

Influence of Xylanase on the Viscosity and Mechanical Properties of Bagasse Pulp in ECF Bleaching Sequences

Pejman Rezayati Charani^{1*}, Fatemeh Qaisari Asl², Mohammad Hadi Moradian³, Ladan Poursartip³

1- Corresponding author, Associate Prof., Department of Cellulose Technology Engineering, Natural Resources Faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran. Email: rezayati@bkatu.ac.ir

2- Graduated Master of pulp and paper technology, Department of cellulose technology engineering, natural resources faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of technology, Behbahan

3- Assistant Prof., Department of Cellulose Technology Engineering, Natural Resources Faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

Received: September 2024

Accepted: November 2024

Abstract

Problem definition and objectives: Treatments are carried out in different ways to dissolve and remove colored substances, mainly lignin, to prepare paper pulp from different lignocellulosic sources. Treatment methods, whether in combination or individually, can significantly impact the strength of the cellulose fibers used in papermaking. The bleaching treatment of paper pulp, which is usually used after pulping, is always associated with damage to the structure of paper pulp. In this regard, it is tried to use selective methods in bleaching. Determining the viscosity of pulp fibers is a measure to evaluate their strength in papermaking. The viscosity of pulp fibers shows the amount of chemical damage to the fibers through indirect measurement of the cellulose chain polymerization degree in the fibers. The viscosity of paper pulp is a measure to evaluate its strength in papermaking. This study investigated the effect of the xylanase enzyme on maintaining the viscosity of unbleached soda bagasse pulp prepared from Pars Paper Industries through ECF bleaching using pulp preparation methods with limited viscosity loss.

Methodology: Unbleached bagasse pulp with 5% consistency was treated using xylanase enzyme at three levels (2, 5, and 10 U/g) and a pH of 5.5 for 60 minutes. Chemical bleaching with the sequence XE1DE2 was done at 10% pulp consistency and 70 and 60 degrees Celsius for stages D and E, respectively. The amount of active chlorine in both treatments was considered 3% based on the initial kappa number of the pulp. Properties of the pulp and handsheets, including pulp yield and viscosity, in addition to grammage, thickness, density, degree of brightness, fold resistance, and tensile strength of handsheets, were measured.

Results: Results showed that the yield of pulps decreased with increasing enzyme consumption and the use of more chemical bleaching steps. Xylanase treatment up to 2U level can help maintain the viscosity of pulp, but consumption of 5U and 10U severely reduces the viscosity of the final pulps. Xylanase treatment up to 2U can also increase pulp brightness during chemical bleaching. However, the higher consumption of xylanase will not affect the final paper's brightness but preserve its strength after bleaching, which showed itself in the evaluation of folding resistance and

tensile strength. In addition, using xylanase treatment reduced the chlorine dioxide consumption to achieve a certain degree of brightness, which, regarding this factor, the consumption of more enzymes in a relatively linear manner reduced the consumption of chlorine dioxide in the bleaching stage.

Conclusion: In general, the moderate use of xylanase can be introduced at the level of 2U according to the information of this research, which leads to a reduction in the consumption of bleaching chemicals and can be environmentally significant. However, using more xylanases not only does not permanently increase the brightness but also causes damage to the mechanical resistance of the paper. In general, the usage of 2U xylanase is recommended for the bleaching of brown bagasse soda pulp.

Keywords: Xylanase, Soda pulping, Bagasse, Pulp viscosity, Pulp bleaching.

تأثیر زایلاناز بر گرانبوی و ویژگی‌های مقاومتی خمیر کاغذ باگاس در توالی رنگ‌بری ECF

پژمان رضایتی چرانی^{۱*}، فاطمه قیصری اصل^۲، محمدهادی مرادیان^۳، لادن پورسرتیپ^۳

۱- نویسنده مسئول، دانشیار گروه جنگلداری و صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران. پست الکترونیک: rezayati@bkatu.ac.ir

۲- دانش‌آموخته مهندسی صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران.

۳- استادیار گروه جنگلداری و صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران.

تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۳

تاریخ دریافت: آذر ۱۴۰۳

چکیده

بیان مساله و اهداف: تیمارهای آماده‌سازی خمیر کاغذ از منابع لیگنوسلولزی مختلف به روش‌های متنوعی صورت می‌گیرد که در راستای انحلال و خارج‌سازی مواد رنگی به‌ویژه لیگنین است. استفاده از این روش‌های تیمار به صورت ترکیبی و یا انفرادی موجب آسیب به استحکام الیاف سلولزی مصرفی کاغذسازی می‌شود. تیمار رنگ‌بری خمیر کاغذ که معمولاً بعد از خمیرسازی استفاده می‌شود، همواره با آسیب به ساختار خمیر کاغذ همراه است که در این راستا سعی می‌شود از روش‌های گزینش پذیر در رنگ‌بری استفاده شود. تعیین گرانبوی الیاف خمیر کاغذ معیاری برای ارزیابی عملکرد استحکام آن در محصولات کاغذسازی محسوب می‌شود که از طریق اندازه‌گیری غیرمستقیم درجه بسپارش زنجیره سلولز در الیاف، مقدار آسیب شیمیایی به الیاف را نشان می‌دهد. در راستای استفاده از روش‌های آماده‌سازی خمیر کاغذ با افت کم گرانبوی، در این پژوهش تأثیر آنزیم زایلاناز بر حفظ گرانبوی خمیر کاغذ سودا رنگ‌بری نشده باگاس تهیه‌شده از صنایع کاغذ پارس در رنگ‌بری ECF بررسی شد.

مواد و روشها: خمیر کاغذ رنگ‌بری نشده باگاس با درصد خشکی ۵ با استفاده از آنزیم زایلاناز، در سه سطح (۲ و ۵ و ۱۰ U/g) و در مدت زمان ۶۰ دقیقه، تحت اسیدیته ۵/۵ تیمار شد. رنگ‌بری با مواد شیمیایی با توالی XEIDE2 در ۱۰ درصد خشکی خمیر کاغذ و دمای ۷۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای مراحل D و E، انجام شد. مقدار کلر فعال در تیمار دی‌اکسید کلر بر پایه عدد کاپای اولیه خمیر کاغذها ۳ درصد در نظر گرفته شد. ویژگی‌های خمیر کاغذ و کاغذ حاصل شامل بازده و گرانبوی خمیر کاغذ، گراماژ، ضخامت، جرم حجمی، درجه روشنی، مقاومت به تاخوردگی و کشش اندازه‌گیری شد.

نتایج: نتایج نشان داد با افزایش مصرف آنزیم و استفاده از مراحل بیشتر رنگ‌بری شیمیایی راندمان خمیر کاغذ کاهش یافت البته در سطح ۲U زایلاناز، افت بازده نسبت به سطوح دیگر آنزیم کمتر بوده است. تیمار زایلاناز تا سطح ۲U، به حفظ گرانبوی خمیر کاغذ کمک کرد اما مصرف سطوح ۵ و ۱۰ U موجب افت گرانبوی خمیر کاغذهای نهایی ضمن تیمارهای شیمیایی تکمیلی رنگ‌بری شد. همچنین، تیمار زایلاناز تا سطح ۲U موجب افزایش درجه روشنی خمیر کاغذها طی فرآیندهای رنگ‌بری با مواد شیمیایی شد؛ اما مصرف بیشتر تأثیری بر درجه روشنی کاغذ نهایی نداشت. بلکه موجب حفظ بیشتر مقاومت‌های کاغذ نهایی پس از رنگ‌بری شد که در ارزیابی مقاومت به تاخوردگی و مقاومت کششی خود را نشان داد. در ضمن استفاده از تیمار زایلاناز از طریق تسهیل لیگنین‌زدایی با حذف همی سلولز زایلان موجب کاهش مصرف دی‌اکسید کلر برای دستیابی به درجه روشنی بیش از ۷۰ درصد شد که در رابطه با این عامل، مصرف بیشتر آنزیم به صورت نسبتاً خطی موجب کاهش مصرف دی‌اکسید کلر در مرحله رنگ‌بری شد.

