جنگل و فرآورده‌های چوب، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۶۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۴
ص ۵۳۱-۵۴۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۲/۲۰

عملکرد آنزیم پکتیناز در بهبود ویژگی‌های خمیرکاغذ روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده به‌روش شست‌وشو

❖ **مقدسه اکبری؛** دانشجوی دکتری صنایع خمیر و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
❖ **ایمان اکبرپور*؛** دانشجوی دکتری صنایع خمیر و کاغذ، گروه تخصصی صنایع خمیر و کاغذ، دانشکدهٔ مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
❖ **حسین رسالتی؛** استاد تکنولوژی خمیر و کاغذ، گروه تخصصی صنایع چوب و کاغذ، دانشکدهٔ مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
❖ **منیره ایمانی؛** دانشجوی دکتری صنایع خمیر و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

چکیده

در این پژوهش، تأثیر استفاده از غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز در مرکب‌زدایی کاغذ روزنامهٔ باطله بررسی شده است. کاغذ روزنامهٔ باطله تحت شرایط خشکی ۵ درصد به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه پراکنده‌ساز (تعداد دور ۲۶۵۰۰) به خمیرکاغذ تبدیل شد. تیمار آنزیمی خمیرکاغذ روزنامهٔ بازیافتی تحت شرایط ثابت (خشکی ۱۰ درصد، زمان تیمار ۲۰ دقیقه، محدودهٔ pH ۵-۴/۵) در غلظت‌های مختلف ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵ درصد آنزیم پکتیناز (براساس وزن خشک کاغذ باطله) انجام شد. ویژگی‌های نوری، فیزیکی و مکانیکی کاغذهای استاندارد (۶۰ g/cm^2) ساخته‌شده از خمیرکاغذهای تیمارشده با غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز در مقایسه با کاغذهای ساخته‌شده از خمیرکاغذ شاهد (خمیرکاغذ تیمارنشده با پکتیناز) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که استفاده از آنزیم پکتیناز در مرکب‌زدایی کاغذ روزنامه باطله در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد به اندکی افزایش در درجهٔ روشنی و زردی و کاهش ماتی کاغذ منجر شد. با افزایش غلظت آنزیم پکتیناز از ۰/۰۵ به ۰/۲ درصد، درجهٔ روشنی به ۴۳/۸۳ درصد ایزو (حدود ۱ درصد افزایش) بهبود یافت و زردی کاغذ به ۱۸/۶۱ درصد ایزو (حدود ۳/۵ درصد) کاهش پیدا کرد. در غلظت‌های بیشتر از ۰/۳ درصد پکتیناز، درجهٔ روشنی کاغذ کاهش یافت و به زردی کاغذ افزوده شد. بیشترین ماتی کاغذ (۹۹/۴۹ درصد ایزو) با استفاده از ۰/۵ درصد آنزیم پکتیناز به‌دست آمد. نتایج مقایسهٔ ویژگی‌های فیزیکی کاغذهای ساخته‌شده نشان داد که با افزایش مصرف آنزیم پکتیناز، مقاومت به عبور هوا و دانسیتهٔ کاغذ بهبود یافت. همچنین، تیمار خمیرکاغذ با ۰/۳ درصد آنزیم پکتیناز در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد، کاغذهای با بیشترین مقادیر شاخص مقاومت به پارگی و ترکیدن را نتیجه داد.

واژگان کلیدی: آنزیم پکتیناز، کاغذ روزنامهٔ باطله، مرکب‌زدایی، ویژگی‌های نوری، ویژگی‌های مکانیکی.

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

مقدمه

در سال‌های اخیر، به دلیل کاهش منابع چوبی و افزایش تقاضای محصولات کاغذی و افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید کاغذهای بکر و حجم زیاد کاغذ موجود در زباله‌های شهری، ضرورت بازیافت کاغذ بیش از پیش احساس می‌شود. مرکب‌زدایی یکی از مراحل مهم در بازیافت کاغذ و استفادهٔ مجدد از آن است [۱؛ ۵]. مطابق پیش‌بینی‌های به‌عمل‌آمده تا سال ۲۰۲۰، ضریب رشد استفاده از گیاهان غیرچوبی حدود ۲ درصد و ضریب رشد ۳ درصد در مورد مصرف کاغذهای بازیافتی مطرح شده و این بیانگر آن است که در سال‌های آتی این صنعت باید بخش عمدهٔ مواد اولیهٔ ساخت کاغذ را از تکنولوژی بازیافت کاغذهای باطله برآورده کند [۶]. در سال‌های گذشته، توجه محققان به سوی بهینه‌سازی و یافتن راه‌های جدید در زمینهٔ حذف آلاینده‌ها، به‌ویژه ذرات مرکب از کاغذهای باطله، معطوف شده است [۲].

با توجه به افزایش آگاهی درخصوص تأثیر آلودگی در صنعت خمیر و کاغذ، تقاضا برای جایگزینی فرایندهای سنتی با فرایندهای سبز شامل استفاده از میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌ها افزایش یافته که این جایگزینی نه‌تنها عملی و اقتصادی است، بلکه سازگار با محیط زیست نیز است. به همین منظور، تلاش شده که برای حل مشکلات فرایند ساخت کاغذ، از آنزیم‌های مختلف استفاده کنند [۷]. آنزیم‌های میکروبی فناوری‌های جدیدی را برای عمل‌آوری الیاف و خمیرهای کاغذ فراهم می‌آورند. برای مثال، زایلاناز مقدار مواد شیمیایی مورد نیاز برای رنگ‌بری، انتشار سالانهٔ دی‌اکسیدکربن و فلزات سنگین موجود در پساب را کاهش می‌دهد [۴؛ ۸]. سلولاز درجهٔ روانی خمیرکاغذ را افزایش می‌دهد، الیاف را صاف‌تر می‌کند، و قابلیت زبری و خمش الیاف خشک را افزایش می‌دهد. همچنین، این آنزیم درصد خروج مرکب از کاغذ، دانسیته و سطح ویژهٔ آن را افزایش می‌دهد [۹].

