

ارزیابی پتانسیل انرژی گازسنتزی حاصله از امحاء و گازسازی پسماند خطرناک بیمارستانی

با راکتور مذاب-پلازما

حسن امیراحمدی^۱، محمدحسن نوبختی^{۲*}، غلامرضا صالحی^۳، شهروز ساویز^۴

۱. دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

hasan.amirahmadi@srbiau.ac.ir

۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول) m.nobakhti@srbiau.ac.ir

۳. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. rezasalehi20@gmail.com

۴. استاد، مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. Shahrooz.saviz@srbiau.ac.ir

چکیده

فرآیند گازسازی ضایعات بیمارستانی، برخلاف روش‌های سنتی مانند سترون‌سازی و دفن کردن پسماند و سوزاندن متداول قابلیت آن را دارد، که علاوه بر آنکه استانداردهای زیست‌محیطی را ارضاء کند، از گاز سنتزی حاصله به‌منظور تولید توان و الکتریسیته بهره برد. در مقاله حاضر، ضایعات زیست پزشکی بیمارستان فرهیختگان تهران با راکتور گازساز مذاب-پلازما که دارای مشعل ۹۰ کیلووات است، گازسازی شد. سه پارامتر نسبت هم ارزی، دما و عامل گازسازی از عوامل مؤثر بر راکتور گازساز مذاب-پلازما به حساب می‌آیند، با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای نسبت‌هم‌ارزی و عامل گازسازی فرآیند گازسازی در دماهای مختلف برای راکتور گازساز انجام شد و گازسنتزی حاصله از آن تحلیل و بررسی عنصری شد و درصد گازهای تشکیل‌دهنده گازسنتزی شامل؛ CO ، H_2 ، CO_2 و CH_4 تعیین گردید. در دمای ۱۴۰۰ درجه‌سانتی‌گراد میزان گازهای CO و H_2 به ترتیب به میزان ۳۷/۱ درصد و ۳۲ درصد اندازه‌گیری شد، که در این دما، ارزش حرارتی بالا از مخلوط گازسنتزی ۹/۶۳۵ مگاژول بر کیلوگرم به دست آمد. همچنین آلاینده‌هایی مانند؛ H_2S ، NO_2 و SO_2 در حد بسیار کمی در تحلیل و بررسی گازسنتزی مشاهده شد. در فاز دوم این پژوهش، مدل‌سازی تعادلی ترمودینامیکی فرآیند گازسازی این پسماند با نرم‌افزار اسپن‌پلاس در بازه دمایی ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ درجه‌سانتی‌گراد بررسی شد. تمام زیر فرآیندهای گازسازی شامل؛ خشک‌کردن، پیرولیز، احتراق جزئی و احیاء با ماژول‌های موجود در نرم‌افزار به‌صورت تعادلی مدل شد. نتایج حاصل از این مدل‌سازی فرآیند گازسازی تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی داشت. و قسمت بعدی مدل گازسازی با توربین بخاری ترکیب شد، تا میزان الکتریسیته قابل‌دسترس بررسی گردد.

کلمات کلیدی: گازسنتزی، انرژی تجدید پذیر، گازسازی، پسماند بیمارستانی، اسپن پلاس

بنا بر گزارش اعلامی از سوی کنوانسیون بازل ۱۹۸۹، ضایعات تولیدی در بیمارستان‌ها به دلیل پتانسیل ایجاد بیماری در زمره ضایعات خطرناک قرار می‌گیرد [۱]. بر اساس اعلام سازمان بهداشت جهانی^۱ تا سال ۲۰۱۵ برآثر برخورد سهوی با زباله‌های عفونی ۲ میلیون نفر به هیپاتیت سی و حدود ۲۶۰ هزار نفر به ایدز مبتلا شده‌اند [۲]. مطابق با آمارهای رسمی منتشرشده در سال ۲۰۲۰، تولید ضایعات بیمارستانی در شهر تهران به عدد ۱۰۰ تن در روز می‌رسد [۳].

در دنیا سه روش امحاء پسماند بیمارستانی با سترون‌سازی (استریل کردن)^۲ و دفن پسماند، سوزاندن متداول^۳ و گازسازی پلاسما^۴ دنبال می‌شود [۳]. دو روش دفن پسماند و سوزاندن متداول موجب آلودگی خاک، آب‌های زیرزمینی و هوا خواهد شد [۴]. علاوه بر مخاطرات زیست‌محیطی که این روش‌های امحاء پسماند در پی خواهد داشت، باعث هدر رفت منابع بالقوه انرژی نیز می‌شود. از آنجاکه ۷۵ درصد ضایعات تولیدشده در مراکز درمانی ماهیت شبه خانگی دارد و از اجزایی به‌مانند؛ پارچه، کاغذ، مقوا، انواع پلاستیک تشکیل شده است، عدم بهره‌وری از انرژی نهفته این پسماندها یک خطای راهبردی قلمداد می‌شود [۵].

روش گازسازی پلاسما که نخستین بار در ژاپن و توسط دکتر کامپو برای امحاء پسماند شهری به کار گرفته شد، در سالیان اخیر با پیشرفت‌های خیره‌کننده‌ای همراه بوده است و بیشتر سعی شده است، از این فناوری برای امحاء ضایعات خطرناک استفاده شود [۶]. گازسازی، فرآیندی ترموشیمیایی است، که طی آن سوخت جامد (در اینجا ضایعات بیمارستانی) از طریق اکسیداسیون جزئی در دماهای بالا معمولاً (۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس) به گاز سنتزی تبدیل می‌شود. این گاز عمدتاً شامل CO₂، H₂، CH₄ با مقدار بسیار اندکی بخار آب و مقدار ناچیزی هیدروکربن‌های دو یا سه کربنه می‌باشد. فرآیند گازسازی شامل چهار زیر فرآیند شامل خشک کردن، پیرولیز^۵، احتراق جزئی و احیاء^۶ می‌باشد [۷، ۸].

گاز سنتزی حاصله از امحاء فرآیند گازسازی ضایعات، هم قابلیت استفاده مستقیم در صنایع را دارد و هم می‌توان از آن به‌منظور یک سوخت پاک و منبع انرژی تجدید پذیر در تولید توان و الکتریسیته بهره برد [۹]. برای تحقق توسعه پایدار اقدامات قابل توجهی در خصوص منابع انرژی تجدید پذیر در ایران صورت گرفته است. در سال ۹۲ ظرفیت نیروگاهی تجدید پذیر در ایران میزان ۰/۶۸ درصد از تولید انرژی را به خود اختصاص داده بود. چشم‌انداز تعریف‌شده برای سال ۱۴۰۶ حاکی از آن است، که با بهره‌برداری ۱۰ هزار مگاواتی از نیروگاه‌های تجدید پذیر، ارتقای ۱۳ برابری ظرفیت انرژی تجدید پذیر مهیا گردد [۱۰، ۱۱].

مرسل و همکاران [۱۲] محاسبات ترمودینامیکی و آزمایش‌های تجربی در خصوص پروسه گازسازی زباله جامد شهری ارائه نمودند. در این پژوهش از راکتور پلاسما معمولی با مشعل جریان مستقیم با توان ۷۰ کیلووات و خوراک ورودی به راکتور با نرخ ۳۰ کیلوگرم بر ساعت استفاده شد. مقادیر CO، H₂ و N₂ گاز سنتزی حاصله از این فرآیند به ترتیب ۲۶/۵، ۴۴/۶ و ۲۸/۹ درصد به دست آمد. ژانگ و همکاران [۱۳] تحقیقاتی در مورد تحلیل و بررسی بازدهی گازسازی پسماند شهری با واسطه بخار در راکتور گازساز پلاسما-مذاب^۷ منتشر ساختند. کومار و همکاران [۱۴] پژوهشی در زمینه مدل‌سازی گازسازی پلاسما معمولی پسماند شهری در درجه حرارت‌های متفاوت داشتند. در این مطالعه، یک مدل از گازسازی پلاسما در دمای پایین برای تبدیل خوراک را مورد بررسی قرار دادند. در این مدل درجه حرارت راکتور ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌منظور ارزیابی اثرات دما بر روی ترکیب گاز سنتزی بررسی شد و مشاهده گردید در دمای ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، این مدل مقادیر ارزش حرارتی به ترتیب برابر با ۵/۴۱، ۶/۰۲ و ۶/۴۵ مگاژول بر نیوتن متر مکعب متناظر با انرژی ورودی ۲۳۵۸، ۲۷۷۵ و ۳۲۴۵ کیلووات بر دبی جرمی^۸ به دست می‌آید. سیلوا پائولینو و همکاران [۱۵] پژوهشی بر روی گازسازی ضایعات بیمارستانی شهر گوآتراتینگورا^۹ ایالات ساوپائولو^{۱۰} کشور برزیل داشتند. ایشان استفاده از

