



دانشگاه گورگان، منابع طبیعی

نشریه حفاظت و بهره‌برداری از منابع طبیعی

جلد اول، شماره اول، ۱۳۹۲

<http://ejang.gau.ac.ir>

## تولید پایدار انرژی در واحدهای صنایع چوب و کارخانه‌های خمیر کاغذ

### \*روزبه اسدی خوانساری

مدرس دانشکده فنی و حرفه‌ای صومعه‌سرا

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۲۷

### چکیده

با در نظر گرفتن شرایط اقتصادی و رقابت‌پذیری واحدهای چوب و کاغذ، امکان تولید انرژی و فرآورده‌های جدیدی در کارخانه‌های صنایع چوب و خمیرکاغذ فراهم شده است، که حتی ممکن است تولیدات اصلی را تحت تاثیر قرار داده و محصولات چوب و کاغذ به یک محصول فرعی تبدیل شوند. جهان آینده نیازمند انرژی پاک و تجدیدپذیر است، که قطعاً از منابع زیست توده و به طور عمده از طریق توسعه زراعت چوب، تأمین خواهد شد و همچنین در تولید اکسیژن و جذب دی اکسید کربن جو کره‌ی زمین نیز مؤثر خواهد بود. امروزه می‌توان، با به‌کارگیری فرآیندهایی مشابه پالایشگاه، از چوب و زیست توده، انرژی و مواد شیمیایی با ارزشی مثل الکل‌ها، مایع فیشر تروپش و دی متیل اتر را تولید کرد، که به آن تصفیه زیستی گفته می‌شود. استفاده از هر نوع زیست توده، می‌تواند در تولید انواع محصولات چوبی، تخته‌های مرکب چوبی و همچنین کاغذ و مقوا، مفید باشد. ولی گام نخست آن، برنامه‌ریزی منطقی توسط متخصصین جنگل و منابع طبیعی برای جنگل‌کاری است که بهترین حالت، تولید انواع محصولات چوب و کاغذ، به‌همراه تولید انرژی و مواد شیمیایی، با استفاده از روش تبدیل به گاز ضایعات چوب و مایع پخت سیاه خمیرکاغذ است. در چند سال اخیر تحقیقات در زمینه تولید سوخت و انرژی از منابع تجدیدپذیر و به‌طور خاص زیست توده، رشد چشم‌گیری داشته است.

**واژه‌های کلیدی:** زی‌توده، کارخانه‌های چوب و خمیرکاغذ، انرژی تجدیدپذیر، تبدیل به گاز،

سوخت‌های زیستی

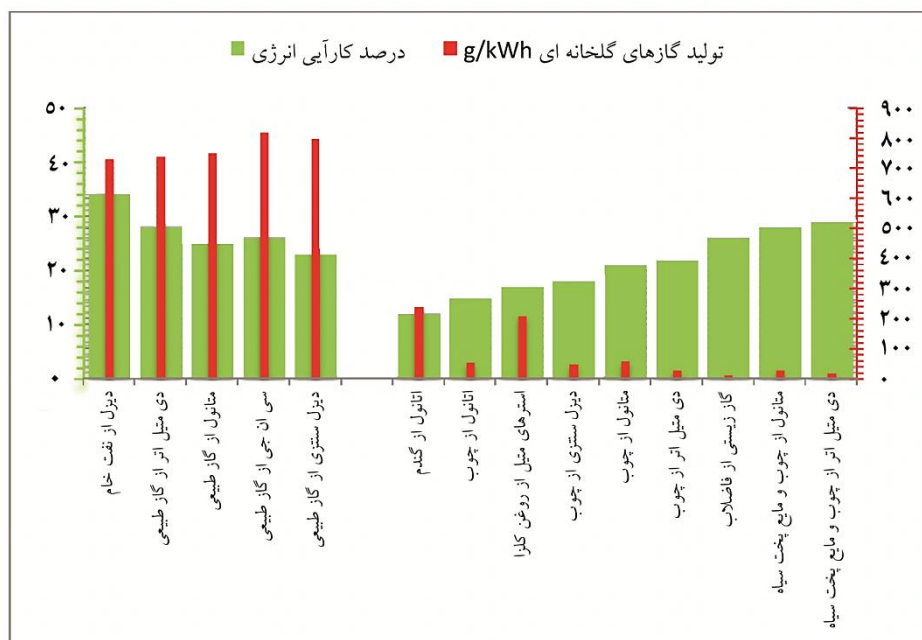
\*مسئول مکاتبه: [rasadikhansari@gmail.com](mailto:rasadikhansari@gmail.com)

## مقدمه

تولید انرژی و مواد شیمیایی از منابع فسیلی، در حال افزایش است و به همین ترتیب، انتشار گازهای آلاینده در جو کره‌ی زمین بیشتر می‌شود و محدودیت‌های زیست‌محیطی برای به حداقل رساندن آن‌ها، با شدت بیشتری اعمال می‌شود. در این رابطه تنها راه حل، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر است که همواره رو به رشد می‌باشد. در بین انرژی‌های نو، بهترین گزینه زیست توده است، چون در حین رشد طبیعی خود، در حال جذب دی اکسید کربن و تولید اکسیژن است و مواد تولیدی خود را در جهت مصارف مختلف و تأمین انرژی عرضه می‌کند. در میان انواع زیست توده، چوب ماده اولیه خاص و برجسته‌ای در تولید محصولات چوبی مختلف، تخته‌های مرکب چوبی و انواع کاغذ و مقوا می‌باشد، که ضایعات آن جهت سوخت و تولید انرژی به مصرف می‌رسد ولی بهترین روش استفاده این ضایعات، تبدیل آن‌ها به سوخت و مواد شیمیایی، به روش تبدیل به گاز<sup>۱</sup> است. بنابراین از ضایعات غنی از کربن و هیدروژن چوب و زیست توده، می‌توان انرژی و مواد شیمیایی گوناگونی را تولید کرد، که اصولی مشابه پالایشگاه و پتروشیمی دارند، که به آن تصفیه زیستی<sup>۲</sup> گفته می‌شود. با این روش انواع مواد شیمیایی و سوخت‌های زیستی، ارزشمندی مثل متانول، محلول فیشر تروپش<sup>۳</sup> و دی متیل اتر<sup>۴</sup> را تولید می‌کنند (کرزن<sup>۵</sup>، ۲۰۰۷).