محققان در سال‌های اخیر آنزیم‌های میکروبی زیادی را در مرکب‌زدایی کاغذهای باطله معرفی کرده‌اند و در این رابطه، آنزیم‌های سلولاز، همی‌سلولاز، لیپاز، پکتیناز، استراز، α-آمیلاز، و آنزیم‌های تجزیه‌کنندهٔ لیگنین[1] به دلیل قابلیت بالقوهٔ آن‌ها، به‌عنوان جایگزین مناسب مواد شیمیایی مضر مرکب‌زدایی در فرایند مرکب‌زدایی بیان شده‌اند [۱۰]. در اغلب موارد، از آنزیم‌های سلولاز و همی‌سلولاز در انواع مختلف کاغذ بازیافتی استفاده می‌شود. این در حالی است که سایر آنزیم‌ها برای منظور خاصی، مثلاً وجود عوامل اندودکننده یا مرکب‌های چاپ بر پایهٔ روغن‌های اشباع‌شده، در کاغذ استفاده می‌شود [۳؛ ۱۱].

آنزیم‌های پکتیناز موجب تسریع هیدرولیز پیوندهای گلیکوزیدی در پلیمرهای پکتینی[2] می‌شوند [۱۲]. لیپاز مقدار ترکیبات قیری را کاهش می‌دهد و آنزیم‌های تجزیه‌کنندهٔ لیگنین نیز لیگنین موجود در خمیرکاغذ را خارج می‌کنند [۱، ۸]. استفاده از آنزیم پکتیناز در خمیرکاغذهای مکانیکی و بازیافتی یا آب فرایندی کاتیون‌خواهی را کاهش می‌دهد [۱۳]. علاوه بر کاربردهای که تاکنون ذکر شده، نتایج تحقیقات

1. lignolytic enzymes
2. pectic polymers

نشان داد که استفاده از آنزیم‌هایی مانند پکتیناز، همی‌سلولاز، سلولاز و لیگنینازها می‌تواند با تأثیر بر سطوح و پیوندهای بین لیفی در مجاورت ذرات مرکب موجب تسهیل حذف ذرات مرکب در مراحل بعدی شود [۱۴-۱۶].

آنزیم‌ها جداسازی ذرات مرکب چاپ از سطح الیاف را افزایش می‌دهند و موجب می‌شوند که مرکب چاپ به ذرات کوچک‌تری شکسته شود. درنتیجه، ذرات حاصل خیلی آسان‌تر می‌توانند در مرحلهٔ مرکب‌زدایی به روش شست‌وشو یا ترکیب شست‌وشو- شناورسازی خارج شوند.

استفاده از آنزیم‌هایی مانند سلولاز، زایلاناز یا پکتیناز به‌منزلهٔ یک روش پیشرفته و نوین عملیاتی شده است؛ به‌طوری‌که این ترکیبات می‌توانند به‌طور انتخابی لایه‌های بیرونی الیاف سلولزی را جهت آزاد کردن مرکب از سطح الیاف هیدرولیز کنند. در مرکب‌زدایی آنزیمی، آنزیم‌ها بر روی مرکب یا سطح الیاف عمل می‌کنند و مکانیسم عمدهٔ آن‌ها مبتنی بر سست‌کردن اتصالات ذرات مرکب- الیاف و حذف ذرات ریز و فیبریل‌هاست [۱؛ ۹؛ ۱۷؛ ۱۸].

با توجه به اینکه آنزیم‌های مختلف تحت شرایط بهینهٔ مشخص به لحاظ غلظت یا میزان مصرف، دمای تیمار، میزان pH و زمان تیمار و همچنین منشأ آنزیم استخراج‌شده می‌توانند در مرکب‌زدایی کاغذهای باطله سودمند باشند، در این تحقیق غلظت آنزیم پکتیناز به‌منزلهٔ یکی از مشخصه‌های مهم تأثیرگذار در حذف ذرات مرکب کاغذهای باطله بررسی شد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی و خمیرکاغذسازی مجدد کاغذ روزنامه باطله

کاغذهای روزنامهٔ *همشهری* (چاپ افست سرد) از دفاتر مرکزی فروش روزنامه خریداری شد. پس از تعیین درصد رطوبت کاغذ روزنامه، روزنامه‌های باطله به تکه‌هایی با ابعاد ۲ـ۵ سانتی‌متر تبدیل و پس از خیس‌خوردن در آب به مدت ۲۴ ساعت به‌طور جداگانه در دستگاه پراکنده‌ساز (تحت شرایط درصد خشکی ۵ درصد، مدت زمان ۱۰ دقیقه با تعداد دور ۲۶۵۰۰) به خمیرکاغذ تبدیل شدند. خمیرکاغذ حاصل بر روی غربال ۲۰۰ مش آب‌گیری شد و سپس تیمار آنزیمی با استفاده از آنزیم پکتیناز در غلظت‌های مختلف در درون کیسهٔ پلاستیکی در حمام آب گرم انجام گرفت.

تیمار آنزیمی پکتیناز

تیمار آنزیمی خمیرکاغذ روزنامهٔ بازیافتی با استفاده از پودر تجاری آنزیم پکتیناز استخراج‌شده از *Aspergillus niger* با فعالیت آنزیمی پکتیناز u/mg ۱/۰۶ انجام شد. خمیرکاغذهای روزنامهٔ بازیافتی با استفاده از آنزیم پکتیناز تحت شرایط ثابت ۵ ± ۵۰ درجهٔ سیلسیوس، درصد خشکی ۱۰ درصد، زمان تیمار ۲۰ دقیقه [۲؛ ۴]، محدودهٔ pH ۵-۴/۵ در غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵ درصد در کیسه‌های پلاستیکی در حمام آب گرم تیمار شدند.

پس از تیمارهای آنزیمی، خنثی‌سازی آنزیم پکتیناز با استفاده از پروکسیدهیدروژن به میزان ۰/۰۵ درصد وزن خشک خمیرکاغذ انجام شد. پس از خنثی‌سازی آنزیم، شست‌وشوی خمیرکاغذهای

تیمارشده بر روی غربال ۲۰۰ مش به مدت ۱۰ دقیقه تحت فشار یکنواخت آب زیر شیر آب انجام گرفت و سپس از خمیرکاغذهای تهیه‌شده کاغذهای دست‌ساز استاندارد ۶۰ گرمی ساخته شد. تهیهٔ کاغذهای دست‌ساز ۶۰ گرمی مطابق استاندارد تاپی[1] با شمارهٔ T۲۰۵ sp-۹۵ انجام شد. ویژگی‌های نوری کاغذهای ساخته‌شده، مانند درجهٔ روشنی و زردی، مطابق با شمارهٔ استاندارد T ۴۵۲om-۰۲ و ماتی کاغذ هم با استاندارد T۴۲۵ om-۰۲ اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی کاغذ شامل ضخامت، مقاومت کاغذ به عبور هوای خمیرکاغذ به ترتیب با شمارهٔ استاندارد T ۴۱۱ om-۰۵، ۰۲- T ۴۶۰om انجام گرفتند. مقادیر دانسیته و حجم ویژهٔ کاغذ از طریق روابط موجود بین وزن پایه و ضخامت کاغذ محاسبه شدند. همچنین، شاخص مقاومت به پارگی و شاخص مقاومت به ترکیدن طبق استاندارد T ۴۱۴ om-۰۴و T۴۰۳ om-۹۶ اندازه‌گیری شدند. درنهایت، ویژگی‌های نوری، فیزیکی، و مقاومتی کاغذهای ساخته‌شده در غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز با کاغذهای حاصل از خمیرکاغذ شاهد (خمیرکاغذ روزنامهٔ بازیافتی تیمارنشده با آنزیم) مقایسه شد.

