



Gasification of petroleum and chemical base fuels with the aim of hydrogen-rich syngas

Ershad Mardani, Hamidreza Farshi Fasih*, Elyas Lekzian

Department of Aerospace Engineering, Faculty of New Science and Technologies, Semnan University, Semnan, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Mixture Fuel
Syngas
Gasification
Hydrogen

ABSTRACT

In this study, the co-gasification of mazut as the primary fuel and black liquor as a supplementary fuel with the aim of hydrogen-rich syngas is investigated. Oxygen and steam have been chosen as gasification agents. The present research was done using the equilibrium method and Aspen Plus software. The presented model has been validated through an experimental gasification article consisting of combined fuel. Then, by analyzing the performance parameters of gasification, the optimum range of gasification temperature, the ratio of fuel compounds, and the ratio of gasification agent to fuel were determined. Finally, the effect of adding steam as a secondary gasifying agent on the performance parameters and composition of syngas was assessed. The results show that the best ratio of fuel composition ranges from 0.1 and 0.2 and the optimum gasification temperature is 1200-1400 centigrade. Moreover, choosing an appropriate range of oxygen to fuel and steam to fuel causes hydrogen-rich syngas; So that, hydrogen includes more than 50% of syngas.



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: farshifasih@semnan.ac.ir (H. Farshi Fasih)

Received 3 April 2024; Accepted 4 May 2024

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Mardani E, Farshi Fasih H, Lekzian E. Gasification of petroleum and chemical base fuels with the aim of hydrogen-rich syngas, The Journal of Engine Research. 2023 Nov 22;70(3):30-38. doi: [10.22034/ER.2024.2025903.1046](https://doi.org/10.22034/ER.2024.2025903.1046)

گازسازی ترکیب سوخت‌های پایه نفتی و شیمیایی با هدف تولید گاز غنی از هیدروژن

ارشاد مردانی، حمیدرضا فرشی فصیح*، الیاس لکزیان

دانشکده مهندسی هوافضا، پردیس علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در این تحقیق به مطالعه گازسازی سوخت ترکیبی مازوت به عنوان سوخت اصلی و لیکور سیاه به عنوان سوخت مکمل با هدف تولید گاز مخلوط غنی از هیدروژن پرداخته شده است. در این مطالعه اکسیژن و بخار آب به عنوان عوامل گازسازی انتخاب گردیده‌اند. پژوهش حاضر با رویکرد تعادلی و با استفاده از نرم‌افزار Aspen plus انجام شده است. الگوی ارائه شده از طریق مطالعه تجربی گازسازی یک سوخت ترکیبی اعتبارسنجی گردیده است. پژوهش حاضر با بررسی مشخصه‌های عملکردی گازسازی، محدوده بهینه دمای گازسازی، نسبت ترکیبات سوخت و نسبت عامل گازساز به سوخت را تعیین کرده است. در انتها نیز اثر افزودن بخار آب به عنوان عامل گازساز ثانویه بر متغیرهای عملکردی و ترکیبات گازهای مخلوط تحقیق شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که بهترین نسبت ترکیب سوخت برابر با ۰٫۱ و ۰٫۲ و بهینه‌ترین دمای گازساز ۱۲۰۰ الی ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است. همچنین با انتخاب محدوده مناسب نسبت اکسیژن به سوخت و نسبت بخار آب به سوخت، گاز مخلوط غنی از هیدروژن خواهد بود؛ بطوریکه هیدروژن در حدود ۵۶٪ گاز مخلوط را به خود اختصاص می‌دهد.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

سوخت ترکیبی
گاز مخلوط
گازسازی
هیدروژن



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: farshifasih@semnan.ac.ir (حمیدرضا فرشی فصیح)

دریافت ۱۵ فروردین ۱۴۰۳؛ پذیرش ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۳

شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

۱- مقدمه

یکی از فرایندهایی که توانایی تولید انرژی پاک از منابع مختلف و تجدید پذیر انرژی را دارد، گازسازی است. گازسازی به فرایندی احتراقی اطلاق می‌شود که طی آن سوخت با عامل گازساز^۱ در مقداری کمتر از مقدار درست واکنش داده و گازی پاک با ارزش حرارتی بالا تولید می‌کند که گاز مخلوط^۲ نامیده می‌شود. گاز مخلوط عمدتاً متشکل از مقادیر زیادی مونوکسیدکربن و هیدروژن و مقادیر کمتری دی‌اکسیدکربن، متان، و بخار آب است. از مزایای گازسازی نسبت به سایر روش‌ها می‌توان به کارگیری محدوده متنوعی از خوراکیهای مایع، مقادیر کم سولفور و خاکستر به جامانده در ازای گازهای تولیدی با ارزش حرارتی بزرگتر و همچنین تولید محصولات متنوع شیمیایی و هیدروژن، به منظور استفاده در پیل‌های سوختی و فرایندهای پالایش نفت را برشمرد [۱].

