Review Article

Polymerization
Quarterly, 2019
Volume 9, Number 1
Pages 14-23
ISSN: 2252-0449

Energy Production from Natural Biopolymeric Wastes of Paper Industries to Reduce Adverse Environmental Effects

Monireh Imani* and Ali Ghasemian

Pulp and Paper Department, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Postal code 4918943464, Gorgan, Iran

Received: 4 Jaunary 2018, Accepted: 11 December 2018

Abstract

Pulp and paper industries produce various and considerable amounts and types of energy-rich natural biopolymeric wastes including wood wastes, residuals from recycled paper production process, various low-quality recovered papers and mill broke and papermaking sludge in all mill operations including wood preparation, pulp and paper production, chemicals recovery, recycled papers processing and wastewater treatments. The volume of these biopolymeric wastes depends on the technological advances, pulp and paper grade and quality of the wood raw material, which provide notable opportunities for the recovery of consumed energy and, especially to reduce adverse environmental effects in paper industries. Generally, energy recovery from natural biopolymeric wastes has been currently considered as a desirable and feasible process in most paper industries of the world. Application of such novel technologies in paper industries can result in higher productivity, lower investment costs and safer operations compared to conventional productions that consume fossil fuels to produce energy. In addition to energy recovery, burning the natural biopolymeric wastes has some advantages such as lowering the air pollution, land-fill operations and the amount and volume of the wastes. The recovered energy can be used in heating systems and power production. A biorefinery bears the aim at producing high-value bio-based chemicals rather than biofuels. The current status of world solid wastes and know-how knowledge of their use as an energy source in the pulp and paper industries are reviewed in the present study.

Key Words

biopolymer, natural sources, energy recovery, paper making, pulp

(*) To whom correspondence should be addressed.
E–mail: monir.imani@aalto.fi

مقاله مروری

بسپارش
فصلنامه علمی
سال نهم، شماره ۱
صفحه ۲۳-۱۴، ۱۳۹۸
ISSN: 2252-0449

تولید انرژی از پسماندهای زیست‌پلیمری طبیعی صنایع کاغذسازی برای کاهش آثار منفی زیست‌محیطی

منیره ایمانی*، علی قاسمیان
گرگان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، گروه علوم و مهندسی کاغذ، کد پستی ۴۹۱۸۹۴۳۴۶۴

دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۴، پذیرش: ۱۳۹۷/۹/۲۰

چکیده

کارخانه‌های خمیر کاغذ و کاغذسازی مقادیر مختلف و درخور توجهی از ضایعات زیست‌پلیمرهای سرشار از انرژی شامل ضایعات چوب، پسماندهای فرایند تولید کاغذهای بازیافتی، انواع کاغذهای بازیافتی با کیفیت ضعیف و لجن کاغذسازی را در تمام مراحل فراوری شامل آماده‌سازی چوب، تولید خمیر کاغذ و کاغذ، بازیابی مواد شیمیایی، عمل‌آوری کاغذهای بازیافتی و تصفیه پساب، ایجاد می‌کنند. مقدار این ضایعات به سطح فناوری، نوع خمیر کاغذ و کاغذ و کیفیت ماده اولیه چوبی بستگی دارد. در مجموع، فرصت‌های درخور توجهی برای بازیابی انرژی مصرفی از این ضایعات و به‌ویژه کاهش آثار منفی زیست‌محیطی در صنایع کاغذسازی ایجاد می‌شود. به‌طور کلی، امروزه در بیشتر صنایع کاغذسازی دنیا بازیابی انرژی از ضایعات زیست‌پلیمرها به‌عنوان فرایندی مطلوب مورد توجه قرار گرفته است. به‌کارگیری چنین فناوری‌های جدیدی در صنایع کاغذسازی می‌تواند به بهره‌وری بیشتر، سرمایه‌گذاری کمتر و عملیات ایمن‌تر در مقایسه با عملیات متداول، منجر شود که از سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی استفاده می‌کنند. به‌طوری که بسیاری از محصولات کارخانه‌های خمیر کاغذ و کاغذ، بیش از نیمی از انرژی مورد نیاز خود را از سوخت‌های زیست‌توده ضایعات جامد، به‌دست می‌آورند. افزون بر امکان بازیابی انرژی گرمایی، سوزاندن پسماندهای زیست‌پلیمرها دارای مزایای دیگری مانند کاهش آلودگی هوا، مقدار دفن سطحی و مقدار و حجم ضایعات است. از انرژی بازیابی‌شده می‌توان در سامانه‌های گرمایشی و تولید برق استفاده کرد. همچنین، می‌توان از بقایای چوب استفاده مناسب‌تری کرده و ارزش افزوده بیشتری به‌کمک زیست‌پالایشگاه برای آن‌ها ایجاد کرد. در این مقاله، وضعیت فعلی و چگونگی استفاده از ضایعات جامد ایجادشده به‌عنوان منبع تولید انرژی در کارخانه‌های خمیر کاغذ و کاغذسازی بررسی شده است.

منیره ایمانی

علی قاسمیان

واژگان کلیدی

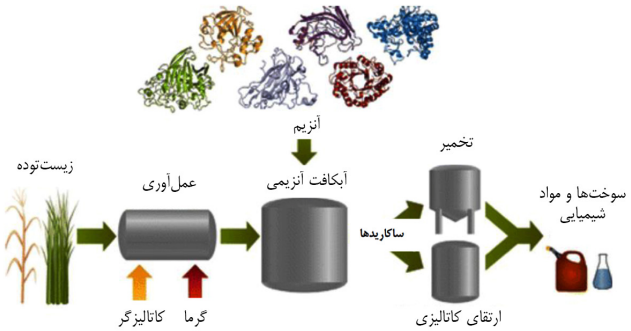
زیست‌پلیمر،
منابع‌طبیعی،
بازیابی انرژی،
کاغذسازی،
خمیر کاغذ

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
monir.imani@aalto.fi

مقدمه

زیست‌توده به‌صورت "هر نوع ماده آلی که از گیاهان مشتق شده و با فوتوسنتز و تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی شیمیایی تولید می‌شود" تعریف شده است. انرژی شیمیایی زیست‌توده می‌تواند از راه احتراق آزاد شده و به‌عنوان انرژی گرمایی استفاده شود [۱]. منابع زیست‌توده پایدار درنظر گرفته می‌شوند، زیرا تجدیدپذیر بوده و سبب گرم‌شدن زمین نمی‌شوند. کربن دی‌اکسید تولیدی از راه احتراق زیست‌توده برای رشد گیاهان مصرف می‌شود و تا زمانی که منابع پایدار است (به‌عنوان مثال از راه کاشت گیاهان)، مقدار رهایش خالص کربن دی‌اکسید ناشی از احتراق به جو، صفر است.

