

Process and Economic Evaluation of Biomass Gasification for Syngas Production: Effective Parameters and Sensitivity Analysis

Koosha Emami¹ ; Mahdi Sedighi^{2*}

1. Department of Energy Systems Engineering, University of Qom, Iran

*2. Department of Chemical Engineering, University of Qom, Iran

*Email Address: sedighi@qom.ac.ir

Article Info

Article Type:
Research Paper

Article History:

Received Date:

2025/04/29

Revised Date:

2025/07/05

Accepted Date:

2025/08/27

Published Date:

2025/09/28

Keywords:

Gasification,
Sugarcane Bagasse,
Simulation,
Sensitivity Analysis,
Lower Heating Value,
Cold Gas Efficiency

ABSTRACT

Population expansion and improvement in society drive a continuously rising need for energy. Depletion of finite fossil fuels and mounting pollution leading to global warming exacerbates damage to the environment. Under these circumstances, biomass gasification has been recognized globally as a promising technique. Syngas, being a product of gasification, consists of hydrogen, methane, carbon monoxide, and carbon dioxide. The subject of this paper is steam gasification with bagasse, a waste product of sugarcane production, as a feedstock. The simulation was carried out using Aspen Plus software by implementing the Boston-Mathias alpha function and Peng-Robinson cubic equation of state. The primary aim of this research paper is to gain the highest lower heating value (LHV) of syngas. Utilization of a carbon dioxide capture solvent in an absorption tower is proposed in this paper by adopting the steam gasification process. These processes aim at improving output properties and minimizing environmental impacts of energy generation. Sensitivity was done to ascertain crucial parameters like the gasifier's temperature and pressure and mass flow rate of steam into the reactor. Targets are to increase LHV of syngas and improve cold gas efficiency. With proper planning and accurate analysis, the LHV of syngas increased by 30.7% and cold gas efficiency by 36.1% compared to earlier research. Also, 95% of carbon dioxide released was captured and sequestered with this method. This study presented the prospects for biomass gasification as an alternative green energy option, preventing limitations of resources and environmental degradation. With optimization of the operating parameters, there were great improvements in syngas and process efficiency. Carbon dioxide capture additionally reduced environmental loads, resulting in cleaner energy systems. These developments served to illustrate the demand for advanced technologies in meeting increasing energy demands while mitigating the effects of climate change.

Cite this article:

Koosha Emami, Mahdi Sedighi(2025). Process and Economic Evaluation of Biomass Gasification for Syngas Production: Effective Parameters and Sensitivity Analysis, Journal of Environmental Sciences Studies, 10(3) , Pages 10523-10533.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The extraction of energy resources using fossil fuels has caused several adverse impacts on the environment, such as pollution and global warming. Carbon-neutral and readily available forms of energy, including biomass derived from industrial and agricultural waste, can solve the above issue. Biomass materials, such as sugar cane, offer additional value due to their lower lignin content, higher glucose levels, and suitability for syngas production via gasification. The process of gasification, modeled using the Aspen Plus software, converts carbon-rich raw materials at elevated temperatures into syngas. Prior research works have acknowledged the role of gasification in improving energy efficiency and mitigating environmental issues. This research optimizes bagasse gasification operational parameters to offer better syngas quality while reducing emissions, and also assesses the economic considerations of the process, proving that bagasse gasification can be an effective renewable energy source.

Materials and methods

A sensitivity analysis of the gasification process was conducted with respect to the four key components of syngas—namely, hydrogen, methane, carbon monoxide, and carbon dioxide—and three key parameters that dictate reactor performance: temperature, pressure, and inlet steam flow rate. Initially, the optimization of these parameters was carried out to maximize the production of syngas, while at the same time minimizing associated production costs. Finally, the economic viability of the process at the established optimum points was examined to ensure that both technical efficacy and affordability were achieved within the scope of the study.

Results and discussion

In this study, a sensitivity analysis of the gasification process was conducted, focusing on the four primary syngas constituents (hydrogen, methane, carbon monoxide, and carbon dioxide) and three most significant parameters (temperature, pressure, and steam flow rate). Hydrogen and carbon monoxide yields were optimized at 850°C in the temperature optimization. Any increase above this temperature subjects the reactor to clogging via sintering reactions. At pressure optimization, 1 bar was found to be the optimum; higher pressure reduced cold gas efficiency and enhanced the formation of carbon dioxide and methane as by-products. The steam flow rate was optimized at 3500 kg/h, balancing reduced hydrogen formation with negligible carbon dioxide production, with little impact on cold gas efficiency. These results maximize gasification efficiency while minimizing cost repercussions.

Conclusion

In this study, the results showed that pre-drying bagasse prior to use significantly improved reactor efficiency and reduced fuel consumption by eliminating moisture content and thereby preventing a rise in combustion temperature in the reactor. Additionally, the hydrogenation tower of sulfur recovers sulfur (91 kg/hr) and boosts the production of hydrogen (from 140 to 190 kg/hr) via the desulfurization of syngas and suppression of undesired side reactions. Sensitivity analyses identified the optimum bagasse and inlet steam flow rates at 15,000 kg/hr and 3,500 kg/hr, respectively, which maximize high-quality syngas production. The gasifier reactor is operated at 850°C and 1 bar with no appreciable tar and heavy hydrocarbon formation. Under these parameters, the reactor produces 1,176 kg/hr of hydrogen, 88 kg/hr methane, 12,952 kg/hr carbon monoxide, and 841 kg/hr carbon dioxide. Two significant parameters, cold gas efficiency, and LHV of syngas were contrasted. Results, as against those established by Motaz et al. , present improved cold gas efficiency by 30% and LHV of 4.66 MJ/kg syngas. Also, the design of a carbon capture tower re-captures 95% of the carbon dioxide produced, and this reduces the environmental impact of the process significantly. Removal of impurities also increases the LHV of the syngas to 1.77 MJ/kg.