¹ World Health Organization (WHO)

² Sterilization

³ Conventional Incineration

⁴ Plasma Gasification

⁵ Pyrolysis

⁶ Reforming

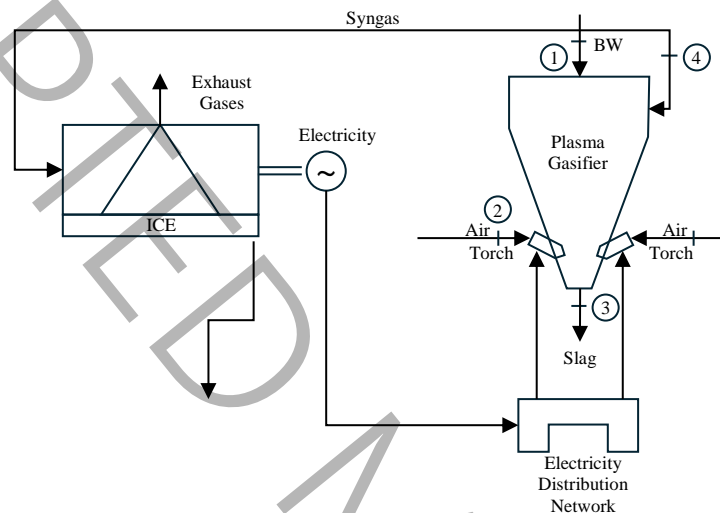
⁷ Plasma Gasification Melting (PGM)

⁸ kW per kg/s

⁹ Gaaatratiguera

¹⁰ Sao Paulo

گازسنتری حاصله از دستگاه‌های گازسازی پلاسما از ضایعات بیمارستانی را برای تولید برق در یک موتور احتراق داخلی؛ با رویکردهای ترمودینامیکی و مسائل اقتصادی بررسی شد. در شکل ۱ شماتیک ست‌آپ آزمایشگاهی کار پائولینیا مشاهده می‌شود. ایشان درصدد آن بوده است، که با ترکیب یک موتور احتراق داخلی با راکتور گازساز پلاسما، از گاز سنتری حاصله برای تولید الکتریسیته بهره‌بردار. در تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی نشان داده شده است، که راندمان گازساز پلاسما ۷۸/۵۸ درصد است و امکان تولید حداکثر ۳۱ درصد از برق موردنیاز راکتور توسط موتور احتراق داخلی وجود دارد. همچنین از تحلیل اقتصادی نیز نمایان گشت، که مدت بازپرداخت سیستم گازسازی ۶ سال خواهد بود و چنانچه اقدام به جمع‌آوری زباله‌های بیمارستانی اطراف صورت پذیرد و در بهترین حالت ۴ سال خواهد بود. قابل پیش‌بینی به نظر می‌رسد، که می‌توان از این گاز سنتری به‌منظور تولید الکتریسیته در میکرو توربین‌ها یا حتی به‌منظور تهیه آبگرم نیز بهره‌بردار.



شکل ۱ شماتیک طرح ترکیبی گازساز پلاسما و موتور احتراق داخلی [۱۵]

Fig. 1 Schematic of the combined design of plasma gasifier and internal combustion engine [15]

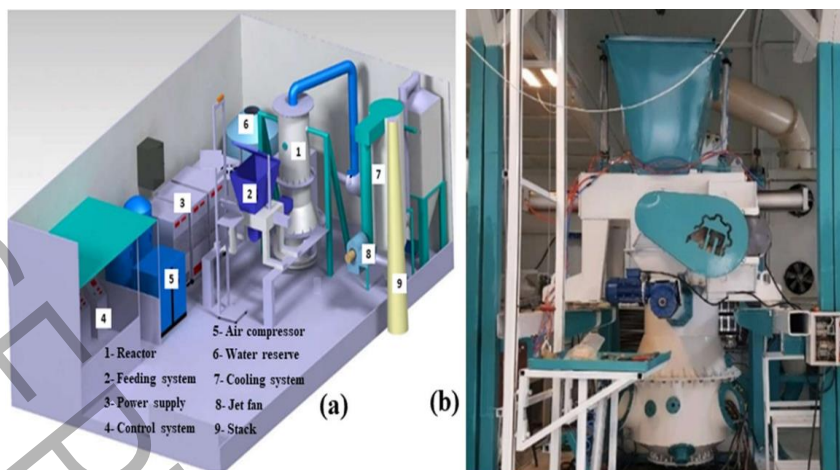
در این مقاله، در فاز اول ضایعات بیمارستانی، بیمارستان فرهیختگان تهران به‌طور تجربی در راکتور مذاب-پلاسما در دماهای ۱۰۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد امحاء و گازسازی شد. در هر مرحله از آزمایش گاز سنتری حاصله مورد تحلیل و بررسی عنصری قرار گرفت. در فاز دوم با استفاده از مدل‌سازی تعادلی ترمودینامیکی در نرم‌افزار اسپن پلاس^۱، فرآیند گازسازی مدل شد و در پایان عملکرد گازسنتری حاصله برای تولید الکتریسیته در یک توربین بررسی شد.

۲- روش و مواد پژوهش

۱-۲ معرفی راکتور PGM

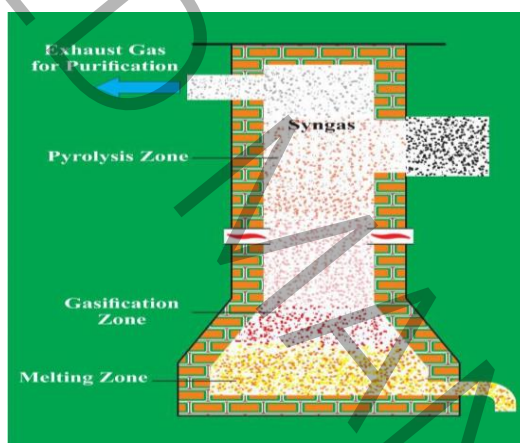
شکل ۲ راکتور مذاب-پلاسما پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. این راکتور متعلق به مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما و واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی می‌باشد. همان‌طور که در قسمت شماتیک سیستم پایلوت مشاهده می‌شود، این راکتور متشکل از کمپرسور هوا، اتاق کنترل، سیستم برق‌رسانی، سیستم کنترل، سیستم خوراک رسانی، فیلترهای آلودگی، جت فن، منبع آب و سیستم عایق‌کاری و خنک‌کاری می‌باشد. دبی جریان خوراک ورودی ۱۰۰ کیلوگرم بر ساعت است و دبی جریان هوای ورودی به راکتور ۶۰ لیتر بر دقیقه است. قطر ستون گازسازی ۱/۱ متر است. دمای گازسازی در بازه ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد قابل تنظیم است. و دمای پیرولیز ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. برای رسیدن به شرایط پایدار عملکردی دستگاه نیاز به ۵ ساعت پیش‌گرمایش دارد.

¹ Aspen Plus

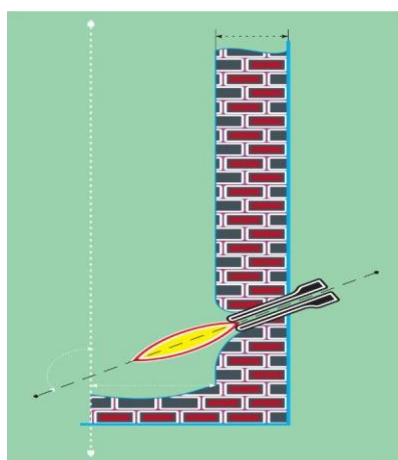


شکل ۲ راکتور PGM پژوهش حاضر
 Fig. 2 PGM reactor of the current research

در شکل ۳ شماتیک یک راکتور مذاب-پلازما مشاهده می‌شود، ناحیه مذاب سازی^۱، ناحیه گازسازی، ناحیه پیرولیز، محل فرارگیری مشعل پلازما و ورودی‌های به راکتور و خروج گازسنتری از آن مشخص گردیده است.