نتیجه‌گیری: تیمار ملایم آنزیمی زایلاناز با توجه به اثرات حذف همی سلولز زایلان می‌تواند به نفوذ و واکنش-پذیری گزینش پذیر مواد شیمیایی با ترکیبات لیگنینی کمک کند که با توجه به کاهش مصرف مواد شیمیایی رنگ‌بر، از نظر زیست محیطی قابل توجه می‌باشد. با این وجود، مصرف بیشتر زایلاناز نه تنها به‌طور پیوسته موجب افزایش درجه

روشنی نمی‌شود، بلکه موجب آسیب به مقاومت‌های مکانیکی کاغذ می‌شود. در مجموع استفاده از زایلانا در سطح مصرف ۲U برای رنگبری خمیر کاغذ قهوه‌ای سودای باگاس توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: زایلانا، خمیرسازی سودا، باگاس، گرانروی خمیر کاغذ، رنگ‌بری خمیر کاغذ.

مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل زیست محیطی مورد بحث طی چند سال گذشته، بهره‌برداری از جنگل‌ها برای تهیه چوب و کاغذ بوده است. طی سالیان گذشته، چوب مهم‌ترین منبع تأمین الیاف برای تولید خمیر کاغذ در سطح جهان بوده است. مصرف جهانی چوب از سال ۱۹۵۰ بیش از دو برابر افزایش یافته است و آخرین پیش‌بینی‌های فائو تخمین می‌زند که تا سال ۲۰۳۰ مصرف جهانی گرده‌بینه صنعتی ۶۰ درصد نسبت به سطح فعلی افزایش می‌یابد و به حدود ۲۴۰۰ میلیون مترمکعب می‌رسد. افزایش جمعیت و نیاز به چوب و فرآورده‌های چوبی از جمله کاغذ باعث شده که جنگل به‌تنهایی قادر به تأمین نیاز چوب نباشد، از این رو استفاده از پسماند گیاهان کشاورزی به‌عنوان ماده اولیه لیفی در ساخت کاغذ مورد توجه است. مصرف مواد خام لیگنوسولوزی بومی در کشورهای در حال توسعه می‌تواند تا حد زیادی سبب کاهش هزینه‌های واردات کاغذ شود، الیاف غیرچوبی به‌رغم مقادیر نسبت کمتر این مناطق دارای اهمیت است. مهم‌ترین منابع الیاف غیرچوبی شامل باگاس، خیزران، جوت، رامی، کنف، کتان و پنبه است [۱]. باگاس یکی از مهم‌ترین منابع لیگنوسولوزی برای تولید خمیر کاغذ در کشور ما به‌ویژه در استان خوزستان به شمار می‌آید. باگاس به‌عنوان پسماند باقیمانده در صنعت نیشکر دارای سلولز (۳۲-۳۲ درصد)، همی سلولز (۳۲/۳۲ درصد)، لیگنین (۱۹-۲۴ درصد) است [۲].

برای تولید کاغذ با کیفیت خوب و بادوام لازم است لیگنین از ساختار الیاف خارج شود. در فرآیند تولید خمیر کاغذ برای کاربردهای تولید خمیر کاغذ سفید، ضرورت دارد تمامی لیگنین بدون افت یا تخریب کربوهیدرات‌ها تحت شرایط فرآیندی مختلف حذف شود، اما در عمل خارج‌سازی گزینشی لیگنین امکان‌پذیر نیست و در تمامی روش‌های موجود تهیه خمیر کاغذ نوعی

سازش بین حذف لیگنین و تخریب کربوهیدرات‌های اتفاق می‌افتد [۳]. همی سلولزها به‌عنوان دسته‌ای از کربوهیدرات‌ها در محیط قلیایی محلول هستند و با استخراج قلیایی می‌توان به‌آسانی آن‌ها را از سلولز جداسازی کرد. با وجود این، این عمل تنها زمانی امکان‌پذیر است که الیاف چوبی در مراحل قبل لیگنین‌زدایی شده باشند، زیرا همی سلولزها دارای پیوندهای کووالانسی با لیگن هستند [۴]. ممکن است این انتظار وجود داشته باشد که عملیات انحلال و حذف همی سلولزها را بتوان در زمان پخت قلیایی همراه با حذف لیگنین انجام داد. در هنگام پخت قلیایی مواد لیگنوسولوزی، گلوکورونوزایلان به‌عنوان یکی از انواع همی سلولزی‌ها در مراحل اولیه پخت که قلیا زیاد است، حل می‌شود اما در مراحل بعدی با کاهش غلظت قلیا، مجدداً روی سطوح الیاف و احتمالاً درون دیواره‌های سلولی رسوب کند [۵، ۶]. حذف کامل همی سلولزها معمولاً نیاز به یک مرحله پیش هیدرولیز اسید دارد [۷، ۸].

کلر و ترکیبات کلردار مهم‌ترین مواد شیمیایی مصرفی برای رنگ‌بری خمیرهای شیمیایی محسوب می‌شوند؛ اما به دلیل فشارهای زیست محیطی، این وضعیت در جهت استفاده از سیستم‌های رنگ‌بری بدون کلر به سرعت در حال تغییر است. پژوهشگران صنایع خمیر و کاغذ در تلاش هستند تا تغییراتی را در سیستم رنگ‌بری خمیر کاغذ ایجاد کنند تا مصرف کلر را به حداقل مقدار ممکن برسانند [۷]. استفاده از زیست‌فناوری در رنگ‌بری خمیر کاغذ در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه بوده است [۹-۱۱]. با استفاده از زیست‌فناوری مانند استفاده از آنزیم زایلانا می‌توان مصرف مواد شیمیایی مصرفی در رنگبری خمیر کاغذ را کاهش داد و به دنبال آن آلودگی‌های سیستم رنگ‌بری خمیر کاغذ کاهش می‌یابد [۱۲]. زایلان ماده اصلی تشکیل‌دهنده همی سلولز چوب‌های سوزنی‌برگ و پهن‌برگ و یکی از فراوان‌ترین پلی-

مصرف پراکسید را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. البته این امر زمانی قابل دست‌یابی است که آنزیم‌ها به درستی انتخاب و در فرآیند رنگ‌بری به کار گرفته شوند. گرانیوی خمیر کاغذ به‌عنوان معیاری از طریق اندازه‌گیری غیرمستقیم درجه بسپارش زنجیره سلولز در الیاف، مقدار تخریب شیمیایی به الیاف را نشان می‌دهد. البته حذف لیگنین با تیمار زایلاناز می‌تواند به سبب ایجاد شکاف در اتصال بین لیگنین و همی‌سلولز باعث شود الیاف خسارت کمتر تخریب شوند [۱۳] و در نتیجه گرانیوی خمیر کاغذ و خواص مقاومتی خمیر کاغذ حفظ شود [۲۱]. از معایب آنزیمی زایلاناز نیز می‌توان دسترسی کم آنزیم‌ها به ترکیبات الیاف سلولزی نام برد؛ زیرا تمایل آنزیم به جذب در سطوح الیاف زیاد است. همچنین بازیابی آنزیم دشوار است و باعث کاهش مقدار سلولز خمیر کاغذ می‌شود و از نظر اقتصادی نیز کار با آن هزینه بیشتری را به همراه خواهد داشت [۱۲].