تجزیه و تحلیل آماری

در این تحقیق، از طرح کاملاً تصادفی استفاده شده است. از آزمون تجزیهٔ واریانس برای بررسی اثر عامل متغیر غلظت آنزیم پکتیناز بر ویژگی‌های نوری، فیزیکی، و مقاومتی کاغذهای حاصل از مرکب‌زدایی آنزیمی کاغذ روزنامه باطله استفاده شد. از آزمون دانکن نیز برای مقایسهٔ میانگین داده‌های به‌دست‌آمده به‌کار گرفته شد.

نتایج و بحث

بررسی ویژگی‌های نوری کاغذ

درجهٔ روشنی و زردی

آزمون تجزیهٔ واریانس درجهٔ روشنی و زردی کاغذهای روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده در غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز نشان داد که در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد، افزایش غلظت آنزیم مصرفی از ۰/۰۵ تا ۰/۵ درصد تأثیر معناداری بر درجهٔ روشنی و زردی کاغذ در سطح اعتماد ۹۹ درصد دارد (جدول‌های ۱ و ۲). همچنین، شواهد به‌دست‌آمده نشان داد که افزایش مصرف آنزیم پکتیناز تا سطح ۰/۲ درصد موجب افزایش عددی درجهٔ روشنی کاغذ شده است؛ هرچند این افزایش به‌لحاظ آماری معنادار نبوده است. زردی کاغذ نیز با مصرف ۰/۲ درصد آنزیم کاهش عددی را نشان می‌دهد. تأثیر غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز بر درجهٔ روشنی و زردی کاغذهای روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

استفاده از آنزیم پکتیناز در مقایسه با خمیرکاغذ بدون آنزیم (نمونهٔ شاهد) به بهبود درجهٔ روشنی کاغذ و کمی افزایش زردی کاغذ منجر شده است. بهبود هرچند اندک درجهٔ روشنی کاغذ را می‌توان به جداسازی ذرات مرکب یا دیگر ترکیبات رنگی موجود در ترکیب کاغذ باطله نسبت داد. سطح الیاف سلولزی می‌تواند به وسیلهٔ آنزیم‌های سلولاز، همی‌سلولاز و پکتیناز مورد حمله قرار گیرد؛ درنتیجه بر اثر هیدرولیز جزئی مولکول کربوهیدرات موجود در سطوح الیاف، ذرات مرکب جدا می‌شوند [۲؛ ۱۲].

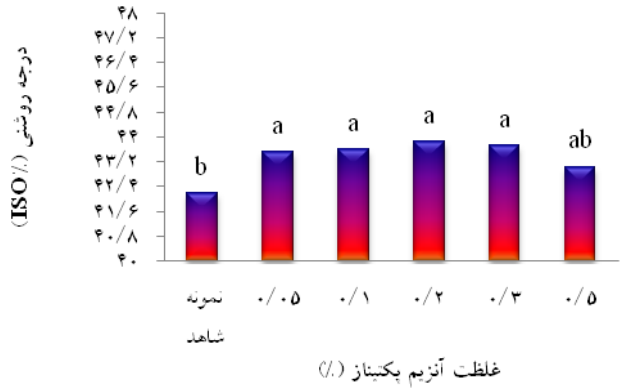
1. TAPPI

جدول ۱. تجزیهٔ واریانس درجهٔ روشنی کاغذهای روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده در غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز

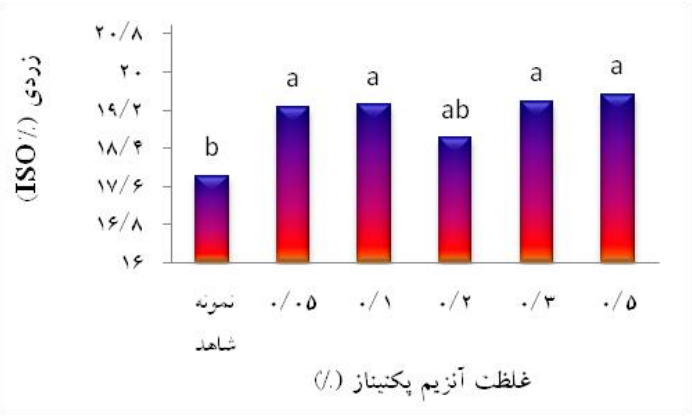
منابع تغییر S.O.V	مجموع مربعات S.S	درجهٔ آزادی d.f	میانگین مربعات M.S	F محاسبه‌شده	سطح معناداری
تیمار	۵/۷۱۸	۵	۱/۱۴۴		
خطا	۱/۳۹۰	۱۲	۰/۱۱۶	۹/۸۷۱	۰/۰۰۱
کل	۷/۱۰۸	۱۷			

جدول ۲. تجزیهٔ واریانس زردی کاغذهای روزنامه مرکب‌زدایی‌شده در غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز

منابع تغییر S.O.V	مجموع مربعات S.S	درجهٔ آزادی d.f	میانگین مربعات M.S	F محاسبه شده	سطح معناداری
تیمار	۶/۴۱۳	۵	۱/۲۸۳		
خطا	۲/۰۹۴	۱۲	۰/۱۷۴	۷/۳۵۲	۰/۰۰۲
کل	۸/۵۰۷	۱۷			



شکل ۱. تأثیر غلظت آنزیم پکتیناز بر درجهٔ روشنی کاغذ روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده



شکل ۲. تأثیر غلظت آنزیم پکتیناز بر زردی کاغذ روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده

افزایش غلظت آنزیم پکتیناز به ۰/۲ درصد به دلیل اثر نسبی آنزیم در شکستن اتصال بین الیاف و ذرات مرکب و کمک به جداسازی و خارج‌سازی بهتر مرکب طی فرایند شست‌وشو توانسته است درجهٔ روشنی را افزایش دهد؛ هرچند میزان افزایش درجهٔ روشنی چندان قابل توجه نبوده است (افزایش حدود ۱ درصد). افزایش غلظت آنزیم به ۰/۵ درصد به کاهش درجهٔ روشنی کاغذ منجر شده و دلیل کاهش روشنی را می‌توان به تأثیر بیشتر آنزیم بر روی ذرات مرکب و شکستن این ذرات و تبدیل آن‌ها به ذرات ریزتر نسبت داد. درنتیجه، احتمال رسوب مجدد ذرات مرکب بر روی الیاف و حفره‌های سلولی آن افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که رسوب مجدد ذرات مرکب بر روی الیاف با افزایش غلظت آنزیم تا ۰/۲ درصد به اندازهٔ رسوب مجدد این ذرات در حالت استفاده از ۰/۵ درصد آنزیم پکتیناز نبوده است. به همین دلیل، افت درجهٔ روشنی در غلظت بیشتر از ۰/۳ درصد آنزیم پکتیناز به دلیل ریزتر شدن احتمالی بیشتر ذرات مرکب با آنزیم، شدیدتر بوده است. در مقایسه با خمیرکاغذ بدون آنزیم، زردی کاغذهای حاصل از مرکب‌زدایی آنزیمی در غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز افزایش یافته است که دلیل عمدهٔ آن ممکن است تشکیل دوبارهٔ گروه‌های رنگ‌ساز موجود در لیگنین در شرایط خمیر کاغذسازی یا مرکب‌زدایی باشد. کاغذهای روزنامه از خمیرکاغذ مکانیکی لیگنین‌دار است؛ درنتیجه گروه‌های رنگ‌ساز موجود در لیگنین تحت شرایط به‌کارگرفته‌شده بار دیگر تشکیل شده و این موجب افزایش زردی کاغذها شده است. به نظر می‌رسد که میزان افزایش درجهٔ روشنی کاغذ به دلیل حذف ذرات مرکب مؤثرتر و بیشتر از کاهش درجهٔ روشنی آن به دلیل تشکیل گروه‌های رنگ‌ساز موجود در لیگنین بوده است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که تأثیر حذف ذرات مرکب در افزایش درجهٔ روشنی کاغذ به‌مراتب بیشتر از تأثیر گروه‌های رنگ‌ساز لیگنین بر کاهش درجهٔ روشنی کاغذ بوده است. به همین دلیل، در خمیرکاغذهای تیمارشده با پکتیناز در خمیرکاغذ فاقد آنزیم، افزایش درجهٔ روشنی و زردی کاغذ مشاهده می‌شود.

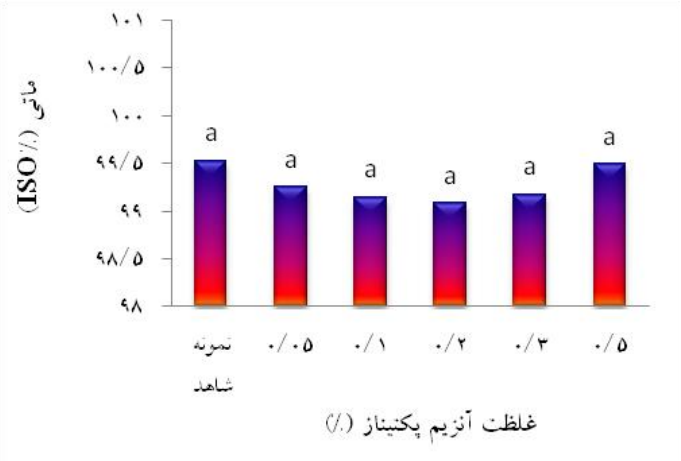
ماتی

نتایج آزمون تجزیهٔ واریانس تأثیر غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز بر میزان ماتی کاغذ نشان داد که در مقایسه با خمیرکاغذ فاقد آنزیم، افزایش غلظت آنزیم پکتیناز از ۰/۰۵ به ۰/۵ درصد تأثیر معناداری را بر ماتی کاغذ در سطح اعتماد ۹۹ درصد نشان نداده است (جدول ۳). درمجموع، می‌توان گفت که با استفاده از ۰/۵ درصد آنزیم پکتیناز در مرکب‌زدایی کاغذهای روزنامه باطله می‌توان کاغذهای با ماتی بیشتر (۹۹٪ ISO) به‌دست آورد؛ هرچند این اختلاف با سایر سطوح مختلف پکتیناز معنادار نبوده است. تأثیر غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز بر ماتی کاغذهای روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

استفاده از ۰/۰۵ تا ۰/۳ درصد آنزیم پکتیناز در مرکب‌زدایی کاغذ روزنامهٔ باطله در مقایسه با خمیرکاغذ فاقد آنزیم به کاهش ماتی کاغذ منجر شده است. به عبارت دیگر، افزایش غلظت آنزیم پکتیناز تا ۰/۳ درصد در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد به بهبود ماتی منجر نشده است.

جدول ۳. آزمون تجزیهٔ واریانس ماتی کاغذهای روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده در غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز

منابع تغییر S.O.V	مجموع مربعات S.S	درجهٔ آزادی d.f	میانگین مربعات M.S	F محاسبه‌شده	سطح معناداری
تیمار	۰/۶۹۳	۵	۰/۱۳۹		
خطا	۰/۴۹۷	۱۲	۰/۰۴۱	۳/۳۴۶	۰/۰۴۰
کل	۱/۱۸۹	۱۷			



شکل ۳. تأثیر غلظت آنزیم پکتیناز بر ماتی کاغذ روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده

دلیل کاهش ماتی کاغذ در صورت استفاده از ۰/۰۵ تا ۰/۳ درصد آنزیم پکتیناز می‌تواند به جداسازی بیشتر ذرات مرکب از الیاف طی فرایند شست‌وشو نسبت داده شود؛ چون ذرات مرکب بیشتر در خمیرکاغذ با افزایش قابلیت جذب نور خمیرکاغذ موجب افزایش ماتی می‌شود.

