

مروری بر انواع روش‌های مرکب‌زدایی کاغذ باطله

رحیم ابراهیمی بریسا^{۱*}، محمد حسین اسماعیلی^۲، حسین رسالتی^۳

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران، صندوق پستی: ۴۹۱۳۸-۱۵۷۳۹
- ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران، صندوق پستی: ۱۴۴۱۷-۴۳۱۹۱
- ۳- استاد، گروه صنایع خمیر و کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران، صندوق پستی: ۴۹۱۳۸-۱۵۷۳۹

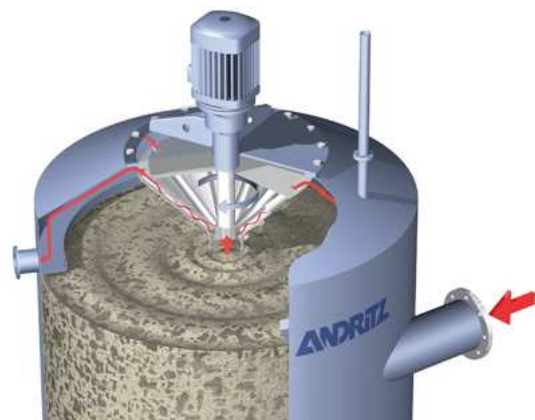
تاریخ دریافت: ۹۲/۹/۸ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۲/۱۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۱۲ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۳/۳/۲۱

چکیده

مطالعه حاضر به بررسی مرکب‌زدایی به روش شستشو، شناورسازی، شیمیایی و مرکب‌زدایی آنزیمی می‌پردازد. کارایی مرکب‌زدایی به روش شستشو به اندازه ذرات مرکب و ضخامت لایه نمدی الیاف بستگی دارد. بازده مرحله شستشو به نوع تجهیزات، ماهیت و کیفیت کاغذ بستگی دارد و معمولاً در محدوده ۷۵-۹۰٪ است. شستشوی موثر زمانی روی می‌دهد که اندازه ذرات مرکب بین ۱۵-۱۰ میکرون باشد، در حالی که ذرات مرکب بین ۵-۰/۵ میکرون به طور موثرتری خارج می‌شوند. روش شستشو در مورد حذف ذرات مرکب چاپ افست و لترپرس که به خوبی پخش می‌شوند مناسب می‌باشد. شناورسازی یک فرآیند شیمیایی- مکانیکی است که پس از تزریق هوا به داخل سلول‌های شناورسازی، حباب‌های هوا به ذرات آب‌گریز مرکب می‌چسبند و پس از انتقال آن‌ها به سطح سلول شناورسازی از سیستم خارج می‌شوند. در مرکب‌زدایی به روش آنزیمی، آنزیم‌ها به خود مرکب یا به سطح الیاف حمله‌ور می‌شوند و سازوکار عمده این عمل مبتنی بر سست کردن اتصالات ذرات مرکب و الیاف و حذف ذرات ریز و نرمة می‌باشد. استفاده از آنزیم درصد خروج مواد آلاینده و کارایی فرآیند مرکب‌زدایی را افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج، از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر مرکب‌زدایی آنزیمی می‌توان به دما، pH، نوع آنزیم، مواد ورودی به سیستم، غلظت ترکیبات کاغذ، زمان واکنش و عمل مکانیکی در طی خمیرسازی نام برد. آنزیمی‌هایی که برای مرکب‌زدایی آنزیمی استفاده می‌شوند شامل سلولاز، زایلاناز، آمیلاز و پکتیناز می‌باشند.

واژه‌های کلیدی

مرکب‌زدایی آنزیمی، شناورسازی، شستشو، آنزیم، مرکب.



*Corresponding author: Ebrahimirahim56@gmail.com

A overview of the various methods of deinking waste paper, R. Ebrahimi-Barisa, M. H. Esmaeeli, H. Resalati

۱- مقدمه

باطله تأمین نمود. بازیافت کاغذهای باطله به طور حتم دارای اثرات بسیار مهم اقتصادی و زیست محیطی است و علاوه بر جلوگیری از برداشت بی رویه منابع چوبی کشور و خروج سالیانه میلیون‌ها دلار ارز، موجب کاهش آلودگی‌های ناشی از تولید خمیر و کاغذ و دفع مواد زائد جامد خواهد شد. در صورتی که بازیافت محصولات کاغذی به طور غیراصولی و بدون نظارت انجام شود، علاوه بر اینکه به لحاظ اقتصادی تأثیر مثبتی نخواهد داشت، بلکه مشکلات فراوانی را نیز در برابر برنامه‌ریزان و دست‌اندرکاران امور اقتصادی و بهداشتی و زیست‌محیطی نتیجه خواهد داد. از جمله این مشکلات می‌توان به افزایش بیماری‌های شغلی و انتقال تدریجی مواد شیمیایی و میکروکوب‌ها به مصرف‌کنندگان و کاهش کیفیت محصولات تولید شده نام برد [۱]. مرکب‌زدایی^۴ همان‌طور که از نامش پیدا است، فرآیند زدودن و خارج کردن مرکب^۵ از کاغذ باطله می‌باشد. هدف از مرکب‌زدایی این است که از کاغذ باطله محصول با کیفیت مطلوب به دست آید، به طوری که این محصول از سفیدی و خواص مقاومتی خوبی برخوردار باشد. فرآورده‌های حاصل از الیاف بازیافتی شامل کاغذ روزنامه، کاغذ بهداشتی و مقدار کمتری کاغذهای چاپ و تحریر می‌باشند. اهمیت مرکب‌زدایی کاغذهای باطله به عنوان یک فرآیند صنعتی رو به افزایش است. در سطح جهانی بیش از ۱۱ میلیون تن الیاف در حدود ۴۰۰ کارخانه بازیافت مرکب‌زدایی می‌شوند و در سال ۲۰۰۹ این رقم تا ۱۸۱/۶ میلیون تن افزایش یافت. علت عمده سیر صعودی نرخ بازیافت، پی بردن اکثر کشورها به اهمیت بازیافت و استفاده از حداکثر منابع سلولزی است [۵]. در سال‌های اخیر با کاهش منابع چوبی و افزایش تقاضا برای محصولات کاغذی و افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید کاغذهای بکر و حجم زیاد کاغذ موجود در زباله‌های شهری ضرورت امر بازیافت منابع کاغذ موجود بیش از پیش احساس می‌شود. مرکب‌زدایی یکی از مراحل مهم در امر بازیافت و استفاده مجدد از کاغذ است. در سال‌های اخیر توجه محققین در سطح بین‌المللی به سوی بهینه‌سازی و یافتن راه‌های جدید در زمینه زدودن آلاینده‌ها به‌ویژه مرکب از کاغذهای چاپ‌شده به روش‌های گوناگون معطوف شده است [۶].

۲- آلاینده‌های^۶ کاغذ باطله

کاغذهای باطله دارای مقادیر زیادی از مواد آلاینده می‌باشند که طی مراحل تبدیل، چاپ، استفاده و جمع‌آوری کاغذ به وجود می‌آیند. مواد آلاینده جامد شامل: انواع گیره، منگنه، چسب‌ها، مرکب چاپ و ترکیبات پلیمری مثل پلی استایرن، پلی بوتادین، پلی ایزوپرن و غیره می‌باشند. در حالی که مواد اولیه محلول در سیستم کاغذسازی حل می‌شوند و تأثیر نامطلوب بر روند تولید و کیفیت فرآورده دارند. مشکلات ناشی از آلاینده‌ها ممکن است در سیستم هدباکس و یا میز شکل‌گیری خمیر و کاغذ مشاهده شود، به طوری که ذرات آلاینده باقیمانده در خمیر کاغذ

با توجه به اینکه ایران در سرزمینی نیمه‌خشک واقع شده است، منابع جنگل‌های طبیعی و ذخایر آب‌های آن بسیار محدود بوده و حفظ و حراست از آن‌ها باید به صورت جدی مورد توجه قرار گیرد. حفظ و نگهداری از منابع حیاتی تجدیدناپذیر در ایران مستلزم صرف انرژی و برنامه‌ریزی اصولی جهت کاهش اتلاف و فرآورده‌های کاغذی و ایجاد یک تشکیلات مناسب برای جداسازی و جمع‌آوری این مواد، پیش از ورود به چرخه زباله شهری می‌باشد. بررسی شرایط تولید در ایران نشان می‌دهد که مواد اولیه لازم در تولید محصولات سلولزی با یکی از چهار روش زیر قابل تأمین است: ۱- استفاده از منابع چوبی جنگل‌های کشور ۲- مصرف منابع سلولزی غیرچوبی شامل نی، کاه، کلس^۱ (قسمت خشن و درشت ساقه‌ها و برگ‌های گندم و جو و امثال آن‌ها که در زمین می‌مانند)، پسمانده‌های مزارع برنج، باگاس^۲ (تقاله نیشکر) و غیره ۳- واردات خمیر کاغذ یا فرآورده‌های آماده ۴- بازیابی کاغذ باطله^۳.

