



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

Hasan Amirahmadi ¹, MohammadHasan Nobakhti * ¹, GholamReza Salehi², Shahrooz Saviz ³

¹ Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

³ 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 in 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 (HHV) 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 heater turbine, to check the amount of available electricity.

Review History:

Received: Feb. 28, 2024

Revised: Jun. 13, 2024

Accepted: Jul. 05, 2024

Available Online: Jul. 11, 2024

Keywords:

Syngas

Renewable Energy

Gasification

Hospital Waste

Aspen Plus

1- Introduction

According to a report announced by the Basel Convention in 1989, production waste in hospitals is classified as hazardous waste due to its potential to cause disease [1]. According to the announcement of the World Health Organization (WHO), by 2015, 2 million people were infected with hepatitis C, and about 260 thousand people were infected with AIDS due to accidental exposure to infectious diseases [2]. In recent years, the plasma gasification method has been associated with stunning developments, and more attempts have been made to use this technology to destroy hazardous waste [3]. Gasification is a thermochemical process, in which solid fuel (here hospital waste) is converted into synthesis gas through partial oxidation at high temperatures, usually (800-900°C) [4]. The gasification process includes four sub-processes including drying, pyrolysis, partial combustion, and reforming [5].

In this article, the synthetic gas from the destruction and gas waste of the hospital of Tehran Hospital was analyzed

in the PGM¹ reactor. Subsequently, using the Aspen Plus software and equilibrium thermodynamic model based on the minimum Gibbs energy modeling, combined with a turbine to determine the amount of electricity available from 1000m³ of syngas at different operating temperatures.

2- Methodology

The PGM reactor of this research belongs to the Plasma Physics Research Center of Islamic Azad University. This reactor consists of an air compressor, control room, electrical system, control system, feed supply system, contamination filters, jet fan, water source, and insulation and cooling system. mass of flow is 100 kg/h inlet feed flow and the flow of the inlet air to the reactor is 60 liters per minute. The diameter of the gas column is 1.1m. The gas temperature is adjustable in the range of 1000 to 1800°C. And the temperature of the pyrolysis is 400°C. To achieve sustainable functioning conditions, the device requires 5 hours before.

¹ Plasma Melting Gasifier (PGM)

*Corresponding author's email: m.nobakhti@srbiau.ac.ir





Fig. 1. PGM reactor of the current research

Synthesis gas output from the PGM reactor was analyzed and analyzed by three different methods. CO_2 , O_2 , NO , NO_2 , CH_4 , H_2S , and SO_2 gases were analyzed and checked with the MRU VARIO PLUS device. N_2 and H_2 were collected in a Tedlar bag with a vacuum pump and analyzed and analyzed in the laboratory with a gas chromatography (GC) device from the Agilent brand, model 6860. CO was also analyzed and analyzed with FANPAYA device after dilution.

For the gasification process, parameters such as reactor pressure and temperature, feed type, feed particle size, residence time, equivalence ratio (ER), gasification agent, and catalyst can affect the gasification process [6]. In this study, only temperature will be a variable parameter and the gas synthesis composition will change based on it.

For the gasification process, parameters such as reactor pressure and temperature, feed type, feed particle size, residence time, equivalence ratio (ER), gasification agent, and catalyst are effective on the gasification process [7]. In general, the gasification process and the quality of the resulting synthetic gas are also measured with things like gasification efficiency, cold gas efficiency (CGE), and high heat value (HHV) [8]. The HHV parameter for the resulting synthetic gas is defined as equation 1.

$$HHV_{\text{Syngas}} = 12.75[H_2] + 12.63[CO] + 39.43[CH_4] + 63.43[C_2H_4] \quad (1)$$

In this regard, [-] species concentration is in terms of molar ratio and HHV is in terms of kJ/kg.

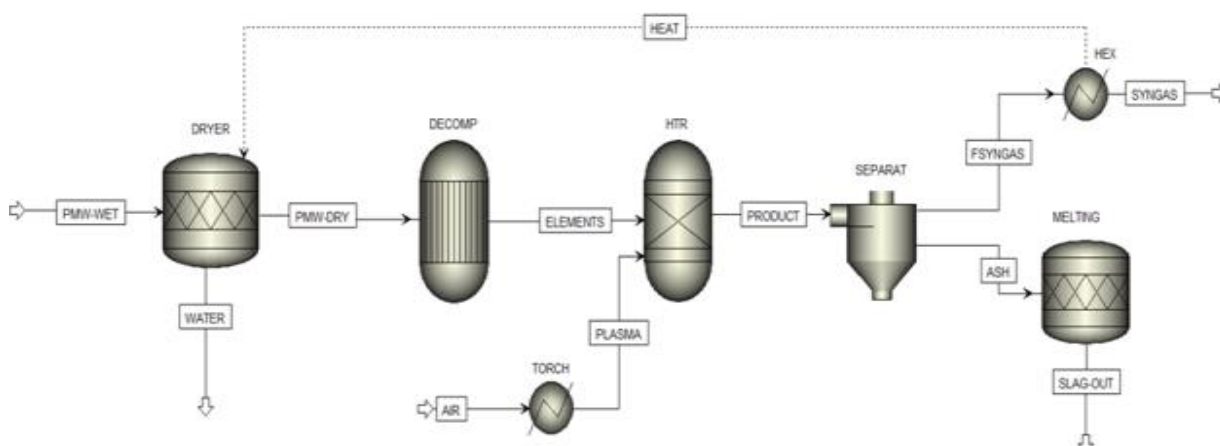


Fig. 2. Modeling flow sheet in Aspen Plus software



Fig. 3. Power generation modeling flowchart in Aspen Plus software

3- Results and Discussion

Table 1. Analysis and investigation of gas synthesis at different temperatures

| Gas | 1000°C | 1400°C | 1800°C |
|---------------------|--------|--------|--------|
| CH ₄ (%) | 1.07 | 1.19 | 1.64 |
| H ₂ (%) | 36.20 | 37.10 | 40.40 |
| CO ₂ (%) | 10 | 9.25 | 7.20 |
| CO (%) | 31 | 32 | 36 |
| N ₂ (%) | 20.85 | 18.50 | 14.05 |
| Sum (%) | 99.12 | 98.04 | 99.27 |
| HHV (kJ/kg) | 8805 | 9635 | 10497 |

