زیست فناوری دانشگاه تربیت مدرس

اهمیت زیست‌فناوری در فراوری کاغذهای باطله

ایمان اکبرپور[1*]

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

*صندوق پستی ٤٣٤٦٤-٤٩١٨٩،گرگان، ایران
inakbarpour@gau.ac.ir

دریافت: ١٤٠١/٠١/٢٩ پذیرش: ١٤٠١/٠٨/٢٤

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 می شود. استفاده از زیست‌فناوری 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 به‌دست آمده است. استفاده از آنزیم‌ها در فراوری الیاف بازیافتی یکی از مهم‌ترین جنبه‌های کاربردی علم زیست‌فناوری در صنایع سلولزی است. استفاده از فناوری‌های آنزیمی به‌عنوان فرآیند دوست‌دار محیط زیست منجر به تغییر در فرآیندهای صنعتی شده و قابلیت‌های زیادی را در حل بسیاری از مشکلات الیاف بازیافتی به‌ویژه مشکلات مربوط به مرکب‌زدایی کاغذ باطله، سرعت آب‌گیری خمیرکاغذ، استخوانی شدن (شاخه‌ای) الیاف، پالایش و مواد چسبناک نشان داده است. به‌طور 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 قلیایی 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 به‌طوری 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، زیست‌فناوری، فراوری الیاف بازیافتی، کیفیت کاغذ، مرکب‌زدایی زیستی.

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-12-22]

۱-مقدمه

کاغذ و فرآورده های کاغذی مختلف به‌عنوان یکی از کالاهای مصرفی روزانه، نقش مهمی را در زندگی انسان‌ها ایفا کرده و در این راستا مواد اولیه لیگنوسلولزی و غیرچوبی به‌عنوان مواد اولیه مهم برای تولید کاغذ محسوب می شوند. امروزه در بسیاری از کشورهای دنیا، صنعت کاغذسازی بدون وجود الیاف بازیافتی نمی‌تواند 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٪ ، ۷٤٪ ، ۸۱٪ و ۷٤٪ گزارش شده و این آمار به اهمیت زیاد توجه به مقوله بازیافت کاغذ در مقیاس جهانی اشاره دارد[۱-۲]. پیش‌بینی می شود تا سال ۲۰۳۰ میلادی بخش عمده کاغذهای باطله را کاغذهای بسته‌بندی تشکیل دهند [۱]. در سال های اخیر صنعت خمیر و کاغذ، استفاده از زیست‌فناوری را به‌طور گسترده در فرآیند تولید خمیرکاغذ آغاز کرده و در این زمینه پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای حاصل شده است. به‌عنوان مثال نتایج استفاده از تیمارهای آنزیمی بیانگر آن است که آنزیم‌های سلولازی مانند سلولاز این قابلیت را دارند که انرژی موردنیاز در پالایش خمیرکاغذ بازیافتی و یا خمیر کاغذ بکر را کاهش دهند و منجر به بهبود حرکت‌پذیری 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 به‌دست آمده بسته به نوع خمیرکاغذ مصرفی متفاوت می‌باشد. زمانی‌که از پالایش مکانیکی قبل از تیمار آنزیمی انجام شود، ویژگی های فیزیکی بهتری در درجه روانی مشابه به‌دست آمده است. افزایش درجه روانی می‌تواند ظرفیت واحد آماده سازی الیاف بازیافتی و سرعت ماشین کاغذ و یا میزان رقیق‌سازی 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 کارخانه‌های کاغذسازی مختلف برای بهبود درجه روانی و قابلیت آب‌گیری 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 به‌عنوان محصول سبز در نظر گرفته شود لذا فناوری‌های آنزیمی به لحاظ فنی و زیست محیطی توجیه‌پذیر می‌باشند. در این پژوهش سعی شده به جنبه‌های کاربردی مهم استفاده از علم زیست فناوری همانند آنزیم‌ها با منشا مختلف در فراوری کاغذهای بازیافتی اشاره شود.

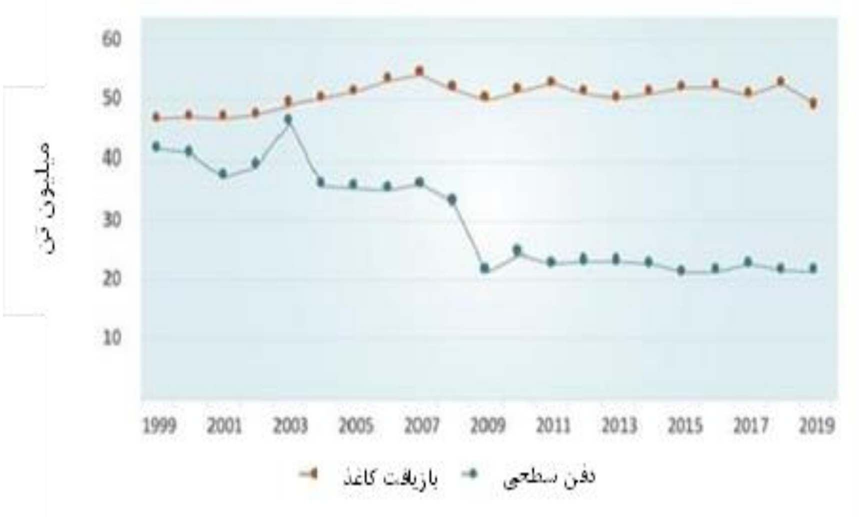
۲- اهمیت استفاده از کاغذهای بازیافتی در مقیاس جهانی