شکل ۳ شماتیک راکتور PGM
 Fig. 3 PGM reactor schematic



شکل ۴ شماتیک نحوه فرارگیری مشعل پلازما
 Fig. 4 schematic of how to place the plasma torch

¹ Melting Zone

در شکل ۴ شماتیک فرارگیری مشعل پلازما درون راکتور مذاب-پلازما مشاهده می‌شود. راکتور حاضر از ۲ مشعل پلازما با توان ۹۰ کیلووات که متصل به سیستم برق‌رسانی است، تشکیل شده است، که با جریان هوای ورودی ۴۰۰ لیتر بر دقیقه تغذیه می‌شود. دمای ناحیه مشعل تا ۳۰۰۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی می‌شود.

۲-۲ معرفی خوراک

در شکل ۵ تصویر ضایعات تولیدی در بیمارستان فرهیختگان قابل مشاهده است.



شکل ۵ ضایعات تولیدی بیمارستان فرهیختگان
Fig. 5 Production waste of Farhikhtegan Hospital

تحلیل و بررسی این خوراک گازسازی توسط ساویز و همکار [۱۶] صورت گرفته است، که اطلاعات آن مطابق جدول ۱ می‌باشد. از این داده‌ها برای ورودی در مدل‌سازی استفاده خواهد شد. خوراک اصلی که در ورودی داده‌های نرم‌افزار به کاررفته است، دارای فرمول شیمیایی $C_6H_{8.8}O_{2.3}$ می‌باشد.

جدول ۱ تحلیل و بررسی ضایعات بیمارستانی (بیمارستان فرهیختگان) [۱۶]
Table. 1 Analysis and review of hospital wastes (Farhikhtegan hospital) [16]

سهم وزنی (%)	خوراک
۶۷/۹	$C_6H_{8.8}O_{2.3}$
۳۱	Si
۱/۱	Other

۳-۲ طراحی آزمایش^۱:

برای فرآیند گازسازی پارامترهایی مانند فشار و دمای راکتور، نوع خوراک، اندازه ذرات خوراک، زمان ماند، نسبت هم‌ارزی^۲، عامل گازسازی و کاتالیست قابل تأثیر بر روی فرآیند گازسازی هستند [۱۷].
نسبت هم‌ارزی مطابق رابطه ۱ تعریف می‌شود.

$$ER = \frac{\left(\frac{O_2}{m}\right)_{actual}}{\left(\frac{O_2}{m}\right)_{stoich}} \quad (1)$$

به‌طور کلی فرآیند گازسازی و کیفیت گازسنتری حاصله را نیز با مواردی مانند بازده گازسازی، بازده گاز سرد^۳ و ارزش حرارتی بالا^۴ می‌سنجند [۱۸].

¹ Design of Experiment (DOE)

² Equivalence Ratio (ER)

³ Cold Gas Efficiency (CGE)

⁴ High Heat Value (HHV)

پارامتر ارزش حرارتی بالا برای گاز سنتزی حاصله به صورت رابطه ۲ تعریف می شود [۱۹].

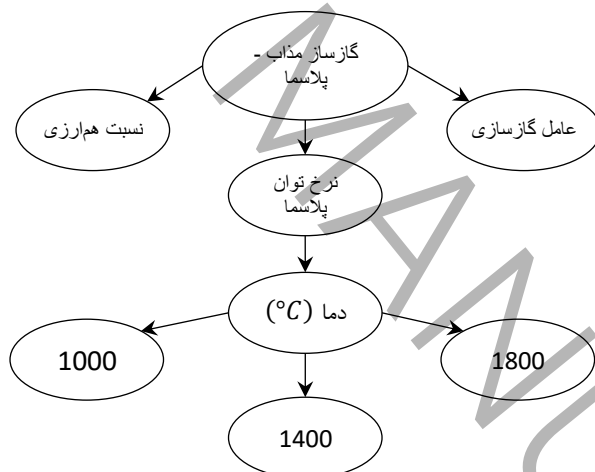
$$HHV_{SynGas} = 12.75[H_2] + 12.63[CO] + 39.43[CH_4] + 63.43[C_2H_4] + \dots \quad (2)$$

در این رابطه [-] غلظت گونه‌ها برحسب نسبت مولی و ارزش حرارتی بالا برحسب کیلوژول بر کیلوگرم است.

این سیستم امحاء و گازسازی، به طور کلی به سه پارامتر عامل گازسازی^۱، نسبت هم‌ارزی و دمای ستون راکتور وابسته است [۲۰]. در این پژوهش عامل گازسازی ثابت می‌باشد و از هوای خشک استفاده می‌شود و از تزریق بخار به سیستم گازساز خودداری می‌شود. نسبت هم‌ارزی نیز ثابت و برابر ۰/۰۸ در نظر گرفته می‌شود. تنها با تغییرات توانی بر روی مشعل پلاسما دمای راکتور کنترل می‌شود. برای توان مشعل پلاسما پارامتری تحت عنوان نرخ توان پلاسما^۲ تعریف می‌شود. راکتور مذاب-پلاسما برخلاف راکتورهای گازساز سنتی نیاز به آماده‌سازی خوراک یا خرد کردن ندارد. این پارامتر به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود. در این رابطه P_{Pla} توان قابل تنظیم مشعل پلاسما است و m دبی جرمی خوراک ورودی است.

$$PER = \frac{P}{LHV \times m} \quad (4)$$

در شکل ۶ شماتیک طراحی آزمایش پژوهش مشاهده می‌شود، که در آن از ۳ پارامتر قابل تغییر فقط یک پارامتر که نرخ توان پلاسما است و به طور مستقیم بر دما اثرگذار است، تغییر می‌کند. بنابراین تغییرات از نوع یک متغیر با زمان می‌باشد. پس برای سه دما مذکور، سه آزمایش تعریف می‌شود، و با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان از نتایج هر آزمایش سه بار تکرار شده است. لذا در مجموع ۹ آزمایش برای این پژوهش تعریف شد.

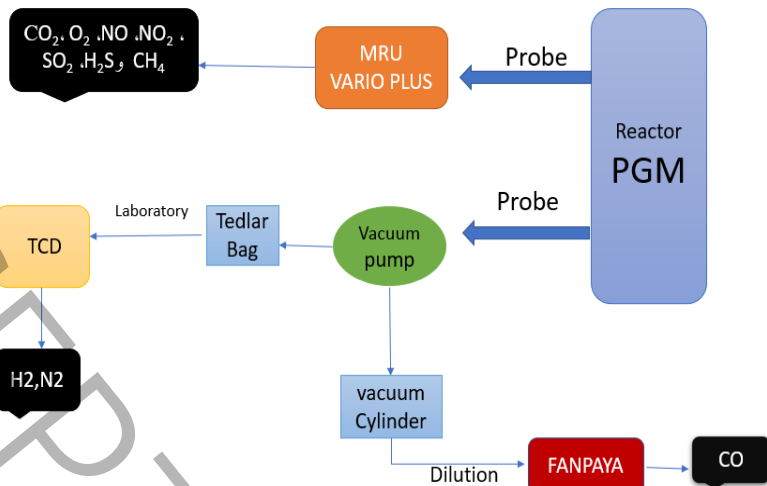


شکل ۶ شماتیک DOE پژوهش
Fig. 6 Schematic DOE research

۴-۲ مکانیزم تحلیل و بررسی اندازه‌گیری:

به دلیل آنکه ست‌آپ اندازه‌گیری این نوع گاز با درصدهای موجود به صورت منسجم در دسترس نبود. طرحواره روش‌های اندازه‌گیری در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

¹ Agent
² PER



شکل ۷ شماتیک مکانیزم آزمایش‌ها

Fig. 7 Schematic of the experiment mechanism

گاز سنتزی خروجی از راکتور مذاب-پلاسما با سه روش مختلف تحلیل و بررسی شد. گازهای CO_2 ، O_2 ، NO ، NO_2 ، CH_4 ، H_2S و SO_2 با دستگاه ام‌آریو واریو پلاس^۱ در محل تحلیل و بررسی شد. H_2 و N_2 با پمپ خلأ در کیسه تدارک جمع شد و در آزمایشگاه با دستگاه گازکروماتوگرافی^۲ از برند اجیلنت^۳ مدل ۶۸۶۰ تحلیل و بررسی شد. CO نیز پس از رقیق‌سازی با دستگاه فن‌پایا^۴ تحلیل و بررسی شد.

