



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال نهم، شماره‌ی ۳۴
بهار ۱۳۹۷، صفحات ۳۰-۲۳

شبیه‌سازی فرآیند پیرولیز انواع مختلف چوب با در نظر گرفتن میزان آلودگی هوا

بهنام ستاری

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
Email: behnam.sattari95@ms.tabrizu.ac.ir

موسی محمدپور فرد

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
Email: mohammadpour@tabrizu.ac.ir

مرتضی قلی‌زاده

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
Email: m.gholizadeh@tabrizu.ac.ir

چکیده

فرآیند پیرولیز یکی از روش‌های ترموشیمیایی است که در آن با تجزیه بیومس در فضای خالی از اکسیژن محصولات بیواویل، بیوجار، گاز تولید می‌شود. در سال‌های اخیر، با توجه به کاهش منابع تولید انرژی در سطح جهان و آلودگی‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی معمول، استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر، جایگاه ویژه‌ای را بین جوامع جهانی پیدا کرده است. از این رو، تحقیقات زیادی در راستای اجرای این فرآیند در ابعاد مختلف انجام شده است اما امکان مطالعه شرایط عملیاتی مختلف با خوراک‌های متفاوت برای این فرآیند در ابعاد صنعتی وجود ندارد، بنابراین اجرای طرح، شبیه‌سازی این فرآیند با استفاده از نرم افزار Aspen Plus انجام می‌شود تا با بررسی شرایط عملیاتی بهترین و بهینه‌ترین حالت برای فرآیند در نظر گرفته شود. در شبیه‌سازی انجام شده، ابتدا میزان رطوبت خوراک مورد استفاده تا مقدار معین کاهش داده می‌شود. در مرحله بعد، بیومس به عناصر سازنده خود تجزیه می‌شود. در مرحله نهایی براساس رویکرد حداقل‌سازی انرژی آزاد گیبس، واکنش‌های پیرولیز مدل‌سازی می‌شوند. هدف اصلی این تحقیق، بررسی فرآیند پیرولیز با توجه به میزان تولید CO، CO₂، CH₄ و آلاینده‌های محیطی و براساس خوراک‌های مختلف مورد استفاده است. این شبیه‌سازی براساس سه نمونه چوبی کاج، صنوبر و افاقیا بررسی شده است.

کلید واژه: بیومس، فرآیند پیرولیز، انرژی‌های تجدیدپذیر، شبیه‌سازی، کنترل آلودگی.

مقدمه

افزایش تقاضا برای منابع انرژی و کاهش میزان سوخت‌های فسیلی در سطح جهان، ضرورت حفظ محیط‌زیست، کاهش آلودگی هوا و غیره، همه از دلایلی هستند که استفاده و تولید انرژی از منابع نو و تجدیدپذیر را توجیه می‌کند. علاوه بر موارد فوق، تولید سوخت برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی معمول و توجیه اقتصادی استفاده از فرآیند پیرولیز می‌تواند عامل محرکی برای اجرای این طرح در کشورهای مختلف باشد.

برای انسان، چوب به‌عنوان یکی از منابع اصلی برای ایجاد آتش در هزاران سال قبل بوده است. در حال حاضر، بیش از ۳ میلیارد نفر در سطح جهان برای تأمین انرژی وابسته به منابع بیومس به‌خصوص چوب هستند. براساس تعریف آژانس انرژی بین‌المللی، بیومس به هر ماده آلی قابل تجزیه اطلاق می‌شود که تجدیدپذیر باشد و معمولاً از ضایعات گیاهی و حیوانی به‌دست می‌آید و شامل چوب و زباله‌های آلی شهری و غیره است. بیومس در حدود ۱۴ درصد از مصرف انرژی جهان را تأمین می‌کند [۱ و ۲] و از مزایای آن نسبت به منابع اصلی تولید انرژی یعنی نفت و گاز طبیعی و زغال‌سنگ، گستردگی آن در سطح جهان و ارزان بودن آن است [۳].