در سال‌های اخیر استفاده از الیاف بازیافتی در صنعت کاغذسازی نقش بسیار مهمی را به‌عنوان جانشین خمیرکاغذ بکر ایفا کرده و در حال حاضر در بسیاری از کشورهای دنیا، صنعت کاغذسازی بدون وجود الیاف بازیافتی نمی‌تواند تداوم داشته باشد. مطابق با پیش‌بینی‌های 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 سال‌های 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 ٤٥٠ 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 ۲٤۰ میلیون تن و تا سال ۲۰۲۸ نیز به بیش از ۵۰۰ میلیون تن خواهد رسید. به هر حال، به روشنی دیده می‌شود که در آینده نقش و اهمیت کاغذهای بازیافتی به‌عنوان مهمترین ماده اولیه برای صنعت

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-12-22]

کاغذسازی نسبت به امروز بسیار مهم‌تر خواهد بود [۳و٤]. مطابق با گزارش منتشر شده از مؤسسه خمیروکاغذ در آمریکا، از ۳ نوع ماده اولیه در تولید کاغذ و مقوا استفاده می‌شود و این نسبت مصرف در سال ۲۰۱۳ به‌گونه‌ای تغییر یافته است که از هر ۳ نوع ماده اولیه، به طور مساوی استفاده می‌شود و تا سال ۲۰۲۸ پیش‌بینی می‌شود که نرخ مصرف کاغذهای بازیافتی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش بیشتری یابد [٦]. 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. به‌طور کلی، تقاضای جامعه برای محصولات کاغذ و مقوا را نمی‌توان بدون استفاده از الیاف بکر و بازیافتی برآورده کرد. فرآیند بازیابی کاغذ روند رو به رشدی دارد و برخی از موارد مصرف فرآورده‌های کاغذی را می‌تواند جبران نماید. اما تقاضا برای تامین الیاف در آینده نیاز به افرایش تولید الیاف بکر دارد تا مقدار الیاف موردنیاز تامین شود [۲۲]. از طرف دیگر میزان دفن سطحی[1] ضایعات کاغذی و مقوا یکی از شاخص‌های مهم در توجه گسترده به بازیافت کاغذ در مقیاس جهانی می‌باشد. میزان دفن سطحی ضایعات کاغذ طی ده سال گذشته به‌طور قابل ملاحظه از حدود ۳۳ میلیون تن در سال ۲۰۰۸ به حدود ۲۱/۵ میلیون تن در سال ۲۰۱۹ کاهش یافته (شکل۱) و این کاهش تا حدی ناشی از افزایش نرخ بازیافت کاغذ می‌باشد [۳].

استفاده از بازیافت کاغذ در مقایسه با خمیرکاغذ بکر مزایای زیادی دارد. جایگزینی خمیرکاغذ بکر با الیاف بازیافتی موجب صرفه‌جویی در چوب مصرفی ساخت خمیرکاغذ و کاهش میزان بهره‌برداری از جنگل‌های طبیعی شده و این برای تنوع زیستی جنگل‌ها بسیار مهم می‌باشد. هر تن الیاف بازیافتی به‌طور میانگین موجب صرفه‌جویی ۱۷ اصله درخت و کاهش مصرف انرژی در بخش خمیرسازی می‌شود. همچنین برای هر تن کاغذ مورد استفاده برای بازیافت، صرفه‌جویی‌هایی شامل حداقل ۳۰۰۰۰ لیتر آب، ۳۰۰۰ تا ٤۰۰۰ کیلو وات الکتریسیته، ۹۵ درصد آلودگی هوا، کاهش انتشار مواد آلاینده به هوا و آب و صرفه‌جویی حدود ۲/۳ مترمکعب از حجم مکان‌های دفن زباله می‌شود. به‌طور کلی تولید کاغذ از خمیرکاغذ بازیافتی در مقایسه با خمیرکاغذ بکر به مصرف انرژی کمتر (۲۸ تا ۷۰ درصد) و آب کمتری نیاز دارد.



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

[1]. Landfill

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-12-22]

حداکثر انرژی مصرفی در کاغذسازی در بخش خمیرسازی و یا تبدیل چوب به کاغذ بوده و در این زمینه کاغذ بازیافتی، معمولاً رنگ‌بری مجدد نشـــده در نتیجه هزینه بخش رنگ‌بری نیز کاهش یافته و با استفاده از اکسیژن به جای کلر هم می‌توان حجم دیوکسین‌های منتشر شده به محیط زیســـت را (به‌عنوان محصـــولات جانبی فرآیند رنگ‌بری) کم کرد. همچنین کاغذهای با کیفیت نیز می‌توانند تا چندین مرتبه بازیافت شـوند و در هر مرتبه به لحاظ زیســـت‌محیطی صـــرفه‌جویی‌های زیادی خواهیم داشت [١ و ٢٢].