مصرف کاغذ باطله به عنوان ماده اولیه تولید کاغذ و مقوا در سال ۱۳۱۳ در ایران آغاز شده و شرکت مقواسازی کرج در این امر پیشگام بوده است [۱]. در ارتباط با بازیافت کاغذهای باطله امروزه رقمی حدود ۲۵۰۰۰۰-۲۳۰۰۰۰ تن کاغذ باطله (۲۵٪ کل کاغذ و مقوای مصرفی) در کشور جمع‌آوری شده و در شرکت‌های کاغذ و مقوا مصرف شده است. با بهره‌گیری از روش‌های جدید جمع‌آوری و تفکیک انواع مختلف کاغذ باطله، خمیر کاغذ حاصل به عنوان یک جایگزین برای منابع اولیه سلولزی جهت تولید ۱/۵ میلیون تن کاغذ و مقوای کشور کفایت خواهد کرد [۲]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با بازیافت یک تن کاغذ باطله از مصرف ۱۷ اصله درخت، ۶۹۵۳ گالن آب، ۴۶۳ گالن روغن، ۵۸۷ پوند آلودگی هوا، ۳/۰۶ یارد مکعب فضا جهت دفع زباله و ۴۰۷۷ کیلو وات ساعت، انرژی صرفه‌جویی می‌شود. همچنین آمارها نشان می‌دهد که فرآیند بازیافت موجب کاهش ۷۵٪ آلودگی هوا، ۳۵٪ آلودگی آب، ۸۵٪ مصرف آب، ۶۴٪ مصرف انرژی و نیز صرفه‌جویی در مصرف ۳۱ بلیون گالن آب در هر ماه و استفاده از آن در مصارف خانگی می‌شود [۳، ۴]. آمارهای منتشر شده در مقیاس جهانی حاکی از آن است که بیش از ۵۰٪ کاغذهای روزنامه، حدود ۶۰٪ انواع مختلف کاغذهای کنگره‌ای و بیش از ۳۰٪ انواع کاغذ و مقوای بسته‌بندی بازیافت می‌شود. در مقیاس جهانی حدود ۳۰٪ انواع کاغذ و مقوای جمع‌آوری شده در آمریکا بازیافت می‌شود [۳]. در فرآیند بازیابی کاغذ باطله به خاطر سادگی برنامه‌ریزی و مدیریت، عدم نیاز به مواد اولیه چوبی، سادگی فرآیند بازیافت نسبت به تولید خمیر و کاغذ از منابع دست اول، کم بودن قیمت تمام شده محصول در فرآیند بازیافت موجب جلب نظر قیمت تمام شده محصول در فرآیند بازیافت به عنوان یک راهکار جهت جبران کسری کاغذ در ایران شده است. نظرات کارشناسی در ایران حاکی از آن است که حدود ۲۰٪-۱۴ از کل کسری کاغذ کشور را می‌توان از طریق برنامه‌ریزی اصولی بازیافت کاغذهای

⁴ Deinkig

⁵ Ink

⁶ Contaminants

¹ Stubble

² Bagasse

³ Waste papers

چشم‌اندازهای جدیدی جهت تهیه و تأمین مواد اولیه بیانیدند. در این راستا دو جایگزین بسیار مناسب مطرح شده است، ۱- استفاده از الیاف لیگنوسلولزی (اصطلاح کلی برای ماده‌ای از قبیل چوب که دارای کربوهیدرات و لیگنین است) غیرچوبی همچون باگاس، کاه و کلش برنج و گندم ۲- استفاده مجدد از کاغذهای باطله [۸]. سال‌های اخیر با توجه به کاهش روزافزون منابع جنگلی، بازیافت کاغذهای باطله به عنوان یکی از روش‌های تأمین مواد اولیه سلولزی مناسب برای صنایع کاغذسازی به طور جدی مورد توجه قرار گرفته است. به طوری که از نیمه قرن بیستم در بسیاری از کشورهای دنیا به دلایل گوناگون از جمله محدودیت‌های منابع اولیه سلولزی، مصرف روزافزون محصولات کاغذی، مشکلات زیست‌محیطی ناشی از برداشت جنگل‌ها و هزینه‌های زیاد مربوط به تولید کاغذ و مقوا از مواد خام سلولزی و انرژی استفاده از فناوری بازیافت به صورت گسترده مورد توجه قرار گرفته است و در این زمینه تقریباً بخش قابل ملاحظه‌ای از کمبود مواد خام سلولزی در صنایع خمیر و کاغذ جبران شده است. نرخ بازیافت کاغذهای باطله در هر کشور به وضعیت منابع الیاف و صنایع کاغذسازی آن مربوط می‌باشد، به طوری که در سال ۱۹۹۱ نرخ متوسط بازیافت کاغذ باطله در مقیاس جهانی از ۳۷٪ به ۵۵٪ در سال ۲۰۰۰ افزایش یافت. در سال ۱۹۹۲ مصرف کلی خمیر و کاغذ در جهان حدود ۲۴۵/۶ میلیون تن بوده است که از این مقدار تولید تنها ۱۶۴ میلیون تن یعنی ۶۷٪ کل تولید مربوط به تولید خمیر کاغذ بکر می‌باشد و بیشتر از ۱/۳ از مواد اولیه را کاغذ باطله در بر داشت. در این سال مصرف کاغذ باطله حدود ۶۴ میلیون تن بود که در مقایسه با سال ۲۰۰۰ حدود ۴۲ میلیون تن افزایش یافت و به مقدار ۱۳۸ میلیون تن رسید [۸]. در ایران با توجه به مشکلات عمده‌ای که در رابطه با محدودیت سطح جنگل‌های شمال کشور و افزایش روند تخریبی آنها وجود دارد، تأمین مواد اولیه مورد نیاز از این جنگل‌ها امکان‌پذیر نبوده است. لذا ضرورت دارد که راه‌کارهای مختلفی برای جبران این کمبود ارائه شود و در صورتی که از لحاظ فنی و اقتصادی مناسب باشند، مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین توجه و بررسی امکان استفاده از فرآیند بازیافت و مرکب‌زدایی کاغذهای باطله امری بسیار ضروری است [۹]. وجود لکه‌های مرکب و کم بودن درجه روشنی در خمیرهای بازیافتی از مهم‌ترین تفاوت الیاف بازیافتی و خمیرهای بکر می‌باشد. مرکب‌زدایی اصطلاحی است برای توصیف فرآیند جداسازی و حذف مرکب‌های چاپ از الیاف جهت بهبود خواص نوری خمیر و کاغذ به کار می‌رود. صنایع کاغذ و بازیافت از ۵۰ سال پیش با فرآیند مرکب‌زدایی آشناست و هر روزه بر اهمیت آن به عنوان یک فرآیند صنعتی افزوده می‌شود [۵]. سهولت و یا سختی زدودن جوهر در ابتدا به نوع مرکب، فرآیند چاپ و نوع الیاف بستگی دارد. چاپ غیرتماسی^۱ فرآیندی است که به طور گسترده و در تجهیزاتی مانند چاپگرهای لیزری^۲ و دستگاه‌های کپی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش به سطحی که چاپ بر روی آن انجام می‌شود تماس یا ضربه‌ای وارد نمی‌شود. کاغذهای چاپ شده به روش تماسی به آسانی

ممکن است بر روی پارچه توری کاغذسازی و یا نمد پرس و خشک‌کن رسوب دهند. این رسوبات موضعی منافذ توری و نمد را بسته و موجب اختلال در آب‌گیری و کاهش کیفیت کاغذ نهایی می‌شوند. سازندگان کاغذ سعی می‌کنند تا با شستشوی عرضی به وسیله دوش‌های فشاره‌ای پرفشار در تمیزسازی توری کاغذسازی از مشکلات رسوب آلاینده به ویژه مواد چسبنده بکاهدند. بنابراین ضروری است که تولید در فواصل زمانی مشخص، متوقف شود و نسبت به تمیزسازی و آماده‌سازی توری‌ها، پارچه‌ها و نمدها اقدام شود. برای آماده‌سازی و تمیزسازی فیزیکی، از فرآیند شستشو با محلول قلیایی و یا حلال‌های آلی استفاده می‌کنند. محلول‌های قلیایی شامل پاک‌کننده‌ها و سایر مواد شیمیایی می‌باشند که پس از پاشیده شدن بر روی توری و نمدها، پساب حاصل را به واحد تصفیه پساب هدایت می‌کنند. با توجه به اینکه هدف همه صنعتگران این است که از کاغذهای باطله الیاف تمیز و قابل استفاده بدست آورند، طراحان و مهندسين ماشین کاغذ سعی کرده‌اند تا با ابداع تجهیزات جدید و کارآمد بتوانند مواد آلاینده جامد را به طور موثری حذف کنند. مواد آلاینده جامد می‌توانند با توجه به تفاوتی که از لحاظ فیزیکی (اندازه، شکل و چگالی)، شیمیایی (انحلال‌پذیری) و مشخصات ناشی از سطح (بار الکتریکی و انرژی سطحی) با الیاف دارند، از سیستم خارج شوند. هر چند که بیشتر مواد آلاینده با روش‌های مکانیکی از دوغاب الیاف بازیافتی جدا می‌شوند، اما استفاده از روش‌های شیمیایی هم برای خارج‌سازی مواد چسبنده لازم است. روش مکانیکی تأثیر چندانی بر روی مواد چسبنده ندارد، چون که مواد چسبنده همانند الیاف آنقدر ریزند که با غربال جدا نمی‌شوند. به همین منظور در کارخانجات برای کنترل شیمیایی آن‌ها از دو روش استفاده می‌شود: ۱- پراکنده‌سازی و ریزکردن آن‌ها به طوری که چسبناک شوند و در فرآیند کاغذسازی و محصول نهایی مشکل ایجاد نکنند، ۲- استفاده از مواد شیمیایی پوشش‌دهنده سطح ذرات مواد چسبنده، به گونه‌ای که این مواد در عملیات کاغذسازی و کیفیت کاغذ حاصله تأثیر نامطلوب نداشته باشند. پوشاندن مواد چسبنده با مواد شیمیایی کار ساده‌ای نیست و تغییر جزئی در شرایط فرآیند مثل تغییر pH ممکن است میزان تأثیر این روش را کاهش دهد. ذرات آلاینده در روش پراکنده‌سازی ممکن است در آب چرخان سیستم کاغذسازی وجود داشته باشند و موجب ناپایداری سیستم و رسوب مجدد بر روی الیاف شوند. به همین خاطر در سال‌های اخیر تمایل به ساخت انواع مختلف چسب‌های پراکنده شونده در آب افزایش یافته است تا مشکلات چسب را در بازیافت الیاف از کاغذهای باطله کاهش دهد [۶، ۷].

