

شبیه‌سازی فرایند گازی‌سازی پلاسمایی زیست‌توده با استفاده از نرم‌افزار اسپن‌پلاس

آرمین اوکاتی، محمدرضا خانی*، بابک شگری

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران

چکیده: فناوری پلاسما یکی از نوظهورترین روش‌های استفاده شده برای تولید انرژی و امحاء پسماند است. اضافه شدن فناوری پلاسما به گازی‌سازی روش نوینی برای مدیریت پسماندها به وجود آورده است. اما فرایند گازی‌سازی پلاسمایی یکی از فرایندهای ترموشیمیایی پیچیده‌ای است که واکنش‌های زیادی به طور هم‌زمان در آن اتفاق می‌افتند به همین سبب مطالعه نظریه این فرایند بسیار دشوار است اما داشتن نتیجه‌های تقریبی و شبیه‌سازی شده پیش از راه‌اندازی و اجرای سامانه مناسب این فرایند برای پسماند زیست‌توده بسیار ضروری است؛ تا از هزینه‌های اجرا و زمان بکاهد. برای مطالعه این فرایند پیچیده مدلی بر اساس کمینه سازی انرژی آزاد گیبس در محیط نرم‌افزار اسپن پلاس توسعه داده شده است. مدل ایجاد شده با نتیجه‌های گزارش شده در منابع علمی مورد ارزیابی قرار گرفت که اعتبار لازم را برای بررسی پارامترهای اجرایی مهم مانند دما، نسبت هم‌آرزی و نسبت بخار بر اجزای سین گاز کسب کرد. بیشترین مقدار تولید هیدروژن برای بخار به عنوان عامل گازی‌ساز و در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس به دست آمد و همچنین نسبت هم‌آرزی بیشترین اثر را در مقدار ارزش گرمای گاز از خود نشان داد.

واژگان کلیدی: پلاسما؛ گازی‌سازی؛ امحاء پسماند؛ اسپن پلاس؛ شبیه‌سازی.

KEYWORDS: Plasma; Gasification; Waste treatment; Aspen Plus; Simulation.

مقدمه

به استفاده از این انرژی‌های پاک تمایل پیدا کرده‌اند. فناوری گازی‌سازی پلاسمایی یکی از نوین‌ترین و خلاقانه‌ترین روش‌ها می‌باشد که امیدهای زیادی در رابطه با تولید انرژی و امحاء پسماندها برانگیخته است. گازی‌سازی، روشی ترموشیمیایی شناخته شده‌ای برای تبدیل زیست‌توده به فراورده گازی (سین‌گاز^۱) قابل احتراق است [۴،۳]. اضافه شدن فناوری پلاسما به فرایند گازی‌سازی ویژگی‌های یگانه‌ای را به این فرایند بخشیده است، دمای بسیار بالای ایجاد شده و ذره‌های باردار تولید شده باعث شده

در جهان امروز پیدا کردن منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر و روش‌های نوین تولید این انرژی ذهن‌های زیادی را به خود مشغول کرده است [۱]. پس از توافق‌نامه کنفرانس تغییرهای اقلیمی پاریس در سال ۲۰۱۵ میلادی که هدف‌های نوینی را برای انتشار کربن دی‌اکسید و سایر گازهای آلاینده ایجاد کرد، دغدغه‌های نوینی در ایران و بسیاری از کشورها برای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر ایجاد شده است [۲]. به همین منظور مطالعه‌های بسیاری برای تولید انرژی تجدیدپذیر و پاک در حال انجام است و بسیاری از کشورها

* عهده‌دار مکاتبات

+Email: m_khani@sbu.ac.ir

(۱) Syngas

جدول ۱ - واکنش‌های عمده فرایند گازی سازی

شماره واکنش	واکنش	فرایند	ΔH_{298}^0 (MJ/Kmol)
(۱)	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO_2 + 3H_2$	اکسایش جزئی	-۱۱۱
(۲)	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	واکنش بودوارد	+۱۷۲
(۳)	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	اصلاح بخار	+۱۳۱
(۴)	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	تشکیل متان	-۷۴
(۵)	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow H_2O$	سوختن هیدروژن	-۴۸۴
(۶)	$CO + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow CO_2$	سوختن CO	-۲۸۴
(۷)	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	شیفت آب و گاز	-۴۲
(۸)	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO_2 + 3H_2$	اصلاح بخار و متان	+۲۰۶
(۹)	$S + H_2 \leftrightarrow H_2S$	تشکیل H_2S	-

