کنترل آنزیمی مواد چسبناک در بازیافت کاغذ

رحیم ابراهیمی بریسا[۱]، حسین رسالتی[۲*]، محمدهادی آریایی منفرد[۱]، علی قاسمیان[۱]، علیرضا شاکری[۳]

۱- گرگان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ

۲- ساری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ

۳- تهران، دانشگاه تهران، دانشکده شیمی

پیام نگار: **hnresalati@yahoo.com**

چکیده

مواد چسبناک یکی از مهمترین مشکلات بازیافت کاغذ و کارتن می‌باشند. این مواد در هنگام تبدیل کاغذهای بازیافتی به خمیرکاغذ، روی قسمت‌های مختلف ماشین کاغذ، خشک‌کن‌ها و سیلندرها رسوب کرده و باعث کاهش کیفیت محصول و پارگی کاغذ خواهد شد. اخیرا فناوری مبتنی بر آنزیم برای کنترل مواد چسبناک در بازیافت کاغذ مورد استفاده قرار گرفته که از کارایی بسیار بالایی برخوردار است. چسب حساس به فشار (PSA) یکی از از انواع مواد چسبناک موجود در بازیافت کاغذ می‌باشد. در این مطالعه به بررسی تاثیر آنزیم در کنترل مواد چسبناک و چسب حساس به فشار (PSA) در بازیافت کارتن‌های بسته‌بندی پرداخته است. آنزیم‌هایی که در این تحقیق برای کنترل مواد چسبناک مورد مطالعه قرار گرفته‌اند شامل استراز و لیپاز می‌باشند. ساختار مواد چسبناک و چسب حساس به فشار حاوی تعداد زیادی پیوند استری می‌باشند. آنزیم‌های استراز و لیپاز توانایی شکستن پیوندهای استری را دارند. استراز و لیپاز مواد چسبناک را به ذرات ریزتر تبدیل کرده و به حذف بهتر و کامل‌تر آن‌ها کمک می‌کنند. این آنزیم‌ها باعث تغییر در خواص چسبندگی سطح مواد چسبناک می‌شوند و از قدرت چسبندگی این مواد می‌کاهند. با استفاده از کنترل آنزیمی می‌توان حدود ۷۰ الی ۹۰ درصد از مواد چسبناک را حذف کرد. خواص نوری و مقاومتی کاغذها با کنترل آنزیمی مواد چسبناک و چسب حساس به فشار در بازیافت کاغذ بهبود پیدا خواهد کرد.

کلمات کلیدی: مواد چسبناک، چسب حساس به فشار (PSA)، آنزیم، استراز، لیپاز، کارتن‌های بسته‌بندی، کنترل آنزیمی

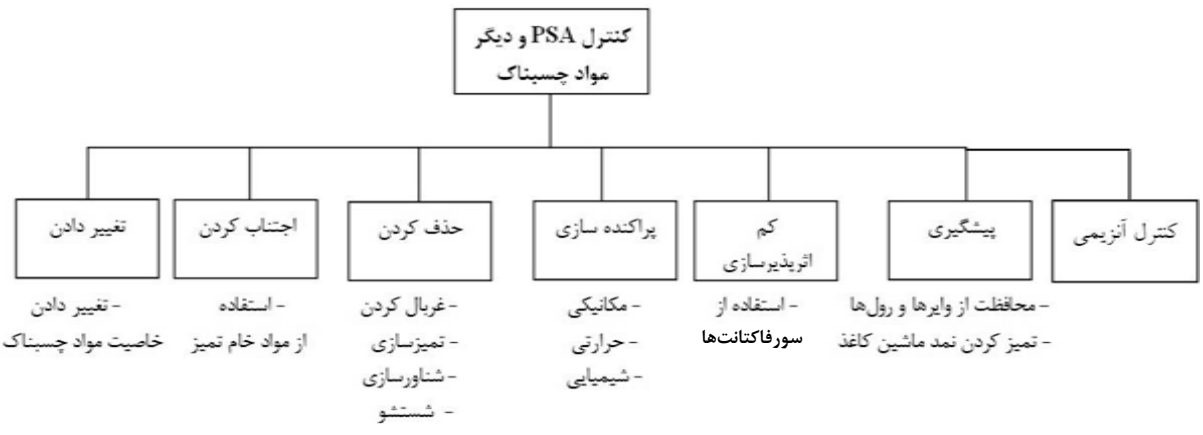
۱- مقدمه

اهمیت کاغذ و فرآورده‌های کاغذی در زندگی نوین بر همگان آشکار است، به طوری که هیچ فرآورده صنعتی دیگر همانند کاغذ چنین نقش برجسته‌ای را در زندگی انسان ندارد. کاغذ وسیله خوبی برای ثبت و ذخیره‌سازی اطلاعات است و عملاً همه مطالب روی آن نوشته شده و چاپ می‌شود. کاغذ یک کالای استراتژیک بوده و نقش حیاتی در توسعه فرهنگی جامعه دارد، به طوری که در فرایند ارتباطات هنوز نقش کلیدی را ایفا کرده و در آینده نیز از جایگاه مهمی برخوردار خواهد بود. فراورده‌های کاغذی به‌صورت‌های مختلفی ساخته می‌شوند و این تنوع ساخت، امکان رقابت‌پذیری کاغذ را در مقایسه با سایر فراورده‌های مشابه حفظ نموده و از این طریق‌می‌تواند در رابطه با کاربرد وسیع خود پاسخ مناسبی دهد [۱].

مصرف روز افزون کاغذ در صنایع چاپ و بسته‌بندی از یک سو و محدودیت مواد اولیه چوبی در این صنایع از سوی دیگر باعث شده است که این صنایع به بازیافت کاغذهای مصرف شده روی بیاورند. یکی از انواع کاغذهای تولیدی، کاغذهای بسته‌بندی می‌باشند که تداوم تولید و مصرف آن وابسته به بازیافت می‌باشد. از مهمترین محصولات کاغذهای بسته‌بندی می‌توان به کارتن‌های کنگره‌ای کهنه (OCC)[1] اشاره نمود که تقریبا نیمی از مواد لیفی صنایع بازیافت کاغذ و مقوای جهان رابه خود اختصاص می‌دهند و برای ساخت محصولات بسته‌بندی مختلف از قبیل تست لاینر، لایه میانی‌کنگره‌ای و کاغذهای‌بسته‌بندی مثل ساک‌کاغذی و امثال آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تعدادی از کارخانجات حدود ۱۰۰ درصد ماده لیفی خام آن‌ها خمیر بازیافتی OCC می باشد [۲].

