

اهمیت زیست فناوری در فراوری کاغذهای باطله

ایمان اکبرپور^{۱*}

۱-استادیار، گروه تخصصی علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی

گرگان، گرگان، ایران

*صندوق پستی ۴۳۴۶۴-۴۹۱۸۹، گرگان، ایران

inakbarpour@gau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۴

چکیده

در سال‌های اخیر با توجه به کمبود منابع جنگلی و همچنین افزایش میزان مصرف کاغذ و مقوا، بسیاری از تولیدکنندگان خمیر و کاغذ استفاده از منابع مختلف الیاف بازیافتی را توسعه داده‌اند. بنابراین بازیافت کاغذ یک راه‌کار موثر و سازگار با محیط زیست برای حفظ منابع جنگلی بوده که در نهایت منجر به صرفه‌جویی در تنوع طبیعی و مصرف انرژی می‌شود. استفاده از زیست فناوری در بخش‌های مختلف صنایع فرآورده‌های سلولزی همچون خمیرسازی زیستی، رنگ‌بری زیستی، مرکب‌زدایی زیستی، تصفیه زیستی پساب و... مورد توجه قرار گرفته و دستاوردهای خوبی نیز در این زمینه به دست آمده است. استفاده از آنزیم‌ها در فراوری الیاف بازیافتی یکی از مهم‌ترین جنبه‌های کاربردی علم زیست فناوری در صنایع سلولزی است. استفاده از فناوری‌های آنزیمی به عنوان فرآیند دوست‌دار محیط زیست منجر به تغییر در فرآیندهای صنعتی شده و قابلیت‌های زیادی را در حل بسیاری از مشکلات الیاف بازیافتی به ویژه مشکلات مربوط به مرکب‌زدایی کاغذ باطله، سرعت آب‌گیری خمیرکاغذ، استخوانی شدن (شاخه‌ای) الیاف، پالایش و مواد چسبناک نشان داده است. به طور کلی مرکب‌زدایی با آنزیم‌ها تحت شرایط اسیدی یا خنثی، میزان مصرف مواد شیمیایی را کاهش داده و زردی کاغذهای بازیافتی را در شرایط مرکب‌زدایی متداول قلبایی کاهش می‌دهد. امروزه استفاده از آنزیم‌های سلولزی (سلولاز و همی سلولاز) و اکسایشی (مانند لاکاز) و همچنین آمیلاز و پکتیناز نتایج قابل قبولی را در مرکب‌زدایی انواع مختلف کاغذهای باطله نشان داده‌اند به طوری که اغلب آزمایش‌های انجام شده در واحدهای نیمه صنعتی و همچنین صنعتی اثبات کردند که مرکب‌زدایی با آنها می‌تواند موجب کاهش هزینه مواد شیمیایی، افزایش میزان جداسازی ذرات مرکب و مواد چسبناک، بهبود درجه روانی خمیرکاغذ (در نتیجه بهبود حرکت‌پذیری ماشین کاغذ) و کاهش بار آلودگی COD و BOD پساب شود.

کلید واژگان: آلودگی پساب، زیست فناوری، فراوری الیاف بازیافتی، کیفیت کاغذ، مرکب‌زدایی زیستی.

۱-مقدمه

کاغذ و فرآورده های کاغذی مختلف به عنوان یکی از کالاهای مصرفی روزانه، نقش مهمی را در زندگی انسانها ایفا کرده و در این راستا مواد اولیه لیگنوسلولزی و غیرچوبی به عنوان مواد اولیه مهم برای تولید کاغذ محسوب می شوند. امروزه در بسیاری از کشورهای دنیا، صنعت کاغذسازی بدون وجود الیاف بازیافتی نمی تواند تداوم داشته باشد. به طوری که مطابق با نتایج بسیاری از تحقیقات گزارش شده، در سال ۲۰۱۰ نرخ بازیافت کاغذهای روزنامه باطله، کاغذهای اداری، کاغذهای بسته بندی و مجله باطله به ترتیب ۸۹٪، ۷۴٪، ۸۱٪ و ۷۴٪ گزارش شده و این آمار به اهمیت زیاد توجه به مقوله بازیافت کاغذ در مقیاس جهانی اشاره دارد [۱-۲]. پیش بینی می شود تا سال ۲۰۳۰ میلادی بخش عمده کاغذهای باطله را کاغذهای بسته بندی تشکیل دهند [۱]. در سال های اخیر صنعت خمیر و کاغذ، استفاده از زیست فناوری را به طور گسترده در فرآیند تولید خمیرکاغذ آغاز کرده و در این زمینه پیشرفت های قابل ملاحظه ای حاصل شده است. به عنوان مثال نتایج استفاده از تیمارهای آنزیمی بیانگر آن است که آنزیم های سلولازی مانند سلولاز این قابلیت را دارند که آنزیمی مورد نیاز در پالایش خمیرکاغذ بازیافتی و یا خمیر کاغذ بکر را کاهش دهند و منجر به بهبود حرکت پذیری ماشین کاغذ و همچنین کنترل مواد چسبنده در الیاف بازیافتی شوند. همچنین نتایج تیمارهای آنزیمی حاکی از افزایش درجه روانی خمیرکاغذ بدون کاهش قابل ملاحظه در ویژگی های مقاومتی کاغذ بوده که اثرات به دست آمده بسته به نوع خمیرکاغذ مصرفی متفاوت می باشد. زمانی که از پالایش مکانیکی قبل از تیمار آنزیمی انجام شود، ویژگی های فیزیکی بهتری در درجه روانی مشابه به دست آمده است. افزایش درجه روانی می تواند ظرفیت واحد آماده سازی الیاف بازیافتی و سرعت ماشین کاغذ و یا میزان رقیق سازی خمیرکاغذ در هدباکس را

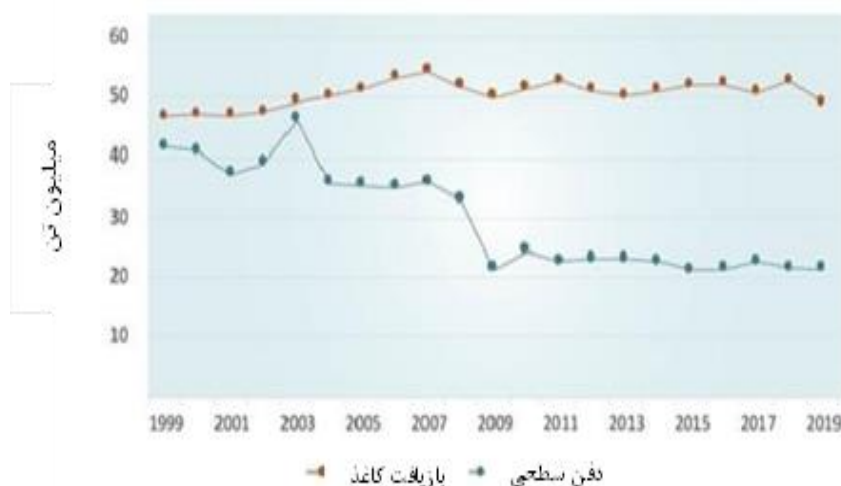
افزایش دهد و در نهایت به تولید کاغذ با کیفیت بهتر منجر شود. اثر بخشی آنزیم سلولاز با فعالیت اندوگلوکاز در سطح آزمایشگاهی و کارخانه های کاغذسازی مختلف برای بهبود درجه روانی و قابلیت آب گیری انواع مختلف خمیرکاغذ بازیافتی ارزیابی و به اثبات رسیده است [۲ و ۲۱]. همچنین آنزیم ها ترکیبات طبیعی با تاثیرات ناسازگار کم بر روی محیط زیست بوده در نتیجه می توانند به عنوان محصول سبز در نظر گرفته شود لذا فناوری های آنزیمی به لحاظ فنی و زیست محیطی توجیه پذیر می باشند. در این پژوهش سعی شده به جنبه های کاربردی مهم استفاده از علم زیست فناوری همانند آنزیم ها با منشأ مختلف در فراوری کاغذهای بازیافتی اشاره شود.