مسئله^۹ و همکاران، محاسبه‌های ترمودینامیکی را برای فرایند گازی سازی پلاسمایی پسماندهای کربنی در جو هوا و بخار انجام داده‌اند. آن‌ها بیش‌ترین بازده برای گاز سنتزی را در این فرایند برای دمای ۱۶۰۰ کلوین پیش‌بینی کرده‌اند [۱۳]. اما برای پسماندهای خاص مطالعه‌های به نسبت کم‌تری موجود است، برای نمونه اوکاتی^{۱۰} و همکاران، پسماند پلی کلرات بی فنیل را به کمک نرم افزار اسپن پلاس مطالعه کرده‌اند و مدلی برای ارزیابی نقطه‌های مناسب برای پارامترهای اجرایی ارائه داده‌اند [۱۴]. اما همچنان برای ایجاد مطالعه بهتر نیازمند مدلی با میزان دقت و اعتبار مناسب‌تری می‌باشد که بتواند شرایط بهینه برای انجام این فرایند را برای پسماند گوناگون بررسی کند.

در این مطالعه سعی شده است مدل عددی کارآمدی برای شبیه‌سازی فرایند گازی سازی پلاسمایی ایجاد شود. که پس از کسب اعتبار مناسب و مقایسه با نتیجه‌های گزارش شده در منابع علمی برای بررسی تأثیر پارامترهای اجرایی مهم مانند دما، نسبت هم‌ارزی و نسبت بخار بر ترکیب سین‌گاز و ارزش گرمایی گاز مورد استفاده قرار گیرد. مدل ایجاد شده بر اساس تعادل ترمودینامیکی است و از اصل کمینه سازی انرژی آزاد گیبس بهره می‌گیرد. این مدل قابلیت استفاده برای بازه گسترده‌ای از پسماندها را دارد. واکنش‌های عمده در فرایند گازی سازی را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد [۱۵].

است که فرایند گازی سازی پلاسمایی برای بسیاری از پسماندها حتی خطرناک و صنعتی به کار برده شود [۵]. منابع تجدیدپذیر انرژی بسیاری در جهان از جمله خورشیدی، بادی، آبی و زیست‌توده وجود دارد در میان این منابع زیست‌توده تنها منبعی است که در سراسر جهان وجود دارد افزون بر این تنها منبعی است که هم می‌تواند برای تولید انرژی و هم فرآورده‌ای شیمیایی به کار رود [۶]. انواع گوناگونی از سوخت‌های زیست‌توده مانند چوب، کاغذ، خاک اره و پسماند جامد شهری در فرایند گازی سازی برای تولید سین‌گاز که عمدتاً شامل کربن مونواکسید، هیدروژن، کربن دی‌اکسید، بخار آب و متان است به کار گرفته شده‌اند [۷].

روش‌های زیادی برای شبیه‌سازی فرایند گازی سازی به کار رفته است در بین این روش‌ها اسپن پلاس، دینامیک محاسبه‌های سیال^۱ (CFD)، تعادل ترمودینامیکی، سینتیک و شبکه عصبی مصنوعی^۲ (ANN) را نام برد [۹،۸]. اسپن پلاس نرم‌افزار شبیه‌سازی فرایندی است که استفاده از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی مواد را به سبب پایگاه داده قوی که در آن وجود دارد تسهیل کرده است. در سال‌های اخیر استفاده از اسپن پلاس در پژوهش‌ها شتاب زیادی گرفته است. برای نمونه این نرم‌افزار در فرایندهایی مانند سنتز متانول، فرایند مایع‌سازی غیرمستقیم زغال‌سنگ، نیروگاه گازی سازی چرخه ترکیبی یکپارچه زغال‌سنگ^۳ (IGCC)، گازی‌سازهای جوی بستر سیال، فرایند گازی سازی زغال‌سنگ و غیره استفاده شده است [۱۰].

مازونی^۴ و همکاران، دو مدل در اسپن پلاس برای مقایسه فرایند گازی سازی ترکیبی پلاسما و پایین سو را برای پسماند جامد شهری^۵ (MSW) و پسماند هیدروکربنی پالایشگاهی^۶ (PHW) ایجاد کرده‌اند. آن‌ها گزارش دادند که پارامترهایی مانند بهره‌برداری گازی سازی^۷ (CGE) کسر مولی سین‌گاز و ارزش گرمایی آن در فناوری پلاسما نتیجه بهتری به ارمغان آورده‌اند [۱۱].

فاواس^۸ و همکاران، مدلی فرایندی برای شبیه‌سازی گازی سازی پلاسمای زیست‌توده توسعه داده‌اند و از نرم‌افزار اسپن پلاس برای اجرای آن کمک گرفته‌اند و تأثیر پارامترهای مهم را بر تولید هیدروژن و ترکیب سین‌گاز ارزیابی کرده‌اند. آن‌ها گزارش کردند که دمای کم برای تولید هیدروژن مناسب‌تر است و با افزایش نسبت هم‌ارزی مقدار هیدروژن کم‌تر می‌شود [۱۲].