۳- اهمیت کاغذ باطله و مرکب‌زدایی

گردش شتابان چرخه صنعت در کشورهای مختلف از یک طرف و محدودیت منابع موجود بر روی کره خاکی از طرف دیگر سبب شده است که تأمین مواد اولیه در صنایع مختلف یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها بر سر راه توسعه صنایع باشد. صنعت چوب و کاغذ نیز از این قاعده مستثنی نبوده و این مسئله در مورد آن جنبه حادثی به خود گرفته و موجب شده است که از مدت‌ها پیش دست‌اندرکاران این صنعت به

^۱ Non Impact printing

کاغذهای اندود نشده است. کاغذ گرافیک بازیافتی شامل موارد زیر می‌باشد: ۱- الیاف، پرکننده‌ها، نشاسته، رنگدانه‌ها و چسب‌های مصنوعی اندودسازی و دیگر مواد شیمیایی کاغذ ۲- مرکب‌های چاپ ۳- چسب‌ها و فیلم‌های پلاستیکی تبدیل شده ۴- فلزات، شن و شیشه. جداسازی چسب‌های ترموپلاستیک، پلاستیک و چسب‌های اندودسازی به خاطر ایجاد مشکلات در فرآیند، در جداسازی مرکب‌های چاپ بسیار مهم است. به این گونه مواد، اصطلاحاً مواد چسبنده^۶ می‌گویند. در فرآیند مرکب‌زدایی نیاز به مواد شیمیایی به طور قابل توجهی متفاوت می‌باشد و بستگی به مواد اولیه، خصوصیات خمیر مرکب‌زدایی شده و نوع فرآیند دارد. کاغذهای بازیافتی کیفیت بالا همانند کاغذهای غیرچوب دار (حاوی خمیر مکانیکی) معمولاً به مواد شیمیایی کمتری از کاغذهای خانگی جمع‌آوری شده مثل کاغذهای چوب‌دار (عاری از خمیر مکانیکی) نیاز دارند. بنابراین کمترین مواد شیمیایی زمان تولید کاغذهای بهداشتی و اداری همراه با یک فرآیند شستشو اتفاق می‌افتد. با استفاده از فرآیند شناورسازی، بیشترین مواد شیمیایی جهت تولید کاغذهای گرافیک جمع‌آوری شده خانگی استفاده می‌شود [۱۱]

۵- قابلیت مرکب‌زدایی

مرکب‌زدایی واژه‌ای است که فرآیند جداسازی و خارج‌سازی مرکب‌های چاپ را از الیاف بازیابی شده جهت بهبود خواص نوری خمیر کاغذ توصیف می‌کند. در جداسازی مرکب چاپ از الیاف خمیر بازیابی شده، شرایط مکانیکی و شیمیایی به کار گرفته می‌شود. خارج‌سازی نهایی ذرات مرکب جدا شده به کمک سیستم‌های شناورسازی یا شستشو انجام می‌شود. مرکب‌زدایی مهم‌ترین فرآیند در عمل‌آوری کاغذ بازیابی شده مثل مواد اولیه برای تولید خمیر مرکب‌زدایی شده می‌باشد که عمدتاً برای ساخت کاغذهای گرافیک، کاغذهای بهداشتی یا لاینر^۷ بالایی مقوای بازیابی شده با خط سفید استفاده می‌شود [۱۲]. قابلیت مرکب‌زدایی کاغذهای بازیافتی معرف درجه جداسازی ذرات مرکب به وسیله فرآیند مرکب‌زدایی می‌باشد و با تغییر خواص نوری اندازه‌گیری می‌شود. این خواص شامل روشنایی و درجه روشنی خمیر مرکب‌زدایی شده و مرکب‌زدایی نشده می‌باشد. علاوه بر مرکب چاپ، فرآیند چاپ، ماده زیرین چاپ و کهنگی محصول چاپ شده، شرایط و عوامل موثر در فرآیند مرکب‌زدایی به لحاظ شرایط هیدرولیکی، مکانیکی و شیمیایی نیز قابلیت مرکب‌زدایی ماده چاپ شده را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در مرکب‌زدایی عمدتاً فرآورده‌های کاغذ گرافیک بازیافتی مثل روزنامه و مجله‌های باطله و کاغذهای حاوی خمیر مکانیکی استفاده می‌شود. همچنین در این فرآیند از کاغذ عاری از خمیر مکانیکی هم استفاده می‌شود. به عنوان مثال در آلمان کاغذهای باطله به‌دست آمده از مجموعه کاغذهای خانگی شامل بخش‌های برابری از روزنامه و مجله می‌باشد که حدود ۸۰٪ ماده اولیه مرکب‌زدایی را تشکیل می‌دهد. ۲۰٪ بخش باقیمانده شامل کاغذهای حاوی خمیر کاغذ مکانیکی و کاغذهای عاری از خمیر مکانیکی و یک

مرکب‌زدایی می‌شوند در حالی که کاغذهای چاپ شده به روش غیرتماسی به سختی مرکب‌زدایی می‌شوند و مقدار آن‌ها نسبت به حجم کل کاغذ بازیافت شده پیوسته در حال افزایش است [۱۰].

۴- شیمی مرکب‌زدایی

مرکب‌زدایی عبارت است از جداسازی مرکب‌های چاپ و موادی که ممکن است در فرآیند کاغذسازی یا خواص نهایی کاغذ تأثیر بگذارند. جداسازی غیرقابل قبول این مواد کاغذ با روشی کم همراه با لکه‌های کثیف را نتیجه می‌دهد. ذرات مرکب بزرگتر از ۵۰ میکرون مثل لکه‌های رنگی یا سیاه موجود در کاغذ با چشم مسلح قابل رویت هستند. ذرات کوچک‌تر روشنی کاغذ را کاهش و نیاز به عملیات رنگ‌زدایی^۱ را افزایش می‌دهد. در فرآیند مرکب‌زدایی، ابتدا اتصال بین ذرات مرکب و الیاف باید شکسته شود و سپس فرآیند شناورسازی و یا شستشو مرکب و الیاف را از همدیگر جدا می‌کند. همچنین یک توالی ترکیبی از این دو فرآیند نیز امکان‌پذیر است. شناورسازی معمول‌ترین روش مورد استفاده در این زمینه می‌باشد. به طوری که در این روش بازده بیشتر است یعنی مقدار الیاف پذیرفته‌نشده^۲ کمتر می‌باشد. در این زمینه تلاش‌های کمتری در جهت تصفیه آب سفید تولید شده به وسیله مراحل فرآیند مذکور انجام شده است. مواد بازده قابل قبول که شامل ذرات مرکب و مواد چسبنده می‌باشند، می‌توانند بر طبق خواص سطحی دیگر ذرات در دوغاب خمیر الیاف بازیافتی از یکدیگر جدا شوند. در فرآیند شستشو ذرات عمدتاً بر اساس اندازه جدا می‌شوند و ذرات ریزتر مثل پرکننده‌ها و رنگدانه‌های مربوط به اندودسازی به آسانی خارج می‌شوند. استفاده از شستشو خمیر کاغذ در ساخت کاغذهای دستمال کاغذی با خاکستر کم کاربرد دارد. مرکب‌زدایی موثر خمیر الیاف بازیافتی شامل کاغذهای خانگی جمع‌آوری شده از روزنامه و مجله می‌تواند روشنی را تا ۲۰٪-۱۵ ISO^۳ افزایش دهد. بعد از خمیرسازی کاغذ بازیافتی مکانیکی، روشنی حدود ۴۵٪-۴۰ ISO^۴ بوده و این مقدار بعد از مرکب‌زدایی به حدود ۶۰٪ ISO خواهد رسید. با رنگ‌بری خمیر مرکب‌زدایی شده می‌توان روشنی را بیشتر بهبود بخشید. کارایی جداسازی مرکب بستگی به خواص مرکب دارد به طوری که جداسازی مرکب چاپ لتریپرس^۴ از الیاف آسان است. مرکب‌های چاپ افست^۵ بعد از کهنه شدن کاغذ، به خاطر تشکیل اتصالات آلیکیدی می‌توانند موجب مشکلاتی در فرآیند مرکب‌زدایی شوند. کاغذ چاپ شده روتوگراورور نسبت به کاغذ چاپ شده افست آسان‌تر مرکب‌زدایی می‌شود. مرکب‌زدایی به روش شناورسازی به طور کارآمد مرکب چاپ فلکسوگرافی بر پایه آب را خارج نمی‌کند، در حالی که فرآیند شستشو به طور موثر می‌تواند مرکب‌های بر پایه آب را جدا کند. همچنین مرکب‌زدایی بستگی به کیفیت کاغذ مورد استفاده شده دارد. به عنوان مثال مرکب‌زدایی کاغذهای اندود شده به طور کلی موفقیت آمیزتر و آسان‌تر از مرکب‌زدایی