٣- اهمیت بازیافت کاغذ باطله در ایران

تولید سـالانه زباله‌های شـهری ایران بیش از ١٠میلیون تن اسـت. زباله‌های آلی با حجم نزدیک به ٧٠ درصـد بزرگ ترین گروه زباله‌های شهری در ایران را تشکیل می‌دهند و در رتبه‌های بعد به‌ترتیب پلاســتیک (١٠درصــد)، مقوا و کاغذ (٨ درصـد) و ترکیبات فلزی (٣ درصـد) قرار دارند. براساس آمارهای منتشر شده، نرخ کلی بازیافت در ایران در محدوده ١٥ الی ٢٦ درصد گزارش شده است و مطابق آخرین آمار گزارش شــده در ســال ١٤٠٠، میزان بازیافت سالیانه کاغذ و مقوا با توجه به مصرف سالیانه ٤٠٠ هزار تن کاغذ و مقوا در ایران به‌طور متوسط حدود ٢٥ درصد می‌باشد [١].

٤- جایگاه زیســـت‌فناوری و اســـتفاده از آنزیم‌ها در صنعت کاغذسازی

آنزیم‌ها مولکول‌های پروتئینی با ســـاختار پیچیده بوده و واکنش‌های بیوشیمیایی را تسریع می‌کنند. فعالیت آنزیم‌ها در محدوده مشـــخصـــی از pH، درجه حرارت و غلظت صورت می‌گیرد. آنزیم‌ها به طور کلی با افزودن پسوند آز به انتهای نام ماده‌ای که واکنش تجزیه آن را تســـریع می‌کنند، نامگذاری می شوند. حذف مرکب چاپ و آلاینده ها از الیاف بازیافتی همراه با حفظ ویژگی‌های مقاومتی و نوری خمیر کاغذ از اهداف اولیه در بازیافت کاغذ محســـوب می‌شـــود. در ســـال های اخیر اســـتفاده از زیســـت‌فناوری مانند به‌کارگیری آنزیم‌ها به‌عنوان یک راهکار دوســـت‌دار محیط زیســـت مطرح شـــده و قابلیت جایگزین شـــدن به جای فرآیندهای متداول ســـنتی در بازیافت کاغذهای باطله مختلف را دارا می‌باشـــد. به طور کلی مرکب‌زدایی با آنزیم‌ها تحت شرایط اسیدی یا خنثی، نیاز به مواد شـــیمیایی را کاهش داده و میزان زرد شـــدگی کاغذهای بازیافتی را در شرایط مرکب‌زدایی متداول قلیایی کاهش می‌دهد.

اســـتفاده از آنزیم‌ها می‌تواند موجب کاهش مدت زمان خمیرسازی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی شده و میزان تولید را به طور بالقوه افزایش دهد. همچنین با اســتفاده از آنزیم‌ها کاهش عمده در سطح مرکب چاپ ایجاد شده و شـــرایط قلیایی ملایم به کار گرفته شـــده با آنزیم ها تاثیر مثبت بر مشـــکلات مربوط به مواد چســـبناک در مقیاس صنعتی دارد. از دیگر اثرات مثبت مورد انتظار در تیمارهای آنزیمی می‌توان به قابلیت آنها در کاهش افزودن مواد فعال‌ســـاز غیریونی به واســـطه تخریب زیســـتی ملایم در واحد تصفیه آب کارخانه اشاره کرد [١-٤].

آنزیم‌های سلولاز و لیگنیناز به‌ترتیب موجب تجزیه سلولز و لیگنین و آنزیم‌های پکتیناز نیز واکنش تجزیه پکتین را تسریع می‌کنند [٢]. امروزه استفاده از آنزیم‌ها به‌عنوان یک روش دوست‌دار محیط زیست، اهمیت بیشتری در صنایع خمیر و کاغذ یافته و از دلایل مهم اسـتفاده آنها می‌توان به خمیرکاغذسازی زیستی، بهبود درجه روانی الیاف بازیافتی و خمیر کاغذ بکر، اصـــلاح ویژگی های الیاف و بهبود کارآیی مرکب‌زدایی اشاره داشت که مزایای زیادی را برای واحدهای صـــنعتی دارد [٥-٧]. رنگ‌بری با اثر زیســـت محیطی کم، مصرف انرژی کم و صرفه‌جویی در مصرف انرژی طی خمیر و کاغذســـازی و رنگ‌بری و همچنین تولید پســـاب کم از مزایای عمده اســـتفاده از آنزیم‌ها در صـــنعت خمیروکاغذ می‌باشـــد [١٠-١١]. به‌عنوان مثال

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-12-22]

استفاده از آنزیم‌ها پتانسیل قابل توجهی را در برطرف نمودن بسیاری از مشکلات مربوط به الیاف بازیافتی مثل قابلیت زه‌کش، استخوانی شدن[1]، 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[2] را کاهش داده و آنزیم های تجزیه کننده لیگنین[3] نیز لیگنین موجود در خمیرکاغذ را خارج می‌کنند [۸ و ۲۰].