شکل ۱ مزیت‌های زیست محیطی مصرف انواع مواد شیمیایی و سوخت زیستی را نشان می‌دهد، که نسبت به سوخت‌های فسیلی، گازهای گلخانه‌ای بسیار کمتری را تولید می‌کند و جدول ۱ برآورد ایجاد آلاینده‌ها در سه حالت انتشار عادی، مصرف در دیگ بازیابی و همچنین فن‌آوری تبدیل به گاز مایع پخت سیاه<sup>۶</sup> را در کارخانه‌های خمیر کاغذ نشان می‌دهد (باجپای<sup>۷</sup>، ۲۰۱۲).

- 
- 1- Gasification
  - 2- Biorefinery
  - 3- Fischer-Tropsch liquid
  - 4- Dimethyl Ether (DME)
  - 5- Connor
  - 6- Black Liquor Gasification (BLG)
  - 7- Bajpai



شکل ۱- تولید گازهای گلخانه‌ای و کارایی انرژی در سوخت‌های زیستی و سوخت‌های فسیلی (کیتلسون<sup>۱</sup>، ۲۰۰۶).

اولین محصول روش تبدیل به گاز چوب و زیست توده، گاز سنتزی<sup>۲</sup> ناخالص است که پس از خالص‌سازی، قابلیت احتراق در توربین‌های گازی مولد برق را دارد و همچنین در روش تبدیل به گاز با سیکل ترکیبی<sup>۳</sup> امکان استفاده از بخار آب تولید شده در توربین‌های بخار، وجود دارد. گازهای سنتزی، قابلیت تبدیل به سوخت‌های با ارزشی چون متانول، اتانول و غیره را دارند که به آن‌ها سوخت‌های زیستی بر پایه تبدیل به گاز می‌گویند. گاهی برخی از این سوخت‌ها به حالت گاز مصرف شده و در موارد لزوم این گازهای سوختی، به حالت مایع<sup>۴</sup> تبدیل می‌شوند.

1- Kittelson

2- Syngas (Synthesis gas)

3- BLGCC (Black Liquor Gasification with Combined Cycle)

4- Gas to Liquid (GTL)

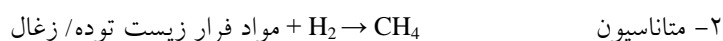
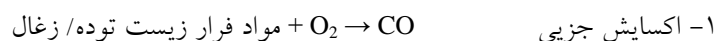
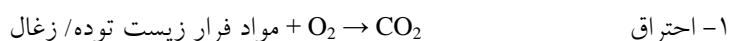
## روزبه اسدی خوانساری

جدول ۱- برآورد آلاینده‌ها در حالت انتشار عادی، مصرف در دیگ بازیابی و فن‌آوری تبدیل به گاز مایع پخت سیاه در کارخانه خمیر کاغذ (لارسون<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۳).

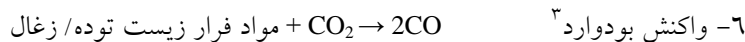
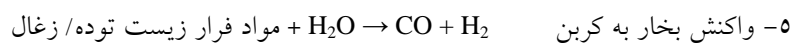
آلاینده‌ها	انتشار عادی	مصرف در دیگ بازیابی	تبدیل به گاز
دی اکسید گوگرد	زیاد	کم	بسیار کم
اکسیدهای نیتروژن	زیاد	متوسط	بسیار کم
مونوکسید کربن	کم	متوسط	بسیار کم
ترکیبات آلی فرار	زیاد	کم	بسیار کم
ذرات معلق	زیاد	کم- متوسط	بسیار کم
متان	کم- متوسط	کم	بسیار کم
آلاینده‌های خطرناک	متوسط- زیاد	کم	بسیار کم
کل گوگرد کاهش یافته	کم	کم	بسیار کم
فاضلاب	متوسط- زیاد	کم	بسیار کم
مواد جامد	بسیار کم	کم	کم

تولید مواد شیمیایی و انرژی از زیست توده: احتراق زیست توده، قابلیت تولید انرژی را دارد، ولی روش تبدیل به گاز قابلیت گرمزایی و ارزش آن را بیشتر کرده و امکان تولید انواع محصولات شیمیایی مختلف را نیز فراهم می‌سازد. واکنش‌های گرمازا و گرماگیر روش تبدیل به گاز، به صورت زیر است:

### واکنش‌های گرمازا



### واکنش‌های گرماگیر



1- Larson

2- Water-gas shift

3- Boudouard

یکی از مهمترین ترکیبات به دست آمده، گاز سنتزی خالص است، که حاوی مقادیر زیادی هیدروژن و مونوکسید کربن است. هر چه نسبت هیدروژن به مونوکسید کربن بیشتر باشد، ارزش حرارتی بالاتری دارد. البته بر حسب نیاز، جهت تولید انواع مواد شیمیایی به نسبت‌های دیگری از عناصر احتیاج است، چون مشتقات نفتی از نسبت‌های مختلف عناصر هیدروژن، کربن و اکسیژن به دست می‌آید (کیتلسون ۲۰۰۶). تولید گاز با ارزش متان، در واکنش‌های ۳ و ۵ قابل مشاهده است. در شهر لاهتی فنلاند از تبدیل به گاز زیست توده، حدود ۴۰۰ مگا وات انرژی برق و گرما تولید می‌شود.

عملیات تبدیل به گاز زیست توده و انواع ضایعات چوب و خاک اره، در چهار نوع واکنشگاه<sup>۱</sup> انجام می‌شود، که قابلیت تولید انواع گاز و سوخت‌های دیزل و متانول را دارند، که از نظر نوع و جهت جریان مواد و گاز تولیدی متفاوت بوده و شامل جریان معکوس، هم جریان، متقاطع و بستر سیال می‌باشند. همچنین فرآیندهای MTG جهت تبدیل متانول به سوخت‌های سبز<sup>۲</sup> و MTO جهت تولید اولفین‌ها<sup>۳</sup>، دو روش تولید مواد شیمیایی از متانول می‌باشند، که برای ارزش افزوده بیشتر قابل استفاده هستند.