زیست‌توده به‌عنوان منبع مناسبی برای بازیابی انرژی و تولید مواد شیمیایی باارزش به‌شمار می‌رود [۴-۲]. در شکل ۱ نمای کلی فرایند تولید سوخت‌ها و مواد شیمیایی از زیست‌توده، نشان داده شده است [۵]. نقش صنعت خمیر کاغذ و کاغذ در تولید انرژی‌های زیستی در بسیاری از کشورهای اروپایی درخور توجه است. بسیاری از کارخانه‌های تولید خمیر کاغذ و کاغذ بیش از ٪۵۰ انرژی مورد نیاز را از راه بازیابی سوخت‌های زیست‌توده از ضایعات جامد تأمین می‌کنند. انرژی زیست‌توده از راه مایع سیاه پخت، خرده‌چوب‌ها، پوست، خاک اره، پس‌زده‌ها و لجن، آزاد می‌شود. کربن دی‌اکسید موجود در جو که از درختان در طول دوره رشد آزاد شده است، انباشته شده و به مواد کربن آلی تبدیل می‌شود. مقدار انرژی‌های تجدیدپذیر در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمای کلی فرایند تولید سوخت‌ها و مواد شیمیایی از زیست‌توده [۵].

زیست‌توده حاصل از صنایع خمیر کاغذ و کاغذ

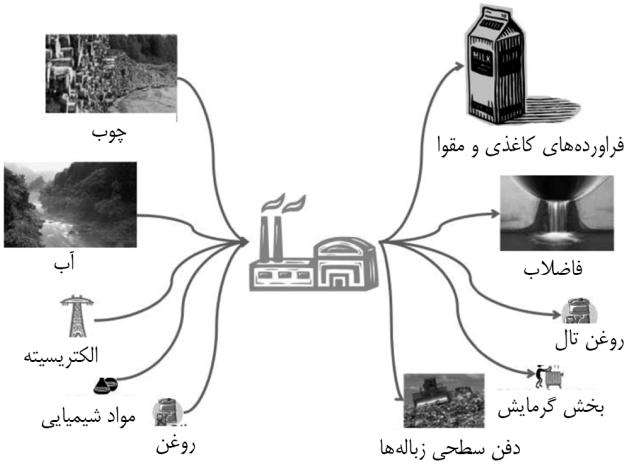
به‌طور عمده منابع زیست‌توده شامل ضایعات کشاورزی، ضایعات چوب از جنگل و صنعت، ضایعات صنایع غذایی و کاغذ، ضایعات شهرداری، لجن‌ها، انرژی حاصل از محصولات با دوره بهره‌برداری کوتاه (۳-۱۵ سال)، درختان (مانند اکالیپتوس، صنوبر و بید)، علف‌ها، محصولات قندی (مانند نیشکر و چغندرقند)، محصولات حاوی نشاسته (مانند ذرت و گندم) و گیاهان دانه‌های روغنی (مانند سویا و آفتابگردان) هستند.

امروزه در صنایع کاغذسازی بازیابی انرژی از ضایعات زیست‌پلیمرها به‌عنوان فرایند مطلوب و در دسترس، مطرح است، به گونه‌ای که در بسیاری از این صنایع، تطبیق و ادغام فناوری‌های پیشرفته تبدیل انرژی زیست‌توده به عملیات کارخانه‌ای مورد توجه قرار گرفته است (شکل ۲) [۶].

جدول ۱- مقدار انرژی زیستی حاصل از زیست‌توده در جهان [۲].

نام منطقه	مقدار انرژی زیستی در سال (MTOE)[۱]				
	ظرفیت عملی			ظرفیت اسمی	
	۱۹۷۰	۱۹۹۹	۲۰۰۵	۲۰۲۰	۲۰۳۰
آفریقا	۸۷	۱۳۱	۱۷۷	۲۱۹	۲۴۰
آسیا	۲۵۹	۲۷۹	۲۷۸	۳۰۲	۳۰۰
اروپا	۶۰	۷۰	۸۹	۲۷۲	۲۹۱
آمریکای لاتین	۷۰	۸۸	۱۰۵	۱۲۳	۱۳۳
آمریکای شمالی	۴۵	۶۴	۶۵	۸۶	۱۰۱
آسیای غربی و مرکزی	۱۱	۷	۶	۸	۱۰
جهان	۵۳۲	۶۳۸	۷۱۹	۱۰۱۰	۱۰۷۵

[۱] معادل میلیون تن نفت (million tones oil equivalent)



شکل ۲- چرخه مواد و انرژی در کارخانه‌های جامع خمیر کاغذ و کاغذ [۶].