(۱) Computational Fluid Dynamic

(۳) Integrated Coal Gasification Combined Cycle

(۵) Municipal Solid Waste

(۷) Cold Gasification Efficiency

(۹) Messerle

(۲) Artificial Neural Network

(۴) Mazzone

(۶) Petroleum Hydrocarbon Waste

(۸) Favas

(۱۰) Okati

اصول نظری

محاسبه‌های ترمودینامیکی

این مدل بر این اساس است که واکنش‌ها در تعادل ترمودینامیکی کمینه مقدار انرژی گیبس را دارند، بنابراین نخست باید مقدار انرژی گیبس سامانه (G^t) به دست آید که از فرمول زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$G^t = \sum_{i=1}^N n_i \mu_i \quad (1)$$

که در آن N تعداد کل گونه‌های موجود n_i تعداد مول گونه‌ها و μ_i پتانسیل شیمیایی گونه i هستند. با فرض ایده‌آل بودن گازهای تولیدی پتانسیل شیمیایی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_i = G_i^0 + RT \ln(f_i/f_i^0) \quad (2)$$

R و T ثابت جهانی گازها و دما هستند، f_i فوگاسیتی گونه‌ی i ، G_i^0 انرژی آزاد گیبس استاندارد و f_i^0 فوگاسیتی استاندارد گونه i است. اگر فشار یک اتمسفر باشد:

$$\mu_i = \Delta G_{f,i}^0 + RT \ln(y_i) \quad (3)$$

که y_i کسر مولی گاز گونه i و $\Delta G_{f,i}^0$ انرژی آزاد گیبس تشکیل برای گونه i است. انرژی آزاد گیبس تشکیل گونه را هم می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

$$\Delta G_{f,i}^0 = \Delta H_{f,i}^0 - T \Delta S_{f,i}^0 \quad (4)$$

$\Delta H_{f,i}^0$ آنتالپی استاندارد و $\Delta S_{f,i}^0$ آنتروپی استاندارد هستند، که می‌توان آن‌ها را به صورت توابعی از دما به دست آورد:

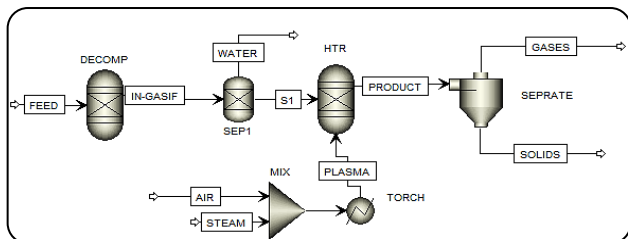
$$\frac{H_{f,i}^0}{RT} = a_1 + a_2 \frac{T}{2} + a_3 \frac{T^2}{3} + a_4 \frac{T^3}{4} + a_5 \frac{T^4}{5} + \frac{b_1}{T} \quad (5)$$

$$\frac{S_{f,i}^0}{R} = a_1 \ln(T) + a_2 T + a_3 \frac{T^2}{2} + a_4 \frac{T^3}{3} + a_5 \frac{T^4}{4} + b_2 \quad (6)$$

که همه ثابت‌ها در پایگاه داده نرم افزار وجود دارند. با جای گذاری معادله‌های (۵) و (۶) در (۳) و (۴) و اعمال روش ضریب‌های لاگرانژ، می‌توان n_i هایی را یافت که در آن انرژی آزاد گیبس کمینه می‌شوند:

$$\frac{dL}{dn_i} = \Delta G_{f,i}^0 + n_i RT \ln\left(\frac{n_i}{n_{tot}}\right) + \sum_{j=1}^k \lambda_j a_{ij} = 0 \quad (7)$$

L و λ_j به ترتیب تابع و ضریب لاگرانژ هستند. a_{ij} تعداد اتم‌ها در عنصر j در یک مول گونه i است. با استفاده از فرمول بالا و معادله‌هایی که بر مبنای پایستگی جرم و انرژی به دست می‌آید،



شکل ۱ - برگه جریان ایجاد شده در نرم‌افزار اسپن پلاس

دستگاه معادله به دست می‌آید، که با حل این دستگاه معادله می‌توان ساختار سین گاز را به دست آورد [۱۷].