Table 2. Analysis and investigation of pollutants at different temperatures

| Gas | 1000°C | 1400°C | 1800°C |
|-----------------------|--------|--------|--------|
| O ₂ (ppm) | 43 | 26 | 18 |
| H ₂ S(ppm) | 1 | 4 | 2 |
| NO ₂ (ppm) | 17 | 11 | 17 |
| NO (ppm) | 26 | 20 | 13 |
| SO ₂ (ppm) | 6 | 4 | 1 |

Table 3. Results of numerical modeling

| Temp (°C) | LHV (kJ/kg) | HHV (kJ/kg) | Power (MW) |
|-----------|-------------|-------------|------------|
| 1000 | 9.361 | 8.567 | 6.2554 |
| 1100 | 9.579 | 8.756 | 6.3941 |
| 1200 | 9.883 | 9.042 | 6.5903 |
| 1300 | 10.278 | 9.406 | 6.8509 |
| 1400 | 10.772 | 9.860 | 7.1577 |
| 1500 | 11.371 | 10.414 | 7.4879 |
| 1600 | 12.085 | 11.075 | 7.8536 |
| 1700 | 12.924 | 11.853 | 8.2569 |
| 1800 | 13.902 | 12.761 | 8.7187 |

4- Conclusions

The most important results of this study:

1- The H₂ gas forming the mixture exiting from the reactor at temperatures of 1000, 1400, and 1800 °C has occupied the values of 36.20%, 37.10%, and 40.40% by volume. It can be seen that the value of H₂ has taken an upward trend.

2- The CO gas that forms the mixture exiting from the reactor at temperatures of 1000, 1400, and 1800 °C has 31%, 32%, and 36% by volume.

4- The amounts of polluting gases such as NO, NO₂, SO₂, and H₂S are at a very desirable level from the environmental point of view.

5- The experimental values of the calorific value of the produced synthetic gas at temperatures of 1000, 1400, and 1800 °C have been assigned the values of 8.805, 9.635, and 10.497kJ/kg, respectively, which is observed, the amount of HHV It has taken an upward trend. Of course, the fact that the resulting gas becomes more favorable as the temperature increases, alone cannot be the right criterion for making a decision, because operation at high temperatures requires higher electricity consumption by the plasma

6- Based on the modeling done by combining the gasification reactor with a power generation turbine, 1000 m³ of synthetic gas produced in the range of 6.25 to 8.71MW of electricity can be obtained.

References

- [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] 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.
- [4] P. Basu, Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory, Academic press, 2010.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.



ارزیابی پتانسیل انرژی گازسنتری حاصله از امحاء و گازسازی پسماند خطرناک بیمارستانی با راکتور مذاب-پلازما

حسن امیراحمدی^۱، محمدحسن نوبختی^{۱*}، غلامرضا صالحی^۲، شهرزاد ساویز^۳
 ۱. گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
 ۲. گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
 ۳. مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۹
 بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۲۴
 پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۵
 ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۴/۲۱

کلمات کلیدی:

گازسنتری
 انرژی تجدید پذیر
 گازسازی
 پسماند بیمارستانی
 اسپن پلاس

خلاصه: 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 سنتری حاصله به‌منظور تولید توان و الکتریسیته بهره برد. در مقاله حاضر، ضایعات زیست‌پزشکی بیمارستان فرهیختگان تهران با راکتور گازساز مذاب-پلازما که دارای مشعل ۹۰ کیلووات است، گازسازی شد. سه پارامتر نسبت هم‌ارزی، دما و عامل گازسازی از عوامل مؤثر بر راکتور گازساز مذاب-پلازما به‌حساب می‌آیند، با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای نسبت‌هم‌ارزی و عامل گازسازی فرآیند گازسازی در دماهای مختلف برای راکتور گازساز انجام شد و گازسنتری حاصله از آن تحلیل و بررسی عنصری شد و درصد گازهای تشکیل‌دهنده گازسنتری شامل: CO_2 ، CO ، H_2 و CH_4 تعیین گردید. در دمای ۱۴۰۰ درجه‌سانتی‌گراد میزان گازهای CO و H_2 به ترتیب به میزان ۳۷/۱ درصد و ۳۳ درصد اندازه‌گیری شد، که در این دما، ارزش حرارتی بالا از مخلوط گازسنتری ۹/۶۳۵ مگاژول بر کیلوگرم به دست آمد. همچنین آلاینده‌هایی مانند H_2S ، NO_x و SO_2 در حد بسیار کمی در تحلیل و بررسی گازسنتری مشاهده شد. در فاز دوم این پژوهش، مدل‌سازی تعادلی ترمودینامیکی فرآیند گازسازی این پسماند در نرم‌افزار اسپن‌پلاس در بازه دمایی ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ درجه‌سانتی‌گراد بررسی شد. تمام زیر فرآیندهای گازسازی شامل؛ خشک‌کردن، پیرولیز، احتراق جزئی و احیاء با مازول‌های 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 قابل دسترس بررسی گردد.

۱- مقدمه

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 برآورد بر خورد سهوی با زباله‌های عفونی ۲ میلیون نفر به هپاتیت سی و حدود ۲۶۰ هزار نفر به ایدز مبتلا شده‌اند [۲]. مطابق با آمارهای رسمی منتشر شده 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 شبه‌خانگی 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 کاماچو 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 سنتری تبدیل می‌شود. این

- 1 World Health Organization (WHO)
- 2 Sterilization
- 3 Conventional Incineration
- 4 Plasma Gasification

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.nobakhti@srbiau.ac.ir



شهر گوآتراتینگورا^۵ ایالات سائوپائولو^۶ کشور برزیل داشتند. ایشان استفاده از گاز سنتزی 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 سنتزی حاصله برای تولید الکتریسیته بهره ببرد. 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 مورد نیاز 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 شهرهای اطراف صورت پذیرد و در بهترین حالت ۴ سال خواهد بود. قابل پیش‌بینی به نظر می‌رسد، که می‌توان از این گاز سنتزی به منظور تولید الکتریسیته در میکرو توربین‌ها یا حتی به منظور تهیه آبگرم نیز بهره برد.

