



دانشگاه گواران

مجله پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل  
جلد نوزدهم، شماره چهارم، ۱۳۹۱  
<http://jwfst.gau.ac.ir>

## استفاده از اکسترودر دوماریچی برای تولید خمیر کاغذ از ساقه برنج

احمد رضا سرائیان<sup>۱</sup>، \* پژمان رضایتی چرانی<sup>۲</sup>، علیرضا طالبی زاده<sup>۳</sup> و کامل یعقوبی<sup>۴</sup>  
<sup>۱</sup>دانشیار دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، آنداشجوی دکتری دانشکده  
مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، آستادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه  
ولی عصر (عج) رفسنجان، کارشناس ارشد مرکز تحقیقات، صنایع چوب و کاغذ ایران (چوکا)، رضوان شهر  
تاریخ دریافت: ۸۹/۸/۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۰/۱۹

### چکیده

در دهه اخیر اکسترودر دوماریچی یکی از فن‌آوری‌های خمیر کاغذسازی در حال گسترش برای منابع غیرچوبی با مزیت‌های زیاد است که بررسی قابلیت تولید خمیر کاغذ به‌وسیله آن با توجه به پیشرفت علوم ضروری به نظر می‌رسد. خمیر کاغذسازی با اکستروژن یک روش خمیر کاغذسازی شیمیایی- مکانیکی است که لیاف تحت تنش‌های کششی و فشاری به خمیر کاغذ تبدیل می‌شود. در این پژوهش ضمن معرفی این فن‌آوری، قابلیت خمیر کاغذسازی ساقه برنج پیش‌تیمار شده با هیدروکسید سدیم (۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ درصد) به مدت ۴ ساعت با اکسترودر دوماریچی هم‌سو با سرعت‌های متفاوت (۵۵، ۷۰ و ۸۵ دور در دقیقه) و دماهای متفاوت اکستروژن (۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد) بررسی شد. نتایج ویژگی‌های خمیر کاغذ با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب ۱۵ مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که مقدار زیادی از خاکستر می‌تواند در خمیر کاغذ باقی بماند. همچنین، خمیر کاغذهای تولیدی به دلیل درجه روانی زیاد، در صورت عبور دوباره از اکسترودر و یا پالایش محدود می‌تواند در تولید فلوتینگ و لاینر به کار گرفته شود. به علاوه، روند نتایج نشان می‌دهد با به‌کارگیری شرایط پیش‌تیمار شدیدتر در دماهای بالاتر اکسترودر (۸۰ درجه سانتی‌گراد) به همراه سرعت چرخش به نسبت پایین اکسترودر می‌تواند برای خمیر کاغذهایی با عدد کاپای کم‌تر به کار گرفته شود.

**واژه‌های کلیدی:** اکسترودر دوماریچی، ساقه برنج، خمیر کاغذسازی، طراحی مرکب مرکزی، هیدروکسید سدیم

\* مسئول مکاتبه: [p.rezayati@gmail.com](mailto:p.rezayati@gmail.com)

## مقدمه

اگرچه صنعت تولید خمیر و کاغذ به دلیل استفاده از منابع تجدیدپذیر دارای قابلیت تطابق‌پذیری پایداری با محیط زیست است و قابلیت تولید انرژی تجدیدپذیر از منابع چوبی باقی‌مانده از درختان را دارد. با این وجود، تولید خمیرکاغذ با روش‌های رایج همراه با اثرات قابل‌توجه‌ای بر محیط زیست می‌باشد. برآورد شده است که این صنعت پنجمین صنعت بزرگ مصرف‌کننده انرژی به‌شمار می‌آید، به‌طوری‌که ۱۰ درصد از کل انرژی مصرفی صنایع جهان را به خود اختصاص داده است. این در حالی است که، مصرف جهانی کاغذ از ۳۱۸ میلیون تن در سال ۲۰۰۱ به حدود ۴۲۵ میلیون تن در سال ۲۰۱۰ رسیده است (هریس و همکاران، ۲۰۰۸). بنابراین همواره پژوهش‌ها، برای یافتن روش‌های تولید خمیرکاغذ دوست‌دار محیط زیست از منابع لیگنوسلولزی چوبی و غیرچوبی برای توسعه پایدار در حال انجام است. در پژوهش‌های اخیر، دو گرایش روش‌های خمیرکاغذسازی با حلال آلی و خمیرکاغذسازی با اکسترودر بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است (وستن‌بروک، ۲۰۰۰؛ نوایی‌ارده و همکاران، ۲۰۰۴؛ رضایتی‌چرانی و محمدی‌روشنده، ۲۰۰۵؛ رضایتی‌چرانی و همکاران، ۲۰۰۶؛ ضیایی‌شیرکلایی و همکاران، ۲۰۰۸).

اکسترودر به‌عنوان یک فن‌آوری جدید به حساب نمی‌آید. اما، طی دهه اخیر به‌شدت مورد توجه محققان و مبتکران قرار گرفته است (ورجنز و برزین، ۲۰۰۶). این فن‌آوری به‌طور عمده در صنایع شیمیایی، دارویی و کمپوزیت کاربرد دارد و در صنایع خمیرکاغذ نیز به‌طور محدود به‌کار گرفته می‌شود. به‌طورکلی فن‌آوری یاد شده، قابلیت انعطاف‌پذیری خوبی برای کاربردهای مختلف و نیز قابلیت مخلوط کردن یک‌دست و سریع با راندمان تولید بالا را دارا می‌باشد. با پیشرفت دانش، پژوهش‌های دهه اخیر سعی بر آن دارند تا استفاده بهتری از این فن‌آوری با توجه به پتانسیل‌های مفید آن در صنایع خمیرکاغذ گردد.