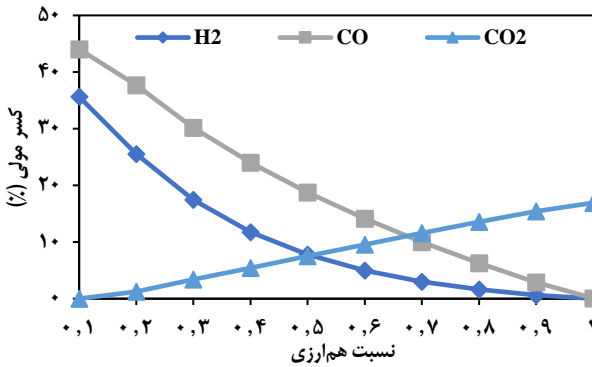
توسعه مدل

برای مدل‌سازی فرایند گازی‌سازی پلاسمایی، مدلی توسعه داده شده که از شبیه‌ساز فرایند اسپن پلاس و در تلاش برای ارزیابی پارامترهای عمده آن استفاده شده است. در این مدل رویکردی تعادلی به کار گرفته شده که پیچیدگی‌های هیدروپلاسمایی راکتور را در نظر نمی‌گیرد. فلوچارت^۱ مدل را می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد. این شبیه‌سازی بر پایه پایستگی جرم و انرژی است و تعادل شیمیایی در کل فرایند در نظر گرفته شده است. در این نرم‌افزار چندین پایگاه داده وجود دارد که داده‌های ترمودینامیکی، شیمیایی و فیزیکی بسیاری از ترکیب‌های شیمیایی را در خود جای داده است. همچنین می‌توان مدل‌های ترمودینامیک مناسب برای شبیه‌سازی سامانه شیمیایی را هم از میان چندین مدل انتخاب کرد [۱۸].

پسماندها به صورت مواد غیرمتداول در سامانه تعریف شده‌اند و از مدل‌های HCOALGEN و DECOULGIT برای پیش‌بینی گرمای سوختن آن‌ها کمک گرفته شده است. پسماندها نخست وارد قسمتی می‌شوند که فرایند پیرولیز^۲ توسط پودمان RYIELD انجام می‌شود و پسماندها به اجزای سازندشان تجزیه می‌شوند. رطوبت موجود در ترکیب توسط بلاک SEP1 (SEP) از پسماند جدا می‌شود. پس از تجزیه اجزای پسماند که بر اساس آنالیز آلتیمیت مشخص می‌شوند و حذف رطوبت اجزاء پسماند، وارد راکتور HTR می‌شوند که فرایند گازی‌سازی پلاسمای در آن شبیه‌سازی می‌شود. اکسند که هوا یا بخار است نخست وارد تبادل گر دما (TORCH) می‌شوند که دمای آن‌ها را به دمای مورد نظر در پلاسمای ۴۰۰۰ درجه سلسیوس می‌رساند و سپس وارد راکتور RGIBBS (HTR) می‌شوند و با اجزای پسماند پس از پیرولیز واکنش می‌دهند و فرآورده‌های گازی و جامد تولید می‌شوند. پودمان RGIBBS ساختار

(۱) Flowchart

(۲) Pyrolysis



شکل ۳ - تأثیر نسبت هم‌ارزی بر درصد مولی اجزاء سین گاز در محیط هوا

نتیجه‌ها و بحث

تأثیر نسبت هم‌ارزی

نسبت هم‌ارزی^۴ (ER) پارامتر بسیار مهمی است، که در واقع میزان ورود اکسیژن به سامانه را مشخص می‌سازد و به صورت نسبت شار اکسید به نسبت شار پسماند که بر نسبت استوکیومتری اکسید و پسماند تقسیم شده است، تعریف می‌شود که در تعیین ساختار سین گاز نقش تعیین کننده‌ای دارد، در فرمول زیر می‌توان روش محاسبه آن را مشاهده کرد [۲۱]:

$$ER = \frac{\left(\frac{\text{اکسیژن}}{\text{سوخت}}\right)}{\left(\frac{\text{اکسیژن}}{\text{استوکیومتری سوخت}}\right)} \quad (۸)$$

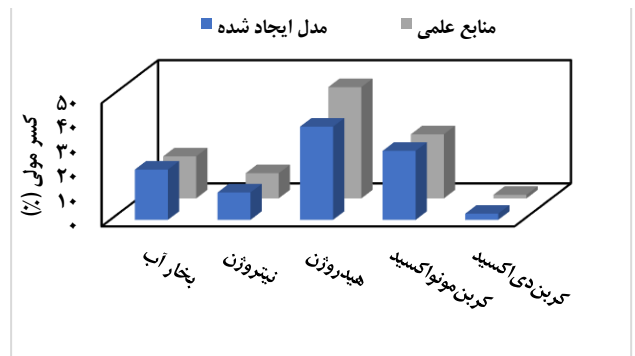
برای بررسی تأثیر این پارامتر بر فرایند گازی‌سازی پلاسمایی بازه مقدار نسبت هم‌ارزی از ۰/۱ تا ۱ است و دمای گازی‌ساز ۱۵۰۰ درجه سلسیوس و نرخ شار پسماند ۱۰ کیلوگرم بر ساعت در نظر گرفته شده است. نتیجه‌های به‌دست آمده از این ارزیابی در شکل ۳ قابل دیدن است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش ER مقدار هیدروژن و کربن مونواکسید کاهش می‌یابند و بر مقدار کربن دی‌اکسید افزوده می‌شود که نتیجه افزایش واکنش‌های سوختن در سامانه است در واقع با افزایش ER واکنش از گازی‌سازی به سمت سوختن کامل حرکت می‌کند.

