مروری بر تکنولوژی پیرولیز برای پردازش پسماند جامد شهری

شلیر کشاورزی[۱*]، شاهین رفیعی[۲]، رضا علیمردانی[۳]، حسن قاسمی مبتکر[۴]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران (shelir.keshavarzi@ut.ac.ir)

۲. استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج ، ایران (shahinrafiee@ut.ac.ir)

۳. استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج ، ایران (rmardani@ut.ac.ir)

۴. استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج ، ایران (Mobtaker@ut.ac.ir)

چکیده

با توجه به افزایش پسماندهای جامد شهری در سرتاسر جهان مشکلات متعدد زیادی مانند آلودگی آب‌های زیرزمینی و خاک و هم‌چنین افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای به وجود آمده که باید به دنبال راه‌حلی برای مدیریت پایدار این مواد باشیم. امروزه با ظهور مفاهیم جدیدی همچون اقتصاد زیستی ضایعات تولید شده به صورت بی‌نهایت بارها و بارها در چرخه‌ی تولید برای تولید مواد خام ثانویه و انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده قرار می‌گیرند تا جایگزین مواد خام بکر و انرژی‌های فسیلی شوند. یکی از تکنولوژی‌های حرارتی که برای ارزش‌افزایی پسماند مورد استفاده قرار می‌گیرد، پیرولیز است. در این فرآیند محصولات در هر سه فاز مایع، جامد و گاز تولید می‌شود که هر کدام می‌تواند کاربردهای مختلفی برای تولید انرژی و مواد متنوع در صنایع شیمیایی داشته باشد. بسته به نرخ گرمایش و دمای مورد استفاده و زمان ماند مواد خام ورودی سه نوع فرآیند پیرولیز کند، سریع و فلاش در داخل راکتور اتفاق می‌افتد که در هرکدام محصولات مختلف با درصد فراوانی متفاوت تولید خواهد شد. به طور کلی برای انجام فرآیند پیرولیز از سه نوع راکتور اصلی بستر ثابت، بستر سیال حبابی و بستر سیال گردشی استفاده می‌شود.

کلمات کلیدی:

پیرولیز، محصولات ،انواع پیرولیز ، پایرولیزر.

*نویسنده مسئول

مروری بر تکنولوژی پیرولیز برای پردازش پسماند جامد شهری

مقدمه

بحران انرژی زاینده‌ی فشار عظیم بر روی ذخیره‌ی سوخت‌های فسیلی در جهان است که منابع بسیار ناپایدار هستند. در سال‌های اخیر، واردات نفت خام با چالش‌هایی به دلیل افزایش قیمت نفت، سناریوی سیاسی متغیر در خاورمیانه و غیرقابل پیش‌بینی بودن بازار جهانی نفت مواجه شده است علاوه بر این، روش‌های مختلفی که در زنجیره تأمین این مواد تجدیدناپذیر دخیل هستند، یعنی استخراج، برداشت، فرآوری، حمل‌ونقل و استفاده منجر به ایجاد انواع آلودگی‌های زیست محیطی به ویژه انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است[1]. در مفهوم سنتی، منابع انرژی تجدیدپذیر آن‌هایی هستند که می‌توانند توسط طبیعت جایگزین و همواره تولید شوند که دارای تنوع بسیار زیادی هستند از جمله مانند انرژی باد، انرژی خورشیدی، انرژی جزر مد[6]. تمامی کشورها امروزه به دنبال استفاده از این منابع هستند تا بتوانند امنیت انرژی خود را تامین کنند.

جمعیت جهان به طور چشمگیری در حال افزایش بوده و در سال ۱۹۶۰، ۳ میلیارد نفر بود که در سال ۲۰۱۱ به ۷ میلیارد نفر افزایش یافته و پیش بینی می شود تا سال ۲۰۲۵ به ۸/۱ میلیارد نفر برسد [3]. تغییر سبک زندگی و الگوهای مصرف، توسعه اقتصادی، شهرنشینی سریع و صنعتی شدن باعث ایجاد روند صعودی تولید زباله های جامد شهری است، به نحوی که توانایی محیط طبیعی و مقامات شهرداری را برای جذب و مدیریت صحیح آن از بین می‌برد[2].