در مقایسه روش‌های خمیرکاغذسازی شیمیایی و مکانیکی رایج از منابع لیگنوسلولزی غیرچوبی، ونروکل و همکاران (۱۹۹۵) نتیجه گرفت که برای تهیه خمیرکاغذ شیمیایی - مکانیکی، خمیرکاغذسازی با اکسترودر از نظر فن‌آوری و اقتصادی مناسب‌تر می‌باشد (ورجنز و برزین، ۲۰۰۶). هارایز (۲۰۰۸) نیز خط تولید منسجمی را با استفاده از فن‌آوری اکسترودر برای تهیه خمیر و کاغذ از منابع لیگنوسلولزی غیرچوبی معرفی نموده است که قادر است با مقیاس تولید ۲۰-۱۰ برابر کوچک‌تر از صنایع رایج، هزینه تولید را نیز به‌ازای هر تن کاغذ تولیدی کاهش دهد (هریس و همکاران، ۲۰۰۸).

## احمدرضا سرانیان و همکاران

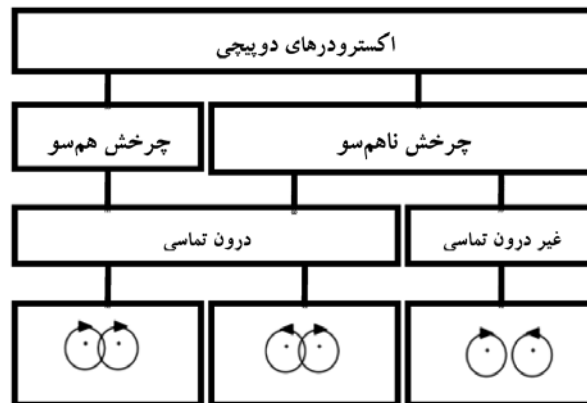
اکسترودر دوپیچی<sup>۱</sup> دارای سه جزء اصلی شامل بخش نیرو محرکه، بخش فرآیندی و بخش تخلیه، مشابه اکسترودر تک پیچی می باشد. در اکسترودر دو پیچی، همان طور که از نامش پیداست، دو محور ماریچ در داخل پوسته یک قرار دارد، در حالی که در اکسترودر نوع ساده تک پیچی، یک محور پیچی یا حلزونی وجود دارد. عوامل مؤثر بر عملکرد اکسترودرهای دو پیچی عبارتند از چرخش نسبی پیچها نسبت به یکدیگر، طراحی پره پیچها و چگونگی تماس آنها با یکدیگر و شکل محورهای پیچها، که سبب تقسیم بندی اکسترودرها به صورت زیر می شوند (اندرسن، ۲۰۱۰):

- چرخش هم سو و ناهم سو (مخالف)<sup>۲</sup>

- طرح های پره درون تماسی و غیردرون تماسی<sup>۳</sup>

- طرح های محور<sup>۴</sup> موازی و مخروطی

شکل ۱ طرح های مختلف اکسترودر دوماریچی را براساس دو ویژگی نخست نشان می دهد. در الگوی چرخش جریان هم سو، هر دو پیچ در جهت مشابه ساعت گرد یا عکس می چرخد. در الگوی چرخش ناهم سو، یک پیچ در جهت ساعت می گردد و دیگری در جهت عکس می چرخد. البته به طور معمول، از نقطه نظر طراحی، فرقی نمی کند که کدام یک ساعت گرد باشد.



شکل ۱- انواع حالات اکسترودر (اندرسن، ۲۰۱۰).






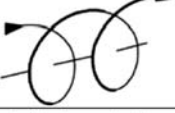
- 1- Twin-Screw Extruder
- 2- Co-Rotating and Counter-Rotating
- 3- Intermeshing and Non-Intermeshing
- 4- Shaft

اصطلاحات پره درون‌تماسی و پره غیردرون‌تماسی به نزدیکی نسبی پیچ‌ها مربوط می‌شود. در حالت پره غیردرون‌تماسی، دو پیچ به صورت پهلو به پهلو قرار می‌گیرند و تداخلی ندارند، به عبارت دیگر دو پیچ به طور مجزا داخل یک پوسته مشترک قرار داده شده‌اند. در حالت درون‌تماسی پیچ‌ها خیلی نزدیک به هم قرار می‌گیرند و تنها به اندازه ناچیزی بین آن‌ها فاصله می‌باشد تا امکان چرخش پیچ‌ها بدون تماس با همدیگر فراهم باشد و تاج- بالای- هر پیچ در گودی یا بدنه دیگری می‌چرخد. در اکسترودرهای هم‌سو، در حقیقت پیچ‌ها در ناحیه بین‌پره‌ای در جهت مخالف هم از بغل هم عبور می‌کنند، در حالی که در حالت‌های چرخش ناهم‌سو، پیچ‌ها حرکتی در جهت موافق در ناحیه بین‌پره‌ای دارند. در اکسترودرهای نوع درون‌پره‌ای هم‌سو، حرکت ناهم‌سو در ناحیه بین‌پره‌ای اجازه عمل نظافت خود به خود را هنگام چرخش پیچ‌ها ممکن می‌سازد. در واقع، برآمدگی هر پیچ، بدنه پیچ مجاور را از مواد پاک می‌سازد و امکان ماندن مواد را در هر نقطه از پیچ به حداقل می‌رساند. ویژگی یاد شده برای اکسترودرهای نوع درون‌پره‌ای ناهم‌سو وجود ندارد. اثر دیگر متغیرهای طراحی درون/ غیردرون‌پره‌ای و جریان هم‌سو/ ناهم‌سو در مکانیسم حرکت دقیق مواد به سمت جلو یا انتقال آن به بخش‌های مختلف اکسترودر می‌باشد. شکل ۲ خصوصیات انتقالی را برای اکسترودر تک‌مارپیچی، و دومارپیچی همسان‌گرد و ناهم‌سانگرد در حالت تماس درون‌پره‌ای را نشان می‌دهد (اندرسن، ۲۰۱۰).