تأثیر دمای گازی‌ساز

دما یکی از مهم‌ترین پارامترهای اجرایی است که بر واکنش‌ها و در نتیجه ساختار سین گاز تأثیر دارد. در گازی‌سازی‌های معمولی

جدول ۲ - آنالیز آلتیمیت^۱ و پروکسیمیت^۲ زیست توده مورد مطالعه [۱۷]

آنالیز آلتیمیت WT.%		آنالیز پروکسیمیت WT.%	
C	۴۶/۵	فرار	۹/۶
H	۵/۸	کربن ثابت	۱۴/۳
N	۰/۲	رطوبت	۲۱/۷
O	۴۳/۵	خاکستر	۳/۹
S	۰/۱		



شکل ۲ - مقایسه نتیجه‌های مدل ایجاد شده با نتیجه‌های موجود در منابع علمی

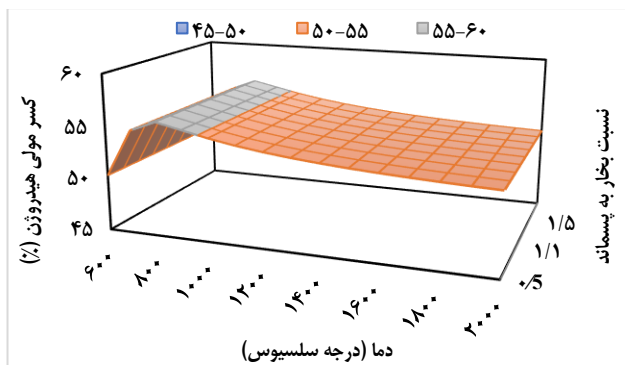
تعادلی سین گاز تولید شده را در دما و فشار مشخص محاسبه می‌کند. جدایی سین گاز از اسلگ با استفاده از پودمان SSPLIT (SEP2) شبیه‌سازی شده است که می‌تواند مواد جامد را به طور کامل از مواد گازی جدا کند. در جدول ۲ می‌توان ساختار پسماند استفاده شده در این مطالعه را مشاهده کرد [۱۹].

اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی مدل از داده‌های موجود در منابع علمی استفاده شده است. که تاواریس^۳ و همکاران [۲۰]، مطالعه کرده‌اند. در این مقایسه پسماند جامد شهری در دمای ۲۵۰۰ درجه سلسیوس پردازش شده است. ورودی پسماند ۱ و شار هوا ۰/۳۶ کیلوگرم بر ثانیه قرار داده شده‌اند. شکل ۲ مقایسه بین داده‌های مدل و داده‌های موجود در منابع علمی را نمایش می‌دهد. محور عمود درصد کسر مولی اجزای تشکیل دهنده سین گاز را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۲ می‌توان مشاهده کرد، کسر مولی گازهای تشکیل دهنده سین گاز (هیدروژن، کربن مونواکسید، متان) در توافق بسیار خوبی با داده‌های موجود در منابع علمی است. تفاوت‌های اندک می‌توانند به دلیل اتخاذ فرض‌های متفاوت در مدل باشند.

(۱) Ultimate
(۳) Tavares

(۲) Proximate
(۴) Equivalence Ratio



شکل ۶ - تأثیر دما و نسبت بخار به پسماند بر درصد مولی هیدروژن موجود در سین گاز

در شکل ۵ مشاهده کرد. با افزایش بیشتر نسبت بخار به پسماند واکنش (۷) شیفیت آب و گاز بهبود یافته و بنابراین مقدار کربن مونواکسید کاهش می‌یابد و مقدار کربن دی‌اکسید افزایش می‌یابد که چندان برای هدف تولید سین گاز مرغوب دلخواه نیست. همچنین مقدار هیدروژن با افزایش مقدار نسبت بخار روندی صعودی دارد که روند به‌دست آمده برای این گاز با نتیجه‌های تجربی منطبق است [۲۵].