۵- آنزیم‌های مورد استفاده در فراوری الیاف بازیافتی

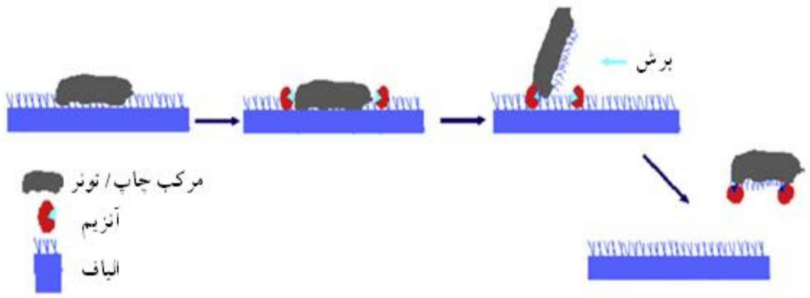
آنزیم‌های مورد استفاده در صنایع خمیر و کاغذ عمدتاً شامل سلولاز، همی‌سلولاز، پکتیناز، آمیلاز، لیپاز، استراز و لاکاز می‌باشند [۱۸-۲۰]. در بین آنزیم‌های مختلف بررسی شده، مرکب‌زدایی با ا ستفاده از آنزیم‌های هیدرولیز کننده کربوهیدرات (با فعالیت‌های مؤثر بر روی سلولز و همی سلولز) به طور گسترده در الیاف بازیافتی مختلف و در واحدهای مختلف کاغذ سازی اثبات شده ا ست. 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 کلاسه از مواد افزودنی محسوب شده که می‌توانند با هدف ا صلاح ویژگی های الیاف برای تغییر یا بهبود ویژگی های کاغذ استفاده شوند. مطابق با بررسی‌های انجام شده، الیاف تیمار شده با انواع مختلف سلولاز یا همی سلولاز بدون تاثیر بر ویژگی‌های مقاومتی کاغذ، موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی کوبیدن و پالایش خمیرکاغذ و یا کاهش زمان لازم برای رسیدن به یک سطح مشخصی از کوبیدن یا پالایش می شود [۲۱]. آنزیم سلولاز ذرات مرکب را با عمل کندن نرمه‌ها و فیبریل‌های ریز الیاف[4] سطح الیاف جدا می‌کند. براساس گزارش منتشر شده توسط ریسمیجانا[5] و همکاران (۲۰۰۳) و باجپای (۲۰۱۰) ا ستفاده از آنزیم‌های سلولاز و همی‌سلولاز منجر به جداسازی فیبریل‌های ریز[6] تحت عنوان پدیده کننده شدن الیاف شده و جدا سازی مرکب از سطح کاغذ را آسان می‌کند. تغییر آب‌گریزی[7] ذرات مرکب به دلیل جداسازی فیبریل‌های ریز، میزان جداسازی آلاینده ها (جداسازی الیاف/ مرکب) را در مرحله شناورسازی/ شستشو افزایش می‌دهد [۱۰-۱۱].

آنزیم‌های سلولاز براساس نوع عملکرد آنها به ۳ کلاسه کلی تقسیم‌بندی می‌شوند: الف) اندوگلوکاناز که موجب هیدرولیز تصادفی بخش‌های آمورف سلولز می شود. ب) سلوبیوهیدرولاز یا اگزوگلوکانازها که بر روی گروه‌های انتهایی کاهنده یا غیرکاهنده زنجیرهای سلولزی فعال هستند. ج) بتا-گلوکوسیداز که موجب هیدرولیز سلوبیوز به گلوکز می‌شود. این ۳ نوع آنزیم شامل آنزیم های 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 سلوبیوهیدرولاز موجب بهبود ویژگی های خمیرکاغذ مکانیکی- گرمایی (TMP[8]) شده اما همین آنزیم اثر تخریبی بر خمیرکاغذ شیمیایی دارد [۱ و ۱٤]. زایلاناز و مانناناز جز آنزیم‌های همی‌سلولز بوده و عملکرد آنها در سیستم متفاوت می‌باشد. زایلاناز پیوند زایلوپیرانوزی -β D 1→4 زایلان ها را هیدرولیز نموده اما مانناز پیوند مانوپیرانوزی β-D 1→4 مانان‌ها و دی‌گالاکتو دی‌مانان‌ها را هیدرولیز می‌کند [۱٤].

[1] Hornification
[2] Pitch components
[3] Lignin-degrading enzymes
[4] Peeling-off fibers
[5] Rismijana
[6] Small fibrils
[7] Hydrophobicity
[8] Thermomechanical pulp

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-12-22]



شکل۲ مکانیسم آنزیم سلولاز در مرکب‌زدایی کاغذ چاپ شده با مرکب تونر [۱].