زباله‌های جامد شهری یا MSW[1] به عنوان هرگونه پسماند تولید شده توسط فعالیت‌های خانگی، تجاری، بازرگانی و سازمانی تعریف می‌شود که خطرناک نیستند. بسته به منبع، می‌توان پسماندهای جامد شهری به سه نوع طبقه‌بندی می‌شود: زباله‌های خانگی یا مسکونی که تولید آن‌ها از مناطق داخلی هر خانه و خانوارها نشات می‌گیرد ؛ پسماندهای بازرگانی و یا پسماندهای سازمانی که از منابع بزرگ‌تر مانند هتل‌ها،رستوران‌ها، پذیرایی‌ها، ساختمان‌های اداری، مدارس و غیره ناشی می‌شوند. پسماندهای خدمات شهری که از منابع منطقه‌ای مانند خیابان‌ها، پارک‌ها، بازارچه‌ها و غیره تولید می‌شوند. زباله‌های شهری شامل پسماندهای غذایی، کاغذ، مقوا، پلاستیک، منسوجات، شیشه، فلزات، چوب، ضایعات حاصل از جاروکردن خیابان و پیرایش درختان، پسماندهای عمومی پارک‌ها، سواحل و دیگر مناطق تفریحی است [7].گاهی اوقات پسماندهای دیگر مانند باتری و لوازم الکترونیکی مصرفی، مواد شیمیایی، رنگ، افت‌کش‌ها و زباله‌های زیست پزشکی نیز با این منابع به صورت نادر ترکیب می‌شوند [8].

دفن زباله یا لندفیل ارزان‌ترین روش برای مدیریت زباله به مقدار زیاد بخصوص در کشورهای درحال توسعه است. از سوی دیگر، مخالفت عمومی مردم به دلیل انتشار بو و هم چنین کمبود زمین در دسترس برای اهداف دفن غیربهداشتی پسماند وجود دارد. وابستگی بیش از حد به این روش سنتی دفع به طور مداوم باعث ایجاد مسائل زیست‌محیطی، بهداشتی و ایمنی برای شهروندان شده است[2].

[1] Municipal Solid Waste

اهداف هر سیستم مدیریت پایدار پسماند ارزش افزایی زباله به شکل مواد و انرژی و به دنبال آن دفع باقی مانده‌ی حاصل از آن است. اما، یک انتخاب بهینه برای یک فناوری پردازش زباله نه تنها منوط به نیازهای اقتصادی و تولنایی بازیابی انرژی بوده، بلکه هم‌چنین به دنبال پیگیری الزامات انطباق نظارتی محیط‌زیستی در منطقه‌ی مورد نظر است. بنابراین لازم است بهترین فناوری موجود برای پردازش زباله انتخاب شود که تمام معیارهای لازم برای یک عملیات موفقیت آمیز را برآورده کند. فرآیندهای متنوعی برای مدیریت پسماند در دسترس است که در آنها سه روش پرکاربرد وجود دارد: الف. تبدیل حرارتی (سوزاندن، پیرولیز، گازی‌سازی)، ب. تبدیل بیولوژیکی (هضم بیهوازی و کمپوست هوازی)،ج. لندفیل بهداشتی زباله به عنوان آخرین گزینه‌ی مدیریتی[3].

در بین تکنولوژی پردازش حرارتی فرآیند پیرولیز پتانسیل بالایی در بازار دارد. بنابراین، تحقیقات زیادی در سراسر جهان برای بهبود این روش تولید انرژی در حال انجام است. در مقایسه با تکنولوژی‌هایی مانند هضم بیهوازی، تخمیر و کمپوست تبدیل حرارتی برای تولید انرژی از زباله‌های جامد شهری از دیدگاه تجاری نسبتا جدیدتر است و به دلیل مزایای فنی و استراتژیک خود توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌است. حذف یا تضعیف مشکلات زیست‌محیطی و کسب سودآوری در این فرآیند مدیریتی گامی بسیار مطلوب بوده و تحقیقات در زمینه فناوری پیرولیز نشان داد که این تکنولوژی گزینه امیدوارکننده‌تری برای توسعه پایدار است[4]. در ادامه به بررسی این فرآیند، شرایط عملیاتی آن، محصولات تولیدی و انواع پایرولیزرهای مورد استفاده برای انجام آن می‌پردازیم.

فرآیند پیرولیز

پیرولیز یک روش پیشرفته‌ی درمان حرارتی پسماند جامد شهری است که در محدوده‌ی دمایی ۴۰۰ الی ۸۰۰ درجه‌ی سانتیگراد در غیاب اکسیژن به عنوان ماده‌ی اکسیدکننده اتفاق می افتد و قادر به تولید محصول در هر سه فاز جامد، مایع و گاز می‌باشد[3]. برای بالا بودن کیفیت محصولات حاصل از پیرولیز ، اخیرا از مواد اولیه‌ای که نوع خاصی از پسماندهای تولید شده (پلاستیک، تایر، تجهیزات الکترونیکی، ضایعات برقی ، ضایعات چوب و غیره) می‌باشد، استفاده می‌کنند[5]. عملکرد و کیفیت این فرآیند عمدتا به سرعت گرم شدن ، درجه‌ی حرارت فرآیند ، زمان اقامت (ماند) ، ترکیب مواد زائد، اندازه‌ی ذرات پسماند و نوع راکتور است بستگی دارد[8].