تولید هیدروژن

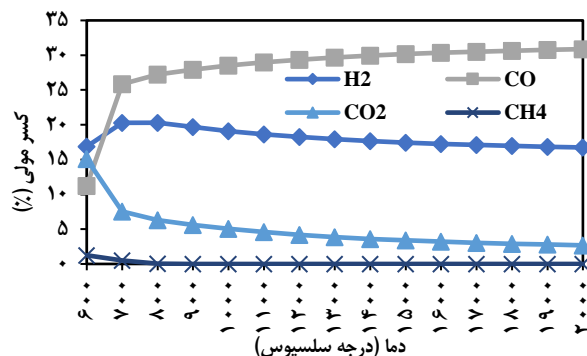
هیدروژن یکی از مهم‌ترین اجزاء در سین گاز تولیدی است برای بررسی میزان تولید هیدروژن، پارامترهایی مانند دما و نسبت بخار به پسماند با هم ترکیب شده‌اند و تأثیر این پارامترها بر تولید هیدروژن مورد بررسی قرار گرفته است که نتیجه‌ها در شکل ۶ قابل دیدن است. در این ارزیابی مقدار دما از ۶۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه سلسیوس تغییر می‌کند و نسبت بخار به پسماند از ۰/۵ تا ۲ که بیش‌ترین مقدار هیدروژن در دمای ۹۰۰ و نسبت بخار به پسماند ۲ به‌دست آمده است. در منابع علمی نتیجه‌های همانندی را می‌توان یافت [۲۰].

ارزش گرمای کمتر^۱ (LHV)

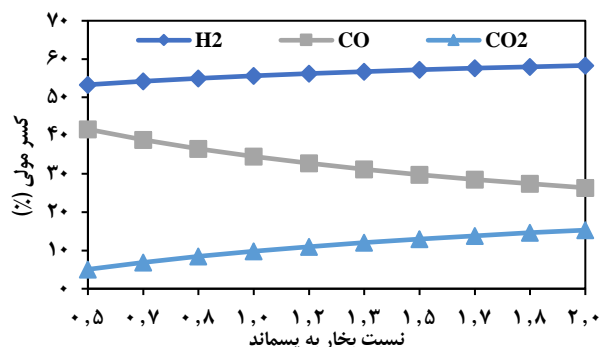
ارزش گرمای کمتر گاز (LHV) برای ارزیابی کیفیت سین گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. که به شکل زیر محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$LHV_{gas} = 10/8 y_{H_2} + 12/6 y_{CO} + 35/8 y_{CH_4} \quad (9)$$

که در آن y_i کسر مولی هر کدام از اجزای سین گاز (هیدروژن، کربن مونواکسید و متان) است. برای بررسی اثر پارامترهای اجرایی مانند دما و نسبت هم ارزی بر ارزش گرمایی کمتر گاز، دما از ۹۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه سلسیوس و ER از ۰/۱ تا ۱ تغییر می‌کنند که



شکل ۴ - تأثیر دما بر درصد مولی اجزاء تشکیل دهنده سین گاز در محیط هوا



شکل ۵ - تأثیر نسبت بخار و پسماند بر درصد مولی اجزاء تشکیل دهنده سین گاز

برای دما بیشینه مقدار حدود ۱۰۰۰ درجه سلسیوس وجود دارد اما برای فرایند گازی‌سازی پلاسمایی این بازه بسیار بزرگ‌تر (تا ۱۰۰۰۰ درجه سلسیوس) است [۱]. همچنین دما نقش تعیین کننده‌ای بر میزان خلوص سین گاز دارد. برای ارزیابی تأثیر دما مقدار آن از ۴۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه سلسیوس تغییر می‌کند. در شکل ۴ تأثیر دما بر کسر مولی اجزای تشکیل دهنده سین گاز قابل دیدن است. افزایش دما ابتدا موجب افزایش هیدروژن و سپس کاهش آن و همچنین افزایش مقدار کربن مونواکسید است شاید این افزایش به دلیل غالب شدن واکنش‌های گرماگیر (۸) و (۳) (اصلاح متان و بخار-کربن) در فرایند است [۲۲، ۲۱].

تأثیر نسبت بخار به پسماند

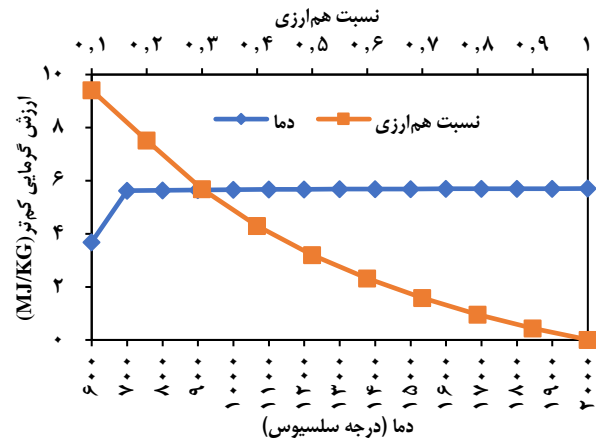
بخار یکی دیگر از اکسندهایی است که در گازی‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً گازی‌سازی پلاسمای بخار برای تولید سین گاز با میزان هیدروژن بیش‌تر توصیه می‌شود [۲۳]. تأثیر این پارامتر بر اجزاء سین گاز را در دمای ۱۵۰۰ درجه سلسیوس می‌توان

