

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



عضویت در خبرنامه



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو



مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛ شبکه های توجه گرافی (Graph Attention Networks)



کارگاه آنلاین مقاله نویسی IEEE و ISI ویژه فنی و مهندسی



زیست فن آوری در کاهش آلودگی‌های پساب کارخانه‌های خمیر کاغذ

روزبه اسدی خوانساری^{۱*}، محمدرضا دهقانی فیروزآبادی^۲

دانشجوی دکتری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و مدرس گروه صنایع چوب و کاغذ دانشکده فنی و حرفه‌ای صومعه سرا
دانشیار گروه صنایع خمیر و کاغذ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

چکیده

با توجه به مصرف زیاد انرژی و مواد شیمیایی، صنعت کاغذ و خمیر کاغذ به عنوان یکی از عوامل آلوده کننده محیط زیست شناخته شده است ولی، زیست فن آوری فرصت‌های متعددی را برای تغییر وضعیت این صنعت به فرآیندهای کارآمدتر و سازگار با محیط زیست، ارائه داده است. اهمیت زیست فن آوری در صرفه جویی انرژی و سازگاری با محیط زیست می‌باشد. همواره تعداد کاربردهای امکان پذیر زیست فن آوری در ساخت کاغذ و خمیر کاغذ، افزایش می‌یابد. علاوه بر روش‌های خمیر سازی، رنگبری و اصلاح الیاف زیستی، مزایای دیگر زیست فن آوری به کاهش مشکلات آلودگی محیط زیست مربوط است، که شامل تخریب آلاینده‌ها، تیمار گازهای منتشر شده جهت حذف گازهای بودار و مدیریت مواد زائد جامد می‌باشد. روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیست فن آوری برای رنگ زدایی و سم زدایی فاضلاب خمیر کاغذ رنگبری شده، انجام می‌گیرد. عدم اطمینان، مشکل اساسی تیمارهای فیزیکی و شیمیایی است، ولی زیست فن آوری قابلیت از بین بردن یا کاهش بیشتر آلودگی‌ها را دارد. این روش به کمک تیمارهای باکتریایی (هوازی و بی‌هوازی)، تیمار قارچی و یا آنزیمی انجام می‌گیرد. فرآیندهای باکتریایی می‌توانند در کاهش ترکیبات لیگنین کلری با وزن مولکولی بالا، بسیار موثر باشند ولی در میان روش‌های زیستی، استفاده از فن آوری تیمار قارچ پوسیدگی سفید امیدوار کننده‌تر است. تلاش‌هایی نیز با استفاده از زیست توده قارچی، برای آماده سازی محیط کشت انجام شده است. تیمار باکتری در تخریب ترکیبات آلی کلری با وزن مولکولی کم، به طور قابل توجهی موثر است. تیمار با قارچ پوسیدگی سفید می‌تواند به عنوان پیش تیمار باکتریایی باشد و به منظور افزایش توانایی باکتری‌ها نسبت به حذف ترکیبات آلی کلردار و نیز در کاهش مقدار لیگنین کلری با وزن مولکولی بالاتر بکار رود. از آنجایی که حذف مواد آلی هالوژنی (AOX) در لیگنین کلری با وزن مولکولی بالا، اولویت دارد، پژوهش‌هایی در این باره نیز در حال انجام است.

واژه‌های کلیدی: خمیر کاغذسازی-فاضلاب-تصفیه زیستی-تیمار آنزیمی

۱- مقدمه

از نظر فیزیکی صنایع خمیر و کاغذ سازی یکی از بزرگترین صنعت‌ها در جهان می‌باشد. هر چند که صنعت کاغذ و خمیر کاغذ، به عنوان یکی از آلوده کننده‌ترین صنایع در نظر گرفته می‌شود، ولی یک فعالیت مهم اقتصادی در کشورهای سراسر جهان است. صنعت ساخت کاغذ و خمیر کاغذ، به آب بسیار زیادی نیاز دارد و در میان صنایع بزرگ ایالات متحده از نظر مصرف آب در رتبه سوم و در مشکلات آلودگی آب رتبه پنجم را، دارد. این مصرف آب، بسته به نوع کاغذ در حال تولید متغیر است. عملیات خمیرسازی، رنگبری و ساخت کاغذ، سه منبع عمده ایجاد فاضلاب می‌باشند. در بین فاضلاب‌های مختلف تولید شده توسط صنایع خمیر و کاغذ، آلوده‌ترین پساب در طرح رنگبری و به خصوص در فرآیندهای شیمیایی است. فاضلاب‌های رنگبری، مولد مواد رنگی و سمی در طبیعت هستند که حاوی مواد استخراجی و لیگنین کلری و غیر کلری می‌باشند. هنگام تخلیه این پساب‌ها به آب، به دلیل مواد رنگی، بهره وری اکوسیستم‌های آبی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این وضعیت، انتقال نور

*-1 (rasadikhansari@gmail.com)