گسترش و توسعه تولید انرژی و مواد شیمیایی از منابع چوب و با استفاده از فرآیندهای ترموشیمیایی همواره تحت تأثیر قیمت و میزان دسترسی سوخت‌های فسیلی بوده است. به همین دلیل، پیشرفت در صنایع مربوط به نفت و گاز، استفاده از صنایع بر مبنای چوب را کاهش داده است. پیرولیز به‌عنوان یکی از فرآیندهای ترموشیمیایی، یک روش نوین برای تولید سوخت و انرژی از بیومس به حساب می‌آید. برای جایگزینی سوخت تولیدی از این فرآیند با سوخت‌های فسیلی معمول، می‌بایست مزایای زیست‌محیطی و معایب مربوط به تولید سوخت از فرآیند پیرولیز در نظر گرفته شود [۴]. بیواویل نسبت به سوخت‌های جامد مزایای بیش‌تری

دارد و به‌عنوان سوخت مایع ارزان شناخته می‌شود [۵]، که امکان استفاده از آن برای تولید گرما یا استفاده در سیستم‌هایی نظیر توربین‌ها، کوره‌ها و غیره فراهم است. بیواویل به‌دست آمده از پیرولیز از ترکیبات اکسیژن‌دار قطبی نظیر کتون‌ها، آلدهیدها، فوران‌ها و شاخه‌های محلول و غیرمحلول و آب تشکیل شده است [۶ و ۷]. یکی از اصلی‌ترین معایب استفاده از بیواویل به‌عنوان سوخت، مقدار بالای رطوبت آن است که ناشی از رطوبت اولیه خوراک و آب تشکیل شده در حین واکنش‌های پیرولیز است. با استفاده از این سوخت در واحدهای تولید حرارت میزان انتشار CO_2 نسبت به نفت کوره تا ۸۰ درصد کاهش می‌یابد [۸].

فرآیند پیرولیز شامل حرارت‌دهی و تجزیه بیومس یا هر خوراک دیگر در فضای خالی از هوا و اکسیژن است. نرخ حرارت‌دهی در فرآیند براساس دمای فرآیند و زمان ماند بخارات در داخل راکتور تعریف می‌شود [۹]. در پیرولیز، مولکول‌های هیدروکربنی پیچیده و بزرگ بیومس شکسته شده و به مولکول‌های ساده‌تر و کوچک‌تر گاز، مایع و جامد تبدیل می‌شوند. این فرآیند نسبت به سایر فرآیندهای ترموشیمیایی در گستره دمایی پایین‌تری ($300-650^\circ C$) انجام می‌شود [۱۰]. بیومس مورد استفاده در راکتور پیرولیز که شامل ذرات جامد است، تحت حرارت قرار می‌گیرد تا به دمای لازم جهت شروع فرآیند تجزیه برسد. گازهای قابل کندانس و غیرقابل کندانس ناشی از تجزیه در داخل راکتور تولید می‌شوند. بقایای عمده جامد باقی‌مانده در راکتور به‌عنوان بیوچار شناخته می‌شود. در مواردی ذرات بسیار ریز چار همراه جریان گازی از راکتور خارج می‌شوند که با استفاده از سیکلون امکان جداسازی این ذرات نیز فراهم است. در نهایت، جریان گازی عبوری از سیکلون وارد کندانسور می‌شود تا گازهای قابل کندانس میعان یافته و محصول بیواویل مایع به دست می‌آید و گازهای غیرقابل کندانس محصول گازی را تشکیل می‌دهد [۱۱]. به‌منظور

مواد و روش‌ها

مدل‌سازی و شبیه‌سازی، استفاده از مدل‌ها یا ارائه منطقی یک سیستم، نهاد، پدیده یا فرآیندی برای توسعه داده‌ها به عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی یا فنی از طریق اجرای شبیه‌سازی است که شامل تجزیه و تحلیل، آزمایش و آموزش است. به همین ترتیب، مدل‌سازی و شبیه‌سازی می‌تواند درک رفتار سیستم بدون در نظر گرفتن آن در دنیای واقعی را آسان کند. برای شبیه‌سازی فرآیند، پیش‌نیازهای اولیه شامل خواص شیمیایی و فیزیکی مولکول‌های خالص و مخلوط‌ها، واکنش‌ها و مدل‌های ریاضی است که امکان محاسبه فرآیند در رایانه‌ها را فراهم می‌کند. هدف شبیه‌سازی فرآیند یافتن شرایط مطلوب برای یک فرآیند مورد بررسی است. بهینه‌سازی فرآیند براساس تکرار داده‌ها و بررسی هر کدام انجام می‌شود. در این مطالعه، یک مدل محاسباتی برای شبیه‌سازی فرآیند با استفاده از نرم افزار توسعه داده شده است. شبیه‌سازی یک فرآیند شیمیایی کل، شروع از مواد خام و رسیدن به محصول نهایی است که به صورت نمادین توسط آیکن‌های مختلف نشان داده می‌شود که هر آیکن برای عملیات خاصی در فرآیند استفاده می‌شود.