در زمینه استفاده از زایلاناز برای پیش تیمار خمیر کاغذ، کولکارانی و همکاران (۱۹۹۶)، آنزیم زایلاناز بدون سلولاز را از یک نوع باکتری استخراج و برای پیش تیمار آنزیمی خمیر باگاس مورد بررسی قرار دادند. تیمار آنزیمی باعث کاهش ۲ واحد در عدد کاپا، بدون تغییر در گرانیوی و خواص مقاومتی خمیر کاغذ شد. درجه روشنی نیز به میزان ۲/۵ درصد افزایش یافت [۲۲]. گزارش‌های دیگری نیز در مورد کاهش عدد کاپا خمیر کاغذهای کرافت و سودا در صورت پیش تیمار آنزیمی زایلاناز گزارش شده است [۱۱، ۲۳، ۲۴]. یک از آخرین تحقیقات گزارش داده است تیمار زایلاناز قابلیت رنگ‌بری خمیر کاغذ قهوه‌ای را افزایش می‌دهد و با استفاده از آن می‌توان به ۲۰ درصد از ClO_2 و ۱۰ درصد NaOH در رنگ‌بری خمیر کاغذ صرفه‌جویی کرد. همچنین ثبات روشنایی خمیر کاغذ رنگ‌بری شده را بدون تأثیر بر خواص کاغذ ساخته شده از آن بهبود می‌بخشد [۱۸].

در این پژوهش، ساخت کاغذ از خمیر کاغذ باگاس در کارخانه کاغذ پارس به روش سودا (مهم‌ترین فرآیند تولید خمیر کاغذ از منابع غیرچوبی) انجام خواهد شد؛ اما رنگ‌بری خمیر کاغذ در این واحد تولیدی هنوز به دلایل مختلف توسعه مناسبی نداشته است. با توجه به مطالعات انجام شده در این زمینه این تحقیق با هدف استفاده از آنزیم زایلاناز برای رنگ‌بری خمیر کاغذ سودا باگاس و

ساکاریدهای تجدید پذیر بعد از سلولز است. دیواره سلولی گیاهان از همی‌سلولز، به‌طور عمده زایلان، و لیگنین تشکیل شده است [۱۳]. آنزیم زایلاناز روی زایلان خمیر کاغذ عمل می‌کند و منتهی به تسهیل لیگنین زدایی در فرآیند رنگ‌بری می‌شود [۱۴]. به این ترتیب، کارایی فرآیند رنگ‌بری افزایش می‌یابد. در روش پخت کرافت سوزنی‌برگان، نه تنها مقداری لیگنین باقی می‌ماند بلکه مقادیر زیادی هگزورونیک اسید نیز در خمیر کاغذ وجود دارد [۱۵]. گروه‌های رنگ‌ساز هگزورونیک اسید، از باقی‌مانده‌های ۴- متیل گلوکورونیک اسید موجود در زایلان تشکیل می‌شوند. مقدار هگزورونیک اسید در پهن‌برگان بستگی به روش پخت دارد و مقدار آن بین ۳۰ تا ۷۰ میکرومول بر گرم در خمیر کاغذ خشک است. این گروه‌های اسیدی در شرایط اسیدی در واکنش هیدرولیز تجزیه می‌شوند. در واقع تیمار آنزیمی زایلاناز با حذف این گروه‌های رنگ‌ساز موجب افزایش درجه روشنی خمیر کاغذ کرافت می‌شود و همچنین دسترسی قلیا به لیگنین را آسان‌تر می‌کند و این امر میزان نیاز به دی‌اکسید کلر را در فرآیندهای بدون کلر عنصری تا ده درصد کاهش می‌دهد. توضیح اینکه در فرآیندهای رنگ‌بری عامل اصلی مصرف‌کننده مواد شیمیایی هگزورونیک اسید هستند که زایلاناز با در هم شکستن ساختار آن‌ها باعث کاهش مصرف مواد شیمیایی می‌شود [۱۶، ۱۷]. به همین دلیل، یکی از مهم‌ترین آنزیم‌هایی که امروزه به صورت صنعتی و نیمه صنعتی برای رنگ‌بری مصرف می‌شود، زایلاناز است [۱۸]. تیمار آنزیمی زایلاناز یک راهکار برای کاهش مصرف کلر در رنگ‌بری خمیر کاغذ است که به شدت موجب کاهش هزینه‌های رنگ‌بری در کارخانه‌های کاغذسازی شده است [۱۹، ۲۰]. تیمار آنزیمی زایلاناز به حذف گروه‌های رنگ‌ساز در خمیر کاغذ و همچنین هیدرولیز زایلان یا لیگنین جمع شده در ساختار الیاف کمک می‌کند و با ایجاد تخلخل در ساختار الیاف موجب نفوذپذیری بهتر مواد شیمیایی رنگ‌بر و تسهیل خروج لیگنین از الیاف خمیر کاغذ می‌شود [۲]. از مزایای اصلی آن می‌توان به کاهش تخلیه اسیدهای آلی قابل جذب در پساب اشاره کرد که در درجه اول با کاهش مصرف گاز کلر همراه است [۱۳]. این آنزیم در صورت مصرف در فرآیند بدون کلر عنصری (ECF) سبب صرفه‌جویی در مصرف کلر می‌شود. همچنین در فرآیند بدون کلر (TCF)

برای جلوگیری از رشد قارچ و باکتری) و همچنین تعیین درصد رطوبت بر مبنای وزن تر، به‌منظور به هم نخوردن رطوبت آن، خمیرکاغذ در داخل کیسه‌های زیپ‌دار پلاستیکی بسته‌بندی و در یخچال نگاه‌داری شد.

پیش تیمار آنزیمی با استفاده از آنزیم زیلاناز تهیه‌شده از شرکت سیگما آلدردیج آلمان با مشخصات جدول ۱ انجام شد. کلیه مواد شیمیایی مصرفی از شرکت مرک آلمان تهیه شد، بجز کوپراتیلن‌دی‌آمین که مربوط به شرکت سیگما آلدردیج بود.

بررسی اثرات آن بر کیفیت خمیرکاغذ سودا باگاس در طی رنگ‌بری ECF انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

خمیرکاغذ سودا رنگ‌بری نشده باگاس از خط تولید کارخانه کاغذ پارس واقع در هفت‌تپه خوزستان تهیه شد و درجه روانی و عدد کاپا آن طبق استاندارد تاپی شماره 04-T 2270m و T 2360m-06 اندازه‌گیری شد. پس از شستشوی خمیرکاغذ و افزودن فرمالین به خمیرکاغذ

جدول ۱. مشخصات آنزیم زیلاناز

نام آنزیم	زیلاناز - 1,4-β-Xylanase, endo-1,4-β-Xylanase
میکروارگانسیم تولیدکننده	<i>Thermomyces lanuginosus</i>
حالت ماده	جامد/پودری
فعالیت آنزیم	2500 units/g
شرکت تولیدکننده	سیگما آلدردیج

دی‌اکسیدکلر ساخته شد و تعداد اتم کلر فعال موجود در آن طبق فرمول زیر محاسبه شد که در آن T2 میزان تیوسولفات مصرفی در تیتراتری محلول رنگ‌بری است و عدد بدست آمده B نام‌گذاری شد. در ادامه از طریق حاصل ضرب مقدار A در ۱۰۰۰ (برای تهیه ۱۰۰۰ میلی-لیتر کلر) و تقسیم بر مقدار B، مقدار کلر قابل دسترس بر اساس وزن خشک خمیرکاغذ به‌دست آمد (رابطه ۱).

$$CLO_2 = T_2 \times (0.8875) \quad (1)$$

محاسبه آنزیم با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از شرکت تولیدکننده آنزیم (2753-50g، سیگما آلدردیج) در مورد قدرت آنزیم در هر گرم آنزیم ۰/۲۵۰۰u/g، برای هر ۱u/g آنزیم معادل ۰/۰۰۰۴ گرم محاسبه شد. در ادامه برای رنگ‌بری و رسیدن به درجه روشنی بیش از ۷۰ درصد خمیرکاغذ، ضمن انجام آزمایش‌های لازم، شرایط رنگ‌بری به مدت ۱ ساعت، با سه سطح آنزیم ۲، ۵ و U/g ۱۰ برای هر گرم خمیرکاغذ خشک در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد با خشکی ۵ درصد و pH ۵/۵ به کار گرفته شد.