استفاده از الیاف بازیافتی و دست دوم در تمام دنیا افزایش یافته است. در سال ۲۰۰۶ حدود ۴۰ درصد کل کاغذ تولیدی در جهان از الیاف دست دوم ساخته شده است [۳]. جایگزینی الیاف بازیافتی با خمیر دست اول، برای ساخت کاغذ باعث کاهش بهره‌برداری از جنگل‌ها و صرفه جویی در مصرف چوب خواهد شد. هر تن الیاف بازیافتی باعث صرفه‌جویی در مصرف ۱۷ اصله درخت خواهد شد. همچنین استفاده از خمیر بازیافتی برای تولید کاغذ باعث کاهش محدودیت مواد اولیه شده است [۲]. استفاده از الیاف بازیافتی OCC با کیفیت پایین هر ساله برای مصرف کاغذهای بسته‌بندی افزایش می‌یابد و کارخانه‌ها تلاش می‌کنند که در مورد هزینه ماده خام لیفی برای خمیرسازی صرفه‌جویی کنند. الیاف بازیافتی دارای مشکل مواد چسبناک[2] هستند که ناگزیر باید راه‌حلی برای این مشکل پیدا کرد. در کاغذ بازیافتی انواع مواد چسبناک یافت می‌شوند. مواد چسبناک در سیستم بازیافت کارتن‌های گنکره‌ای کهنه شامل: چسب حساس به فشار (PSA)[3] آبگریزها، لاستیک، پلی‌ایزوپرن‌ها، پلی‌بوتادین‌ها، انواع چسب‌ها و مواد معدنی اولیه نرم شده می‌باشند [۶-۵-۴]. این مواد بسته به نوع ترکیبی که دارند دارای طیف گسترده‌ای از نقطه ذوب و درجات مختلف چسبندگی هستند و همانطور که از نامشان پیداست چسبنده می‌باشند. مواد چسبناک موجود در کاغذهای بازیافتی روی لوله‌کشی‌ها، وایرها، نمدها، سیلندرها، خشک‌کن‌ها و قسمت‌های دیگر ماشین کاغذ رسوب می‌کنند که هزینه‌های اضافی را به همراه خواهند داشت.

از مهمترین مشکلاتی که در صنعت بازیافت کارتن‌های بسته بندی وجود دارد رسوب چسب حساس به فشار و دیگر مواد چسبناک موجود در الیاف بازیافتی بر روی قسمت‌های مختلف ماشین کاغذ است که منجر به کاهش خواص نوری و مقاومتی کاغذ خواهد شد. برای جلوگیری از این مشکلات روش‌های فراوانی ارائه شده است (شکل (۱)). مؤثرترین روش کنترل مواد چسبناک و چسب حساس به فشار در بازیافت کارتن استفاده از آنزیم‌ها می‌باشد [۲].



شکل ۱- روش‌های ممکن جهت کنترل چسب حساس به فشار و دیگر مواد چسبناک

1. Old Corrugated Container
2. Stickies
3. Pressure-Sensitive Adhesive

اخیراً فناوری مبتنی بر آنزیم، برای کنترل چسب‌های حساس به فشار در بازیافت کاغذهای بسته‌بندی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش بسیار مؤثرتر از روش‌های قدیمی می‌باشد. آنزیم‌ها به طور بسیار خاص عمل می‌کنند. آنزیم‌هایی که برای کنترل چسب حساس به فشار در بازیافت کاغذ به کار می‌روند باید قادر به شکستن پیوندهای استری باشند زیرا ترکیب بسپار پایه چسب حساس به فشار مبتنی بر پلیمرهای اکریلیک است. این پلیمرها حاوی شاخه‌های جانبی فراوانی هستند که با پیوند استری با همدیگر در ارتباط هستند. در اثر شکستن پیوند استری به وسیله آنزیم، چسب‌ها به ذرات ریزتر تبدیل می‌شوند و در نهایت به حذف آسانتر و کامل‌تر آن‌ها منجر می‌شود [۸-۷].بررسی مطالعات گوناگون نشان می‌دهد که استفاده از آنزیم برای حذف چسب حساس به فشار و دیگر مواد چسبناک از اهمیت و کارایی بالایی برخوردار است. اسکس[1] و کلانگنس[2] (۱۹۹۷) تاثیر تیمار آنزیم‌های سلولاز[3]، لیپاز[4] و ترکیبی از هر دو آنزیم را همراه با تاثیر pH بر روی کنترل چسب حساس به فشار در کاغذ باطله اداری مورد بررسی قرار دادند. میزان مصرف سلولاز ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ درصد، و برای لیپاز مقدار آن از ۰/۰۲۵ تا ۰/۵ درصد که کمی بیشتر از سلولاز بود، در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داده است که تیمار با آنزیم‌های سلولاز، لیپاز و ترکیبی از هر دو آنزیم توانسته است مقدار ذرات چسب را از ۹۰۰ppm به ترتیب به ۷۰ ppm، ۵۰ ppm و ۵۲ ppm کاهش دهد [۹]. فیتزهنری[5] و همکاران (۲۰۰۰) تاثیر تیمار آنزیمی استراز برای حذف مواد چسبناک را در کارخانه‌ای که از خمیر بازیافتی OCC به عنوان ماده خام اولیه برای تولید کاغذ بسته بندی استفاده می کرد بررسی کردند. کارخانه مذکور قبل از استفاده از استراز برای کنترل مواد چسبناک، از موادپراکنده‌کننده سنتی همراه با یک ترکیب بسپار کاتیونی استفاده می‌کرد که در نهایت باعث حذف فقط ۱۰ درصد از کل مواد چسبناک می‌شد. پراکنده‌سازهای آلی با استراز جایگزین شدند و بهبود بلافاصله مشاهده شد. با استفاده از کنترل آنزیمی مقدار کل مواد چسبناک در خمیر به ۵۰ درصد کاهش یافت [۱۰]. پاتریک[6] (۲۰۰۴) تاثیر تیمار مخلوط آنزیم های استراز[7] را بر روی مواد چسبناک در کارخانه تولید مقوای روکش شده، که ۱۰۰ درصد ماده اولیه لیفی آن OCC بازیافتی بود مورد بررسی قرار داد. بر اثر تیمار آنزیمی رسوب ماشین کاغذ به ۷۵ درصد کاهش یافت. پارگی و توقف ماشین کاغذ نیز مطابق با آن کاهش یافت. همچنین استفاده از مواد شیمیایی برای تمیز کردن کارخانه عملا حذف شد. در این کارخانه با استفاده از تیمار آنزیمی نارضایتی‌های مشتری مبنی بر کیفیت پایین محصول کاهش یافت. این کارخانه تولید مقوای روکش، به واسطه استفاده از تیمار آنزیمی برای کنترل مواد چسبناک، سالانه ۱/۳۳ میلیون دلار صرفه جویی داشته است [۲]. از جمع بندی تحقیقات صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که کنترل چسب حساس به فشار به وسیله آنزیم‌های استراز و لیپاز باعث کاهش مشکلاتی می‌شود که منشا آن‌ها از مواد چسبناک سرچشمه می‌گیرد. در این مطالعه کنترل آنزیمی چسب حساس به فشار (PSA) با استفاده از آنزیم‌های استراز و لیپاز در بازیافت کارتن‌های بسته‌بندی مورد مطالعه قرار گرفته شده است.