الگوسازی فرایند پیش‌بینی قابل قبولی را از عملکرد گازساز ارائه می‌دهد، تا در نهایت بنا بر کاربرد گازسازی (اهمیت ارزش حرارتی یا ترکیبات گاز مخلوط)، محدوده مناسبی برای عملکرد گازساز تعیین شود [۲-۴]. فرشی فصیح و همکاران [۵] فرایند گازسازی سوخت مازوت را با استفاده از رویکرد الگوسازی تعادلی مطالعه کردند. این الگوسازی با کمک نرم‌افزار Aspen plus انجام شده و از عامل گازساز هوا و اکسیژن استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مصرف کربن جامد معیاری برای عملکرد بهینه گازسازی است، به طوری که در نسبت هم‌ارزی بهینه برابر ۰/۳۹، مقادیر H₂ و CO بیشینه است و کربن جامد کاملاً مصرف می‌شود.

هر سوخت هیدروکربنی ظرفیت منحصر به فردی برای فرایند گازسازی دارد. ترکیب سوخت‌های مختلف با یکدیگر بنا بر کاربرد گازسازی می‌تواند بسیار کارآمد باشد، زیرا هر سوخت ویژگی‌های خاص خود را داراست. ترکیبات سوخت با یکدیگر می‌تواند اثرات منفی هر یک از سوخت‌ها را کاهش دهد و بنا بر هدف از فرایند گازسازی، نتیجه مطلوب‌تری را حاصل کند. بنابراین می‌توان دریافت که استفاده از ترکیب سوخت‌ها یک راهکار مفید برای افزایش بازده گازسازی است [۶-۸].

بائه^۳ و همکاران [۹] گازسازی مخلوط آبکی زغال‌سنگ و اتانول (CWES) را با روش تجربی در یک گازساز جریان حامل مورد مطالعه قرار دادند و نتایج حاصل از گازسازی آن را با مخلوط آبکی زغال‌سنگ (CWS) مقایسه نمودند. در این ترکیب اتانول به جهت افزایش مقدار کربن با ویسکوزیته کم به مخلوط آبکی زغال‌سنگ اضافه شده است. در گازسازی CWS دمای گازساز به دلیل وجود غلظت بالای CO₂ ناپایدار بوده، اما عملکرد بهتر و پایدارتری در فرایند گازسازی داشته و همچنین ترکیبات گاز مخلوط، CCE و CGE را به دلیل ارزش حرارتی و مقدار کربن بیشتر بهبود بخشیده است.

مازونی^۴ و همکاران [۱۰] فرایند گازسازی لجن‌های نفتی و زباله‌های جامد شهری را در یک گازساز جریان حامل از روش الگوسازی و با استفاده از نرم افزار Aspen plus بررسی کردند. ترکیبات زباله شهری به پسماند نفتی از ۱۰۰ تا ۵۰ درصد متغییر بوده و از مخلوط هوا و اکسیژن به عنوان عامل گازساز استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد هرچه مقدار پسماندهای نفتی در ترکیبات سوخت بیشتر باشد مقدار CO، H₂، ارزش حرارتی، CCE و CGE افزایش پیدا کرده و در کل بازده گازساز بیشتر می‌شود. در ترکیب سوخت ۵۰/۵۰ فرایند بیشترین بازده گازسازی را دارد. هرچه مقدار غلظت اکسیژن در ترکیب عامل گازساز بیشتر باشد بازده گاز مخلوط مطلوب‌تر خواهد بود.

هدف این مطالعه بررسی مشخصه‌های عملکردی گازسازی ترکیب یک سوخت پایه نفتی و پایه شیمیایی با تمرکز بر گاز مخلوط غنی از هیدروژن است. بدین منظور در ابتدا گازسازی ترکیبات مختلف دو سوخت با عامل گازساز اکسیژن

¹ Agent

² syngas

³ Bae

⁴ Mazzoni

مطالعه گردید. سپس اثر بخار آب به عنوان عامل گازساز ثانویه بر ترکیب گاز مخلوط با رویکرد تولید هیدروژن بیشتر مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- تعریف مساله