انواع محصولات پیرولیز

به طورکلی علاوه بر زغال، روغن زیستی و گاز به عنوان محصولات اصلی، تارها و خاکستر نیز به مقدار بسیار کم در کنار محصولات اصلی تولید می‌شوند. تارها می‌توانند باعث گرفتگی و انسداد لوله‌ها شوند[8].

- روغن زیستی (بایو اویل)

بایواویل، اصطلاحی است که برای تولید سوخت مایع به عنوان محصول مایع حاصل از پیرولیز زیست‌توده به کار می‌رود. رنگ آن از زرد مایل به قهوه ای روشن تا رنگ قهوه‌ای تیره برای بخشهای مختلف در طول مراحل چگالش بخارات با بوی تند دودی و pH اسیدی متفاوت است. روغن‌های زیستی

مخلوط‌های پیچیده‌ای از ترکیبات شیمیایی هستند که از تجزیه سلولز، همی‌سلولز، لیگنین همراه با سایر مواد آلی به دست می‌آیند. روغن زیستی را می توان به عنوان یک میکروامولسیون در نظر گرفت که در آن فاز پیوسته یک محلول آبی ازتجزیه شدن محصولات سلولز و همی سلولز است که فاز ناپیوسته یا پخش شونده ماکرومولکول های لیگنین پیرولیتیک را پایدار و تثبیت می کند [10]. تنها ترکیب فراوان موجود در هر روغن زیستی آب (حداکثر ۴۰٪ وزنی) خواهد بود که در تعیین مقدار انرژی و همچنین خصوصیات فیزیکی وشیمیایی مانند pH ، ویسکوزیته و جداسازی فاز بسیار مهم است. روغن‌های زیستی همچنین می‌توانند حاوی ذرات جامد ریز (آئروسل‌ها)نیز باشند. ویژگی‌های سوخت روغن‌های زیستی در اصل به دلیل وجود صدها ترکیب آلی است که متعلق به قندها، اسیدهای آلی، الکل‌ها ، آلدئیدها، کتون‌ها، فنل‌ها، استرها، اترها، فوران‌ها ، ترکیبات ازت و گوگرد و ترکیبات چند منظوره دیگر است. وزن مولکولی میانگین برای بخش‌های مختلف روغن‌های زیستی می تواند در محدوده‌ی ۳۷۰ الی ۱۰۰۰ گرم در مول باشد. در حال حاضر بیش از ۳۰۰ ترکیب آلی در بیوروغن‌های مختلف از منابع مختلف گزارش شده است. با این حال، به دلیل تشکیل لیگنین‌های پیرولیتیک که به طور تصادفی در طول‌های مختلف زنجیره پلیمری شکسته می‌شوند، شناسایی شیمیایی کامل بیوروغن‌ها عملا امکان پذیر نیست. مشتقات لیگنین ترکیبات اصلی هر گونه روغن زیستی هستند و به پیچیدگی و خصوصیات متمایز آن در صورت استفاده از منابع مختلف کمک می‌کنند.در اغلب موارد ممکن است استفاده‌ی مستقیم از آن مناسب نباشد و نیاز به پالایش و مراحل پردازش بیشتر شبیه به تصفیه‌ی نفت خام فسیلی در پالایشگاه‌های نفت دارد. پایداری روغن‌های زیستی از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا پس از اتمام پیرولیز، روغن‌های زیستی شروع به تجزیه یا انجام واکنش‌های بیشتر در میان گونه‌های مختلف شیمیایی خود البته با سرعت بسیار کمتری می‌کنند[9]. ارزش حرارتی پایین این محصول مایع در محدوده‌ی ۱۷ الی ۲۵ مگاژول بر کیلوگرم است[11]. این روغن می‌تواند پس از ارتقا جایگزین بنزین، گازوئیل و در سیستم‌های ترکیبی برای تولید گرما و الکتریسیته، یا به عنوان بلوک‌های سازنده‌ی مواد شیمیایی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد[12]. این محصول مایع هم‌چنین برای ساخت طعم‌دهنده‌ها و اسانس‌های مصنوعی، برای ساخت چسب ودر صنعت رزین نیز می‌توان به کار گرفته شود [4].