در این تحقیق، فرآیند پیرولیز در چهار مرحله اصلی توسعه داده شده است. در مرحله اول، میزان رطوبت خوراک مورد استفاده تا مقدار معین کاهش داده می‌شود (این میزان ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است). در مرحله دوم، بیومس به عناصر سازنده خود تجزیه می‌شود و در مرحله بعد اجزای فرار و غیرفرار بیومس جدا شده و از سیستم خارج می‌شوند. در مرحله نهایی که اصلی‌ترین مرحله این فرآیند به شمار می‌آید براساس رویکرد حداقل‌سازی انرژی آزاد گیبس، واکنش‌های پیرولیز مدل‌سازی می‌شوند.

- توسعه مدل

- مشخصات خوراک

ارزیابی عملکرد فرآیند پیرولیز در ابعاد صنعتی، وجود یک ابزار شبیه‌سازی ضروری است، چرا که داده‌های تجربی تنها برای ابعاد آزمایشگاهی در دسترس است که در این ابعاد هم، بررسی همه تغییرات مربوط به شرایط عملیاتی امکان‌پذیر نیست. از این رو، مدلی برای شبیه‌سازی فرآیند پیرولیز در نرم افزار Aspen Plus استفاده شده است که براساس آن می‌توان شرایط عملیاتی مختلف را بررسی کرد. با استفاده از نرم افزار Aspen Plus دانشمندان تحقیقات زیادی روی فرآیند پیرولیز انجام داده‌اند.

رینگر و همکاران [۱۲] یک مدل Aspen Plus توسعه دادند که با برقراری موازنه جرم و انرژی، زمینه را برای تجزیه و تحلیل فنی و اقتصادی فرآیند پیرولیز در ابعاد بزرگ را فراهم کرده است. ورودی‌های مربوط به مدل تقریباً براساس مفروضات مهندسی و داده‌های آزمایشگاهی بود.

جونز و همکاران [۱۳] طرحی را برای تولید بنزین و دیزل از بیومس و براساس فرآیند پیرولیز توسعه داده‌اند. موازنه جرم و انرژی با استفاده از یک طراحی فرآیند مفهومی به دست آمده از CHEMCAD انجام شد. ورودی‌های این مدل براساس داده‌های تحقیقات قبلی و بخشی از تجارب مراحل اولیه تجاری‌سازی بود.

هم‌چنین رایت و همکاران [۱۴] یک مدل Aspen Plus برای فرآیند پیرولیز توسعه دادند که برای شبیه‌سازی موازنه‌های انرژی و جرم از آن استفاده شده است.

استفاده از چوب برای تولید انرژی، علاوه بر موارد اقتصادی، می‌تواند مزایای اجتماعی و محیط‌زیستی داشته باشد [۱۵]. تحقیق در زمینه بازیابی انرژی از چوب، با مطالعه و توسعه مدل‌های محاسباتی (Aspen Plus) کمک می‌کند تا اطلاعات جدیدی در این موضوع به دست آید و باعث گسترش تکنولوژی‌های مورد استفاده در فرآیند شود و با بهینه‌سازی روند پیرولیز، تأثیر مثبتی بر کاهش میزان انتشار آلاینده‌های هوا داشته باشد.

۱ و ۲ آمده است. در این تحقیق، نمونه‌ها به صورت خشک در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- آنالیز ساختاری براساس خوراک‌های مختلف

نمونه	رطوبت	خاکستر	مواد فرار	کربن ثابت
کاج	۲۵	۰/۴	۶۵/۹	۳۳/۷
صنوبر	۲۳	۱/۹	۷۶/۶	۲۱/۳
اقاقیا	۲۰	۰/۵	۸۸/۳	۱۱/۲

جدول ۲- آنالیز عنصری براساس خوراک‌های مختلف

نمونه	کربن	هیدروژن	اکسیژن	نیتروژن
کاج	۴۷/۸۴	۶/۹۸۱	۴۲/۶۳۷	۰/۱۴۲
صنوبر	۴۵/۲۰۲	۶/۴۸۱	۴۷/۷۱	۰/۶۰۷
اقاقیا	۳۰/۰۸۳	۸/۶۷	۶۰/۲۲۶	۱/۰۲۱