-2 (m_r_dehghani@mail.ru)



خورشید را به تاخیر می‌اندازد و در نتیجه، از طریق اختلال در فتوسنتز، کارایی جامعه آبی را کاهش می‌دهد. مواد رنگی با یون‌های فلزی، مانند آهن، مس و سایر بازمانده‌های فلزی، ترکیبات پیچیده‌ای را تشکیل می‌دهند. این شرایط، تصفیه این آب را دشوار و پرهزینه می‌کند و ممکن است اثرات ممانعتی مستقیمی بر برخی از موجودات پایین زنجیره غذایی، داشته باشد. بنابراین راه‌های جدیدی برای استفاده از منابع جنگلی موثرتر و با عواقب زیست محیطی کمتر، نیاز است. روش‌های در حال ظهور زیست فن‌آوری^۱، مبتنی بر استفاده پایدار از منابع تجدید پذیر، نویدی برای جوان سازی و رشد صنایع خمیر و کاغذ است. در حقیقت، فن‌آوری زیستی مدتی است که در صنعت کاغذ استفاده می‌شود (Bajpai, ۲۰۰۶).

۲- کاربرد آنزیم‌ها در صنایع خمیر و کاغذ

در پاسخ به نگرانی‌های زیست محیطی، تا حد زیادی این تیمارهای زیستی، روند تشکیل محصولات آروماتیک کلری شده در طی رنگبری خمیر، را کاهش می‌دهد، که در ابتدا با کاهش مقدار لیگنین باقی مانده در خمیر کاغذ و سپس با تبدیل آن‌ها به مواد دیگر، رنگبری صورت می‌گیرد. در جهت این اهداف، فن‌آوری آنزیمی بر پایه زیلائانازهای میکروبی، از طریق کاهش یا حتی حذف نیاز به کلر در تولید انواع کاغذ چاپ و تحریر، به فرآیندهای بدون عنصر کلر^۲ (ECF) و کاملاً بدون کلر^۳ (TCF)، کمک کرده است (Viikari و همکاران، ۲۰۰۲). آنزیم‌ها در رسیدن به اهداف زیست محیطی و همچنین در سایر موارد صنعتی، کاربرد داشته‌اند و با کاهش هزینه‌های موجود در جوهرزدایی، توانایی تولید کنندگان را برای بازیافت الیاف افزایش داده‌اند، در نتیجه تقاضای کمتری برای منابع چوبی حاصل شده است. آنزیم‌های تجاری به منظور کاهش هزینه‌های تولید کاغذ یا بهبود کیفیت محصول استفاده می‌شوند. لیپازها می‌توانند در کنترل انباشت قیر^۴ طی فرآیند تولید کاغذ از خمیرهایی با مقدار رزین بالا، نقش داشته باشند. همچنین آنزیم‌ها در حذف آلاینده‌ها در جریان بازیافت موثرند و می‌توانند تجمع مواد چسبناک و باقی‌مانده‌های قیر بر روی ماشین کاغذ، یا همان مواد چسبنده^۵ را کاهش دهند. آنزیم‌ها، جوهرزدایی کاغذ بازیافتی را تسهیل کرده و آبگیری^۶ خمیر را بهبود می‌دهند. زیلائانازها باعث صرفه جویی در هزینه‌های خرید مواد شیمیایی در صنعت کاغذسازی شده‌اند. تحولات اخیر در این فن‌آوری، توانایی بسیار مطلوب صنعتی را، در استفاده بهتر از تجهیزات و سرمایه، فراهم می‌سازد. استفاده آنزیم در بسیاری از برنامه‌های کاربردی دیگر نیز امکان پذیر است. این موارد، شامل حذف مواد شیمیایی قلیایی برای تمیز کردن ماشین آلات کاغذ، بهبود پخت کرافت، کاهش زمان پالایش، کاهش پسماندهای آوندی، تسهیل در تجزیه قارچی میکروبی، به‌گزینی در حذف اجزای الیاف، اصلاح خواص الیاف، افزایش انعطاف پذیری الیاف و پیوند کوالانسی زنجیره‌های جانبی یا گروه‌های عاملی می‌باشند (Zhang و Paice, ۲۰۰۵). بسیاری از برنامه‌های کاربردی تجاری شده زیست فن‌آوری، بر مبنای تولید آنزیم‌های صنعتی استوار است. البته باید بدانیم که آنزیم‌ها مبدا کاتالیزورهای طبیعت بوده، که واکنش‌های شیمیایی را پیش می‌برند؛ که در تمام موجودات زنده وجود دارند. آنزیم‌ها دارای خواص زیر هستند:

- در مقادیر بسیار کم موثر هستند یعنی چند مولکول آنزیم؛ هزاران واکنش در ثانیه را انجام می‌دهد.
- آنزیم‌ها بدون تغییر مانده و در واکنش مصرف نمی‌شود.
- انرژی فعال سازی واکنش را کاهش می‌دهند و در نتیجه سرعت واکنش را افزایش می‌دهند.
- در جهت یک واکنش بسیار خاص عمل می‌کنند.
- دارای دامنه خاصی از pH و درجه حرارت بوده و در آن شرایط فعال هستند.