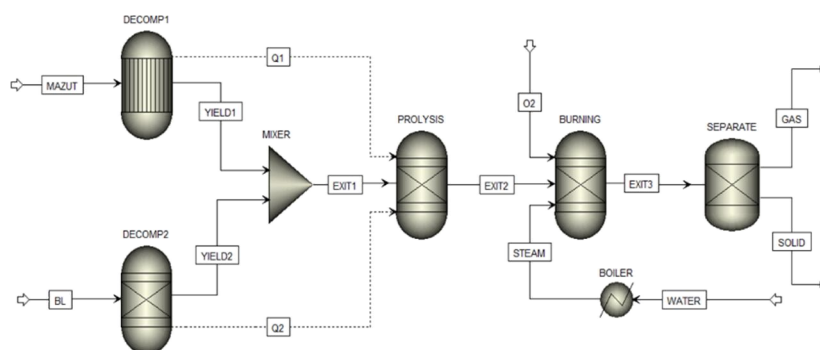
پسماندهای نفتی سنگین محصولات ثانویه فرایند پالایشی نفت خام بوده و می‌تواند به عنوان خوراک فرایند گازسازی به محصولات با ارزش و پاک گازهای مخلوط تبدیل گردد. لیکور سیاه محصول جانبی فرایند کرافت هنگام تبدیل خمیر چوب به خمیر کاغذ است. لیکور سیاه یک خوراک مایع سنگین به شمار می‌رود که عمدتاً از بقایای خمیر کاغذ مانند لیگنین و همی سلولز و مواد شیمیایی حاصل از فرایند کرافت مانند سدیم هیدروکسید و سدیم سولفید تشکیل شده است. مازوت دارای کربن زیاد، خاکستر کم و ارزش حرارتی بالایی است و از این جهت می‌تواند ترکیب خوبی با لیکور سیاه که دارای کربن کم، خاکستر زیاد و ارزش حرارتی نسبتاً پایینی است را تشکیل دهد. ترکیب لیکور سیاه و مازوت می‌تواند سیال شوندگی و گرانروی مازوت را جهت تمیزه شدن بهبود بخشد. همچنین لیکور سیاه دارای اکسیژن زیادی بوده که سبب کاهش مصرف اکسیژن در فرایند می‌شود. بنابراین مطالعه گازسازی ترکیبات مختلف مازوت و لیکور سیاه و استفاده همزمان از بخار آب برای تولید هیدروژن بیشتر، می‌تواند رویکردی نوآورانه تلقی گردد. در جدول ۱ مشخصات مازوت و لیکور سیاه ارائه شده است.

جدول ۱ مشخصات شیمیایی مازوت و لیکور سیاه [۵، ۱۱]

	Proximate analysis		Ultimate analysis (dry)		
	Mazut	Black liquor		Mazut	Black liquor
Moisture	0.05 wt%	3.20 wt%	C	87.3 wt%	33.43 wt%
Ash	0.02 wt%	27.38 wt%	H	11.3 wt%	2.77 wt%
Residual carbon	14.1 wt%	20.1 wt%	O	0.0 wt%	32.86 wt%
LHV	40.62 MJ/kg	11.3 MJ/kg	N	0.02 wt%	0.23 wt%
			S	1.36 wt%	0.13 wt%

۳- الگوسازی گازسازی

الگوسازی گازسازی با استفاده از نرم افزار aspen plus و با رویکرد تعادلی (مینیمم کردن انرژی آزاد گیبس) انجام شده است. محفظه گازساز تحت شرایط پایدار و در فشار ۵ بار عمل می‌کند. در شکل ۱ طرح‌واره الگوی تعریف شده نشان داده شده است. در این الگوی بخش‌های تجزیه از نوع RYield، بلوک پیرولیز و احتراق از نوع RGibbs، بلوک جداساز از نوع Sep و بلوک بخارساز از نوع Heater است.