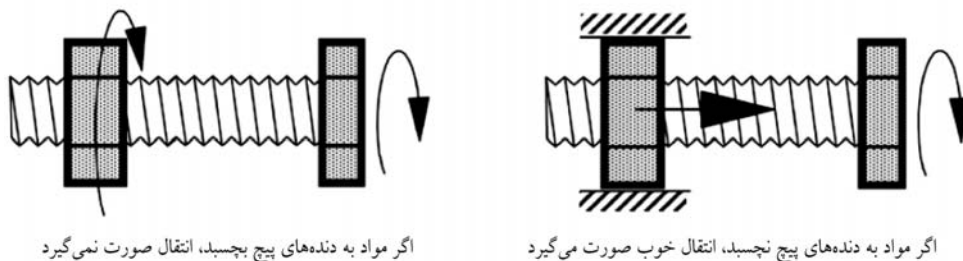
طرح اکسترودر تک‌مارپیچی بر پایه جریان کششی می‌باشد. جریان کششی، عمل کشش پیچ در حال چرخش است که مواد متمایل به چسبیدن به بدنه پوسته را در طول اکسترودر می‌کشد. اگر مواد متمایل چسبیدن بیش‌تری به پیچ نسبت به بدنه پوسته داشته باشند، ممکن است درست در همان نقطه چسبیده باقی بمانند. در این حالت، مواد به طرف خروجی اکسترودر حرکت نمی‌کنند. شکل ۳ این ویژگی را با پیچ و مهره نشان می‌دهد:

اگر هر دو پیچ و مهره به‌طور آزاد بچرخند، مهره در همان مکان باقی می‌ماند. ولی اگر مهره روی سطح ثابت شود، یعنی به‌طور آزاد با چرخش پیچ نچرخد، در این صورت ضمن حرکت پیچ به طرف انتهای کانال اکسترودر، مهره به‌عنوان مواد حرکت خواهد نمود. در نگاهی دوباره به شکل ۲، ملاحظه می‌شود که حالت حرکت ناهم‌سو با حالت تماس درون‌پره‌ای بر پایه جریان کششی تکیه ندارد. پیچ‌ها قسمت‌های C شکل انفرادی را تشکیل می‌دهند که با چرخش پیچ این قسمت‌های C شکل به سمت انتها حول داده می‌شوند. این عمل جریان جابه‌جایی مثبت نامیده می‌شود. اکسترودر هم‌سو در حالت تماس درون‌پره‌ای بر پایه هر دو اصول جابه‌جایی مثبت و جریان کششی استوار است. عمل جابه‌جایی مثبت در بخش کوچکی در ناحیه درون‌پره‌ای- محل رسیدن دو پیچ به هم‌دیگر- ظاهر می‌شود و در

بقیه مناطق باقی مانده پیرامون جداره داخلی پوسته عمل جریان کششی ظاهر می شود. عبارت موازی و مخروطی در مورد اکسترودرها نیز به قطر پیچ درون پوسته در آغاز و انتهای اکسترودر مربوط می شود. در سیستم موازی، قطر پیچ در طول ماشین ثابت باقی می ماند. در اکسترودر مخروطی، قطر پیچ در ناحیه تغذیه بزرگ تر از ناحیه تخلیه است (ونروکل و همکاران، ۱۹۹۵).

اکسترودر دو مارپیچی		اکسترودر تک پیچ
هم سو	ناهم سو	
سیستم محوری بسته 	سیستم محوری باز 	سیستم محوری باز 
		
ناحیه بین بره ای باز پیچ ها. "انتقال پیچ منفرد" در دیگر بخش های پیچ.  کاهش انتقال کاهش تشکیل فشار آمیزش طولی خوب	اتاقک بسته در ناحیه بین بره ای پیچ ها. "انتقال پیچ منفرد" در دیگر بخش های پیچ.  انتقال خوب تشکیل فشار خوب کاهش آمیزش طولی	انتقال محصول وابسته به اختلاف اصطکاک پلیمر به پیچ و پلیمر به بدنه پوسته. - اصطکاک پایین به پیچ (آب کاری کروم) - اصطکاک بالا به بدنه پوسته (سطح داخلی شیاردار) انتقال مواد مذاب به وسیله جریان کششی (Drag flow)

شکل ۲- خصوصیات انتقالی در اکسترودر (اندرسن، ۲۰۱۰).



شکل ۳- مکانیسم انتقال در اکسترودر تک پیچی (اندرسن، ۲۰۱۰).

کاربرد اکسترودر در صنایع خمیر و کاغذ: معمولاً، در صنایع رایج خمیر و کاغذ از اکسترودر ساده تک‌پیچی تحت عنوان اسکرو<sup>۱</sup> به‌طور عمده برای حمل خرده‌چوب برای خمیرکاغذسازی، انتقال خمیرکاغذ با درصد خشکی بالا بین تجهیزات خمیرکاغذسازی و حمل مواد جامد مثل سنگ آهک برای تولید مایع خمیرکاغذسازی و انتقال لجن رسوبی در کف مخازن زلال‌سازی با طول مسیر محدود، استفاده می‌شود. اکسترودر دومارپیچی نیز به‌طور عمده در بخش شستشوی خمیرکاغذ برای خارج‌سازی باقی‌مانده مایع خمیرکاغذسازی در خمیرکاغذ تولیدی به‌کار می‌رود.