برای تیمار آنزیمی، زیلاناز پودری در محلول بافر فسفات حل و تحت شرایط رنگ‌بری ذکر شده اعمال شد. بافر فسفات سدیم سبب می‌شود که تغییرات pH محیط

اندازه‌گیری عدد کاپا خمیرکاغذ برای هر مرحله از توالی رنگ‌بری و با تکرار ۳ مرتبه انجام شد. برای پالایش الیاف خمیرکاغذ از یک پالایشگر دیسکی طبق استاندارد تاپی شماره T sp-00248 و توسط پالایشگر در کارخانه کاغذ پارس واقع در هفت‌تپه اهواز انجام گرفت. در این تحقیق، برای رسیدن به درجه روانی ۳۰۰ میلی‌لیتر، تعداد دور پالایشگر ۵۰۰ در نظر گرفته شد. سپس خمیرکاغذ پالایش شده روی الک مش ۲۰۰ جمع‌آوری و آب‌گیری شد و سپس در هوای آزاد قرار گرفت، تا به تعادل رطوبتی برسد. در ادامه، خمیرکاغذها برای حفظ تعادل رطوبت در کیسه پلاستیکی بسته‌بندی شدند و برای جلوگیری از فعالیت میکروارگانسیم‌ها در یخچال نگهداری شدند. برای محاسبه مقدار کلر فعال لازم به‌منظور فرآیند رنگ‌بری خمیرکاغذ، فاکتور کاپا با توجه به عدد کاپای خمیرکاغذ موردنظر بین ۰/۲ تا ۵/۵ درصد در نظر گرفته شد و تعداد اتم‌های فعال کلر برای رنگ‌بری خمیرکاغذ برابر با حاصل ضرب عدد کاپا در فاکتور کاپا در نظر گرفته شد. در ادامه، برای محاسبه کلر قابل دسترس بر اساس وزن خشک خمیرکاغذ، تعداد اتم‌های فعال کلر لازم در گرم خمیرکاغذ خشک ضرب، و بر ۱۰۰ تقسیم شد که در نتیجه تعداد اتم‌های فعال کلر مورد نیاز برای این مقدار خمیرکاغذ، به‌عنوان A نام‌گذاری شد. در ادامه، محلول

داده شد تا هوا خشک شود. بعد از پایان توالی‌های موردنظر، در هر مرحله از خمیر کاغذ نمونه برداشته شد و عدد کاپا و بازده اندازه‌گیری شد.

بعد از پیش تیمار آنزیمی، رنگ‌بری در توالی XED1E2 انجام شد [۲۴] و درجه روشنی هر مرحله طبق استاندارد تاپی شماره T 452om-92 اندازه‌گیری شد. سپس، رنگ‌بری اصلی با توالی‌های ED و EDX انجام شد. با توجه به اینکه پیش تیمار آنزیمی به‌تنهایی کافی نیست و باید در ترکیب با توالی‌های شیمیایی قرار گیرد، از روش رنگ‌بری بدون کلر عنصری ECF برای تکمیل فرایند استفاده شد (جدول ۲).

در هنگام تیمار آنزیمی ثابت نگاه داشته شود. برای پیش تیمار آنزیمی، از کیسه‌های پلاستیکی استفاده شد. ابتدا خمیر کاغذ موردنظر وزن شده و مواد رنگ‌بر و همچنین آب مقطر برای رسیدن به درصد خشکی موردنظر به آن اضافه شد. درب کیسه زیپ شده و درون حمام آب گرم که قبلاً به دمای موردنظر رسیده بود قرار داده شد و در طی مدت عملیات رنگ‌بری، حدود هر ده دقیقه، محتویات کیسه‌ها به‌طور یکدست هم‌زده شدند. سپس خمیر کاغذها از کیسه‌ها خارج و برای شستشو روی الک مش ۲۰۰ ریخته با آب شستشو شد. در نهایت، خمیر کاغذ شسته شده آب‌گیری و در فضای آزمایشگاه در محیط آزاد قرار

جدول ۲. شرایط فرآیند رنگ‌بری خمیر کاغذ باگاس

شرایط	دی‌اکسید کلر، D	استخراج قلیایی، E
زمان (دقیقه)	۷۵	۶۰
دما (درجه سانتی‌گراد)	۶۰	۷۰
درصد خشکی	۱۰	۱۰
دی‌اکسید کلر مصرف‌شده (درصد)	۳	
قلیای مصرف‌شده (درصد)		۱
pH اولیه	۱/۷	۱۲
pH نهایی	۳	۱۱/۱

و خواص مقاومتی و نوری کاغذهای دست‌ساز شامل درجه روشنی، گراماژ، ضخامت، مقاومت کششی، مقاومت به تاخوردگی طبق استانداردهای مرسوم TAPPI اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خمیر کاغذ اولیه سودا باگاس رنگ‌بری نشده صنایع کاغذ پارس به ترتیب شامل درجه روانی و عدد کاپا به میزان 50.0 ± 15 میلی‌لیتر CSF و $13/19$ به-دست آمد. ویژگی‌های خمیر کاغذ پس از تیمار آنزیمی و شیمیایی همراه خصوصیات کاغذ دست‌ساز شامل گراماژ، ضخامت، بازده، جرم حجمی، درجه روشنی و ماتی و مقاومت کششی در جدول ۳ معرفی شده است.

برای انجام رنگ‌بری، نمونه‌های خمیر کاغذ همراه مواد شیمیایی در بشر و در دمای موردنظر در حمام آب قرار داده شد و با سرعت دورانی ۱۰۰ دور در دقیقه به‌طور یکنواخت هم‌زده شد و بعد از طی زمان موردنظر خمیر کاغذ شستشو داده شد. برای رسیدن به روشنی ۷۰ درصد خمیر کاغذ، از روش ECF با توالی DE برای نمونه شاهد استفاده شد. برای رنگ‌بری با دی‌اکسید کلر، درصد کلر فعال ۳ در نظر گرفته شد و مقدار کلر مصرفی در این توالی برای رسیدن به روشنی حداقل ۷۰ درصد برای هر گرم خمیر کاغذ خشک مقدار $1/25$ گرم محاسبه شد. پس از انجام مراحل رنگ‌بری، در هر دو مرحله پیش‌رنگ‌بری و رنگ‌بری اصلی از خمیر کاغذها نمونه‌برداری و بازده، عدد کاپا اندازه‌گیری شدند. گرانروی نیز از طریق استاندارد تاپی شماره T 230-om 08 اندازه‌گیری شد. سپس کاغذهای دست‌ساز طبق استاندارد مرسوم TAPPI ساخته

جدول ۳. تیمارها و خصوصیات خمیرکاغذ حاصل از پیش تیمار زایلاناز و ماده رنگ‌بر دی‌اکسید کلر و کاغذ ساخته شده از آن.