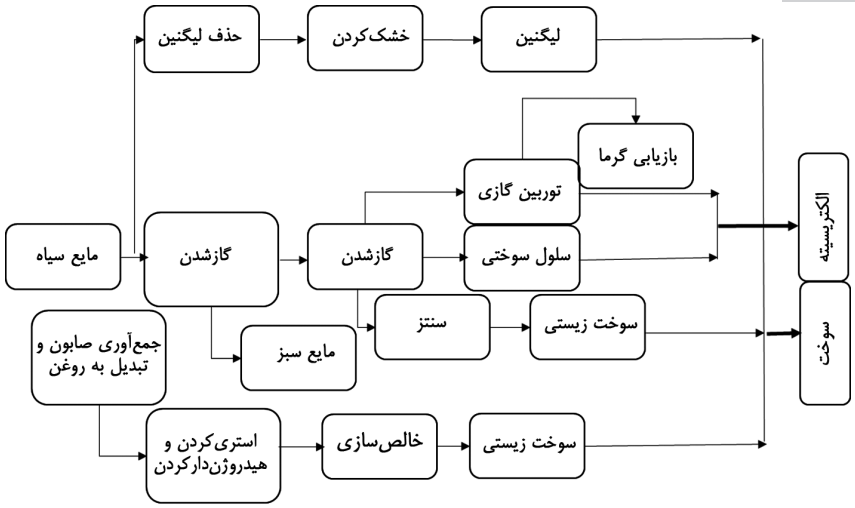
به‌کارگیری چنین فناوری‌های جدیدی در صنایع کاغذسازی می‌تواند به بهره‌وری بیشتر، سرمایه‌گذاری کمتر و عملیات ایمن‌تر در مقایسه با عملیات متداول منجر شود که از سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی استفاده می‌کنند [۷،۸]. باتوجه به جدول ۲ ویژگی‌های انواع سوخت‌ها، مقایسه شده است. در نتیجه، زیست‌توده درخور توجهی از صنعت خمیر کاغذ و کاغذ تولید می‌شود. در جدول ۳ فهرستی از انواع ضایعات زیست‌پلیمرها در صنعت خمیر کاغذ و کاغذ ارائه شده است [۹]. مایع سیاه از مهم‌ترین سوخت‌های زیست‌توده در کارخانه‌های خمیر کاغذ و کاغذ بوده که شامل ٪۵۰ ماده چوبی به‌عنوان مواد آلی محلول است [۱۰]. به‌طور معمول حداکثر مقدار گرمای مایع سیاه، حدود ۱۳۰۰۰ kJ/kg تا ۱۵۵۰۰ kJ/kg است که مقدار آن به گونه چوب و بازده خمیر بستگی دارد.

جدول ۲- مقایسه ویژگی‌های انواع سوخت‌ها [۷].

ارزش گرمایی انواع سوخت‌ها	پوست	لجن زیستی	لجن حاصل از مرکب‌زدایی	زغال سنگ	زغال
ارزش گرمایی (kJ/kg)	۵۹۰۰	۴۲۰۰	۲۸۰۰	۹۲۰۰	۲۴۰۰۰
مقدار رطوبت میانگین (٪)	۶۰	۶۳	۵۸	۵۰	۱۲
خاکستر (w_{dry}٪)	۳	۲۰	۵۰	۵	۱۴
عناصر تشکیل‌دهنده (w_{dry}٪)					
C	۵۰/۶	۳۳/۷	۱۹/۰	۵۷/۱	۷۱/۶
H	۵/۹	۴/۴	۲/۴	۶/۲	۴/۹
S	–	۰/۳	۰/۰۵	۰/۲	۰/۶
N	۵/۰	۰/۷	۱/۰	۱/۹	۱/۹
O	۴۰/۲	۴۱/۲	۲۷/۴	۲۹/۶	۷/۰

جدول۳- ضایعات زیست‌پلیمرها در صنایع خمیر کاغذ و کاغذ [۱۸-۹].

نوع زیست‌پلیمر	منبع ضایعات
مایع سیاه	تولید خمیر کاغذ شیمیایی (فرایند کرافت)
پوست و بازمانده‌های چوب	فرایندهای خمیرسازی شیمیایی، نیمه‌شیمیایی و مکانیکی
پسزده‌های مراحل غربال‌کردن و خمیرپاک‌کردن	تولید خمیر شیمیایی، فرایندهای کاغذ بازیافتی و مراحل آماده‌سازی کاغذ
لجن شیمیایی-مکانیکی	عمل‌آوری آب سفید و پساب
لجن زیستی	عمل‌آوری پساب زیستی
لجن مرکب‌زدایی	کاغذهای بازیافتی مرکب‌زدایی‌شده
لجن مخلوط	منابع گوناگون



شکل ۳- فرایندهای تولید سوخت زیستی از مایع سیاه [۱۱].

سوزاندن مایع سیاه در بخش کوره موجب بازیابی تقریبا ton_{vap}/ton_{pulp} ۴ می‌شود. با تولید بخار در توربین‌ها، مقدار زیادی انرژی برق تولید می‌شود. پژوهشگران این فرایند را به سه بخش تقسیم کرده‌اند: حذف لیگنین، گازشدن و فرایند روغن تال و تولید سوخت زیستی که تمام این مراحل در شکل ۳ به خوبی نشان داده شده است [۱۱]. افزون بر این، ترکیبات عناصر جامد مایع سیاه و ارزش گرمایی آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است[۱۲].

ضایعات چوب به‌عنوان سوخت

منبع تولید ضایعات چوب در کارخانه خمیر کاغذ، بخش آماده‌سازی

جدول ۴- تجزیه شیمیایی و ارزش گرمایی حاصل از جامدات مایع پخت [۱۲].

مقدار عناصر تشکیل‌دهنده (٪)	گونه چوبی	
	سوزنی برگ	پهن برگ
C	۳۳/۵	۳۷/۰
H	۳/۷	۳/۹
N	۰/۱	۰/۱
O	۳۵/۸	۳۴/۰
S	۴/۴	۳/۷
Na	۱۹/۹	۱۹/۲
K	۱/۵	۱/۵
Cl	۰/۵	۰/۵
ارزش گرمایی (MJ/kg)	۱۳/۲	۱۵/۱

خمیر چوب است. ضایعات تولیدی در کارخانه خمیر کاغذ شامل خاک اره حاصل از برش گرده‌بینه (log)، پوست ایجادشده به‌وسیله استوانه پوست‌کن، خرده‌چوب میخی و نرمه‌ها در اثر غربال خرده‌چوب‌ها و ضایعات چوب حاصل از ذخیره چوب در انبار است.