پتانسیل بازیابی انرژی از روغن حاصل از تکنولوژی پیرولیز

درپایین با استفاده از ارزش‌حرارتی پایین روغن‌زیستی به‌دست آمده از اجزای متناسب پسماند برای فرآیند، پتانسیل بازیابی انرژی از محصول بایواویل حاصل از تکنولوژی پیرولیز فرموله شده است[12].

$$E_{PYR} = M_{Wav} \times f_{PYR} \times LHV_{PYR} \times M_{PYR} \times \eta_P \times 0.28$$

E_{PYR}، پتانسیل تولید الکتریسیته برحسب کیلووات ساعت؛ M_{Wav}، میانگین نرخ پسماند تولیدی کل برحسب کیلوگرم؛ f_{PYR}، درصد پسماند مطلوب مورد استفاده برای استفاده در تکنولوژی (٪)؛ LHV_{PYR}، ارزش‌حرارتی پایین روغن پیرولیز برحسب مگاژول بر کیلوگرم؛ M_{PYR} ، بازده‌ی تولید روغن از پسماند (٪)؛ η_P، بازده‌ی تبدیل روغن به الکتریسیته (0.33)؛ 0.28 ضریب تبدیل مگاژول به کیلووات ساعت است.

- زغال زیستی

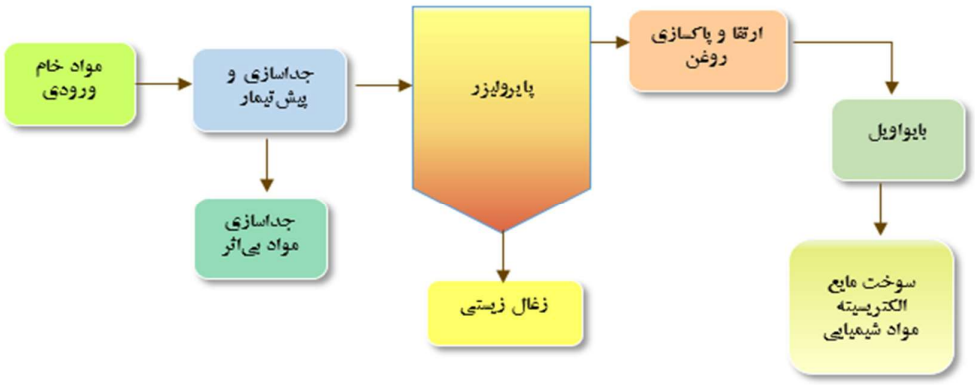
زغال یک محصول جانبی پیرولیز همراه با روغن زیستی و گازهای دودکش است. در زمان‌های اخیر، بیوچار به دلیل ناسازگاری با بخش حمل و نقل (موتورهای خودرو)، ذخیره‌سازی و مسائل مربوط به آلاینده‌های ثانویه (محتوای خاکستر بالاتر)، کم‌تر نسبت به بایواویل به عنوان منبع سوخت ترجیح داده می‌شود. هم‌چنین این موضوع در مقالات مربوطه نیز منعکس شده است. با این وجود، به جز ناسازگاری به عنوان سوخت زیستی برای بخش حمل و نقل، بیوچار مزایای متعددی دارد که آن را به یک محصول جانبی مهم پیرولیز از نقطه‌نظر امکان‌سنجی اقتصادی تبدیل می‌کند. سودمندی بیوچار در بخش کشاورزی ثابت شده و پژوهشگران مختلف نتایج تعادل انرژی و پتانسیل کاهش خالص متان (CH_4) و اکسید نیتروژن (N_2O) را در کاربرد اصلاح خاک گزارش کرده‌اند. کاربردهای بالقوه بیوچار شامل بهبود دهندهی خاک، عامل حجیم کننده برای کمپوست کردن، کربن فعال، اصلاح آب با گرفتن ذرات آلی اب و تصفیه آن و اصلاح خاک و ترسیب کربن است. این یک واقعیت مسلم است که بیوچار در مقایسه با زیست توده خام بسیار پایدار است و اثرات مثبتی بر رشد کلی گیاه دارد. ویژگی‌های بسیار اساسی فیزیکی و شیمیایی مانند خاصیت تعدیل pH، تخلخل، تمایل به جذب فلز، آزاد شدن آهسته مواد مغذی مانند فسفر و نیتروژن، در میان دیگر ویژگی‌ها به بهبود کیفیت خاک کمک می‌کنند. این می تواند به طور بالقوه نیازهای دوز متعارف کودها را کاهش دهد و در نتیجه باعث بهبود تولید اقتصادی و همچنین کاهش احتمال رواناب مواد مغذی و ازدست رفتن مواد مغذی در خاک، جلوگیری از فرسایش و انتشارکمتر گازهای گلخانه‌ای به دلیل استفاده نکردن از کودهای شیمیایی می شود. استفاده از بیوچار به عنوان کاهنده در صنعت متالورژی، به ویژه در برزیل، بازار بالقوه بیوچار را نیز گسترش داده‌است. تجربه در طی سالیان متمادی ثابت کرده است که تولید بیوچار با بازدهی مطلوب، نسبتا آسان‌تر از روغن زیستی است. بنابراین، فن‌آوری تولید برای بیوچار دارای مانع خاصی نیست، اما انتشار دانش در مورد استفاده عملی از بیوچار در کشاورزی و تدوین استانداردهای نظارتی استفاده از آن نیازمند تحقیقات تکمیلی است[10].