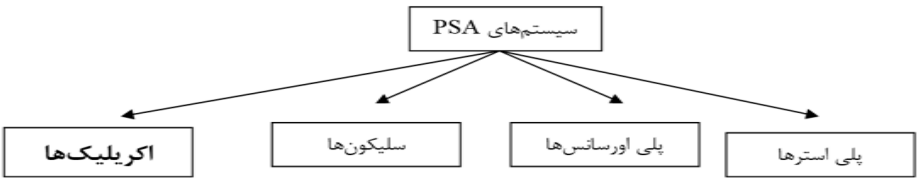
۲- چسب حساس به فشار (PSA)

چسب‌های حساس به فشار منحصر به فرد هستند زیرا در طی فرایند چسبیدن، هیچ تغییری در شکل فیزیکی و واکنش شیمیایی آن‌ها رخ نمی‌دهد. خواص آن‌ها به طور کامل با پلیمر پایه و سایر اجزایی که برای ساخت آن‌ها انتخاب شده است کنترل می‌شود.

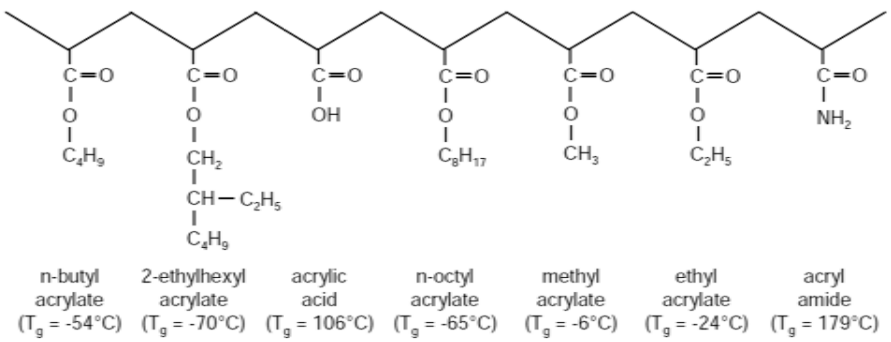
ترکیب بسپار پایه چسب حساس به فشار شامل اکریلیک‌ها، سیلیکون‌ها، پلی اسانس‌ها و پلی‌استرها می‌باشد (شکل (۲)) [۷]. در این تحقیق بیشتر بر روی چسب‌های حساس به فشار بر پایه اکریلیک بحث می‌کنیم چون چسبی که در خمیر بازیافتی OCC یافت می‌شود، از این نوع می‌باشد.

ترکیب بسپار پایه چسب حساس به فشار مبتنی بر بسپارهای اکریلیک حاوی شاخه‌های جانبی فراوانی است، که با پیوند استری با همدیگر در ارتباط هستند (شکل (۳)).

1. Skes
2. Klungness
3. Cellulase
4. Lipase
5. Fitzhenry
6. Patrick
7. Esterase



شکل ۲- انواع بسپارهای پایه برای چسب حساس به فشار



شکل ۳- نقشه و طرح ترکیب زنجیره چسب‌های حساس به فشار بر پایه بسپارهای اکریلیک [۷]

۳- مشکلات ناشی از چسب حساس به فشار در بازیافت کاغذ OCC

چسب حساس به فشار می‌تواند در عملکرد ماشین کاغذ و کیفیت محصول مشکلات زیادی را به وجود آورد [۱۲و۱۱ و ۶-۴]. این چسب بر روی سیلندرها، نمد، پرس‌ها، رول‌ها، خشک‌کن‌ها و قسمت‌های دیگر رسوب می‌کند. چسب حساس به فشار از ایجاد پیوند خوب الیاف به یکدیگر جلوگیری می‌کند و خطر پارگی در ماشین کاغذ را مخصوصا در کاغذ روزنامه و انواع دستمال کاغذی‌ها افزایش می‌دهد.