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 سنتزی حاصله مورد تحلیل و بررسی عنصری قرار گرفت. در فاز دوم با استفاده از مدل‌سازی تعادلی ترمودینامیکی در نرم‌افزار اسپن‌پلاس^۷، فرآیند گازسازی مدل شد و در پایان عملکرد گازسنتزی حاصله برای تولید الکتریسیته در یک توربین بررسی شد.

۲- روش و مواد پژوهش

۲-۱- معرفی راکتور PGM

شکل ۲ راکتور مذاب-پلاسما پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. این راکتور متعلق به مرکز تحقیقات فیزیک پلاسماهای 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

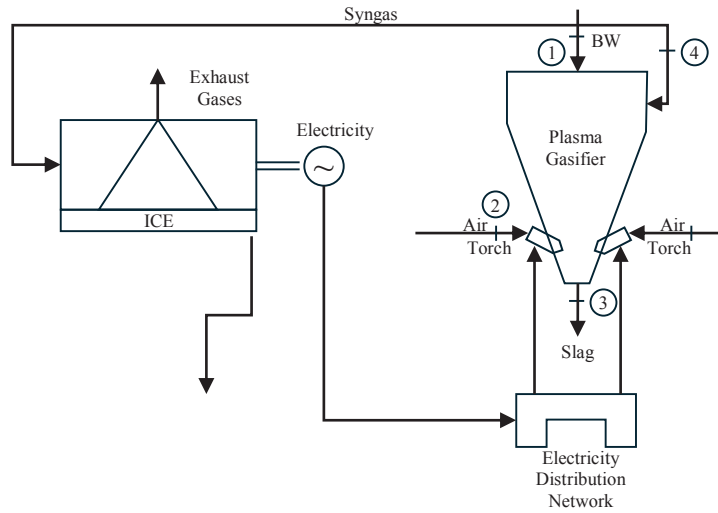
گاز عمدتاً شامل CO، H₂، CO₂ و CH₄ با مقدار بسیار اندکی بخار آب و مقدار ناچیزی هیدروکربن‌های دو یا سه کربنه می‌باشد. فرآیند گازسازی شامل چهار زیر فرآیند شامل خشک‌کردن، پیرولیز^۱، احتراق جزئی و احیاء^۲ می‌باشد [۷، ۸].

گازسنتزی 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^۳ 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 گازسنتزی 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^۴ به دست می‌آید. سیلوا پائولینو و همکاران [۱۵] پژوهشی بر روی گازسازی ضایعات بیمارستانی

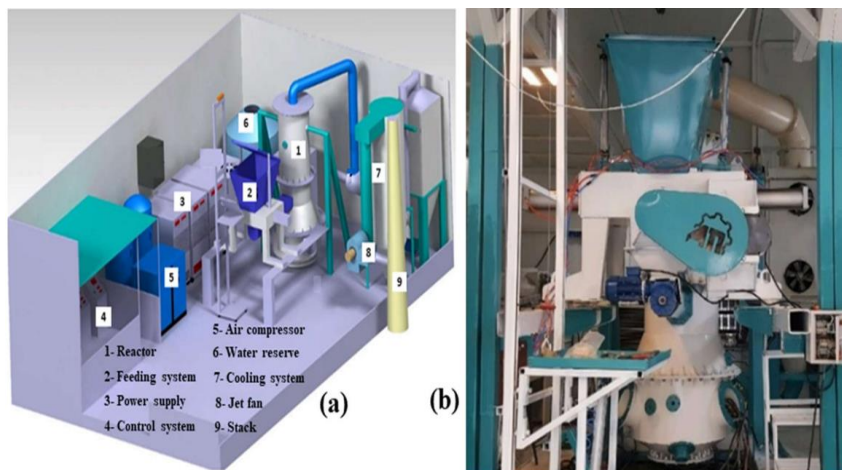
- 1 Pyrolysis
- 2 Reforming
- 3 Plasma Gasification Melting (PGM)
- 4 kW per kg/s

- 5 Guaatratiguera
- 6 Sao Paulo
- 7 Aspen Plus



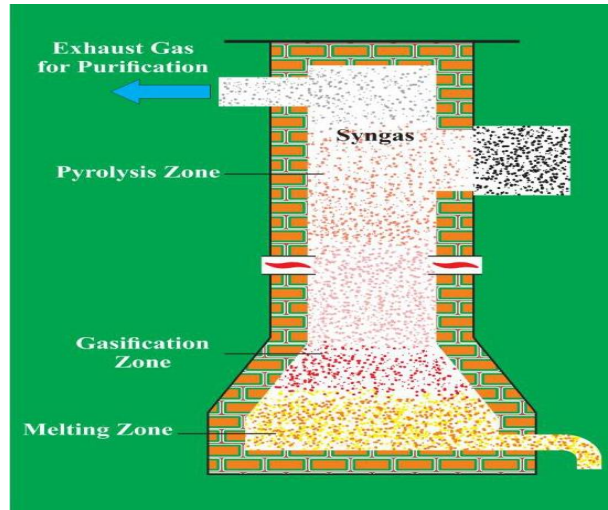
شکل ۱. شماتیک طرح ترکیبی گازساز پلاسما و موتور احتراق داخلی [۱۵]

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



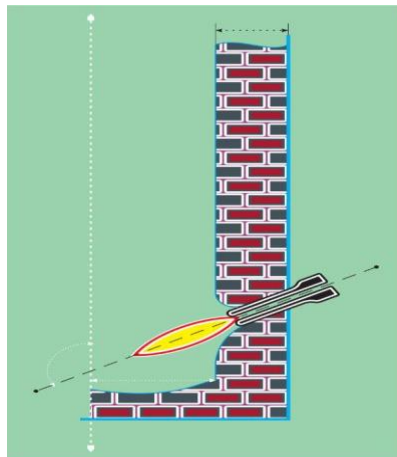
شکل ۲. راکتور PGM پژوهش حاضر

Fig. 2. PGM reactor of the current research



شکل ۳. شماتیک راکتور PGM

Fig. 3. PGM reactor schematic



شکل ۴. شماتیک نحوه قرارگیری مشعل پلاسما

Fig. 4. schematic of how to place the plasma torch

گردیده است.