ویژگی‌های ضایعات چوبی به‌شرح زیر است:

- از ذرات با قطر و شکل مختلف تشکیل شده‌اند.
- مقدار رطوبت آن‌ها زیاد و وابسته به زمان است.
- ارزش گرمایی این ضایعات تحت تأثیر مقدار رطوبت آن‌هاست.
- زمان بر تولید ضایعات چوب در کارخانه‌های خمیر اثرگذار است.

به‌طور کلی در هر تن چوب برای تولید خمیر کاغذ، ۳۰۰ kg پوست وجود دارد و ٪۶۰ تا ٪۹۰ ضایعات چوبی در کارخانه، پوست است که ویژگی‌های آن بدین شرح است:

- از لحاظ قطر (۱ mm تا ۱۰۰ mm یا بیشتر) و اندازه ذرات پوست بسیار متفاوت هستند.
- رطوبت پوست بسیار زیاد است و بستگی به شیوه پوست‌کنی دارد. در پوست‌کنی خشک مقدار رطوبت پوست حدود ٪۴۰ تا ٪۵۰ و در پوست‌کنی نیمه‌مرطوب مقدار رطوبت پوست به ٪۷۰ تا ٪۸۰ می‌رسد.
- ذرات پوست سخت و شکننده هستند و به‌راحتی آب را جذب می‌کنند، درصورتی‌که خروج آب به‌سختی انجام می‌گیرد و مقدار خاکستر پوست بیشتر از چوب است.
- مقدار گرمای حاصل از احتراق پوست حدود ۲۰۰۰۰ kJ/kg بر پایه وزن خشک است و رطوبت سبب کاهش ارزش گرمایی پوست می‌شود.

خرده‌چوب‌های میخی و نرمه‌ها در اثر تبدیل گرده‌بینه به خرده‌چوب تولید می‌شوند. مقدار خرده‌چوب‌های میخی و نرمه‌ها به کیفیت خرده‌چوب و عملکرد خرده‌چوب‌ساز بستگی دارد. مقدار خرده‌چوب میخی و نرمه‌ها در هر تن چوب ۵۰ kg تا ۱۰۰ kg بوده که ویژگی‌های آن به شرح زیر است:

– خرده‌چوب میخی شامل قطعات کوچک چوبی است. درحالی‌که نرمه شامل ذرات چوب و پوست بوده و مقدار پوست آن حدود ٪۲۰ تا ٪۵۰ است. سطح رطوبت این ذرات (٪۵۰–۴۰) سبب احتراق بدون آب‌گیری می‌شود. رایج‌ترین روش برای استفاده از ضایعات چوبی، سوزاندن آن‌ها برای تولید گرماست. اهمیت اقتصادی ضایعات چوبی بستگی به ارزش گرمایی و مقدار رطوبت آن‌ها دارد. مقدار رطوبت زیاد به دو دلیل برای زیست‌توده مضر است:

۱– کاهش مقدار گرمای حاصل از ضایعات و

۲– کاهش کارایی دیگ بخار، زیرا تبخیر رطوبت در چوب و پوست، سبب کاهش انرژی گرمایی می‌شود.

پس‌زده‌ها در طول عمل‌آوری خمیرسازی شیمیایی، برای عمل‌آوری کاغذ بازیافتی تولید می‌شوند. پس‌زده‌های تولیدشده در عمل‌آوری خمیر شیمیایی شامل گره (کلوخه‌های سخت خمیر غربال‌شده) و نرمه‌های خمیر غربال‌شده هستند. گره‌ها شامل گره حقیقی چوب، خرده‌چوب‌های نپخته و ذرات پوست هستند. مقدار گره ٪۲ تا ٪۶ در خمیر غربال‌نشده یا ۲۵ kg تا ۷۰ kg در هر تن چوب برای تولید خمیر بوده که ویژگی‌آن‌ها به‌صورت زیر است:

– اندازه (۵ mm تا ۵۰ mm) و شکل‌های آن‌ها با یکدیگر متفاوت است.

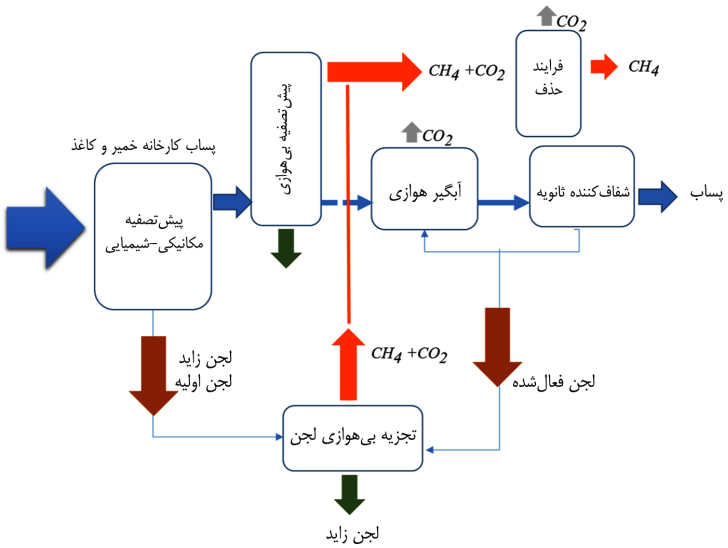
– روش‌های عمل‌آوری گره به‌صورت پخت گره (در یک دیگ جدا) یا مخلوط آن‌ها با خرده‌چوب‌های تازه، پالایش گره‌ها و سوزاندن آن‌ها پس از مخلوط‌کردن با ضایعات چوب است. سوزاندن گره‌ها روش متداولی در عمل‌آوری آن‌ها در کارخانه‌های خمیر نیست [۱۸–۱۳].