**تولید انرژی از ضایعات کارخانه‌های خمیر کاغذ:** انواع ضایعات مثل پوست، خاک اره، لجن و غیره برای تولید انرژی مناسب است و ضایعات محلول یا معلق در مایعات را نیز پس از تبخیر و تغلیظ می‌توان استفاده کرد، که به طور متداول برای تولید بخار مصرف می‌شود. به دلیل ارزش حرارتی کم همی سلولز نسبت به لیگنین، جدا سازی آن از خمیر کاغذ، به روش پیش استخراج همی سلولز<sup>۴</sup> قابل انجام است و این همی سلولز جهت تولید بسپارهای زیستی<sup>۵</sup>، هیدروژل‌ها<sup>۶</sup>، مشتقات زایلان گرمانرم<sup>۷</sup> و همچنین قندهایی برای تخمیر و تولید سوخت و مواد شیمیایی، استفاده می‌شود. با این حال روش تبدیل به گاز بهینه‌تر است، چون قابلیت تولید گاز سنتزی را دارد. مایع پخت سیاه که در کارخانه‌های خمیر کاغذ شیمیایی و به خصوص در فرآیند کرافت از دیگ پخت خارج می‌شود، حاوی مقادیر زیادی لیگنین و همی سلولز به همراه مواد شیمیایی مصرف شده است، که مواد شیمیایی آن از طریق مایع پخت سبز بازیابی شده و به مایع پخت سفید تبدیل و دوباره استفاده می‌شود. همچنین در روش تبدیل به

- 1- Reactor
- 4- Methanol to Gasoline (MTG)
- 5- Methanol to Olefins (MTO)
- 4- Hemicellulose preextraction
- 5- Biopolymers
- 6- Hydrogels
- 7- Thermoplastic xylan derivatives

## روزبه اسدی خوانساری

گاز مایع پخت سیاه، این مراحل وجود داشته ولی تحت واکنش‌های گفته شده، امکان تولید انواع مواد شیمیایی یا گاز سنتزی برای تولید برق، وجود دارد (سیکستا، ۲۰۰۶).

جدول ۲- روش‌های مختلف برای تولید سوخت‌های زیستی (لارسون، ۲۰۰۷).

الکل‌های مخلوط	انواع دی متیل اتر			انواع فیشر تروپش			وضعیت (مقیاس)	فن‌آوری‌های تولید	
	DMEc	DMEb	DMEa	FTc	FTb	FTa			
*	*	*	*	*	*	*	نیمه صنعتی	تبدیل به گاز کننده الگو	تولید گاز
*	*	*	*	*	*	*	نیمه صنعتی	روش فرونشاندن (کوئنج)	
*	*	*	*	*	*	*	تجاری	با تغذیه اکسیژن	
*	*	*	*	*	*	*	نیمه صنعتی	تبدیل به گاز با بستر سیال	تولید زیست‌توده
*	*	*	*	*	*	*	نیمه صنعتی	خنک سازی گاز سنتزی	
*	*	*	*	*	*	*	نیمه صنعتی	فیلتر گاز داغ	
*	*	*	*	*	*	*	تجاری	پاکسازی کوئنج	
*	*	*	*	*	*	*	تجاری	تغذیه اکسیژن	
*	*	*	*	*	*	*	تجاری	دیگ بخار	
*	*	*	*	*	*	*	تجاری	رکتیسول	
*	*	*	*	*	*	*	تجاری	سلکسول	تولید هیدروژن
*	*	*	*	*	*	*	تجاری	کلاوس / اسکات	
*	*	*	*	*	*	*	تجاری	واکنشگاه بستر آبی	تولید گاز
*	*	*	*	*	*	*	آزمایشگاهی	واکنشگاه بستر ثابت	
*	*	*	*	*	*	*	تجاری	بازیابی گاز سنتزی	
*	*	*	*	*	*	*	تجاری	توربین گاز	تولید برق
*	*	*	*	*	*	*	تجاری	فشار بخار	
*	*	*	*	*	*	*	تجاری	فشرده‌سازی بخار	

هر چه فرآیند خمیرکاغذ بازدهی بیشتری داشته باشد، ضایعات کمتری دارد، که امکان تولید برق و مواد شیمیایی آن کم می‌شود، ولی در فرآیندهای مکانیکی خمیرکاغذ با بازدهی بالا نیز، امکان استفاده

از این روش وجود دارد، که باعث مصرف بهینه ضایعات می‌شود. با توجه به فرآیند کرافت و غالب بودن آن در جهان، اغلب تحقیقات آزمایشگاهی، نیمه صنعتی و تجاری به کرافت معطوف شده است. طبق تحقیقات لارسون (۲۰۰۷) روش‌های مختلفی برای تولید سوخت‌های زیستی پیشنهاد شده است که در جدول ۲ آمده است. این جدول به وسیله فن‌آوری‌های مختلف، امکان تولید انواع سوخت‌ها مثل الکل‌های مخلوط، فیشر تروپش و دی‌متیل اتر را نشان می‌دهد. در این بین، روش تولید فیشر تروپش C با تغذیه اکسیژن، مناسب‌ترین روش بوده که در سال ۲۰۰۶ در سوئد به مرحله نیمه صنعتی رسید و در سال ۲۰۱۰ طرح آن صنعتی شد (باجپای، ۲۰۱۲).