شکل ۱ طرح‌واره الگوی تعریف شده در aspen plus

هر یک از سوخت‌ها در بلوک‌های تجزیه به صورت جداگانه بر اساس آنالیز نهایی خود به گونه‌های اصلی شامل (H_2, N_2)، S, H_2O, C) تجزیه می‌شوند. این دو جریان وارد Mixer شده و با یکدیگر ترکیب می‌شود و سپس به صورت یک جریان واحد وارد بلوک پیرولیز می‌شود. در بلوک پیرولیز چار (کربن جامد) و مواد فرار گازی شامل ($H_2, H_2O, CH_4, N_2, S, CO, CO_2$) تعیین می‌شود. در این بلوک نیازی به وارد کردن دما نبوده، زیرا جریان‌های $Q1$ و $Q2$ گرمای مورد نیاز جهت انجام فرایند پیرولیز را بر پایه بالانس جرم و انرژی تامین کرده است. در بخش بعد اکسیژن و بخار نیز به عنوان عوامل گازساز وارد بلوک احتراق شده و چار و مواد فرار با عوامل گازساز واکنش داده و محصولات گازسازی از جریان خروجی این بلوک خارج می‌شود. در اکثر موارد اتلاف گرما از گازساز وجود داشته که این موضوع در فرایند گازسازی موثر خواهد بود. برای الگوسازی گازسازی، اتلاف حرارت در بلوک احتراق لحاظ شده و به مقدار ۴ درصد انرژی ورودی واکنش دهنده‌ها در نظر گرفته می‌شود. محصولات گازسازی نیز شامل ترکیبات گازهایی مخلوط و مواد جامد در بخش جداساز از یکدیگر جدا می‌شوند. واکنش‌های فرایند گازسازی بسیار پیچیده است که در جدول ۲ به صورت خلاصه جمع‌بندی شده است. واکنش‌های شیمیایی در فرایند گازسازی به دو دسته واکنش‌های همگن فاز گازی و ناهمگن گازسازی کربن جامد دسته‌بندی می‌شوند که در این مطالعه برای تحلیل رفتار ترکیبات گازهایی مخلوط از آنها استفاده شده است.

جدول ۲ واکنش‌های شیمیایی گازسازی

Reaction	Reaction rate	ΔH (MJ/kmol)	A_0	E (J/kmol)
R1	$C + 1/2O_2 \rightarrow CO$	+111	1.36×10^6	1.3×10^8
R2	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	-171	2.07×10^7	2.2×10^8
R3	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	-131	2.07×10^7	2.2×10^8
R4	$CO + 1/2O_2 \rightarrow CO_2$	+283	2.20×10^{12}	1.67×10^8
R5	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	+242	0.68×10^{16}	1.68×10^8
R6	$CH_4 + 1/2O_2 \rightarrow CO + 2H_2$	+35.7	0.44×10^{12}	1.26×10^8
R7	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	+41.1	2.75×10^9	8.38×10^7
R8	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	-206	0.30×10^9	1.26×10^8

ارزش حرارتی گازهایی مخلوط و بازده تبدیل کربن از مهم‌ترین مشخصه‌های عملکردی گازسازی است که بر حسب مقادیر گازهایی مخلوط و مطابق روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$LHV = 10.8y_{H_2} + 12.6y_{CO} + 35.8y_{CO_2} \quad (1)$$

$$CCE = \left[1 - \frac{\dot{m}_{gas} \left(\frac{12}{44} Y_{CO_2} + \frac{12}{28} Y_{CO} + \frac{12}{16} Y_{CH_4} + \frac{12}{28} Y_{C_2H_4} \right)}{\dot{m}_{fuel} \times Y_C} \right] \times 100 \quad (2)$$

که \dot{m} شار جرمی با واحد کیلوگرم بر ساعت و y کسر مولی است.

۴- اعتبارسنجی الگوسازی

برای اعتبارسنجی از مطالعه تجربی و^۱ و همکاران [۱۲] که فرایند گازسازی سوخت زغال سنگ و زیست‌مس را در یک گازساز جریان‌حامل مورد بررسی قرار داده‌اند، استفاده شده است. گازسازی در شرایط دما ثابت برابر با ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و نسبت اکسیژن به سوخت برابر با ۰٫۴۵، تعیین شده است. در جدول ۳ داده‌های بدست آمده از الگوسازی و نتایج تجربی با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج بدست آمده از الگوسازی و مقایسه آن با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که الگوی طراحی شده تطابق خوبی با نتایج تجربی داشته و داده‌های بدست آمده از الگوسازی قابل اعتماد است.

¹ Wu

جدول ۳ واکنش‌های شیمیایی گازسازی

Syngas component%	Modeling%	Experimental%
CO	۶۳,۰۲	۶۲
H ₂	۳۵,۶۷	۳۲,۵
CO ₂	۰,۲	۴,۵
CH ₄	۰,۲۱	۰,۸

