

تأثیر توالی تیمار آنزیم سلولاز و پالایش بر ویژگی‌های خمیر کاغذ مخلوط کاغذ باطله اداری

محمدعلی حسین^۱، محمد طلایی پور^{۲*}، امیر هومن حمصی^۳، بهزاد بازیار^۴ و سعید مهدوی فیض آبادی^۵

۱- دکتری، گروه تخصصی صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه تخصصی صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران،

ایران، پست الکترونیک: m.talaeipoor@srbiau.ac.ir

۳- استاد، گروه تخصصی صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
۴- دانشیار، گروه تخصصی صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران
۵- دانشیار، بخش تحقیقات علوم چوب و فراورده‌های آن، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: بهمن ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: اردیبهشت ۱۳۹۹

چکیده

در این تحقیق، توالی تیمار آنزیم و بعد پالایش و اثرهای آن بر ویژگی‌های خمیر کاغذ باطله اداری مورد بررسی قرار گرفته است. پالایش خمیر کاغذ در دو سطح ۷۰۰ و ۱۵۰۰ دور توسط پالایشگر آزمایشگاهی PFI و تیمار آن با آنزیم سلولاز در درصد خشکی ۱۳ درصد و طی مدت زمان ۶۰ دقیقه انجام شد. اعمال تیمار آنزیمی باعث کاهش مقاومت‌های کاغذ و همچنین درجه‌روانی خمیر کاغذ گردید و اعمال پالایش بدون تیمار آنزیمی، باعث افزایش مقاومت‌ها شد. تیمار آنزیمی پیش از پالایش خمیر کاغذ، درجه‌روانی خمیر کاغذ را کاملاً تحت تأثیر قرار داد، به طوری که قبل از اعمال آنزیم، برای پالایش با ۷۰۰ و ۱۵۰۰ دور درجه‌روانی کانادایی خمیر کاغذ ۴۶۹ و ۳۹۰ میلی‌لیتر (CSF) اندازه‌گیری شد. در حالی که با پیش تیمار آنزیمی، این اعداد به ترتیب به ۳۹۷ و ۵۴۴ میلی‌لیتر (CSF) تغییر کردند. پس از پیش تیمار آنزیمی، افزایش درجه‌روانی با تعداد دور بیشتر پالایشگر، نشان‌دهنده تأثیر تیمار آنزیمی پیش از پالایش بوده است. به طور کلی، پالایش باعث افزایش مقاومت‌ها و بهبود ویژگی‌های کیفی خمیر کاغذ شده است، اما پالایش خمیر کاغذ پس از تیمار آنزیمی با توجه به اثرهای این پیش تیمار بر روی الیاف، باعث کاهش ویژگی‌های کیفی کاغذ و خمیر کاغذ در دوره‌های پالایش ثابت گردید. توالی تیمار آنزیمی و بعد پالایش، شاخص اریک را به عنوان یکی از اصلی‌ترین ویژگی‌های کیفی خمیر کاغذ باطله اداری افزایش داده است.

واژه‌های کلیدی: سلولاز، پالایش، خمیر کاغذ، کاغذ باطله اداری، مقاومت، شاخص اریک.

مقدمه

که برای تغییر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خمیر کاغذ، از هر دو نوع نیروی مکانیکی و هیدرولیکی استفاده می‌کند. در طی فرایند پالایش الیاف تحت تأثیر چندین عامل قرار می‌گیرند که مهمترین نتیجه آن فیبر پاره شدن، تشکیل نرمه و کاهش میانگین طول الیاف است. فیبر پاره شدن خارجی شامل جداسازی فیبریل‌ها بر روی سطح الیاف بوده، در نتیجه سطح ویژه را افزایش می‌دهد.

رشد روزافزون جمعیت و پیشرفت فناوری، همگام با رشد مصرف و افزایش تقاضا برای کاغذ از یکسو و تخریب شدید جنگل‌های دنیا و مشکلات زیست‌محیطی از سوی دیگر، لزوم بررسی و به‌کارگیری روش‌های جدید و بهبود فرایندهای متداول را در صنعت خمیر و کاغذ آشکار می‌کند. پالایش فرایندی است

Bajpai (۲۰۱۰) دلیل افزایش مقدار آبگیری را هیدرولیز نرمة‌ها می‌دانند و بر این عقیده هستند که در تیمار آنزیمی با هیدرولیز نرمة‌ها که سطح ویژه زیادی داشته و علاوه بر کاهش آبگیری، اثر منفی بر مقاومت‌ها دارند (Bajpai, 2010)، مقدار آبگیری و همچنین مقاومت‌ها افزایش پیدا می‌کند؛ اما از سویی با حضور آنزیم هم کوتاه شدن طول الیاف و هم فیبریلی شدن (-Znidaršič Plazl et al., 2009; Zhang et al., 2013; Cui et al., 2015) انجام می‌شود. در تحقیقاتی که انجام شده، زمانی که تیمار آنزیمی پیش از پالایش انجام شده، نتایج این‌طور نشان داده‌اند که بیشتر مقاومت‌های کاغذ افت پیدا کرده است. از این‌رو نویسندگان این مقاله بر آن شدند که به بررسی اثر توالی آنزیم و پالایش بر روی خمیر کاغذ متداول باطله اداری و بررسی ویژگی‌های خمیر کاغذ و کاغذ حاصل از آن پردازند تا بدین وسیله اثربخشی پیش تیمار آنزیمی بر فرایند پالایش مورد بررسی قرار بگیرد. در صورت اثربخش بودن تیمار آنزیمی بر پالایش، یکی از مهمترین دستاوردهای این تحقیق می‌تواند کاهش انرژی پالایش و رسیدن به ویژگی‌های مشخصی از خمیر کاغذ و کاغذ در دوره‌های کمتر یا انرژی‌های کمتر پالایشگر باشد. با توجه به اهمیت انرژی در صنعت فرض بر این است که با استفاده از پیش تیمار آنزیمی می‌توان امکان کاهش انرژی پالایش را برای خمیر کاغذ حاصل از کاغذ باطله اداری فراهم کرد.