¹ Bleaching

² Reject

³ International Organization for Standardization

⁴ Letterpress

⁵ Offset

⁶ Stickies

⁷ Liner

جلوگیری از رسوب مجدد ذرات مرکب بر روی الیاف که با اضافه کردن مواد شیمیایی می‌توان به این هدف رسید. مهم‌ترین مواد شیمیایی که در بخش خمیرسازی کاغذهای باطله مصرف می‌شوند، شامل: سود سوزآور، پروکسید هیدروژن، سیلیکات سدیم، عوامل کی‌لیت‌کننده و مواد فعال‌ساز سطحی هستند. سود سوزآور موجب افزایش pH می‌شود و به سست و نرم‌شدن عوامل شیمیایی چسباننده مرکب چاپ در سطح کاغذ کمک می‌کند. پروکسید هیدروژن میزان سفیدی خمیرهای بازیافتی مکانیکی را بهبود بخشیده و با خنثی‌سازی محیط واکنش، از تیره‌شدن خمیرهای مکانیکی در pH قلیایی جلوگیری می‌کند. نقش عوامل کی‌لیت‌کننده جلوگیری از دخالت کاتیون‌های فلزی سنگین بر عملکرد شیمیایی پروکسید هیدروژن می‌باشد. سیلیکات سدیم موجب نرم‌شدن مرکب شده و با جذب یون‌های فلزی، میزان تأثیر پروکسید هیدروژن را افزایش می‌دهد. با توجه به تفاوت خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مرکب با الیاف می‌توان بخشی از مرکب را با تمیزکننده‌های معمولی جدا کرد، اما بخش عمده آن‌ها با استفاده از شستشو و شناورسازی خارج می‌شوند. شستشو یک فرآیند کاملاً مکانیکی است در حالی که شناورسازی متکی بر فرآیندهای شیمیایی و مکانیکی است. در گذشته روش شستشو به طور سنتی در آمریکای شمالی و روش شناورسازی در اروپا استفاده شده است. امروزه در بسیاری از کارخانجات برای خارج کردن مرکب چاپ از ترکیبی از دو سیستم مرکب‌زدایی یعنی شستشو و شناورسازی استفاده می‌کنند [۱۲-۷].

۶-۱- مرکب‌زدایی با روش شستشو

شستشو یک فرآیند هیدرولیکی است که به وسیله آن آب از دوغاب خمیر گرفته می‌شود (شکل ۱).

بخش مشخصی هم اختصاص به مواد بسته‌بندی قهوه‌ای و کاغذهای رنگی دارد. کاغذهای رنگی و کاغذهای قهوه‌ای مربوط به بسته‌بندی، تأثیر نامطلوب بر تمیزی و روشنی خمیر مرکب‌زدایی شده دارد. کاغذهای روزنامه و مجله دارای خمیر کاغذ و مواد افزودنی مختلف بوده و با فرآیندهای مختلفی چاپ می‌شوند. مرکب‌های لترپرس^۱، افست^۲ و روتوگراور^۳ در بین فرآیندهای معمول چاپ عمدتاً برای چاپ این محصولات استفاده می‌شوند. همچنین فرآیند فلکسوگرافی بعضی اوقات در امریکای شمالی برای چاپ روزنامه استفاده می‌شود. چاپ فلکسوگرافی در اروپا به استثنای کشور ایتالیا برای چاپ روزنامه کاربرد خیلی کمی دارد [۱۲، ۱۱].

۶- سیستم‌های مرکب‌زدایی

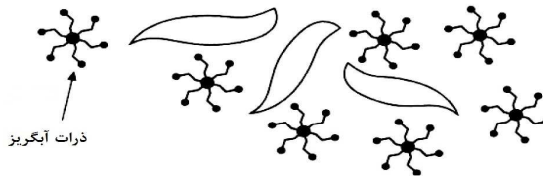
هدف عمده از مرکب‌زدایی تهیه خمیر کاغذی است که کاغذ حاصل از آن به میزان کافی سفید باشد و در آن لکه‌های مرکب دیده نشود. بنابراین خارج ساختن کامل ذرات درشت مرکب (بزرگتر از ۴۰ میکرون) یک هدف مهم و اساسی است. همچنین زدودن و خارج ساختن ذرات مرکب کوچکتر از ۴۰ میکرون با رعایت جنبه‌های اقتصادی نیز مورد توجه سازندگان کاغذ می‌باشد. نخستین مرحله مرکب‌زدایی در جریان خمیرسازی کاغذهای باطله انجام می‌شود. زمانی که کاغذهای باطله در آب پراکنده می‌شوند، ذرات مرکب از الیاف جدا شده و در محیط پخش می‌شوند. مهم‌ترین اهداف مرحله خمیرسازی عبارتند از: ۱- جداسازی ذرات مرکب از الیاف به طور مناسب به منظور خارج‌سازی بعدی آن‌ها (یعنی متوسط اندازه ذرات مرکب و توزیع آن‌ها باید کنترل شود). ۲-

- ¹ Letterpress
- ² Offset
- ³ Rotogravure

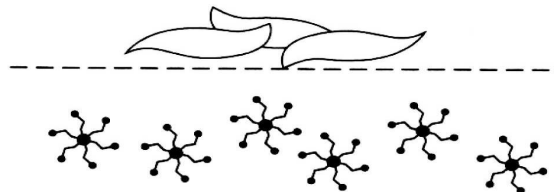


ذرات الیاف و جوهر در داخل آب

اضافه کردن پراکنده‌سازها



الیاف شسته شده



شکل ۱- طرح شمایی فرآیند جوهرزدایی به وسیله سازوکار شستشو [۵].

۶-۲- مرکب‌زدایی با شناورسازی، سازوکار عوامل واکنش

شناورسازی یک فرآیند شیمیایی- مکانیکی است که پس از تزریق هوا به داخل سلول‌های شناورسازی، حباب‌های هوا به ذرات آب‌گریز مرکب می‌چسبند و پس از انتقال آنها به سطح سلول شناورسازی از سیستم خارج می‌شوند (شکل ۲). آب‌گریزی ذرات مرکب با استفاده از مواد شیمیایی جمع‌کننده تحقق می‌یابد. این ترکیبات شامل: نمک‌های قلیایی اسیدهای چرب و انواع مختلف صابون می‌باشند که بر روی سطح ذرات مرکب قرار می‌گیرند و با جذب بخش آب‌گریز ترکیبات مرکب، بخش آب‌دوست آن را به سمت آب جهت داده، در نتیجه ذرات مرکب پوشیده شده با مواد فعال‌ساز سطحی خاصیت آب‌دوستی پیدا کرده و به آسانی از الیاف جدا می‌شوند. مولکول‌های صابون پس از ترکیب با عوامل سخت‌کننده آب همچون کلسیم و منیزیم منجر به نشست ذرات مرکب پراکنده شده بر روی حباب‌های هوا می‌شوند. در نتیجه صابون به عنوان یک ماده جمع‌کننده عمل می‌کند. حباب‌های هوا ذرات مرکب را به سطح دوغاب منتقل کرده و لایه کف ماندنی را در سطح آن تشکیل می‌دهد. سپس این کف با عمل مکش در سیستم خارج می‌شود. علاوه بر صابون‌های متداول همچون نمک اسید چرب، از مواد فعال‌ساز سطحی غیریونی سنتزی نیز به عنوان جمع‌کننده ذرات مرکب و یون‌های کلسیم و منیزیم استفاده می‌شود [۱۴-۱۵]. کارایی سیستم شناورسازی همانند روش شستشو به اندازه مرکب و عوامل فیزیکی- شیمیایی بستگی دارد. روش شناورسازی برای خارج کردن ذرات بزرگ‌تر مرکب موثرتر از روش شستشو است. این در حالی است که روش شستشو ذرات با اندازه ۱۰-۵ میکرون را به خوبی جدا و خارج می‌کند و با افزایش اندازه ذرات مرکب کارایی جداسازی کاهش می‌یابد. بازده الیاف حاصل از روش شناورسازی به کیفیت دوغاب خمیر و مواد شیمیایی مصرف شده بستگی دارد و در مقایسه با روش شستشو این بازده بیشتر و حدود ۸۵٪-۹۰٪ می‌باشد. مهم‌ترین عوامل فیزیکی موثر در کارایی شناورسازی عبارتند از: اندازه و چگالی ذرات، اندازه حباب‌های هوا، غلظت و دمای دوغاب خمیر کاغذ، سرعت جریان دوغاب و زمان شناورسازی. از مهم‌ترین عوامل شیمیایی تأثیرگذار بر کارایی روش شناورسازی می‌توان به pH دوغاب خمیر کاغذ و عوامل شیمیایی کف‌ساز و جمع‌کننده اشاره کرد [۷-۱۵]. شناورسازی بهترین روش برای زدودن ذرات آب‌گریز است که ترجیحاً خود را به حباب‌های هوا می‌چسبانند. در روش شناورسازی ذرات بزرگ‌تری نسبت به روش شستشو جداسازی می‌شوند، که معمولاً دامنه ابعادی ۲۵۰-۱۰ میکرومتر را دارا می‌باشند. برخی از سیستم‌های شناورسازی حتی توانایی زدودن ذراتی با قطر بالای ۵۰۰ میکرومتر را نیز دارا می‌باشند. موثرترین عملکرد شناورسازی موقعی است که اندازه ذرات مرکب بین ۲۰ الی ۴۰ میکرون بوده و زاویه تماس بین آب و ذرات مرکب ۹۰ درجه باشد به عبارت دیگر در شناورسازی نیاز به ذرات آب‌گریز می‌باشد. ذرات مرکب‌های چاپ افسست، لترپرس و روتوگراور به صورت ذاتی آب‌گریز هستند که به طور موثر و کارآمد با روش شناورسازی حذف می‌شوند. برای موفقیت شناورسازی باید ذرات مرکب لخته شوند و توده‌های بزرگ‌تری را تشکیل دهند. سطح آب‌گریز این ذرات توده