در شکل ۴ شماتیک قرارگیری مشعل پلاسما درون راکتور مذاب-پلاسما مشاهده می‌شود. راکتور حاضر از ۲ مشعل پلاسما 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.

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.

در شکل ۳ شماتیک یک راکتور مذاب-پلاسما مشاهده می‌شود، ناحیه مذاب سازی^۱، ناحیه گازسازی، ناحیه پیرولیز، محل قرارگیری مشعل پلاسما و ورودی‌های به راکتور و خروج گازسنتزی از آن مشخص

1 Melting Zone



شکل ۵. ضایعات تولیدی بیمارستان فرهیختگان

Fig. 5. Production waste of Farhikhtegan Hospital

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 |

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].

پارامتر ارزش حرارتی بالا برای گاز سنتری حاصله به‌صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود [۱۹].

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

۲-۲- معرفی خوراک

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

تحلیل و بررسی این خوراک گازسازی توسط ساوینز 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 به‌کاررفته است، دارای فرمول شیمیایی $C_6H_{8.8}O_{2.3}$ می‌باشد.

۲-۳- طراحی آزمایش^۱:

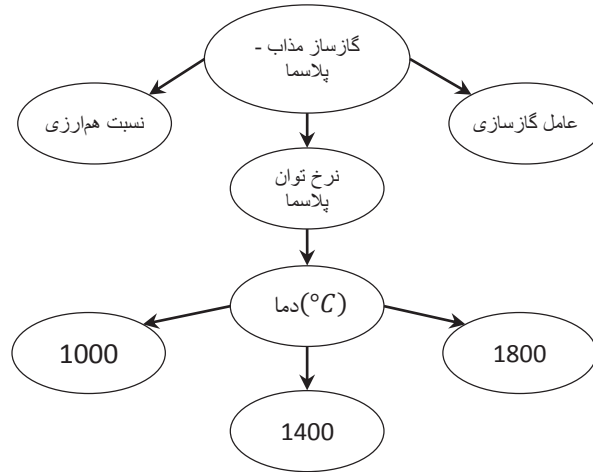
برای فرآیند گازسازی پارامترهایی مانند فشار و دمای راکتور، نوع خوراک، اندازه ذرات خوراک، زمان ماند، نسبت هم‌ارزی^۲، عامل گازسازی و کاتالیست قابل تأثیر بر روی فرآیند گازسازی هستند [۱۷].

3 Cold Gas Efficiency (CGE)

4 High Heat Value (HHV)

1 Design of Experiment (DOE)

2 Equivalence Ratio (ER)



شکل ۶. شماتیک پژوهش DOE

Fig. 6. Schematic DOE research

بازمان 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.

۲-۴- مکانیزم تحلیل و بررسی اندازه‌گیری:

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

گاز سنتزی خروجی از راکتور مذاب-پلاسما با سه روش مختلف تحلیل و بررسی شد. گازهای SO_2 و H_2S ، CH_4 ، NO_2 ، NO ، O_2 ، CO_2 با دستگاه ام‌آریو واریو پلاس^۳ در محل تحلیل و بررسی شد. H_2 و N_2 با پمپ خلأ در کیسه تدارک جمع شد و در آزمایشگاه با دستگاه گاز کروماتوگرافی^۴ از برند اجیلنت^۵ مدل ۶۸۶۰ تحلیل و بررسی شد. CO نیز پس از رقیق‌سازی با دستگاه فن‌پایا^۶ 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 پرآب^۷ به محفظه راکتور متصل می‌شود و به‌صورت در لحظه مقادیر را

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

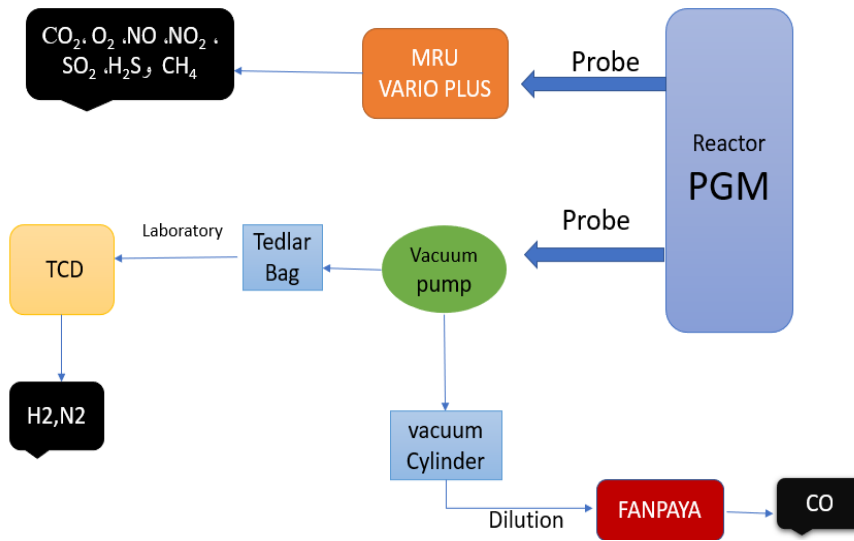
این سیستم امحاء و گازسازی، به‌طور کلی به سه پارامتر عامل گازسازی^۱، نسبت هم‌ارزی و دمای ستون راکتور وابسته است [۲۰]. در این پژوهش عامل گازسازی ثابت می‌باشد و از هوای خشک استفاده می‌شود و از تزریق بخار به سیستم گازساز خودداری می‌شود. نسبت هم‌ارزی نیز ثابت و برابر ۰/۰۸ در نظر گرفته می‌شود. تنها با تغییرات 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 به‌صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود. در این رابطه P_{pla} توان قابل تنظیم مشعل پلاسما است و m دبی جرمی خوراک ورودی است.