مواد و روش‌ها

انتخاب و تهیه ماده اولیه

کاغذ باطله اداری از شرکت کاغذسازی لطیف تهیه شد که شامل دو نوع اداری کاغذ (تهیه شده از فرایندهای شیمیایی) و کتاب درسی (کاغذهای تهیه شده از فرایندهای مکانیکی) بودند. در این تحقیق، کاغذ باطله اداری و کتاب با کاغذ مکانیکی به نسبت وزنی ۷۰ به ۳۰ مورد استفاده قرار گرفتند. عملیات خمیرسازی با پالپر آزمایشگاهی ساخت شرکت قومس با شرایط ثابت زیر انجام شد.

زمان خمیرسازی: ۳۰ دقیقه، درصد خشکی خمیر کاغذ: ۱۰ و دمای آب: ۴۰ درجه سانتی‌گراد.

فیبرله شدن داخلی باعث جداسازی داخلی لایه‌های دیواره سلولی شده، بنابراین انعطاف پذیری الیاف را بهبود می‌بخشد (Torres et al., 2006; Ny and Messmwer, 2007; Bhardwaj et al., 2007; Talaiepoor, 2008). با وجود این، در کنار اثرهای مثبت، ممکن است اثرهای نامناسبی نیز به وسیله پالایش ایجاد شود که از آن جمله، شکسته شدن و کوتاه شدن الیاف در اثر نیروی برشی است. همچنین در اثر پالایش، نرمة‌ها در الیاف خمیر کاغذ زیاد شده که منجر به کاهش میزان آبگیری از خمیر کاغذ و در نتیجه کاهش درجه روانی خمیر کاغذ می‌گردد. امروزه آنزیم‌ها در علم کاغذسازی گستره زیادی دارند و در قسمت‌های مختلفی استفاده می‌شوند. Quinde (۱۹۹۴) و Bajpai (۲۰۱۰) بیان کردند که آنزیم‌ها در صنعت کاغذ برای پوست کنی چوب، کنترل قیر، خمیرسازی زیستی، رنگ‌بری زیستی، پالایش، جوهرزدایی، کنترل مواد چسبناک و تصفیه آب به کار می‌روند؛ اما در این میان تغییر در شرایط الیاف باز یافتی اصلی‌ترین موضوع مورد بررسی بوده است که محققان زیادی را درگیر خود کرده است (Ibarra et al., 2012; Znidaršič-Plazl et al., 2009; Dourado et al., 1999; Mayeli and Talaiepoor, 2010; Pala et al., 2001; Dienes, 2006; Lee et al., 2011; Dienes et al., 2004). استفاده از آنزیم همگام با فرایند پالایش یکی از مهمترین کاربردهایی است که برای آنزیم در نظر گرفته شده است. از دیرباز محققان زیادی در این زمینه فعالیت داشته‌اند و امروزه نیز تحقیقات تکمیلی در این مورد انجام شده است. استفاده از آنزیم باعث ارتقاء آبگیری از خمیر کاغذ می‌شود و محققان زیادی مانند Loosvelt (۲۰۰۹)، Bajpai (۲۰۱۰)، Zhang و همکاران (۲۰۱۳)، Cui و همکاران (۲۰۱۵)، Torres و همکاران (۲۰۱۲)، Garcial و همکاران (۲۰۰۲)، Maximino و همکاران (۲۰۱۰)، Kim و همکاران (۲۰۰۶)، Eriksson (۱۹۹۸) و Gil و همکاران (۲۰۰۹) همگی تقریباً با ادبیات مشترکی در سال‌های مختلف به این نتیجه رسیده‌اند که تیمار آنزیمی درجه روانی خمیر کاغذ را کاهش می‌دهد و زمانی که خمیر کاغذهای تیمار شده با آنزیم با خمیر کاغذهای کنترل مقایسه می‌شوند زمان رسیدن به یک درجه روانی مشخص کاهش پیدا می‌کند. بیشتر محققان از جمله

تیمار آنزیمی

ساخت شرکت قومنس تبدیل شد و برای انجام آزمون بر اساس استاندارد T 205 sp-02 مشروط سازی و آماده شدند. آزمون-های مختلف در هر مرحله بر اساس استاندارد Tappi و به شرح زیر انجام شد: درجه روانی خمیر کاغذ: T227 om-99، مقاومت به پاره شدن: T414om-04، مقاومت به کشش: T494 om-01، مقاومت به ترکیدگی: T403om-02، آزمون ماتی: T425om-06 و آزمون روشنی: T452om-08. آزمون ERIC بر اساس استاندارد ایزو به شماره ISO 22754:2008 انجام گردید.

تجزیه و تحلیل آماری

بررسی آماری تیمارهای پالایش و آنزیم با نرم افزار SPSS و بر اساس تحلیل واریانس یک طرفه (طرح کاملاً تصادفی) (ANOVA) انجام شد.

نتایج

پالایش

در این قسمت به بررسی اثر پالایش بدون اشاره به اثرهای تیمار آنزیمی پرداخته شده است و نتایج نشان داد که اثر پالایش بر تمام پارامترهای کیفی خمیر کاغذ و کاغذ معنادار بوده است. ویژگی‌های خمیر کاغذ پالایش شده و کاغذهای دست ساز در دو دور ۷۰۰ و ۱۵۰۰ در جدول ۱ نشان داده شده است.