پس‌زده‌های حاصل از عمل‌آوری کاغذهای بازیافتی

با توجه به محصول نهایی، مقدار پس‌زده‌ها از ٪۵ برای مقوای کنگره‌ای تا ٪۲۵ و بیشتر برای کاغذهای گرافیکی باطله، متغیر است. درصد خشکی پس‌زده‌های نهایی حدود ٪۶۰ است و مقدار آن‌ها ۸۳ kg تا ۴۱۶ kg در هر تن کاغذ است. پس‌زده‌ها ناهمگن هستند. پس‌زده‌هایی که دارای بیشترین ارزش گرمایی (بیش از ۱۱ MJ/kg) هستند، برای سوزاندن مناسب‌اند. پس‌زده‌های خمیرسازی حاصل از کاغذهای بازیافتی شامل مقدار زیادی پلاستیک (پلی‌اتیلن، پلی‌استیرن، پلی‌یورتان و پلی‌وینیل‌کلرید) بوده و در هر تن از آن‌ها حدود ۲۰ kg تا ۶۰ kg پلاستیک وجود دارد. مقدار پلاستیک با توجه به نوع کاغذ بازیافتی آن متغیر است. پلاستیک‌ها از مواد مهندسی ساخته‌شده از پلیمرهای ترکیبی با مواد افزودنی هستند. نوع پلیمر پایه موجب خواص ویژه‌ای مانند استحکام مکانیکی، انعطاف‌پذیری، قالب‌پذیری، رنگ و غیره می‌شود. اغلب پلیمرها حاوی کربن و هیدروژن بوده و محصولات احتراق آن‌ها کربن دی‌اکسید و بخار آب است. اما بعضی از پلیمرها حاوی کلر یا نیتروژن هستند که محصولات احتراق آن‌ها به‌ترتیب هیدروکلریک اسید یا هیدروژن سیانید است. پلاستیک‌ها سوخت ارزشمندی به‌شمار می‌روند که در جدول ۵ ارزش گرمایی آن‌ها نشان داده شده‌است. احتراق پلاستیک‌ها فرایند پیچیده‌ای است و باعث آلودگی بسیار زیادی می‌شود. در طول احتراق، اکسیژن با کربن موجود در پلاستیک‌ها به کربن دی‌اکسید، با هیدروژن به آب، با گوگرد به گوگرد دی‌اکسید، با نیتروژن به سیانیدها یا نیتروژن مولکولی و با کلر به هیدروکلریک اسید تبدیل می‌شود. از آنجا که بیشتر پلاستیک‌ها از کربن و هیدروژن تشکیل شده‌اند، بخش اعظم گاز تولیدی آن‌ها متشکل از کربن دی‌اکسید و بخار آب است. اگرچه پلاستیک‌ها و بیشتر سوخت‌ها هرگز در شرایط آرمانی

جدول ۵– ارزش گرمایی و اکسیژن مصرفی در اثر احتراق پلاستیک‌ها [۱۳].

ترکیبات ضایعات	ارزش گرمایی (kJ/kg)	مقدار اکسیژن مصرفی (kg_{air}/kg_{waste})
الیاف سلولوزی	۱۶۰۰۰	۴
پلی‌اتیلن	۴۴۰۰۰	۱۶
پلی‌استیرن	۳۸۰۰۰	۱۳
پلی‌یورتان	۲۶۰۰۰	۹
پلی‌وینیل‌کلرید	۲۳۰۰۰	۸



شکل ۴- تصفیه فاضلاب از پساب کارخانه خمیر و کاغذ [۱۵].

نمی‌سوزند، محصولات احتراق ناقص تشکیل می‌شوند که سمی بوده و برای انسان و محیط زیست مضر است.

لجن کاغذ به‌عنوان سوخت

استفاده از لجن کاغذ به‌عنوان سوخت از ضایعات زیستی برای تولید انرژی به‌تازگی در کشورهای اروپایی مورد توجه قرارگرفته‌است [۶]. بخش‌های آلی لجن کاغذ تجدیدپذیرند. بنابراین، سبب انتشار کربن دی‌اکسید نمی‌شوند. تعداد کمی از کارخانه‌ها لجن کاغذ را در دیگ بخار می‌سوزانند و از آن به‌عنوان سوخت ضایعات چوبی استفاده می‌کنند [۱۴].

برای ارزیابی پتانسیل سوخت زیستی، بررسی دقیق‌تر جریان کربن غنی‌شده در فرایندهای تصفیه فاضلاب مهم است. در شکل ۴ تصفیه فاضلاب از پساب کارخانه خمیر کاغذ و کاغذ با تاکید بر چرخه کربن و امکان‌پذیری بازیابی متان (CH_4) نشان داده شده است.

مقدار رطوبت زیاد بر قابلیت سوزاندن مناسب لجن اثرگذار است. برای تقویت ارزش گرمایی، لجن‌ها معمولاً با مواد ضایعات خشک‌شده (مانند ضایعات چوب) مخلوط می‌شوند. احتراق بستر سیال یکی از فناوری‌های نوظهور است که به‌خوبی برای لجن مرطوب حاصل از واحد مرکب‌زدایی به‌کار گرفته می‌شود. در این فرایند، از حباب هوا استفاده شده که با ورود به بستری از مواد بی‌اثر (معمولاً شن یا سنگ آهک) تا حدودی سبب بهبود فرایند احتراق می‌شود. افزون بر این، در فناوری مزبور مقدار کمی گوگرد دی‌اکسید و نیتروژن اکسید انتشار می‌یابد. از مزایای سوزاندن لجن، کاهش مقدار دفن سطحی بوده و حدود ۲۵٪ از خاکستر دفن‌شده مربوط به لجن است. افزون بر این، خاکستر دیگ بخار که از سوزاندن لجن حاصل از مرکب‌زدایی حاصل‌شده است، گاهی به‌عنوان مخلوط با بتن یا سیمان به‌کاربرده می‌شود. خاکستر لجن که متشکل از فلزات سنگین است، در صورت افزایش مقدار این فلزات، می‌تواند خطرناک باشد که نیاز به حمل‌ونقل ویژه دارد. هر تن از الیاف بازیافتی حدود ۲۰۰ kg از انواع متفاوت لجن و بیش از ۴۰۰ kg، بر اساس وزن خشک، پس‌زده و لجن تولید می‌کند. لجن مرکب‌زدایی شامل مرکب‌های چاپ (رنگ‌دانه‌های سیاه و رنگی)، ذرات پرکننده و اندودکننده، الیاف، نرمه‌های الیاف و ترکیبات چسبنده است. بیش از ۵۵٪ جامدات از راه فرایند شناورسازی خارج می‌شوند که بخش اعظم آن‌ها شامل ترکیبات غیرآلی است. در درجه اول، رنگ‌دانه‌های پرکننده و اندودکننده‌ها شامل خاک رس و کلسیم کربنات هستند و معمولاً نسبت الیاف سلولوزی کم است. مقدار ارزش گرمایی به مقدار خاکستر بستگی دارد و حدود ۴/۷ GJ/kg تا ۸/۶ GJ/kg است [۱۶].