$$PER = \frac{P}{LHV \times m} \quad (3)$$

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 به‌طور مستقیم بر دما اثرگذار است، تغییر می‌کند. بنابراین تغییرات از نوع یک متغیر

3 MRU VARIO PLUS
4 Gas Chromatography (GC)
5 Agilent
6 FANPAYA
7 Probe

1 Agent
2 PER



شکل ۷. شماتیک مکانیزم آزمایش‌ها

Fig. 7. Schematic of the experiment mechanism



شکل ۸. دستگاه MRU VARIO PLUS

Fig. 8. MRU VARIO PLUS device



شکل ۹. پراب استفاده شده

Fig. 9. Used probe



شکل ۱۰. دستگاه گاز کروماتوگرافی از برند اجیلنت

Fig. 10. Agilent brand GC device

حاصله از فرآیند گازی سازی 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

1 Method 7E
2 Method 10E

خوانش می‌کند. در شکل ۱۰ دستگاه گاز کروماتوگرافی از برند اجیلنت، مدل ۶۸۶۰ مشاهده می‌شود. در جدول ۲، خطا تحلیل و بررسی درصد‌های خروجی گازهای تشکیل‌دهنده بر اساس کالیبراسیون‌های اعلامی آورده شده است. از این داده‌ها برای محاسبه عدم قطعیت نتایج تجربی بهره برده شده است. بامطالعه ادبیات پیشین متوجه این موضوع آشکار شد، که گاز سنتزی

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 |

جدول ۳. تحلیل و بررسی گازسنجی در دماهای مختلف

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

| ۱۸۰۰°C | ۱۴۰۰°C | ۱۰۰۰°C | گاز |
|--------|--------|--------|---------------------|
| ۱/۶۴ | ۱/۱۹ | ۱/۰۷ | (%) CH ₄ |
| ۴۰/۴۰ | ۳۷/۱۰ | ۳۶/۲۰ | (%) H ₂ |
| ۷/۲۰ | ۹/۲۵ | ۱۰ | (%) CO ₂ |
| ۳۶ | ۳۲ | ۳۱ | (%) CO |
| ۱۴/۰۵ | ۱۸/۵۰ | ۲۰/۸۵ | (%) N ₂ |
| ۹۹/۲۷ | ۹۸/۰۴ | ۹۹/۱۲ | جمع کل (%) |

۳- نتایج

۳-۱- نتایج تجربی

تحلیل و بررسی گازهای تشکیل‌دهنده گازسنجی 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 گازسنجی، 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.

آمریکا^۱ منتشر شده است.

و در آن شرح تحلیل و بررسی و اندازه‌گیری استاندارد گازها داده شده است، تکنیک رقیق‌سازی^۲ 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].

- 1 Environmental Protection Agency
- 2 Dilution

جدول ۴. تحلیل و بررسی آلاینده‌ها در دماهای مختلف

Table 4. Analysis and investigation of pollutants at different temperatures

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



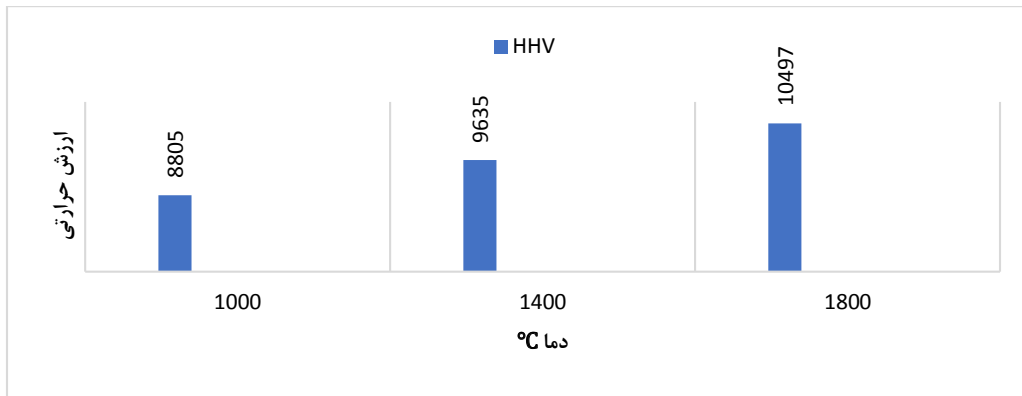
شکل ۱۱. سرباره داغ خارج شده از گازساز

Fig. 11. Hot slag removed from the gasifier



شکل ۱۲. سرباره سردشده

Fig. 12. Cooled slag



شکل ۱۳. نمودار تغییرات ارزش حرارتی برای دماهای مختلف عملیاتی

Fig. 13. The diagram of calorific value changes for different operating temperatures

اگر نتایج محاسبه شده I 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. می توان رابطه زیر را نوشت [۱۷]:

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

مقدار خطای ایجاد شده در ارزش حرارتی بالا گازسنتری برابر 0.217% کیلوژول بر کیلوگرم خواهد بود.

۳-۳- صحت سنجی 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 گازسنتری حاصله ایجاد کند [۲۴]. برای مقایسه مقادیر نتایج گاز سنتری در

تحلیل و بررسی سرباره سردشده بیمارستان فرهیختگان در سایر مقالات علمی دیگر منتشر شده است. نتایج نشان داده است، که این سرباره شامل ترکیبات شیمیایی معدنی از قبیل SiO_2 ، CaO ، Al_2O_3 و Na_2O می‌باشد. در این بین سهم SiO_2 با $56/92\%$ درصد مقدار قابل‌توجهی 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.

با استفاده از رابطه ۲ و جدول ۳ ارزش حرارتی گاز سنتری برای دماهای 1000 ، 1400 و 1800 درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر 8805 ، 9635 و 10497 کیلوژول بر کیلوگرم به دست خواهد آمد.