تیمار آنزیمی در این تحقیق توسط آنزیم سلولاز تهیه شده از شرکت AB Enzymes و از نوع BIOTOUCH® C35 انجام شد. این آنزیم از باکتری تریکودرما ریسی تهیه شده و فعالیت اصلی آن حاصل از اندو-۱-۴-β-D-گلوکاناز است. تیمار آنزیمی با شرایط زیر انجام شد: مقدار آنزیم به صورت ثابت و ۳۰U، دما ۶۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ۶۰ دقیقه و درصد خشکی خمیر کاغذ ۱۳ درصد. pH خمیر کاغذ برای تیمار آنزیمی بر اساس دستورالعمل کاربرد آنزیم، ۵ تا ۶/۵ بود که با استفاده از اسیدسولفوریک ۰/۲۵ درصد برای تمام خمیر کاغذها به حدود ۵/۸ رسید.

پالایش

در این تحقیق، پالایش خمیر کاغذ طبق استاندارد T 248 sp-00 با شرایط زیر انجام شد: فاصله تیغه پالایشگر مقدار ثابت ۰/۲ میلی‌متر، وزن خمیر کاغذ ۳۰ گرم بر مبنای وزن خشک، درصد خشکی خمیر کاغذ ۱۰ درصد و تعداد دور پالایشگر در دو سطح ۷۰۰ و ۱۵۰۰. پالایش در مرکز تحقیقات البرز و توسط پالایشگر PFI انجام گردید.

آزمون‌های خمیر کاغذ و کاغذ دست ساز

پس از اعمال تیمارهای ذکر شده، خمیرهای کاغذ طبق استاندارد T208om-95، به کاغذهای دست ساز آزمایشگاهی

جدول ۱- ویژگی‌های خمیر کاغذ و کاغذ پالایش شده در دو دور ۷۰۰ و ۱۵۰۰

ERIC (ppm)	شاخص	شاخص	شاخص	درجه	دور پالایشگر (Rev)	
	مقاومت به ترکیدگی (kPa.m ² /g)	مقاومت به کشش (N.m/g)	مقاومت به پاره شدن (mN.m ² /g)	ماتی (درصد)		روشنی (درصد)
۱۴۴۶	۲/۰۸	۳۳/۹۳	۱۳/۲۴	۸۳/۸	۸۵/۰۹	نمونه شاهد (بدون پالایش)
۱۶۳۴ ^a	۳/۲۲ ^a	۴۷/۵ ^a	۱۲/۷۹ ^a	۸۱/۸۵ ^a	۸۵/۱۲ ^a	تعداد دور پالایش ۷۰۰
۱۹۵۲ ^b	۴/۲۵ ^b	۵۱/۵۷ ^b	۱۵/۲۵ ^b	۸۰/۶۹ ^a	۸۶/۰۸ ^a	تعداد دور پالایش ۱۵۰۰

تیمار آنزیمی

توالی آنزیم و پالایش

در جدول ۲ اثر تیمار آنزیمی بر ویژگی‌های خمیرکاغذ و کاغذ دست‌ساز نشان داده شده است. در توالی آنزیم و پالایش ارئه شده است.

جدول ۲- ویژگی‌های خمیرکاغذ و کاغذ پس از تیمار آنزیمی

ERIC (ppm)	شاخص	شاخص	شاخص	ماتی	درجه روشنی	
	مقاومت به ترکیدگی (kPa.m ² /g)	مقاومت به کشش (N.m/g)	مقاومت به پاره‌شدن (mN.m ² /g)	(درصد)	(درصد)	
۱۴۴۶ ^a	۲/۰۸ ^a	۳۳/۹۳ ^a	۱۳/۲۴ ^a	۸۳/۸ ^a	۸۵/۰۹ ^a	نمونه شاهد
۱۵۹۹/۷ ^b	۱/۶ ^b	۳۲/۵ ^b	۷/۸ ^b	۸۳/۸ ^a	۸۱ ^b	تیمار آنزیمی
۱۰/۶۳	-۲۳/۰۸	-۴/۲۱	-۴۱/۰۹	۰/۰۰	-۴/۸۱	درصد تغییرات

جدول ۳- ویژگی‌های خمیرکاغذ و کاغذ در توالی آنزیم و پالایش

ERIC (ppm)	شاخص	شاخص	شاخص	ماتی	درجه روشنی	
	مقاومت به ترکیدگی (kPa.m ² /g)	مقاومت به کشش (N.m/g)	مقاومت به پاره‌شدن (mN.m ² /g)	(درصد)	(درصد)	
۱۴۴۶	۲/۰۸	۳۳/۹۳	۱۳/۲۴	۸۳/۸	۸۵/۰۹	نمونه شاهد
۱۵۹۹/۷	۱/۶	۳۲/۵	۷/۸	۸۳/۸	۸۱	تیمار آنزیمی
۲۰۵۶/۹۰ ^a	۱/۰۰ ^a	۳۰/۵۰ ^a	۷/۲۰ ^a	۷۴/۱۰ ^a	۸۰/۴۰ ^a	دور ۷۰۰ پالایش
۲۴۶۲/۷ ^b	۱/۱ ^b	۳۰/۲ ^a	۶/۳ ^b	۷۱ ^b	۷۷/۷ ^b	دور ۱۵۰۰ پالایش

بحث

برآورد شده است (شکل ۱). این کاهش درجه‌روانی به دلیل فیبرله‌شدن داخلی و خارجی و ایجاد نرمه در خمیرکاغذ پس از پالایش می‌باشد. در جدول ۱، مشخص شده است که با پالایش، مقدار مقاومت به پاره‌شدن برای تعداد ۷۰۰ دور کاهش و برای تعداد ۱۵۰۰ دور افزایش داشته است. Wavell (۱۹۹۵) در بررسی خود بیان می‌کند که مقدار مقاومت به پاره‌شدن در ۱۵۰۰ دور پالایش به حداکثر مقاومت خود می‌رسد و پس از آن تا ۸۰۰۰ دور به شدت کاهش پیدا می‌کند. این محقق دلیل این امر را افزایش ایجاد پیوند تا پالایش با