**تبدیل به گاز:** تبدیل به گاز ضایعات چوب و یا مایع پخت سیاه شامل دو مرحله اصلی، پیرولیز (تجزیه با حرارت) و گازی شدن می‌باشد و به ترتیب در دماهای ۶۵۰-۵۰۰ و ۱۰۰۰-۹۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. بسیاری از واکنش‌های ضروری، در مرحله اول رخ داده و در مرحله دوم گاز سنتزی ناخالص حاصل می‌شود. البته دو روش تبدیل به گاز مایع پخت سیاه با دمای کم<sup>۱</sup> (۷۱۵ درجه سانتی‌گراد) و با دمای زیاد<sup>۲</sup> (بیش از ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) وجود داشته که در جدول ۳ تفاوت‌های این دو روش، از مایع پخت سیاه یکسان، مشاهده می‌شود.

در هر دو روش، باید گاز سنتزی خالص شده و گاز سولفید هیدروژن ( $H_2S$ ) به وسیله دوش‌های جاروب کننده<sup>۳</sup> گرفته شود، که جهت بازیابی مواد شیمیایی و نیز تأمین قدرت گرمایی گاز سنتزی، ضروری است. روش LTBLG به تجهیزات بیشتری نیاز دارد و سرمایه‌گذاری آن نسبت به HTBLG ۳۲٪ بیشتر است. به همین ترتیب LTBLG به زیست توده بیشتری نیاز داشته و گاز سنتزی تبدیل شده به دیگ بخار آن، بیشتر بوده و تولید برق آن نیز نسبت به HTBLG بالاتر است، در حالی که امکان تولید بیشتر دی‌متیل اتر در روش HTBLG وجود دارد.

1- Low-Temperature Black Liquor Gasification (LTBLG)

2- High-Temperature Black Liquor Gasification (HTBLG)

3- Scrubber

## روزبه اسدی خوانساری

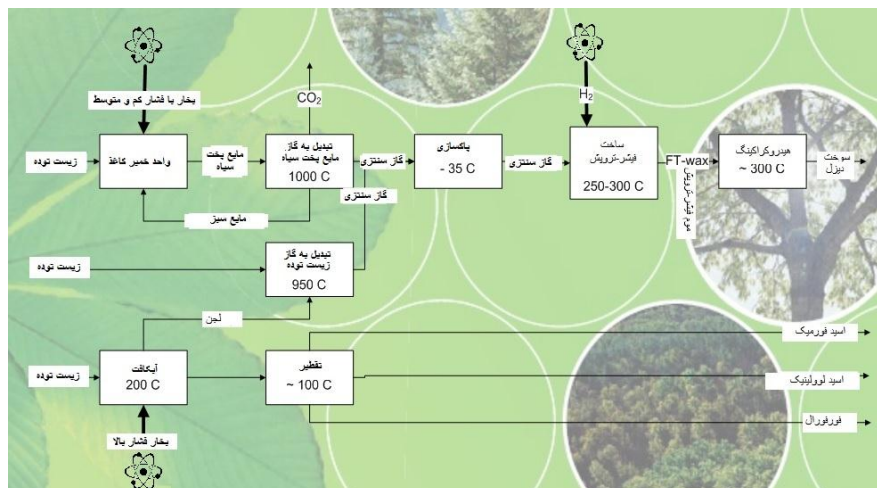
جدول ۳- تفاوت روش‌های تبدیل به گاز با دمای کم و با دمای زیاد از یک مایع پخت سیاه (لارسون و همکاران ۲۰۰۳).

درصد اختلاف	HTBLG	LTBLG		
	۲۸/۵ Kg/s			
	۳۵۰/۸ MWt LHV		مایع پخت سیاه	ورود مواد سوختی
۰	(٪۸۰)		(درصد مواد جامد خشک)	
۳۵	۱۳۱/۵	۱۷۷/۸	زیست توده چوبی	
۶۰	۷۷/۴	۱۲۳/۷	خرید زیست توده	
۲۵	۳۵/۹	۴۴/۸	سوخت کوره آهک	
	۱۳/۳	۷/۷	جریان توده	گاز سنتزی پاک
-۶	۲۳۵/۴	۲۲۱/۷	انرژی	
	۱/۰۵	۲/۸۵	نسبت هیدروژن به مونوکسیدکربن	تولید سوخت
۰	٪۹۷	٪۹۷	بازیابی گاز سنتزی تبدیل نشده	
۱۱۲	۳۳/۵	۷۱	گاز سنتزی تبدیل نشده به دیگ بخار	تولید و تقاضای برق
-۱۸	۱۶۸	۱۳۷/۴	انرژی دی متیل اتر	
۵۷	۳۵/۵	۵۵/۶	کل تولید ناخالص برق	تولید و تقاضای برق
۷۳	۳۴/۳	۵۹/۵	کل تقاضای برق	
۰	۱۰۰/۱	۱۰۰/۱	مصرف برق واحد خمیر کاغذ	
۱۰	۹۸/۹	۱۰۹	خرید برق مورد نیاز	تولید و تقاضای برق

با توجه به شکل ۲، امکان تلفیق این روش با فرآیندهای هسته‌ای برای تولید سوخت‌های فشر تر و پیش و سوخت دیزل زیستی<sup>۱</sup> وجود دارد. که از بخار آب با فشار کم، متوسط و زیاد و همچنین هیدروژن نیروگاه هسته‌ای استفاده می‌شود.

1- Biodiesel



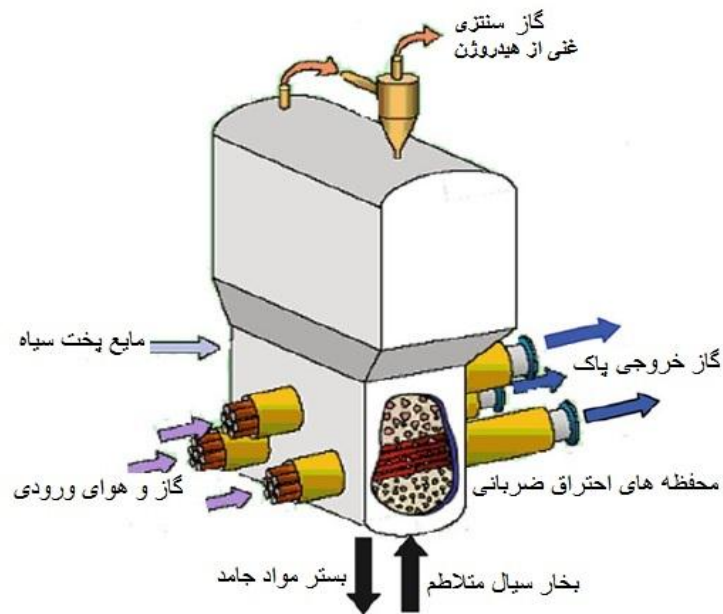


شکل ۲- امکان تلفیق روش تبدیل به گاز با فرآیندهای هسته‌ای برای تولید سوخت‌های فیشر تروپش و سوخت دیزل زیستی (کانگاس<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۹).