زمانی که وزن پایه کاغذ کاهش و سرعت ماشین کاغذ افزایش یابد، تنش فشاری دینامیکی بیشتری بر شبکه کاغذ وارد می‌شود که در این مرحله مشکلات ناشی از چسب حساس به فشار و دیگر مواد چسبناک جدی‌تر می‌شوند [۱۱]. مشکلات دیگری که مواد چسبناک می‌توانند در پروسه تولید ایجاد کنند شامل: توقف ماشین کاغذ، کاهش کیفیت محصول، افزایش پارگی کاغذ، کاهش بازدهی و تولید، خرابی دستگاه‌ها و... می‌باشند [۸]. برای رفع این مشکل در سال‌های اخیر راه حل‌های زیادی از جمله غربال کردن، تمیزسازی، شناورسازی، شستشو و پراکنده‌سازی به کار گرفته شده است. اما هیچ یک از این روش‌ها نمی‌توانند به طور کامل مشکلات ایجاد شده توسط مواد چسبناک را در بازیافت کارتن‌های بسته بندی حل کنند. حتی مشکلات ناشی از مواد چسبناک که پس از عملیات تکمیلی کاغذ یا مقوا رخ می‌هند، می‌توانند پرهزینه باشند. مواد چسبناکی که در درون مقوا یا کاغذهای ضخیم‌تر چسبیده‌اند ممکن است به جهت برخی تیمارهای حرارت و فشار ذوب شوند و به سطوح خارجی کاغذ یا مقوا برسند. این امر پس از چاپ، وارنیش زدن یا لامینه نمودن می‌تواند باعث ظاهر نامطلوب کاغذ گردد. بعضی اوقات هم، لایه‌ها در حین باز کردن رول‌های کاغذ به هم چسبیده‌اند که منجر به پارگی یا ایجاد لکه‌های سطحی می‌شوند.

مسئله ویژه‌ای نیز در تولید مقواهای کنگره‌ای بوسیله موم (واکس) موجود در کاغذهای بازیابی شده ایجاد می‌شود. اگر این ماده در حین فرآوری کاغذ بازیابی شده خارج یا خنثی نشود، می‌تواند باعث کاهش ضریب اصطکاک لاینر تولید شده گردد. در نتیجه حلقه‌ها یا رول‌های کاغذ ممکن است در حین انتقال تلسکوپی شوند. ورقه‌های مقوای کنگره‌ای کامل نیز ممکن است بر روی هم بلغزند. این امر می‌تواند منجر به قرارگیری نامناسب شده و بر فرایندهای بعدی تاثیر بگذارد [۱۳].

۴- آنزیم‌ها

آنزیم‌ها ترکیبات پروتئینی هستند که درانجام متابولیسم مواد غذایی در اندام جانوران نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند. این ترکیبات به عنوان کاتالیزورهای زیستی ممکن است سبب تغییرات مطلوب و یا نامطلوب فیزیکی و شیمیایی در مواد غذایی شوند. به طور کلی مکانیسم اثر آنزیم‌ها از طریق کاهش انرژی لازم برای انجام بسیاری از واکنش‌های شیمیایی است. این انرژی اصطلاحاً به انرژی فعال کننده موسوم می‌باشد. ماده‌ای که مورد اثر آنزیم قرار می‌گیرد، ماده زمینه[1] نامیده می‌شود [۱۴]. آنزیم پس از ایجاد تغییرات لازم در ماده زمینه و ایجاد ماده جدید از آن جدا شده و مجدداً مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقایسه با کاتالیزورهای متداول شیمیایی، آنزیم‌ها دارای دو مزیت مهم و چشمگیری می‌باشند، ۱) سرعت عمل یک مزیت عمده آن‌ها است. ۲) مزیت دیگر آنزیم‌ها اختصاصی عمل کردن فوق العاده زیاد اکثرآن‌ها می‌باشد. از نقطه نظر ایزومری نیز آنزیم‌ها در موارد بسیار، اختصاصی عمل می کنند. مثل آنزیم لاکتیک اسید دهیدروژناز که فقط روی شکل L – اسید لاکتیک اثر می‌کند و آن را به اسید پیرووِیک تبدیل می‌نماید. به طور کلی اختصاصی عمل کردن آنزیم ها معیار بسیار خوبی برای شناسایی برخی مواد محسوب می‌شود و به طور مشخص در بررسی‌های علمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان یک مزیت جانبی همچنین باید توجه شود که آنزیم‌ها اساساً در حرارت‌های معمولی عمل می‌کنند که این حالت از ایجاد صدمات حرارتی در محصول مورد نظر جلوگیری می‌نماید، در عین حال انجام بعضی اقدامات هزینه‌بر همچون بکارگیری انرژی یا ساخت دستگاه‌های مقاوم در برابر حرارت و فشار را منتفی می‌سازد.

در طول دو دهه گذشته استفاده از آنزیم‌ها در صنعت خمیر و کاغذ به طرز چشمگیری افزایش یافته است، و هنوز هم کاربردهای آن‌ها در حال توسعه است. تا چند سال قبل، استفاده از آمیلاز برای اصلاح پوشش نشاسته و زایلاناز برای کاهش مصرف مواد شیمیایی در رنگبری، شناخته شده‌ترین برنامه‌های کاربردی بودند، اما امروزه لیپاز برای کنترل قیر، استراز برای حذف مواد چسبناک، آمیلاز و سلولاز برای بهبود مرکب‌زدایی و سلولاز برای اصلاح الیاف، تبدیل به راه‌حل‌های شیمیایی اجتناب ناپذیر برای کارخانه های تولید خمیر و کاغذ شده‌اند [۱۴].

۴-۱ تأثیر آنزیم استراز در کنترل مواد چسبناک موجود در خمیربازیافتی OCC

آنزیم استراز ملکول‌های پروتئینی با ساختار پیچیده می‌باشند که واکنش‌های بیوشیمیایی را تسریع می‌کنند. فعالیت اغلب این آنزیم‌ها در دامنه pH= ۷ -۱۰ و درجه حرارت ۵۰ درجه سلسیوس انجام می‌گیرد. استراز نیز همانطور که از نام آن پیداست پیوندهای استری را از همدیگر جدا می‌کند. چسب حساس به فشار و دیگر مواد چسبناک موجود در خمیر بازیافتی کارتن‌های کنگره‌ای کهنه حاوی تعداد زیادی از این پیوندها می‌باشند که می‌توان برای شکست و حذف آن‌ها از آنزیم استراز استفاده کرد. برای اطمینان از مؤثر بودن استراز برای کنترل چسب حساس به فشار شرایط زیر مورد نیاز است [۹].