تیمارها	بازده (%)	گرانبوی (η)	گراماژ (g/m ²)	ضخامت (μ m)	جرم حجمی (g/Cm ³)	درجه روشنی (%)	ماتی (%)	تاخوردگی	مقاومت کششی (KNm/g)
شاهد	-	-	۱۰۳	۰/۱۴۶	۱۵/۶۰	۴۲/۰۱	۵۶/۰۸	۰/۹۳۲	۸/۳۷
Xa	۹۹/۷	-	۱۰۶	۰/۱۴۴	۱۵/۲۷	۴۱/۵۱	۵۵/۸۸	۰/۹۲۸	۸/۳
Xb	۹۵/۴	-	۱۰۷	۰/۱۴۳	۱۵/۳۸	۴۱/۴۴	۵۵/۸۷	۰/۷۷۸	۸/۴۳
Xc	۹۲/۲	-	۱۰۴	۰/۱۴۵	۱۵/۱۷	۴۱/۴۶	۵۵/۸۴	۰/۹۰۳	۷/۹۸
D	۹۱	-	۱۲۴	۰/۱۳۳	۱۶/۵۴	۷۰/۳۸	۵۵/۸۹	۰/۷۷۸	۸/۴۸
XaE1	۹۴/۷	-	۱۰۳	۰/۱۴۶	۱۵/۰۶	۴۴/۵۴	۵۹/۲۷	۰/۶۹۹	۷/۰۹
XbE1	۹۹	-	۱۰۴	۰/۱۴۵	۱۵/۱۷	۴۶/۱۱	۶۰/۱۰	۰/۶۰۲	۸/۶۱
XcE1	۹۸/۷۳	-	۱۰۹	۰/۱۴۲	۱۵/۴۹	۴۵/۶۳	۵۹/۹۷	۰/۶۹۹	۷/۱۳
E	۹۸/۹	۱۵/۷۴	۱۰۶	۰/۱۴۴	۱۵/۲۷	۷۳/۰۷	۸۰/۸۰	۰/۸۴۵	۸/۸۶
XEaD	۹۹/۴	-	۱۰۷	۰/۱۴۳	۱۵/۳۸	۶۷/۱۱	۷۶/۷۰	۰/۸۴۵	۷/۰۹
XEBd	۹۵	-	۱۰۶	۰/۱۴۴	۱۵/۲۷	۷۱/۳۲	۷۹/۲۸	۰/۷۷۸	۸/۶۱
XEcD	۹۱/۹	-	۱۰۴	۰/۱۴۵	۱۵/۱۷	۷۲/۱۰	۷۹/۲۹	۰/۷۷۸	۷/۱۳
XEaDE2	۹۷	۱۶/۴۴	۱۰۶	۰/۱۴۴	۱۵/۲۷	۷۴/۱۳	۷۹/۲۴	۰/۹۰۳	۷/۰۹
XEbDE2	۹۷/۶	۱۴/۳۷	۱۱۰	۰/۱۴۱	۱۵/۶۰	۷۴/۶۸	۸۰/۲۹	۰/۹۵۴	۶/۶۹
XEcDE2	۹۸/۲۵	۱۴/۲۷	۱۰۶	۰/۱۴۴	۱۵/۲۷	۷۴/۹۸	۸۰/۱۵	۰/۸۴۵	۷/۱۵

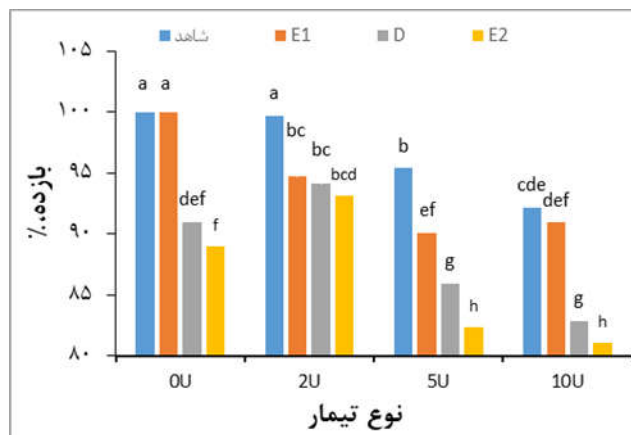
a: تیمار آنزیمی با دوز ۲U، b: تیمار آنزیمی با دوز ۵U، c: تیمار آنزیمی با دوز ۱۰U

ویژگی‌های خمیرکاغذ و کاغذ

بازده خمیرکاغذ

سایر اجزاء خمیرکاغذ در اثر واکنش‌های ناخواسته وارد شود. البته همی‌سلولز به علت شاخه‌دار بودن نسبت به سلولز بیشتر مستعد تخریب است [۲۵]. همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد، نمونه شاهد (بدون تیمار آنزیمی) در اثر رنگ‌بری با مواد شیمیایی افت بازده بیشتری را در مقایسه با نمونه‌های تیمار شده با سطح ۲U/g زایلاناز نشان داده است. در مورد تیمار آنزیمی با سطح بیشتر مثلاً ۵U و ۱۰U به نظر می‌رسد تأثیر شدید آنزیم بر خمیرکاغذ از طریق هیدرولیز زایلوز همی‌سلولز و بخش کریستالی سلولز، موجب کاهش بازده می‌شود [۱۸، ۲۶].

هدف اصلی در رنگ‌بری شیمیایی حذف لیگنین و سایر ترکیبات رنگی است [۲۵] و این امر سبب کاهش بازده خمیرکاغذ می‌شود. در طی فرآیند رنگ‌بری شیمیایی علاوه بر لیگنین سایر ترکیبات نیز به‌طور تصادفی تخریب می‌بینند و در واقع همراه با لیگنین از خمیرکاغذ خارج می‌شوند. هنگام مصرف مواد شیمیایی رنگ‌بر باید به این مسئله توجه شود که این مواد دارای گزینش‌پذیری زیادی باشند تا در نهایت تخریب کمتری به

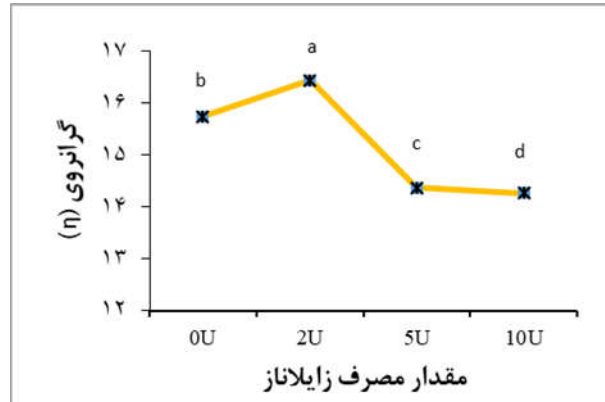


شکل ۱. تغییرات بازده خمیرکاغذ با تیمار آنزیمی و مواد شیمیایی رنگ‌بری

گرانروی خمیر کاغذ

می‌تواند به دلیل حذف کربوهیدرات‌های با وزن ملکولی کم همانند زایلوز باشد [۲۶، ۲۷]. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مصرف بیشتر آنزیم (۵U/g) نه تنها موجب حفظ بیشتر گرانروی خمیر کاغذ نمی‌شود، بلکه موجب کاهش گرانروی خمیر کاغذ نهایی نیز می‌شود. این نتایج دلالت می‌کند بر اینکه برای حفظ گرانروی خمیر کاغذ مصرف زایلناز تا حد معینی مفید است و بیش از آن اثری مثبتی بر حفظ بر گرانروی نخواهد داشت.