تبدیل به گاز با فن‌آوری و ساخت تبدیلی بین‌المللی (MTCI)<sup>۲</sup>: این روش بر اصول LTBLG و در واکنش‌گاه با بستر سیال متلاطم و حرارت‌دهی غیرمستقیم بوده که مایع پخت سیاه با قطرات ریز روی بستر سیال پاشیده شده و به سرعت خشک و پیرولیز می‌شود. زغال باقی‌مانده با بخار آب واکنش داده و گاز غنی از هیدروژن را به وجود می‌آورد. مواد بستر و کربن نسوخته در آب حل شده و مایع پخت سبز را می‌سازند. گاز  $H_2S$  موجود در جاروب‌کننده، برای تأمین سولفیدیه مایع پخت سبز، از گاز سنتزی جدا شده و گاز سنتزی خالص شده در توربین برای تولید برق مصرف می‌شود. شکل ۳، طرحی از این واکنش‌گاه را نشان می‌دهد.

1- Kangas

2- Manufacturing and Technology Conversion International (MTCI)

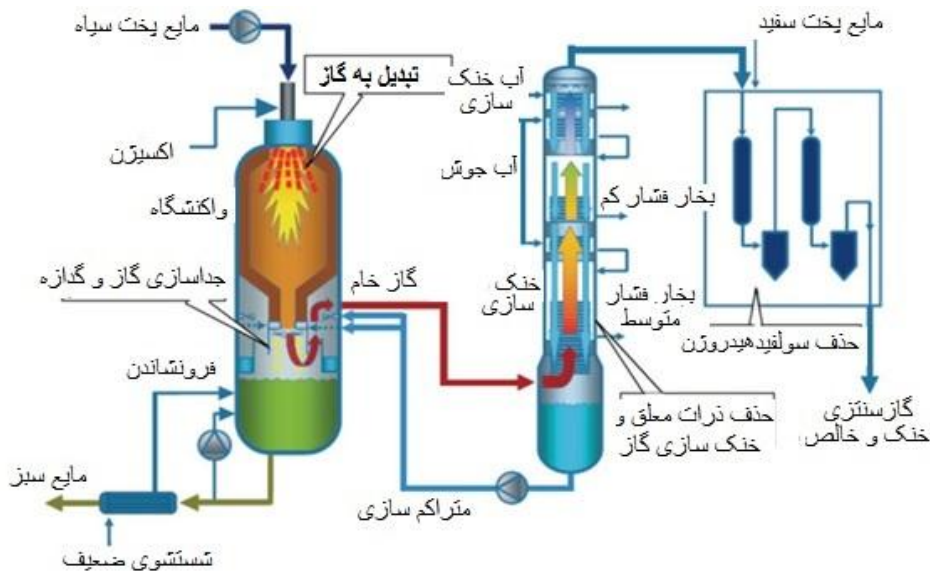


شکل ۳- طراحی از واکنشگاه تبدیل به گاز MTCI (ویتنی و باکستر، ۲۰۰۱).

تبدیل به گاز کمرک<sup>۱</sup>: این فرآیند در دو نوع تحت فشار عادی و تحت فشار بالا، با اصول HTBLG و با واکنشگاه تغییر جریان الگو، کار می‌کند. نوع تحت فشار پیشرفته‌تر بوده و قطرات ریز مایع پخت سیاه در دمای ۹۵۰-۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد سوزانده شده و نمک گداخته از گاز خارج می‌شود و مایع پخت سبز را می‌سازد. گاز  $H_2S$  در جاروب کننده جدا شده و گاز سنتزی خالص تشکیل می‌شود، که ارزش حرارتی بالایی داشته و می‌تواند جهت تولید برق در توربین و یا تولید متانول و دی‌متیل اتر استفاده شود. شکل ۴ فرآیند کمرک را به‌طور خلاصه نشان داده است.

1- Whitty و Baxter

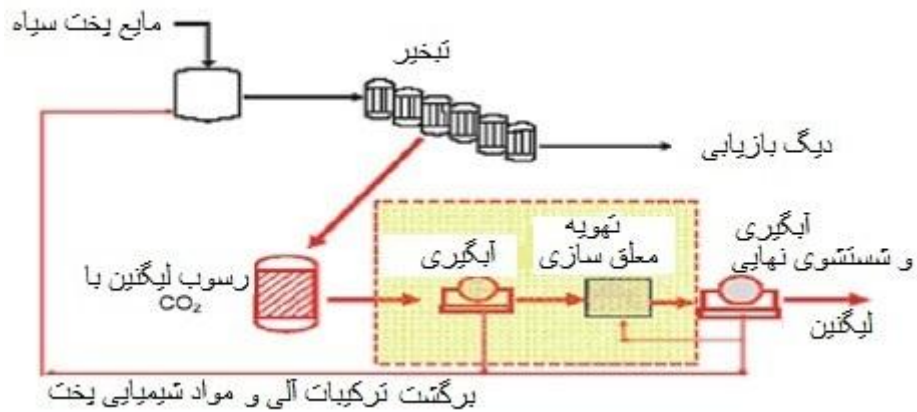
2- CHEMREC نام یک شرکت سوئدی



شکل ۴- خلاصه فرآیند کمرک (لیندبلوم، ۲۰۰۶).