مقدار گوگرد، فلوئور، کلر، برم و ترکیبات ید ناچیز است. در نتیجه، هنگامی که از لجن مرکب‌زدایی سوزانده‌شده استفاده می‌شود، سامانه تصفیه گازی ضروری نیست. در مقایسه با لجن حاصل از تصفیه فاضلاب زیستی گیاهان، مقدار نیتروژن و ترکیبات فسفر بسیار کم است. سطح فلزات سنگین لجن حاصل از کاغذهای بازیافتی معمولاً کم است. غلظت کادمیم و جیوه مقدار ناچیزی است که گاهی اوقات کمتر از حد تشخیص آزمون کاربردی (طیف‌سنجی جذب اتمی) است. با توجه به ارزش گرمایی کم،

لجن می‌تواند به‌عنوان ترکیب با سوخت‌های دارای ارزش گرمایی بیشتر، به‌عنوان مثال پوست و ضایعات چوب، به‌کاربرده شود (جدول ۲). مشکلات این کار شامل موارد زیر است:

– به‌دلیل ارزش گرمایی کم لجن، مقدار استفاده از آن به‌عنوان تغذیه دیگ بخار محدود است.

– رطوبت زیاد لجن سبب ایجاد مشکل در نگه‌داری بار دیگ بخار می‌شود.

– مقدار زیاد لجن در تغذیه دیگ بخار ممکن است، سبب رسوب بستر سوخت یا سامانه جابه‌جایی خاکستر شود.

– سبب ایجاد محدودیت در ظرفیت سامانه‌های حمل‌ونقل خاکستر می‌شود.

– احتراق لجن با توجه به فلزات سمی سبب افزایش مشکلات زیست‌محیطی می‌شود [۱۳].

استفاده از کاغذهای بازیافتی به‌عنوان سوخت

با افزایش مدوام مصرف کاغذهای باطله در سراسر جهان، رفته رفته کیفیت کاغذهای باطله کمتر شده و به‌عنوان ضایعات جامد استفاده می‌شود. منابع الیاف کاغذهای باطله (الیاف ثانویه) عبارت‌اند از: مخلوط (کاغذهای با کیفیت‌های متفاوت، برش مقوای بسته‌بندی)، روزنامه‌ها (روزنامه‌های کهنه و مازاد)، جایگزین‌های خمیر (انواع کرافت سفیدرنگ، ورقه یا نوارهای کاغذ سفید یا نیمه‌رنگبری‌شده)، انواع لبه‌بری‌شده و چاپ‌نشده، انواع مرکب‌زدایی‌شده تجاری مانند (دفاتر رسمی سفید یا رنگی مرکب‌زدایی‌شده، ورقه‌های رنگبری‌شده با سولفات و بریده‌شده و سایر). در این مرحله، بهترین راه حل سوزاندن کاغذ است. به دلایل متعددی مخلوط کاغذهای بازیافتی منبعی برای تولید انرژی به‌شمار می‌روند. جداسازی آسان آن‌ها از سایر ضایعات، همگنی و عاری‌بودن از فلزات، فسادپذیری و احتراقی‌نبودن، نیاز به عمل‌آوری کم برای تبدیل مستقیم به سوخت و تولید انرژی مناسب، ارزش گرمایی نسبتاً زیاد و گوگرد و آلودگی اکسیدهای‌نیتروژن کم از جمله این دلایل هستند. از احتراق ۱ ton کاغذ بازیافتی سوختی، به مقدار ۹/۸ GJ انرژی گرمایی تولید می‌شود [۱۷].

در جدول ۶، ارزش گرمایی برخی از انواع کاغذها نشان‌داده شده‌است. مقدار رطوبت مخلوط کاغذهای بازیافتی ٪۶ تا ٪۲۸ است. مقدار رطوبت بیش از ٪۳۰ سبب کاهش ارزش گرمایی ضایعات کاغذهای مخلوط می‌شود. در طول احتراق کاغذ، تمام کربن موجود در آن به کربن دی‌اکسید، هیدروژن به بخارآب، کلر به هیدروژن کلرید و گاز کلر، گوگرد به گوگرد دی‌اکسید، نیتروژن

جدول ۶- ارزش گرمایی تعدادی از انواع کاغذ [۱۳].

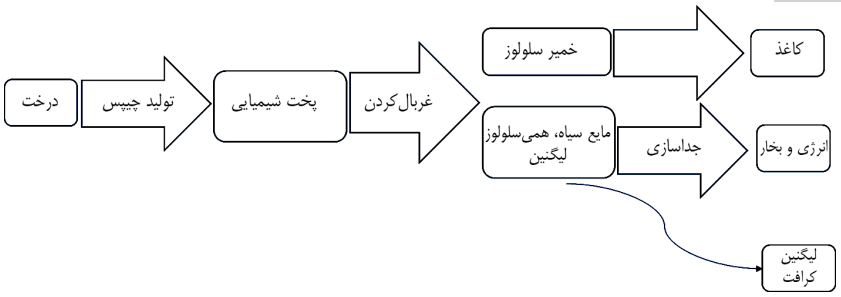
نوع کاغذ	ارزش گرمایی بر اساس وزن خشک (kJ/kg)
کاغذ روزنامه	۱۷۶۰۰
کاغذ کرافت و مقوا	۱۶۱۰۰
مقوای جعبه	۱۶۰۰۰
کاغذ بهداشتی	۱۵۲۰۰
کاغذهای اداری	۱۴۷۰۰

به اکسیدهای نیتروژن مانند نیتروژن مونوکسید یا نیتروژن دی‌اکسید تبدیل می‌شود. از احتراق مخلوط کاغذهای باطله عموماً کربن دی‌اکسید، کربن مونوکسید، آب، اکسیژن، نیتروژن، اکسیدهای گوگرد و نیتروژن، آمونیوم، هیدروکربن‌هایی مانند هگزان یا متان، آلدهید به‌عنوان مثال فرمالدهید و اسیدهای آلی به‌عنوان مثال استیک اسید، تولید می‌شود. نگرانی اصلی درباره آلودگی به‌طور ویژه مربوط به بو وگازهاست. مقدار این آلودگی در اثر سوزاندن بستگی به ترکیبات ضایعات و همچنین طراحی و عملکرد سوزاننده دارد [۱۳].