در این روش دوغاب محتوی الیاف و مرکب را به طور متوالی رقیق و غلیظ می‌کنند و در هر مرحله تغلیظ، مرکب و سایر ذرات ریز را خارج کرده و الیاف و بخش باقیمانده مرکب بر جای می‌مانند. تجهیزات مختلف شستشو عبارتند از: تغلیظ‌کننده‌ها^۱، غربال‌های سایدهیل، پرس‌های پیچی و پرس‌های توری. شرایط عملیاتی و غلظت دوغاب در هر یک از سیستم‌های شستشو متفاوت می‌باشد. غربال‌های سایدهیل و تغلیظ‌کننده‌های ثقلی در غلظت کم، پرس‌های مورب و صافی‌های خلأ در غلظت متوسط و پرس‌های پیچی در غلظت‌های زیاد کارایی دارند. متداول‌ترین سیستم مرکب‌زدایی به روش شستشو، استفاده از تغلیظ‌کننده‌ها می‌باشد. کارایی مرکب‌زدایی به روش شستشو به اندازه ذرات مرکب و ضخامت لایه نمدی الیاف به‌دست آمده در هر مرحله آب‌گیری بستگی دارد. لایه نمدی در ابتداء بر روی صافی و یا توری مناسب با منافذ باز تشکیل می‌شود. در این مرحله درصد خروج مرکب زیاد است و پس از تشکیل لایه نمدی الیاف و فشرده شدن آن از خروج مرکب کاسته می‌شود. در بسیاری از سیستم‌های شستشوی صنعتی به منظور به حداقل رساندن مصرف آب، از سیستم‌های شستشوی با جریان مخالف استفاده می‌کنند که جریان آب شوینده مخالف با جریان حرکت خمیر کاغذ می‌باشد. در این سیستم برای رقیق‌سازی، از آب تازه و یا آب تمیز بازگردانده شده قبل از آخرین مرحله شستشو استفاده می‌شود. پساب حاصل از شوینده اول به واحد تصفیه فرستاده شده و پساب حاصل از شوینده دوم به واحد خمیرسازی هدایت می‌شود. استفاده از آب تازه پیش از مرحله شستشو برای رقیق‌سازی از جنبه‌های اقتصادی و زیست محیطی مقرون به صرفه و مناسب نیست. برای پراکنده ساختن مرکب و جلوگیری از رسوب مجدد آن بر روی الیاف از مواد شیمیایی همچون پاک‌کننده‌ها و حلال‌های مختلف استفاده می‌شود. دوغاب خمیر مرکب‌زدایی شده اساساً متشکل از الیاف است، چون پرکننده‌ها و نرمه‌ها به همراه مرکب در جریان شستشو خارج می‌شوند. بازده مرحله شستشو به نوع تجهیزات، ماهیت و کیفیت کاغذ بستگی دارد و معمولاً در محدوده ۷۵٪-۹۰٪ است. برای جداسازی مرکب از آب و الیاف از وسایل مختلفی استفاده می‌شود. شستشوی موثر زمانی روی می‌دهد که اندازه ذرات مرکب بین ۱۵-۱۰ میکرون باشد، در حالی که ذرات مرکب بین ۵-۰/۵ میکرون به طور موثرتری خارج می‌شوند. در سیستم شستشو به هنگام خارج شدن آب، ذرات درشت مرکب بین توده الیاف‌گیر کرده و کارایی مرحله شستشو را کاهش می‌دهند. بنابراین روش شستشو در مورد ذرات مرکب چاپ افسست و لترپرس که به خوبی پخش می‌شوند مناسب می‌باشد [۵]. مرکب‌زدایی با روش شستشو برای زدودن ذرات بسیار ریز به ویژه در مواردی که نرمه‌ها، پرکننده‌ها و مواد چسبناک وجود دارند بسیار مفید می‌باشد. همچنین مرکب‌زدایی با روش شستشو در مورد ذرات آب‌دوست عملکرد مطلوبی دارد. یکی از بزرگ‌ترین معایب مرکب‌زدایی با روش شستشو، کاهش کارایی و بازده آن در مواقعی است که ذرات مرکب درشت هستند. هر چه ذرات مرکب در مرکب‌زدایی درشت‌تر باشند به مراتب بازده مرکب‌زدایی با روش شستشو نیز کاهش می‌یابد [۱۳].

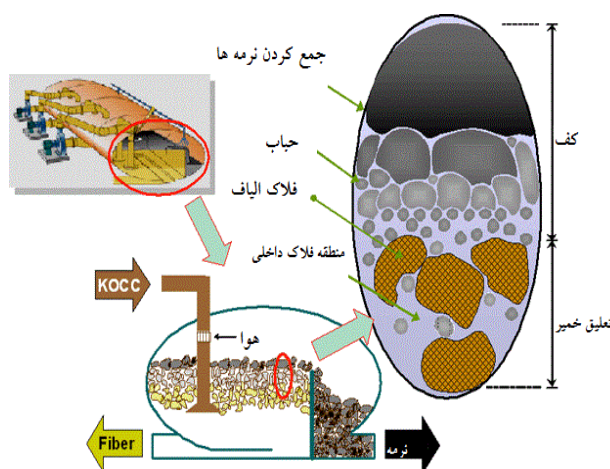
^۱ Deckers

لیزری، تعداد ذرات مرکب در هر گرم الیاف بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ است. در حالی که در خمیر بازیافتی حاصل از کاغذ روزنامه و مجله باطله که در آن ذرات مرکب به سهولت پراکنده می‌شوند، در هر گرم الیاف تا حدود 200×10^6 ذره مرکب دارد [۵]. در فرآیند مرکب‌زدایی متداول مواد شیمیایی زیادی مصرف شده و موجب می‌شود که این فرآیند به لحاظ زیست‌محیطی مخرب باشد. گذشته از برطرف شدن معایب مرکب‌زدایی شیمیایی، مرکب‌زدایی آنزیمی توجهات زیادی را به خود جلب کرده است، چون که این فرآیند می‌تواند ذرات مرکب را از الیاف بدون آزاد کردن زیاد مواد آلاینده خارج کند [۱۶]. از دیگر معایب روش مرکب‌زدایی شیمیایی مصرف مواد شیمیایی زیاد آن از قبیل سیلیکات‌ها، هیدروکسید سدیم و غیر می‌باشد. برای مثال سیلیکات‌ها گاهی اوقات باعث ایجاد رسوب و یا ته‌نشست‌های نامطلوب در سیستم کاغذسازی می‌شوند. همچنین زرد شدن الیاف خمیرهای مکانیکی در pH بالا و نیز بالا بودن قیمت مواد شیمیایی مورد استفاده در این روش از موانع آن به شمار می‌آید. همچنین تیمار با هیدروکسید سدیم سبب تجزیه همه سلولزها و لیگنین موجود در الیاف می‌شود و در نتیجه میزان اکسیژن خواهی شیمیایی (BOD) در سیستم پساب کارخانه افزایش می‌یابد. در نهایت استفاده بیش از اندازه از مواد فعال سطحی سبب اختلال در عمل آهارزنی کاغذ، تشکیل اسید، خوردگی و کف در کاغذسازی و سیستم تیمار پساب می‌شود. جدول ۱ مقایسه عوامل کیفی مرکب‌زدایی به روش شستشو با روش شناورسازی نشان می‌دهد. در این جدول روش شستشو و شناورسازی از نظر عملیات فرآیند، کیفیت خمیر مرکب‌زدایی شده و کیفیت چاپ‌پذیری با همدیگر مقایسه شده‌اند [۱۵-۱۳].