(۱) Lower heating value

نتیجه‌گیری

فناوری پلاسما یکی از نوینترین روش‌ها برای مدیریت پسماند و تولید انرژی است. در این مطالعه سعی شده با آرایه مدلی تعادلی بر پایه کمینه سازی انرژی آزاد گیبس این فرایند مورد ارزیابی قرار گیرد. پس از اینکه مدل مورد اعتبارسنجی با نتیجه‌ها علمی منتشر شده قرار گرفت، اثر پارامترهای اجرایی مهم مانند دما، نسبت هم‌ارزی و بخار بر روی ساختار سین گاز، تولید هیدروژن و ارزش گرمای کم‌تر گاز مورد بررسی قرار گرفت. مقدار نسبت هم‌ارزی مناسب برای این فرایند را می‌توان بین ۰/۳ تا ۰/۶ گزارش کرد با توجه به تولید سین گاز مرغوب و تجزیه پسماندها. بیشترین مقدار تولید هیدروژن برای عامل گازی ساز بخار برای نسبت ۱/۵ در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس به دست آمد و بیشترین تأثیر بر روی ارزش گرمای کم‌تر گاز هم برای نسبت هم‌ارزی است که تفاوت بین گازی‌سازی و سوختن را ایجاد می‌کند. با بالا رفتن دما تغییرات اجزاء اصلی سین گاز کم‌تر می‌شود به این معنی که تغییرات بیشتر در اجزاء جزئی سین گاز مانند متان و آلاینده‌هایی مانند قیر^۱ است.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۵



شکل ۷ - تأثیر دما و نسبت هم‌ارزی بر ارزش گرمایی کم‌تر سین گاز در محیط هوا

تغییرهای LHV نسبت به دما و ER در شکل ۷ قابل دیدن است. همان‌گونه که در شکل ۷ قابل دیدن است مقدار LHV با ER کاهش می‌یابد که به سبب افزایش واکنش‌های اکسایش در سامانه است و با افزایش دما تا ۷۰۰ درجه سلسیوس مقدار LHV افزایش می‌یابد و پس از آن به سبب کم شدن تغییرات اجزای سین گاز مقدار تغییرهای LHV هم کم می‌شود.

مراجع

- [1] Drożdż W., Bilan Y., Rabe M., Streimikiene D., Pilecki B., [Optimizing Biomass Energy Production at the Municipal Level to Move to Low-Carbon Energy](#), *Sustainable Cities and Society*, **76**: 103417 (2022).
- [2] Poorhashemi S., Sobhaninia M., Hosseini Azad S., [Analyzing the Nature of States Obligations in the Paris Agreement 2015 on Climate Change](#), *Journal of Environmental Science and Technology*, **23(11)**: 85-98 (2022).
- [3] Ramos A., Rouboa A., [Life Cycle Thinking of Plasma Gasification as a Waste-to-Energy Tool: Review on Environmental, Economic and Social Aspects](#), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **153**: 111762 (2022).
- [4] اوکاتی آ، خانی م، شگری ب، مدل‌سازی گرمایابی فرایند گازی سازی پسماند شهری با پلاسما گرمایی، *دوماهنامه مهندسی شیمی ایران*، (۱۰۷): ۶۱ تا ۷۴ (۱۳۹۸).
- [5] Achinas S., [An Overview of the Technological Applicability of Plasma Gasification Process](#), *Contemp Environ Issues Challenges Era Clim Chang*, **1**: 261-75 (2019).