۲- اهمیت استفاده از کاغذهای بازیافتی در مقیاس جهانی

در سال های اخیر استفاده از الیاف بازیافتی در صنعت کاغذسازی نقش بسیار مهمی را به عنوان جانشین خمیرکاغذ بکر ایفا کرده و در حال حاضر در بسیاری از کشورهای دنیا، صنعت کاغذسازی بدون وجود الیاف بازیافتی نمی تواند تداوم داشته باشد. مطابق با پیش بینی های به عمل آمده 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 نشانگر آن است که در سال های آتی این صنعت باید بخش عمده مواد اولیه ساخت کاغذ را از بازیافت کاغذهای باطله برآورده سازد. براساس گزارش منتشر شده، میزان تولید جهانی کاغذ در سال ۲۰۱۵ در حدود ۴۵۰ میلیون تن و تا سال ۲۰۲۸ این مقدار به ۵۵۰ میلیون تن خواهد رسید این در حالی است که مصرف کاغذهای بازیافتی در سال ۲۰۱۵ در حدود ۲۴۰ میلیون تن و تا سال ۲۰۲۸ نیز به بیش از ۵۰۰ میلیون تن خواهد رسید. به هر حال، به روشنی دیده می شود که در آینده نقش و اهمیت کاغذهای بازیافتی به عنوان مهمترین ماده اولیه برای صنعت

ضایعات کاغذ طی ده سال گذشته به طور قابل ملاحظه از حدود ۳۳ میلیون تن در سال ۲۰۰۸ به حدود ۲۱/۵ میلیون تن در سال ۲۰۱۹ کاهش یافته (شکل ۱) و این کاهش تا حدی ناشی از افزایش نرخ بازیافت کاغذ می باشد [۳]. استفاده از بازیافت کاغذ در مقایسه با خمیر کاغذ بکر مزایای زیادی دارد. جایگزینی خمیر کاغذ بکر با الیاف بازیافتی موجب صرفه جویی در چوب مصرفی ساخت خمیر کاغذ و کاهش میزان بهره برداری از جنگل های طبیعی شده و این برای تنوع زیستی جنگل ها بسیار مهم می باشد. هر تن الیاف بازیافتی به طور میانگین موجب صرفه جویی ۱۷ اصله درخت و کاهش مصرف انرژی در بخش خمیرسازی می شود. همچنین برای هر تن کاغذ مورد استفاده برای بازیافت، صرفه جویی هایی شامل حداقل ۳۰۰۰۰ لیتر آب، ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ کیلو وات الکتریسیته، ۹۵ درصد آلودگی هوا، کاهش انتشار مواد آلاینده به هوا و آب و صرفه جویی حدود ۲/۳ مترمکعب از حجم مکان های دفن زباله می شود. به طور کلی تولید کاغذ از خمیر کاغذ بازیافتی در مقایسه با خمیر کاغذ بکر به مصرف انرژی کمتر (۲۸ تا ۷۰ درصد) و آب کمتری نیاز دارد.

کاغذسازی نسبت به امروز بسیار مهم تر خواهد بود [۴ و ۵]. مطابق با گزارش منتشر شده از مؤسسه خمیر و کاغذ در آمریکا، از ۳ نوع ماده اولیه در تولید کاغذ و مقوا استفاده می شود و این نسبت مصرف در سال ۲۰۱۳ به گونه ای تغییر یافته است که از هر ۳ نوع ماده اولیه، به طور مساوی استفاده می شود و تا سال ۲۰۲۸ پیش بینی می شود که نرخ مصرف کاغذ های بازیافتی به طور قابل ملاحظه ای افزایش بیشتری یابد [۶]. در حالی که براساس گزارش اخیر منتشر شده در سال ۲۰۲۰، بیش از ۵۰ درصد از الیاف مورد استفاده در کاغذسازی از الیاف بازیافتی است. به طور کلی، تقاضای جامعه برای محصولات کاغذ و مقوا را نمی توان بدون استفاده از الیاف بکر و بازیافتی برآورده کرد. فرآیند بازیابی کاغذ روند رو به رشدی دارد و برخی از موارد مصرف فرآورده های کاغذی را می تواند جبران نماید. اما تقاضا برای تامین الیاف در آینده نیاز به افزایش تولید الیاف بکر دارد تا مقدار الیاف مورد نیاز تامین شود [۲۲]. از طرف دیگر میزان دفن سطحی^۱ ضایعات کاغذی و مقوا یکی از شاخص های مهم در توجه گسترده به بازیافت کاغذ در مقیاس جهانی می باشد. میزان دفن سطحی



شکل ۱ بازیافت کاغذ در مقایسه با دفن سطحی ضایعات کاغذی [۳]

^۱. Landfill

محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر استفاده از زیست‌فناوری مانند به‌کارگیری آنزیم‌ها به‌عنوان یک راهکار دوست‌دار محیط زیست مطرح شده و قابلیت جایگزین شدن به جای فرآیندهای متداول سنتی در بازیافت کاغذهای باطله مختلف را دارا می‌باشد. به‌طور کلی مرکب‌زدایی با آنزیم‌ها تحت شرایط اسیدی یا خنثی، نیاز به مواد شیمیایی را کاهش داده و میزان زرد شدگی کاغذهای بازیافتی را در شرایط مرکب‌زدایی متداول قلیایی کاهش می‌دهد.

استفاده از آنزیم‌ها می‌تواند موجب کاهش مدت زمان خمیرسازی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی شده و میزان تولید را به‌طور بالقوه افزایش دهد. همچنین با استفاده از آنزیم‌ها کاهش عمده در سطح مرکب چاپ ایجاد شده و شرایط قلیایی ملایم به‌کار گرفته شده با آنزیم‌ها تاثیر مثبت بر مشکلات مربوط به مواد چسبناک در مقیاس صنعتی دارد. از دیگر اثرات مثبت مورد انتظار در تیمارهای آنزیمی می‌توان به قابلیت آنها در کاهش افزودن مواد فعال‌ساز غیریونی به واسطه تخریب زیستی ملایم در واحد تصفیه آب کارخانه اشاره کرد [۱-۴].