۵- نتایج و بحث

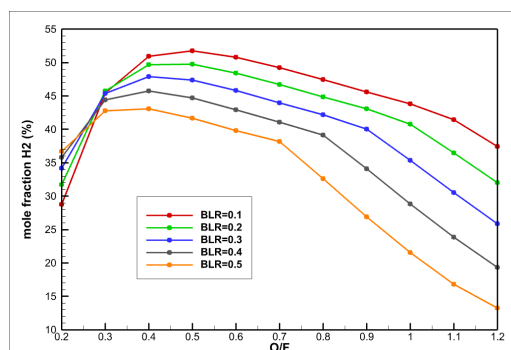
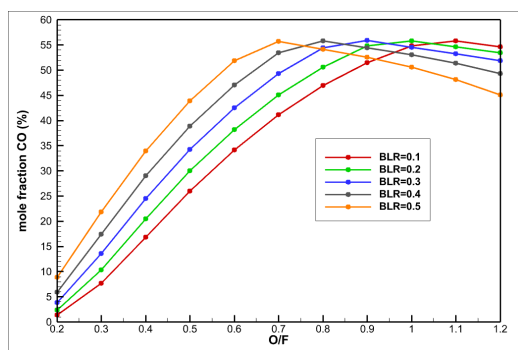
هدف از این مقاله بررسی گازسازی سوخت ترکیبی مازوت و لیکور سیاه با مطالعه متغیرهای عملکردی گازسازی مانند ترکیبات گاز مخلوط، دمای گازسازی، ارزش حرارتی و بازده تبدیل کربن است. نوع عامل گازساز به صورت مستقیم در انتخاب محدوده مناسب نقاط کارکرد گازسازی موثر است. بنابراین در این تحقیق علاوه بر اثر نسبت ترکیب سوخت‌ها، نسبت اکسیژن به سوخت و بخار آب به سوخت بر غنی سازی گاز مخلوط از هیدروژن بررسی شده است. برای اینکه بتوان ترکیبات مختلف جرمی ورودی به محفظه گازساز برای دو سوخت مازوت و لیکور سیاه را بررسی نمود، از تعریف نسبت BLR بهره برده شده است. معادله ۳ روش محاسبه نسبت BLR را نشان می‌دهد. در جدول ۴ مقادیر ترکیبات مختلف لیکور سیاه و مازوت، بیان شده است.

$$BLR = \frac{\text{Black liquor mass flow rate}}{\text{Black liquor mass flow rate} + \text{Mazut mass flow rate}} \quad (3)$$

جدول ۴ درصد ترکیبات مختلف لیکور سیاه و مازوت

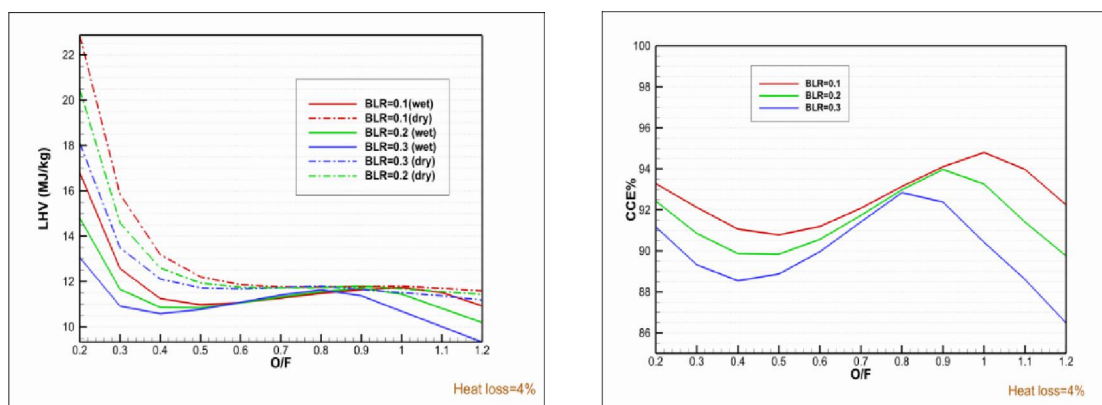
BLR	۰,۱	۰,۲	۰,۳	۰,۴	۰,۵
Mazut (%)	۹۰	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰
Black liquor (%)	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰

شکل ۲ روند تغییرات CO و H₂ به عنوان اصلی‌ترین گونه‌های گاز مخلوط در ترکیبات سوختی و نسبت‌های اکسیژن به سوخت مختلف را نشان می‌دهد. در یک O/F ثابت و با افزایش BLR، مقدار هیدروژن کاهش می‌یابد. کاهش H₂ به علت کاهش مقدار کربن سوخت متناظر با افزایش BLR بوده که این رفتار بر طبق واکنش (R₃) منطقی است. برای تمامی BLRs، مقدار CO یک نقطه عطف ثابت دارد که تولید آن به بیشینه خود می‌رسد. با این تفاوت که هرچه مقدار BLR کاهش یابد، اکسیژن بیشتری جهت دستیابی به نقطه بیشینه CO باید مصرف شود. چنین رفتاری برای ترکیبات گاز مخلوط در مرجع [۱۳، ۱۴] برای سوخت‌های ترکیبی مشاهده می‌شود.