بسیاری از این کاربردها، به حد مقیاس تجاری رسیده‌اند و یا در حال صنعتی شدن هستند. مصارفی از زیست فن‌آوری که با موفقیت به استفاده تجارتي دست یافته اند شامل: زیلائانازها برای تقویت رنگبری، سلولازها برای آبگیری بهتر، لیپاز برای

¹ - biotechnology

² - elemental chlorine free

³ - totally chlorine free

⁴ - pitch

⁵ - stickies

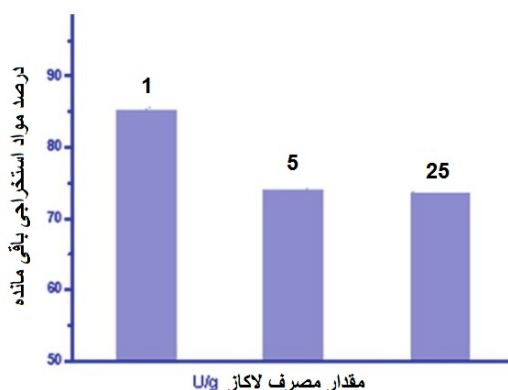
⁶ - drainage



حذف مشکل قیر، مخلوط سلولاز-همی سلولاز برای جوهر زدایی و اصلاح الیاف، استرآزها برای کنترل مواد چسبناک و لوآن هیدرولاز، پروتئازها، سلولازها، آمیلازها و غیره برای حذف لجن می‌باشند.

۳- آنزیم‌های اکسایشی در کاهش مواد استخراجی

نتایج امیدوار کننده‌ای در کاهش مواد آلاینده با استفاده از آنزیم‌های اکسایشی به خصوص، اثر آنزیم لاکاز با حضور مواد حد واسط ردوکس، بر روی چند نوع مواد استخراجی چربی دوست مثل اسیدهای چرب، اسیدهای رزینی، تری گلیسریدها و استرول‌های آزاد و توام، گزارش شده است. آنزیم‌های لاکاز خواص خود را، از قارچ‌های پوسیدگی سفید می‌گیرند و مثل حالت تخریب قارچ‌های چتری لیگنین هستند. این ترکیبات لاکاز می‌توانند، لیگنین باقی‌مانده را حذف کنند و همچنین تخریب سرسخت ترین اجزا مواد استخراجی خمیر کاغذ، مثل استرول‌ها و اسیدهای رزینی، را گسترش دهند. برای اولین بار Karlsson و همکاران، (۲۰۰۱) واکنش آنزیم لاکاز (از گونه‌های *Trametes*) بر روی اسیدهای چرب چند گانه غیر اشباع (۲۰٪ کاهش پس از ۴ ساعت) و اسیدهای رزینی توام (۲۹٪ کاهش)، را گزارش کردند. اثر مشابه (۳۵-۲۰٪ کاهش پس از ۳ ساعت) لاکاز روی تری‌لینوئین توسط Zhang و همکاران، (۲۰۰۲) گزارش شد. در واکنش تری‌لینوئین، محصولات غالب اکسایشی مونوهیدروپراکسیدها، بیس‌هیدروپراکسیدها و اپوکسی‌ها، بودند. به همین ترتیب بیش از ۳۰ درصد کاهش مواد استخراجی چربی دوست موجود در خمیر کاغذ TMP سوزنی برگ و نیز در آب‌های فرآیند، توسط پژوهشگران مختلف گزارش شد و Paice (۲۰۰۵) حذف ۸۵٪ مواد استخراجی خمیر کاغذ مکانیکی را، به وسیله تیمار لاکاز، گزارش کرد (شکل ۱).



شکل ۱- اثر تیمار لاکاز بر حذف مواد استخراجی خمیر مکانیکی (Paice، ۲۰۰۵)

همچنین Gutiérrez و همکاران، (۲۰۰۶) برای نخستین بار، جهت حذف مواد استخراجی چربی دوست خمیر کاغذ با منشاهای مختلف، کارآیی بالایی را در سیستم لاکاز-ماده حد واسط^۱ (LMS) گزارش کردند، و بدون در نظر گرفتن نوع فرآیند خمیرسازی، نوع ماده اولیه، یا طبیعت شیمیایی ترکیب مورد تخریب، مورد بررسی قرار گرفت و اختراع آن به ثبت رسید. این مطالعات نشان داد که، لاکاز حاصل از قارچ چتری *Pycnoporus cinnabarinus* با حضور ماده حد واسط HBT یا Hydroxybenzotriazole در حذف استرول‌های آزاد و توام (۱۰۰-۹۵٪ کاهش) خمیر کاغذ کرافت اکالیپتوس؛ تری گلیسریدها، اسیدهای رزینی، و استرول‌های (۱۰۰-۶۵٪ کاهش) خمیر TMP نوئل؛ و الکل‌های چرب، آلکان‌ها، و استرول‌های (۱۰۰-۴۰٪ کاهش) خمیر کاغذ سودای کتان، بسیار موثر بود. بررسی‌های بیشتر بر روی شیمی واکنش‌های سیستم لاکاز-حد واسط، در مواد استخراجی اصلی چربی دوست موجود در خمیر کاغذهای سوزنی برگ، پهن برگ و غیر چوبی و نیز چربی‌ها (شامل آلکان‌ها، الکل‌های چرب، اسیدهای چرب، اسیدهای رزینی، استرول‌های آزاد، استرول‌های تری گلیسریدها)