ماتی کاغذ در غلظت بیش از ۰/۲ درصد آنزیم پکتیناز، به دلیل رسوب مجدد ذرات مرکب بر روی الیاف یا حفره‌های سلولی آن بهبود یافت. وجود ذرات مرکب بیشتر در خمیرکاغذ به منزلهٔ جذب نور بیشتر خمیرکاغذ است. درنتیجه، افزایش ذرات مرکب خمیرکاغذ موجب افزایش ماتی کاغذ می‌شود. همچنین، در غلظت‌های بیشتر، آنزیم با تأثیر بیشتر بر الیاف و افزایش سطح ویژهٔ آن موجب افزایش پراکندگی و پخش نور می‌شود و ماتی را بهبود می‌بخشد.

بررسی ویژگی‌های فیزیکی کاغذ

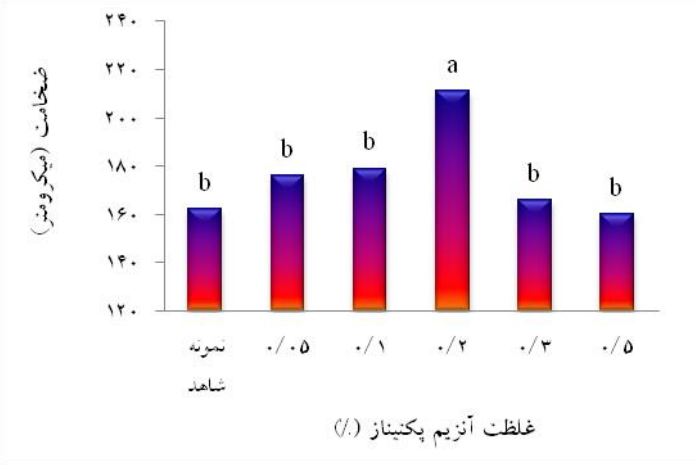
ضخامت

آزمون تجزیهٔ واریانس ضخامت کاغذهای حاصل از مرکب‌زدایی کاغذهای روزنامه باطله با استفاده از غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز نشان داد که در مقایسه با خمیرکاغذ فاقد آنزیم، استفاده از غلظت‌های مختلف آنزیم تأثیر معناداری را در میزان ضخامت کاغذ دارد (جدول ۴). مقایسهٔ میانگین مقادیر ضخامت کاغذهای ساخته‌شده با آزمون دانکن نشان

داد که فقط اختلاف معناداری بین میزان ضخامت کاغذ در غلظت ۰/۲ درصد و سایر تیمارها مشاهده شده و بین دیگر تیمارهای انجام‌شده اختلاف معناداری در سطح اعتماد ۹۹ درصد بین میزان ضخامت کاغذ دیده نشده است. افزایش غلظت آنزیم پکتیناز به ۰/۵ درصد میزان ضخامت کاغذ را به کمترین میزان خود، یعنی ۱۶۸/۲ میکرومتر، کاهش داده است. تأثیر غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز بر ضخامت کاغذهای روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴. آزمون تجزیهٔ واریانس ضخامت کاغذهای روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده در غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز

منابع تغییر S.O.V	مجموع مربعات S.S	درجهٔ آزادی d.f	میانگین مربعات M.S	F محاسبه‌شده	سطح معناداری
تیمار	۵۰۷۰/۴۴۴	۵	۱۰۱۴/۰۸۹		
خطا	۶۹۲/۶۶۷	۱۲	۵۷/۷۲۲	۱۷/۵۶۸	۰/۰۰۰
کل	۵۷۶۳/۱۱۱	۱۷			



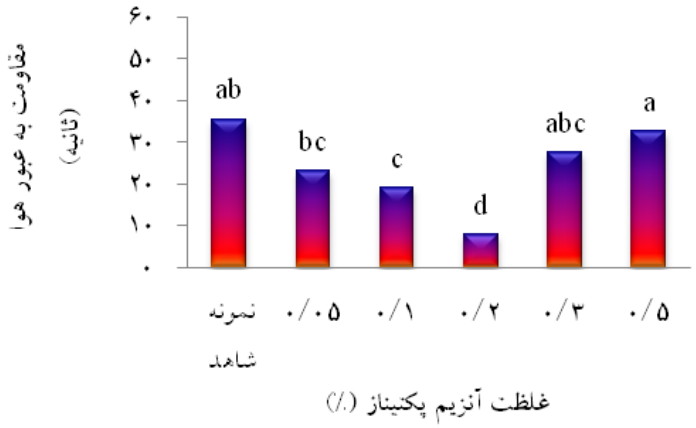
شکل ۴. تأثیر غلظت آنزیم پکتیناز بر ضخامت کاغذ روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده

مقاومت به عبور هوا

شواهد به‌دست‌آمده از تجزیهٔ واریانس مقادیر مقاومت به عبور هوا در کاغذهای ساخته‌شده نشان داد که استفاده از درصدهای مختلف آنزیم پکتیناز افزایش معناداری را در میزان مقاومت کاغذ به عبور هوا نتیجه داده است (جدول ۵). استفاده از غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز در مقایسه با خمیرکاغذ فاقد آنزیم به کاهش میزان مقاومت کاغذ به عبور هوا منجر شده است. افزایش غلظت آنزیم به ۰/۲ مقاومت به عبور هوای کاغذ را به ۷/۷۳ ثانیه کاهش داده است. اما با افزایش غلظت آنزیم به ۰/۵ درصد مقاومت به عبور هوای کاغذ افزایش داشته است؛ به‌طوری‌که بیشترین میزان مقاومت به هوا با مصرف ۰/۵ درصد آنزیم پکتیناز ۳۲/۶۳ ثانیه بوده است. تأثیر غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز بر مقاومت به عبور هوا در کاغذهای روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده در شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵. آزمون تجزیهٔ واریانس مقاومت به عبور هوای کاغذهای روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده در غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز

منابع تغییر S.O.V	مجموع مربعات S.S	درجهٔ آزادی d.f	میانگین مربعات M.S	F محاسبه‌شده	سطح معناداری
تیمار	۱۵۲۹/۴۲۹	۵	۳۰۵/۸۸۶		
خطا	۲۴۵/۸۳۳	۱۲	۲۰/۴۸۶	۱۴/۹۳۱	۰/۰۰۰
کل	۱۷۷۵/۲۶۲	۱۷			