(۱) Tar

- [6] AlNouss A., Parthasarathy P., Shahbaz M., Al-Ansari T., Mackey H., McKay G., [Techno-Economic and Sensitivity Analysis of Coconut Coir Pith-Biomass Gasification Using ASPEN PLUS](#), *Appl Energy*, **261**: 114350 (2020).
- [7] Shayan E., Zare V., Mirzaee I., [Hydrogen Production from Biomass Gasification; a Theoretical Comparison of Using Different Gasification Agents](#), *Energy Convers Manag*, **159**: 30–41 (2018).
- [8] Maya D.M.Y., Lora E.S., Andrade R.V., Ratner A., Martínez J.D., [Biomass Gasification using Mixtures of Air, Saturated Steam, and Oxygen in a Two-Stage Downdraft Gasifier. Assessment using a CFD Modeling Approach](#), *Renewable Energy*, **177**: 1014-1030 (2021).
- [9] Tungalag A., Lee B.J., Yadav M., Akande O., [Yield Prediction of MSW Gasification Including Minor Species Through ASPEN Plus Simulation](#), *Energy*, **198**: 117296 (2020).
- [10] Kaushal P., Tyagi R., [Advanced Simulation of Biomass Gasification in a Fluidized Bed Reactor using ASPEN PLUS](#), *Renew Energy*, **101**: 629–636 (2017).
- [11] Mazzoni L., Janajreh I., Elagroudy S., Ghenai C., [Modeling of Plasma and Entrained Flow Co-Gasification of MSW and Petroleum Sludge](#), *Energy*, **196**: 1–14 (2020).
- [12] Favas J., Monteiro E., Rouboa A., [Hydrogen Production using Plasma Gasification with Steam Injection](#), *Int J Hydrogen Energy*, **42**: 10997–11005 (2017).
- [13] Messerle V.E., Mosse A.L., Ustimenko A.B., [Plasma Gasification of Carbonaceous Wastes: Thermodynamic Analysis and Experiment](#), *Thermophys Aeromechanics*, **23**: 613–620 (2016).
- [14] Okati A., Khani M., Shokri B., Monteiro E., Rouboa A., [Numerical Modeling of Plasma Gasification Process of Polychlorinated Biphenyl Wastes](#), *Energy Reports*, **7**: 270-285 (2021).
- [15] Fabry F., Rehmet C., Rohani V., Fulcheri L., [Waste Gasification by Thermal Plasma: A Review](#), *Waste and Biomass Valorization*, **4**: 421–439 (2013).
- [16] Sharma V., Agarwal V.K., [Equilibrium Modeling and Optimization for Gasification of High-Ash Indian Coals by the Gibbs Free Energy Minimization Method](#), *Process Integr Optim Sustain*, **3**: 487–504 (2019).
- [17] Mojaver P., Jafarmadar S., Khalilarya S., Chitsaz A., [Investigation and Optimization of a Co-Generation Plant Integrated of Gasifier, Gas Turbine and Heat Pipes Using Minimization of Gibbs Free Energy, Lagrange Method and Response Surface Methodology](#), *Int J Hydrogen Energy*, **45**: 19027–19044 (2020).
- [18] Wang L.Q., Dun Y.H., Xiang X.N., Jiao Z.J., Zhang T.Q., [Thermodynamics Research on Hydrogen Production from Biomass and Coal Co-Gasification with Catalyst](#), *Int J Hydrogen Energy*, **36**: 11676–11683 (2011).
- [19] Son Y.I., Yoon S.J., Kim Y.K., Lee J.G., [Gasification and Power Generation Characteristics of Woody Biomass Utilizing a Downdraft Gasifier](#), *Biomass and Bioenergy*, **35**: 4215–4220 (2011).
- [20] Tavares R., Ramos A., Rouboa A., [A Theoretical Study on Municipal Solid Waste Plasma Gasification](#), *Waste Manag*, **90**: 37–45 (2019).

- [21] Tavares R., Monteiro E., Tabet F., Rouboa A., [Numerical Investigation of Optimum Operating Conditions for Syngas and Hydrogen Production from Biomass Gasification using Aspen Plus](#), *Renew Energy*, **146**: 1309–1314 (2020).
- [22] Deng N., Li D., Zhang Q., Zhang A., Cai R., Zhang B., [Simulation Analysis of Municipal Solid Waste Pyrolysis and Gasification Based on Aspen Plus](#), *Front Energy*, **13**: 64–70 (2019).
- [23] Mallick D., Mahanta P., Moholkar V.S., [Co-Gasification of Coal/Biomass Blends in 50 kW Circulating Fluidized Bed Gasifier](#), *J Energy Inst*, **93**: 99–111 (2020).
- [24] Kuo P.C., Illathukandy B., Wu W., Chang J.S., [Plasma Gasification Performances of Various Raw and Torrefied Biomass Materials using Different Gasifying Agents](#), *Bioresour Technol*, **314**: 123740 (2020).
- [25] Liu L., Huang Y., Cao J., Liu C., Dong L., Xu L., Zha J., [Experimental Study of Biomass Gasification with Oxygen-Enriched Air in Fluidized Bed Gasifier](#), *Sci Total Environ*, **626**: 423–433 (2018).
- [26] Tavares R., Ramos A., Rouboa A., [Microplastics Thermal Treatment by Polyethylene Terephthalate-Biomass Gasification](#), *Energy Convers Manag*, **162**: 118–131 (2018).