- **گاز پیرولیز**

به طور کلی، بخش گازی از بخار پیرولیز از گازهای مختلف مانند کربن دی‌اکسید (CO_2)، کربن مونواکسید (CO)، ناکس‌ها(NO_X)، اکسیدهای گوگرد(SO_X)، هیدروژن سولفید(H_2S)، هیدوژن(H_2)، آلدئیدها، کتون‌ها، اسیدهای کربوکسیلیک فرار و هیدروکربن‌های گازی تشکیل شده‌است. با این وجود، گازهای پیرولیز را می توان در غیاب سیستم چگالش کارآمد، از ترکیبات فرار نیز تشکیل داد. اجزای اصلی گاز پیرولیزکربن دی‌اکسید و کربن مونواکسید هستند که توسط چندین محقق برای انواع ورودی مواد مختلف گزارش شده‌اند.گازهای پیرولیزنسبت به سوختهای معمولی ارزش حرارتی نسبتاً پایین تر دارند. وجود گازهای آلاینده احتمالی NO_X، SO_X، H_2S و آئروسل در گازهای پیرولیز به منبع مورد استفاده یعنی ضایعات حیوانی، زباله‌های کشاورزی و پسماندهای شهری بستگی دارد. به همین دلیل در اثر فرآیند پیرولیز ممکن است آلاینده‌هایی به محیط زیست وارد شود که در اینجا تصفیه و تمیزکردن کار بسیار ضروری است. با این وجود، گزینه‌های زیادی برای تصفیه و خالص‌سازی گازهای پیرولیز مانند سیستم‌های رسوبات الکترواستاتیک، اسکرابرهای موجود برای جداسازی ناکس‌ها، سیستم‌های جذب مبتنی بر کربن

فعال برای ترکیبات آلی فرار، منشورها، سیستم‌های سولفورزدایی گاز دودکش مبتنی بر حلال برای خالص‌سازی هیدروژن و فیلترها در جاهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند[13].

درشکل زیر نمایی کلی از فرآیند پیرولیز قابل مشاهده است[14].



شکل ۱. نمایی کلی از فرآیند پیرولیز

انواع پیرولیز

- پیرولیز کند

پیرولیز کند یا متداول با سیستم‌هایی به نام " تولید زغال" یا سیستم‌های پیوسته، با نرخ گرمایش کند مواد، در دمای بالای ٤٠٠ درجه‌ی سانتیگراد در غیاب اکسیژن شناخته شده است. در این فرآیند، زیست‌توده با نرخ حرارت پایین، در حدود ٥ تا ٧ درجه سانتیگراد بر دقیقه، که در آن محصولات مایع و گازی حداقل هستند، پیرولیز می‌شود و تولید زغال‌سنگ به حداکثر می‌رسد[13]. پیرولیز کند چوب، با دوام و پایداری ٢٤ ساعته، تا اوایل دهه ١٩٠٠ یک تکنولوژی بسیار رایج در صنایع بود، که در آن زغال‌سنگ، اسید استیک، متانول و اتانول از چوب تولید می‌شدند. پیرولیز کند با نرخ‌های حرارت‌دهی کوچک و محدوده دمایی بیشینه در حدود ٦٠٠ درجه سانتیگراد و زمان ماند زیست‌توده در رآکتور بین ٥ تا ٣٠ دقیقه مشخص می‌شود[15].

- پیرولیز سریع

پیرولیز سریع، روش مناسبی برای تبدیل زیست‌توده به یک محصول مایع می‌باشد. روغن پیرولیز تولید شده (بیو اویل)، یک سوخت با چگالی متوسط است که به عنوان محصول اصلی در فرآیند پیرولیز سریع تولید می‌شود [٧٠]. در پیرولیز سریع، زیست‌توده به سرعت تجزیه می‌شود و عمدتا بخارات و آئروسل‌ها و مقدار اندکی زغال‌سنگ و گاز تولید می‌کند. این بخارات پس از سردسازی و چگالش تبدیل به روغن زیستی می‌شوند[16].