- انتخاب روش ترمودینامیکی

به منظور دستیابی به نتایج دقیق و قابل قبول در مدل‌سازی فرآیند، باید از یک مدل ترمودینامیکی مناسب استفاده شود. به همین دلیل، انتخاب مدل یکی از مهم‌ترین موضوعات در این نوع تحقیقات است. مدل ترمودینامیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی، مجموعه‌ای از مفاهیم و روابط است که برای محاسبات مربوط به خواص ترمودینامیکی و انتقال و جریان‌های جرمی استفاده می‌شود. محصولات بخار از پیرولیز سلولز، همی سلولز و لیگنین در چوب به دست می‌آیند. این محصولات در دمای واکنش پیرولیز شکسته می‌شوند و بر مبنای مکانیسم‌های مختلف به صدها ترکیب متفاوت تبدیل می‌شود. تنوع محصولات تولید شده نشان از طیف گسترده از خواص ترمودینامیکی است که می‌تواند فرآیند را تحت تأثیر قرار دهد. براساس ویژگی‌های هر کدام از مدل‌های ترمودینامیکی موجود در نرم‌افزار Aspen Plus، مدل PR-BM برای شبیه‌سازی فرآیند انتخاب شده است. این مدل براساس رابطه پنگ-رابینسون به دست آمده است و برای فرآیندهای ترموشیمیایی کاربرد دارد.

براساس گروه‌بندی ترکیبات موجود در نرم‌افزار ASPEN PLUS، سه نوع از ترکیبات در این تحقیق مورد استفاده واقع شده است: متداول^۱، غیرمتداول^۲ و جامدات^۳.

ترکیبات متداول، ترکیباتی هستند که در مرکز داده نرم‌افزار تعریف شده‌اند و اطلاعات لازم شامل خواص ترمودینامیکی و انتقال برای انجام محاسبات مربوط به خواص فیزیکی و تعادل فازی در روش‌های انتخاب شده، فراهم است. هم-چنین می‌توان سایر اطلاعات را از طریق منابع خارجی وارد نرم‌افزار کرد. ترکیبات غیرمتداول جز ترکیبات شیمیایی به حساب نمی‌آیند و امکان دسته‌بندی آن‌ها براساس فرمول مولکولی وجود ندارد. در مقابل، این ترکیبات به وسیله علائم تجربی، ترکیب عنصری خود را نمایش می‌دهند.

این ترکیبات خواص ترمودینامیکی و انتقال مرتبطی ندارند و از این رو در هیچ کدام از محاسبات مربوط به تعادلات شیمیایی یا فازی شرکت نمی‌کنند. آنتالپی و دانسیته تنها خواصی هستند که در مورد ترکیبات غیرمتداول مطرح می‌گردد و از طریق روابط تجربی محاسبه می‌شوند.

جامدات به دو دسته متداول و غیرمتداول تقسیم می‌شوند. جامدات قراردادی، ترکیبات خالصی هستند که در واکنش‌های تعادلی شرکت می‌کنند اما جامدات بی‌اثر شامل ترکیبات متداول می‌شوند که در فاز جامد ظاهر می‌شوند. این ترکیبات در تعادلات فازی شرکت نمی‌کنند ولی در تعادلات شیمیایی می‌توانند شرکت کنند. جامدات غیر قراردادی ترکیبات غیرهمگنی هستند که به هر تعادلی وارد می‌شوند اما امکان نمایش آن‌ها با یک ساختار مولکولی وجود ندارد. چوب در این شبیه‌سازی به عنوان ترکیب جامد غیرمتداول مدل‌سازی می‌شود [۱۶].

خوراک مورد استفاده در این شبیه‌سازی کاج، صنوبر و اقاقیا است که به صورت جامد غیرمتداول تعریف می‌شود. داده‌های مربوط به آنالیزهای عنصری و ساختاری در جداول