^۱ - laccase-mediator system



صورت گرفت و جهت درک بهتر الگوهای مشاهده شده تخریب در خمیر کاغذها، در طی این تیمار محصولات واکنش، شناسایی و تعیین شدند (Molina و همکاران، ۲۰۰۸). این مطالعات ثابت کرد که، در پایان ۲ ساعت تیمار لاکاز-HBT، مقادیر اولیه ترکیبات غیر اشیاعی مثل اسید آبتیک، تری لینولین، لینولیک و اسیدهای اولئیک، سیتوسترول، کلسترل پالمیتات، اولات و لینولات، ۶۰ تا ۱۰۰٪ کاهش داشتند. به همین ترتیب، پس از تیمار با لاکاز، کاهش ۴۰ تا ۲۰ درصدی این چربی‌های غیر اشیاع مشاهده شد، البته اسید آبتیک ۹۵٪ کاهش یافت ولی کلسترل پالمیتات و سیتوسترول تأثیری نپذیرفتند. تحقیق فوق تأکید کرد که، تیمار لاکاز به تنهایی، غلظت برخی از چربی‌های غیر اشیاع را کم می‌کند.

۴- پساب در خمیر کاغذ سازی زیستی

فرآیند خمیر کاغذ شیمیایی زیستی، میزان مصرف مواد شیمیایی پخت را می‌کاهد، ظرفیت پخت را افزایش می‌دهد یا کارایی پخت خمیر کاغذ را بیشتر می‌کند، در نتیجه مصرف مواد شیمیایی رنگبری کم می‌شود. افزایش لیگنین زدایی، به طور غیر مستقیم باعث صرفه جویی در مصرف انرژی و کاهش آلودگی می‌شود. بار آلودگی‌های تولید شده توسط خمیر کاغذ سازی زیستی، به طور قابل توجهی کمتر و خوش خیم‌تر از پساب کارخانه‌های رایج خمیر کاغذ CTMP است. در واقع، پساب خمیر کاغذ مکانیکی حاصل از تیمار قارچی با مواد سمی کمتری، همراه است. اگر چه، گاهی اوقات ممکن است اکسیژن خواهی زیست شیمیایی (BOD) و اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) این پساب‌ها، کمی بالاتر از پساب خمیر کاغذ تیمار نشده، باشد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که خمیر کاغذ سازی زیستی، سازگار با محیط زیست است. فن‌آوری خمیر کاغذ زیستی در سال‌های اخیر به سرعت پیشرفت کرده است و آزمایشات نیمه صنعتی و کارخانه‌ای آن، در سراسر جهان آغاز شده است (Reid و همکاران، ۲۰۱۰).

۵- اثر آنزیم‌ها بر مشخصات پساب جوهر زدایی آنزیمی

در مقایسه با فرآیند جوهر زدایی قلیایی رایج، COD در جوهر زدایی آنزیمی کمتر است، این موضوع بار سیستم‌های تصفیه فاضلاب را کاهش می‌دهد. پساب جوهر زدایی آنزیمی، ۲۰ تا ۳۰ درصد COD کمتری را نسبت به پساب حاصل از فرآیندهای جوهر زدایی شیمیایی دارد. با اجتناب از استفاده مواد قلیایی در مرحله خمیر سازی، مزایای متعدد زیست محیطی ایجاد می‌شود. در آب سفید سوسپانسیون خمیر کاغذ در جوهر زدایی کاغذ روزنامه، بار COD پس از واکنش، ۵ کیلوگرم به ازاء هر تن خمیر کاغذ جوهر زدایی است و زمانی که هیچ نوع ماده شیمیایی اضافه نشده باشد، به کمترین حد می‌رسد. با مصرف کل ترکیبات مواد شیمیایی در روش شاهد، به دلیل محیط قلیایی خمیر سازی بار COD به میزان ۲۲ کیلوگرم در هر تن، است. ولی برای خمیر کاغذ تیمار شده آنزیمی، بار COD به مقدار و نوع آنزیم بستگی دارد. متوسط بار COD، به مقدار ۱۱ کیلوگرم در هر تن برای ۰/۲٪ مصرف آنزیم به دست آمد. در مقایسه با روش جوهر زدایی قلیایی عادی، بار COD از یک تیمار با ۰/۲٪ آنزیم، ۵۰٪ کمتر بود. همچنین پیش تیمار زایلاناز، به علت کاهش مقدار کلر مورد نیاز جهت دستیابی به درجه روشنی حاصل شده، باعث تنزل در غلظت‌های دیوکسین و مواد آلی هالوژنی (AOX) پساب می‌شود. در مقایسه با خمیر کاغذهای رنگبری شده شاهد معمولی، مقدار ترکیبات AOX پساب خمیر کاغذهای پیش تیمار شده با زایلاناز، به طور قابل توجهی کمتر است (Bajpai, ۲۰۱۲).