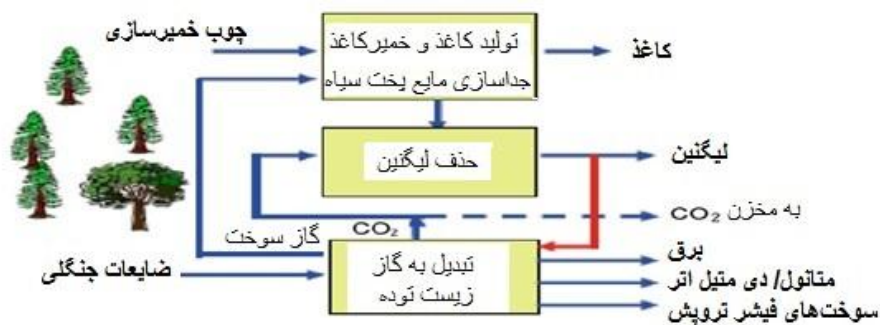
روش حذف لیگنین از مایع پخت سیاه (لینگوبوست<sup>۲</sup>): این فرآیند یکی از روش‌های جدید و به صرفه‌ی شرکت اینونتیا AB سوئد<sup>۳</sup> است، که به لینگوبوست معروف است و از CO<sub>2</sub> برای رسوب لیگنین و شستشو با جریان معکوس برای جمع‌آوری خاکستر و سدیم استفاده می‌شود که مراحل آن شامل اسیدی کردن مایع پخت با گاز CO<sub>2</sub>، رسوب لیگنین جامد، آگیری، معلق‌سازی لیگنین و شستشوی نهایی و جدا کردن لیگنین خالص است، که طرحی از آن در شکل ۵ دیده می‌شود. رسوب لیگنین، مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی حل شدن و خروج لیگنین را، کم می‌کند. در ضمن لیگنین رسوب داده شده دارای مقادیر بسیار کم مواد معدنی و خاکستر است و به دلیل داشتن ۷۰-۶۵٪ مقدار ماده جامد و خاکستر اندک، ارزش حرارتی بسیار بالایی دارد (۲۶ گیگا ژول بر تن). این ماده می‌توان جایگزین، سوخت‌های مصرفی در کوره آهک یا واحد تولید برق کارخانه، شود.

- 1- Lindblom
- 2- Lingoboost
- 3- STFI - Packforsk-Innventia AB



شکل ۵- خلاصه فرآیند لینگوبوست (آکسگارد، ۲۰۰۷).

اگر این فرآیند با روش تبدیل به گاز ادغام شود، می‌توان از CO<sub>2</sub> به‌دست آمده از روش تبدیل به گاز، برای رسوب لیگنین در فرآیند لینگوبوست استفاده کرد. که در این صورت بهره‌وری افزایش یافته و لیگنین با ارزش حرارتی زیاد تولید می‌شود و نیز می‌توان از لیگنین حاصل، برای تولید چسب، الیاف کربن و سایر مواد شیمیایی بر پایه لیگنین استفاده کرد، که در شکل ۶ طرح آن نشان داده شده است.



شکل ۶- طرح ادغام فرآیند لینگوبوست و تبدیل به گاز (آکسگارد، ۲۰۰۷).

## بحث و نتیجه‌گیری

در صنعت کاغذ و خمیرکاغذ زیست توده‌های غنی از انرژی، مانند مایع پخت سیاه خمیرسازی، ضایعات چوب، لجن و پسماندهای فراوانی وجود دارند. امروزه بسیاری از کارخانه‌های تولید کاغذ و خمیر، بیش از نیمی از انرژی موردنیاز خود را از طریق سوخت‌های زیست توده و زباله‌های جامد، تأمین می‌کنند. انتشار دی‌اکسید کربن از احتراق زیست توده، به‌عنوان عامل افزایش گازهای گلخانه‌ای محسوب نمی‌شود. مایع پخت سیاه، مهم‌ترین ماده سوختی زیست توده‌ای در یک کارخانه تولید خمیرکاغذ کرافت است. سوزاندن مایع پخت سیاه در دیگ بازیابی، موجب تولید بخار و انرژی الکتریکی کارخانه خمیرکاغذ می‌شود، که مصارف جدیدتری خواهد یافت (گاوریلسو<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸).

در کارخانه‌های تولید خمیرکاغذ، عملیات تبدیل به گاز، روش امیدوارکننده مناسبی برای تولید انرژی است. تولید گاز قابل اشتعال از سوخت‌های مختلف (زغال، ضایعات چوب و مایع پخت سیاه) از طریق فنون مختلف تبدیل به گاز، امکان‌پذیر می‌باشد. اصول تبدیل به گاز مایع پخت سیاه غلیظ، از طریق واکنش با اکسیژن در دمای بالا و تجزیه با حرارت، به فازهای معدنی و گازی است. تعدادی از فرآیندهای تبدیل به گاز، برای مایع پخت سیاه ارائه شده است، که در واقع به دو دسته تقسیم می‌شوند. روش اول تبدیل به گاز در دمای پایین است، که در آن عملیات حرارتی پایین‌تر از نقطه ذوب نمک‌های معدنی، صورت می‌گیرد. نوع واکنش‌گاه با بستر سیال، برای کلیه فرآیندهای تبدیل به گاز در دمای پایین مناسب است. روش دیگر، شامل آن دسته از فرآیندهایی است که بالاتر از نقطه ذوب عمل کرده و از آب برای خنک کردن و انحلال نمک‌های سدیم مذاب استفاده می‌کند.

اولین نمونه فرآیند تبدیل به گاز در کارخانه خمیرکاغذ Frövifors سوئد است، که از طریق بخار غیر مستقیم با درجه حرارت  $135^{\circ}\text{C}$ ، حاصل از طرح تبخیر آن کارخانه فعالیت می‌کند. درصد مواد جامد مایع پخت سیاه، در حدود ۶۵٪ است و مایع پخت پس از گرم شدن، وارد بخش اول فرآیند Chemrec می‌شود، که همان واحد تبدیل به گاز کننده است. این کارخانه، از سال ۱۹۹۱ با روش تبدیل به گاز مایع پخت سیاه، اداره می‌شود. عملیات تبدیل به گاز تحت فشار<sup>۲</sup> نیز، در کارخانه

1- Gavrilescu

2- Pressurised black liquor gasification

Skoghall در سوئد اجرا شده است. همچنین این روند از سال ۱۹۹۷ به صورت تجاری، در ایالات متحده نیز به کار برده شده است (کمیسیون اروپایی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۰).