از سویی صنایع خمیرکاغذ از صنایع پرمصرف انرژی محسوب می‌شوند و از سویی دیگر برای تولید خمیرکاغذ از منابع لیگنوسلولزی غیرچوبی، ضرورت به‌کارگیری صنایع خمیرکاغذ با مقیاس محدود می‌باشد. با توجه به این محدودیت‌ها، در دهه اخیر، فن‌آوری اکستروژن در تهیه خمیرکاغذ در حال گسترش می‌باشد. فن‌آوری اکستروژن نیز پیچیدگی‌های خود را دارد و بنابراین ضرورت بررسی قابلیت خمیرکاغذسازی با آن در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. در سال‌های اخیر، در راستای جای‌گزینی سیستم‌های خمیرکاغذسازی رایج مثل پخت در دیگ‌های خمیرکاغذسازی منقطع و پیوسته، روش تازه‌ای با توجه به اهمیت مسایل زیست‌محیطی و قابلیت اقتصادی، روش تازه‌ای با استفاده از فن‌آوری پیچ با نام تجاری اکسترودر دومارپیچی<sup>۲</sup> مورد توجه قرار گرفته است. خمیرکاغذسازی با اکسترودر دوپیچی با مکانیسم شیمیایی - مکانیکی طی اعمال تیمار شیمیایی و به‌دنبال آن تنش فشاری و برشی انجام می‌شود. اصول اولیه این روش خمیرکاغذسازی از ۴۰ سال پیش به‌کار گرفته شده است که نتایج موفقیت‌آمیزی در سطح نیمه‌صنعتی برای خمیرکاغذسازی پنبه، کنف، کاه گندم و کتان در سطح دنیا داشته است (ورجنز و برزین، ۲۰۰۶). در واقع این نوع خمیرکاغذسازی مشابه روش بی‌ویس<sup>۳</sup> است که با دو اکسترودر تک‌مارپیچی سری طراحی شده است که در اولی اقدام به اشباع و برش جزئی مواد لیگنوسلولزی می‌گردد و در دومی برای سفیدسازی و برش اضافی استفاده می‌گردد. در طی مرحله خمیرکاغذسازی الیاف کوتاه و مجتمع می‌شوند که شامل باز شدن الیاف اولیه از یکدیگر و ریش‌ریش شدن آن‌ها می‌باشند همچنین، خمیرکاغذسازی با اکسترودر دومارپیچی به الیاف امکان برش طولی تا ابعاد مورد انتظار را می‌دهد، بنابراین به‌دنبال خمیرکاغذ می‌تواند به‌وسیله سیستم‌های کاغذسازی بالکی آماده و برای مناطق مصرف منتقل گردد. این فرآیند از نظر فیزیکی برای ظرفیت‌های کوچک مناسب می‌باشد و نسبت به فن‌آوری‌های رقیب به هزینه‌های سرمایه‌گذاری کم‌تری نیاز دارد.

1- Screw

2- Twin Screw Extruder

3- Bi Vis (French for Twin Screw)

امتیاز دیگر این فن آوری، مصرف آب کم تر برای تولید است که امکان ایجاد مایع سیاه خمیر کاغذسازی غلیظ تری را فراهم می سازد. این روند برای مرحله تیمار مایع سیاه به دست آمده از خمیر کاغذسازی مفید است، زیرا ضرورت به کارگیری تبخیرکننده ها کاهش و یا حذف می گردد. به علاوه این که، این فرآیند دارای اثرات تخریبی کم تری هنگام اعمال تیمار مکانیکی می باشد (هریس و همکاران، ۲۰۰۸).

در مقایسه با خمیر کاغذهای سوزنی برگ مکانیکی سفید شده با پراکسید قلیایی و خمیر کاغذ کرافت سوزنی برگان، خمیر کاغذ به دست آمده از اکسترودر مقاومت به پارگی بالاتر، مقاومت به کشش کم تر و سرعت آب گیری کم تری نشان داده است (وستن بروک، ۲۰۰۰). به طور عموم خمیر کاغذسازهای رایج برای تولید خمیر کاغذهای چاپ و نوشت افزار طراحی شده است، خمیر کاغذ به دست آمده از اکسترودر نیز برای تولید فلوتینگ، لاینر و در صورت رنگبری برای دیگر درجه های کاغذ می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

در ادامه این پژوهش، براساس امتیازات و کارایی فن آوری خمیر کاغذسازی با اکسترودر دومارپیچی هم سو، اقدام به بررسی قابلیت خمیر کاغذسازی ساقه برنج با پیش تیمار قلیایی - غوطه وری در هیدروکسید سدیم - قبل از ورود به اکسترودر دومارپیچی هم سو آزمایشگاهی گردید و سعی گردید شرایط امکان تولید کاغذ بسته بندی با این دستگاه ارزیابی گردد.

### مواد و روش ها

**مواد اولیه:** ساقه برنج از نواحی کشت زاری شمال ایران در استان گیلان، تهیه گردید. ساقه ها که در هوای محیط خشک شده بودند، پس از حذف گره به طول های  $2 \pm 0.3$  سانتی متر بریده شدند و در بسته های ۳۰۰ گرمی برای استفاده در مرحله خمیر کاغذسازی، بسته بندی گردید. رطوبت ساقه های برنج در این مرحله ۹/۵۶ درصد بود. ترکیبات شیمیایی مهم ماده لیگنوسلولزی ساقه برنج مورد بررسی در این پژوهش شامل ۴۶/۵۱ درصد سلولز، ۱۶/۰۳ درصد لیگنین، ۱۴/۶۱ درصد خاکستر، و ۳/۱۰ درصد مواد استخراجی محلول در اتانول/ استن بود.

**مشخصات اکسترودر دومارپیچی:** اکسترودر دومارپیچی هم سو آزمایشگاهی به کار گرفته شده در این پژوهش در شکل ۴ نشان داده شده است. این اکسترودر از نوع دومارپیچی هم سو و با محورهای موازی است که نیازمند پیش تیمار شیمیایی محدود الیاف به منظور حداقل نمودن تخریب الیاف برای رسیدن به خمیر کاغذی با کیفیت نهایی مناسب می باشد. همان طور که در شکل زیر دیده می شود این سیستم دارای ۵ ناحیه پیچ معکوس<sup>۱</sup>، طول ۱۳۷۶ میلی متر، پوسته ای با قطر ۱۱۰ میلی متر حول پیچ هایی به شعاع ۲۵ میلی متر است که فاصله بین دو پیچ درون اکسترودر ۴۰ میلی متر می باشد.