۲-۵ معرفی تجهیزات تحلیل و بررسی گاز

شکل ۸ دستگاه ام‌آریو واریو پلاس را نشان می‌دهد، که از طریق یک پراب^۵ به محفظه راکتور متصل می‌شود و به‌صورت در لحظه مقادیر را خوانش می‌کند.



شکل ۸ دستگاه MRU VARIO PLUS

Fig. 8 MRU VARIO PLUS device



شکل ۹ پراب استفاده‌شده

Fig. 9 Used probe

¹ MRU VARIO PLUS

² Gas Chromatography (GC)

³ Agilent

⁴ FANPAYA

⁵ Probe

در شکل ۱۰ دستگاه گاز کروماتوگرافی از برند اجیلنت، مدل ۶۸۶۰ مشاهده می‌شود. در جدول ۲، خطا تحلیل و بررسی درصدی خروجی گازهای تشکیل‌دهنده بر اساس کالیبراسیون‌های اعلامی آورده شده است. از این داده‌ها برای محاسبه عدم قطعیت نتایج تجربی بهره برده شده است.



شکل ۱۰ دستگاه گاز کروماتوگرافی از برند اجیلنت

Fig. 10 Agilent brand GC device

بامطالعه ادبیات پیشین متوجه این موضوع آشکار شد، که گاز سنتزی حاصله از فرآیند گازی‌سازی در بازه ۲۵ الی ۴۵ درصد باشد. بنابراین خوانش CO با این دستگاه غیرممکن به نظر برسد. یکی از تکنیک‌های معتبر در اندازه‌گیری و تحلیل و بررسی گازها که در مهندسی شیمی کاربرد دارد و تحت عناوین روش ۷ ای^۱ و ۱۰ ای^۲ توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا^۳ منتشر شده است. و در آن شرح تحلیل و بررسی و اندازه‌گیری استاندارد گازها داده شده است، تکنیک رقیق‌سازی^۴ می‌باشد. رقیق‌سازی، فرآیند کاهش غلظت حل‌شونده در محلول است و معمولاً به سادگی با اضافه کردن حلال بیشتر مانند افزودن آب بیشتر به محلول صورت می‌پذیرد. رقیق کردن محلول به معنای افزودن حلال بیشتر بدون افزودن حل‌شونده بیشتر است. محلول حاصل باید کاملاً مخلوط شده تا اطمینان حاصل شود که تمام قسمت‌های محلول یکسان هستند [۲۱].

جدول ۲ درصد خطای گازهای اندازه‌گیری شده

Table. 2 Error percentage of measured gases

میزان خطا (%)	گاز
۲/۳۸	CH ₄
۳/۷۶	H ₂
۲/۳۱	O ₂
۳/۲۴	CO
۲/۳۸	H ₂ S
۲/۳۱	CO ₂
۳/۲۹	N ₂
۲/۳۸	NO ₂
۲/۳۸	NO
۲/۳۸	SO ₂

¹ Method 7E

² Method 10E

³ Environmental Protection Agency

⁴ Dilution

۳- نتایج

۱-۳ نتایج تجربی

تحلیل و بررسی گازهای تشکیل‌دهنده گازسنتری مطابق جدول ۳ می‌باشد. همان‌طور که از جدول ۴ نیز مشخص است، آلاینده‌های حاصل از فرآیند امحاء ضایعات بیمارستانی در حد بسیار مطلوبی از نقطه نظر محیط‌زیستی قرار دارد. فرآیند گازسازی ضایعات با راکتور مذاب-پلازما به جزء محصول گازسنتری، دارای سرباره‌ای سخت، خنثی و بی‌خطر برای محیط‌زیست می‌باشد، که می‌توان از آن در صنایع ساختمانی استفاده کرد. تصاویر مربوط به سرباره مذاب خارج شده از راکتور مذاب-پلازما و سرباره سرد شده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ قابل مشاهده هستند.

تحلیل و بررسی سرباره سرد شده بیمارستان فرهیختگان در سایر مقالات علمی دیگر منتشر شده است. نتایج نشان داده است، که این سرباره شامل ترکیبات شیمیایی معدنی از قبیل CaO ، SiO_2 ، Al_2O_3 و Na_2O می‌باشد. در این بین سهم SiO_2 با ۵۶/۹۲ درصد مقدار قابل توجهی به حساب می‌آید [۲۲]. البته این مقدار از SiO_2 با توجه به نوع خوراک تزریق شده به راکتور مذاب-پلازما که مطابق شکل ۵ می‌باشد، مقدار قابل انتظاری به شمار می‌رود، چرا که ظروف شیشه‌ای تشکیل‌دهنده پسماند وزن قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهد.

جدول ۳ تحلیل و بررسی گازسنتری در دماهای مختلف

Table. 3 Analysis and investigation of gas synthesis at different temperatures

گاز	۱۰۰۰°C	۱۴۰۰°C	۱۸۰۰°C
CH_4 (%)	۱/۰۷	۱/۱۹	۱/۶۴
H_2 (%)	۳۶/۲۰	۳۷/۱۰	۴۰/۴۰
CO_2 (%)	۱۰	۹/۲۵	۷/۲۰
CO (%)	۳۱	۳۲	۳۶
N_2 (%)	۲۰/۸۵	۱۸/۵۰	۱۴/۰۵
جمع کل (%)	۹۹/۱۲	۹۸/۰۴	۹۹/۲۷

جدول ۴ تحلیل و بررسی آلاینده‌ها در دماهای مختلف

Table. 4 Analysis and investigation of pollutants at different temperatures

گاز	۱۰۰۰°C	۱۴۰۰°C	۱۸۰۰°C
O_2 (ppm)	۴۳	۲۶	۱۸
H_2S (ppm)	۲	۴	۱
NO_2 (ppm)	۱۷	۱۱	۱۷
NO (ppm)	۱۳	۲۰	۲۶
SO_2 (ppm)	۱	۴	۲

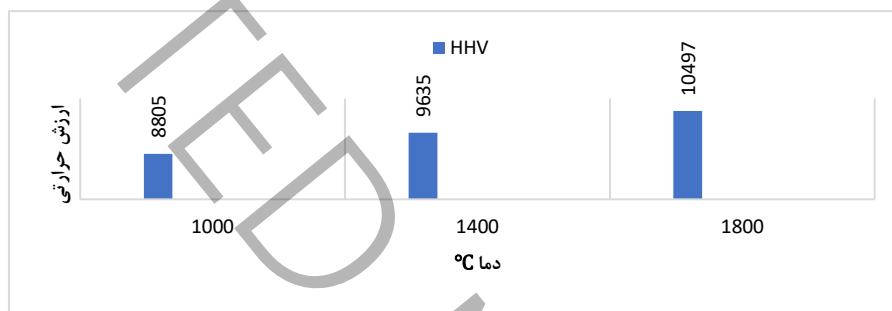


شکل ۱۱ سرباره داغ خارج شده از گازساز
Fig. 11 Hot slag removed from the gasifier



شکل ۱۲ سرباره سرد شده
Fig. 12 Cooled slag

با استفاده از رابطه ۲ و جدول ۳ ارزش حرارتی گاز سنتزی برای دماهای ۱۰۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر ۸۸۰۵، ۹۶۳۵ و ۱۰۴۹۷ کیلوژول بر کیلوگرم به دست خواهد آمد.



شکل ۱۳ نمودار تغییرات ارزش حرارتی برای دماهای مختلف عملیاتی
Fig. 13 The diagram of calorific value changes for different operating temperatures

۲-۲ عدم قطعیت نتایج تجربی

با توجه به جدول ۲ و تحلیل و بررسی خطا مربوط به هر یک از گازهای بررسی شده، عدم قطعیت نتایج به دست می‌آید. در جدول ۲ به عنوان مثال خطای ۲/۳۸ درصد برای متان تعریف شده است، که این به معنای آن است، که چنانچه مقدار متان ۱ درصد خوانده شود، مقدار حقیقی متان می‌تواند در بازه (۱/۰۲۳۸-۰/۹۷۶۲) درصد باشد. اما برای عدم قطعیت نتایج تجربی با استفاده از رابطه تئوری عدم قطعیت کلاین-مک کلیتوک^۱ می‌توان برای عدم قطعیت نتایج تجربی بیان نمود [۲۳]:
اگر نتایج محاسبه شده r تابع معلومی از متغیرهای مستقلی به شرح زیر باشد:

$$r = r(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (4)$$

فرض شود، W_r عدم قطعیت نتیجه بوده و W_1, W_2, \dots, W_n عدم قطعیت متغیرهای مستقل باشد، اگر عدم قطعیت کلیه متغیرهای مستقل با نسبت احتمالی امکان وقوع داشته باشد. می‌توان رابطه زیر را نوشت [۱۷]:

$$W_r = [(W_1)^2 + (W_2)^2 + \dots + (W_n)^2] \quad (5)$$

مقدار خطای ایجاد شده در ارزش حرارتی بالا گاز سنتزی برابر ۰/۰۲۱۷ کیلوژول بر کیلوگرم خواهد بود.