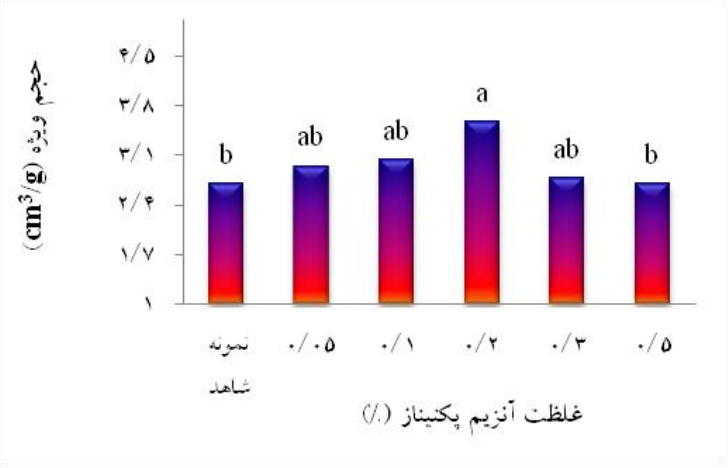
شکل ۵. تأثیر غلظت آنزیم پکتیناز بر مقاومت به عبور هوای کاغذ روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده

حجم ویژه

نتایج حاصل از آزمون تجزیهٔ واریانس مقادیر حجم ویژهٔ کاغذهای ساخته‌شده در غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز نشان داد که در مقایسه با خمیرکاغذ فاقد آنزیم، استفاده از ۰/۲ درصد آنزیم پکتیناز تأثیر معناداری در افزایش حجم ویژهٔ کاغذ داشته است (جدول ۶). تأثیر غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز بر حجم ویژهٔ کاغذهای روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده به ترتیب در شکل ۶ نشان داده است.

جدول ۶. آزمون تجزیهٔ واریانس حجم ویژهٔ کاغذهای روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده در غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز

منابع تغییر S.O.V	مجموع مربعات S.S	درجهٔ آزادی d.f	میانگین مربعات M.S	F محاسبه‌شده	سطح معناداری
تیمار	۲۱/۹۴۹	۵	۴/۳۹۰		
خطا	۱۲/۰۰۰	۱۲	۱/۰۰۰	۴/۳۹۰	۰/۰۱۷
کل	۳۳/۹۴۹	۱۷			



شکل ۶. تأثیر غلظت آنزیم پکتیناز بر حجم ویژهٔ کاغذ روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده

تیمار آنزیمی خمیرکاغذ روزنامهٔ بازیافتی (تا سطح مصرف ۰/۲ درصد) به افزایش حجم ویژهٔ (کاهش دانسیته) کاغذ منجر شده است. کاهش دانسیته یا افزایش ضخامت خمیرکاغذهای تیمارشده با پکتیناز در مقایسه با خمیرکاغذ شاهد را می‌توان به کم‌شدن قابلیت انعطاف‌پذیری و تغییر شکل الیاف و همچنین خارج‌شدن احتمالی نرمه‌های الیاف نسبت داد. اعمال تیمار آنزیمی به دلیل فیبریله‌کردن الیاف و جداسازی ذرات مرکب، اتصال بین الیاف و درنتیجه اتصال‌های داخلی ورقهٔ کاغذ را بهبود بخشیده و موجب افزایش ویژگی‌های مقاومتی کاغذ (افزایش دانسیتهٔ کاغذ) می‌شود [۱۴؛ ۱۶؛ ۱۹]. همان‌طور که اشاره شد، استفاده از آنزیم‌هایی مانند سلولاز، زایلاناز یا پکتیناز موجب می‌شود لایه‌های سطحی الیاف سلولزی به‌طور انتخابی هیدرولیز و درنتیجه موجب تسهیل جداسازی و آزادشدن مرکب چاپ از سطح الیاف شوند [۱۷؛ ۲۰]. در این تحقیق، با توجه به میزان نرمه‌های قابل توجه در خمیرکاغذ بررسی‌شده (خمیرکاغذ مکانیکی روزنامه)، به‌نظر می‌رسد با افزایش مصرف آنزیم تا ۰/۲ درصد، نرمه‌ها در مقایسه با الیاف بیشتر تحت‌تأثیر فعالیت آنزیمی قرار گرفته باشند. درنتیجه، با هیدرولیز و خروج بخش عمدهٔ آن‌ها، کاغذهای نهایی ضخیم‌تر و درنتیجه حجیم‌تر شده‌اند. اما با استفاده از مقادیر بیشتر آنزیم (بیش از ۰/۲ درصد) شدت عمل آنزیم در هیدرولیز لایه‌های سطحی الیاف بیشتر شده و درنتیجه با خروج بیشتر مرکب چاپ چسبیده به نرمه‌ها یا فیبریل‌ها، کمی قابلیت پیوندیابی بین الیاف تقویت یافته و کاغذهای با دانسیتهٔ بیشتر نتیجه شده است؛ هرچند در بسیاری از موارد اختلاف مقادیر ضخامت کاغذ به‌لحاظ آماری معنادار نبوده است. با افزایش غلظت آنزیم پکتیناز به ۰/۵ درصد، کاهش ضخامت کاغذ (یا افزایش دانسیته) و افزایش مقاومت کاغذ به عبور هوا را می‌توان به فیبریله شدن یا ریش‌ریش شدن بیشتر الیاف (بر اثر هیدرولیز یا کنده‌شدن لایه‌های سطحی الیاف) و خمیرکاغذ و افزایش قابلیت لهیدگی الیاف و همچنین جداسازی ذرات مرکب و قابلیت برقراری بهتر اتصال بین الیاف نسبت داد. این در حالی است که در غلظت‌های کمتر از ۰/۲ درصد پکتیناز مصرفی، تأثیر آنزیم بر الیاف و ذرات مرکب

کمتر بوده و با فیبریله‌شدن ضعیف‌تر الیاف و همچنین هیدرولیز بیشتر نرمه‌های خمیرکاغذ اتصال بین الیاف کاهش یافته، بنابراین تا سطح مصرف ۰/۲ درصد پکتیناز با توجه به خروج بخش عمدهٔ نرمه‌ها از ترکیب خمیرکاغذ، ضخامت کاغذ افزایش و مقاومت کاغذ به عبور هوای کاغذ کاهش یافته است.