پالایش پنج اثر اصلی بر لیاف دارد که هر یک از این اثرها به‌نوبه خود ویژگی خاصی از خمیرکاغذ و کاغذ را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند. کنده شدن دیواره اولیه، فیبرله‌شدن داخلی، فیبرله‌شدن خارجی، برش لیاف و تولید نرمه‌ها (Loosvelt, 2009; Bajpai, 2010; Zhang *et al.*, 2013;) (Cui *et al.*, 2015; Wong *et al.*, 2000). اعمال تیمار پالایش در هر دو دور ۷۰۰ و ۱۵۰۰ باعث کاهش درجه‌روانی خمیرکاغذ شده است و اختلاف آنها در سطح ۹۵٪ معنادار

فرایند است؛ بنابراین کاهش اندازه ذرات جوهر بر شاخص ERIC اثرگذار بوده و نتیجه آن افزایش غلظت جوهر باقی مانده در کاغذ دست ساز می باشد (Lee, 2011).

در مورد مقاومت به پاره شدن کاهش حدود ۴۰ درصد را می توان به اثرگذاری آنزیم بر الیاف مرتبط دانست. میانگین طول الیاف طی تیمار آنزیمی کاهش پیدا می کند (Zhang et al., 2009; Znidarsie-Plazl et al., 2013) که می تواند عامل اصلی کاهش مقاومت به پاره شدن باشد. در مورد مقاومت به کشش و مقاومت به ترکیدگی، محققان (Zhang, 2013; Gil et al., 2010; Bajpai, 2010) بر این عقیده اند که مقدار این مقاومت ها نیز به میزان استفاده از آنزیم بستگی دارد. این مقدار استفاده در مقالات مختلف متفاوت است. مصرف کمتر آنزیم سلولاز باعث افزایش مقاومت به کشش و ترکیدگی می گردد اما با افزایش میزان مصرف، این مقاومت ها کاهش پیدا می کنند. این بیانات در واقع نشان دهنده این است که آنزیم سلولاز قادر به این است که فیبریل شدن خارجی انجام دهد، اما محققان بیان می کنند که در مقادیر بیشتر آنزیم، اثر هیدرولیز آنزیمی در خمیر کاغذ بیشتر نمود پیدا کرده و با تخریب بیشتر دیواره سلولی مقدار مقاومت به کشش و ترکیدگی کم می شود (Bajpai, 2010; Buzala, 2016). ویژگی های نوری کاغذ نیز در مرحله تیمار آنزیمی تحت تأثیر قرار می گیرند. هیدرولیز الیاف سلولزی که از آن جمله می توان به هیدرولیز نواحی اشاره کرد که جوهر به آن نواحی اتصال دارد نیز می تواند هم باعث انفصال ذرات جوهر از روی الیاف (Kim et al., 1991; Lee et al., 2011) و هم باعث کوچک تر شدن این ذرات شود. این جوهرها در سوسپانسیون الیاف پراکنده می شوند. نتیجه پراکندگی جوهر در کاغذ، کاهش در درجه روشنی کاغذ می باشد. از آنجایی که شاخص ERIC به میزان غلظت جوهر در کاغذ بستگی دارد، این پراکندگی ذرات جوهر باعث افزایش سطح ویژه جوهر و در نتیجه افزایش این شاخص می شود.

مقدار درجه روانی پس از تیمار آنزیمی از حدود ۵۲۰ به ۵۱۹ کاهش پیدا کرده است (شکل ۱) که کاهش قابل توجهی نیست اما شاید بتوان این طور بیان کرد که اعمال تیمار آنزیمی با اثر هیدرولیز سطح الیاف باعث لایه لایه شدن دیواره الیاف و

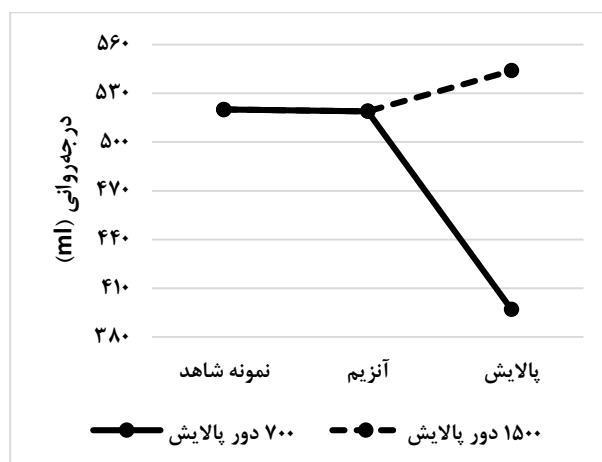
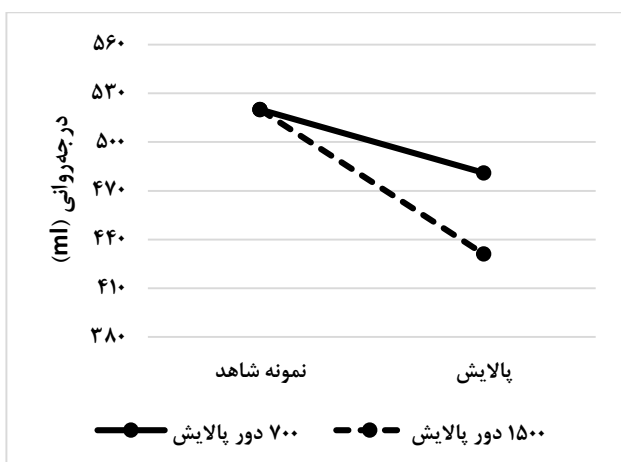
دور مشخصی از پالایش می داند و بیان می دارد که پس از آن کاهش طول الیاف اثری بیش از برقراری پیوند داشته و باعث کاهش این مقاومت می گردد؛ اما در مورد مقاومت هایی مانند کشش و ترکیدگی (Gao et al., 2009; Wavell, 1995; Heydari et al., 2013) بیان می کنند که پیوند بین الیاف اصلی ترین فاکتور در افزایش مقدار عددی این مقاومت ها است. از این رو می توان نتیجه گرفت که با اعمال تیمار پالایش، پیوند بین الیاف افزایش یافته و مقاومت به کشش به ترتیب برای ۷۰۰ و ۱۵۰۰ دور پالایش، ۴۰ درصد و ۵۲ درصد و همچنین برای مقاومت به ترکیدگی، ۵۵ درصد و ۱۰۴ درصد افزایش را نشان می دهند.