۳-۲- 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 $2/38\%$ برای متان تعریف شده است، که این به معنای آن است، که چنانچه مقدار متان 1 درصد خوانده شود، مقدار حقیقی متان می‌تواند در بازه $(1/0.238 - 0/9762)$ 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]:

1 Kline-Mcclitock method

جدول ۵. صحت‌سنجی نتایج تجربی

Table 5. validation of experimental results

| نوع پسماند | نوع راکتور | (%) H_2 | (%) CO | (%) N_2 |
|------------------------|---------------|-----------|----------|-----------|
| تحقیق حاضر | 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 | ---- |

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 هم‌دما فرض می‌شود.
- واکنش‌ها به صورت تعادلی در نظر گرفته می‌شود و نرخ انجام واکنش‌ها در نظر گرفته نمی‌شود.

به‌طور کلی به 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 استفاده‌شده 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 مدل‌های گازسازی در جدول ۶ بیان شده است [۲۷].

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{(V_m^2 + 2bV_m - b^2)} \quad (6)$$

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

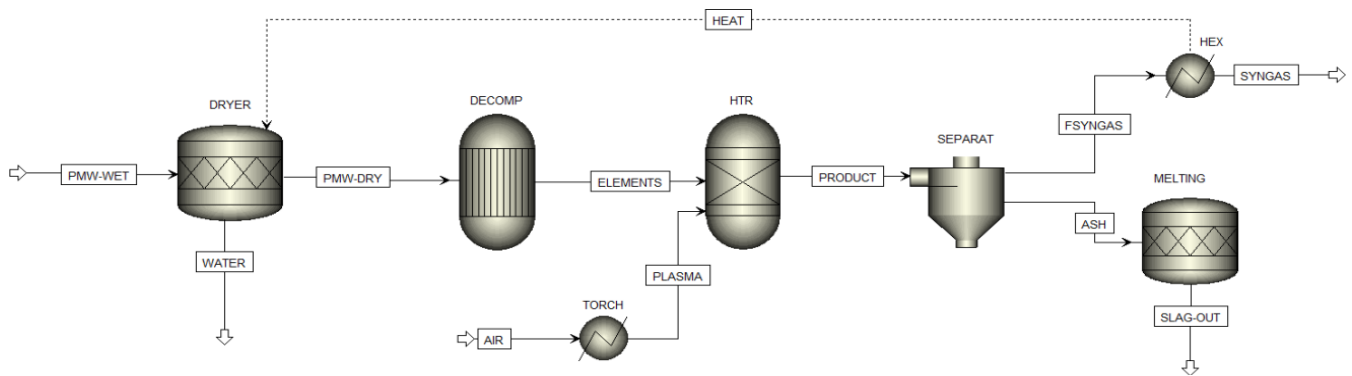
مسرل نتایج تحقیقات تجربی خود را که بر روی پسماند کشور روسیه صورت پذیرفته بود، را ارائه نموده‌اند. در این پژوهش مشعل جریان مستقیم با توان ۷۰ کیلووات و خوراک ورودی به راکتور با نرخ ۳۰ کیلوگرم بر ساعت بود. اردوغان با مطالعه‌ای عددی برای راکتور پلاسمای معمولی نسبت هم‌ارزی را متغیر بین ۰/۱ تا ۰/۵ در نظر گرفت. 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

1 Equation of State (EOS)

2 Peng- Robinson



شکل ۱۴. فلوشیت مدل سازی در نرم افزار Aspen Plus

Fig. 14. Modeling flow sheet in Aspen Plus software

تشکیل دهنده شامل CO و H_2 با افزایش دمای گازسازی روند صعودی به خود می‌گیرد و گازهای CO_2 و N_2 روند نزولی دارند.

یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی که در این مقاله سعی شده است، به آن پرداخته شود. این موضوع است، که ارزش حرارتی این گاز سنتزی چه مقدار خواهد بود و از آن چه میزان الکتریسیته می‌توان تولید به دست آورد. برای شبیه‌سازی سیستم توان از اطلاعات فنی توربین مورای^۲ استفاده می‌شود. نمودار عملکردی این توربین که مطابق شکل ۱۵ می‌باشد، به عنوان ورودی در مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آورده شده است.

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

جدول ۱۱ نتایج حاصل از مدل‌سازی و تحلیل و بررسی گاز سنتزی که شامل ارزش حرارتی بالا و ارزش حرارتی پایین حاصل از گاز می‌شود، را در دماهای مختلف از ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. همچنین میزان الکتریسیته حاصل از این گاز نیز بررسی شده است.

۳-۵- اعتبارسنجی مدل

برای آن که از صحت و وسقم نتیجه حاصل از مدل‌سازی گازسازی اطمینان خاطر حاصل شود، برخی از داده‌های تجربی با داده‌های حاصل از مدل‌سازی مقایسه می‌شود. در نمودار شکل ۱۷ داده‌های تجربی و عددی

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

$$a = \frac{0.45724R^2T_c^2}{P_c} \quad (۶-الف)$$

$$b = \frac{0.01778RT_c}{P_c} \quad (۶-ب)$$

$$\alpha = (1 + (1 - \sqrt{T_r}))^2 \quad (۶-ج)$$

$$k = 0.374646 + 1.54226w - 0.26992w^2 \quad (۶-د)$$

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.

در جدول ۱۰ داده‌های حاصل از این مدل‌سازی به صورت ترکیب گازهای سنتزی آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد‌های اجزاء

جدول ۶. شرایط کاری اعمال شده

Table 6. applied working conditions

| مقدار | مشخصه کاری |
|--------------|----------------------------|
| ۳۰°C | دمای خوراک ورودی به راکتور |
| ۱atm | 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 |
| ۰/۹۵atm | فشار هوای ورودی به کمپرسور |
| ۶۰ Lit/m | دبی هوای ورودی به راکتور |
| ۶۰ bar | فشار بخار ورودی به توربین |
| ۵/۵bar | 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 |