در شکل ۲ یکی از مکانیسم‌های احتمالی آنزیم سلولاز در مرکب‌زدایی کاغذ با چاپ تونر نشـــان داده شـــده اسـت. آنزیم‌های اکســـایشـــی مانند لیگنینازها از جمله آنزیم‌های دیگر مورد ا ستفاده در صنایع کاغذ سازی به‌ویژه فراوری کاغذ بازیافتی هســـتند. لیگنینازها آنزیم‌هایی هســـتند که جداسازی لیگنین سطحی را کاتالیز می‌کنند لذا این آنزیم‌ها برای مرکب‌زدایی کاغذ روزنامه باطله (ONP[1]) مناســـب می‌باشند. لیگنینازها عمدتاً شامل آنزیم‌های اکسایشی[2] بوده و شـــامل الف- منگنز پروکســـیداز[3] (MnP) ب- لیگنین پروکسـیداز[4] (LiP) و ج- لاکاز می‌باشـند [۱]. اسـتفاده از MnP در حضـــور پروکســـید هیدروژن Mn^{+2} را به Mn^{+3} اکسید کرده و این ترکیب می‌تواند واحدهای فنولی لیگنین را اکسـید کند. همچنین یک سـیسـتم متشـکل از MnP ، Mn^{+2} ، پروکســـید هیدروژن و لیپیدهای اشـــباع نشـــده، واحدهای غیر فنولی لیگنین را اکسـید می‌کند. این ترکیب قادر به تجزیه خود لیگنین نیز می‌با شد [۱۲-۱۳]. همچنین اسـتفاده از LiP در حضـور پراکسـید هیدروژن، واحدهای فنولی و غیرفنولی لیگنین را اکســـید می‌کند. همچنین این ترکیب می‌تواند پلیمر لیگنین را نیز اکسـید کند. امروزه در بین آنزیم‌های مختلف تجزیه کننده لیگنین، دو آنزیم لاکاز و MnP موارد اســـتفاده و کاربرد بیشـــتری دارند. در این رابطه آنزیم لیگنین پروکســـیداز که تحقیقات کمی بر روی آن انجام شده ا ست، دورنمای کمی را ن شان داده ا ست و این نشـانگر آن اسـت که باید در اسـتفاده و کاربرد عملی این آنزیم دقت و توجه بیشتری شود [۱].

۶- مزایای استفاده از آنزیم‌ها در فراوری الیاف بازیافتی

همان‌طور که از پیش ا شاره شد، ا ستفاده از الیاف بازیافتی طی چند دهه اخیر به طور گسـترده افزایش یافته و در این رابطه فرآیند مرکب‌زدایی مرحله مهمی در بازیابی الیاف محسوب می‌شود [۱و ۵]. در مرکب‌زدایی متداول شیمیایی (صـنعتی) از مواد شـیمیایی زیادی (شـامل هیدروکسـید سـدیم، پراکســید هیدروژن، مواد کی‌لیت کننده، مواد فعال‌ساز سطحی و سیلیکات سدیم) مصرف می‌شود و لذا نیازمند سیستم‌های با تیمار پساب پرهزینه می‌با شد [۱۷-۱۸]. در ســـال‌های اخیر مرکب‌زدایی آنزیمی به‌عنوان یکی از روش‌هـای بهبود ویژگی‌هـای کیفی خمیرکـاغـذهـای بازیافتی و به دلیل کارآیی زیاد و اثر زیســـت محیطی کم، توجه زیادی را به خود جلب نموده اســـت [۱۹]. اعمال تیمارهای آنزیمی می‌توانند با حذف نرمه‌های الیاف و همچنین بهبود فیبریله شدن الیاف خمیرکاغذهای بازیافتی، موجب بهبود قابلیت آب‌گیری خمیرکاغذ، افزایش سرعت تولید ماشـــین کاغذ و بهبود ویژگی‌های مقاومتی کاغذ

[1] Old newspaper
[2] Oxidative enzymes
[3] Manganese peroxidase
[4] Lignin peroxidase

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-12-22]

حاصـــل شـــود [۱۱]. صـــنعت بازیافت کاغذ، اســـتفاده از آنزیم‌ها را برای اصـــلاح یا بازســـازی[1] ویژگی‌های الیاف به‌عنوان یک روش مؤثر مطرح کرده اســـت. در فرآیند مرکب‌زدایی سنتی[2]، مقادیر زیادی از مواد شیمیایی مصرف شـــده که موجب می‌شـــود این روش پرهزینه، به لحاظ زیست محیطی مخرب و خروج زیاد مواد آلاینده را در بر داشته باشد [۵]. در این زمینه آنزیم‌ها می‌توانند نیاز به مواد شـــیمیایی را کاهش و هزینه‌های فرآیندی و اثر زیســـت محیطی را کم کنند. الیاف بازیافتی می‌توانند از طریق تیمار با سلولاز بهینه‌سازی شوند. در حقیقت آنزیم‌ها ویژگی‌های بین سطحی[3] الیاف را اصلاح و آب دوستی[4] آنها را افزایش داده در نتیجه ویژگی‌های خمیرکاغذ مانند قابلیت زه‌کش و مقاومت خمیرکاغذ را می‌توانند تغییر دهند [۱۹و۲۱]. همچنین نتایج اســـتفاه از تیمار آنزیمی بر قابلیت گذر ماشین کاغذ، میزان آب‌گیری خمیرکاغذ برای تولید لاینر با وزن پایه ۲۰۰ گرم بر ســـانتی‌متر مربع در کارخانه‌ای در آمریکای شـــمالی نشـــان داد که به واســـطه افزایش قابلیت آب‌گیری، قابلیت گذر یا حرکت‌پذیری ماشـــین کاغذ افزایش یافته و کاهش ٦ الی ۷ درصد در مصرف بخار در بخش خشـــک کن مشـــاهده شـــد [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، ســـرعت ماشـــین کاغذ از ۱٦۵۰ متر بر دقیقه به ۱۷۵۰ متر بر دقیقه برای دســـتمال کاغذی و برای حوله نیز از۱٦۰۰ متر بر دقیقه به ۱۷۵۰ متر بر دقیقه افزایش یافت. همچنین، انرژی ویژه پالایش حدود ۱۲/۵ درصـــد کاهش یافته که احتمالاً به دلیل حضـــور فعالیت برخی از آنزیم های سلوبیوهیدرولاز (CBH) در محصول آنزیمی است که به پالایش خمیرکاغذ کمک می‌کند [۱۰-۱۱].