¹ Conventional

² Non-conventional

³ Solids

- تجهیزات عملیاتی

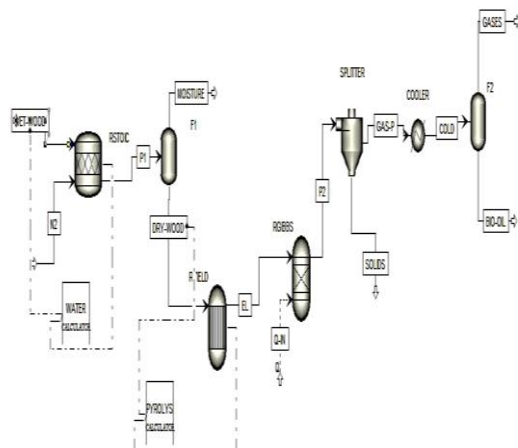
نرم افزار یک راه‌حل جامع برای مهندسی فرآیند به حساب می‌آید که شامل بخش‌های مختلف عملیاتی و تجهیزات برای شبیه‌سازی فرآیندها با امکان ترکیب مواردی همچون راکتورها، سیکلون‌ها، هیترها و غیره برای ایجاد ساختار فرآیند است. با استفاده از این نرم افزار امکان شبیه‌سازی فرآیند پیرولیز، بررسی شرایط عملیاتی مختلف و میزان تولید محصولات بیواویل، چار و گاز فراهم است. برای توسعه مدل مدنظر در نرم‌افزار مراحل زیر انجام شده است: (۱) تعریف مراحل فرآیند (۲) انتخاب تجهیزات مناسب با فرآیند (۳) تشکیل فلو شیت با جایگذاری مناسب تجهیزات (انتخاب شده ۴) تعیین مقادیر پارامترهای مورد استفاده (۵) اجرای شبیه‌سازی. تجهیزات به کار رفته برای شبیه‌سازی و توضیحات مربوط به آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. در محیط نرم‌افزار برای فرآیند پیرولیز به صورت اختصاصی راکتوری در نظر گرفته نشده است اما امکان استفاده از دو نوع راکتور براساس شرایط عملیاتی خاص وجود دارد.

جدول ۳- تجهیزات مورد استفاده در شبیه‌سازی

نوع تجهیزات	توضیحات
RSTOIC	راکتور مورد استفاده برای کاهش رطوبت خوراک اولیه
RYIELD	راکتور مورد استفاده برای تبدیل خوراک به عناصر سازنده
RGIBBS	راکتور اصلی فرآیند پیرولیز
CYCLONE	ابزار مورد استفاده برای جداسازی ذرات ریز جامد از جریان گازی
SPLITTER	ابزار مورد استفاده برای جداسازی جریان‌ها
HEATER	ابزار مورد استفاده برای کاهش دمای جریان نهایی
FLASH2	ابزار مورد استفاده برای جداسازی جریان بیواویل و گاز

براساس اطلاعات به‌دست آمده از نرم‌افزار، برای سیستم‌هایی که استوکیومتری و مکانیسم انجام واکنش در

آن‌ها مشخص نباشد و در عین حال از مواد جامد استفاده شده باشد، بهترین نوع راکتور، مدل‌های RYIELD و RGIBBS است که براساس شرایط می‌توان از هر کدام بهره برد [۱۷]. ساختار فرآیند شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Aspen Plus در شکل ۱ نشان داده شده است. تعریف خواص جریانات ورودی و خروجی مهم‌ترین قسمت شبیه‌سازی است و با وجود مقادیر مربوط به پارامترهای مطرح شده، امکان اجرای شبیه‌سازی وجود خواهد داشت. برای توصیف مکانیسم‌های موجود در فرآیند از کدهای FORTRAN خارجی در شبیه‌سازی استفاده شده است.

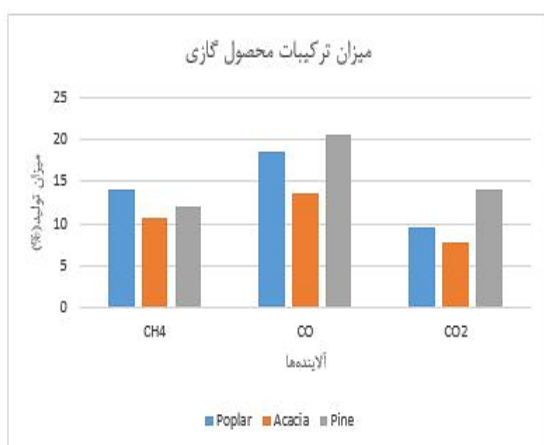


شکل ۱: ساختار فرآیند شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Aspen Plus

- مشخصات محصول

آنالیز توزین حرارتی (TGA). برای اندازه‌گیری میزان فراریت نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. منحنی‌های کاهش وزن و مشتق توزین حرارتی (DTG) با استفاده از دستگاه آنالیز TGA Henven HCT-1 اندازه‌گیری شد. در این سیستم، نمونه‌ها ابتدا تا دمای ۱۰۵°C حرارت‌دهی می‌شوند و برای حذف رطوبت فیزیکی اولیه خوراک به مدت ۲۰ دقیقه در این حالت حفظ می‌شوند. در نهایت دمای نمونه‌ها تا ۵۰۰°C و با نرخ ۲۰ °C/min⁻¹ افزایش می‌یابد.