۴-۶- مرکب‌زدایی آنزیمی^۳

مرکب‌زدایی و خارج کردن آلاینده‌ها، موانع عمده در بازیافت کاغذ می‌باشند. مرکب‌های تونر پلی‌مرهای پلاستیکی بوده که با الیاف ترکیب شده‌اند و دارای خاصیت ارتجاعی می‌باشند. مرکب‌های لیزری و فلکسو گرافیک برعکس مرکب‌های قابل پخش که در روزنامه و چاپ افست یافت می‌شوند، در آب پخش نشده و به سختی از الیاف خارج می‌شوند. ذرات مرکب باقیمانده در خمیر کاغذ روشنی کاغذ را کاهش می‌دهد. اخیراً استفاده از آنزیم‌هایی مثل سلولاز، زایلاناز یا پکتیناز به عنوان یک روش پیشرفته و نوین اجرا شده است به طوری که این ترکیبات به طور انتخابی می‌توانند لایه‌های بیرونی الیاف سلولزی را جهت آزاد کردن مرکب از سطح الیاف آبکافت کنند. در مرکب‌زدایی به روش آنزیمی، آنزیم‌ها به خود مرکب یا به سطح الیاف حمله‌ور می‌شوند و سازوکار عمده این عمل مبتنی بر سست کردن اتصالات ذرات مرکب و الیاف و حذف ذرات ریز و فیبریل می‌باشد. استفاده از آنزیم درصد خروج مواد آلاینده و کارایی فرآیند مرکب‌زدایی را افزایش می‌دهد. آنزیم‌ها مواد شیمیایی زنجیره‌ای می‌باشند که جدا شدن ذرات مرکب چاپ را از سطح الیاف افزایش می‌دهند.

شده توسط صابون‌ها یا سایر مواد فعال‌کننده سطح به صورت آب‌دوست در آمده و از الیاف کاغذ جدا می‌شوند [۱۵].



شکل ۲- طرح شمایی فرآیند جوهرزدایی به وسیله سازوکار شناورسازی [۱۰].

ذراتی که به صورت ذاتی آب‌دوست هستند مثل الیاف خمیر و نرمة‌های الیاف را نمی‌توان با روش شناورسازی جدا و حذف نمود که این جزء معایب این روش می‌باشد. این گونه ذرات با داشتن سطح آب‌دوست و زاویه تماس صفر درجه با آب، به خوبی خیس شده و در این حالت در مایع خمیر باقی می‌ماند. ذرات مرکب با اندازه کوچک‌تر ۱۰ میکرون، علی‌رغم جدا شدن از الیاف، به وسیله روش شناورسازی قابل حذف نیستند زیرا به دلیل اندازه کوچک خود مجدداً درون حفره‌های سلولی الیاف رسوب کرده و حذف آن‌ها در این حالت بسیار مشکل است. ثابت شده است که با کاهش اندازه ذرات مرکب، مقدار رسوب مجدد آنها روی الیاف و درون حفره‌های سلولی افزایش می‌یابد [۱۱].

۳-۶- مرکب‌زدایی شیمیایی^۱

مرکب‌زدایی شیمیایی در pH قلیای برای طیف گسترده‌ای از مرکب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. خروج ذرات مرکب در مرکب‌زدایی شیمیایی با استفاده از مواد شیمیایی، حرارت و انرژی مکانیکی صورت می‌گیرد. هنگامی که مرکب از الیاف جدا شد، می‌توان با توجه به تفاوت‌های فیزیکی و شیمیایی آن با الیاف، آن را از الیاف خارج کرد. بخشی از مرکب را با تمیزکننده‌های معمولی می‌توان جدا کرد در حالی که بخش عمده آن در واحدهای ویژه شستشو و شناورسازی از خمیر کاغذ خارج می‌شوند. شستشو یک فرآیند کاملاً مکانیکی است، در حالی که شناور سازی متکی بر فرآیندهای شیمیایی و مکانیکی است. روش مرسوم دیگر، روش تلفیقی شستشو- شناورسازی می‌باشد که مزیت‌های هر دو روش فوق را دارا می‌باشد. در این روش ذرات ریز با شستشو و ذرات درشت با شناورسازی از الیاف جدا می‌شوند. گاهی اوقات مرکب‌زدایی با استفاده از روش متداول در مورد کاغذهایی که به‌وسیله مرکب تونر چاپ شده باشند، مشکل است، مخصوصاً مرکب چاپ تونر و بدون تماس که سبب پیدایش ذرات مرکب درشت می‌شوند. در خمیر کاغذ حاصل از کاغذهای باطله چاپ شده با چاپگر

² Biochemical oxygen demand

³ Enzymatic deinking

¹ Chemical deinking

جدول ۱- مقایسه کیفی روش شستشو با روش شناورسازی [۱۲].

| شستشو | | | عملیات فرآیندی |
|---------------------------|-----------------|--------------|------------------------|
| درصد خشکی زیاد | درصد خشکی متوسط | درصد خشکی کم | |
| مشابه | مشابه | بیشتر | مصرف آب |
| کمتر | کمتر | کمتر | بازده |
| کمتر | کمتر | کمتر | هزینه کلی مواد شیمیایی |
| کمتر | کمتر | مشابه | فضای مورد نیاز |
| بیشتر | بیشتر | بیشتر | کنترل فرآیند |
| بیشتر | بیشتر | بیشتر | ثبات فرآیند |
| کیفیت خمیر مرکب‌زدایی شده | | | کیفیت چاپ پذیری |
| بیشتر | بیشتر | بیشتر | |
| بیشتر | بیشتر | بیشتر | درجه روانی |
| بیشتر | بیشتر | بیشتر | حذف خاکستر |
| بیشتر | بیشتر | بیشتر | مقاومت کششی |
| بیشتر | بیشتر | بیشتر | مقاومت به پاره شدن |
| بیشتر | بیشتر | بیشتر | مقاومت به ترک‌یدن |
| بیشتر | بیشتر | بیشتر | حجمی |
| کمتر | کمتر | کمتر | ماتی |
| بیشتر | بیشتر | بیشتر | سرعت زهکش آب |
| کنترل شده | کنترل شده | کنترل شده | کنترل مقدار نرمه‌ها |
| بیشتر | بیشتر | بیشتر | مقاومت‌تر |
| کمتر | کمتر | کمتر | مسدودشدن نمدها |
| کمتر | کمتر | کمتر | تولید گردوغبار |
| کمتر | کمتر | کمتر | کنده‌شدن الیاف از سطح |

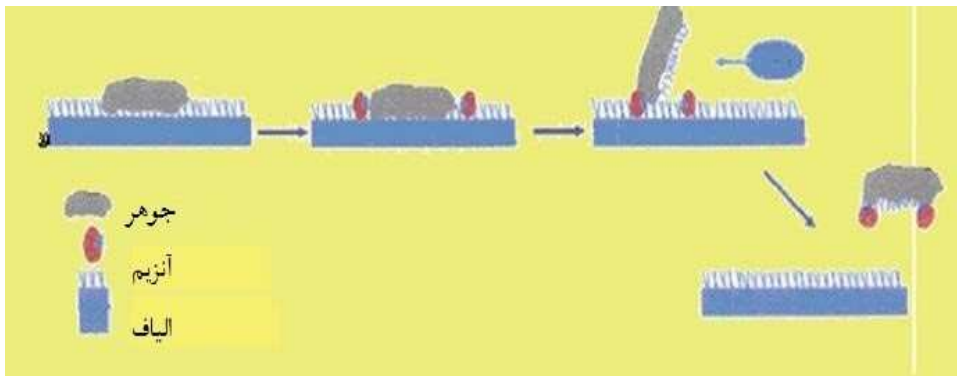
لحاظ مواد شیمیایی مصرفی، مرکب‌زدایی با روش‌های متداول نیاز به مواد شیمیایی بیشتری دارد و با استفاده از روش مرکب‌زدایی آنزیمی، استفاده از این مواد شیمیایی در جهت حفظ محیط زیست کاهش می‌یابد. از مزایای مرکب‌زدایی آنزیمی اقتصادی بودن آن نسبت به مرکب‌زدایی متداول شیمیایی، مقرون به صرفه بودن و کارایی بیشتر آن می‌باشد. از دیگر فواید مرکب‌زدایی آنزیمی می‌توان به پروفیل فعالیت، پایداری و موثر بودن به لحاظ اقتصادی اشاره کرد [۱۷-۱۶]. همچنین پساب حاصله از مرکب‌زدایی آنزیمی نسبت به روش‌های متداول از آلودگی کمتری برخوردار است و عوامل زیست تخریب پذیر آن نیز کمتر می‌باشد. آنزیم‌ها طی فرآیند مرکب‌زدایی می‌توانند هم به مرکب و هم به سطح الیاف حمله کنند. معمولاً ذرات مرکب بر مبنای روغن گیاهی می‌توانند به طور مستقیم به وسیله لیپاز و استراز تخریب شوند، در حالی که سطوح یا اتصالات الیاف در نزدیکی ذرات مرکب می‌تواند توسط سلولاز، همی سلولاز، پکتیناز و آنزیم‌های تجزیه کننده لیگنین تغییر یابد. در نتیجه ذرات مرکب آزادانه‌تر به وسیله شستشو یا شناورسازی خارج می‌شوند. اگر چه مرکب‌زدایی با سلولاز و همی سلولاز صنعتی شده‌اند، اما آنزیم‌های مطلوب و مؤثرتری را باید برای مرکب‌زدایی بررسی کرد [۱۷، ۱۸].