۶- تیمار زیستی در پساب کارخانه کاغذ و خمیر کاغذ

ترکیبات آلی کلری و مشتقات لیگنینی حاصل از پساب رنگبری، سرسخت هستند و در طول زنجیره‌های غذایی اکوسیستم‌های آبرزی تجمع می‌یابند. پساب رنگبری، حاوی ترکیباتی با وزن مولکولی کم و به طور بالقوه مشکل ساز (سمی) است. آن‌ها توانایی نفوذ به غشاء یاخته و تمایل به انباشت زیستی را دارند و ترکیبات آلی کلری با وزن مولکولی کم، زیست شناسی اکوسیستم‌های آبرزی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. ناپدید شدن بی مهرگان اعماق دریا، شیوع بالای بیماری‌های ماهی و اثرات جهش زایی در



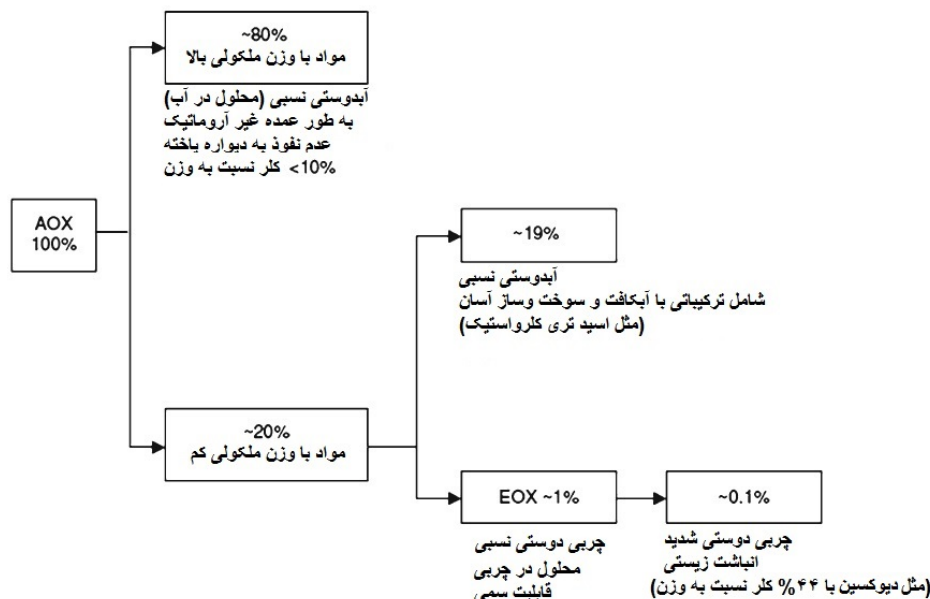
جانوران آبی، برخی از عواقب ناشی از دفع پساب رنگبری به آب‌های سطحی است. افزایش آگاهی از پیامدهای زیست محیطی پساب رنگبری، موجب ایجاد مقررات زیست محیطی سخت گیرانه شده است. بسیاری از کشورها، محدودیت‌هایی را به ترکیبات AOX فاضلاب تحمیل کرده‌اند. در برخی از کشورها، محدودیت‌ها فقط به ترکیبات آلی کلری فاضلاب طرح رنگبری مربوط می‌شود. در چند کارخانه کرافت رنگبری شده، برخی از فن‌آوری‌های جدید جایگزین در حال اجرا می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۱- اثر فن‌آوری‌ها بر شاخص‌های پساب (۰ بی اثر، + موثر، ++ تاثیر زیاد، +++ اثر بسیار زیاد) (Annergren و همکاران، ۱۹۹۰)

				ترکیبات آلی پلی کلری شده		سمیت حاد	
BOD	COD	TSS	AOX	PCDD/Fs	PCPs	LC ₅₀	
+	+	•	+	•	+	؟	پخت خمیرسازی اصلاح شده
++	++	•	++	+	++	+	لیگنین زدایی با اکسیژن
•	•	•	++	+++	+++	++	رنگبری اصلاح شده با کلر کم
							تیمار خارجی
•	•	+++	•	+	•	•	شفاف سازی
+++	+	+	++	+	++	+++	تیمار زیستی