در سال‌های اخیر استفاده از آنزیم لاکاز برای مرکب‌زدایی الیاف بازیافتی به‌طور مجزا و یا در ترکیب با ســـلولاز و یا همی سلولاز بسیار مورد توجه قرار گرفته است. لاکاز در حضور عوامل واسطه تحت عنوان سیستم لاکاز- عامل واسـطه (LMS[5]) در ۲۰ سـال اخیر معرفی شـده و به‌طور گســـترده در لیگنین‌زدایی و رنـگ‌بری انوع مختلف خمیرکاغذ اســتفاده شــده اســت [۱ و ۱۲]. با جداســازی لیگنین توســط لاکاز، اتصــالات بین الیاف و ذرات مرکب شُـل شـده و جداسـازی مرکب آسـان می‌شـود [۱۰-۱۱]. اخیراً تغییر شکل موفق رنگ‌های سخت[6] با سیستم LMS به‌عنوان روش جدید برای بی‌رنگ کردن مســـتقیم[7] ذرات مرکب معرفی شــده اســت [۹ و ۱۳]. بعضــی از تحقیقات پتانسیل سیستم های LMS را برای رنگ‌بری انواع مختلف خمیرکاغذهای چوبی و غیرچوبی تأیید کرده‌اند. اما در حال حاضـــر هزینه زیاد این فرآورده‌های ســـنتزی، اجرای صـــنعتی و توجه به زمینه اســـتفاده از مواد واســـطه طبیعی حاصـــل از گیاهان و یا فرآورده‌های جنبی صـــنعتی را به تأخیر انداخته است [۸-۹].

لاکاز به‌عنوان آنزیم اکسایشی می‌تواند لیگنین سطحی را در حضور مواد واسطه با جرم مولکولی کم[8] و یا اکسیژن با اکسایش بخش‌های لیگنین، شکست اکسایش زنجیرهای جانبی[9] و اکســـایش انتخابی گروه‌های فنوکســـی لیگنین خارج کند [۱۱]. لاکاز اغلب با مواد واســـطه اکســـید کننده استفاده می‌شود [۱٦-۱۷]. اولین ماده واسطه سنتزی[10] که قادر به اکســـایش لیگنین غیرفنولی و با قابلیت اکســـایش- کاهش زیاد اســـت ترکیبات ۲-۲ آزینوبیس[11] (۳-اتیل بنزن

[1] Restore
[2] Traditional deinking process
[3] Interfacial properties
[4] Water affinity
[5] Laccase mediator system (LMS)
[6] Hard dyes
[7] Direct discoloration
[8] Low molecular mass mediators
[9] Oxidative cleavage of side chains
[10] Synthetic mediator
[11] 2,2′-Azino-bis

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-12-22]