بهره‌مندی از پسماندهای صنایع خمیر کاغذ و کاغذ به‌عنوان منبع مواد اولیه زیست‌پایه

با توجه به موارد گفته‌شده، می‌توان از بقایای چوب استفاده مناسب‌تری کرد و ارزش افزوده بیشتری به‌وسیله پالایشگاه زیستی در آن‌ها ایجاد کرد. افزون براین، صنعت چوب نیز با چالش کاهش تقاضای روزنامه و افزایش هزینه‌های الیاف مواجه است که به‌کمک پالایشگاه زیستی، زیست‌توده چوب یا بقایای چوب، مانند لیگنین به مواد سودمندی تبدیل می‌شوند.

تولید جهانی لیگنین، پلیمر سه‌بعدی پیچیده‌ای از الکل‌های آروماتیک، بیش از ۷۰×۱۰^{۶} ton است که اغلب به‌شکل مایع سیاه از کارخانه‌های خمیر کرافت ایجاد می‌شود (شکل ۵). همچنین مشهود است، کارخانه‌های خمیر کاغذ از لیگنین کرافت برای تولید الکتریسیته، بخار و تولید مواد شیمیایی غیرآلی استفاده می‌کنند و مواد باارزشی مانند زیست‌فنول‌ها و زیست‌پلی‌ال‌ها (الکل‌های چندعاملی) تهیه می‌شوند. لیگنین کرافت برای تولید انواع مواد شیمیایی زیست‌پایه، به‌عنوان مثال جایگزین فنول در فنول‌های چسبنده سنتزی–رزین‌ها و پلی‌ال در تولید اسفنج‌های پلی‌یورتان، فنول و مشتقات آن، به‌عنوان مثال بیس‌فنول A، کاپرولاکتام و سالیسیلیک



شکل ۵- فرایند تجاری لیگنین کرافت [۲۰].

اسید، عناصر اصلی برای تولید بخش عمده‌ای از محصولات صنعتی مانند رزین‌های فنولی، پلی‌کربنات‌ها، رزین‌های اپوکسی، بالکیت، نایلون، شوینده‌ها، علف‌کش و صنایع داروسازی و به‌عنوان درمان ناباروری خوراکی، ضددرد و همچنین برای درمان سرگیجه استفاده می‌شود [۱۹]. دوسوم از تولید جهانی فنول به پیش‌سازهای پلاستیک تبدیل شده است که قطعه ساختاری مهمی برای زیست‌پلاستیک، فنول فرمالدهید یا رزین‌های اپوکسی یا پلی‌یورتان است. همچنین، محصولات فنولی در پانسمان حیوانات و سایر صنایع مانند مواد شیمیایی، دارویی، مواد غذایی و غیره نیز کاربرد دارد. فنول‌ها ترکیباتی واکنش‌پذیر و به‌دلیل داشتن گروه –OH، اسیدی هستند و به‌راحتی اکسید می‌شوند. بنابراین، فنول‌ها و مشتقات آن‌ها واسطه‌های زیست‌سنتز لیگنین پلیمرها را تشکیل می‌دهند. معمولا بیش از ٪۹۵ از فنول تولیدی از مشتقات نفتی بنزن با کمک فرایند کومن (cumene) حاصل می‌شود [۲۰].

در گذشته اغلب محصولات حاصل از فنول و پلی‌ال از مواد نفتی تشکیل می‌شدند، بنابراین قیمت آن‌ها تحت تاثیر قیمت نفت خام بود. در سال ۲۰۱۳، پس از اسفنج‌های انعطاف‌پذیر، اسفنج‌های سخت به‌عنوان بزرگ‌ترین بخش در بازار پلی‌یورتان جهانی به‌شمار آمدند. اگر چه همچنان مشکلاتی در تولید مواد شیمیایی زیست‌پایه در مقیاس گسترده وجود دارد. از سایر مشتقات لیگنین می‌توان به گوایاکول، الیاف کربن، کربن فعال، وانیلین و زیست‌پلاستیک‌ها اشاره کرد.

نتیجه‌گیری

– در صنایع خمیر کاغذ و کاغذ، زیست‌توده سرشار از انرژی با مایع خمیرسازی، ضایعات چوب، لجن و پس‌زده‌ها حاصل می‌شود. بسیاری از محصولات کارخانه‌های خمیر کاغذ و کاغذ، بیش از نیمی از انرژی لازم را از سوخت‌های زیست‌توده ضایعات جامد، به دست می‌آورند.

– از اصلی‌ترین سوخت‌های زیست‌توده در کارخانه‌های خمیر کرافت، مایع سیاه پخت است که حدود ٪۵۰ آن مواد چوبی است. سوزاندن مایع پخت سیاه در کوره بازیابی بخار، مقدار بخار و انرژی الکتریکی مصرفی در کارخانه خمیر کاغذ را تأمین می‌کند.

– یکی دیگر از سوخت‌های زیست‌توده، ضایعات چوبی است که در کارخانه خمیر کاغذ در درجه دوم اهمیت قرار دارند. انرژی حاصل از مخلوط ضایعات چوبی و لجن تولیدشده در کارخانه‌ها برای سوزاندن کافی نیست، زیرا مقدار ارزش گرمایی آن‌ها کم و مقدار رطوبت و خاکستر این ضایعات زیاد است.