اثر پالایش بر ویژگی های نوری کاغذ نیز توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. در واقع عقیده بر این است که در فرایند پالایش، روشنی تاحدودی افزایش پیدا می کند که دلیل آن را می توان حذف خاکستر و پرکننده از مجموعه الیاف دانست (Talaiepoor, 2008). یکی از ویژگی های مؤثر بر کاربرد انواع کاغذ، ماتی است. Xia (۲۰۱۱) بیان می کند که افزایش پالایش باعث کاهش مقدار ماتی و افزایش دانسیته کاغذ می گردد. ایشان دلیل بروز این ویژگی را ایجاد نرمه های بیشتر و "پیوندهای داخلی بیشتر و نزدیک تر" می داند و بیان می کند که با نشست بیشتر الیاف روی یکدیگر، الیاف به یکدیگر نزدیک تر خواهند شد (اشاره به پدیده نشست الیاف)، در نتیجه نور کمتری از ورقه کاغذ بازگشت داده می شود و نور تأیید شده به کاغذ بیشتر از کاغذ عبور خواهد کرد. نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج اعلام شده توسط این محقق مطابقت دارد.

ERIC از جمله مشخصه هایی است که شاخص مهمی در برآورد سیستم هایی است که از کاغذ باطله به عنوان ماده اولیه استفاده می کنند. همان طور که مشخص است مقدار ERIC با افزایش پالایش روند صعودی پیدا کرده است. در مورد درجه روشنی خمیر کاغذ گفته شد که این مشخصه پس از پالایش به اندازه محدودی افزایش پیدا می کند که می تواند نتیجه حذف فیلر و خاکستر از خمیر کاغذ باشد، اما در فرایند پالایش علاوه بر حذف این موارد، خرد شدن ذرات جوهر نیز جزئی از این

داده و یا به عبارتی درجه روانی خمیر کاغذ را کاهش داده است.

فیبره شدن الیاف شده و قدرت نگهداری آب را در الیاف افزایش



شکل ۱- اثر پالایش بر درجه روانی خمیر کاغذ (چپ)، اثر تیمار آنزیمی و پالایش بر درجه روانی خمیر کاغذ (راست)

۲۳/۵ درصد درجه روانی مشاهده می‌شود. نکته جالب توجه این است که در ۱۵۰۰ دور پالایش با وجود اینکه انتظار می‌رفت طبق روال معمول درجه روانی کاهش بیشتری پیدا کند، این شاخص افزایش پیدا کرده است. برای توضیح این پدیده می‌توان به شکل ۲ مراجعه کرد. در اندازه‌گیری درجه روانی برای خمیر کاغذی که با ۱۵۰۰ دور پالایش شده بود، مقدار زیادی نرمه در آب خارج شده از زیر توری دستگاه مشاهده می‌شود. عبور این مقدار نرمه از توری دستگاه اندازه‌گیری درجه روانی، نشان‌دهنده خرد شدن الیاف و تولید بیش از حد نرمه‌ها می‌باشد.

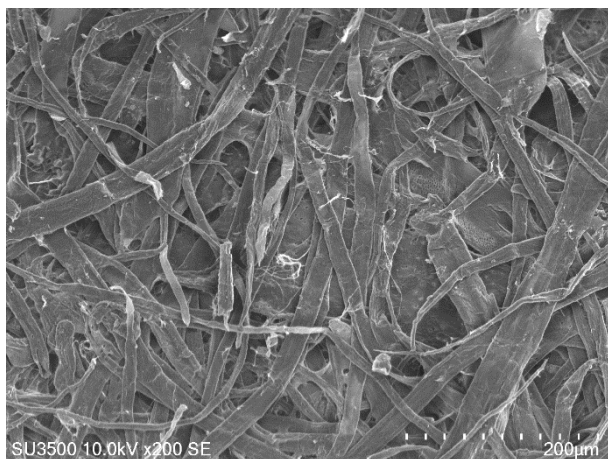
با اعمال پالایش بعد از تیمار آنزیمی، نتایج متفاوتی برای پالایش با دورهای ۷۰۰ و ۱۵۰۰ به دست آمد. به طوری که مقدار درجه روانی برای ۷۰۰ دور پالایش از ۵۱۸ به مقدار ۳۹۷ میلی‌لیتر (CSF) کاهش پیدا کرده است. این طور به نظر می‌رسد که استفاده از تیمار آنزیمی پیش از پالایش باعث تخریب دیواره سلولی شده و الیاف مستعد شکست بیشتر و آمادگی لازم برای تخریب شدن است و شیب تند کاهش درجه روانی نیز مؤید این گفته می‌باشد. به عبارت بهتر در پالایش با دور ۷۰۰ بدون تیمار آنزیمی، کاهش ۷/۵ درصد درجه روانی اتفاق افتاده، اما پس از تیمار آنزیمی کاهش