تیازولین–٦ سولفونیک اسید[1] می باشد. مواد واسطه سنتزی لاکاز که به‌طور عمده برای کاربردهای مربوط به صــنایع فرآورده‌های جنگلی استفاده می شوند، شامل ترکیبات ۳– OH–N ؛ HBT، ویلوریک اسید[2] (VA)، و N– هیدروکسی استانیلید[3] است. یکی از اولین عوامل واسطه کشف شده ترکیب ســیرینجالدهید[4] می باشــد. اخیراً ترکیبات N– هیدروکســی مانند ۱– هیدروکســی بنزوتریازول (HBT[5]) به‌عنوان مهمترین مواد واسطه لاکاز به‌طور گسترده استفاده می‌شــوند. مواد واســطه طبیعی بالقوه مقرون به صــرفه که مشتق شده از لیگنین[6] (p–کوماریک اسید[7]، سیرینجالدهید و اســتوســیرینجون[8]) می‌توانند از لیکور مصــرفی واحد خمیرسـازی و مواد گیاهی به‌دسـت آیند و به‌عنوان عوامل واسطه لاکاز مورد استفاده قرار گیرند [۱۳]. انوع مختلفی از ترکیبات پلی اکسومتالات[9] (خوشه‌های انتقال فلزی یون آنیون اکسیژن[10]) و دیگر کمپلکس‌های فلزی تبادل کننده[11] صــرفنظر از ترکیبات آلی به‌عنوان مواد واســطه لاکاز مورد بررسی قرار گرفته و اثرات خوبی را نشان دادند [۱ و ۱۳]. نتایج حاصــل از تأثیر آنزیم‌های اکســید کننده لیگنین در پخت‌های کرافت و ســولفیت و همچنین خارج‌ســازی لیگنین نهایی آنها در فرآیند رنگ‌بری با کلر نشان داد که از این آنزیم‌ها می‌توان در رنگ‌بری خمیرکاغذهای شــیمیایی اســتفاده کرد. همچنین نتایج نشــان داد که از قارچ‌های پوسیدگی سفید می‌توان برای تمیزسازی پساب مربوط به واحدهای رنگ‌بری کلر اسـتفاده کرد [۱۷]. آنزیم لاکاز در حضــور مواد واســطه شــیمیایی و یا اکســیژن می‌تواند خمیرکاغذ را لیگنین‌زدایی کند [۱۸]. لاکاز یک اکســیداز چند مسی[12] است که به وسیله میکروارگانیسم‌ها و گیاهان ســاخته می‌شــود. این آنزیم اکســایش ترکیبات فنولی را تسریع بخشیده و به دلیل قابلیت اکسایش– کاهش کم و جرم مولکولی زیاد می‌توانند واحدهای فنولی لیگنین را اکسید کند اما توانایی آن در اکسایش بعضی ترکیب‌های با جرم مولکولی کم، کـاربرد آن را در ترکیبـات غیرفنولی لیگنین نیز قادر ســاخته اســت. آنزیم لاکاز همراه با ســایر آنزیم‌های اکســایشــی (آنزیم‌های قارچی تخریب کننده لیگنین) مثل LiP ، MnP و پروکســیدازهای مختلف، بر روی مواد زمینه فنولی عمل کرده و با کاتالیز کردن اکســایش گروه‌های هیدروکســیل فنولی، آنها را به رادیکال‌های فنوکسی تبدیل کرده و دی اکسـیژن[13] هم به آب احیا می شود. تبدیلات غیرآنزیمی بیشتر رادیکال‌های فنوکســی می‌توانند منجر به تخریب لیگنین شــود و رادیکال‌های حاصـل می‌توانند با سـایر رادیکال‌ها جفت و آنها را اکسید کند [۱۲ و ۱۷].

نتایج مطالعات انجام شــده در مورد تاثیر تیمار آنزیمی با استراز بر مواد چسبناک ضایعات مخلوط کاغذ باطله اداری (MOW) در مقیاس صنعتی نشان می دهد که مقدار مواد چســبناک به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافتند [۲۳]. افزایش مقدار الیاف بازیافتی به بیش از ۵۰ درصــد در ترکیب نهایی خمیر کاغذ بدون اعمال تیمار آنزیمی MOW، امکان‌پذیر نبوده به‌طوری که کل مواد چســبناک بیش از ۲۵۰ ppm مشـاهده شـد. اما با انجام تیمار آنزیمی الیاف بازیافتیMOW، مقدار کل مواد چسبناک می‌تواند به حدود ۱۰۰ppmکاهش یابد و اســتفاده از مقادیر بیشــتر الیاف بازیافتیMOW (٦۰ در صد) امکان‌پذیر شده است [۱]. همچنین در تحقیق دیگر الیاف بازیافتیMOW با اســتفاده از آنزیم در مقیاس صــنعتی تیمار شــد تا میزان مصــرف خمیرکاغذ بکر با درجه روشــنی زیاد را در

[1] 3-ethylbenzenthiazoline -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
[8] Acetosyringon
[9] Acetosyringon
[10] Transition metal oxygen-anion clusters
[11] Transition metal complexes
[12] Multi-copper oxidase
[13] Dioxygen

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-12-22]

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 وازده‌ها 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[1]) توسط آنزیم‌های هیدرولیز کننده کربوهیدرات[2] شامل آنزیم‌های سلولاز (با فعالیت‌های اندوگلوکاناز و اگزوکلوکاناز) و همی‌سلولاز در مقایسه با آنزیم لاکاز بیانگر آن بوده که آنزیم‌های ذکر شده می‌توانند به‌طور مؤثر موجب مرکب‌زدایی این نوع خمیرکاغذها 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[3] گزارش کرد ند. اگر چه مرکب‌زدایی با سلولاز و همی‌سلولاز در حال حاضر در واحدهای صنعتی استفاده می‌شود اما ویژگی‌های خمیرکاغذ به ویژه ویژگی‌های فیزیکی به خوبی خمیرکاغذ مرکب‌زدایی شده با مواد شیمیایی[4] نیستند، لذا مطلوب 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 خمیرکاغذ 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 جنبه های 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 خمیرکاغذ مرکب‌زدایی شده، دما، pH تیمار آنزیمی و ... بسیار مهم بوده تا هر آنزیم مشخص بتواند حداکثر کارآیی را در فرآیند داشته باشد. آنزیم‌ها طی فرآیند مرکب‌زدایی هم به مرکب و هم به الیاف حمله می‌کنند. مرکب‌های بر پایه روغن گیاهی می توانند 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 تجزیه کننده لیگنین تغییر یابند. در نتیجه ذرات مرکب آسان‌تر در