جدول ۷. توضیحات مربوط به ماژول‌های مربوط به مدل‌سازی

Table 7. Descriptions of modules related to modeling

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

جدول ۸. واکنش‌های شیمیایی احتراق جزئی

Table 8. Chemical reactions of partial combustion

| توضیحات (ΔH) | معادله واکنش | شماره واکنش |
|---|-------------------------------|-------------|
| اکسیداسیون جزئی کربن (۱۱۱ MJ/kmol) | $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ | ۱ |
| اکسیداسیون کربن منواکسید (-۲۸۳ MJ/kmol) | $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$ | ۲ |
| اکسیداسیون کربن (-۳۹۴ MJ/kmol) | $C + O_2 \rightarrow CO_2$ | ۳ |

جدول ۹. واکنش‌های شیمیایی احیاء

Table 9. chemical reactions of reduction

| توضیحات (ΔH) | معادله واکنش | شماره واکنش |
|---|--|-------------|
| احیاء (۲۰۶ MJ/kmol) | $CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$ | ۴ |
| تولید آب-گاز ^۱ (۱۳۱ MJ/kmol) | $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ | ۵ |
| متان‌زایی (۲۴۷ MJ/kmol) | $2CO_2 + 2H_2 \leftrightarrow CO_2 + CH_4$ | ۶ |
| متان‌زایی (۱۶۵ MJ/kmol) | $CO_2 + 4H_2 \leftrightarrow 2H_2O + CH_4$ | ۷ |
| واکنش بودورد ^۲ (۱۷۲ MJ/kmol) | $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ | ۸ |

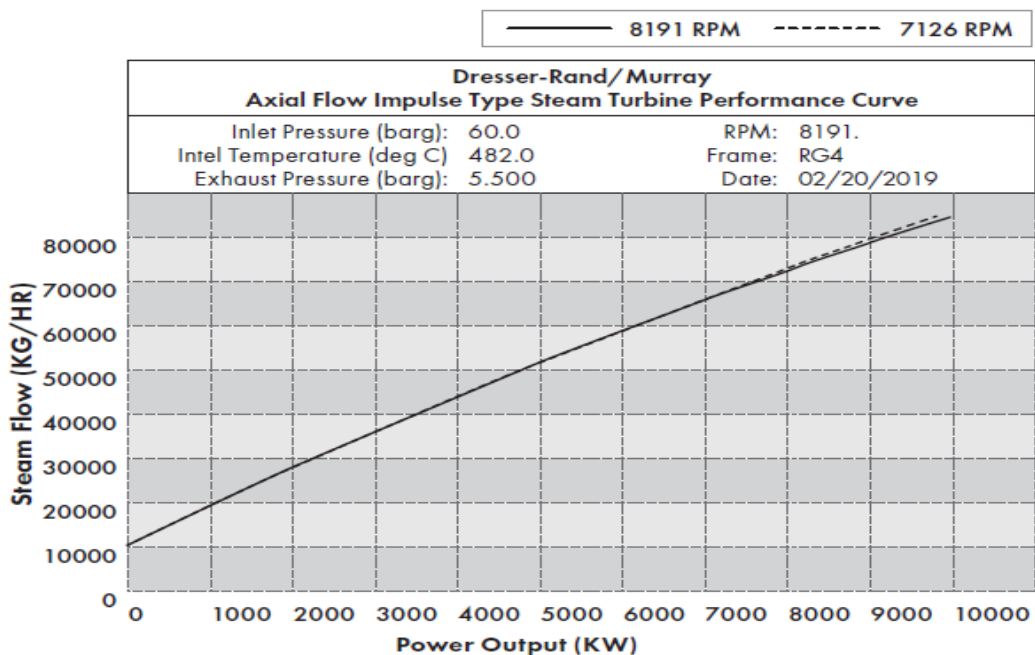
¹ Water-gas reaction

² Bouououard reaction

جدول ۱۰. داده‌های عددی ترکیبات گاز سنتزی در دماهای مختلف

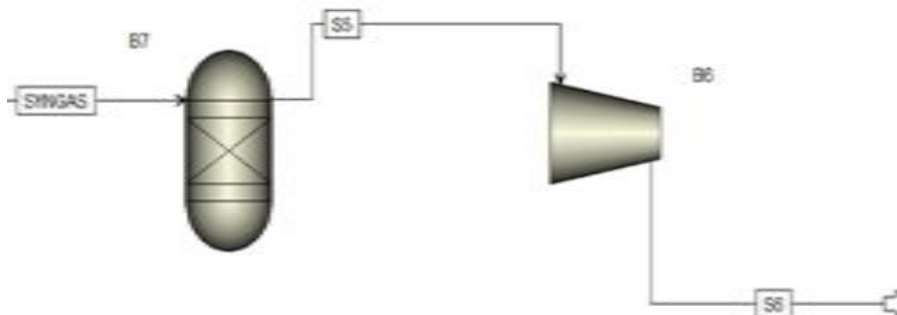
Table 10. numerical data of synthesis gas compositions at different temperatures

| دما (°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 | ۳۳/۲۶۶۲۹ | 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 |
| ۱۸۰۰ | ۴۲/۰۵۱۴۲ | ۱۳/۳۳۳۴۲ | ۳۸/۹۵۸۵۸ | ۴/۱۰۲۵۲ | ۱/۴۹۷۱۹ |



شکل ۱۵. شرایط عملکردی توربین [۲۸]

Fig. 15. Turbine operating conditions [28]