آنزیم‌های سلولاز و لیگنیناز به‌ترتیب موجب تجزیه سلولز و لیگنین و آنزیم‌های پکتیناز نیز واکنش تجزیه پکتین را تسریع می‌کنند [۲]. امروزه استفاده از آنزیم‌ها به‌عنوان یک روش دوست‌دار محیط زیست، اهمیت بیشتری در صنایع خمیر و کاغذ یافته و از دلایل مهم استفاده آنها می‌توان به خمیرکاغذسازی زیستی، بهبود درجه روانی الیاف بازیافتی و خمیر کاغذ بکر، اصلاح ویژگی‌های الیاف و بهبود کارایی مرکب‌زدایی اشاره داشت که مزایای زیادی را برای واحدهای صنعتی دارد [۵-۷]. رنگ‌بری با اثر زیست محیطی کم، مصرف انرژی کم و صرفه‌جویی در مصرف انرژی طی خمیر و کاغذسازی و رنگ‌بری و همچنین تولید پساب کم از مزایای عمده استفاده از آنزیم‌ها در صنعت خمیر و کاغذ می‌باشد [۱۰-۱۱]. به‌عنوان مثال

حداکثر انرژی مصرفی در کاغذسازی در بخش خمیرسازی و یا تبدیل چوب به کاغذ بوده و در این زمینه کاغذ بازیافتی، معمولاً رنگ‌بری مجدد نشده در نتیجه هزینه بخش رنگ‌بری نیز کاهش یافته و با استفاده از اکسیژن به جای کلر هم می‌توان حجم دیوکسین‌های منتشر شده به محیط زیست را (به‌عنوان محصولات جانبی فرآیند رنگ‌بری) کم کرد. همچنین کاغذهای با کیفیت نیز می‌توانند تا چندین مرتبه بازیافت شوند و در هر مرتبه به لحاظ زیست‌محیطی صرفه‌جویی‌های زیادی خواهیم داشت [۱ و ۲۲].

۳- اهمیت بازیافت کاغذ باطله در ایران

تولید سالانه زباله‌های شهری ایران بیش از ۱۰ میلیون تن است. زباله‌های آلی با حجم نزدیک به ۷۰ درصد بزرگ‌ترین گروه زباله‌های شهری در ایران را تشکیل می‌دهند و در رتبه‌های بعد به‌ترتیب پلاستیک (۱۰ درصد)، مقوا و کاغذ (۸ درصد) و ترکیبات فلزی (۳ درصد) قرار دارند. براساس آمارهای منتشر شده، نرخ کلی بازیافت در ایران در محدوده ۱۵ الی ۲۶ درصد گزارش شده است و مطابق آخرین آمار گزارش شده در سال ۱۴۰۰، میزان بازیافت سالیانه کاغذ و مقوا با توجه به مصرف سالیانه ۴۰۰ هزار تن کاغذ و مقوا در ایران به‌طور متوسط حدود ۲۵ درصد می‌باشد [۱].

۴- جایگاه زیست‌فناوری و استفاده از آنزیم‌ها در

صنعت کاغذسازی

آنزیم‌ها مولکول‌های پروتئینی با ساختار پیچیده بوده و واکنش‌های بیوشیمیایی را تسریع می‌کنند. فعالیت آنزیم‌ها در محدوده مشخصی از pH، درجه حرارت و غلظت صورت می‌گیرد. آنزیم‌ها به‌طور کلی با افزودن پسوندها به انتهای نام ماده‌ای که واکنش تجزیه آن را تسریع می‌کنند، نامگذاری می‌شوند. حذف مرکب چاپ و آلاینده‌ها از الیاف بازیافتی همراه با حفظ ویژگی‌های مقاومتی و نوری خمیر کاغذ از اهداف اولیه در بازیافت کاغذ

می شود [۲۱]. آنزیم سلولاز ذرات مرکب را با عمل کردن نرمه‌ها و فیبریل‌های ریز الیاف^۴ سطح الیاف جدا می‌کند. براساس گزارش منتشر شده توسط ریس‌میجانا^۵ و همکاران (۲۰۰۳) و باجپای (۲۰۱۰) استفاده از آنزیم‌های سلولاز و همی‌سلولاز منجر به جداسازی فیبریل‌های ریز^۶ تحت عنوان پدیده کنده شدن الیاف شده و جداسازی مرکب از سطح کاغذ را آسان می‌کند. تغییر آب‌گریزی^۷ ذرات مرکب به دلیل جداسازی فیبریل‌های ریز، میزان جداسازی آلاینده‌ها (جداسازی الیاف/ مرکب) را در مرحله شناورسازی/ شستشو افزایش می‌دهد [۱۰-۱۱].

آنزیم‌های سلولاز براساس نوع عملکرد آنها به ۳ کلاس کلی تقسیم‌بندی می‌شوند: الف) اندوگلوکاناز که موجب هیدرولیز تصادفی بخش‌های آمورف سلولز می‌شود. ب) سلویویدرولاز یا اگزوگلوکانازها که بر روی گروه‌های انتهایی کاهنده یا غیرکاهنده زنجیرهای سلولزی فعال هستند. ج) بتا-گلوکوسیداز که موجب هیدرولیز سلویوز به گلوکز می‌شود. این ۳ نوع آنزیم شامل آنزیم‌های مختلف از خانواده هیدرولاز گلوکوسیل بوده و به‌لحاظ مشخصات مولکولی و نوع عملکرد متفاوت می‌باشند [۱]. لذا اثرات ویژه آنها بر روی الیاف سلولزی بستگی به نوع سلولاز، خانواده آنزیم و نوع ماده زمینه مورد نظر دارد. به‌عنوان مثال براساس گزارش‌های منتشر شده، آنزیم‌های سلویویدرولاز موجب بهبود ویژگی‌های خمیر کاغذ مکانیکی- گرمایی (TMP^۸) شده اما همین آنزیم اثر تخریبی بر خمیر کاغذ شیمیایی دارد [۱ و ۱۴]. زایلاناز و ماناناز جز آنزیم‌های همی‌سلولز بوده و عملکرد آنها در سیستم متفاوت می‌باشد. زایلاناز پیوند زایلوپیرانوزی β-4-D 1→ مانانها را هیدرولیز نموده اما ماناناز پیوند مانوپیرانوزی β-D 1→4 مانانها و دی‌گالاکتو دی‌مانانها را هیدرولیز می‌کند [۱۴].