- بایستی pH بیشتر از ۶/۵ و کمتر از ۱۰ باشد
- درجه حرارت بین ۸۰ و ۱۳۵ درجه فارنهایت باشد (۲۵ و ۶۰ درجه سلسیوس)
- هیچ ماده شیمیایی اکسید کننده‌ای نباید در خمیر باقی مانده باشد
- زمان تماس ۵۰ دقیقه باشد

تجمع چسب‌ها (که به مواد چسبناک موسوم‌اند) بزرگترین مانع در فراوری کاغذهای بازیافتی محسوب می‌شود، زیرا این مواد سبب ایجاد سوراخ و پارگی کاغذ می‌شوند و موجب کیفیت کمتر کاغذ و توقف‌های متوالی ماشین کاغذ برای تمیزسازی خواهند شد. روش متداول برای کنترل مواد چسبناک به وسیله تمیزسازی شیمیایی و مکانیکی، تجهیزات فرایندی است که منجر به مصرف الکتریسیته، بخار و حلال‌های مختلف می‌شود. روش جایگزین برای کنترل مواد چسبناک استفاده از آنزیم استراز می‌باشد که پلی وینیل استات موجود در چسب‌ها را هیدرولیز می‌نماید. استفاده از آنزیم مصرف انرژی را طی توقف‌های متوالی تولید کاهش داده و مصرف حلال‌ها را نیز کاهش می‌دهد و از این طریق موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی و مواد چسبناک می‌شود. نتایج مطالعه محققین نشان می‌دهد که استفاده از آنزیم‌ها جهت کنترل مواد چسبناک موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش تاثیرات مخرب و گسترده زیست محیطی می‌گردد.

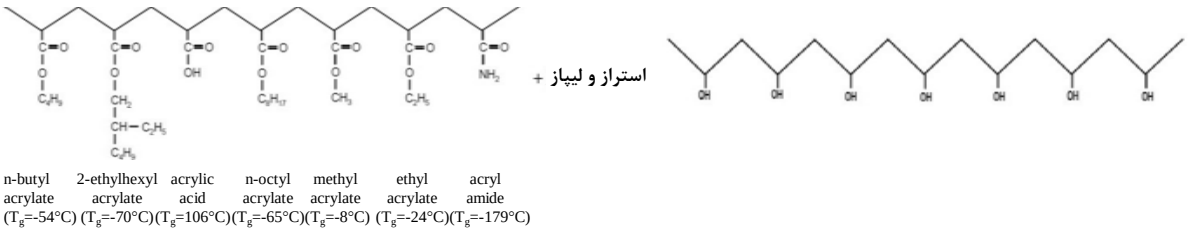
1. Substrate

آنزیم‌های استراز می‌توانند سطح ذرات چسب را اصلاح نموده و از تجمع آن‌ها جلوگیری نمایند. از این طریق کارخانه می‌تواند مقدار مواد چسبناک میکرو را که در فرایند در حال چرخش هستند و قابلیت تشکیل ذرات چسبناک مشکل آفرین ماکرو را دارند به حداقل برساند.

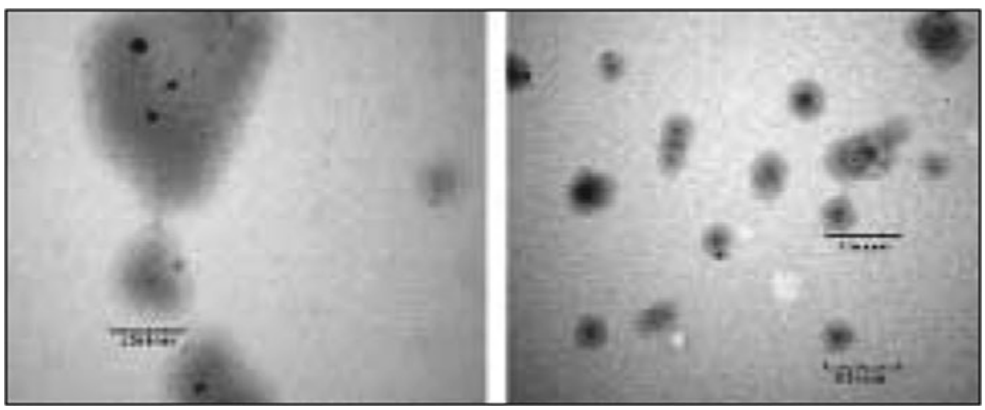
افزودن آنزیم استراز به خمیر بازیافتی OCC موجب می‌شود که پیوندهای استری چسب حساس به فشار شکسته شوند و چسب به ذرات ریزتری جهت حذف آسانتر تبدیل شود (شکل (۴)). استراز علاوه بر اینکه پیوندهای استری چسب حساس به فشار را می‌شکند باعث تغییر خاصیت شیمیایی سطح ملکول‌های چسب نیز خواهد شد و تا حدودی از خاصیت چسبندگی آن می‌کاهد.

در شکل (۵) تأثیر تیمار مخلوط آنزیم‌های استراز بر روی چسب حساس به فشار و دیگر مواد چسبناک نشان داده شده است. ذرات فشرده و جمع شده برای تشکیل کلوخه‌های بزرگ‌تر نه‌تنها می‌تواند دلیل پارگی و توقف ماشین کاغذ باشند بلکه باعث ایجاد پارگی در سیستم عملیاتی و به وجود آمدن خرابی در تجهیزات خواهند شد. همچنین ذرات کروی می‌توانند باعث دو برابر شدن تغذیه کاغذ از میان پرینتر شوند زیرا این ذرات اصطکاک کمتری را در پرینتر ایجاد می‌کنند. تیمار آنزیمی در سمت راست شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل استراز ذرات مواد چسبناک را به صورت کوچک، پراکنده و بدون چسبندگی نگه داشته است.