1- Reversed Screw Element (RSE)

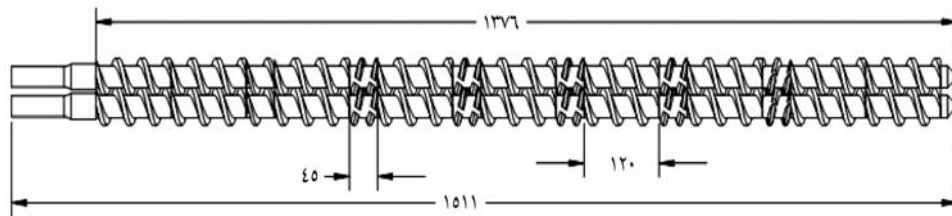
**خمیر کاغذسازی:** بسته‌های ساقه برنج ابتدا توسط محلول هیدروکسید سدیم با غلظت‌های مختلف مطابق جدول ۱ و در نسبت محلول به وزن خشک ۸ به ۱ به مدت ۴ ساعت تیمار شدند و پس از اتمام پیش‌تیمار، ابتدا حدود ۵ برابر وزن ماده اولیه، مایع پخت توسط صافی بدون اعمال فشار جدا شده و سپس ساقه‌های خیس و نرم شده یاد شده به‌طور پیوسته وارد اکسترودر گردید و اکسترودر در دمای مشخص با دور تعیین شده می‌چرخد و از انتهای اکسترودر خمیر کاغذی به‌دست می‌آید که پس از شستشو با الک مش ۲۰۰ آب‌گیری و در هوای محیط خشک شد. جدول ۱ شرایط پیش‌تیمار و فرآیندی اکسترودر و ویژگی‌های خمیر کاغذ به‌دست آمده را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقادیر متغیرهای فرآیندی و ویژگی‌های شیمی- مکانیکی خمیر کاغذ به‌دست آمده در خمیر کاغذسازی در اکسترودر با به‌کارگیری طرح آزمایش‌ها<sup>a</sup>.

شماره پخت	مقادیر کد شده			مقادیر واقعی			نتایج			
	X <sub>T</sub>	X <sub>C</sub>	X <sub>RPM</sub>	T (درجه سانتی‌گراد)	C (درصد)	دور پرخش (rpm)	Y (درصد)	KN	CSF-in (میلی‌لیتر)	Ash (درصد)
۱	۰	۰	۰	۶۰	۰/۸	۷۰	۷۶/۹۰	۸۸	۴۶۳	۷/۷۲
۲	-۱	۰	۰	۴۰	۰/۸	۷۰	۷۳/۹۶	۹۸	۶۰۸	۸/۵۵
۳	۰	۰	-۱	۶۰	۰/۸	۵۵	۷۵/۹۹	۹۹	۵۸۵	۷/۱۸
۴	-۱	+۱	+۱	۴۰	۱/۲	۸۵	۷۰/۳۶	۹۱	۵۷۸	۶/۵۹
۵	۰	+۱	۰	۶۰	۱/۲	۷۰	۷۲/۶۳	۷۵	۴۶۲	۶/۶۱
۶	+۱	+۱	+۱	۸۰	۱/۲	۸۵	۷۲/۸۴	۷۹	۴۳۳	۸/۳۷
۷	۰	۰	+۱	۶۰	۰/۸	۸۵	۷۶/۸۸	۸۳	۴۷۷	۷/۴۶
۸	+۱	-۱	-۱	۸۰	۰/۴	۵۵	۷۸/۲۳	۹۲	۴۶۰	۱۰/۴۲
۹	۰	-۱	۰	۶۰	۰/۴	۷۰	۷۷/۹۰	۹۸	۴۸۸	۹/۷۹
۱۰	-۱	+۱	-۱	۴۰	۱/۲	۵۵	۷۰/۵۷	۸۴	۵۱۳	۶/۲۳
۱۱	-۱	-۱	+۱	۴۰	۰/۴	۸۵	۷۹/۹۵	۱۰۰	۶۲۸	۱۰/۵۱
۱۲	-۱	-۱	-۱	۴۰	۰/۴	۵۵	۷۹/۲۸	۱۱۲	۶۰۵	۱۰/۱۵
۱۳	+۱	+۱	-۱	۸۰	۱/۲	۵۵	۷۵/۲۳	۷۵	۴۳۸	۸/۱۱
۱۴	+۱	۰	۰	۸۰	۰/۸	۷۰	۷۵/۶۵	۸۵	۵۳۵	۹/۶۳
۱۵	+۱	-۱	+۱	۸۰	۰/۴	۸۵	۸۵/۱۷	۹۳	۴۴۸	۱۰/۸۱

X<sub>T</sub><sup>a</sup>: دمای نرمال شده اکسترودر هنگام خمیر کاغذسازی؛ X<sub>C</sub>: غلظت نرمال شده هیدروکسید سدیم؛ X<sub>RPM</sub>: سرعت نرمال شده اکسترودر؛ TE: دمای اکسترودر؛ C: غلظت هیدروکسید سدیم؛ rpm دور اکسترودر؛ زمان پیش‌تیمار: ۲۴۰ دقیقه؛ نسبت ماده خشک به مایع پیش‌تیمار: ۸ به ۱؛ Y: راندمان؛ KN: عدد کاپا؛ CSF-in: درجه روانی خمیر کاغذ خروجی از اکسترودر.





شکل ۴- شماتیک اکسترودر آزمایشگاهی ساخته شده در دانشکده کاسپین دانشگاه تهران (ابعاد به میلی‌متر می‌باشد).