استفاده از آنزیم‌ها پتانسیل قابل توجهی را در برطرف نمودن بسیاری از مشکلات مربوط به الیاف بازیافتی مثل قابلیت زه‌کش، استخوانی شدن^۱، پالایش و مقاومت آنها دارد [۱-۳]. همچنین زایلاناز مقدار مواد شیمیایی مورد نیاز برای رنگ‌بری، انتشار سالانه دی‌اکسید کربن و فلزات سنگین موجود در پساب را کاهش داده، سلولاز درجه روانی خمیر کاغذ را بهبود بخشیده و قابلیت زبری و خمش الیاف خشک را افزایش می‌دهد. آنزیم لیپاز مقدار ترکیبات قیری^۲ را کاهش داده و آنزیم‌های تجزیه‌کننده لیگنین^۳ نیز لیگنین موجود در خمیر کاغذ را خارج می‌کنند [۸ و ۲۰].

۵- آنزیم‌های مورد استفاده در فراوری الیاف بازیافتی

آنزیم‌های مورد استفاده در صنایع خمیر و کاغذ عمدتاً شامل سلولاز، همی‌سلولاز، پکتیناز، آمیلاز، لیپاز، استراز و لاکاز می‌باشند [۱۸-۲۰]. در بین آنزیم‌های مختلف بررسی شده، مرکب‌زدایی با استفاده از آنزیم‌های هیدرولیزکننده کربوهیدرات (با فعالیت‌های مؤثر بر روی سلولز و همی‌سلولز) به طور گسترده در الیاف بازیافتی مختلف و در واحدهای مختلف کاغذسازی اثبات شده است. مکانیسم مرکب‌زدایی به وسیله این آنزیم‌ها کاملاً شناخته نشده است هرچند که در این زمینه فرضیه‌های زیادی بیان شده‌اند [۲۱ و ۲۳].

آنزیم‌های سلولاز و همی‌سلولاز به‌عنوان یک کلاس از مواد افزودنی محسوب شده که می‌توانند با هدف اصلاح ویژگی‌های الیاف برای تغییر یا بهبود ویژگی‌های کاغذ استفاده شوند. مطابق با بررسی‌های انجام شده، الیاف تیمار شده با انواع مختلف سلولاز یا همی‌سلولاز بدون تاثیر بر ویژگی‌های مقاومتی کاغذ، موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی کوبیدن و پالایش خمیر کاغذ و یا کاهش زمان لازم برای رسیدن به یک سطح مشخصی از کوبیدن یا پالایش

^۵ Rismijana

^۶ Small fibrils

^۷ Hydrophobicity

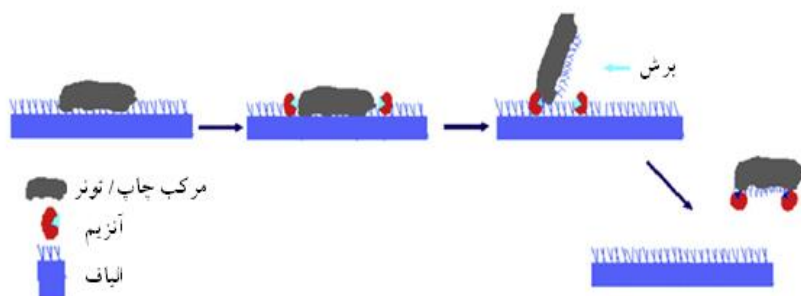
^۸ Thermomechanical pulp

^۱ Hornification

^۲ Pitch components

^۳ Lignin-degrading enzymes

^۴ Peeling-off fibers



شکل ۲ مکانیسم آنزیم سلولاز در مرکب‌زدایی کاغذ چاپ شده با مرکب تونر [۱].

رابطه آنزیم لیگنین پروکسیداز که تحقیقات کمی بر روی آن انجام شده است، دورنمای کمی را نشان داده است و این نشانگر آن است که باید در استفاده و کاربرد عملی این آنزیم دقت و توجه بیشتری شود [۱].

۶- مزایای استفاده از آنزیم‌ها در فراوری الیاف بازیافتی

همان‌طور که از پیش اشاره شد، استفاده از الیاف بازیافتی طی چند دهه اخیر به طور گسترده افزایش یافته و در این رابطه فرآیند مرکب‌زدایی مرحله مهمی در بازیابی الیاف محسوب می‌شود [۵ و ۱۰]. در مرکب‌زدایی متداول شیمیایی (صنعتی) از مواد شیمیایی زیادی (شامل هیدروکسید سدیم، پراکسید هیدروژن، مواد کی‌لیت کننده، مواد فعال‌ساز سطحی و سیلیکات سدیم) مصرف می‌شود و لذا نیازمند سیستم‌های با تیمار پساب پرهزینه می‌باشد [۱۷-۱۸]. در سال‌های اخیر مرکب‌زدایی آنزیمی به‌عنوان یکی از روش‌های بهبود ویژگی‌های کیفی خمیرکاغذهای بازیافتی و به دلیل کارایی زیاد و اثر زیست محیطی کم، توجه زیادی را به خود جلب نموده است [۱۹]. اعمال تیمارهای آنزیمی می‌تواند با حذف نر مه‌های الیاف و همچنین بهبود فیبریل شدن الیاف خمیرکاغذهای بازیافتی، موجب بهبود قابلیت آب‌گیری خمیرکاغذ، افزایش سرعت تولید ماشین کاغذ و بهبود ویژگی‌های مقاومتی کاغذ

در شکل ۲ یکی از مکانیسم‌های احتمالی آنزیم سلولاز در مرکب‌زدایی کاغذ با چاپ تونر نشان داده شده است. آنزیم‌های اکسایشی مانند لیگنینازها از جمله آنزیم‌های دیگر مورد استفاده در صنایع کاغذ سازی به‌ویژه فراوری کاغذ بازیافتی هستند. لیگنینازها آنزیم‌هایی هستند که جداسازی لیگنین سطحی را کاتالیز می‌کنند لذا این آنزیم‌ها برای مرکب‌زدایی کاغذ روزنامه باطله (ONP) مناسب می‌باشند. لیگنینازها عمدتاً شامل آنزیم‌های اکسایشی^۲ بوده و شامل الف- منگنز پروکسیداز^۳ (MnP) ب- لیگنین پروکسیداز^۴ (LiP) و ج- لاکاز می‌باشند [۱]. استفاده از MnP در حضور پروکسید هیدروژن Mn^{+2} را به Mn^{+3} اکسید کرده و این ترکیب می‌تواند واحدهای فنولی لیگنین را اکسید کند. همچنین یک سیستم متشکل از MnP، Mn^{+2} ، پروکسید هیدروژن و لیپیدهای اشباع نشده، واحدهای غیر فنولی لیگنین را اکسید می‌کند. این ترکیب قادر به تجزیه خود لیگنین نیز می‌باشد [۱۲-۱۳]. همچنین استفاده از LiP در حضور پراکسید هیدروژن، واحدهای فنولی و غیرفنولی لیگنین را اکسید می‌کند. همچنین این ترکیب می‌تواند پلیمر لیگنین را نیز اکسید کند. امروزه در بین آنزیم‌های مختلف تجزیه کننده لیگنین، دو آنزیم لاکاز و MnP موارد استفاده و کاربرد بیشتری دارند. در این

³ Manganese peroxidase

⁴ Lignin peroxidase

¹ Old newspaper

² Oxidative enzymes

برخی از آنزیم های سلویویدرولاز (CBH) در محصول آنزیمی است که به پالایش خمیرکاغذ کمک می کند [۱۰-۱۱].