شکل ۲ گونه‌های اصلی گاز مخلوط بر حسب نسبت اکسیژن به سوخت در ترکیبات سوخت مختلف

با توجه به ترکیبات گاز مخلوط و اکسیژن مورد نیاز مصرفی جهت بهبود عملکرد گازساز، ترکیبات سوخت ۰٫۱ الی ۰٫۳ بازه مناسبی جهت مطالعه گازسازی سوخت لیکور سیاه و مازوت است. در شکل ۳ رفتار بازه تبدیل کربن و ارزش حرارتی گازهای مخلوط در سه ترکیب منتخب سوخت آورده شده است. زیاد بودن متغیرهای عملکردی در O/F کم به دلیل زیاد بودن مقدار CH_4 در ترکیبات گازهای مخلوط بوده که با افزایش O/F در واکنش‌ها مصرف می‌شود. این دو مشخصه در BLRS مختلف و در O/F برابر ۰٫۴ الی ۰٫۵ به حداقل خود می‌رسد؛ یعنی دقیقاً نقطه‌ای که مقدار H_2 بیشینه است. با افزایش O/F نرخ واکنش (R_6) افزایش یافته و باعث افزایش دمای گازساز می‌شود. بنابراین CH_4 تولید شده، طبق واکنش‌های (R_6) و (R_8) با اکسیژن و بخار آب واکنش داده و تبدیل به H_2 و CO می‌شود. بنابراین با گذر از نقطه بیشینه H_2 ، متغیرهای عملکردی شروع به افزایش کرده و در نقطه‌ای که کربن جامد به صفر می‌رسد، دوباره به یک نقطه بیشینه می‌رسند.



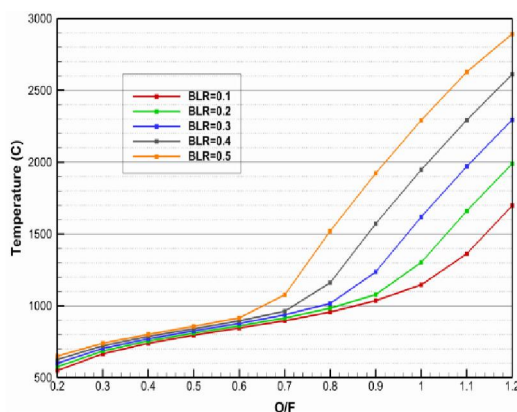
شکل ۳ مشخصه‌های عملکردی گازسازی بر حسب نسبت اکسیژن به سوخت در ترکیبات سوخت مختلف

با توجه به تعیین BLR مناسب و توضیحات دو شکل قبل، محدوده بهینه نسبت اکسیژن به سوخت در بازه ۰٫۶ الی ۱٫۱ است. عملکرد BLRS مختلف در این بازه نسبت به یکدیگر متفاوت است. به طوری که با افزایش BLR نسبت اکسیژن به سوخت کمتری جهت رسیدن به نقطه بهینه فرایند گازسازی مورد نیاز است. در شکل ۴ دمای فرایند گازسازی در ترکیبات سوختی و نسبت‌های اکسیژن به سوخت مختلف آورده شده است. با افزایش مقدار O/F دمای مورد نیاز واکنش‌های گرماگیر تامین شده و سپس واکنش‌های گرمازا به انجام رسیده که باعث افزایش دمای گازسازی می‌شود. بنابراین با افزایش O/F از ۰٫۷ به بالا سیر صعودی دمای گازسازی افزایش می‌یابد. با توجه به اکسیژن زیاد موجود در لیکور سیاه، در $BLR=0.5$ که بیشترین مقدار برای لیکور سیاه در نظر گرفته شده است، واکنش‌های احتراقی گرمازا غالب بوده و دمای محفظه گازساز نسبت به حالت‌های دیگر BLR بیشتر است. با توجه به محدوده مناسب BLRS و همچنین محدوده اکسیژن به سوخت تعیین شده، بازه دمایی بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، محدوده مطلوب دمای گازسازی خواهد بود.