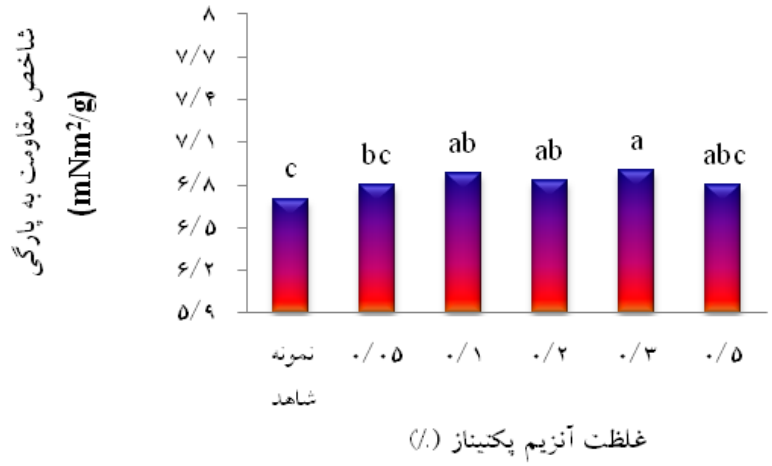
بررسی ویژگی‌های مکانیکی کاغذ

شاخص مقاومت به پارگی

تجزیهٔ واریانس داده‌های به‌دست‌آمده از مقادیر شاخص مقاومت به پارگی کاغذها نشان داد که این مقادیر در سطح اعتماد آماری ۹۹ درصد اختلاف معناداری دارند (جدول ۷). مقایسهٔ میانگین داده‌های به‌دست‌آمده با آزمون دانکن نشان داد که بین مقادیر شاخص مقاومت به پارگی نمونهٔ شاهد با تیمارهای ۰/۳ و تیمار شاهد اختلاف معناداری در سطح اعتماد ۹۹ درصد مشاهده شده است؛ به‌نحوی‌که بیشترین شاخص مقاومت به پارگی با افزودن ۰/۳ درصد آنزیم پکتیناز به‌دست آمد که مقدار آن برابر با mNm^2/g ۶/۹۳ است (شکل ۷).

جدول ۷. آزمون تجزیهٔ واریانس شاخص مقاومت به پارگی کاغذهای روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده در غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز

منابع تغییر S.O.V	مجموع مربعات S.S	درجهٔ آزادی d.f	میانگین مربعات M.S	F محاسبه‌شده	سطح معناداری
تیمار	۰/۱۲۹	۵	۰/۰۲۶		
خطا	۰/۰۴۵	۱۲	۰/۰۰۴	۶/۹۳۵	۰/۰۰۳
کل	۰/۱۷۴	۱۷			



شکل ۷. تأثیر غلظت آنزیم پکتیناز بر شاخص مقاومت به پارگی کاغذ روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده

به‌طورکلی، عوامل مختلفی بر مقاومت پارگی کاغذ تأثیرگذارند که طول الیاف، تعداد الیاف دخیل در پاره‌شدن، تعداد اتصالات بین الیاف، مقاومت اتصالات، و مقاومت ذاتی الیاف از مهم‌ترین آن‌ها هستند [۹؛ ۱۹]. تعداد الیاف دخیل در پاره‌شدن کاغذ به کمک وزن پایه و براساس انعطاف‌پذیری کاغذ

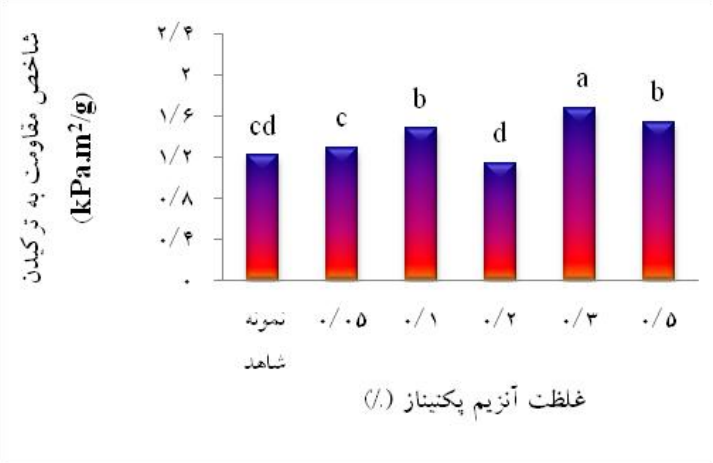
تعیین می‌شوند. طول الیاف فاکتور بسیار مهمی در مقاومت به پاره‌شدن کاغذ است. مقاومت به پارگی با افزایش طول الیاف افزایش می‌یابد؛ چون افزایش طول الیاف به منزلهٔ افزایش نیروی لازم برای کندن و جداسازی الیاف است [۱۹]. افزایش غلظت آنزیم پکتیناز تا ۰/۳ درصد به بهبود شاخص مقاومت به پارگی کاغذها منجر شده است. البته این بهبود به لحاظ آماری معنادار نیست. با توجه به عمل هیدرولیز نرمه‌ها با آنزیم، به‌طور نسبی متوسط طول الیاف خمیرکاغذهای تیمارشده با آنزیم نسبت به نمونهٔ شاهد می‌تواند بیشتر باشد؛ چون الیاف بلندتر خمیرکاغذ نسبت به شرایط هیدرولیز محافظت شده است [۲۰]. بنابراین، آنزیم پکتیناز تا حدودی موجب افزایش شاخص مقاومت به پارگی کاغذ شده است.

شاخص مقاومت به ترکیدن

نتایج حاصل از تجزیهٔ واریانس مقادیر شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذها نشان داده است که این مقادیر اختلاف معناداری در سطح اعتماد آماری ۹۹ درصد دارند (جدول ۸). آزمون دانکن این مقادیر را در چهار گروه مجزا قرار داده است. البته شایان ذکر است که بین مقادیر شاخص مقاومت به ترکیدن تیمارهای ۰/۱ و ۰/۵ درصد و همچنین تیمارهای ۰/۰۵ درصد و تیمار شاهد اختلاف معناداری در سطح اعتماد ۹۹ درصد مشاهده نشده است. بیشترین و کمترین شاخص مقاومت به ترکیدن به ترتیب به تیمارهای ۰/۳ درصد و ۰/۲ درصد اختصاص داشته و این مقادیر به ترتیب ۱/۶۸ $kPa.m^2/g$ و $kPa.m^2/g$ ۱/۱۴ هستند (شکل ۸).