- پیرولیز فلاش

پیرولیز فلاش، به عنوان ویژگی اصلی خود، نرخ‌های گرمایش بسیار بالا و زمان اقامت بسیار کم مواد موجود در رآکتور را دارا می‌باشد. این ویژگی‌ها به تولید بخارها کمک می‌کنند و فرآیند را بسیار شبیه به گازی‌سازی می‌کنند. با توجه به نرخ گرمایش بالا و زمان اقامت مواد اولیه‌ی ورودی فقط در حد چند

ثانیه نیازهای گرمایی راکتور تامین می‌شود[17]. در اینجا گازها و روغن مایع دو محصول اصلی تولیدی و مقدار بسیار اندکی زغال تشکیل می‌شود. برای انجام این فرآیند ، موارد زیر باید رعایت شود: (الف) قرار دادن ذرات زیست توده در دمای مورد نظر به گونه‌ای که آن‌ها به صورت مطلوب واکنش نشان دهند و (ب) به حداقل رساندن قرار گرفتن آنها در معرض دمای پایین میانی که باعث تحریک تشکیل کک می شود. یک راهکار برای رسیدن به این اهداف، استفاده از ذرات کوچک است[13].

در جدول زیر ویژگی‌های اصلی سه نوع پیرولیز قرار دارد.

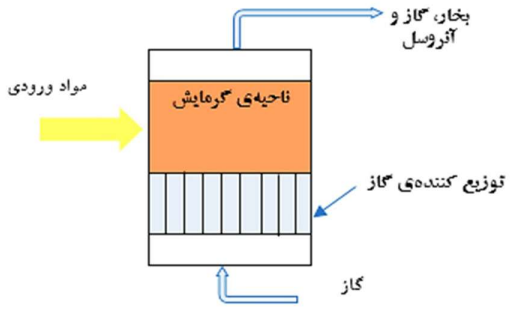
جدول۱- انواع پیرولیز

انواع پیرولیز	زماند ماند (ثانیه)	دما (کلوین)	نرخ گرمایش (کلوین بر ثانیه)	اندازه‌ی ذرات (میلیمتر)	محصولات اصلی
پیرولیز کند	۶۵۰-۵۵۰	۹۵۰-۵۵۰	۱- ۰/۱	۵۰-۵	زغال
پیرولیز سریع	۱۰-۰/۵	۱۲۵۰-۸۵۰	۲۰۰-۱۰	۱>	بایواویل
پیرولیز فلش	۰/۵>	۱۰۵۰- ۱۳۰۰	۱۰۰۰>	۰/۲>	گاز و بایو اویل

انواع پایرولیزرها

- راکتور بستر ثابت

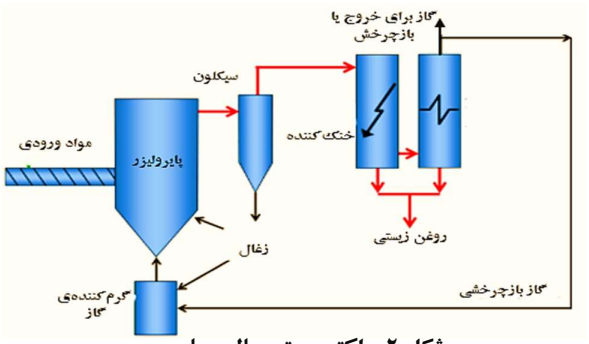
سیستم پیرولیز بستر ثابت، ساده، قابل اعتماد و اثبات شده برای سوختهایی است که اندازه نسبتاً یکنواختی دارند و محتوای کمی ریزدانه ذغال سنگ دارند که از یک راکتور با سیستم خنک‌کننده و تمیزکننده‌ی گاز تشکیل شده است و به طور معمول برای تولید زغال چوب استفاده می‌شود. راکتورهای بستر ثابت به طور کلی با حفظ کربن بالا و باقیمانده‌ی ناخاصی بسیار کم در مدت زمان ماند طولانی مواد جامد عمل می‌کنند. یک مشکل عمده در راکتورهای بستر ثابت، تشکیل تار است، اگرچه تحول اخیر در تبدیل حرارتی و کاتالیستی تار، فرصت‌های جلوگیری از تشکیل تار را فراهم کرده است. در فرآیند پیرولیز بستر ثابت دما در محدوده‌ی تعیین شده بین ۴۵۰ الی ۷۵۰ درجه‌ی سانتیگراد ، با نرخ گرمایش بین ۵ تا ۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد در دقیقه در نوسان است[18]. در شکل زیر نمایی کلی از راکتور بستر ثابت نمایان است[13].