بر اساس نتایج شکل ۲ که مربوط به گرانروی خمیر کاغذ رنگ‌بری شده نهایی (مرحله بعد از E2) با تیمار آنزیمی و بدون تیمار آنزیمی است، مشاهده شد که با افزایش مصرف زایلناز مقدار گرانروی به مقدار کمی کاهش نشان می‌دهد در حالی که با مصرف سطح ۲U/g زایلناز برای تیمار، گرانروی خمیر کاغذ نسبت به شاهد بدون تیمار آنزیمی بیشتر شده است. افزایش اخیر

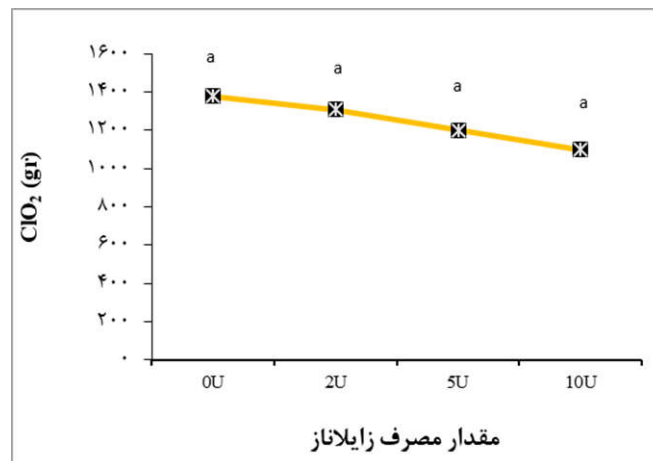


شکل ۲. رابطه گرانروی خمیر کاغذ با تیمار آنزیمی زایلناز

مصرف دی‌اکسید کلر

به تیمار آنزیمی از مقدار ۱/۳۸۰ به مقدار ۱/۱۰۰ گرم در هر کیلوگرم خمیر کاغذ خشک کاهش یافت؛ به عبارت دیگر، در مقیاس بزرگ‌تر ۲۸۰ کیلوگرم به ازای هر تن خمیر کاغذ در مصرف دی‌اکسید کلر می‌تواند صرفه‌جویی شود که از نظر اقتصادی می‌تواند قابل توجه باشد. همچنین تأثیر جانبی آن بر مقدار ترکیبات کلر وارده به پساب محیط نیز از نظر زیست محیطی حائز اهمیت زیادی است.

بررسی نتایج مصرف دی‌اکسید کلر طی رنگ‌بری نشان می‌دهد که تیمار آنزیمی موجب کاهش درصد لیگنین و ترکیبات رنگی شده است که منتهی به کاهش مصرف این ماده رنگ‌بر می‌شود [۱۸]. اگر چه بر اساس ارزیابی آماری، کاهش به‌دست‌آمده معنی‌دار نبوده است. بررسی مواد شیمیایی رنگ‌بر در هر سه نمونه تیمار آنزیمی و ارزیابی عدد کاپا برای تعیین میزان مصرف دی‌اکسید کلر نشان داد که مقدار مصرف آن در نمونه شاهد نسبت

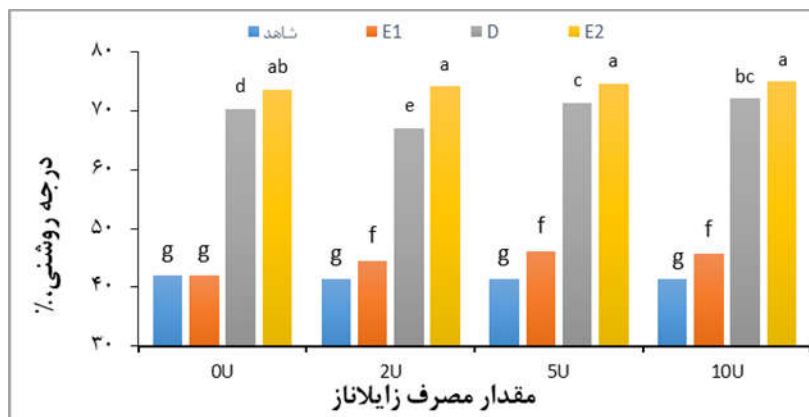


شکل ۳. رابطه مصرف دی‌اکسید کلر با غلظت زایلناز در رنگ‌بری خمیر کاغذ.

درجه روشنی

استخراج قلیایی استفاده شده است. البته در صورت بیشتر شدن سطح آنزیم مصرفی از ۲U، تأثیر معنی‌داری بر روشنی خمیرکاغذ حاصل در پایان توالی رنگ‌بری نخواهد داشت [۲۸-۳۰].

نتایج شکل ۴ نشان داد که روشنی خمیرکاغذهای تیمار شده با آنزیم زایلاناز بیشتر از تیمار شاهد خواهد بود به‌ویژه وقتی که از رنگ‌بری با دی‌اکسید کلر و در ادامه

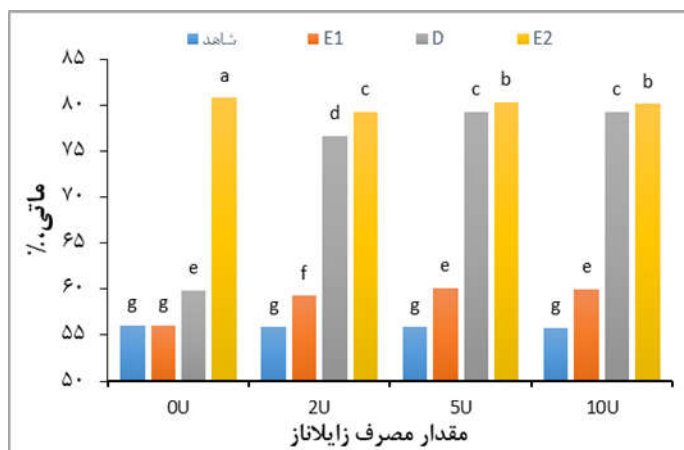


شکل ۴. رابطه درجه روشنی کاغذ با تیمار زایلاناز و مواد شیمیایی رنگ‌بری

ماتی کاغذ

موجب کاهش تخلخل و در نتیجه افزایش ماتی کاغذ می‌شوند. مقایسه این روند با روند افزایش درجه روشنی موید هم‌سویی این دو ویژگی با یکدیگر است [۳۱].

ماتی کاغذ معمولاً وابسته به میزان عبور نور و تخلخل کاغذ است. در بررسی نتایج شکل ۵ به نظر می‌رسد تیمارهای شیمیایی با افزایش انعطاف‌پذیری الیاف سلولزی

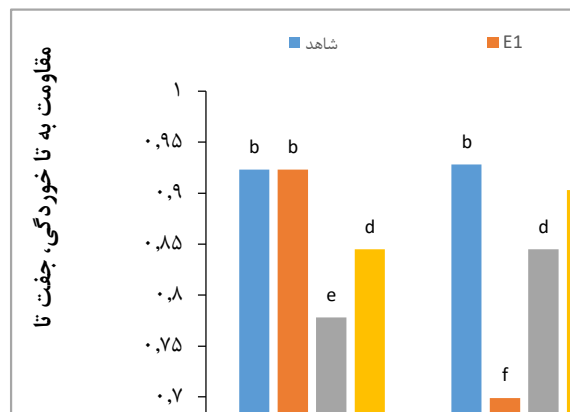


شکل ۵. رابطه ماتی کاغذ با تیمار زایلاناز و مواد شیمیایی رنگ‌بری

مقاومت به تاخوردگی کاغذ

در بررسی مقاومت به تاخوردگی کاغذهای تهیه شده از تیمارها، مقاومت به تاخوردگی کاغذها در اثر تیمارهای شیمیایی رنگبری کاهش داشته است، اما تیمار صرفاً آنزیمی تأثیری معنی داری روی این ویژگی نداشته است. در مورد تأثیر تیمار آنزیمی بر نمونه های تیمار شده مصرف آنزیم تا ۲U تأثیر منفی معنی داری بر مقاومت به تاخوردگی نداشته باشد ولی مصرف بیشتر آنزیم می تواند مستقیماً موجب کاهش این ویژگی شود البته بر اساس نتایج شکل ۶، استخراج قلیایی اولیه بدون تیمار آنزیمی تأثیری در افت مقاومت به تاخوردگی نداشته است اما در صورت انجام تیمار آنزیمی، به طور معنی داری سبب کاهش مقاومت به تاخوردگی شده است؛ اما تیمارهای بعدی

شیمیایی سبب بهبود مقاومت به تاخوردگی خواهد شد. در مورد دلایل این وضعیت، به نظر می رسد استخراج قلیایی مرحله نخست بعد از تیمار آنزیمی، به سبب عملکرد آنزیم در حذف همی سلولز زایلان، قدرت نفوذ قلیا در دیواره الیاف خمیرکاغذ بیشتر شده و در نتیجه به کاهش خواص مقاومتی کاغذ از جمله مقاومت به تاخوردگی شده است در حالی که در استخراج قلیایی مرحله دوم بدون اینکه قلیا قدرت نفوذ بیشتری داشته باشد تصور می شود در اثر انحلال و خارج سازی حداکثری مواد غیر سلولزی حل شده توسط مرحله قبل در اثر تیمار با دی اکسید کلر، منجر به بهبود مقاومت های کاغذ از جمله مقاومت به خوردگی شده است.