شکل ۱۶. فلو شیت مدل سازی تولید توان در نرم افزار Aspen Plus

Fig. 16. Power generation modeling flowchart in Aspen Plus software

جدول ۱۱. نتایج حاصل از مدل سازی عددی

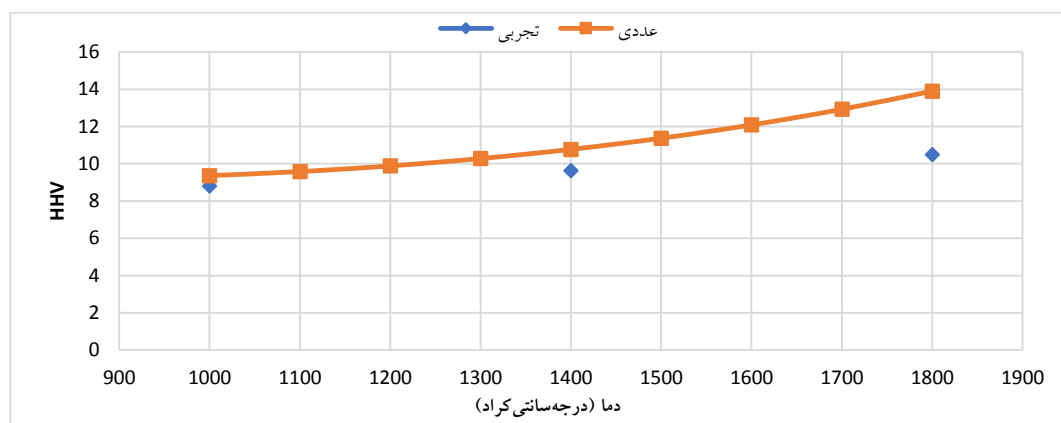
Table 11. results of numerical modeling

| قدرت (MW) | ارزش حرارتی پایین (MJ/kg) | ارزش حرارتی بالا (MJ/kg) | دما (°C) |
|-----------|---------------------------|--------------------------|----------|
| ۶/۳۵۵۴ | 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 |

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

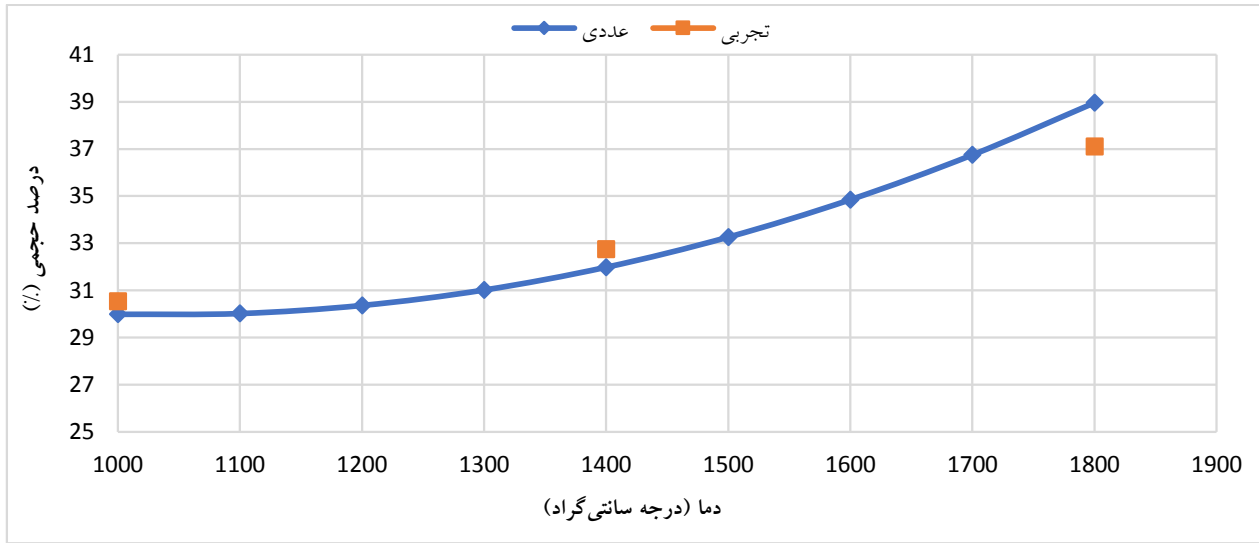
Table 12. Comparison of numerical and experimental values at 1000 °C

| CO (%) | H ₂ (%) | ارزش حرارتی بالا (MJ/kg) | دما °C |
|--------|--------------------|--------------------------|--------------|
| ۳۱ | ۳۶/۲۰ | ۸/۸۰۵ | تجربی |
| ۲۹/۹۹۵ | ۳۵/۰۰۰ | ۹/۳۶۱ | عددی ۱۰۰۰ |
| ۳/۲۵ | ۳/۳۲ | ۶/۳۱ | درصد خطا (%) |



شکل ۱۷. مقایسه داده های عددی و تجربی ارزش حرارتی بالا گاز سنتزی

Fig. 17. Comparison of numerical and experimental data of high heating value of gas synthesis



شکل ۱۸. مقایسه داده‌های عددی و تجربی CO

Fig. 18. Comparison of numerical and experimental CO data

گاز N_2 تشکیل دهنده 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 تشکیل دهنده 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 تشکیل دهنده 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 ۱/۰۷، ۱/۱۹ 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.

مرتبط با ارزش حرارتی بالا گازسنتری با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در جدول ۱۲ تحلیل و بررسی خطا داده‌های تجربی و عددی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد آورده شده است و درصد خطا مقادیر ارزش حرارتی بالا و اجزاء CO ، H_2 بررسی شده است. در شکل ۱۸ نمودار مقایسه داده‌های عددی و تجربی مربوط به جزء کربن منواکسید مشاهده می‌شود.

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 سنتری حاصله از هر آزمایش در درجه حرارت تعیین شده مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و درصدهای حجمی اجزاء تشکیل دهنده آن در هر دمای عملیاتی تعیین گردید. همچنین ارزش حرارتی گاز سنتری در هر دمای عملیاتی به صورت تجربی اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

گاز H_2 تشکیل دهنده 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.

منابع

- [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
- 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 CO_2 ، CO ، CH_4 و H_2 می‌باشد. در نمودار شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مقادیر تجربی و عددی ارزش حرارتی بالا و درصدحجمی س 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 حجم، Lit/s

V توان، kw

W توان، kw

علائم یونانی

ρ چگالی، kg/m^3

- 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. Dorrnian, 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.
- 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

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Amirahmadi¹, M. H. Nobakhti, Gh. R. Salehi, Sh. Saviz, Evaluating the energy potential of gas synthesis obtained from the destruction and gasification of hazardous hospital waste with a melting-plasma reactor, Amirkabir J. Mech Eng., 56(2) (2024) 295-318.

DOI: [10.22060/mej.2024.23022.7709](https://doi.org/10.22060/mej.2024.23022.7709)