در طی خمیرکاغذسازی، به‌منظور افزایش درستی نتایج، بخش اول و آخر خمیرکاغذهای خروجی از اکسترودر از قسمت میانی جدا شد و به‌طور مجزا با آب ولرم شستشو و در هوای آزاد کف اتاق آزمایشگاه خشک گردیدند. از خمیرکاغذهای دو قسمت اولیه و آخری فقط برای تعیین راندمان استفاده شد و خمیرکاغذ هوا- خشک قسمت میانی برای تعیین ویژگی‌های خمیرکاغذ به‌دست آمده استفاده گردید.

**روش‌ها:** در سنجش ویژگی‌های ماده اولیه خمیرکاغذهای به‌دست آمده از آن‌ها با استفاده از روش‌های زیر استفاده گردیده است. ماده اولیه: لیگنین کلاسون (TAPPI T ۲۲۲ om-۹۸)، سلولز (برانینگ، ۱۹۶۷)، خاکستر (TAPPI T ۲۱۱ om-۸۵)، مواد قابل استخراج با اتانول / استن (TAPPIT ۲۰۴ om-۹۷)، خمیرکاغذهای به‌دست آمده: راندمان خمیرکاغذسازی به روش وزن‌سنجی با خشک کردن در دمای  $105 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت، درجه روانی (TAPPI T ۲۲۷ om-۹۹)، عدد کاپا (TAPPI T ۲۳۶ om-۹۹)، خاکستر خمیر (TAPPI T ۲۱۱ om-۸۵).

**روش آنالیز آماری:** در این پژوهش از طرح فاکتور مرکب مرکزی برای تعیین شرایط خمیرسازی برای بررسی اثرات تغییرات سه عامل تأثیرگذار، غلظت‌های متفاوت محلول هیدروکسید سدیم در پیش‌تیمار، دور اکسترودر و دمای اکسترودر استفاده شد. نتایج با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب<sup>۱</sup> و معادلات رگرسیونی درجه ۲ پردازش، تحلیل و اثرات مستقیم و متقابل سه عامل تأثیرگذار ارزیابی گردید (رضایتی‌چرانی و همکاران، ۱۳۸۴).

1- Minitab

## نتایج و بحث

در این پژوهش، دامنه پاسخ ویژگی‌های خمیرکاغذ به‌دست آمده از دستگاه اکسترودر به پارامترهای عملیاتی به‌عنوان وسیله مفیدی برای بهینه نمودن شرایط خمیرکاغذسازی به‌کار گرفته شده است. در این بررسی، اثرات دو عامل دما و دور اکسترودر به‌عنوان دو عامل مهم تأثیرگذار بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خمیر و کاغذ به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بررسی گردید. ضمن این‌که با توجه به ضرورت پیش‌تیمار ماده لیگنوسولوزی در این فرآیند، سعی شد اثرات تغییرات غلظت محلول هیدروکسید سدیم نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. اثرات شرایط مختلف فرآیندی بر خصوصیات خمیر و کاغذ در جدول ۲ ارایه شده است که با استفاده از مدل‌های رگرسیونی درجه ۲ به‌دست آمده برای ویژگی‌های خمیرکاغذ تحت شرایط بهینه فرضی (۸۰ درجه سانتی‌گراد، ۰/۸ درصد و ۷۰ دور در دقیقه) به‌دست آمده است.

نتایج جدول ۲ همه اثرات مستقیم و متقابل عوامل فرآیندی بر خصوصیات خمیرکاغذ به‌دست آمده را به‌نحوی ساده نشان می‌دهد. این نتایج به‌دست آمده برآورد روابط رگرسیونی برای هر یک از ویژگی‌های مورد بررسی خمیرکاغذ با عوامل اثرگذار می‌باشد که به‌طور مختصر به برخی از موارد آن اشاره می‌گردد. بر طبق این جدول، تقریباً روند اثرات پارامترهای عملیاتی سه‌گانه را بر ویژگی‌های خمیرکاغذ می‌توان برآورد نمود که در نتیجه آن، امکان کنترل فرآیند اکستروژن-خمیرکاغذسازی با اکسترودر-ممکن می‌گردد.

مطابق جدول ۲- ستون ۴، افزایش دور اکسترودر نیز تأثیر معنی‌داری بر راندمان خمیرکاغذسازی نداشته است که قابل پیش‌بینی بود. زیرا افزایش دور اکسترودر عاملی مکانیکی می‌باشد و انتظار تغییر راندمان را نمی‌توان داشت. اثر مثبت دور اکسترودر بر عدد کاپا، فرض کاهش زمان ماند در هنگام عبور ماده لیگنوسولوزی از اکسترودر را تأیید می‌کند که سبب می‌شود لیگنین ناچیزی در این مرحله تخریب و حذف می‌شود. همچنین افزایش دور اکسترودر به تنهایی تأثیر منفی محدودی بر درجه رونی داشته است که با مقایسه این نتیجه‌گیری با نتایج ستون ۳- جدول ۲، که نشان می‌دهد با کاهش دور اکسترودر، درجه روانی نیز کاهش می‌یابد، بنابراین می‌توان گرفت که یک حد بهینه‌ای برای دور اکسترودر در محدوده مورد بررسی باید وجود داشته باشد که منجر به نبود کاهش درجه روانی می‌گردد. این استنباط در خصوص نتایج عدد کاپا نیز صادق است. توضیح این‌که موارد تحلیلی به‌دست آمده ارزیابی معنی‌داری نتایج در محدوده ۹۵ درصد می‌باشد و نتایج آزمایشگاهی اولیه برای همه شرایط تحت بررسی در جدول ۱ ارایه شده است. همچنین معمولاً دور اکسترودر رابطه مستقیم

مثبتی با قابلیت عبوردهی اکسترودر یا توان عبوری آن دارد. در واقع این توان عبوری با افزایش دور اکسترودر به طور مستقیم بهبود می‌یابد. بنابراین به نظر می‌رسد به کارگیری دور اکسترودر ۸۵ دور در دقیقه، ضمن داشتن صرفه اقتصادی تأثیر منفی معنی‌داری بر نتایج نداشته باشد.