- آنالیز عنصری



شکل ۳: میزان تولید ترکیبات موجود در ترکیبات گازی

هدف اصلی در این تحقیق، بررسی آلاینده‌های هوای مرتبط با فرآیند پیرولیز در صورت اجرا در ابعاد صنعتی است که براساس نوع ترکیبات به دست آمده در محصول گازی و مقادیر هر کدام، تصمیم نهایی برای انتخاب خوراک گرفته می‌شد. همان‌طور که اشاره شد، بیش‌ترین میزان تولید محصول گازی مربوط به نمونه کاج است و در عین حال می‌توان با استفاده از شکل ۳، مقادیر ترکیباتی که بیشترین تأثیر را در آلودگی هوا و پدیده گرمایش زمین را به دست آورد.

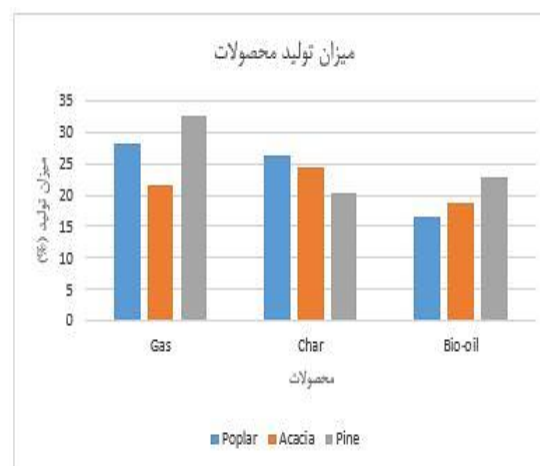
– تأثیر میزان رطوبت

یکی از عوامل مؤثر در کیفیت بیوویل تولید شده، میزان رطوبت نهایی موجود در ترکیب آن است. رطوبت می‌تواند مزایا و معایبی را به دنبال داشته باشد، از این رو برای رسیدن به بالاترین کیفیت بیوویل باید میزان رطوبت در آن بهینه باشد. میزان رطوبت نهایی وابسته به دو عامل کلی است. (۱) میزان رطوبت اولیه خوراک مورد استفاده. (۲) میزان آب تولیدی در حین واکنش‌های پیرولیز. اصلی‌ترین تأثیر منفی رطوبت بالا در بیوویل می‌تواند کاهش ارزش حرارتی مربوط به محصول باشد. براساس نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، بیش‌ترین میزان رطوبت در بیوویل مربوط به نمونه آفاقا است.

از دستگاه EuroEA3000-Single برای تعیین مقادیر عناصر سازنده نمونه‌های چوب در فرآیند استفاده شد. نمونه‌ها در دمای ۹۵۰°C و در داخل لوله احتراق سوزانده شدند. از هلیوم به عنوان گاز حامل در این سیستم استفاده شد که به لوله‌های جذب مختلف دمیده می‌شد. مقادیر عناصر با استفاده از حسگر TCD شناسایی شد.

یافته‌ها و بحث

شبیه‌سازی فرآیند پیرولیز با استفاده از نرم‌افزار انجام شد که برای پیش‌بینی موارد مختلف مربوط به فرآیند استفاده می‌شد. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی و براساس میزان تولید محصولات، می‌توان بهترین نوع خوراک برای از میان سه نمونه بررسی شده را انتخاب کرد. در شکل ۲، مقادیر گاز، چار و بیوویل براساس گونه‌های مختلف چوب نشان داده شده است. نمونه چوبی کاج بیش‌ترین میزان تولید محصول گازی را نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. و در عین حال میزان تولید بیوویل در نمونه کاج نسبت به دو نمونه دیگر بالاتر است که نشان از عملکرد بهتر سیستم با استفاده از این خوراک در تولید محصول اصلی فرآیند یعنی بیوویل دارد.