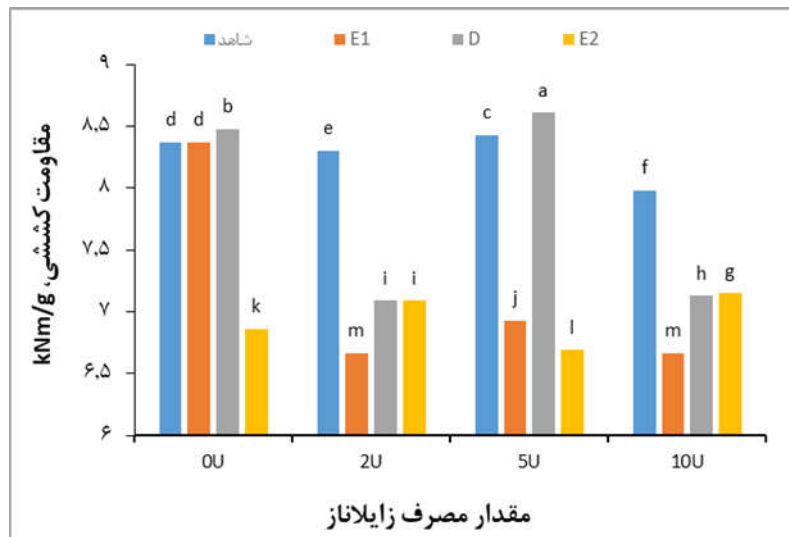


شکل ۶. رابطه مقاومت به تاخوردگی کاغذ با تیمار زایلاناز و مواد شیمیایی رنگبری.

مقاومت کششی کاغذ

در بررسی مقاومت کششی کاغذهای تهیه شده از تیمارها طبق شکل ۷، افزایش مصرف زایلاناز به تنهایی از سطح ۲ به ۵U تأثیر مثبتی بر مقاومت کششی داشته است اما مصرف بیشتر از ۵U سبب کاهش مقاومت کششی شده است [۳۲]. طی تیمار شیمیایی استخراج اولیه برای رنگ-بری کاهش مقاومت شدید بوده است ولی در ادامه استفاده از دی اکسید کلر و حتی استخراج مجدد قلیایی مقاومت

کششی مشابه شرایطی که برای مقاومت به تاخوردگی گزارش شد، بهبود یافته است؛ بنابراین می توان با اطمینان از آنزیم زایلاناز برای پیش تیمار در رنگبری خمیرکاغذ بدون احتمال کاهش مقاومت کششی استفاده نمود. البته نظر به بهبود کم مقاومت به کشش در سطوح بیشتر مصرف آنزیم زایلاناز، می توان همان سطح ۲U را برای پیش تیمار رنگبری خمیرکاغذ سودا با گاس توصیه نمود.



شکل ۷. رابطه مقاومت کششی کاغذ با تیمار زیلاناز و مواد شیمیایی رنگ‌بری.

نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، تیمار ملایم آنزیمی زیلاناز با توجه به اثرات حذف همی سلولز زیلاناز می‌تواند به نفوذ و واکنش‌پذیری انتخابی مواد شیمیایی با ترکیبات لیگنینی کمک کند و این رفتار با توجه به تغییرات درجه روشنی، گرانبوی و بازده خمیرکاغذ همراه با مصرف دی‌اکسید کلر، ماتی، مقاومت کششی و تاخوردگی کاغذ بررسی شد. این نتایج دلالت می‌کند بر اینکه بهینه‌سازی مصرف آنزیم زیلاناز می‌تواند نقش مهمی در تسهیل رنگ‌بری ضمن حفظ گرانبوی خمیرکاغذ برای دستیابی به حداقل کاهش مقاومت‌های کاغذ به خاطر اثرات منفی تیمارهای شیمیایی رنگ‌بری داشته باشد ضمن اینکه استفاده از تیمار زیلاناز برای رنگ‌بری خمیرکاغذ از طریق کاهش مصرف دی‌اکسید کلر می‌تواند به اهمیت مصرف آن از نظر زیست محیطی بیفزاید.

منابع

- [1] Abd El-Sayed, E.S., El-Sakhawy, M. and El-Sakhawy, M.A.-M., 2020. Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 35, pp. 215–230.
- [2] Azizi Mossello, A., Savari, A. and Rezayati Charani, P., 2019. The Effect of Protexin Enzyme for Bagasse Storage on Pulp and Paper Properties. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 10(3), pp. 457–468. (In Persian).

در بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کاغدهای تهیه‌شده از تیمارهای می‌توان گفت که تیمار زیلاناز با سطح ۲U/گ توانسته است از طریق حذف همی سلولز زیلاناز و تسهیل توالی‌های رنگ‌بری شیمیایی برای دستیابی به روشنی بیشتر ضمن حفظ گرانبوی خمیرکاغذ مفید باشد؛ اما تیمار با سطوح مصرف بیشتر زیلاناز از یک سو موجب کاهش بیشتر بازده به‌واسطه تخریب سلولز موجب کاهش گرانبوی خمیرکاغذ شده است از طرف دیگر، زیلاناز تأثیری در تسهیل بیشتر رنگ‌بری با تیمارهای شیمیایی نشان نداده است و نتایج افزایش غیر معنی‌دار مقادیر درجه روشنی کاغذهای حاصل نیز مؤید این امر می‌باشد. با این وجود، با افزایش مصرف زیلاناز خواص مقاومتی شامل مقاومت به تاخوردگی و کششی تا حدودی بهبود نشان داده است؛ بنابراین مصرف زیلاناز بر کاهش مصرف دی‌اکسید کلر و حفظ بازده اثر دارد اما مصرف بیشتر آن نه‌تنها اثری بر درجه روشنی ندارد بلکه اثر آن در بهبود مقاومت‌های مکانیکی کاغذ نیز معنی‌دار نیست و نتایج کاهش کم گرانبوی خمیرکاغذ نیز مؤید این امر است.

نتیجه‌گیری

رنگ‌بری خمیرکاغذ همواره با آسیب به ساختار کلی خمیرکاغذ همراه است که در این راستا سعی می‌شود از روش‌های گزینش‌پذیر در رنگ‌بری استفاده شود. بر اساس