در سال های اخیر استفاده از آنزیم لاکاز برای مرکب زدایی الیاف بازیافتی به طور مجزا و یا در ترکیب با سلولولاز و یا همی سلولولاز بسیار مورد توجه قرار گرفته است. لاکاز در حضور عوامل واسطه تحت عنوان سیستم لاکاز-عامل واسطه (LMS) در ۲۰ سال اخیر معرفی شده و به طور گسترده در لیگنین زدایی و رنگبری انواع مختلف خمیرکاغذ استفاده شده است [۱ و ۱۲]. با جداسازی لیگنین توسط لاکاز، اتصالات بین الیاف و ذرات مرکب شل شده و جداسازی مرکب آسان می شود [۱۰-۱۱]. اخیراً تغییر شکل موفق رنگ های سخت^۶ با سیستم LMS به عنوان روش جدید برای بی رنگ کردن مستقیم^۷ ذرات مرکب معرفی شده است [۹ و ۱۳]. بعضی از تحقیقات پتانسیل سیستم های LMS را برای رنگبری انواع مختلف خمیر کاغذ های چوبی و غیرچوبی تأیید کرده اند. اما در حال حاضر هزینه زیاد این فرآورده های سنتزی، اجرای صنعتی و توجه به زمینه استفاده از مواد واسطه طبیعی حاصل از گیاهان و یا فرآورده های جنبی صنعتی را به تأخیر انداخته است [۸-۹].

لاکاز به عنوان آنزیم اکسایشی می تواند لیگنین سطحی را در حضور مواد واسطه با جرم مولکولی کم^۸ و یا اکسیژن با اکسایش بخش های لیگنین، شکست اکسایش زنجیرهای جانبی^۹ و اکسایش انتخابی گروه های فنوکسی لیگنین خارج کند [۱۱]. لاکاز اغلب با مواد واسطه اکسید کننده استفاده می شود [۱۶-۱۷]. اولین ماده واسطه سنتزی^{۱۰} که قادر به اکسایش لیگنین غیر فنولی و با قابلیت اکسایش-کاهش زیاد است ترکیبات ۲-۲-آزینوبیس^{۱۱} (۳-اتیل بنزن

حاصل شود [۱۱]. صنعت بازیافت کاغذ، استفاده از آنزیم ها را برای اصلاح یا بازسازی^۱ ویژگی های الیاف به عنوان یک روش مؤثر مطرح کرده است. در فرآیند مرکب زدایی سنتی^۲، مقادیر زیادی از مواد شیمیایی مصرف شده که موجب می شود این روش پرهزینه، به لحاظ زیست محیطی مخرب و خروج زیاد مواد آلاینده را در بر داشته باشد [۵]. در این زمینه آنزیم ها می توانند نیاز به مواد شیمیایی را کاهش و هزینه های فرآیندی و اثر زیست محیطی را کم کنند. الیاف بازیافتی می توانند از طریق تیمار با سلولولاز بهینه سازی شوند. در حقیقت آنزیم ها ویژگی های بین سطحی^۳ الیاف را اصلاح و آب دوستی^۴ آنها را افزایش داده در نتیجه ویژگی های خمیرکاغذ مانند قابلیت زه کش و مقاومت خمیر کاغذ را می توانند تغییر دهند [۱۹ و ۲۱]. همچنین نتایج استفاده از تیمار آنزیمی بر قابلیت گذر ماشین کاغذ، میزان آب گیری خمیرکاغذ برای تولید لاینر با وزن پایه ۲۰۰ گرم بر سانتی متر مربع در کارخانه ای در آمریکای شمالی نشان داد که به واسطه افزایش قابلیت آب گیری، قابلیت گذر یا حرکت پذیری ماشین کاغذ افزایش یافته و کاهش ۶ الی ۷ درصد در مصرف بخار در بخش خشک کن مشاهده شد [۱۰]. همچنین امکان افزایش مقاومت له شدن در حالت حلقه کاغذ به میزان دو واحد وجود دارد. همچنین در آزمایش مشابه با استفاده از تیمار آنزیمی (۱۰۰ گرم به ازای هر تن خمیرکاغذ) قبل از پالایش، در یک واحد صنعتی تولید کننده حوله و دستمال کاغذی در اروپا، سرعت ماشین کاغذ از ۱۶۵۰ متر بر دقیقه به ۱۷۵۰ متر بر دقیقه برای دستمال کاغذی و برای حوله نیز از ۱۶۰۰ متر بر دقیقه به ۱۷۵۰ متر بر دقیقه افزایش یافت. همچنین، انرژی ویژه پالایش حدود ۱۲/۵ درصد کاهش یافته که احتمالاً به دلیل حضور فعالیت

⁷ Direct discoloration

⁸ Low molecular mass mediators

⁹ Oxidative cleavage of side chains

¹⁰ Synthetic mediator

¹¹ 2,2'-Azino-bis

¹ Restore

² Traditional deinking process

³ Interfacial properties

⁴ Water affinity

⁵ Laccase mediator system (LMS)

⁶ Hard dyes

تسریع بخشیده و به دلیل قابلیت اکسایش- کاهش کم و جرم مولکولی زیاد می‌تواند واحدهای فنولی لیگنین را اکسید کند اما توانایی آن در اکسایش بعضی ترکیب‌های با جرم مولکولی کم، کاربرد آن را در ترکیبات غیرفنولی لیگنین نیز قادر ساخته است. آنزیم لاکاز همراه با سایر آنزیم‌های اکسایشی (آنزیم‌های قارچی تخریب کننده لیگنین) مثل LiP، MnP و پروکسیدازهای مختلف، بر روی مواد زمینه فنولی عمل کرده و با کاتالیز کردن اکسایش گروه‌های هیدروکسیل فنولی، آنها را به رادیکال‌های فنوکسی تبدیل کرده و دی‌اکسیژن^{۱۳} هم به آب احیا می‌شود. تبدیلات غیرآنزیمی بیشتر رادیکال‌های فنوکسی می‌تواند منجر به تخریب لیگنین شود و رادیکال‌های حاصل می‌توانند با سایر رادیکال‌ها جفت و آنها را اکسید کند [۱۲ و ۱۷].