۷- رنگبری خمیر کاغذ و اثرات زیست محیطی

بخشی از ترکیبات AOX که توسط مواد آلی غیر قطبی قابل استخراج هستند به نام EOX، گفته شده و حدود ۱ تا ۳٪ از کل مواد آلی متصل به کلر^۱ (TOCI) می‌باشند. این بخش شامل ترکیبات آلی چربی دوست خنثی با وزن مولکولی کم بوده و بنابراین، نسبت به ۹۹ درصد باقی‌مانده مواد AOX، از اهمیت زیست محیطی بیشتری برخوردار هستند (شکل ۲). در حدود ۴۵۶ ترکیب مختلف در این پساب طرح‌های رنگبری معمولی، شناسایی شده است. در حدود ۳۳۰ نوع از این ترکیبات، از مواد آلی کلری هستند، که شامل فنل‌های کلری، دیوکسین‌ها، هیدروکربن‌ها، و اسیدهای رزینی می‌باشند (جدول ۲).



شکل ۲- خاصیت ترکیبات AOX در پساب حاصل از خمیر کرافت سوزنی برگ رنگبری شده و خمیر معمولی (Bajpai و Bajpai ۱۹۹۶)

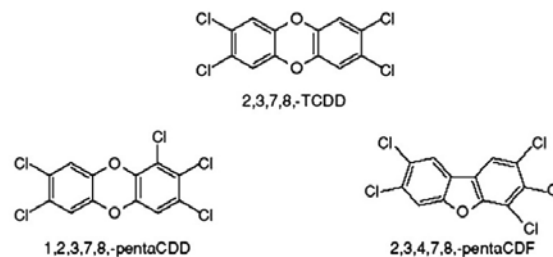
¹ - Total Organically Bound Chlorine



جدول ۲- ترکیبات آلی کلری در پساب‌های طرح رنگبری (Carlberg و McKague ۱۹۹۶)

انواع ترکیبات کلری	تعداد
اسیدها، استرها، آلدئیدها، فوران و پیرن‌ها	۷۷
فنل‌ها و اترهای فنل	۵۲
آلدئیدها و کتون‌ها	۶۶
هیدروکربن‌ها	۷۵
الکل‌ها	۲۵
دیوکسین و فوران	۲۰
متفرقه	۱۵
مجموع	۳۳۰

ناپدید شدن بی مهرگان اعماق دریا، مانند صدف، و شیوع بالای بیماری‌های ماهیان برخی از این اثرات است. ماهی در معرض پساب کارخانه‌های سولفیت و کرافت رنگبری شده، موجب اختلال عملکردهای کبد، سیستم‌های آنزیمی و سوخت و ساز می‌شود. علاوه بر این، قرار گرفتن در چنین شرایطی موجب افزایش بروز ناهنجاری‌های ستون فقرات و کاهش رشد غدد جنسی، ثابت شده است. اعتقاد بر این است که، بخش عمده‌ای از مواد آلی کلری (۸۰٪)، به مواد ناهمگن ترکیبات با وزن مولکولی نسبتاً بالا متعلق است. این ترکیبات، ظاهراً، تاثیر کمی بر سمیت حاد و BOD پساب دارند. بخش عمده‌ای از این مواد، عامل تغییر رنگ، COD و سمیت مزمن است. ترکیباتی با جرم مولکولی بالا و بسیار قطبی، مسئول سمیت پساب رنگبری در طول مراحل اولیه زندگی جانوران و گیاهان دریایی هستند. دیوکسین در آب تقریباً نامحلول است و تمایل به ورود به زنجیره غذایی و تجمع در شکارچینی مانند پرندگان ماهی خوار را دارد. حتی مقدار بسیار کم، دیوکسین ممکن است، موجب طیف گسترده‌ای از شرایط نامطلوب مانند اختلالات در هورمون‌ها، کاهش سیستم ایمنی، تنزل باروری و نیز رشد غیر طبیعی جنین شود (Bajpai و همکاران، ۱۹۹۹). ساختار مولکول‌های سمی‌ترین اشکال دیوکسین و فوران در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- سمی‌ترین دیوکسین و فوران‌های پلی کلری

۸- تیمار باکتریایی

تیمار باکتریایی شامل تیمارهای هوازی، بی‌هوازی و ترکیب هر دو روش است. ترکیب این فرآیندهای بی‌هوازی و هوازی، در حذف آلاینده‌های آلی زیست تخریب پذیر موثر است. رایج‌ترین روش‌های زیستی هوازی، مورد استفاده در تیمار پساب کارخانه خمیرکاغذ، حوضچه‌های هوادهی یا آبگیرهای ثابت^۱ (ASB)، تیمار لجن فعال^۲ (AST) و واکنشگاه‌های ناپیوسته متوالی^۳ (SBR) بوده و به ندرت از تماس دهنده‌های زیستی چرخان^۴ (RBCs) و صافی‌های چکه‌ای^۵ استفاده می‌شود.