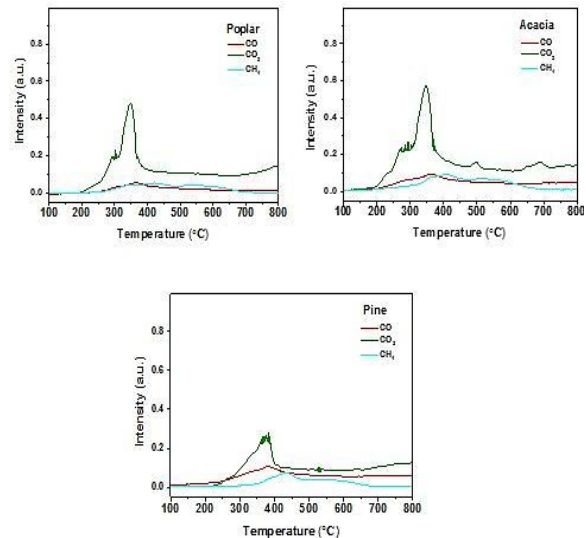


شکل ۲: میزان تولید محصولات برای گونه‌های مختلف خوراک

زمان ماند و فشار همه جز عواملی هستند که می‌توانند میزان و نوع محصولات و مشخصات فیزیکی آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهند. در این تحقیق، مدلی برای فرآیند پیرولیز در نظر گرفته شد و پس از شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Aspen Plus و اجرای آن، عملکرد آن براساس شرایط عملیاتی مختلف و خوراک‌های متفاوت بررسی گردید. براساس نتایج ارائه شده در قالب نمودارها، نمونه چوبی کاج بیشترین میزان تولید بیواویل را نسبت به دو نمونه دیگر دارد و در عین حال محصول گازی بیش‌تری هم تولید می‌کند. از آن-جایی که هدف اصلی این تحقیق، بررسی جوانب محیط‌زیستی فرآیند پیرولیز است، پس باید نمونه چوبی به-عنوان خوراک مناسب انتخاب شود که کربن‌دی‌اکسید کم-تری نسبت به بقیه داشته باشد و آلودگی هوایی و گرمایش جهانی کم‌تری را ایجاد کند. علیرغم کاهش انتشار آلاینده‌های هوایی و استفاده از منبع تجدیدپذیر بیومس به-عنوان خوراک که نسبت به سایر منابع اصلی نفت، گاز طبیعی و زغال‌سنگ، ارزان‌تر و در دسترس‌تر هست اما متأسفانه به دلیل ویسکوزیته و خوردندگی بالا، ارزش حرارتی پایین و غیره، بیواویل استانداردهای تجاری لازم برای استفاده به‌عنوان سوخت را ندارد.

منابع

- [1] Zhang, O.; Chang, J.; Wang, T.; Xu, Y., 2007, Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. *Energy Convers. Manag.* 48, 87-92.
- [2] Lindman, E. K. and Hagerstedt, L. E., 1999, Pyrolysis oil as a clean city fuel. In: *Power production from biomass Gasification and pyrolysis, R&D&D for industry*. Eds; Sipilä, K., Korhonen, M. VTT Symposium, 192.
- [3] Berndes, G.; Hoogwijk, M.; Broek, R.V., 2003, The contribution of biomass in the future global energy supply: A review of 17 studies. *Biomass Bioenergy*, 25, 1-28.
- [4] Gaijing, Z.; Weiding, L., 2010, A key review on energy analysis and assessment of biomass resources for a sustainable future. *Energy Policy*, 38, 2948-2955.
- [5] McKeough, P.; Nissila, M.; Solantausta, Y.; Beckman, D. and Ostman, A., 1985, Techno-economic assessment of direct biomass liquefaction processes. VTT Technical Research Centre of Finland, report no. 337. ISBN: 951-38-2215-X.
- [6] Scott, D.S; Piskorz, J. and Radlein, D., 1985, Liquid products from the continuous flash pyrolysis of biomass. *Ing. Eng. Chem., Process Des. Dev.*, 24, 581 - 588.
- [7] Oasmaa, A.; Kuoppala, E. and Solantausta, Y., 2003, Fast pyrolysis of forestry residue. 2. Physicochemical Composition of product liquid. *Energy & Fuels*, 17, 433 - 443.



شکل ۴: شدت تولید ترکیبات CO، CO₂، CH₄ براساس تغییرات دما

- تأثیر دما

در فرآیند پیرولیز، ذرات بیومس با نرخ حرارتی معین، حرارت‌دهی می‌شوند. دمای پیرولیز هر دو مورد ترکیب محصولات و شدت تولید آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در شکل ۴، میزان تولید ترکیبات CO، CO₂، CH₄ براساس دماهای مختلف نشان داده شده است. براساس نمودارها می‌توان مشاهده کرد که بیش‌ترین میزان تولید در گستره دمایی ۳۰۰-۴۵۰°C است.