شکل ۲. راکتور بستر ثابت

- راکتور بستر سیال حبابی

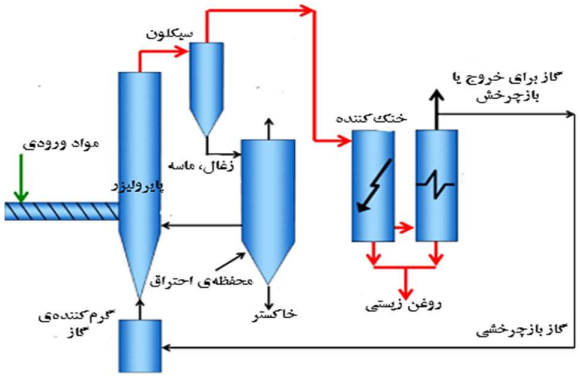
پارولیزرهای بستر سیال عملکرد خوب و سازگار با بازده‌ی زیاد مایعات بایواویل به طور معمول ۷۰-۷۵٪ وزنی دارند. در اینجا گازتولیدی در داخل سیستم بازچرخش می‌کند و برای سیال‌سازی مواد خام ورودی و مواد کاتالیستی اضافی یعنی شن و ماسه از آن استفاده می‌کنند. از چوب به صورت خوراک خشک معمولا استفاده می‌شود. اندازه‌ی ذرات زیست توده کوچک کمتر از ۲ الی ۳ میلی متر برای دستیابی به نرخ گرمایش بالا برای مواد مورد نیاز است. زمان اقامت مواد جامد و بخارها با نرخ جریان گاز سیال کننده کنترل می شود و برای ذغال سنگ بیشتر از بخارات است[13]. از آنجا که ذغال سنگ به عنوان یک کاتالیزور یا کاتالیست موثر ترک خوردگی و کراکینگ بخار در دمای واکنش پیرولیز سریع عمل می‌کند، جداسازی سریع و موثر زغال مهم است. این امر معمولاً با تخلیه و جداسازی به دنبال تفکیک در یک یا چند سیکلون حاصل می‌شود و بعد از انجام این عمل جداسازی، زغال دوباره به داخل راکتور بازمی‌گردد. بنابراین طراحی دقیق هیدرودینامیک ماسه و مواد خام ورودی و زغال مهم است[9]. در شکل زیر نمایی از این نوع راکتور قابل مشاهده است[20].



شکل ۲. راکتور بستر سیال حبابی

- راکتور بستر سیال گردشی

بستر سیال در گردش دارای بسیاری از ویژگی‌های بسترهای سیال حبابی هستند که در بالا توضیح داده شده است با این تفاوت که مدت زمان ماند برای زغال تقریباً مشابه بخارات و گاز است و سرعت بالاتر گاز بازچرخش شده می تواند منجر به محتوای بیشتر زغال در روغن زیستی جمع آوری شده شود، چون سرعت بالای گاز جداسازی کامل زغال را در سیکلون مشکل می‌کند. یک مزیت اضافه شده این است که راکتورهای سیال گردشی برای توانهای بسیار زیاد مناسب هستند. تأمین گرما معمولاً از طریق چرخش مجدد شن و ماسه گرم شده از یک محفظه‌ی احتراق ثانویه ذغال صورت می‌گیرد[13]. نمایی از این نوع راکتورها در زیر قابل مشاهده است[20].



شکل۳. راکتور بستر سیال گردشی

نتیجه‌گیری

پیرولیز یکی از تکنولوژی حرارتی برای درمان پسماندهای جامد شهری در سرتاسر جهان است که محصولات مختلفی از آن تولید می‌شود که در زمینه‌های مختلفی کاربرد دارند. روغن زیستی به عنوان اصلی‌ترین محصول تولید شده در آینده می‌تواند تحول عظیمی در تامین انرژی و بخش حمل و نقل ایجاد کند. این فرآیند علاوه بر اینکه یک تکنولوژی حرارتی مستقل است، در دیگر تکنولوژی‌ها یعنی احتراق و گازی‌سازی به عنوان مرحله‌ی اول انجام فرآیند نقش بسیار تعیین‌کننده‌ی دارد.

برای به دست آوردن پتانسیل کامل تکنولوژی پیرولیز زیست‌توده و تجاری سازی موفق، به تحقیقات و توسعه بیشتری در زمینه‌ی استفاده از مواد خام ورودی مناسب و پارامترهای عملیاتی نیاز است. علاوه بر این، باید بر مسائل مختلفی از جمله فقدان بازار برای روغن‌های پیرولیز و محصولات مشتق‌شده از بیوچار با ویژگی‌های عملکردی مناسب غلبه کرد. همچنین، توصیه می‌شود سرعت بهبود پالایشگاه‌های روغن زیستی برای استفاده از پتانسیل کامل این محصول تسریع شود.