۳-۳ صحت‌سنجی نتایج تجربی

مفاهیم گازسازی نشان داده است، که عواملی همچون اندازه خوراک، نوع خوراک، عامل گازسازی، نسبت هم‌ارزی، دمای فرآیند، فشار فرآیند، زمان ماند، تزریق بخار و کاتالیست می‌تواند تاثیرات بسزایی در ترکیب نهایی گاز سنتزی حاصله ایجاد کند [۲۴]. برای مقایسه

¹ Kline-Mcclitock method

مقادیر نتایج گاز سنتزی در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد مطابق جدول ۵، نتایج کاری سایر محققین نشان داده شده است. اما باید دقت نمود، که هر آزمایش با توجه به شرایط اختصاصی خود، باید مورد ارزیابی قرار بگیرد.

جدول ۵ صحت‌سنجی نتایج تجربی
Table 5 validation of experimental results

نوع پسماند	نوع راکتور	(%) H_2	(%) CO	(%) N_2
بیمارستانی	مذاب-پلازما	۳۷/۱۰	۳۶/۲	۱۸/۵
مسرل و همکاران [۲۵]	پلازما معمولی	۴۴/۶	۲۶/۵	۲۸/۹
اردوغان و همکاران [۲۶]	پلازما معمولی	۲۷/۹۶	۲۰/۷۷	۴۲/۲۲
ژانگ و همکاران [۱۳]	مذاب-پلازما	۲۶/۸۷	۱۵/۷۴	---

مسرل نتایج تحقیقات تجربی خود را که بر روی پسماند کشور روسیه صورت پذیرفته بود، را ارائه نموده‌اند. در این پژوهش مشعل جریان مستقیم با توان ۷۰ کیلووات و خوراک ورودی به راکتور با نرخ ۳۰ کیلوگرم بر ساعت بود. اردوغان با مطالعه‌ای عددی برای راکتور پلاسمای معمولی نسبت هم‌ارزی را متغیر بین ۰/۱ تا ۰/۵ در نظر گرفت. در این شبیه‌سازی سینتیکی فرآیند تزریق هوا در مقدار ثابت ۰/۱ کیلوگرم بر ثانیه صورت می‌گیرد و مقدار تزریق خوراک متناسب با نسبت هم‌ارزی تغییر می‌کند، اردوغان در این مقاله نتایج شبیه‌سازی خود را با نتایج تجربی مسرل اعتبارسنجی می‌کند و مقادیر بالای N_2 را به دلیل اعمال شرایط نسبت هم‌ارزی بالاتر ربط می‌دهد. ژانگ و همکاران طی یک مطالعه تجربی با راکتور مذاب-پلازما پسماندهای جامد شهری را در شمال سرزمین‌های اشغالی فلسطین مورد مطالعه و بررسی قرار می‌دهند. این فرآیند که در نسبت هم‌ارزی ۰/۰۴ صورت می‌گیرد و برای خوراک ۱۲ تا ۲۰ تن در روز است، به دلیل رطوبت بالای پسماند جامد شهری مقدار پارامتر ارزش حرارتی پایین نیز در حدود ۸/۷۰ مگاژول بر نیوتن مترمکعب به دست می‌آید.

۳-۴ نتایج مدل‌سازی

مدل‌سازی فرآیند گازسازی به صورت ترمودینامیک تعادلی با نرم‌افزار اسپن پلاس صورت گرفت. از آنجاییکه در واقعیت فرآیند گازسازی از ۴ زیرفرآیند خشک‌کردن، پیرولیز، احتراق جزئی و احیاء تشکیل شده است. باید تمامی زیر فرآیندها در مدل‌سازی رعایت شود و نهایتاً مدل فرآیند گازسازی با یک توربین ترکیب شود. فرضیاتی که در این مدل‌سازی به کاررفته، عبارت است از:

❖ تمامی فرآیندها به صورت پایا می‌باشد.

❖ تمامی ماژول‌ها به صورت هم‌دم فرض می‌شود.

❖ واکنش‌ها به صورت تعادلی در نظر گرفته می‌شود و نرخ انجام واکنش‌ها در نظر گرفته نمی‌شود.

به‌طور کلی یه منظور انجام این مدل‌سازی در نرم‌افزار اسپن پلاس، مراحل مدل‌سازی طی گردد، که این مراحل عبارت از؛ انتخاب روش‌های حل، تعیین اجزاء موجود در مدل‌سازی، تعیین ورودی‌های مساله و تعیین کردن مشخصات کاری تمامی ماژول‌های استفاده شده در مدل‌سازی می‌باشد.

خوراک اعمالی مطابق جدول ۱ می‌باشد. مدل‌سازی تعادلی ترمودینامیکی فرآیند گازسازی مبتنی بر فرض مینیمم در نظر گرفتن انرژی آزاد گیبس می‌باشد، لذا برای شرایط اعمال شده بر مدل‌سازی از معادله حاکم^۱ پنگ-رابینسون^۲ استفاده خواهد شد. شرایط فیزیکی اعمال شده بر مدول‌های گازسازی در جدول ۶ بیان شده است [۲۷].

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{(V_m^2 + 2bV_m - b^2)} \quad (۶)$$

که در رابطه پنگ-رابینسون، پارامترها به صورت روابط زیر تعریف می‌شود:

^۱ Equation of State (EOS)

^۲ Peng- Robinson

$$a = \frac{0.45724R^2T_c^2}{P_c}$$

(۶- الف)

$$b = \frac{0.01778RT_c}{P_c}$$

(۶- ب)

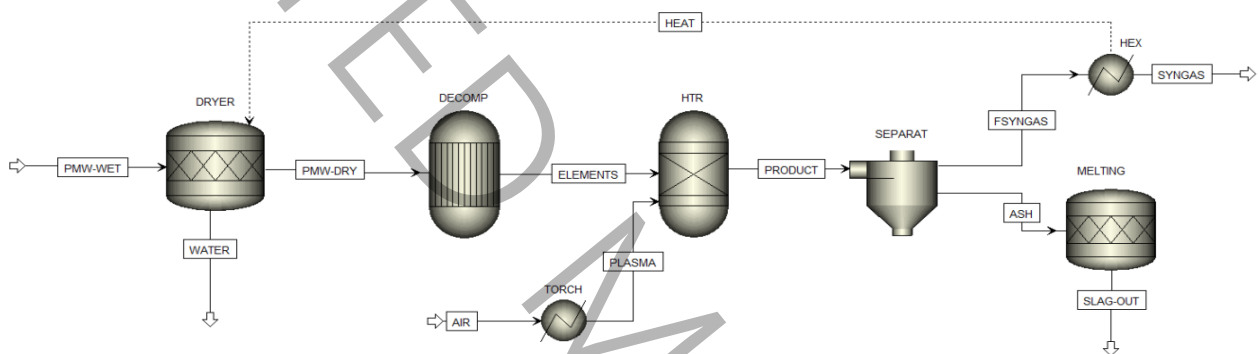
$$\alpha = (1 + (1 - \sqrt{T_r}))^2$$

(۶- ج)

$$k = 0.374646 + 1.54226w - 0.26992w^2$$

(۶- د)

در شکل ۱۴ فلوشیت^۱ مربوط به مدل حاضر مشاهده می‌شود. که توضیحات مربوط به هر ماژول اعمالی در جدول ۷ بیان گردیده است. همچنین معادلات واکنش‌های شیمیایی در جدول‌های ۸ و ۹ که اختصاص به زیر فرآیندهای پیرولیز، احتراق جزئی و احیاء دارد، بررسی شده است.