^۱ - aerated lagoons or stabilization basins

^۲ - activated sludge treatment

^۳ - sequencing batch reactors

^۴ - rotating biological contactors

^۵ - trickling filters



۹- جمع بندی

آلاینده‌های اصلی صنعت خمیرکاغذ و کاغذسازی به مواد شیمیایی رنگبری، ترکیبات مواد استخراجی و لیگنینی مربوط است، که با تیمارهای آنزیمی کلیه این عوامل آلودگی کم می‌شوند. تیمارهای زیستی با آنزیم‌ها یا قارچ‌ها، در جهت کاهش مشکلات قیر و رسیدن به تولید رضایت بخش، کمک می‌کنند. این عمل موجب پاکسازی رسوبات قیر در ماشین کاغذ، کاهش توقف ماشین کاغذ و رفع معایب ورق کاغذ می‌شود و امکان آبیگری خمیرکاغذ و قابلیت گذر ماشین کاغذ را بهبود می‌بخشد و در نتیجه به طور غیر مستقیم، موجب صرفه جویی انرژی در عملیات‌های بعدی خواهد شد. این تیمار چندین مزیت دیگر، مثل فن‌آوری غیر سمی و دوستار زیست بوم را، ارائه می‌دهد. فرآیندهای زیست فن‌آوری براساس کاربرد انتخابی قارچ پوسیدگی سفید، نسبت به قارچ‌های باختگی آبی، می‌تواند مزیت‌هایی را داشته باشد. برخی از مواد استخراجی چربی دوست، مثل تری گلیسیریدها (TGs) و اسیدهای چرب، به راحتی با قارچ‌های مختلف تخریب می‌شوند و حتی امکان آبکافت موثر استرهای استرول، با چند قارچ کیسه دار مثل گونه‌های باختگی آبی، وجود دارد. ولی استرول‌های آزاد و تری‌ترپنول‌ها و نیز اسیدهای رزینی، نسبت به تخریب مقاوم‌تر هستند و حذف بهتر این ترکیبات، با قارچ‌های چتری پوسیدگی سفید، فراهم می‌شود. اگرچه که نظر می‌رسد، خمیرکاغذ سازی مکانیکی زیستی، قابلیت زیادی در کاهش مشکلات آلودگی دارد، ولی اطلاعات بسیار اندکی در کارایی زیست محیطی خمیرکاغذ مکانیکی زیستی، در مقایسه با فرآیند CTMP و دیگر فرآیندهای خمیرکاغذ سازی پربازده، در دسترس است. این نتایج جهت معادل سازی کیفیت و بازدهی خمیرکاغذ، به مطالعات اصولی و مقایسه‌ای بین فرآیند خمیرکاغذ مکانیکی زیستی و سایر فرآیندهای خمیرکاغذ، نیاز دارد.

در سال ۱۹۸۶ اختراع یک روش تیمار زیستی فاضلاب، حاوی ترکیبات فنلی غیر قابل تجزیه و غیر فنلی قابل تخریب، ثبت شد. که شامل یک تیمار اکسایشی برای کاهش یا حذف سمیت ترکیبات فنلی است و سپس عمل خالص سازی بی‌هوازی انجام می‌شود. این پیش تیمار اکسایشی می‌تواند با آنزیم‌های لاکاز انجام شود و ادعا شده است که COD را ۱۰۰۰ برابر کاهش می‌دهد. البته در سال ۱۹۹۱ یک فرآیند با استفاده از لاکاز برای تیمار فاضلاب به ثبت رسید که، می‌تواند با چند آنزیم لاکاز در حضور اکسید کننده‌های غیر آروماتیک و ترکیبات آروماتیک، فاضلاب حاصل از لیگنین زدایی و رنگبری را تصفیه کند. با افزودن لاکاز تنها، تقریباً بشارش کامل این لیگنین‌ها، ۲۰ تا ۵۰٪ بیش از مقادیر قبلی به دست آمد، که در این شرایط در حدود ۷۰ تا ۹۰٪ لیگنین به صورت نامحلول بوده، که به کمک ته‌نشینی و فیلتر کردن حذف می‌شود.