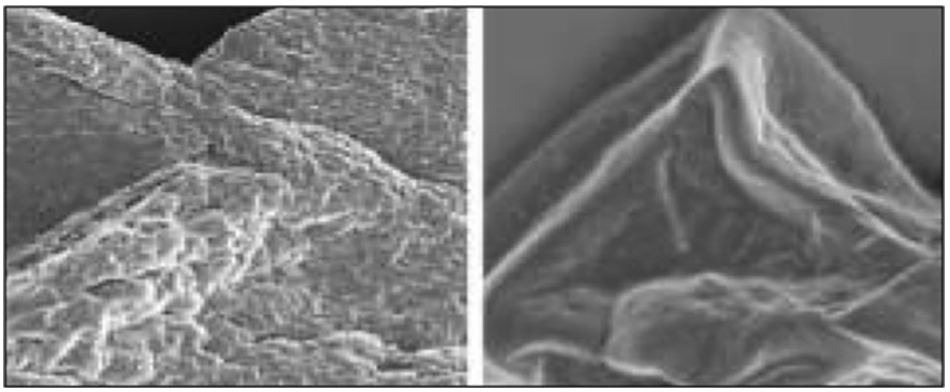
شکل (۶) عکس گرفته شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی از سطح ذرات مواد چسبناک را نشان می‌دهد. در سمت راست این شکل، ذره چسب بعد از تیمار با آنزیم نشان داده شده است و نسبت به سمت چپ که مربوط به قبل از تیمار آنزیمی می‌باشد سطح ذره صاف و یکنواختر شده است [۱۵]. تمام گزارش کارخانه‌هایی که از آنزیم برای کنترل مواد چسبناک استفاده می‌کنند ناشی از این است که آنزیم دستاوردهای قابل توجه و بهتری نسبت به روش‌های سنتی شیمیایی داشته است.



شکل ۴- در شکل بالا زنجیره چسب حساس به فشار (PSA) بر پایه بسپارهای اکریلیکی نشان داده شده است (سمت چپ)، با افزودن آنزیم استراز و لیپاز پیوندهای استری شکسته شده که در نتیجه باعث کاهش وزن ملکولی و همچنین افزایش خاصیت آبدوستی چسب می‌شوند (سمت راست) [۹-۷]



شکل ۵- نتیجه تیمار آنزیمی بر روی مواد چسبناک (سمت چپ قبل از تیمار و سمت راست بعد از تیمار با استراز)

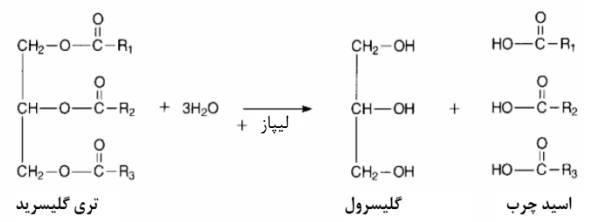


شکل ۶- عکس تهیه شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی از سطح ذرات مواد چسبناک قبل از تیمار با آنزیم (چپ) و بعد از تیمار(راست) [۱۵]

۲-۴ تأثیر آنزیم لیپاز در کنترل مواد چسبناک موجود در خمیر بازیافتی OCC و کنترل قیر[1]

لیپاز آنزیمی است که توانایی هیدرولیز استرها را دارد و نقش اختصاصی تبدیل تری‌گلیسرید به گلیسرول و اسید چرب را ایفا می‌کند، که به این عمل لیپولیز می‌گویند (شکل (۷)). لیپازها را می‌توان زیرمجموعه‌ای از استرازها دانست. از لیپاز نیز می‌توان برای حذف چسب حساس به فشار و دیگر مواد چسبناک استفاده کرد [۱۴].

قیر به طور کلی واژه ای است که برای ترکیبات آبگریز رزین چوب، اسیدهای رزینی، تری گلیسریدها و مومها بکار می رود. انواع مشخصی از خمیرهای چوب مثل خمیرهای سولفیت و خمیرهای مکانیکی به خصوص از گونه کاج‌ها مقدار زیادی قیر دارند. آنزیم لیپاز معمولاً برای کنترل قیر در خمیرهای مکانیکی که دارای مواد استخراجی فراوان می‌باشند مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فرایند خمیر مکانیکی مواد صمغی به نام قیر هنوز در خمیر وجود دارند. قیر می‌تواند مشکلات جدی را در تولید خمیر و کاغذ به وجود آورد. قیر روی وایرها، رول ماشین کاغذ و قسمت‌های دیگر رسوب می‌کند، که نتیجه آن توقف مکرر ناگهانی ماشین کاغذ و کیفیت پایین کاغذ می‌باشد. در خمیرهای مکانیکی تری‌گلیسیریدها به عنوان یک عامل عمده برای به وجود آمدن قیر شناخته شده‌اند. لیپاز می‌تواند تری گلیسرید را به گلیسرول و اسیدهای چرب آزاد تبدیل کند (شکل (۷)). اسیدهای چرب آزاد می‌توانند با شستشو از خمیر خارج شوند و یا با استفاده از آلوم یا تثبیت کننده‌های دیگر بر روی الیاف ثابت شوند. تیمار آنزیمی با استفاده از لیپاز می‌تواند به میزان قابل توجهی سطح قیر رسوب داده شده بر روی ماشین کاغذ و معایب سیستم کاغذسازی را کاهش دهد. همچنین اغلب می‌تواند سرعت ماشین را افزایش دهد. تیمار لیپاز برای خمیر مکانیکی موجب بهبود و افزایش مقاومت کششی کاغذ خواهد شد. لیپازها همچون سایر آنزیم‌ها نسبت به دما و pH محیط، میزان آب موجود و جنس و قطبی بودن حلال حساس و تأثیرپذیرند.



شکل ۷- نحوه تبدیل تری‌گلیسرید به گلیسرول و اسید چرب با استفاده آنزیم لیپاز

از کاربردهای مهم دیگر آنزیم لیپاز در صنایع کاغذ و بسته‌بندی استفاده از آن برای کنترل مواد چسبناک است. لیپاز نیز همانند استراز قابلیت شکستن پیوندهای استری را داشته و می‌تواند مواد چسبناک و چسب حساس به فشار را به قطعات ریزتر جهت حذف از فرایند بازیافت، تبدیل کند.