نتایج مطالعات انجام شده در مورد تاثیر تیمار آنزیمی با استراز بر مواد چسبناک ضایعات مخلوط کاغذ باطله اداری (MOW) در مقیاس صنعتی نشان می‌دهد که مقدار مواد چسبناک به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافتند [۲۳]. افزایش مقدار الیاف بازیافتی به بیش از ۵۰ درصد در ترکیب نهایی خمیر کاغذ بدون اعمال تیمار آنزیمی MOW، امکان‌پذیر نبوده به طوری که کل مواد چسبناک بیش از ۲۵۰ ppm مشاهده شد. اما با انجام تیمار آنزیمی الیاف بازیافتی MOW، مقدار کل مواد چسبناک می‌تواند به حدود ۱۰۰ ppm کاهش یابد و استفاده از مقادیر بیشتر الیاف بازیافتی MOW (۶۰ درصد) امکان‌پذیر شده است [۱]. همچنین در تحقیق دیگر الیاف بازیافتی MOW با استفاده از آنزیم در مقیاس صنعتی تیمار شد تا میزان مصرف خمیر کاغذ بکر با درجه روشنی زیاد را در

تیازولین-۶ سولفونیک اسید^۱ می‌باشد. مواد واسطه سنتزی لاکاز که به طور عمده برای کاربردهای مربوط به صنایع فرآورده‌های جنگلی استفاده می‌شوند، شامل ترکیبات ۳-N-OH؛ HBT، ویلوریک اسید^۲ (VA)، و N-هیدروکسی استانیلید^۳ است. یکی از اولین عوامل واسطه کشف شده ترکیب سیرینجالدهید^۴ می‌باشد. اخیراً ترکیبات N-هیدروکسی مانند ۱-هیدروکسی بنزوتریازول (HBT)^۵ به عنوان مهمترین مواد واسطه لاکاز به طور گسترده استفاده می‌شوند. مواد واسطه طبیعی بالقوه مقرون به صرفه که مشتق شده از لیگنین^۶ (p-کوماریک اسید^۷، سیرینجالدهید و استوسیرینجون^۸) می‌توانند از لیکور مصرفی واحد خمیرسازی و مواد گیاهی به دست آیند و به عنوان عوامل واسطه لاکاز مورد استفاده قرار گیرند [۱۳]. انواع مختلفی از ترکیبات پلی‌اکسومتالات^۹ (خوشه‌های انتقال فلزی یون آنیون اکسیژن^{۱۰}) و دیگر کمپلکس‌های فلزی تبادل کننده^{۱۱} صرف نظر از ترکیبات آلی به عنوان مواد واسطه لاکاز مورد بررسی قرار گرفته و اثرات خوبی را نشان دادند [۱ و ۱۳]. نتایج حاصل از تأثیر آنزیم‌های اکسید کننده لیگنین در پخت‌های کرافت و سولفیت و همچنین خارج‌سازی لیگنین نهایی آنها در فرآیند رنگ‌بری با کلر نشان داد که از این آنزیم‌ها می‌توان در رنگ‌بری خمیر کاغذهای شیمیایی استفاده کرد. همچنین نتایج نشان داد که از قارچ‌های پوسیدگی سفید می‌توان برای تمیزسازی پساب مربوط به واحدهای رنگ‌بری کلر استفاده کرد [۱۷]. آنزیم لاکاز در حضور مواد واسطه شیمیایی و یا اکسیژن می‌تواند خمیر کاغذ را لیگنین‌زدایی کند [۱۸]. لاکاز یک اکسیداز چند مسی^{۱۲} است که به وسیله میکروارگانیسم‌ها و گیاهان ساخته می‌شود. این آنزیم اکسایش ترکیبات فنولی را

⁸ Acetosyringon

⁹ Acetosyringon

¹⁰ Transition metal oxygen-anion clusters

¹¹ Transition metal complexes

¹² Multi-copper oxidase

¹³ Dioxygen

¹ 3-ethylbenzothiazoline -6-sulfonic acid (ABTS)

² Violuric acid (VA)

³ N-Hydroxyacetanilide (NHA)

⁴ Syringaldehyde

⁵ 1-hydroxybenzotriazole (HBT)

⁶ Lignin-derived natural mediators

⁷ P-coumaric acid

است تا آنزیم‌های مؤثرتری برای مرکب‌زدایی جستجو شود [۲۴-۲۵].

۷- نتیجه‌گیری

استفاده از الیاف بازیافتی در صنعت کاغذسازی نقش بسیار مهمی را به‌عنوان جانشین خمیر کاغذ بکر ایفا می‌کند، به‌طوری که امروزه در بسیاری از کشورهای دنیا، صنعت کاغذسازی بدون وجود الیاف بازیافتی نمی‌تواند تداوم داشته باشد. الیاف بازیافتی دارای خواص مقاومتی کمتر و مقاومت به زه‌کش زیاد نسبت به الیاف بکر است لذا وجود همین معایب، کیفیت کاغذ نهایی و سرعت عملیات ماشین‌های کاغذ را محدود می‌کند. در سال‌های اخیر استفاده از زیست‌فناوری در بخش‌های مختلف صنایع سلولزی همچون خمیر سازی زیستی، رنگ‌بری زیستی، مرکب‌زدایی زیستی، تصفیه پساب و... مورد توجه قرار گرفته و دستاوردهای بسیار خوبی نیز در این زمینه به‌دست آمده است. یکی از مهم‌ترین جنبه‌های کاربردی علم زیست‌فناوری در صنایع سلولزی استفاده از آنزیم‌ها در فراوری الیاف بازیافتی است. در فراوری کاغذهای بازیافتی، تعیین شرایط فرآیندی بهینه در فرمولاسیون تیمار آنزیمی مشخص به لحاظ نوع سوسپانسیون مصرفی (الیاف، ساختار مرکب، فرآیند چاپ و ...)، نوع فرآیند مرکب‌زدایی، کیفیت مطلوب خمیر کاغذ مرکب‌زدایی شده، دما، pH تیمار آنزیمی و ... بسیار مهم بوده تا هر آنزیم مشخص بتواند حداکثر کارایی را در فرآیند داشته باشد. آنزیم‌ها طی فرآیند مرکب‌زدایی هم به مرکب و هم به الیاف حمله می‌کنند. مرکب‌های بر پایه روغن گیاهی می‌توانند به طور مستقیم به وسیله آنزیم‌های لیپاز و استراز تخریب شوند این در حالی است که سطح الیاف و اتصال الیاف در نزدیکی ذرات مرکب می‌تواند توسط آنزیم‌های سلولاز، همی سلولاز و پکتیناز و آنزیم‌های تجزیه‌کننده لیگنین تغییر یابند. در نتیجه ذرات مرکب آسان‌تر در