روش تبدیل به گاز یکپارچه با فن‌آوری سیکل ترکیبی<sup>۲</sup> را می‌توان، به تدریج در صنعت کاغذ معرفی کرد. در ابتدا تبدیل به گاز کننده، تنها در ظرفیت‌های کمتر از یک واحد کارخانه خمیرکاغذ بزرگ طراحی شده بود و انتظار می‌رود که فن‌آوری IGCC، تا قبل از سال ۲۰۱۰ تنها در حاشیه صنعت کرافت به ایفای نقش بپردازد. ولی ممکن است که در سال‌های آتی در برخی از فرآیندهای تولیدی دیگر نیز، اجرا شود و در حالتی که دیگ بازیابی گلوگاه فرآیند تولید باشد، محدودیت افزایش ظرفیت بازیابی مواد شیمیایی را حل می‌کند. نسبت به دیگ بازیابی معمولی، تبدیل به گاز مایع پخت سیاه تحت فشار، دارای قابلیت ۱۰۰ درصد افزایش تولید برق است. با این حال، فرآیند تبدیل به گاز، پیچیدگی و سرمایه‌گذاری کمتری، نسبت به فرآیند خمیرسازی بدون استفاده از گوگرد دارد. (کمیسیون اروپایی، ۲۰۱۰).

استفاده از گاز سنتزی حاصل از تبدیل به گاز مایع پخت سیاه، باعث ساخت ماده خام برای تولید سوخت خودرو (به عنوان مثال بیودیزل) می‌شود، که معادل بیش از ۲۸۰ میلیون بشکه نفت در هر سال است. این رقم چشمگیر نشان دهنده جایگزینی بیش از ۷ درصد از واردات نفت آمریکا با تولید در داخل کشور، از طریق سوخت‌های تجدید پذیر است (چرمیسینوف و روزنفلد<sup>۳</sup>، ۲۰۱۰).

به طور گسترده‌ای، فن‌آوری تبدیل به گاز با مقیاس تجاری در چندین روش و واکنشگاه در دسترس است. هر کدام از این واکنشگاه‌ها، به راحتی می‌توانند عامل تولید اتانول در یک کارخانه شوند. از سوی دیگر، حجم تولید اتانول، توسط اندازه واکنشگاه تعیین خواهد شد و تمایل به طراحی واحدهای متصل و ترکیب چند واحد، برای دستیابی به ظرفیت مورد نظر، وجود دارد. در این زمینه، دو نمونه از فرآیندهای تولید تجاری اتانول از گاز سنتزی مشتق شده از زیست توده، به انجام رسیده است (دراپچو<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۸).

به علاوه، روش‌های دیگری برای استخراج همی سلولز از خمیرکاغذ یا مایع پخت سیاه وجود دارد، که قابلیت تولید انواع مواد شیمیایی از همی سلولز را ارتقا می‌دهد، که شامل فرآیندهای قلیایی خفیف

1- European commission

2- Integrated gasification with a combined cycle (IGCC)

3- Cheremisinoff and Rosenfeld

4- Drapcho

با و بدون استفاده از کاتیون‌هایی مانند سدیم، پتاسیم، لیتیم، و بورات در درجه حرارت پایین، رسوب ارگانوسولوف، دی اکسید کربن فوق بحرانی و مایعات یونی می‌باشند (بوزل<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۵). با توجه به توسعه فن‌آوری‌های جدید، ارزش افزوده محصولات شیمیایی و سوخت‌های زیستی و همچنین محدودیت‌های شدید زیست‌محیطی، جهان چاره‌ای جز تولید انرژی و مواد شیمیایی از چوب و ضایعات چوبی را به‌عنوان جایگزین منابع فسیلی نخواهد داشت. کشورهای توسعه یافته و عاری از منابع فسیلی در این خصوص پیشرو هستند، چون نیاز بیشتری به انرژی دارند. سایر کشورهای جهان در آینده نزدیک به این سمت حرکت کرده و ایران نیز باید در این زمینه فعالیت کند، ولی توسعه جنگل‌کاری برای تولید محصولات چوب و کاغذ، و همزمان با تولید انرژی و مواد شیمیایی مختلف، بسیار ضروری است. لازم است که، هزینه‌های قریب به ۳ میلیارد دلاری واردات (کل ارزش واردات انواع چوب و کاغذ در سال ۱۳۹۱ معادل ۲۵۹۲۰۴۳۵۴۹ دلار بود)، جایگزین تولید چوب و کاغذ شود، که ضمن ایجاد اشتغال، شرایط محیط‌زیست را بهبود می‌بخشد و امکان تولید انرژی نیز، مهیا خواهد شد.

### رهیافت ترویجی

روند پیشرفت این فنون تبدیل به گاز زیست توده و مایع پخت سیاه، نشانگر اهمیت آن در جهان است و تولید انرژی از منابع فسیلی غیر قابل تجدید، به دلایل زیست‌محیطی باید محدود شود که مناسب‌ترین راه، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است که با وجود برنامه‌های مختلف در کشور، مثل کاربرد انرژی‌های نو (باد، خورشید و غیره)، فعالیتی در این زمینه صورت نگرفته است، که مزایای بسیار بیشتری نسبت به سایر روش‌های تولید انرژی، دارد.