شکل ۱۴ فلوشیت مدل‌سازی در نرم‌افزار Aspen Plus
Fig. 14 Modeling flow sheet in Aspen Plus software

جدول ۶ شرایط کاری اعمال شده
Table. 6 applied working conditions

مقدار	مشخصه کاری
۳۰°C	دمای خوراک ورودی به راکتور
۱ atm	فشار واحد تجزیه و پیرولیز
۵۰۰°C	دمای واحد تجزیه و پیرولیز
۳۰°C	دما هوای ورودی به کمپرسور
۰/۸۵	بازده آنتروپی ثابت کمپرسور
۰/۹۵ atm	فشار هوای ورودی به کمپرسور
۶۰ Lit/m	دبی هوای ورودی به راکتور
۶۰ bar	فشار بخار ورودی به توربین
۵/۵ bar	فشار بخار خروجی از توربین
۴۸۲°C	دمای بخار ورودی به توربین
۱۵۰°C	دمای بخار خروجی از توربین
۲۵۰۰°C	دمای سرباره خروجی
۱۸۰۰-۱۰۰۰ °C	دمای ماژول گازساز
۳۰۰°C	دمای ماژول خشک کن

¹ Flowsheet

جدول ۷ توضیحات مربوط به ماژول‌های مربوط به مدل‌سازی
Table. 7 Descriptions of modules related to modeling

نام ماژول	نوع ماژول	توضیحات
DRYER	RStoich	کاهش رطوبت خوراک
DECOMP	RYield	راکتور غیراستوکیومتریکی بر پایه تجزیه
TORCH	Heater	ایجاد حرارت با مشعل پلاسما DC غیرانتقالی
HTR	RGibbs	راکتور گازسازی بر اساس حداقل کردن انرژی آزاد گیبس
SEPARAT	Splitter	جداسازی گاز از جامد
MELTING	RStoich	شبیه‌سازی پروسه تولید سرباره جامد
HEX	Cooler	مبدل گرمایی

جدول ۸ واکنش‌های شیمیایی احتراق جزئی
Table. 8 Chemical reactions of partial combustion

شماره واکنش	معادله واکنش	توضیحات (ΔH)
۱	$2C + O_2 \rightarrow 2CO$	اکسیداسیون جزئی کربن (-111 MJ/kmol)
۲	$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	اکسیداسیون کربن‌منواکسید (-283 MJ/kmol)
۳	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	اکسیداسیون کربن (-394 MJ/kmol)

جدول ۹ واکنش‌های شیمیایی احیاء
Table. 9 chemical reactions of reduction

شماره واکنش	معادله واکنش	توضیحات (ΔH)
۴	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	احیاء (206 MJ/kmol)
۵	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	تولید آب-گاز ^۱ (131 MJ/kmol)
۶	$2CO_2 + 2H_2 \leftrightarrow CO_2 + CH_4$	متان‌زایی (247 MJ/kmol)
۷	$CO_2 + 4H_2 \leftrightarrow 2H_2O + CH_4$	متان‌زایی (165 MJ/kmol)
۸	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	واکنش بودورد ^۲ (172 MJ/kmol)

در جدول ۱۰ داده‌های حاصل از این مدل‌سازی به صورت ترکیب گازهای سنتزی آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد‌های اجزاء تشکیل‌دهنده شامل CO و H_2 با افزایش دمای گازسازی روند صعودی به خود می‌گیرد و گازهای CO_2 و N_2 روند نزولی دارند.

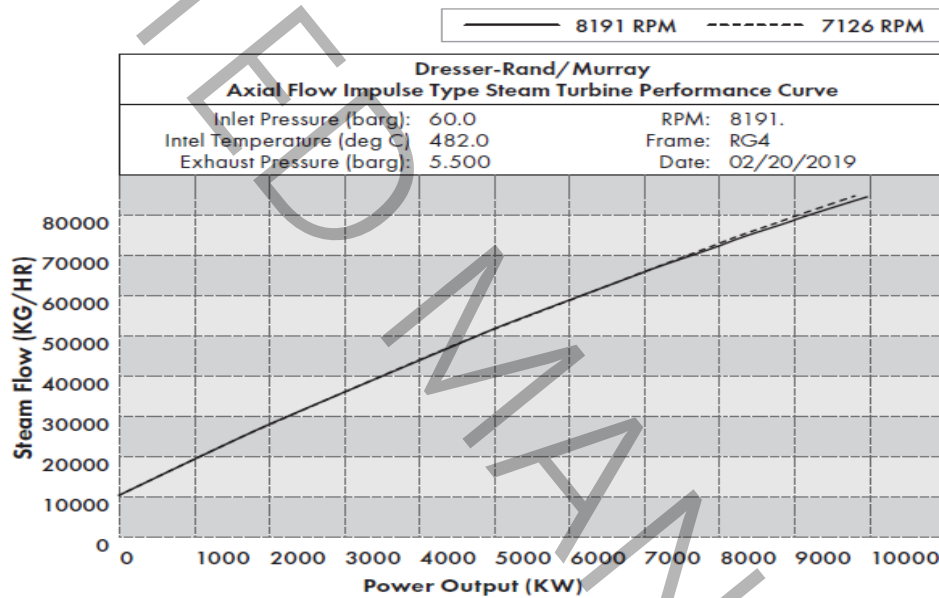
جدول ۱۰ داده‌های عددی ترکیبات گاز سنتزی در دماهای مختلف
Table 10 numerical data of synthesis gas compositions at different temperatures

دما ($^{\circ}C$)	(%) H_2	(%) N_2	(%) CO	(%) CO_2	(%) CH_4
۱۰۰۰	۳۵/۰۰۰۰۴	۲۲/۰۰۰۰۴	۲۹/۹۹۵۱۲	۱۱/۹۹۹۹۹	۱/۰۰۰۰۰
۱۱۰۰	۳۵/۲۱۴۰۰	۲۰/۹۷۵۰۵	۳۰/۰۲۷۷۶	۱۱/۸۶۵۳۷	۱/۰۸۴۳۷۵
۱۲۰۰	۳۵/۶۱۸۶۵	۱۹/۹۳۳۳۹	۳۰/۳۷۱۱۹	۱۱/۴۸۷۱۶	۱/۱۶۲۵۰
۱۳۰۰	۳۶/۲۱۴۰۲	۱۸/۸۷۵۰۷	۳۱/۰۲۵۴۲	۱۰/۸۶۵۳۶	۱/۲۳۴۳۷
۱۴۰۰	۳۷/۰۰۸۰۹	۱۷/۸۰۰۰۷	۳۱/۹۸۰۲۵	۹/۹۹۹۷۵	۱/۳۱۰۲۰
۱۵۰۰	۳۷/۹۷۶۸۶	۱۶/۷۰۸۴۱	۳۳/۴۶۶۲۹	۸/۸۹۰۹۹	۱/۳۵۹۳۷
۱۶۰۰	۳۹/۱۴۴۳۴	۱۵/۶۰۰۰۸	۳۴/۸۵۲۹۲	۷/۵۳۸۴۳	۱/۴۱۲۵۰
۱۷۰۰	۴۰/۵۰۲۵۳	۱۴/۴۷۵۰۹	۳۶/۷۵۰۳۵	۵/۹۴۲۲۷	۱/۴۵۹۳۷

¹ Water-gas reaction

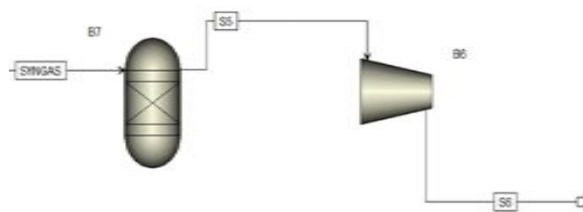
² Bouououard reaction

یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی که در این مقاله سعی شده است، به آن پرداخته شود. این موضوع است، که ارزش حرارتی این گازسنتری چه مقدار خواهد بود و از آن چه میزان الکتریسیته می‌توان تولید به دست آورد. برای شبیه‌سازی سیستم توان از اطلاعات فنی توربین مورای^۱ استفاده می‌شود. نمودار عملکردی این توربین که مطابق شکل ۱۵ می‌باشد، به عنوان ورودی در مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آورده شده است.



شکل ۱۵ شرایط عملکردی توربین [۲۸]
Fig. 15 Turbine operating conditions [28]

فرض ورودی محفظه احتراق بر اساس جدول ۱۰ می‌باشد و فرض بر ورود ۱۰۰۰ مترمکعب گازسنتری می‌باشد. در شکل ۱۶ فلوشیت تولید توان نشان داده شده است.