۱۰- نتیجه گیری

آنزیم‌های زیلاناز، موجب کاهش هزینه‌های کارخانه‌ها در جهت رنگبری می‌شوند که این مزایا عبارتند از: کاهش تخلیه ترکیبات AOX، به خصوص از طریق کاهش مصرف گاز کلر، رفع محدودیت تولید دی اکسید کلر، گاهی حذف مصرف گاز کلر، افزایش سقف درجه روشنی خمیرکاغذ، قابلیت اجرای توالی‌های رنگبری TCF و ECF و کاهش مخارج مواد شیمیایی رنگبری. عدم اطمینان، مشکل اساسی روش‌های معمولی فیزیکی و شیمیایی در کاهش آلودگی پساب‌های کاخانه‌های خمیرکاغذ است. مزایای دیگر زیست فن‌آوری به کاهش مشکلات آلودگی محیط زیست مربوط است، که شامل تخریب آلاینده‌ها، گازهای منتشر شده و حذف گازهای بودار می‌باشد. در آینده زیست فن‌آوری برای رنگ زدایی و سم زدایی فاضلاب خمیرکاغذ رنگبری شده، انجام می‌گیرد. این روش به کمک تیمارهای باکتریایی (هوازی و بی‌هوازی)، تیمار قارچی و یا آنزیمی انجام می‌گیرد. فرآیندهای باکتریایی می‌توانند در کاهش ترکیبات لیگنین کلری با وزن مولکولی بالا، بسیار موثر باشند، ولی در میان روش‌های زیستی، استفاده از فن‌آوری تیمار قارچ پوسیدگی سفید امیدوار کننده‌تر است. تیمار باکتری به طور قابل توجهی در تخریب ترکیبات آلی کلری با وزن مولکولی کم، موثر است. تیمار با قارچ پوسیدگی سفید می‌تواند به عنوان پیش تیمار باکتریایی باشد و به منظور افزایش توانایی باکتری‌ها نسبت به حذف ترکیبات آلی کلردار و نیز در کاهش مقدار لیگنین کلری با وزن مولکولی بالاتر بکار رود. از آنجایی که حذف AOX در لیگنین کلری با وزن مولکولی بالا، اهمیت بسیار زیادی دارد، پژوهش‌هایی در



جهت حذف یا کاهش این ترکیبات انجام می‌گیرد و جهان گزینه‌ای به غیر از زیست فن‌آوری برای کاهش آلودگی‌های زیست محیطی ندارد. پس باید بیش از پیش به این کاتالیزورهای طبیعی اطمینان کرد، تا ضمن تولید صنعتی کاغذ و خمیرکاغذ، مشکلات انواع آلاینده‌های صنعتی به حداقل برسد.

منابع

- 1- Bajpai, P. 2006. Potential of biotechnology for energy conservation in pulp and paper. energy management for pulp and papermakers. 16–18 Oct. 2006. Budapest, Hungary.
- 2- Viikari, L., Poutanen, K., Tenkanen, M. and Tolan, JS. 2002. Hemicellulases. In: Flickinger MC, Drew SW (eds) Encyclopedia of bioprocess technology: fermentation, biocatalysis, and bioseparation. Wiley: Chichester,UK. 289-295.
- 3- Paice, M. and Zhang, X. 2005. Enzymes find their niche. Pulp Paper Can. 106(6):17–20.
- 4- Karlsson, S., Holmbom, B., Spetz, P., Mustranta, A. and Buchert, J. 2001. Reactivity of Trametes laccases with fatty and resin acids. Appl Microbiol Biotechnol. 55:317–320.
- 5- Zhang, X., Eigendorf, G., Stebbing, DW., Mansfield, SD. and Saddler, JN. 2002. Degradation of trilinolein by laccase enzymes. Arch Biochem Biophys. 405:44–54.
- 6- Paice, M. 2005. Enzyme application in pulp and paper manufacturing. Lakehead University Symposium. 27 Sep 2005. Ontario, Canada.
- 7- Gutiérrez, A., Del Río, JC., Rencoret, J., Ibarra, D. and Martínez, AT. 2006. Main lipophilic extractives in different paper pulp types can be removed using the laccase-mediator system. Appl Microbiol Biotechnol. 72:845–851.
- 8- Molina, S., Rencoret, J., Del Río, JC., Lomascolo, A., Record, E., Martínez, AT. and Gutiérrez, A. 2008. Oxidative degradation of model lipids representative for main paper pulp lipophilic extractives by the laccase-mediator system. Appl Microbiol Biotechnol. 80:211–222.
- 9- Reid, ID., Bourbolnnais, R. and Paice, MG. 2010. Biopulping and biobleaching. In: Heitner C, Dimmel DR, Schmidt JA (eds) Lignin and lignans: advances in chemistry. CRC Press. Boca Raton. 521–554.
- 10- Bajpai, P. 2012. Biotechnology for pulp and paper processing. Springer.414p.
- 11- Annergren, GE., Osterberg, F. and Lindblad, P. 1990. Tappi pulping conference, Tappi. Toronto.
- 12- Bajpai, P. and Bajpai, PK. 1996. Organochlorine compounds in bleach plant effluents – genesis and control. PIRA International. Leatherhead.
- 13- Mckague, AB. and Carlberg, G. 1996. Pulp bleaching and the environment. In: Dence CW, Reeve DW (eds) Pulp bleaching – principles and practice. Tappi Press. Atlanta. 746–820.
- 14- Bajpai, P., Bajpai, PK., Kondo, R. 1999. Biotechnology for environmental protection in pulp and paper industry. Springer. Germany. 239–261.

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



عضویت در خبرنامه



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو



مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛ شبکه های توجه گرافی (Graph Attention Networks)



کارگاه آنلاین مقاله نویسی IEEE و ISI ویژه فنی و مهندسی