1. Pitch

زینگ[1] و همکاران (۲۰۰۹) آنزیم‌های لیپاز و استراز را برای کنترل چسب حساس به فشار و مواد چسبناک در خمیر جوهرزدایی[2] شده و خمیرگرمایی- شیمیایی استفاده کردند. این آنزیم‌ها مواد چسبناک را در خمیر جوهرزدایی شده بیشتر از ۳۰ درصد و در خمیرگرمایی- شیمیایی[3] حدود ۷۵ درصد حذف کردند. آنزیم لیپاز تغییرات چشمگیری در وزن ملکولی مواد چسبناک موجود در خمیر جوهرزدایی ایجاد کرد. همچنین نشان دادند که آنزیم تاثیر منفی بر روی دیگر خواص خمیر نداشته است [۱۶].

کارخانه‌ای در کانادا که مقوای بسته‌بندی از خمیر بازیافتی OCC تولید می‌کند، از آنزیم لیپاز برای کنترل مواد چسبناک استفاده می‌کند. مزایای کنترل آنزیمی مواد چسبناک برای این کارخانه در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- مزایای کنترل آنزیمی مواد چسبناک با استفاده از آنزیم لیپاز[۹]

مشکلات ناشی از چسبناک ها	مزایای کنترل	صرفه جویی سالیانه(دلار)
کاهش عمر مفید نمد شکل‌دهنده	کاهش ۴ نمد در سال	۱۰۰۰۰۰
زمان توقف برای تمیز کردن نمد	افزایش تولید	۱۷۰۰۰۰
مواد شیمیایی برای تمیز کردن	جایگزین مواد شیمیایی	۱۶۰۰۰۰
توقف ماشین کاغذ	رفع ۴۵ پارگی در سال	۹۰۰۰۰۰

۵- تأثیر کنترل آنزیمی مواد چسبناک بر ویژگی‌های کاغذ بازیافتی

از ویژگی‌هایی که به وسیله کنترل آنزیمی مواد چسبناک در خمیربازیافتی OCC بهبود می‌یابند شامل خواص نوری و ویژگی‌های مقاومتی می‌باشند. کنترل آنزیمی بر خلاف روش‌های سنتی مکانیکی، خسارتی به الیاف خمیر وارده نکرده و طول الیاف را کم نمی‌کند. به دلیل عدم کوتاه شدن طول الیاف در کنترل آنزیمی مواد چسبناک، ویژگی‌های کاغذ بهبود می‌یابند.

۵-۱ بهبود خواص نوری کاغذهای بسته‌بندی به‌وسیله کنترل آنزیمی مواد چسبناک

همانطور که در شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده شد، کنترل آنزیمی چسب حساس به فشار باعث ریز شدن ذرات و تغییر در خاصیت شیمیایی سطح چسب خواهد شد. ریزتر شدن ذرات چسب در خمیر بازیافتی OCC منجر به حذف بهتر و آسانتر چسب در خمیر می‌شود. مواد چسبناک به دلیل خاصیت چسبندگی که دارند در طول فرایند مصرف و بازیافت انواع مواد و آشغال‌ها را به خود جذب می‌کنند. این مواد باعث تیره شدن و کثیف شدن الیاف خواهند شد. با خارج کردن ذرات تیره و کثیف مواد چسبناک از خمیر OCC، درجه روشنی کاغذهای حاصل از آن بهبود خواهد یافت.

۵-۲ بهبود خواص مقاومتی کاغذهای بسته‌بندی به وسیله کنترل مواد چسبناک

چسب حساس به فشار و دیگر مواد چسبناک موجود در خمیر بازیافتی به علت کلوخه شدن و ایجاد تخلخل در بین الیاف مانع پیوند قوی بین الیاف خواهد شد. کنترل مواد چسبناک در خمیر بازیافتی به وسیله آنزیم‌های استراز و لیپاز باعث جلوگیری از تجمع این مواد می‌شود. کنترل آنزیمی مواد چسبناک در خمیر بازیافتی OCC باعث بهبود پیوند بین الیاف در نتیجه بهبود مقاومت‌های کاغذ خواهد شد. کنترل آنزیمی مواد چسبناک در بین مقاومت‌های کاغذ بیشتر از همه روی مقاومت کششی و مقاومت به پاره شدن اثر مطلوب به جای خواهد گذاشت که این دو پارامتر برای کاغذهای بسته بندی بسیار مهم می‌باشند [۱۳]. مقاومت به پاره شدن و مقاومت کششی کاغذ به مقاومت ذاتی خود الیاف، تعداد و مقاومت‌های بین الیاف بستگی دارد. مواد چسبناک موجود در الیاف بازیافتی باعث کاهش پیوند الیاف به الیاف خواهد شد. علاوه بر این مواد چسبناک موجود در الیاف به کاغذ حاصله خاصیتی شکننده و کم انعطاف می‌بخشند که این خاصیت نیز باعث کاهش مقاومت‌های کاغذ خواهد شد. با کنترل آنزیمی مواد چسبناک در الیاف بازیافتی، پیوند الیاف به الیاف افزایش می‌یابد و همچنین خاصیت انعطاف‌پذیری الیاف نیز افزایش خواهد یافت. افزایش پیوند و انعطاف‌پذیری الیاف باعث بهبود مقاومت‌های کاغذ خواهند شد.

1. Zing
2. Deinking pulp (DIP)
3. Chemical Thermo Mechanical Pulp (CTMP)

۶- اثر کنترل آنزیمی مواد چسبناک بر روی ماشین کاغذ و فرایند تولید

کارخانه‌ها در سراسر جهان اثر کنترل آنزیمی را برای مواد چسبناک و چسب حساس به فشار در کاغذهای بازیافتی OCC و دیگر کاغذها در مقیاس صنعتی و نیمه صنعتی مورد استفاده و بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از آنزیم برای حذف مواد چسبناک در مقابل روش‌های سنتی مانند غربال، شستشو، پراکنده‌سازی، شناورسازی و دیگر روش‌های سنتی بسیار کارامدتر و رضایت‌بخش‌تر بوده است. استفاد از کنترل آنزیمی برای مواد چسبناک مانع توقف و پارگی کاغذ خواهد شد و در نتیجه راندمان تولید افزایش خواهد یافت.