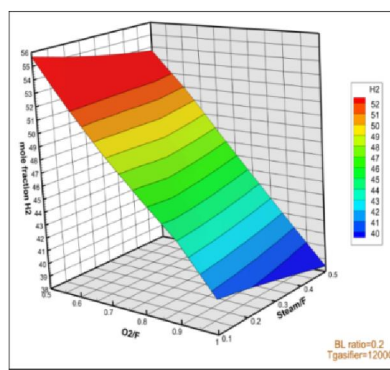
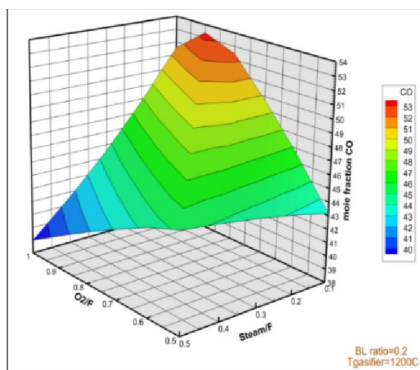
برای تولید گاز مخلوط غنی از هیدروژن به کارگیری بخار آب بسیار موثر است، اما باید به صورت ترکیبی با اکسیژن استفاده شود. بدین دلیل که استفاده ترکیبی از بخار آب و اکسیژن سبب جلوگیری از افت حرارتی گازساز شده و نرخ واکنش‌های گرمازا را افزایش می‌دهد. به همین جهت از اکسیژن به عنوان عامل گازساز اصلی و از بخار آب به عنوان عامل گازساز ثانویه با هدف افزایش هیدروژن در ترکیبات گاز مخلوط، استفاده شده است. در شکل ۵ اثر عامل گازساز اکسیژن و بخار آب بر ترکیبات گازهای مخلوط در BLR برابر ۰٫۲ و حالت دما ثابت برابر ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد آورده شده است. رفتار تغییرات گاز مخلوط نسبت به عامل گازساز اکسیژن تنها متفاوت است. با افزایش عوامل گازساز، CO تولیدی ابتدا سیر صعودی داشته و به نقطه بیشینه خود رسیده که این مقدار در حدود ۵۳٪ است و سپس سیر نزولی می‌گیرد. این پدیده به دلیل مصرف شدن کامل کربن

در فرایند است. در واقع زمانی که زمانی که کربن جامد صفر شده و مقدار CO بیشینه است. طبق واکنش (R₁) کربن جامد با اکسیژن واکنش داده و سبب افزایش CO می‌شود. مقدار H₂ تولید شده نسبت به زمانی که از اکسیژن به عنوان عامل گازساز استفاده شده افزایش یافته، و به طور ثابت سیر نزولی دارد. به طوری که بیشینه تولید H₂ با استفاده از اکسیژن به عنوان عامل گازساز حدود ۵۰٪ بوده که با افزودن بخار آب این مقدار تا حدود ۵۶٪ افزایش یافته است.

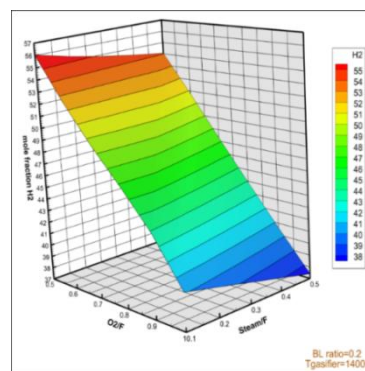
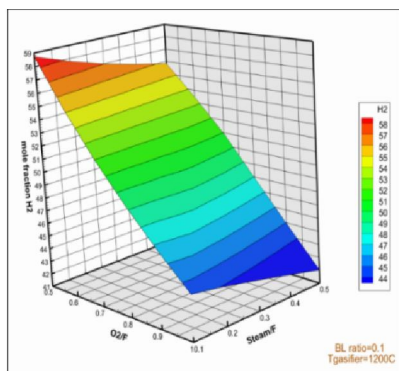
در شکل ۶ تأثیرات نسبت ترکیبات سوخت و دمای فرایند بر هیدروژن محصولات آورده شده است. با مقایسه نمودار هیدروژن تولید شده در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، دما تأثیر ناچیزی در حدود کمتر از ۰٫۵٪ بر تولید هیدروژن دارد. اما BLR تأثیر بیشتری بر تولیدات هیدروژن داشته به طوری که با کاهش BLR از ۰٫۲ به ۰٫۱ هیدروژن محصولات ۳٪ افزایش یافته است. این در حالی است که با کاهش BLR، گازساز نیازمند به مصرف اکسیژن بیشتری برای رسیدن به مقدار بیشینه است.