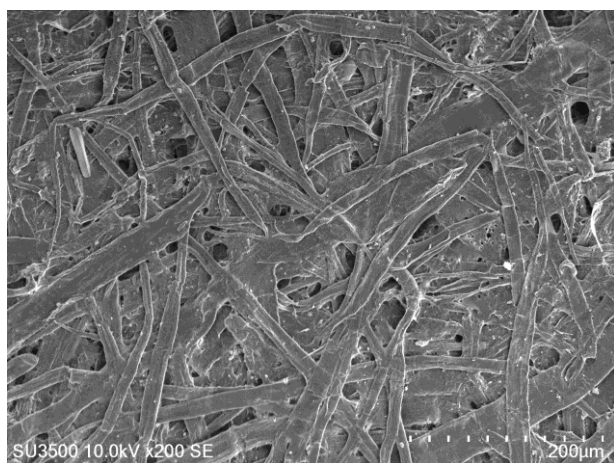
شکل ۲- سمت راست: در آب نرمه زیادی وجود دارد که مربوط است به خمیر کاغذ پالایش شده با دور پالایش ۱۵۰۰ و با پیش تیمار آنزیمی. سمت چپ: در آب نرمه کمی وجود دارد که مربوط است که به خمیر کاغذ پالایش شده با دور ۷۰۰ و بدون پیش تیمار آنزیمی.

دیده می‌شود. برای مشاهده تخریب انجام شده در ساختار کاغذ می‌توان به شکل ۴ که در تصویر میکروسکوپ روبشی توالی تیمارهای آنزیمی و پالایش نشان داده شده است، مراجعه کرد.

هنگامی که تیمار آنزیمی با پالایش همراه می‌شود، تمامی پدیده‌ها از جمله کوتاه شدن طول الیاف، هیدرولیز سطح الیاف، تجزیه نرمه‌ها و نواری شدن الیاف (Bajpai, 2010) تشدید شده و اثر معکوس آن در نتایج مقاومتی و نوری کاغذ حاصل

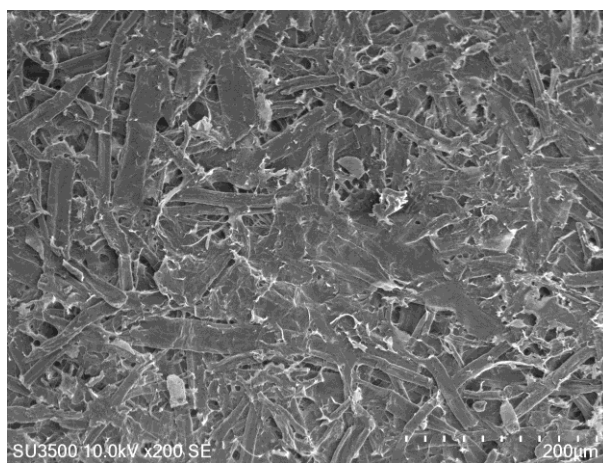


شکل ۳- تصویر SEM با بزرگنمایی ۲۰۰ از الیاف کاغذ باطله بدون تیمار آنزیمی و پالایش



شکل ۵- تصویر SEM با بزرگنمایی ۲۰۰ از الیاف کاغذ باطله

پس از تیمار آنزیمی



شکل ۴- تصویر SEM با بزرگنمایی ۲۰۰ از الیاف کاغذ باطله

پس از تیمار آنزیمی و پالایش

به ترکیب‌دهی شده‌اند؛ اما هنگامی که پالایش پس از تیمار آنزیمی انجام می‌شود به دلیل تشدید اثربخشی، می‌تواند اثرهای معکوسی داشته باشد که شکل ۴ کاملاً نشان‌دهنده آن می‌باشد. در تعداد دور پالایش ۷۰۰ و ۱۵۰۰ بدون پیش‌تیمار آنزیمی، مقاومت به کشش ۴۷/۵ و ۵۱/۵۷ (N.m/g)

همان‌طور که در بخش پالایش به آن پرداخته شد، پالایش همیشه باعث افزایش مقاومت به کشش و ترکیب‌دهی می‌شود و اشاره شد که دوره‌های پالایش ۷۰۰ و ۱۵۰۰ به ترتیب باعث افزایش ۴۰ درصد و ۵۲ درصد در افزایش مقاومت به کشش و همچنین ۵۰ درصد و حدود ۱۰۰ درصد در افزایش مقاومت

جوهر تحت تأثیر قرار دهد.

نتیجه‌گیری

این تحقیق نشان داد که فارغ از توالی انجام شده، تیمار آنزیمی باعث کاهش مقاومت‌ها و خواص نوری کاغذ و درجه روانی خمیرکاغذ شد اما شاخص اریک افزایش پیدا کرد.

اینکه پالایش قبل از تیمار آنزیمی یا بعد از آن انجام شود، نتایج بسیار متفاوتی را ایجاد می‌نماید. اعمال تیمار پالایش بدون پیش‌تیمار آنزیمی، باعث افزایش مقاومت‌ها، بهبود ویژگی‌های نوری و افزایش شاخص ERIC در کاغذ و کاهش درجه روانی خمیرکاغذ شد؛ اما پالایش با پیش‌تیمار آنزیمی بعکس باعث کاهش مقاومت‌ها گردید. درجه روانی خمیرکاغذ روندی غیرمعمول را نشان داد و شاخص اریک با شیب تندتری افزایش پیدا کرد.

اینکه با تغییر محل پالایش (قبل از تیمار آنزیمی و یا بعد از آن) نتایجی تا این حد متفاوت ایجاد می‌شود می‌تواند به دلیل معنادار بودن اثر تیمار آنزیمی بر الیاف سلولزی باشد. به این ترتیب و با اتکا به نتایج به دست آمده، نویسندگان این تحقیق بر این عقیده‌اند که می‌توان با اعمال تیمار آنزیمی پیش از پالایش، در تعداد دوره‌های بسیار کمتری از ۷۰۰ و ۱۵۰۰ به همان نتایج مطلوب دست پیدا کرد، از این رو لازم به نظر می‌رسد که در تحقیقات آینده برای رسیدن به ویژگی مشخصی از خمیرکاغذ، نسبت به تغییر دوره‌های پالایشگر اقدام کرد تا بهترین شرایط پالایش با پیش‌تیمار آنزیمی به دست بیاید.