با استفاده از آنزیم می‌توان حدود ۷۰ الی ۹۰ درصد از مواد چسبناک و چسب حساس به فشار را در خمیر بازیافتی حذف کرد، این در حالی است که با روش‌های سنتی در بهترین حالت فقط حدود ۳۰ در صد از مواد چسبناک موجود در خمیر بازیافتی حذف می‌شود [۱۷]. مزیت دیگر کنترل آنزیمی در مقایسه با روش‌های سنتی این است که به تجهیزات مختلف برای اعمال آن احتیاج ندارد. آنزیم را می‌توان مستقیماً به خمیرساز اضافه کرد. اما برای روش‌هایی مانند شستشو و شناورسازی نیاز به تجهیزات و سرمایه‌گذاری اولیه بیشتری می‌باشد و این در حالی است که کارایی و اثر آن نیز نسبت به روش آنزیمی کمتر است. همچنین تیمار آنزیمی برای کنترل مواد چسبناک در کاغذهای بازیافتی مانع از مصرف مواد شیمیایی و حلال‌های آلی برای تمیز کردن ماشین کاغذ و فرایند تولید خواهد شد. در نتیجه اثرات زیست محیطی و تخریب‌پذیر نیز به وسیله کنترل آنزیمی مواد چسبناک در کارخانه‌های بازیافت کاهش خواهد یافت [۱۴]. استفاده از آنزیم‌ها به عنوان جایگزین روش‌های متداول برای کنترل مواد چسبناک باعث صرفه جویی در مصرف مواد شیمیایی، ماشین کاغذ تمیزتر، افزایش مقدار تولید محصول، پساب با آلودگی کمتر، محصولی با کیفیت بالاتر و افزایش سرعت تولید خواهد شد.

۷- نتیجه‌گیری

استفاده از الیاف بازیافتی در صنایع کاغذ هر ساله رو به افزایش است. همانطور که تقاضا برای الیاف بازیافتی افزایش می‌یابد مطابق با آن کیفیت الیاف بازیافتی نیز کاهش می‌یابد. با افزایش الیاف بازیافتی در چرخه صنعت تولید کاغذ مشکل کنترل چسب حساس به فشار و دیگر مواد چسبناک نیز جدی‌تر خواهد شد. روش‌های مکانیکی و شیمیایی برای کنترل مواد چسبناک استفاده شده‌اند اما کارکرد قابل توجهی از خود نشان نداده‌اند. استفاده از کنترل آنزیمی رویکردی جدید برای مقابله با کنترل مواد چسبناک است که دارای کارایی بالایی می‌باشد. کنترل آنزیمی مواد چسبناک و چسب حساس به فشار نه تنها از کارایی بالایی برخوردار است بلکه سبب بهبود ویژگی‌های کاغذ نیز خواهد شد. با استفاده از کنترل آنزیمی مواد چسبناک در پروسه بازیافت کاغذ، می‌توان محصولی با مقاومت بیشتر همراه با سرعت و بازدهی بیشتر تولید کرد.

مراجع

[۱] کیتی، ک.، و گست، د.، "راهنمای بازیافت کاغذهای باطله، ترجمه سید احمد میرشکرایی"، تهران، انتشارات آییژ، ۱۴۰ ص، (۱۳۸۸).

[2] Patrick, K., "Enzyme technology improves efficiency, cost, safety of stickies removal program", PaP Age, 22–26, (2004).

[3] Sixta, H., "Handbook of pulp", Wiley: Weinheim, (2006).

[4] Delagoutte, T., "Management and control of stickies", Progr Pap Recycl, 15(1), 31-45, (2005).

[5] Doshi, M., "Properties and control of stickies", Paper recycling challenge, 4, 67-79, (1999).

[6] Doshi, M., Dyer, J., "Overview, recent advances in paper recycling stickies", paper recycling challenge, Appleton, p 1, (2002).

[7] Czech, Z., Milker, R., "Development trends in pressure-sensitive adhesive systems", Materials Science-Poland, 23(4), 1015-1022, (2005).

[8] Pedersen, H. H., "Expanding Enzyme Technology in Pulp & Paper Industry". 9th International Conference on Biotechnology in the Pulp and Paper Industry, Durban, (2004).

[9] Ji, Z., Yi, j., jixue, Y., Hailan, L., Xinnan, A., "Study on Removing Stickies containing in the deinked pulp of wast newspaper by laccase/Xylanase treatment", journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition). 3, 111-114, (2011).

[10] Fitzhenry, J., Hoekstra, P. M., Glover, D., "Enzymatic stickies control in MOW, OCC, and ONP furnishes", Tappi pulping, process and product quality conference, Boston, MA, (2000).

[11] Zongquan, L., Congxiang, L., Menghua, Q., Yingjuan, F., Yang G., "Stickies Control with Pectinase for Improving Behavior of Cationic Polymers in a Mixture of Chemithermo-mechanical Pulp and Deinked Pulp", BioResources, 8(1), 189-200. (2013).

[12] Putz, H., "pulp Papermaking science and technology", vol 7, Fapet Oy: Helsinki, (2000).

[۱۳] خسروانی، ا.، لتیباری، ا.، و میرشکرایی، ا.،"بررسی عملکرد دو نوع ترکیب مواد شیمیایی به منظور مجتمع کردن مواد چسبناک قبل از غربال"، ، نشریه دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۶۰(۳)، ۹۹۹-۹۸۹، (۱۳۸۶).

[۱۴] ابراهیمی بریسا، ر.، رسالتی، ح.، " کاربرد آنزیم‌ها در صنایع خمیر و کاغذ"، ماهنامه صنایع چوب و کاغذ، سال دوازدهم، شماره ۸۲، ۵۹-۵۸، (۱۳۹۲).

[15] Pratima, B., "Biotechnology for pulp and paper processing", New York, Springer, (2012).

[16] Zeng X, S., Yu J, K., Zhan, H. L. X. "Study on the degradation of stickies in the pulps by complex enzymes", China Pulp Pap 28(2), 1–4. (2009.)

[17] Covarrubias, R., "Optimyze: enzymatic stickies control developments", Pap Asia, 22(8), 31–34, (2006).