منابع

1. Rajaeifar, M. A., Ghanavati, H., Dashti, B. B., Heijungs, R., Aghbashlo, M., & Tabatabaei, M. (2017). Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: a comparative review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79, 414-439.
2. Tan, S. T., Ho, W. S., Hashim, H., Lee, C. T., Taib, M. R., & Ho, C. S. (2015). Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia. Energy Conversion and Management, 102, 111-120.
3. Kumar, A., & Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. Waste Management, 69, 407-422.
4. Uddin, M. N., Techato, K., Taweekun, J., Rahman, M. M., Rasul, M. G., Mahlia, T. M. I., & Ashrafur, S. M. (2018). An overview of recent developments in biomass pyrolysis technologies. Energies, 11(11), 3115.

5. Lombardi, L., Carnevale, E., & Corti, A. (2015). A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. Waste management, 37, 26-44.
6. Cheng, H., & Hu, Y. (2010). Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China. Bioresource technology, 101(11), 3816-3824.
7. Annepu, R. K. (2012). Sustainable solid waste management in India. Columbia University, New York, 2(01).
8. Beyene, H. D., Werkneh, A. A., & Ambaye, T. G. (2018). Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review. Renewable Energy Focus, 24, 1-11.
9. Verma, M., Godbout, S., Brar, S. K., Solomatnikova, O., Lemay, S. P., & Larouche, J. P. (2012). Biofuels production from biomass by thermochemical conversion technologies. International Journal of Chemical Engineering, 2012.
10. Konwar, L. J., Mikkola, J. P., Bordoloi, N., Saikia, R., Chutia, R. S., & Kataki, R. (2018). Sidestreams from bioenergy and biorefinery complexes as a resource for circular bioeconomy. In Waste Biorefinery (pp. 85-125). Elsevier.
11. Alao, M. A., Ayodele, T. R., Ogunjuyigbe, A. S. O., & Popoola, O. M. (2020). Multi-criteria decision based waste to energy technology selection using entropy-weighted TOPSIS technique: The case study of Lagos, Nigeria. Energy, 201, 117675.
12. Yang, Y., Heaven, S., Venetsaneas, N., Banks, C. J., & Bridgwater, A. V. (2018). Slow pyrolysis of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Characterisation of products and screening of the aqueous liquid product for anaerobic digestion. Applied energy, 213, 158-168.
13. Rappert, S., & Müller, R. (2005). Odor compounds in waste gas emissions from agricultural operations and food industries. Waste Management, 25(9), 887-907.
14. Malav, L. C., Yadav, K. K., Gupta, N., Kumar, S., Sharma, G. K., Krishnan, S., ... & Bach, Q. V. (2020). A review on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: Current practices, challenges, and future opportunities. Journal of Cleaner Production, 277, 123227.
15. GOMES, M. D. S. (2010). Produção de bioóleo através do processo termoquímico de pirólise. São Paulo: Faculdade de Araçatuba.
16. Strahan, G. D., Mullen, C. A., & Boateng, A. A. (2011). Characterizing biomass fast pyrolysis oils by 13C NMR and chemometric analysis. Energy & fuels, 25(11), 5452-5461.
17. Goyal, H. B., Seal, D., & Saxena, R. C. (2008). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: a review. Renewable and sustainable energy reviews, 12(2), 504-517.
18. Martini, P. R. R. (2009). Conversão pirolítica de bagaço residual da indústria de suco de laranja e caracterização química dos produtos.
19. Mohan, D., Pittman Jr, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. Energy & fuels, 20(3), 848-889.

20. Amenaghawon, A. N., Anyalewechi, C. L., Okieimen, C. O., & Kusuma, H. S. (2021). Biomass pyrolysis technologies for value-added products: A state-of-the-art review. Environment, Development and Sustainability, 1-55.

A review of pyrolysis technology for municipal solid waste processing

Shelir keshavarzi *[1], Shahin rafiee [1],

1. Biosystems Engineering Group, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, karaj, Iran
2. Biosystems Engineering Group, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, karaj, Iran

Abstract

According to the increase in municipal solid waste around the world, many problems have arisen, such as groundwater and soil pollution, as well as increasing greenhouse gas emissions, and we must look for a solution for the sustainable management of these materials. Nowadays, with the advent of new concepts such as: bio-economics, waste generated endlessly is used repeatedly in the production cycle to produce secondary raw materials and renewable energy to replace virgin raw materials and fossil fuels. One of the thermal technologies used to increase the value of waste is pyrolysis. In this process, products are produced in all three phases of liquid, solid and gas, each of which can have different applications for the production of energy and various materials in the chemical industry. Depending on the heating rate and temperature used and the residence time of the input raw materials, three types of slow, fast and flash pyrolysis processes take place inside the reactor, in each of which different products will be produced with different percentages. In general, three main types of reactors: fixed beds, bubbling fluidised beds and circulating fluidised beds, are used to perform the pyrolysis process.

Key words: Pyrolysis, Products, Types of pyrolysis, Solar radiation, Pyrolyser

*Corresponding author
E-mail: shelir.keshavarzi@ut.ac.ir