منابع مورد استفاده

- Bhardwaj, N.K., Hoang, V. and Nguyen, K.L., 2007. Effect of Refining on Pulp Surface Charge Accessible to Polydadmac and FTIR Characteristic Bands of High Yield Kraft Fibers, *Bioresource Technology* 98:962–966.
- Bajpai, P. K. (2010). "Solving the Problems of Recycled Fiber Processing with Enzymes," *Bioresources* 5(2), 1311-1325.
- Buzala, P., Kalinowska, H. and Derkowska, M., 2016. "Effect of Cellulases and Xylanases on Refining Process and Kraft Pulp Properties," *PLOS ONE*,

اندازه‌گیری شده است. در صورتی که این اعداد در فرایند پالایش با پیش‌تیمار آنزیمی به ۳۰,۵ و ۳۰,۲ تقلیل پیدا کرده‌اند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پیش‌تیمار آنزیمی شرایط را برای پالایش مهیا می‌کند و الیاف ضربه‌پذیری مناسب‌تری در فرایند پالایش پیدا می‌کنند و می‌توان گفت که با اعمال پیش‌تیمار آنزیمی در این توالی، نیازی به دوره‌های ۷۰۰ و ۱۵۰۰ برای رسیدن به اعداد ۴۷,۵ و ۵۱,۵۷ نیست و قطعاً با تعداد کمتری از دور پالایش به این اعداد خواهیم رسید و این روند نه تنها برای مقاومت به کشش بلکه تقریباً برای تمام پارامترهای کیفی قابل استناد است.

در مرحله تیمار آنزیمی، هیدرولیز الیاف سلولز در نواحی اتصال الیاف به جوهر باعث انفصال ذرات جوهر از روی الیاف شده (Kim et al., 1991; Lee et al., 2011) و نتیجه آن کاهش درجه روشنی می‌باشد. در همراهی پالایش با تیمار آنزیمی در دو دور ۷۰۰ و ۱۵۰۰ رفتار متفاوتی ایجاد شده است. در ۷۰۰ دور پالایش مقدار درجه روشنی تغییر قابل توجهی نداشته است اما در پالایش ۱۵۰۰ دور، درجه روشنی کاهش پیدا کرده است و نتایج تحلیل آماری نیز معناداری را نشان می‌دهد. بنابراین به نظر می‌رسد با استفاده از تیمار پالایش پس از تیمار آنزیمی انفصال ذرات جوهر از روی الیاف بیشتر انجام شده و نتیجه آن کاهش درجه روشنی به‌ویژه در پالایش با دور ۱۵۰۰ می‌باشد. از این رو تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده و می‌توان گفت که قریب به اتفاق این تحقیقات با نتایج این تحقیق مشابه هستند (Lee, 2011).

اثر پیش‌تیمار آنزیمی در شاخص ERIC از نظر آماری در سطح ۹۵٪ معنادار بوده است. به نحوی که دور پالایش ۷۰۰ و ۱۵۰۰ با پیش‌تیمار آنزیمی به ترتیب باعث افزایش ۴۲ درصد و ۷۰ درصد در این شاخص شدند، در حالی که همین دوره‌های پالایش بدون پیش‌تیمار آنزیمی تنها ۱۳ درصد و ۳۵ درصد ERIC را افزایش دادند. افزایش شاخص ERIC را می‌توان به خرد شدن و پراکنده شدن ذرات جوهر در خمیرکاغذ ارتباط داد. از این رو افزایش این شاخص می‌تواند در فرایند جوهرزدایی اثرهای مثبتی داشته باشد و بازدهی فرایند شناورسازی را با توجه به کوچک‌تر کردن ابعاد ذرات