بر اساس جدول ۲- ستون ۶، افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم در پیش تیمار به طور مستقیم باعث کاهش راندمان و عدد کاپا می‌گردد که این اثر احتمالاً از قابلیت تخریبی شدید هیدروکسید سدیم بر همی سلولز و به طور محدود بر لیگنین ماده اولیه هنگام پیش تیمار ناشی می‌شود. همچنین افزایش دمای اکسترودر، جدول ۲- ستون ۲، اثرات کاهنده معنی‌داری همانند هیدروکسید سدیم، بر راندمان و عدد کاپا داشته است. مطابق ستون ۱۰ نیز نتیجه می‌شود، افزایش دما، اثرات تخریبی هیدروکسید سدیم را تشدید می‌کند.

یکی از محدودیت‌های خمیر کاغذسازی ماده لیگنوسلولزی برنج در سیستم‌های رایج، وجود درصد سیلیس بالا در این ماده لیگنوسلولزی می‌باشد که ضمن خمیر کاغذسازی، درصد بالایی از این سیلیس از خمیر کاغذ خارج و وارد مایع به دست آمده از خمیر کاغذسازی شده و در مراحل بعدی باعث ایجاد رسوب بر جداره داخلی لوله‌های کوره بازیابی می‌گردد و تشکیل رسوب از قابلیت هدایت گرمایی لوله‌ها می‌کاهد و حتی می‌تواند سبب مسدود شدن آن‌ها گردد (هریس و همکاران، ۲۰۰۸). از جمله برتری‌های فرآیند اکستروژن، امکان حفظ مقدار قابل توجهی از سیلیس در خمیر کاغذ تولیدی می‌باشد که با این برتری در صورت نیاز به بازیابی مایع به دست آمده از پخت با کوره بازیابی، مشکل رسوب سیلیس تا حد قابل توجهی مرتفع می‌گردد. میزان خاکستر خمیر کاغذها در این پژوهش به عنوان تابعی از مقدار سیلیس باقی مانده در خمیر کاغذ برای مقایسه اهمیت این فرآیند در حفظ سیلیس در خمیر کاغذ در مقایسه با فرآیندهای رایج از طریق مقایسه خاکستر در جدول ۲ ارائه شده است. در بررسی اثرات عوامل فرآیندی بر فرآیند اکستروژن، مطابق جدول ۲ مشاهده می‌شود که افزایش درصد هیدروکسید سدیم در مرحله پیش تیمار، باعث کاهش درصد خاکستر خمیر کاغذ می‌گردد و بنابراین به کارگیری حداقل درصد مناسب هیدروکسید سدیم ضروریست.

نتایج ستون ۷ تا ۱۴ جدول ۲ اثرات متقابل بین سه عامل فرآیندی اثرگذار در خمیر کاغذسازی را نشان می‌دهند. این نتایج دلالت بر وجود روابط معنی‌داری بین سه عامل بالا می‌کند که ضرورت کنترل دقیق آن‌ها را برای به دست آمدن نتایج نهایی قابل پیش‌بینی می‌نماید.

جدول ۲- تأثیر شرایط خمیرکاغذسازی با اکسترودر دومارپیچی هم‌سو در نقطه بهینه فرضی (۸۰ درجه سانتی‌گراد، ۰/۸ درصد و ۷۰ دور در دقیقه) بر خصوصیات خمیرکاغذ.

ستون:	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
دور اکسترودر	C	C	↓	↑	C	C	↓	↑	C	C	↓	↑	↓	↑
دمای اکسترودر	↓	↑	C	C	C	C	↓	↑	↓	↑	C	C	↓	↑
غلظت هیدروکسیدسدیم	C	C	C	C	↓	↑	C	C	↓	↑	↓	↑	↓	↑
بازده	-	-	+/-	+/-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-
عدد کاپا	+	-	+	+	+	-	+	+	+	++	--	++	++	--
درجه روانی اولیه	++	0-	-	0-	0-	+	+	+	++	-	+/-	0-	++	-
خاکستر	0+	+	-	-	0-	++	-	0-	++	++	+	++	++	0+

راهنای علایم: ↑ (افزایش)؛ ↓ (کاهش)؛ C (ثابت)؛ + (تأثیرگذاری مثبت)؛ - (تأثیرگذاری منفی)؛ ++ (تأثیرگذاری مثبت جزئی)؛ 0+ (تأثیرگذاری مثبت جزئی)؛ 0- (تأثیرگذاری منفی جزئی)؛ ++ (تأثیرگذاری مثبت قوی تر)؛ -- (تأثیرگذاری منفی قوی تر)؛ +/- (بی تأثیر).

### نتیجه‌گیری

نتایج خمیرکاغذسازی ساقه برنج نیز نشان داد که خمیرکاغذ تولیدی ضمن پیش‌تیمار محدود با هیدروکسید سدیم، با عبور دوباره از اکسترودر و یا با پالایش محدود به دلیل درجه روانی بالا (CSF ۶۰-)، می‌تواند برای تولید فلوتینگ و لاینر به‌کار رود. همچنین درصد بالای خاکستر باقی‌مانده در خمیرکاغذ نیز بر کاهش مشکل سیلیس در مایع به‌دست آمده از خمیرکاغذسازی دلالت می‌کند. همچنین انتظار می‌رود، خمیرکاغذهایی با مقادیر پایین عدد کاپا نیز با به‌کارگیری پیش‌تیمار شدیدتر در دماهای بالاتر اکسترودر به همراه سرعت چرخش به نسبت پایین اکسترودر می‌تواند به‌دست آید.