– پس‌زده‌های حاصل از عمل‌آوری کاغذهای بازیافتی، مقدار زیادی مواد سوختنی مانند پلاستیک و الیاف سلولوزی دارند. پلاستیک‌ها تنها شامل کربن، هیدروژن و اکسیژن هستند که خطرهای زیست‌محیطی کمتری دارند. اگر پلاستیک‌ها در حجم کم سوزانده شوند، می‌توانند برای طراحی سوزاننده مناسب باشند. این نوع از پلاستیک‌ها شامل پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن و پلی‌استیرن هستند.

– اخیراً استفاده از لجن کاغذ به‌عنوان سوخت ضایعات زیستی برای تولید انرژی در چند کارخانه خمیر کاغذ و کاغذ مورد توجه قرار گرفته‌است. به‌دلیل ارزش گرمایی کم، لجن‌ها می‌توانند به‌طور مشترک و کمکی با زیست‌توده‌های دارای ارزش گرمایی بیشتر استفاده شوند. علت کم‌بودن ارزش گرمایی لجن کاغذ، زیادبودن مقدار رطوبت آن است.

– یکی دیگر از انواع زیست‌توده‌های حاصل از کارخانه‌های خمیر کاغذ و کاغذ، کاغذهای بازیافتی با کیفیت ضعیف هستند که به چند دلیل برای تولید انرژی مناسب هستند. از جمله این دلایل می‌توان به جداسازی آسان‌تر آن‌ها در جریان بازیافت، همگنی، عمل‌آوری کمتر برای سوختن، ارزش گرمایی زیاد و مقدار انتشار گوگرد و نیتروژن کم اشاره کرد. استفاده از کاغذهای باطله برای تولید سوخت، همواره در کارخانه‌های خمیر کاغذ و کاغذ مورد توجه است.

– واپلیمر شدن لیگنین مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی فراوانی دارد. اصلاح ژنتیک ترکیبات لیگنین باعث بهبود استفاده از آن می‌شود. تلاش‌های بسیاری در راستای توسعه فناوری و استخراج محصولات با ارزش افزوده از لیگنین انجام گرفته که در سال‌های آینده گسترش بیشتری خواهد یافت.

مراجع

1. Jones J.M., Lea-Langton A.R., Ma L., Pourkashanian M., and Williams A., *Pollutants Generated by the Combustion of Solid Biomass Fuels*, Springer, London, 9-24, 2014.
2. Popa V.I. and Volf I., Contribution to the Complex Processing of Biomass, *Nordic Wood Biorefinery Conference*, Stockholm, 229-236, 23-24 September, 2008.
3. Kumar R., Tabatabaei M., Karimi K., and Horváth I.S., Recent Updates on Lignocellulosic Biomass Derived Ethanol. A Review, *Biofuel Res. J.*, **9**, 347-356, 2016.
4. Demirbas A., *Biorefineries for Biomass Upgrading Facilities*, Springer, Switzerland, 3-73, 2010.
5. Srivastava N., Srivastava M., Mishra P.K., and Pardeep S., Application of Cellulases in Biofuels Industries: An Overview, *J. Biofuels Bioenergy*, **1**, 55-63, 2015.
6. Hagelqvist A., Nilsson T., Granstrom K., Mansson B., and Mattiasson B., *Sludge from Pulp and Paper Mills for Biogas Production*, Ph.D. Thesis, Karlstad University Studies, Sweden, September 2013.
7. Bowyer J., Howe J., Guillery P., and Fernholz K., *The US Pulp and Paper Industry: A Key Player in the Coming Bio-Revolution*, Dovetail Partners, USA, 1-9, 2005.
8. Budzyn S. and Tora B., Biomass Fuel Based on Wastes from the Paper Industry, *1st International Conference on the Sustainable Energy and Environment Development (SEED 2016)*, 1-7, Poland, May 17-19, 2016.
9. Pandey B.K., Kumar A., and Srivastava S., Energy Generation from the Biomass in Pulp and Paper Mill, *Int. J. Emerging Technol. Adv. Eng*., **4**, 462-473, 2014.
10. Nong G., Zhou Z., and Wang S., Generation of Hydrogen, Lignin and Sodium Hydroxide from Pulping Black Liquor by Electrolysis, *Energies*, **13**, 1-11, 2016.
11. Hamaguchi M., Cardoso M., and Vakkilainen E., Alternative Technologies for Biofuels Production in Kraft Pulp Mills Potential and Prospects, *Energies*, **5**, 2288-2309, 2012.
12. *Handbook of Pulp*, Sixta H. (Ed.), Wiley–VCH, Germany, 967-996, 2006.
13. Gavrilescu D., Energy from Biomass in Pulp and Paper Mills, *Environ. Eng. Manage. J.*, **7**, 537-546, 2008.
14. World Bank Group, Environmental, Health, and Safety Guidelines Pulp and paper mills, http://www.ifc.org/wps/wcm/connect, available in 10 December 2007.
15. Pontual L., Mainier B., and Gilson B.A.L., The Biogas Potential of Pulp and Paper Mill Wastewater: An Essay, *Am. J. Environ. Eng.,* **5**, 53-57, 2015.
16. *Handbook of Paper and Board*, Hamm U. and Holik H. (Eds.), Wiley-VCH, Germany, 422-445, 2006.
17. Porteous A., *Dictionary of Environmental Science and Technology*, John Wiley and Sons, New York, 600-700, 2007.
18. Mirshokraei S.A., *Pulp and Paper Terminology (Persian)*, Aeeizh, Tehran, 100-350, 2013.
19. Dessbesell L., Yuan Z., Hamilton S., Leitch M., Pulkki R., and Xu Ch., Bio-Based Polymers Production in a Kraft Lignin Biorefinery: Techno-Economic Assessment, *Biofuels, Bioprod. Biorefin.*, **12**, 239-250, 2017.
20. Agrawal A., Kaushik N., and Biswas S., Derivatives and Applications of Lignin– An Insight, *The Scitech*, **7**, 30-36, 2014.