- Properties of Old Newspaper Deinked Pulp,” *BioResources* 5(4), 2520-2534.
- Maximino, M.G., Taleb, M.C., Adell, A.M. and Formento, J.C., 2011. “Application of Hydrolitic Enzymes and Refining on Recycled Fibers,” *Cellulose Chem. Technol.* 45 (5-6), 397-403.
- Ny, C.L. and Messmer, M., 2007. “Potential of Refining and Dispersing to Develop Recycled Fibre Properties,” *Pulp and Paper Canada* 38, 108:2.
- Pala, H., Lemos, M.A., Mota, M. and Gama, F.M., 2001. “Enzymatic upgrade of old paperboard containers,” *Enzyme and Microbial Technology* 29 (2001) 274–279.
- Pala, H., Mota, M. and Gama, F.M., 2001. “Refining and Enzymatic Treatment of Secondary Fibers for Paperboard Production: Cyber flex Measurements of Fiber Flexibility,” *COST E20 – Wood Fiber Cell Wall Structure*.
- Quinde, A., 1994. “Enzymes in the Pulp and Paper Industry: A Review,” *A Quinde Pulping Consulting Inc.*
- Talaiepoor, M., 2008. “Chemical Deinked Pulp Refining on Optical and Mechanical Properties of Paper,” *Iranian Wood and Paper Research Journal* Vol. 24, No. 1, 148-157.
- Talaiepoor, M. and Imani, R., 2008. “Effect of Debonding Agent and Refining on the Properties of Deinked Pulp,” *Tappi Journal* 12-14.
- Torres, C. E., Negro, C., Fuente, E. and Blanco, A., 2012. “Enzymatic Approaches in Paper Industry for Pulp Refining and Biofilm Control,” *Appl Microbiol Biotechnol.* 96: 327–344.
- Wavell, F.C., 1995. “Explaining Hand-Sheet Tensile and Tear In Terms of Fiber-Quality Numbers,” *Tappi Journal*, 78 (1), 101-106.
- Wong, K.Y., Richardson, J.D. and Mansfield, S.D., 2000. “Enzymatic Treatment of Mechanical Pulp Fibers for Improving Papermaking Properties,” *Biotechnol. Prog.* 16: 1025-1029.
- Xia, X. and Gong, H., 2011. “Effects of Refining on the Fiber Properties of Poplar APMP.” *J. Chem. Chem. Eng.* 5, 20-24.
- Znidarsie-Plazl, P., Rutar, V. and Ravnjak, D., 2009. “The Effect of Enzymatic Treatments of Pulp on Fiber and Paper Properties,” *Chem. Biochem. Eng.* 23 (4) 497–506.
- Zhang, Z. J., Chen, Y. Z., Hu, H. R. and Sang, Y.Z., 2013. “The Beatability –aiding Effect of *Aspergillus niger* Crude Cellulase on Bleached Simao Pine Kraft Pulp and its Mechanism of Action,” *Bioresources* 8(4), 5861-5870.
- DOI:10.1371.
- Cui, L., Meddeb-Mouelhia, F., Laframboise, F. and Beauregard, M., 2015. “Effect of Commercial Cellulases and Refining on Kraft Pulp Properties: Correlations Between Treatment Impacts and Enzymatic Activity Components,” *Carbohydrate Polymers* 115: 193–199.
- Dourado, F., Mota M., Pala, H. and Gama, F.M., 1999 “Effect of cellulose adsorption on the surface and interfacial properties of cellulose,” *Cellulose* 6: 265–282
- Dienes, D., 2006. “Effect of cellulase enzymes on secondary fiber properties,” Ph.D. thesis, Budapest University of Technology and Economics Department of Agricultural Chemical Technology.
- Eriksson, K. E. L., 1998. “Biotechnology in the Pulp and Paper Industry: An Overview,” *American Chemical Society*, Chapter 1.
- Gao, Y., Huang, F., Rajbhandari, V., Li, K. and Zhou, Y., 2009. “Effect of Separate Refining and Co-refining of BCTMP/KP on Paper Properties,” *PULP & PAPER CANADA*, 28-33.
- Garcia1, O. Torres, A.L., Colom, J.F., Pastor, F.I. J., Díaz, P. and Vidal, T., 2002. “Effect of Cellulase-Assisted Refining on the Properties of Dried and Never-Dried Eucalyptus Pulp,” *Cellulose.* 9: 115–125, 2002.
- Gil, N., Gil, C., Amaral, M. E., Costa, A.P. and Duarte, A.P., 2009. “Use of Enzymes to Improve the Refining of a Bleached Eucalyptus Globulus Kraft Pulp,” *Biochemical Engineering Journal* 46: 89–95.
- Heydari, S., Ghasemian, A. and Afra, E., 2013. “Effects of Refining and Cationic Polyacrylamide on Strength Properties of Paper Made from Old Corrugated Container (OCC),” *World of Sciences Journal*, 2013-April-Special Issue, 1-8.
- Ibarra, D., Monte, M. C., Blanco, A., Martinez, A.T. and Martinez, M.J., 2012. “Enzymatic deinking of secondary fibers: cellulases/hemicellulases versus laccase-mediator system,” *J. Ind. Microbiol Biotechnol.* 39: 1-9.
- Kim, H.J., Jo, B.M. and Lee, S.H., 2006. “Potential for Energy Saving in Refining of Cellulase-Treated Kraft Pulp,” *J. Ind. Eng. Chem.* Vol. 12, No. 4, 578-583.
- Loosvelt, I., 2009. “Modifying the Quality of Fiber with Enzymes,” *Paper Age* 20-22.
- Lee, C.K., Ibrahim, D., Ibrahim, C.O. and Wan Rosli, W., 2011. “Enzymatic and Chemical Deinking of Mixed Office Waste Paper and Old Newspaper: Paper Quality and Effluent Characteristics,” *Bioresources*, 6(4), 3859-3875.
- Mayeli, N. and Talaiepour, M., 2010. “Effect of different HLB Value and Enzymatic Treatment on the

The effect of Enzymatic treatment and Refining Sequence on the Properties of Pulp Produced from Mixed Office Waste Paper

M.A. Hossein¹, M. Talaeipour^{2*}, A.H. Hemmasi³, B. Bazyar⁴
and S. Mahdavi Feyz-abadi⁵

1-Ph.D., Department of Wood and Paper Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2*-Corresponding author, Associate Prof., Department of Wood and Paper Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: m.talaeipoor@srbiau.ac.ir

3-Prof., Department of Wood and Paper Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- Associate Prof., Department of Wood and Paper Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

5-Associate Prof., Wood & Forest Products Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agriculture Research Education and Extension Organization, Tehran, Iran

Received: Feb., 2020

Accepted: May, 2020

Abstract

The effect of applying the sequence of enzymatic treatment and refining on the properties of deinked pulp from mixed office waste (MOW) is investigated. Refining was applied for 700 and 1500 revolutions with PFI mill beater. Enzymatic treatment was applied for 60 minutes at the temperature of 60°C and 13% consistency. Applying enzymatic treatment led to decrease the strength properties of pulp and also decreased the freeness. The refining process resulted in increase the pulp properties. By applying enzymatic treatment before refining, the freeness of pulp changed significantly so that, the freeness of the pulp reached 496 and 390 for 700 and 1500 refining revolution respectively just for refining but these numbers changed to 397 and 544 for same revolutions for “enzymatic treatment + refining” sequence. Enzymatic pre-treatment led to increase in freeness of pulp with higher refining revolution. This means that the enzymatic treatment was effective. Generally, refining itself improved the quality of pulp, but refining with enzymatic pre-treatment, led to decrease in quality parameters of pulp in the same refining revolutions. Refining with enzymatic pre-treatment increased ERIC as one of the effective parameters of waste paper pulp.

Keywords: Cellulase, refining, pulp, ERIC, MOW, strength.