شکل ۱۶ فلوشیت مدل‌سازی تولید توان در نرم‌افزار Aspen Plus
Fig. 16 Power generation modeling flowchart in Aspen Plus software

^۱ Murray turbine Siemens

جدول ۱۱ نتایج حاصل از مدل سازی و تحلیل و بررسی گاز سنتزی که شامل ارزش حرارتی بالا و ارزش حرارتی پایین حاصل از گاز می شود، را در دماهای مختلف از ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ درجه سانتی گراد نشان می دهد. همچنین میزان الکتریسیته حاصل از این گاز نیز بررسی شده است.

جدول ۱۱ نتایج حاصل از مدل سازی عددی
Table. 11 results of numerical modeling

قدرت (MW)	ارزش حرارتی پایین (MJ/kg)	ارزش حرارتی بالا (MJ/kg)	دما (°C)
۶/۲۵۵۴	۸/۵۶۷	۹/۳۶۱	۱۰۰۰
۶/۳۹۴۱	۸/۷۵۶	۹/۵۷۹	۱۱۰۰
۶/۵۹۰۳	۹/۰۴۲	۹/۸۸۳	۱۲۰۰
۶/۸۵۰۹	۹/۴۰۶	۱۰/۲۷۸	۱۳۰۰
۷/۱۵۷۷	۹/۸۶۰	۱۰/۷۷۲	۱۴۰۰
۷/۴۸۷۹	۱۰/۴۱۴	۱۱/۳۷۱	۱۵۰۰
۷/۸۵۳۶	۱۱/۰۷۵	۱۲/۰۸۵	۱۶۰۰
۸/۲۵۶۹	۱۱/۸۵۳	۱۲/۹۲۴	۱۷۰۰
۸/۷۱۸۷	۱۲/۷۶۱	۱۳/۹۰۲	۱۸۰۰

۳-۵ اعتبارسنجی مدل

برای آن که از صحت و سقم نتیجه حاصل از مدل سازی گاز سازی اطمینان خاطر حاصل شود، برخی از داده های تجربی با داده های حاصل از مدل سازی مقایسه می شود. در نمودار شکل ۱۷ داده های تجربی و عددی مرتبط با ارزش حرارتی بالا گاز سنتزی با یکدیگر مقایسه شده اند.

در جدول ۱۲ تحلیل و بررسی خطا داده های تجربی و عددی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد آورده شده است و درصد خطا مقادیر ارزش حرارتی بالا و اجزاء CO، H₂ بررسی شده است

جدول ۱۲ مقایسه مقادیر عددی و تجربی در دمای ۱۰۰۰ °C

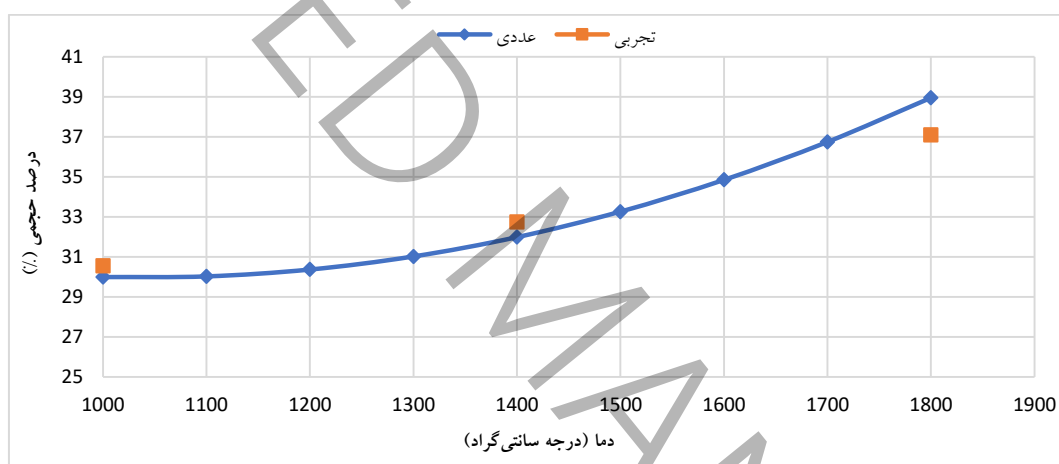
Table. 12 Comparison of numerical and experimental values at 1000°C

CO (%)	H ₂ (%)	ارزش حرارتی بالا (MJ/kg)	دما °C
۳۱	۳۶/۲۰	۸/۸۰۵	تجربی
۲۹/۹۹۵	۳۵/۰۰۰	۹/۳۶۱	عددی
۳/۲۵	۳/۳۲	۶/۳۱	درصد خطا (%)



شکل ۱۷ مقایسه داده‌های عددی و تجربی ارزش حرارتی بالا گاز سنتزی
 Fig. 17 Comparison of numerical and experimental data of high heating value of gas synthesis

در شکل ۱۸ نمودار مقایسه داده‌های عددی و تجربی مربوط به جزء کربن منواکسید مشاهده می‌شود.



شکل ۱۸ مقایسه داده‌های عددی و تجربی CO
 Fig. 18 Comparison of numerical and experimental CO data

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثرات دماهای عملیاتی مختلف بر روی امحاء و گازی‌سازی ضایعات بیمارستانی (بیمارستان فرهیختگان) با استفاده از راکتور مذاب-پلازما مورد بررسی تجربی قرار گرفت. گاز سنتزی حاصله از هر آزمایش در درجه حرارت تعیین شده مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و درصد‌های حجمی اجزاء تشکیل‌دهنده آن در هر دمای عملیاتی تعیین گردید. همچنین ارزش حرارتی گاز سنتزی در هر دمای عملیاتی به صورت تجربی اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

گاز H_2 تشکیل‌دهنده مخلوط خروجی از راکتور در دماهای ۱۰۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد مقادیر ۳۶/۲۰، ۳۷/۱۰ و ۴۰/۴۰ درصد حجمی را به خود اختصاص داده است. ملاحظه می‌شود، که مقدار H_2 روند صعودی به خود گرفته است.

گاز N_2 تشکیل‌دهنده مخلوط خروجی از راکتور در دماهای ۱۰۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد مقادیر ۲۰/۸۵، ۱۸/۵ و ۱۴/۰۵ درصد حجمی را به خود اختصاص داده است. ملاحظه می‌شود، که مقدار N_2 روند تقریباً نزولی به خود گرفته است.

گاز CO تشکیل‌دهنده مخلوط خروجی از راکتور در دماهای ۱۰۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد مقادیر ۳۱، ۳۲ و ۳۶ درصد حجمی را به خود اختصاص داده است. ملاحظه می‌شود، که مقدار CO روند صعودی به خود گرفته است.

گاز CO_2 تشکیل‌دهنده مخلوط خروجی از راکتور در دماهای ۱۰۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد مقادیر ۱۰، ۹/۲۵ و ۷/۲ درصد حجمی را به خود اختصاص داده است. ملاحظه می‌شود، که مقدار CO_2 روند صعودی به خود گرفته است.

گاز CH_4 تشکیل دهنده مخلوط خروجی از راکتور در دماهای ۱۰۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد مقادیر ۱/۱۹، ۱/۰۷ و ۱/۶۴ درصد حجمی را به خود اختصاص داده است. ملاحظه می‌شود، که مقدار CH_4 روند صعودی به خود گرفته است.

همان‌طور که از داده‌های جدول ۴ استنباط می‌شود، مقادیر گازهای آلاینده‌ای همچون NO ، NO_2 ، SO_2 و H_2S در حد بسیار مطلوبی از نقطه نظر زیست‌محیطی قرار دارند.

مقادیر تجربی ارزش حرارتی گاز سنتزی حاصله در دماهای ۱۰۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب مقادیر ۸/۸۰۵، ۹/۶۳۵ و ۱۰/۴۹۷ کیلوژول بر کیلوگرم را به خود اختصاص داده است، که ملاحظه می‌شود، مقدار ارزش حرارتی بالا یک روند صعودی را به خود گرفته است. البته این که با افزایش درجه حرارت گاز حاصله شرایط مطلوب‌تری به خود می‌گیرد، نیز به تنهایی نمی‌تواند معیار درست برای تصمیم‌گیری باشد، زیرا عملیات در دماهای بالا مستلزم انرژی الکتریسیته مصرفی بالاتر توسط قوس پلاسما است و مقادیر نرخ توان پلاسما افزایش خواهد یافت.

افزایش کیفیت گاز سنتزی در بازه دمایی ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل آن می‌باشد، که بر اساس افزایش دما، مقادیر بیشتری از CO_2 وارد واکنش اکسید خواهد شد و مقادیر CO افزایش خواهد یافت.

نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای تشکیل‌دهنده گاز سنتزی مطابق با جدول ۹ می‌باشد، که تقارب قابل قبولی با نتایج تجربی دارد. مقادیر حاصل از مدل‌سازی عددی پنج گاز اصلی گاز سنتزی که شامل N_2 ، CO_2 ، CO ، CH_4 و H_2 می‌باشد. در نمودار شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مقادیر تجربی و عددی ارزش حرارتی بالا و درصد حجمی CO اعتبارسنجی گردیدند.

بر اساس مدل‌سازی صورت گرفته با ترکیب راکتور گازسازی با یک توربین تولید توان، می‌توان از ۱۰۰۰ مترمکعب گاز سنتزی تولیدشده در بازه ۶/۲۵ الی ۸/۷۱ مگاوات انرژی الکتریسیته استحصال کرد.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

ER نسبت هم‌ارزی

HHV ارزش حرارتی بالا، MJ/Nm^3

LHV ارزش حرارتی پایین، MJ/Nm^3

P فشار، atm

T دما، C

t زمان، s

m³ دبی، Lit/s

V حجم، m^3

W توان، kw

علائم یونانی

ρ چگالی، kg/m^3

۶- منابع و مراجع

- [1] N. Jafarzadeh, Introducing hazardous waste according to the Basel Convention and reducing their effects using clean technologies, Sustainability, Development and Environment, 1 (2014) 31-42. (In Persian).
- [2] w. Bidlingmeier, Biological waste treatment and energy production, in: Sardinia2017-30th Anniversary book, 16th International Waste and Landfill symposium, 2017.
- [3] Islamic Republic News Agency, <https://www.irna.ir/news/83893669/>, 2020, (In Persian).

- [4] L. Gray, Plasma gasification as a viable waste-to-energy treatment of municipal solid waste, MANE-6960, (2014).
- [5] S. Ilyas, R.R. Srivastava, H. Kim, Disinfection technology and strategies for COVID-19 hospital and bio-medical waste management, *Science of the Total Environment*, 749 (2020) 141652.
- [6] N. Indrawan, S. Thapa, P.R. Bhoi, R.L. Huhnke, A. Kumar, Electricity power generation from co-gasification of municipal solid wastes and biomass: Generation and emission performance, *Energy*, 162 (2018) 764-775.
- [7] P. Basu, *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*, Academic press, 2010.
- [8] R.F.S. Paulino, A.M. Essiptchouk, L.P.C. Costa, J.L. Silveira, Thermodynamic analysis of biomedical waste plasma gasification, *Energy*, 244 (2022) 122600.
- [9] Z. Wang, C. Baniotopoulos, Thermodynamic analysis of steam gasification for syngas production in Biomass renewable energy using parametric investigation, *Advances in Engineering and Intelligence Systems*, 2(03) (2023).
- [10] N. Mohammadi, E. Afra, Brickets and pellets, solid fuel from biomass, alternative sources of energy, *Scientific Journal of Renewable and New Energies*, 7 (2019) 1. (In Persian).
- [11] <https://www.farsnews.ir/news/14020709000612/>, (In Persian).
- [12] V.E. Messerle, A.L. Mosse, A.B. Ustimenko, Municipal solid waste plasma processing: thermodynamic computation and experiment, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44(12) (2016) 3017-3022.
- [13] Q. Zhang, L. Dor, L. Zhang, W. Yang, W. Blasiak, Performance analysis of municipal solid waste gasification with steam in a Plasma Gasification Melting reactor, *Applied energy*, 98 (2012) 219-229.
- [14] N. Indrawan, S. Mohammad, A. Kumar, R.L. Huhnke, Modeling low temperature plasma gasification of municipal solid waste, *Environmental technology & innovation*, 15 (2019) 100412.
- [15] R.F.S. Paulino, A.M. Essiptchouk, J.L. Silveira, The use of syngas from biomedical waste plasma gasification systems for electricity production in internal combustion: Thermodynamic and economic issues, *Energy*, 199 (2020) 117419.
- [16] S. Saviz, A. Sari, Disposal of Hazardous Waste with The New Thermal Plasma Technology, publication of Rahe farda., Iran, Tehran, (2019). (In Persian)
- [17] G. Su, H.C. Ong, M. Mofijur, T.I. Mahlia, Y.S. Ok, Pyrolysis of waste oils for the production of biofuels: A critical review, *Journal of hazardous materials*, 424 (2022) 127396.
- [18] K. Xiangdong, W. Zhong, D. Wenli, Q. Feng, Three stage equilibrium model for coal gasification in entrained flow gasifiers based on aspen plus, *Chinese journal of chemical engineering*, 21(1) (2013) 79-84.
- [19] G.C. Umenweke, I.C. Afolabi, E.I. Epelle, J.A. Okolie, Machine learning methods for modeling conventional and hydrothermal gasification of waste biomass: A review, *Bioresource Technology Reports*, 17 (2022) 100976.
- [20] P. Mondal, From municipal solid waste (MSW) to hydrogen: performance optimization of a fixed bed gasifier using Box-Benkhen method, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(46) (2022) 20064-20075.
- [21] J. Kumirska, N. Migowska, M. Caban, A. Plenis, P. Stepnowski, Chemometric analysis for optimizing derivatization in gas chromatography-based procedures, *Journal of Chemometrics*, 25(12) (2011) 636-643.
- [22] S. Saviz, D. Dorranean, A.H. Sari, Chemical and pharmaceutical waste disposal with thermal plasma pyrolysis-melting, *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 16(4) (2022) 1-6.
- [23] H. Ronald, Dieck, ISBN10: 1-55617-915, (2007).
- [24] H. Ghassemi, R. Shahsavan-Markadeh, Effects of various operational parameters on biomass gasification process; a modified equilibrium model, *Energy Conversion and Management*, 79 (2014) 18-24.

- [25] V. Messerle, A. Mosse, A. Ustimenko, Processing of biomedical waste in plasma gasifier, Waste management, 79 (2018) 791-799.
- [26] A.A. Erdogan, M.Z. Yilmazoglu, Plasma gasification of the medical waste, International journal of hydrogen energy, 46(57) (2021) 29108-29125.
- [27] E. Fermi, Thermodynamics, Courier Corporation, 2012.
- [28] M.J.T.I. www.turbomachinerymag.com.

Evaluating the energy potential of gas synthesis obtained from the destruction and gasification of hazardous hospital waste with a melting-plasma reactor

Hasan Amirahmadi^a, MohammadHasan Nobakhti^{b1}, GholamReza Salehi^c, Shahrooz Saviz^d

^a PhD student, Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^b Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^c Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^d Professor, Plasma Physics research Center, Science and Research Branch, Azad Islamic University, Tehran, Iran

ABSTRACT

The gasification process of hospital waste, unlike traditional methods such as sterilization and burying waste and conventional incineration, has the ability to use the resulting synthetic gas to produce power and electricity in addition to satisfying environmental standards. In this article, the biomedical wastes of Farhikhtegan Hospital in Tehran were gasified with a molten-plasma gasifier reactor that has a 90 kW torch. Three parameters of equivalence ratio, temperature and gasification factor are considered to be effective factors on the molten-plasma gasification reactor, by keeping equivalence ratio parameters and gasification factor fixed, the gasification process was carried out at different temperatures for the gasification reactor and the gas synthesis resulting from It was analyzed elementally and the percentage of gases that make up gas synthesis includes; CO, H₂, CO₂ and CH₄ were determined. At the temperature of 1400 °C, the amount of CO and H₂ gases were measured as 37.1% and 32%, respectively, and at this temperature, the high heat value of the gas synthesis mixture was 9.635 MJ/kg. Also pollutants such as; H₂S, NO₂ and SO₂ were observed in a very small amount in gas synthesis analysis. In the second phase of this research, the thermodynamic equilibrium modeling of the gasification process of this waste was investigated with Aspen Plus software in the temperature range of 1000 to 1800 °C. All gasification sub-processes including; Drying, pyrolysis, partial combustion and regeneration were modeled in equilibrium with the modules in the software. The results of this modeling of the gasification process were in very good agreement with the experimental results. And the next part of the gasification model was combined with the turbine, to check the amount of available electricity.

KEYWORDS

Keywords: syngas, renewable energy, gasification, hospital waste, Aspen Plus

¹ Corresponding Author Email: m.nobakhti@srbiau.ac.ir