همچنین این ترکیبات موجب می‌شوند که مرکب چاپ به ذرات کوچک‌تری شکسته شود که در نتیجه ذرات حاصله می‌توانند خیلی راحت‌تر شناورسازی شوند. گزارشات نشان می‌دهند که آنزیم‌ها مقاومت کاغذهای ساخته شده از الیاف بازیافتی را افزایش داده و میزان آب‌گیری خمیر را بهبود می‌بخشند. از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر مرکب‌زدایی آنزیمی می‌توان به دما، pH، نوع آنزیم، مواد ورودی به سیستم، غلظت ترکیبات کاغذ، زمان واکنش و عمل مکانیکی در طی خمیرسازی نام برد. عمل آنزیم در مرکب‌زدایی تحت تأثیر اجزای تشکیل‌دهنده کاغذ قرار می‌گیرد. الیاف شیمیایی نسبت به الیافی که به‌طور مکانیکی خمیرسازی شده‌اند، حساس‌تر می‌باشند. به دلیل اینکه در الیاف مکانیکی مقدار لیگنین بیشتری باقی مانده است و این الیاف نسبت به آنزیم سلولاز خیلی مقاوم‌تر می‌باشد. بنابراین بهترین کاربرد فناوری آنزیم در بازیافت کاغذهایی است که به‌طور شیمیایی تولید شده‌اند مثل مخلوط کاغذهای بازیافتی اداری. آنزیم‌های تثبیت شده محلول در آب در بین آنزیم‌های مورد استفاده در بخش مرکب‌زدایی، موجب جداسازی درصد زیادی از مرکب شده و خمیر کاغذهای پر بازدهی را نتیجه می‌دهند. این آنزیم‌ها از لحاظ تئوری می‌توانند از خمیر کاغذ جدا شوند و دوباره به فرآیند مرکب‌زدایی برگردند. از

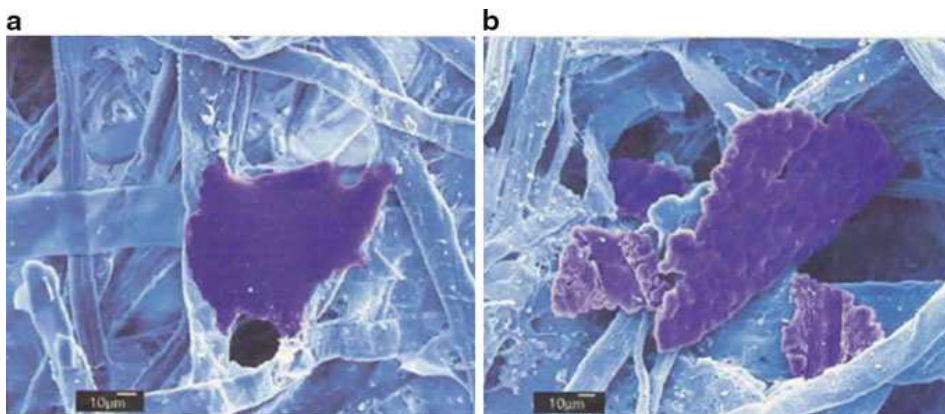
۱-۴-۶- سازوکار مرکب‌زدایی آنزیمی

سازوکاری باشد که موجب شکسته شدن مرکب چاپ به ذرات کوچک‌تر و جداسازی آن‌ها از الیاف شود. نقش اصلی سلولاز برداشتن ذرات مرکب از سطح الیاف می‌باشد و تأثیر آن بستگی به عمل مکانیکی در فرآیند خمیرسازی دارد تا اینکه ذرات مرکب از سطح الیاف کنده شوند و با عمل شناورسازی خارج شوند. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که ترکیب عمل مکانیکی در طی خمیرسازی و فعالیت آنزیم خیلی مهم می‌باشد. آنزیم انرژی مکانیکی لازم جهت گرفتن مقدار تونر باقیمانده در خمیر کاغذ را کاهش می‌دهد (شکل ۴). افزودن مواد فعال‌ساز سطحی در مرحله خمیرسازی خیلی مهم می‌باشد، چون که این مواد سطح الیاف را مرطوب ساخته و مشکلات مربوط به وجود آهار در کاغذ را برطرف می‌سازند. آهارها مواد شیمیایی هستند که جهت تراوش مرکب به کاغذ اضافه می‌شوند. این مواد، سطح کاغذ را آب‌گریز می‌سازند و برای عمل آنزیم مناسب نمی‌باشند [۲۲-۱۹]. با توجه به نوع کاغذ باطله، نوع روش چاپ، نوع کاربرد مورد انتظار از کاغذ مرکب‌زدایی، یکی یا ترکیبی از روش‌های مرکب‌زدایی برای حذف مرکب از کاغذ مورد استفاده می‌گیرد.

سازوکار مرکب‌زدایی آنزیمی و استقرار یک جریان بهینه جهت تحقق بخشیدن به روش مرکب‌زدایی آنزیمی مهم می‌باشد. آنزیم سلولاز به چند طریق ممکن می‌تواند کارایی مرکب‌زدایی را افزایش دهد (شکل ۳). اولاً آنزیم سلولاز می‌تواند با کاهش کشش هیدرودینامیکی موجب افزایش سرعت زلال‌سازی و شناورسازی شود. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین درصد خروج مرکب تونر در قسمت شناورسازی دیده می‌شود. آنزیم سلولاز سرعت آب‌گیری را افزایش داده و با این کار فرآیند جداسازی مرکب مثل شناورسازی و زلال‌سازی تشدید می‌گردد. همچنین این آنزیم ممکن است با کاهش سطح ویژه الیاف موجب کاهش برهم‌کنش با آلاینده‌ها شود. سطح الیاف در طی مرحله خمیرسازی باید تا حد امکان به‌طور مطلوبی در تماس با آب قرار گیرد تا تاثیر فعالیت آنزیم افزایش یابد. همچنین برای رقیق‌سازی آنزیم‌ها آب زیادی لازم است تا آنها با تمام سطوح الیاف تماس خوبی داشته باشند و تأثیر آنها در جداسازی مرکب افزایش یابد. آنزیم‌های سلولاز، الیاف سلولزی و آنزیم‌های لیپاز گروه‌های استری را آبکافت و تخریب می‌کنند. این آبکافت و تخریب شاید



شکل ۳- شمای نحوه واکنش آنزیم سلولاز بر روی الیاف و جداسازی ذرات مرکب [۱۰].



شکل ۴- مرکب‌زدایی با روش سنتی (a) و مرکب‌زدایی با استفاده از آنزیم (b) [۱۰].

جدول ۲- مقایسه روش‌های مختلف مرکب‌زدایی کاغذ باطله / ۱۵، ۱۲، ۱۰، ۵٪.

| روش مرکب‌زدایی | ویژگی | مزایا | معایب |
|----------------|--|--|---|
| روش شستشو | <ul style="list-style-type: none"> یک فرآیند هیدرولیکی است حذف ذرات مرکب ریز بین ۱۰ تا ۱۵ میکرون قابل استفاده برای مرکب‌هایی که قابلیت پخش خوبی دارند مانند مرکب چاپ افست و لترپرس کارایی آن به اندازه ذرات مرکب و ضخامت لایه نمدی الیاف بستگی دارد ذرات آبدوست را می‌توان با این روش حذف کرد | <ul style="list-style-type: none"> بازده ۷۵ تا ۸۵٪ مناسب برای حذف ذرات ریز مرکب علاوه بر مرکب باعث حذف آلاینده‌های حل شده و کلوییدی می‌شود در دامنه وسیعی از درصد خشکی کاربرد دارد دارای خواص نوری و مقاومتی بهتر از فرآیند شناورسازی خروج مواد معدنی قابل کنترل است | <ul style="list-style-type: none"> قابلیت حذف ذرات مرکب درشت را ندارد مصرف آب آن زیاد است دارای حجم پساب زیادی است نیاز به تجهیزات و مکان اضافی کیفیت چاپ نسبت به روش شناورسازی کمتر پشت نمایی کاغذ حاصله از روش شستشو نسبت به شناورسازی کمتر است بازده کمتر نسبت به شناورسازی |
| روش شناورسازی | <ul style="list-style-type: none"> یک فرآیند شیمیایی - مکانیکی است مبتنی بر دمیدن هوا به داخل سوسپانسیون است لازم به آب‌گریز کردن ذرات مرکب حذف ذرات آب‌گریز حذف ذرات درشت بین ۱۰ تا ۲۵۰ میکرون مناسب برای حذف ذرات مرکب چاپ شده به وسیله چاپ روتوگراور، افست و لترپرس | <ul style="list-style-type: none"> بازده ۸۵ تا ۹۰٪ قابلیت حذف ذرات درشت بازده آن از روش شستشو بیشتر است ارزان‌تر بودن مواد شیمیایی قابل استفاده مشکلات پساب کمتر مصرف آب کمتر نسبت به شستشو به دلیل بسته بودن سیستم حساسیت کمتر نسبت به اندازه مرکب پشت نمایی کاغذ حاصله از آن بالاست | <ul style="list-style-type: none"> قابلیت حذف ذرات مرکب خیلی ریز را ندارد فضای مورد نیاز بیشتر نسبت به روش شستشو خواص مقاومتی و نوری کاغذ حاصله آن از روش شستشو کمتر است مسدود شدن منافذ توری ماشین کاغذ |
| روش آنزیمی | <ul style="list-style-type: none"> حذف مرکب با استفاده از آنزیم آنزیم یا با الیاف کاغذ واکنش می‌دهد یا با مرکب چاپ واکنش می‌دهد مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر مرکب‌زدایی آنزیمی دما، pH، نوع آنزیم، مواد ورودی به سیستم، غلظت ترکیبات کاغذ، زمان واکنش و عمل مکانیکی در طی خمیرسازی می‌باشند | <ul style="list-style-type: none"> این روش دوست‌دار محیط زیست است و پساب حاصل از آن آلودگی بسیار کمی دارد عدم نیاز آن به تجهیزات و فضای اضافی قابل استفاده در خمیرساز برای سطح اندک مرکب باقی‌مانده در کاغذ روش مناسبی می‌باشند مقاومت کاغذ حاصله و آب‌گیری از خمیر بهبود می‌یابد مصرف کمتر مواد شیمیایی قابلیت حذف مرکب‌هایی که با روش اکسایشی خشک شده‌اند | <ul style="list-style-type: none"> الیاف کاغذ را تخریب می‌کنند ذرات مرکب را خیلی ریز می‌کند به طوری که قابل حذف به وسیله روش شناورسازی نیستند ذرات ریز شده به درون الیاف رسوب می‌کنند هزینه‌های عملیاتی آن بالاست |