سوسپانسیون نهایی کاهش دهد بدون اینکه بر میزان درجه روشنی استاک نهایی تاثیر بگذارد. مطالعات زیادی در مورد تولید دستمال کاغذی، کاغذ روزنامه، کاغذهای چاپ و بسته‌بندی حاصل از کاغذهای بازیافتی در مقیاس صنعتی گزارش شده است [۲۳]. نتایج استفاده از آنزیم‌ها نشان داد که این عوامل کارآیی عملیات غربال را بهبود بخشیده و حجم وزده‌ها را کاهش می‌دهند. در نتیجه این امر منجر به کاهش مواد چسبناک به ۷۰ تا ۹۰ درصد شده و ترکیب سلولزی تمیزتر و ذرات آلاینده بزرگ را نتیجه خواهد داد که به راحتی از سیستم حذف می‌شوند. در سایر مطالعات صنعتی با استفاده از آنزیم‌ها، نتایجی همچون کاهش ۹۰ درصد مواد چسبناک، درجه روشنی بیشتر طی فرآیند مرکب‌زدایی، بهبود عملکرد تولید، کاهش مصرف حلال‌های تمیزکننده و کاهش ۹۵ درصدی در توقف ماشین‌ها در اثر وجود مواد چسبناک حاصل شده است [۱۵]. نتایج ارزیابی‌های انجام شده در رابطه با کارآیی مرکب‌زدایی آنزیمی الیاف بازیافتی (شامل الیاف روزنامه، مجله و مقوای کارت رنگی^۱) توسط آنزیم‌های هیدرولیزکننده کربوهیدرات^۲ شامل آنزیم‌های سلولاز (با فعالیت‌های اندوگلوکاناز و آگزوگلوکاناز) و همی سلولاز در مقایسه با آنزیم لاکاز بیانگر آن بوده که آنزیم‌های ذکر شده می‌توانند به‌طور مؤثر موجب مرکب‌زدایی این نوع خمیر کاغذها در نتیجه بهبود درجه روشنی و کاهش غلظت مرکب باقی‌مانده در کاغذ شوند [۱۷]. بسیاری از محققان استفاده از آنزیم‌های مختلف مثل سلولاز و همی سلولاز، پکتیناز، آمیلاز و لیگنیناز را در فرآیند مرکب‌زدایی دوست‌دار محیط زیست^۳ گزارش کرده‌اند. اگر چه مرکب‌زدایی با سلولاز و همی سلولاز در حال حاضر در واحدهای صنعتی استفاده می‌شود اما ویژگی‌های خمیر کاغذ به ویژه ویژگی‌های فیزیکی به خوبی خمیر کاغذ مرکب‌زدایی شده با مواد شیمیایی^۴ نیستند، لذا مطلوب

³ Eco-friendly deinking process

⁴ Chemically deinked pulp

¹ Printed cardboard

² Carbohydrate hydrolase

کاهش آلودگی پروتئینی محصول و افزایش میزان تحمل آن در مقابل حلال های آلی مختلف می تواند با فرآیند تثبیت آنزیم میسر و فراهم شود. همچنین استفاده از آنزیم های سختی دوست (اکستریموفیل) که از جانداران سختی دوست (اغلب باکتری هایی که قادر به رشد در شرایط بسیار سخت هستند و این شرایط برای انسان حاد و غیرقابل تحمل است) استخراج می شوند می تواند راه کار دیگر برای کاهش نوسانات شرایط تیمار آنزیمی در محیط صنعتی باشد. از آنجایی که فرآیندهای صنعتی همواره تحت شرایط ویژه و سختی انجام می شوند، یافتن آنزیم های با توانایی فعالیت در این شرایط بسیار حائز اهمیت است. در این زمینه استفاده از باکتری های نمک دوست می تواند منبع مناسبی از این آنزیم ها محسوب شود زیرا آنزیم های تولید شده توسط این میکروارگانیسم ها می توانند فعالیت خود را در مقادیر مختلف درجه حرارت، غلظت نمک و pH حفظ کنند.

۸- منابع

- [۱] اکبرپور، ا. ۱۳۹۴. بهبود ویژگی های کیفی مخلوط خمیر کاغذ های روز نامه و مجله باز یافتی با تیمار های شیمیایی، آنزیمی و فراصوتی. رساله دکتری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۲۸۳ص.
- [۲] اکبرپور، ا.، و رسالتی، ح. ۱۳۹۰. تاثیر غلظت های مختلف آنزیم سلولاز بر ویژگی های نوری و فیزیکی خمیر کاغذ روزنامه مرکب زدایی شده. مجله صنایع چوب و کاغذ ایران، ۲ (۱): ۱-۱۵.
- [۳] اکبرپور، ا.، قاسمیان، ع.، و عزیزیان نسنار، ع. ۱۳۹۹. بررسی نرخ مصرف و بازیافت کاغذ باطله در مقیاس جهانی تا سال ۲۰۲۸ میلادی. سومین همایش ملی دانش و نوآوری در صنعت چوب و کاغذ، ۱۲ص.
- [۴] قاسمیان، ع. و اکبرپور، ا. ۱۳۹۰. استراتژی بازیافت کاغذ و جایگاه آن در تامین مواد لیگنوسولولزی مورد نیاز صنایع خمیر و کاغذ کشور. همایش نقشه راه تامین مواد

فرآیندهای شستشو یا شناورسازی خارج می شوند. اگرچه مرکب زدایی با سلولاز و همی سلولاز صنعتی شده است، اما باید در جستجوی آنزیم های مؤثرتر و یا ترکیب های مختلف آنزیمی برای مرکب زدایی باشیم. امروزه استفاده از آنزیم های سلولزی و اکسایشی (مانند لاکاز) نتایج قابل قبولی را برای مرکب زدایی انواع مختلف کاغذ های باطله نشان داده اند به طوری که اغلب آزمایش های انجام شده در واحدهای نیمه صنعتی و همچنین صنعتی اثبات کردند که مرکب زدایی با سلولاز و لاکاز می تواند موجب کاهش هزینه مواد شیمیایی، افزایش میزان جداسازی ذرات مرکب و مواد چسبناک، بهبود در جه روانی (در نتیجه بهبود حرکت پذیری ماشین کاغذ) و کاهش COD و BOD پساب شود. همچنین با ترکیبی از آنزیم های سلولاز و آلفا آمیلاز همزمان با مصرف کمتر مواد شیمیایی و کاهش میزات ذرات مرکب و لکه (کمتر ۱۰ ppm) در کاغذ، پساب نهایی دارای بار COD و مقدار رنگ کمتر می باشد. با استفاده از آنزیم ها می توان مشکلات مواد چسبناک مربوط به الیاف باز یافتی را کنترل کرد و نتایج مطالعات انجام گرفته به کمک آنزیم های استراز نیز بیانگر آن است که مقدار مواد چسبناک موجود در ضایعات کاغذ به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد و همین مسئله امکان استفاده از مقادیر بیشتر الیاف باز یافتی در سیستم تولید را برای تولید کاغذ فراهم می کند. از طرف دیگر استفاده از آنزیم های مختلف در مقیاس صنعتی نیازمند کنترل دقیق شرایط تیمار آنزیمی است و این مسئله ممکن است بسته به نوع آنزیم مصرفی سخت باشد. در این راستا تثبیت آنزیم های تجاری می تواند ضمن انجام واکنش مکرر و بهبود کارایی آنها در زمان طولانی تر منجر به بهبود پایداری آنزیم و کاهش هزینه کلی شود. بهینه سازی کارایی آنزیم از طریق ثبات و پایداری بیشتر، استفاده بیشتر آن در محدوده pH و درجه حرارت های بیشتر (جلوگیری از تغییر ماهیت آنزیم در شرایط ذخیره سازی و عملیاتی)، امکان بازیابی مؤثر،