جدول ۸. آزمون تجزیهٔ واریانس شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذهای روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده در غلظت‌های مختلف آنزیم پکتیناز

منابع تغییر S.O.V	مجموع مربعات S.S	درجهٔ آزادی d.f	میانگین مربعات M.S	F محاسبه‌شده	سطح معناداری
تیمار	۰/۶۴۸	۵	۰/۱۳۰		
خطا	۰/۰۲۶	۱۲	۰/۰۰۲	۵۹/۳۸۲	۰/۰۰۰
کل	۰/۶۷۴	۱۷			



شکل ۸. تأثیر غلظت آنزیم پکتیناز بر شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذ روزنامهٔ مرکب‌زدایی‌شده

مقاومت به ترکیدن کاغذ تحت‌تأثیر دو عامل مهم طول الیاف و اتصال بین الیاف قرار می‌گیرد. اگرچه مقاومت به ترکیدن کاغذ با افزایش طول الیاف افزایش می‌یابد، بیشتر به اتصال میان الیاف بستگی دارد. در مرکب‌زدایی آنزیمی، شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذها با افزایش غلظت آنزیم پکتیناز از ۰/۰۵ تا ۰/۳ درصد بهبود یافته است. استفاده از آنزیم پکتیناز با تأثیر بر سطوح و پیوندهای بین‌لیفی در مجاورت ذرات مرکب موجب تسهیل زدودن ذرات مرکب و به بهبود ویژگی مقاومتی کاغذ منجر می‌شود [۱۴؛ ۱۶]. بنابراین، با افزایش غلظت آنزیم مصرفی، به‌نظر می‌رسد میزان فیبریله‌شدن الیاف افزایش یافته و با جداسازی و تفکیک بهتر ذرات مرکب، تعداد اتصال میان الیاف بیشتر شده است؛ درنتیجه، شاخص مقاومت به ترکیدن کاغذ بهبود می‌یابد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش بیانگر آن است که آنزیم پکتیناز در مرکب‌زدایی کاغذهای بازیافتی نسبتاً مؤثر واقع شده است. افزایش غلظت آنزیم پکتیناز از ۰/۰۵ به ۰/۲ درصد، هم‌زمان با خروج مرکب چاپ، به بهبود درجهٔ روشنی کاغذ منجر شد و زردی کاغذ نیز حدوداً ۳/۵ درصد کاهش یافت. اما در غلظت‌های بیشتر از ۰/۳ درصد پکتیناز، کاغذهای زردتر و با درجهٔ روشنی کمتر حاصل شده است. افزایش غلظت آنزیم پکتیناز به ۰/۳ درصد به بهبود سطح اتصال بین الیاف درنتیجه بهبود ویژگی مقاومتی کاغذ منجر شده است. همچنین، با استفاده از آنزیم پکتیناز می‌توان هم‌زمان با شاخص مقاومت به ترکیدن بیشتر، کاغذهای با شاخص مقاومت به پارگی معادل و حتی بیشتر را تولید کرد. به‌طورکلی، استفاده از آنزیم پکتیناز در سطح مصرف کمتر از ۰/۲ درصد چندان کارآمد نیست و کاغذهای حجیم‌تر (مقاومت کلی کمتر) و زردتر را نتیجه داده است.

References

[1]. Welt, T. (1996). Enzymatic deinking effectiveness and mechanisms. Doctoral dissertation. The Institute of Paper Science and Technology. Atlanta, Georgia. 10pp.

[2]. Bajpai, P. (1998). Biotechnology for Environmental Protection in pulp and paper industry. Germany. Springer, Pp: 91-107.

[3]. Bajpai, P., and Bajpai, P. K., (1998). Deinking with enzymes: A review. Tappi Journal, 81(12), 111-117.

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

[5]. Ghasemian, A., and Akbarpour, I. (2011). The strategy of paper recycling and its position on supplying the lignocellulosic materials required for local pulp and paper industries. 1st Way Map Conference for Supplying of Raw Material and Development of Wood and Paper Industry at Horizon 1404, p.4.

[6]. American Forest & Paper Association (AF&PA) (2010). Paper Recycling, US EPA.htm file.

[7]. Ricard, M., Reid, I., and Orcootoma, J. A. (2005). Pectinase reduces the cationic demand of peroxide-bleached TMP: A paper machine trial, Pulp and Paper Canada, 106(12): T258-T263.

[8]. Paice, M.G., Bourbonnais, R., Reid, I.D., Archibald, and Jurask, L.J. (1995). Journal of Pulp and Paper Science, 96(1):1684-1689.

[9]. 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.

[10]. Soni, R., Nazir, A., Chadha, B. S., and Saini, H. S. (2008). Novel sources of fungal cellulases for efficient deinking of composite paper waste. BioResources, (3): 234-246.

[11]. Pathak, P., Bhardwaj, N.K., and Singh, A.K. (2011). Optimization of chemical and enzymatic deinking of photocopier waste paper. BioResources, 6(1), 447-463.

[12]. Verma, N., Bansal, M.C., and Kumar, V. (2011). Enzymatic and other recent approaches in waste paper recycling technology. Journal of Industrial Research & Technology, 1(1), 46-55.

[13]. Miao, Q. (2009). Study of the dissolved and colloidal substances in aspen CTMP and APMP, Doctoral dissertation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin, China.

[14]. Jeffries, T.W., Klungness, J.H., Sykes, M.S., and Rutledge-Cropsy, K.R. (1994). Comparison of enzyme-enhanced with conventional Deinking of xerographic and laser-printed paper. Tappi Journal, 77:4. 173-179.

[15]. Aehle, W. (2003). *Enzymes in Industry*, 2nd E. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Pp: 234-236.

[16]. Vyas, S.R., and Lachke, A. (2003). Biodeinking of mixed Office Waste Paper by Alkaline Active Cellulases from alkalotolerant Fusarium SP. Enzyme and Microbial Technology, 32: 236-245.

[17]. Heise, O.U., Unwin, J.P., Klungness, J.H., Fineran, W.G., Sykes, M., and Abubakr, S. (1996). Industrial scale-up of enzyme enhanced deinking of non-impact printed toners. Tappi Journal, 79:3.207- 212.

[18]. Quinghua, XU. Menghua, Q. Sholan, Sh. Liquiang, J., and Yingjuan, F. (2006). Structural

changes in lignin during the deinking of old newsprint with Laccase-Violuric acid system. Enzyme and Microbial Technology, 39:969-975.

[19]. Afra, E. (2003). *Properties of Paper*. Agricultural Sciences Press, 392p.

[20]. Bajpai, P., Mishra, Sh.P., Mishra, O.P., Kumar, S., and Bajpai, P.K. (2006). Use of enzymes for reduction in refining energy-laboratory studies. Tappi Journal, 5:11.25-32.