شکل ۴ دمای فرایند گازسازی بر حسب نسبت اکسیژن به سوخت در ترکیبات سوخت مختلف



شکل ۵ گونه‌های اصلی گاز مخلوط بر حسب نسبت اکسیژن به سوخت و بخار آب به سوخت



شکل ۶ تأثیر BLR و دمای گازسازی بر تولید هیدروژن

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل نتایج بدست آمده در فرایند گازسازی، BLR مطلوب برابر با ۰,۲ است. بهترین عامل گازساز، عامل گازساز ترکیبی اکسیژن و بخار آب است. دمای مطلوب فرایند ۱۲۰۰ الی ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است. نسبت ترکیب بهینه $O_2/(O_2+steam)$ برابر با ۰,۵ و ۰,۶ است. در نتیجه سوخت ترکیبی لیکور سیاه و مازوت ظرفیت قوی برای انجام فرایند گازسازی با هدف تولید گاز مخلوط غنی از هیدروژن دارد، بطوریکه در حدود ۵۶ درصد گاز مخلوط را هیدروژن تشکیل داده است.

References

- [1] Reyhani HA, Meratizaman M, Ebrahimi A, Pourali O, Amidpour M. Thermodynamic and economic optimization of SOFC-GT and its cogeneration opportunities using generated Syngas from heavy fuel oil gasification. *Energy*. 2016;107:141-64. doi: 10.1016/j.energy.2016.04.010
- [2] Islam MW. Effect of different gasifying agents (steam, H₂O, oxygen, CO₂, and air) on gasification parameters. *International journal of hydrogen energy*. 2020;45:31760-74. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.002
- [3] Kakati U, Sakhia ak, Baghel P, Trada A, Mahapatra S, Upadhyay D, Kaushal P. Sustainable utilization of bamboo through air-steam gasification in downdraft gasifier: Experimental and simulation approach. *Energy*. 2022;124055. doi: 10.1016/j.energy.2022.124055
- [4] Qatan S, Ghani W, Said M. Prediction and optimization of syngas production from Napier grass air gasification via kinetic modelling and response surface methodology. *Energy*. 2023;126883. doi: 10.1016/j.energy.2023.126883
- [5] Fasih HF, Ghassemi H, Mazrae Shahi HK. Gasification of a Heavy Fuel Oil: A Parametric Study on Energy and Exergy Analysis for Different Gasifying Agents. *Petroleum Chemistry*. 2021;61:162-71. doi: 10.1134/S0965544121020055
- [6] He Z, Sun Y, Cheng S, Jia Z, Tu R, Wu Y, Shen X, Zhang F, Jiang E, Xu X. The enhanced rich H₂ from co-gasification of torrefied biomass and low rank coal: The comparison of dry/wet torrefaction, synergetic effect and prediction. *Fuel*. 2021;287:119473. doi: 10.1016/j.fuel.2020.119473
- [7] Singh M, Salaudeen S, Gilroyed B, Dutta A. Simulation of biomass-plastic co-gasification in a fluidized bed reactor using Aspen plus. *Fuel*. 2022; 319:123708. doi: 10.1016/j.fuel.2022.123708
- [8] Rosha P, Kumar S, Vikram S, Ibrahim H, Muhtaseb A. H₂-enriched gaseous fuel production via cogasification of an algae-plastic waste mixture using Aspen PLUS. *International journal of hydrogen energy*. 2022;47:26294-302. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.092
- [9] Bae JS, Lee DW, Park SJ, Lee YJ, Hong JC, Won H, Han C, Choi YC. High-Pressure Gasification of Coal Water Ethanol Slurry in an Entrained Flow Gasifier for Bioethanol Application. *Energy Fuels*. 2012;26:6033-39. doi: 10.1021/ef301079z
- [10] Mazzoni L, Janajreh I, Elagroudy S, Ghenai C. Modeling of plasma and entrained flow co-gasification of MSW and petroleum sludge. *Energy*. 2020;196:117001. doi: 10.1016/j.energy.2020.117001
- [11] Cao C, Guo L, Chen Y, Guo S, Lu Y. Hydrogen production from supercritical water gasification of alkaline wheat straw pulping black liquor in continuous flow system. *International journal of hydrogen energy*. 2011;36:13528-135. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.07.101
- [12] Wu Z, Meng H, Luo Z, Chen L, Zhao J, Wang S. Performance evaluation on co-gasification of bituminous coal and wheat straw in entrained flow gasification system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42:18884-93. doi: 10.1016/j.energy.2020.117001
- [13] Al-Zareer M, Dincer I, Rosen MA. Production of hydrogen-rich syngas from novel processes for gasification of petroleum cokes and coals. *international journal of hydrogen energy*. 2019;45:11577-92. doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.10.108
- [14] Okati A, Khani MR, Shokri B, Rouboa A, Monteiro E. Optimizing the operating conditions for hydrogenrich syngas production in a plasma co-gasification process of municipal solid waste and coal using Aspen Plus. *International journal of hydrogen energy*. 2022;47:26891-900. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.058