### منابع

۱- رضایتی‌چرانی، پ.، محمدی‌روشنده، ج.، نوایی‌ارده، ش.، پورجوی، م.، رسالتی، ح. و کاظمی‌نجفی، س. ۱۳۸۴. کاربرد طراح مرکب مرکزی در تحقیقات صنایع سلولزی: خمیرسازی باگاس با دی‌متیل‌فرم‌آمید، مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، ۱۸ (۶)، ۳۴۵-۳۵۸.

2. Andersen, P. 2010. Twin-Screw Extruders. Society of Plastics Engineers, [http://www.4spe.org/sites/default/files/TWS Andersen. PDF](http://www.4spe.org/sites/default/files/TWS%20Andersen.PDF). (available in 22 May 2012)

3. Browning, B.L. 1967. Methods of Wood Chemistry. Vol. 1-2, Interscience Publishers, N.Y., USA.

4. Harris, A.T., Riddlestone, S., Bell, Z. and Hartwell, P.R. 2008. Towards zero emission pulp and paper production: the BioRegional Mini Mill. *J. Cleaner Product.* 16: 1971-1979.
5. Navaee-Ardeh, S., Mohammadi-Rovshandeh, J. and Pourjoozi, M. 2004. Influence of rice straw cooking conditions in the soda-ethanol-water pulping on the mechanical properties of produced paper sheets. *Bioresource Technology*, 92: 65-69.
6. Rezayati-Charani, P. and Mohammadi-Rovshandeh, J. 2005. Effect of pulping variables with dimethyl formamide on the characteristics of bagasse-fiber. *Bioresource Technology*, 96: 1658-1669.
7. Rezayati-Charani, P., Mohammadi-Rovshandeh, J., Hashemi, S.J. and Kazemi-Najafi, S. 2006. Influence of dimethyl formamide pulping of bagasse on pulp properties. *Bioresource Technology*, 97: 2435-2442.
8. Vergnes, B. and Berzin, A. 2006. Modeling of reactive systems in twin-screw extrusion: challenges and applications. *Comptes Rendus Chimie.* 9: 1409-1418.
9. Van Roekel, G.J., Lips, S.J.J., Op Den Kamp, R.G.M. and Baron, G. 1995. Extrusion pulping of true hemp bast fibre (*Cannabis sativa* L.), Tappi Conference, Chigago, USA, Pp: 477-485.
10. Westenbroek, A.P.H. 2000. Extrusion pulping of natural fibres; Determination, implementation and verification of constitutive equations required for modeling. PhD Thesis, University Wageningen and Research Centre, Netherlands.
11. TAPPI Test Methods for Evaluating of Pulp and Paper properties, TAPPI T 222 om-98, TAPPI Press, Atlanta, GA, USA, 2006-2007.
12. TAPPI Test Methods for Evaluating of Pulp and Paper properties, TAPPI T 211 om-85, TAPPI Press, Atlanta, GA, USA, 2006-2007.
13. TAPPI Test Methods for Evaluating of Pulp and Paper properties, TAPPI T 204 om-97, TAPPI Press, Atlanta, GA, USA, 2006-2007.
14. TAPPI Test Methods for Evaluating of Pulp and Paper properties, TAPPI T 227 om-99, TAPPI Press, Atlanta, GA, USA, 2006-2007.
15. TAPPI Test Methods for Evaluating of Pulp and Paper properties, TAPPI T 236 om-99, TAPPI Press, Atlanta, GA, USA, 2006-2007.
16. Ziaie-Shirkolae, Y., Mohammadi-Rovshandeh, J., Rezayati-Charani, P. and Khajeheian, M.B. 2008. Influence of dimethyl formamide pulping of wheat straw on cellulose degradation and comparison on with Kraft process. *Bioresource Technology*, 99: 3568-3578.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Wood & Forest Science and Technology*, Vol. 19 (4), 2013  
<http://jwfst.gau.ac.ir>

## **Application of Twin-Screw Extruder for Production of Pulp from Rice Stalk**

**A.R. Saraeian<sup>1</sup>, \*P. Rezayati Charani<sup>2</sup>, A.R. Talebizadeh<sup>3</sup>  
and K. Yaghoubi<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Associate Prof., Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, <sup>2</sup>Ph.D. Student, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources,

<sup>3</sup>Assistant Prof., Faculty of Engineering, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, <sup>4</sup>M.Sc., Iran Wood and Paper Industries (Chouka), Dept. of Research and Development, Rezvanshahr

Received: 10/26/2010; Accepted: 01/08/2013

### **Abstract**

Twin-screw extruder has been attractive with many efficient benefits as one of developing pulping technology from non-wood feedstocks in recent decades. Extrusion pulping is a chemi-mechanical pulping method in which fibers are processed by means of compression and shear forces. In this research, application of this technology was introduced in pulp and paper industries and the extrusion pulping of rice stalk was investigated. Extrusion pulping of rice stalk was conducted following a central composite design using a two-level factorial plan involving three process variables (pretreatment NaOH concentration: 0.4, 0.8 and 1.2%, extrusion temperature: 40, 60 and 80 °C, extruder rotational speed: 55, 70 and 85 rpm). Responses of pulp properties to the process variables were analyzed using statistical software (MINITAB 15). As the results show, a more content of initial ash of rice stalk was remained in the obtained pulp. Also, because of high freeness of obtained pulps, it is necessary to retransfer the obtained pulp from extruder or refine it for fluting paper and linerboard production. Moreover, analysis of the results reveals that this process can be used to obtain a pulp with low kappa number under a relatively long pretreatment time, high NaOH concentration, high extrusion temperature and moderate extruder rotational speed.

**Keywords:** Twin-screw extruder, Rice stalk, Papermaking, Central composite design, Sodium hydroxide

---

\* Corresponding Author; Email: p.rezayati@gmail.com