- [14] Walia, A., Guleria, S., Mehta, P., Chauhan, A. and Parkash, J., 2017. Microbial xylanases and their industrial application in pulp and paper biobleaching: a review. *3 Biotech*, 7(11), pp. 1–12. DOI: 10.1007/s13205-016-0584-6.
- [15] Kaur, G., Kaur, P., Kaur, J., Singla, D. and Taggar, M.S., 2024. Xylanase, xylooligosaccharide and xylitol production from lignocellulosic biomass: Exploring biovalorization of xylan from a sustainable biorefinery perspective. *Industrial Crops and Products Journal*, 215, 118610.
- [16] Deshpande, R., Sundvall, L., Grundberg, H., Lawoko, M. and Henriksson, G., 2020. Lignin carbohydrate complex studies during kraft pulping for producing paper grade pulp from birch. *TAPPI Journal*, 19(9), pp. 447–460.
- [17] Moon, R.J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J. and Youngblood, J., 2011. Cellulose nanomaterials review: Structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 40(7). DOI: 10.1039/c0cs00108b.
- [18] Beg, Q.K., Bhushan, B., Kapoor, M. and Hoondal, G.S., 2000. Enhanced production of a thermostable xylanase from *Streptomyces* sp. QG-11-3 and its application in biobleaching of eucalyptus kraft pulp. *Enzyme and Microbial Technology*, 27(7), pp. 459–466. DOI: 10.1016/S0141-0229(00)00231-3.
- [19] Matos, J.M.S., Evtuguin, D. V., de Sousa, A.P.M. and Carvalho, M.G.V.S., 2024. Xylanase treatment of eucalypt kraft pulps: effect of carryover. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108(1), p. 210. DOI: 10.1007/s00253-024-13027-3.
- [20] Gangwar, A.K., Prakash, N.T. and Prakash, R., 2014. Applicability of microbial xylanases in paper pulp bleaching: a review. *BioResources*, 9(2). pp. 3733-3753.
- [21] Van der Brught, T., Tolan, J. and Thibault, L., 2002. US kraft mills lead in xylanase implementation. In: 2002 TAPPI Fall Technical Conference and Trade Fair.
- [22] Schaubeder, J.B., Spirk, S., Fliri, L., Orzan, E., Biegler, V., Palasingh, C., Selinger, J., Bakhshi, A., Bauer, W., Hirn, U. and Nypelö, T., 2024. Role of intrinsic and extrinsic xylan in softwood kraft pulp fiber networks. *Carbohydrate Polymers*, 323, p.121371. DOI: 10.1016/j.carbpol.2023.121371.
- [23] Kulkarni, N. and Rao, M., 1996. Application of xylanase from alkaliphilic thermophilic *Bacillus* sp. NCIM 59 in biobleaching of bagasse pulp. *Journal of Biotechnology*, 51(2). DOI: 10.1016/0168-1656(96)01616-1.
- [24] Jeffries, T.W., Davis, M., Rosin, B. and Landucci, L.L., 1998. Mechanisms for kappa reduction and color removal by xylanases. *Enzyme*, 4, pp. 2–319.
- [3] Santos, R.B., Jameel, H., Chang, H.-M. and Hart, P.W., 2013. Impact of Lignin and Carbohydrate Chemical Structures on Kraft Pulping Process and Biofuel Production. *TAPPI Journal*, 12, pp. 23–31.
- [4] Wang, X., Liu, Y., Pu, J., Qin, C., Yao, S., Wang, S. and Liang, C., 2024. A comparative study on the structure of lignin-carbohydrate complexes in alkali-soluble hemicellulose from bamboo (*Bambusa chungii*) fibers and parenchyma cells. *Industrial Crops and Products Journal*, 210;118061. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.118061
- [5] Roberts, J.C., 2007. *The chemistry of paper*. Royal Society of Chemistry.
- [6] Lan, X., Fu, S., Song, J., Leu, S., Shen, J., Kong, Y., Kang, S., Yuan, X. and Liu, H., 2024. Structural changes of hemicellulose during pulping process and its interaction with nanocellulose. *International Journal of Biological Macromolecules*, 255, 127772. DOI: 10.1016/J.IJBIOMAC.2023.127772.
- [7] Mboowa, D., 2024. A review of the traditional pulping methods and the recent improvements in the pulping processes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(1), pp. 1–12. DOI: 10.1007/s13399-020-01243-6.
- [8] Zhang, L., Yu, D., Chen, Y. and Wu, C., 2024. Effect of Urea/choline chloride treatment on removing hemicellulose during alkali extraction in the preparation of high-purity dissolving pulps. *Industrial Crops and Products Journal*, 222, 119709. DOI: 10.1016/J.INDCROP.2024.119709.
- [9] Cuebas-Irizarry, M.F. and Grunden, A.M., 2024. *Streptomyces* spp. as biocatalyst sources in pulp and paper and textile industries: Biodegradation, bioconversion and valorization of waste. *Microbial Biotechnology*, 17(1), p. e14258. DOI: 10.1111/1751-7915.14258.
- [11] Moradian Gilan, K., hedjazi, sahab, Abdolkhani, A. and Sixta, H., 2019. Using of xylanase and cold caustic extraction to remove hemicellulose from bagasse bleached pulp for dissolving pulp production. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 10(1), pp. 1–9. (In Persian).
- [12] Alifia, K.C.H., Setiadi, T., Boopathy, R., Risdianto, H., Irfan, M. and Hidayatullah, I.M., 2023. Bio-bleaching agents used for paper and pulp produced from the valorization of corncob, wheat straw, and bagasse. In: *Chemical Substitutes from Agricultural and Industrial By-Products: Bioconversion, Bioprocessing, and Biorefining*. DOI: 10.1002/9783527841141.ch8.
- [13] Dhiman, S.S., Garg, G., Mahajan, R., Garg, N. and Sharma, J., 2009. ‘Single lay out’ and ‘mixed lay out’ enzymatic processes for bio-bleaching of kraft pulp. *Bioresource Technology*, 100(20), pp. 4736–4741. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.04.059

- into value-added products. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 54, 771–796. DOI: 10.1080/10643389.2023.2277670.
- [30] Madlala, A.M., Bissoon, S., Singh, S. and Christov, L., 2001. Xylanase-induced reduction of chlorine dioxide consumption during elemental chlorine-free bleaching of different pulp types. *Biotechnology Letters*, 23(5), pp. 345–351. DOI: 10.1023/A:1005693205016.
- [31] Paice, M.G., Bernier, R. and Jurasek, L., 1988. Viscosity-enhancing bleaching of hardwood kraft pulp with xylanase from a cloned gene. *Biotechnology and Bioengineering*, 32(2). DOI: 10.1002/bit.260320214.
- [32] Vinod Kumar, N., Rani, M.E., Gunaseeli, R. and Kannan, N.D., 2018. Paper pulp modification and deinking efficiency of cellulase-xylanase complex from *Escherichia coli* SD5. *International Journal of Biological Macromolecules* 111. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2017.12.126.
- [33] Przybysz Buzala, K., Kalinowska, H., Borkowski, J. and Przybysz, P., 2018. Effect of xylanases on refining process and kraft pulp properties. *Cellulose*, 25(2), pp. 1319–1328. DOI: 10.1007/s10570-017-1609-y.
- [25] Bajpai, P., Bajpai, P.K., Kondo, R., Bajpai, P., Bajpai, P.K. and Kondo, R., 1999. Pulp Bleaching with xylanases. *Biotechnology for Environmental Protection in the Pulp and Paper Industry*, Springer Berlin, Heidelberg, pp. 49–64. DOI: 10.1007/978-3-642-60136-1.
- [26] Matos, J.M.S., Evtuguin, D. V, de Sousa, A.P.M. and Carvalho, M.G.V.S., 2024. Xylanase treatment of eucalypt kraft pulps: effect of carryover. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108(1), p. 210. DOI: 10.1007/s00253-024-13027-3.
- [27] Roncero, M.B., Torres, A.L., Colom, J.F. and Vidal, T., 2004. The effect of xylanase on lignocellulosic components during the bleaching of wood pulps. *Bioresource Technology*, 96(1), pp. 21–30. DOI: 10.1016/j.biortech.2004.03.003.
- [28] Roncero, M.B., Torres, A.L., Colom, J.F. and Vidal, T., 2003. TCF bleaching of wheat straw pulp using ozone and xylanase. Part A: Paper quality assessment. *Bioresource Technology*, 87(3), pp. 305–314. DOI: 10.1016/S0960-8524(02)00224-9.
- [29] Kuhad, R.C., Rapoport, A., Kumar, Vinod, Singh, D., Kumar, Vijay, Tiwari, S.K., Ahlawat, S., Singh, B., 2024. Biological pretreatment of lignocellulosic biomass: An environment-benign and sustainable approach for conversion of solid waste