- [15] Covarrubias, R. M., and Eng, G. H. 2006. Optimize: Enzymatic stickies control developments, *Pap. Asia* 22(8), 31-34.
- [16] Gao, SH., Li, L., Lin, Y., and Han, SH. 2018. Deinkability of different secondary fibers by enzymes. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 33(1): 12-20.
- [17] Ibarra, D., Monte, M.C., Blanco, A., Martínez, A.T., Martínez, M.J. 2012. Enzymatic deinking of secondary fibers: Cellulases/hemicellulases versus laccase-mediator system, *J. Ind. Microbiol. Biotech.* 39 (1):1-9.
- [18] Lee , C.K ., Darah , I., and Ibrahim, C.O. 2013. Characterization of cellulase, hemicellulase and lipase and its use in deinking of laser printed paper. *Malaysian Journal of Microbiology*, 9(1):84-92.
- [19] Pala, H., Mota, M., and Gama, F.M. 2004. Enzymatic versus chemical deinking of non- impact ink printed paper. *Biotechnology Journal*, 108:79-89.
- [20] Pathak, P., Bhardwaj, N.K., and Singh, A.K. 2014. Production of crude cellulase and xylanase from *trichoderma harzianum* PPDDN10 NFCCI-2925 and its application in photocopier waste paper recycling. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 172:3776-3797.
- [21] Pinto, R., Moreira, S., Mota, M., Gama, M. 2004. Studies on the cellulose-binding domains adsorption to cellulose, *Langmuir*, 20(4):1409-1413.
- [22] Sixta, H. 2006. Introduction (Chapter 1), In: *Handbook of Pulp*, Sixta, H. (ed.), Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KgaA, p. 2-19.
- [23] Tsatsis, D.E., Papachristos, D.K., Valta, K.A., Vlyssides, A.G., Economides, D.G. 2017. Enzymatic deinking for recycling of office waste paper, *J. Environ. Chem. Eng.* 5(2):1744-1753.
- [24] Zhang, D., Chai, X.S., Pu, Y., Ragauskas, A.J. (2007). Lignocellulosic fiber charge enhancement by catalytic oxidation during oxygen delignification. *J. Colloid. Interface Sci.*, 306:248-254.
- [25] Zhang, X., Renaud, S., and Paice M. 2008. Cellulase deinking of fresh and aged recycled newsprint/magazines (ONP/OMG). *Enzyme Microb. Technology Journal*, 43:103-108.
- اولیه و توسعه صنایع چوب و کاغذ کشور در افق ۱۴۰۴، ص ۴.
- [5] Akbarpour, I., Ghasemian, A., Resalati, H., and Saraeian, A. (2018). Biodeinking of mixed ONP and OMG waste papers with cellulase. *Cellulose Journal*, 25 (2): 1265-1280.
- [6] American Forest and Paper Association (AF&PA). (2019). *Recycled paper*, 15p.
- [7] Aracri, E., Colom, J.F., and Vidal, T. 2009. Application of laccase-natural mediator systems to sisal pulp: An effective approach to biobleaching or functionalizing pulp fibres? *Journal of Bioresour. Technol.*, 100 (23):5911-5916.
- [8] Aracri, E., Fillat, A., Colom, J.F., Gutierrez, A., del Rio, J.C., Martinez, A.T., and Vidal, T. 2010. Enzymatic grafting of simple phenols on flax and sisal pulp fibres using laccases. *Journal of Bioresour. Technol.*, 101:8211-8216.
- [9] Arjona, I., Vidal, T., Roncero, M. B., and Torres, A. L. 2007. A new color stripping sequence for dyed secondary fibres. In: *10th International Congress on Biotechnology in the Pulp and Paper Industry*, Madison, Wisconsin, USA, PS LPA 3.2, p. 127.
- [10] Bajpai, P. (2018). Fiber from recycled paper and utilization. *Biermann's Handbook of Pulp and Paper* (3rd Edition), P. 547-582.
- [11] Bajpai, P.K. 2010. Solving the problems of recycled fiber processing with enzymes. *Bioresources*, 5(2):1-15.
- [12] Call, H.P., and Strittmatter, G., 1992. Application of lignolytic enzymes in the paper and pulp industry-recent results. *Papier*, 46 (10A):32-37.
- [13] Camarero, S., Ibarra, D., Martinez, A.T., Romero, J., and Gutierrez, A. 2007. Paper pulp delignification using laccase and natural mediators. *Enzyme Microbial Technology.*, 40:1264-1271.
- [14] Chutani, P., and Sharma K. K. 2015. Biochemical evaluation of xylanases from various filamentous fungi and their application for the deinking of ozone treated newspaper pulp. *Carbohydrate Polymers* 127 (2015) 54-63.

The importance of biotechnology in waste papers processing

Iman Akbarpour^{1*}

* Assistant Prof., Department of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR), Gorgan, Iran.

inakbarpour@gau.ac.ir

Receipt: 2022/04/18

Accepted: 2022/11/15

Abstract

Over the past few years, due to the shortage of forest resources as well as the increasing consumption of paper and paperboard, many pulp and paper manufacturers have developed the use of different sources of recycled (secondary) fibers. Recycling of paper is an effective and eco-friendly way to preserve forest resources, which eventually save the natural diversity and energy. The use of biotechnology in various sectors of the cellulosic products industries such as bio-pulping, bio-bleaching, bio-deinking, bio-wastewater treatment, etc. has been considered and good achievements have been obtained in this field. One of the most important applications of biotechnology in the cellulosic industries is the use of enzymes in the processing of recycled fibers. The use of enzymatic technologies, as environmental friendly process, has led to changes in industrial processes as much as possible and indicated great potential in solving many problems of recycled fibers, especially problems related to waste paper deinking, pulp drainage rate, fiber hornification, refining and stickies materials. In general, deinking with enzymes under acidic or neutral conditions declines the chemicals usage and reduces the yellowing of recycled paper under conventional alkaline deinking conditions. Today, the use of cellulosic enzymes (cellulase and hemicellulase) and oxidative enzymes (such as laccase) as well as amylase and pectinase have shown acceptable results for deinking different types of waste paper and most experiments in semi-industrial as well as industrial units have shown that deinking with them can reduce the cost of chemicals, increase the separation of ink particles and stickies, improve the pulp freeness (thus improving the paper machine runability) and reduce the COD and BOD loads of the effluent.

Keywords: Wastewater pollution, Biotechnology, Recycled fiber processing, Paper quality, Bio-deinking.