[1] Printed cardboard
[2] Carbohydrate hydrolase
[3] Eco-friendly deinking process
[4] Chemically deinked pulp

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-12-22]

فرآیندهای شستشو یا شناورسازی خارج می‌شوند. اگرچه مرکب‌زدایی با سلولاز و همی سلولاز صنعتی شده است، اما باید در جستجوی آنزیم‌های مؤثرتر و یا ترکیب‌های مختلف آنزیمی برای مرکب‌زدایی باشیم. امروزه استفاده از آنزیم‌های سلولزی و اکسایشی (مانند لاکاز) نتایج قابل قبولی را برای مرکب‌زدایی انواع مختلف کاغذهای باطله نشان داده‌اند به‌طوری که اغلب آزمایش‌های انجام شده در واحدهای نیمه صنعتی و همچنین صنعتی اثبات کردند که مرکب‌زدایی با سلولاز و لاکاز می‌تواند موجب کاهش هزینه مواد شیمیایی، افزایش میزان جداسازی ذرات مرکب و مواد چسبناک، بهبود درجه روانی (در نتیجه بهبود حرکت‌پذیری ماشین کاغذ) و کاهش COD و BOD پساب شود. همچنین با ترکیبی از آنزیم‌های 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 می‌باشد. با استفاده از آنزیم‌ها می‌توان مشکلات مواد چسبناک مربوط به الیاف بازیافتی را کنترل کرد و نتایج مطالعات انجام گرفته به کمک آنزیم‌های استراز نیز بیانگر آن است که مقدار مواد چسبناک موجود در ضایعات کاغذ به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و همین مسئله امکان استفاده از مقادیر بیشتر الیاف بازیافتی در سیستم تولید را برای تولید کاغذ فراهم می‌کند. از طرف دیگر استفاده از آنزیم‌های 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 آنزیم‌های تجاری می‌تواند ضمن انجام واکنش مکرر و بهبود کارآیی آنها در زمان طولانی‌تر منجر به بهبود پایداری آنزیم و کاهش هزینه کلی شود. بهینه سازی کارآیی آنزیم از طریق ثبات و پایداری بیشتر، استفاده بیشتر آن در محدوده pH و درجه حرارت‌های بیشتر (جلوگیری از تغییر ماهیت آنزیم در شرایط ذخیره‌سازی و عملیاتی)، امکان بازیابی مؤثر، کاهش آلودگی پروتئینی محصول و افزایش میزان تحمل آن در مقابل حلال های آلی مختلف می‌تواند با فرآیند تثبیت آنزیم میسر و فراهم شود. همچنین استفاده از آنزیم‌های سختی‌دوست (اکستریموفیل) که از جانداران سختی‌دوست (اغلب باکتری‌هایی که قادر به رشد در شرایط بسیار سخت هستند و این شرایط برای انسان حاد و غیرقابل تحمل است) استخراج می‌شوند می‌تواند راه‌کار دیگر برای کاهش نوسانات شرایط تیمار آنزیمی در محیط صنعتی باشد. از آنجایی‌که فرآیندهای صنعتی همواره تحت شرایط ویژه و سختی انجام می‌شوند، یافتن آنزیم های با توانایی فعالیت در این شرایط بسیار حائز اهمیت است. در این زمینه استفاده از باکتری‌های نمک دوست می‌تواند منبع مناسبی از این آنزیم‌ها محسوب شود زیرا آنزیم‌های تولید شده توسط این میکروارگانیسم‌ها می توانند فعالیت خود را در مقادیر مختلف درجه حرارت، غلظت نمک و pH حفظ کنند.

۸- منابع

[۱] اکبرپور، ا. ۱۳۹٤. بهبود ویژگی‌های کیفی مخلوط خمیر کاغذهای روزنامه و مجله بازیافتی با تیمارهای شیمیایی، آنزیمی و فراصوتی. رساله دکتری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۲۸۳ص.

[۲] اکبرپور، ا.، و رسالتی، ح. ۱۳۹۰. تاثیر غلظت‌های مختلف آنزیم سلولاز بر ویژگی‌های نوری و فیزیکی خمیرکاغذ روزنامه مرکب‌زدایی 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.

[٤] قاسمیان، ع. و اکبرپور، ا. ۱۳۹۰. استراتژی بازیافت کاغذ و جایگاه آن در تامین مواد لیگنوسلولزی مورد نیاز صنایع خمیروکاغذ کشور. همایش نقشه راه تأمین مواد

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-12-22]

اولیه و توسعه صنایع چوب و کاغذ کشور در افق ۱۴۰۴، ص۴.

[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.

[15] Covarrubias, R. M., and Eng, G. H. 2006. Optimyze: 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.

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-12-22]

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.

[Downloaded from biot.modares.ac.ir on 2024-12-22]