNR), Iran

Corresponding author:
inakbarpour@gau.ac.ir

Received: 2021/10/07
Accepted: 2022/01/16