دارد که راهکارهای مختلفی برای جبران این کمبود ارائه شود و در صورتی که از لحاظ فنی و اقتصادی مناسب باشند، مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین توجه و بررسی امکان استفاده از فرآیند بازیافتی مرکب‌زدایی کاغذهای باطله امری بسیار ضروری است. الیاف بازیافتی یکی از مهم‌ترین منابع برای کاغذ تیشو، کاغذ روزنامه و کاغذ چاپ هستند. مرکب‌زدایی آنزیمی نشان داده است که یک جایگزین بسیار مناسب برای مرکب‌زدایی شیمیایی است. آنزیم‌هایی که به طور گسترده برای مرکب‌زدایی استفاده می‌شود سلولاز، آمیلاز و لیپاز هستند. بخش قابل توجهی از مخلوط کاغذ باطله اداری محتوای نشاسته است که به عنوان آهاردهی در کاغذ استفاده می‌شود. آمیلاز به طور موثر می‌تواند

جدول ۲ به ویژگی، مزایا و معایب روش‌های مختلف مرکب‌زدایی اشاره می‌کند.

۷- نتیجه‌گیری

طی سال‌های اخیر با توجه به کاهش روزافزون منابع جنگلی، بازیافت کاغذهای باطله به عنوان یکی از روش‌های تأمین مواد اولیه سلولزی مناسب برای صنایع کاغذسازی به طور جدی مورد توجه قرار گرفته است. در ایران با توجه به مشکلات عمده‌ای که در رابطه با محدودیت سطح جنگل‌های شمال کشور و افزایش روند تخریبی آنها وجود دارد، تأمین مواد اولیه مورد نیاز از این جنگل‌ها امکان‌پذیر نبوده است. لذا ضرورت

داده‌اند. افزایش آگاهی‌های زیست‌محیطی موجب توسعه مرکب‌های چاپ بر پایه روغن‌های سبز شده است. استفاده از لیپاز اثبات کرده است برای مرکب‌زدایی روزنامه که مرکب آن بر پایه روغن‌های سبز است می‌تواند حذف مرکب قابل توجهی داشته باشد و روشنایی را بهبود بخشد.

اندازه ذرات نشاسته را کاهش دهد و از انتشار ذرات جوهر به سطح الیاف جلوگیری کند. انواع مختلف آمیلاز و سلولاز در طول مرکب‌زدایی به عنوان عوامل تمیزکننده سطح عمل می‌کنند. آنها الیاف ریز متصل به جوهر را تفکیک کرده و کارایی مرکب‌زدایی را افزایش می‌دهند. برای مرکب‌زدایی روزنامه کهنه سلولاز و لیپاز امیدوارکننده‌ترین نتایج را نشان

۸- مراجع

۱. ع. فیضی، "بازیابی کاغذ باطله"، جلسه بحث دوره کارشناسی، دانشکده جنگلداری و فناوری چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۱۳۷۶.
۲. س. منتظری، "تولید و ارزیابی خمیر کرکی (Fluff pulp) از باگاس"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۱۳۷۷.
۳. ع. برزن، "بررسی تأثیر کاغذ باطله بسته بندی در تولید مقوای کنگره‌ای"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۶.
۴. ف. شفیع‌زاده، "بررسی امکان استفاده از خمیر سودا و NSSC ساقه پنبه برای تولید کاغذ فلوتینگ در صنایع چوب و کاغذ مازندران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۱۳۷۸.
۵. ا. میرشکرایی، "راهنمای بازیافت کاغذهای باطله (تالیف کیت کتی، دیوید گست)"، انتشارات آبیژ، تهران، ۱۳۸۰.
6. U. Viesturs, M. Leite, A. Treimanis, M. Eisimonte, "Enzyme-improved recycling of laser-printed office waste paper", 20, 8, 384-393, 1999.
7. T. Mckinney, M. Hache, "Technology of paper recycling", Blackie Academic and Professional, UK, 401, 1991.
۸. م. رحمانی نیا، "تأثیر کهنگی کاغذ روزنامه بر قابلیت مرکب‌زدایی آن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، ۱۳۸۳، ۸-۱۴.
۹. قاسمیان و همکاران، "مرکب‌زدایی کاغذهای روزنامه و مجله باطله قسمت دوم: بررسی تأثیر استفاده از خمیر مرکب‌زدایی شده بر ویژگی‌های خمیر CMP داخلی"، مجله منابع طبیعی ایران، ۵۹ (۳)، ۱۳۸۵، ۷۴۰-۷۲۷.
10. B. Pratima, "Biotechnology for pulp and paper processing", New York: Springer, 426, 2012.
11. J. Gullichsen, H. Paulapuro, "Recycled fiber and deinking", 215, 2000.
۱۲. ع. قاسمیان، ع. خلیلی، "مبانی و روش‌های بازیافت کاغذ، انتشارات آبیژ، تهران، ۱۳۹۰، ۱۵۹.
۱۳. ف. سلطانی، ع. قاسمیان، ا. سرانیان، ح. رسالتی، "اثر خمیر کاغذ مرکب‌زدایی شده کاغذ مجله بازیافتی بر ویژگی‌های خمیر کاغذ CMP صنوبر دلتوئیدس، مجله پژوهش‌های علوم و فناوری چوب جنگل، ۲۰ (۱)، ۷۹-۹۱، ۱۳۹۲.
14. F. Hamilton, M. J. Kocurek, "Pulp and paper manufacture", 3, part 2, secondary fiber, 1983.
۱۵. م. ه. آریایی منفرد، ح. رسالتی، ف. زینلی، "ارزیابی تأثیر شناورسازی بر ویژگی‌های ظاهری خمیر کاغذ مرکب‌زدایی شده به روش شیمیایی و آنزیمی با استفاده از معادلات توانی معکوس، مجله پژوهش‌های علوم و فناوری چوب جنگل، ۱۹ (۴)، ۱۵۰-۱۳۷، ۱۳۹۱.
16. T. Welt, R. J. Dinus, prog., Paper recycle, www.sciencedirect.com, Access 2007, 1995.
17. S. Mitsuhiro, M. yasuyuki, "The study for the mechanism of enzymatic deinking", 19 (1), 285-296, 2000.
18. O. U. Heise, J. P. Unwin, J. H. Klungness, J. R. Fineran, W. G. Sykes, M. S. Abubakr, "Industrial scale-up of enzyme enhanced deinking of non-impact printed toners", Tappi Journal, 79(3):207-212, 1996.
19. D. Dienes, A. Egyházi, K. Réczey, "Treatment of recycled fiber with trichoderma cellulases", J. Ind. Crops Prod. 20, 11-21, 2004.
20. Z. Yongli, "Using of mobilized enzymes to deink mixed office waste paper, 26(9), 387-394, 2002.
۲۱. مظفری جمنانی، "انواع کاغذ"، پروژه دوره کارشناسی، دانشکده جنگلداری و فناوری چوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۱۳۸۴.
22. Q. H. Xu, M. H. Qin, S. L. Shi, Y. J. Fu, "Structural changes in lignin during the deinking of old newsprint with laccase-violuric acid system", Enzyme Microb. Technol., 39, 969-975, 2006.
۲۳. ح. رسالتی، ح. آریایی، م. ه. منفرد، "مرکب‌زدایی آنزیمی کاغذ باطله اداری در مقایسه با روش متداول شیمیایی: بخش دوم- ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی کاغذ"، مجله پژوهش‌های علوم و فناوری چوب جنگل، ۱۹ (۱)، ۱۸۶-۱۷۵، ۱۳۹۱.