روش تبدیل به گاز ضایعات چوبی و مایع پخت سیاه، می‌تواند کل یا بخشی از برق مصرفی واحدهای چوب و کاغذ را تأمین کند، که به لحاظ اقتصادی، مشکل تأمین انرژی بسیاری از واحدهای ایران را، بر طرف می‌کند. این روش‌ها در کاهش هزینه‌های واحدهای صنعتی کشور موثر خواهند بود و با سرمایه‌گذاری بیشتر، امکان تولید انواع مواد شیمیایی کاربردی، وجود داشته که با این عمل سودآوری واحدهای چوب و کاغذ تضمین خواهد شد، زیرا موضوع سود و ارزش افزوده بیشتر،

1- Bozell

مهمترین مسئله اقتصادی صنعت، در کشور است. در نتیجه درخت کاری و جنگل کاری به دلیل تقاضای این واحدها رونق گرفته و حتی روش‌های بازیافت انواع زیست توده نیز، متحول می‌شوند. همان‌طور که می‌دانیم، رشد درختان و گیاهان در هر نوعی مفید و ضروری است و در بسیاری از نقاط کشور، کشت گونه‌های بومی و سازگار، به صورت دیم و آبی صورت می‌گیرد. گسترش این سنت پسندیده مزایایی را برای طبیعت و کره‌ی زمین داشته و هم می‌تواند باعث رشد صنایع جانبی و ایجاد اشتغال شود، که از تمامی پسماندهای کشاورزی و چوبی می‌توان برای این منظور، استفاده کرد. ولی برای اصلاح شرایط زیست محیطی، تولید انرژی و بهره‌برداری اصولی، کافی نیست بلکه باید برنامه‌ریزی منطقی توسط متخصصین جنگل و منابع طبیعی صورت گیرد، تا در سال‌های آینده بتوان از زیست توده استفاده بهینه کرد و از وابستگی اقتصادی به نفت رها شویم و از همین امروز، باید نسبت به این برنامه‌ریزی اصولی منابع طبیعی اقدام کرد.

### سپاسگزاری

لازم است که از استاد محترم آقای دکتر رسالتی، استاد راهنمای دلسوزم آقای دکتر دهقانی فیروزآبادی و همچنین کلیه تلاشگران عرصه منابع طبیعی تشکر و قدردانی گردد.

### منابع

1. Axegård, P. 2007. The kraft pulp mill as a biorefinery. In: Third ICEP international colloquium on eucalyptus pulp. Belo Horizonte, Brazil, 4–7 March 2007, 6p.
2. Bajpai, P. 2012. Biotechnology for pulp and paper processing. Springer. 414p.
3. Bozell, J.J., Black, S.K., and Myers, M. 1995. Clean fractionation of lignocellulosics— a new process for preparation of alternative feedstocks for the chemical industry. In: 8th International Symposium on Wood and Pulping Chemistry. Helsinki, Finland. 697–704p.
4. Cheremisinoff, N.P., and Rosenfeld, P.E. 2010. Best practices in the wood and paper industries. Handbook of pollution prevention and cleaner production. Elsevier. 350p.
5. Connor, E. 2007. The integrated forest bio refinery: the pathway to our bio-future. In: International chemical recovery conference: efficiency and energy management, Quebec City, QC, 29 May to 1 June 2007. 323–327p.



6. Drapcho, C.M., Nhuan, N.P. and Walker, T.H. 2008. Biofuels engineering process technology. McGraw-Hill. 371p.
7. European commission. 2010. Integrated pollution prevention and control, pulp and paper industry. European IPPC bureau. 718p.
8. Gavrilescu, D. 2008. Energy from biomass in pulp and paper mills. Environmental Engineering and Management Journal. 7(5): 537-546.
9. Kangas, P., Auterinen, I. and Koukkari, P. 2009. Bionuclear concept. NETNUC, Espoo. 11p.
10. Kittelson, D. 2006. Emission control and biofuels. Tenth annual freight and logistics symposium. Four points sheraton, Minneapolis. December 1, 2006. 28p.
11. Larson, E.D. 2007. Pulp mill integrated gasification-based liquid biofuels production. TAPPI international conference on renewable energy. Atlanta, GA. 10-11 May 2007. 20p.
12. Larson, E.D., Consonni, S. and Katofsky, R. 2003. A cost-benefit assessment of biomass gasification power generation in the pulp and paper industry. Final report, Princeton Environmental Institute, 8 Oct 2003. 191p.
13. Lindblom, M. 2006. Chemrec pressurized black liquor gasification – status and future plans. In: 7<sup>th</sup> international colloquium on black liquor combustion and gasification, Jyväskylä, Finland, 31 July to 2 Aug 2006.
14. Sixta, H. 2006. Handbook of pulp. WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, Weinheim. 1352p.
15. Whitty, K. and Baxter, L. 2001. State of the art in black liquor gasification technology. In: Joint international combustion symposium, Kauai, Hawaii, 9–12 Sep 2001.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Conservation and Utilization of Natural Resources, Vol. 1 (1), 2013*  
<http://ejang.gau.ac.ir>

## **Sustainable Production of Energy in Units of Wood Industry and Pulp Mills**

**\*R. Asadi Khansari**

Lecture at Technical and Vocational Faculty of Sowmeeh Sara, Department of  
Wood and Paper Industries

Received: 2013/02/28 ; Accepted: 2013/08/18

### **Abstract**

With regard to competition and economic conditions from pulp and paper plants, it is possible to provide emerging products and energy in wood and pulp industries, which may affect the main products and they will be converted into by-products. In future the world needs clean and renewable energy, which will be supplied, from biomass conclusively. In order to produce oxygen and carbon dioxide absorption, the tree plantation will be very useful on earth's atmosphere. Wood waste and biomass are rich of carbon and hydrogen, and they can provide energy and different chemicals by the new techniques. The principles are similar to refineries and petrochemical plants called biorefinery, and biofuels and valuable chemicals such as methanol, Fischer-Tropsch Liquid (FTL) and Dimethyl Ether (DME) are produced. Usage of any kind of biomass, agricultural waste, and wood can be useful to produce a variety of wood products, wood composites, and also paper and paperboard. But the first step, in proper planning of forest is the silviculture by natural resource specialists. Concerning production of wood and paper, gasification is the best method of chemicals and energy production from wood wastes and black liquor. In the last years, researchers have developed new fields of fuel and energy from renewable sources, specifically biomass dramatically.

**Keywords:** Biomass, Wood and pulp mills, Renewable energy, Gasification, Biofuels

---

\* Corresponding author; Rasadikhansari@gmail.com