- تأثیر توزیع اندازه ذرات خوراک

ترکیب، اندازه، شکل و ساختار فیزیکی ذرات بیومس مورد استفاده می‌تواند روی محصولات تولید شده در فرآیند مؤثر باشد. ذرات با اندازه ریزتر در مقابل خروج مواد فرار مقاومت کم‌تری نشان می‌دهد و مسلماً منجر به تولید بیش‌تر بیواویل خواهد شد. در مقابل ذرات بزرگ‌تر، مقاومت بیش‌تری در برابر انتقال حرارت و خروج مواد فرار نشان می‌دهد و میزان تولید بیواویل را کاهش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

براساس مطالعات می‌توان گفت که نوع خوراک، اندازه ذرات خوراک، میزان رطوبت خوراک، نرخ حرارت‌دهی،

- [8] Sorsa, R. Soimakallio, S., 2013, Does bio-oil derived from logging residues in Finland meet the European Union greenhouse gas performance criteria Energy Policy, 53, 257 – 266.
- [9] Dieterich M, Van de Beld B, V.Bridgwater A, C.Elliott D, Oasmaa A, Preto F., 2013, State-of-the-art of fast pyrolysis in IEA bioenergy member countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20, 619-641.
- [10] Czernik S, V. Bridgwater A., 2003, Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil. Energy and Fuels, 18, 590-598.
- [11] Bridgwater, A. V.; Peacocoke, G. V. C., 1999, Fast Pyrolysis Processes for Biomass. Sustainable and Renewable Energy Reviews, 4(1), 1-73.
- [12] Ringer, M.; Putsche, V. and Scahill, J., 2006, Large-scale pyrolysis oil production: A technology assessment and economic analysis. NREL Technical report TP-510-37779.
- [13] Jones, S.B.; Valkenburg, C.; Walton, C.W.; Elliott, D.C.; Holladay, J.E.; Stevens, D.J.; Kinchin, C. and Czernik, S., 2009, Production of gasoline and diesel from biomass via fast pyrolysis, hydrotreating and hydrocracking: A design case. Pacific Northwest national laboratory/U.S. Department of Energy.
- [14] Wright, M.M.; Satrio, J.A.; Brown, R.C.; Daugaard, D.E. and Hsu, D.D., 2010, Techno-economic analysis of biomass fast pyrolysis to transportation fuels. NREL Technical report NREL/TP-6A20-46586.
- [15] Kabir, M.J.; Rasul, M.G.; Ashwath, N.; Chowdhury, A.A., 2012, Environmental impacts of green wastes to energy conversion through pyrolysis process: An overview. In Proceedings of the 5th BSME International Conference on Thermal Engineering, Dhaka, Bangladesh, 21–23.
- [16] Aspen Plus 10.2 user manuals, Cambridge, MA, February 2000.
- [17] At Naw S.M., Sulaiman S.A., Yusup S. A., 2011, simulation study of downdraft gasification of oil-palm fronds using ASPEN PLUS, Journal of Applied Sciences, 11, 1913-1920.
- [18] Garcia-Perez M., Wang X.S., Shen J., Rhodes M.J., Tian F.J., Lee W.J., Wu H., Li C. Z., 2008, Fast pyrolysis of oil mallee woody biomass: Effect of temperature on the yield and quality of pyrolysis products. Industrial & Engineering Chemistry Research, 47, 1846-1854.
- [19] Garcia-Perez M., Chala A., Pakdel H., Kretschmer D., 2007, Roy C. Characterization of bio-oils in chemical families. Biomass & Bioenergy, 31, 222-242.
- [20] Garcia-Perez M., Wang S., Shen J., Rhodes M., Lee W.J., Li C. Z., 2008, Effects of temperature on the formation of lignin-derived oligomers during the fast pyrolysis of mallee woody biomass. Energy & Fuels, 22, 2022-2032.
- [21] MD Mahmudul H, Xiao S. W., Daniel M, Richard G, Chunlong Y, Xun H, Sri K, Mortaza G, Hongwei W, Bin L, Lei Z, Chun-Zhu L., 2017, Grinding pyrolysis of Mallee wood: Effects of pyrolysis conditions on the yields of bio-oil and biochar. Fuel Processing Technology, 167, 215–220.