ارزیابی فرایندی و اقتصادی فرایند گازی سازی باگاس برای تولید گاز سنتز: بررسی پارامترهای مؤثر و آنالیز حساسیت

کوشا امامی^۱، مهدی صدیقی^{۲*}

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی سیستم های انرژی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم

۲* - دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه قم، قم، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: sedighi@qom.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>با افزایش جمعیت و پیشرفت بشر، نیاز به انرژی پیوسته در حال رشد است. مصرف سوخت های فسیلی، علاوه بر محدودیت منابعشان، یکی از عوامل اصلی تولید آلاینده های زیست محیطی و گرمایش تدریجی زمین به شمار می رود. در این میان، گازی سازی زیست توده در سطح جهان به عنوان فرایندی با آینده ای روشن مطرح شده است. محصول این فرایند، گاز سنتز نام دارد که ترکیبی از هیدروژن، متان، کربن مونوکسید و کربن دی اکسید است. در این پژوهش باگاس که ضایعات کشاورزی صنعت تولید شکر از نیشکر است، به عنوان خوراک فرایند گازی سازی در نظر گرفته شده است. این فرایند در نرم افزار اسپن پلاس با استفاده از معادله حالت مکعبی پنگ رابینسون با تابع آلفای بوستون - ماتياس شبیه سازی شد. هدف اصلی این پژوهش پیشینه کردن حداقل ارزش حرارتی گاز سنتز است. در این مقاله به کارگیری بخار آب به عنوان عامل گازی ساز و استفاده از برج جاذب کربن برای جذب دی اکسید کربن تولیدی طراحی شد تا کیفیت تولید افزایش و اثرات زیست محیطی کاهش پیدا کنند. پارامترهای تعیین کننده بر اساس تحلیل حساسیت، شامل دمای راکتور گازی ساز، فشار راکتور گازی ساز، و دبی جرمی بخار ورودی به راکتور گازی ساز تعیین شده است. هدف از این فرایند، افزایش حداقل ارزش حرارتی و راندمان گاز سرد است. با انجام طراحی و تحلیل های دقیق، حداقل ارزش حرارتی گاز سنتز تولیدی به میزان ۳۰/۷٪ و راندمان گاز سرد به میزان ۳۶/۱٪ نسبت به مطالعات قبلی افزایش یافته است. در این فرایند، ۹۵٪ کربن دی اکسید تولیدی جذب و ذخیره سازی می شود.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۴</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶</p> <p>کلید واژه ها: گازی سازی، باگاس نیشکر، شبیه سازی، تحلیل حساسیت، حداقل ارزش حرارتی، راندمان گاز سرد.</p>

ناشر: انتشارات فن پایا

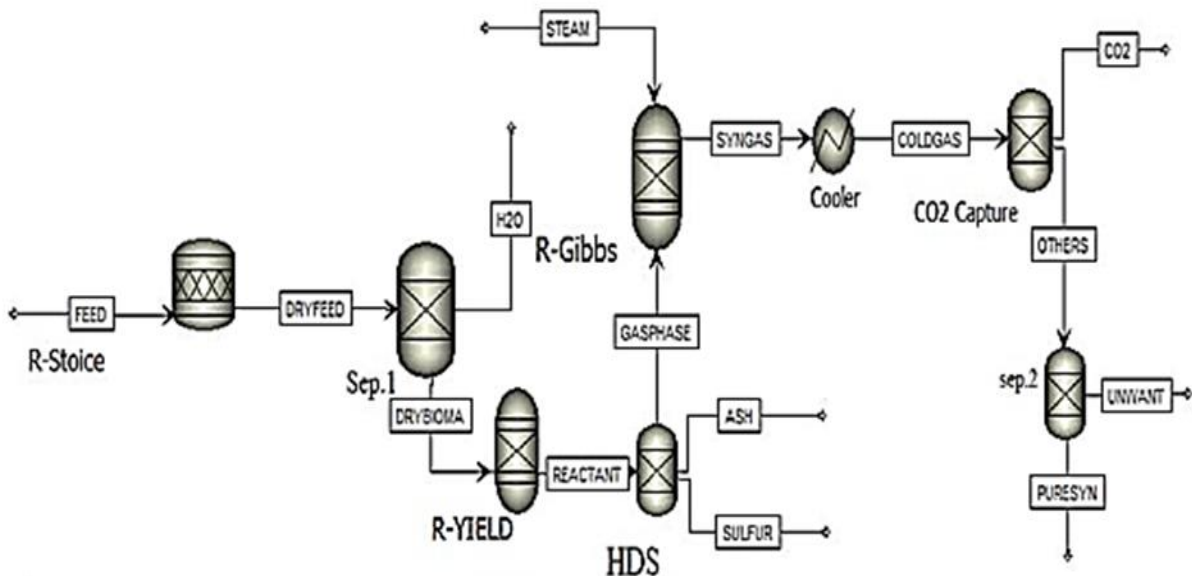
صرف انرژی، عنصری بنیادی در زندگی انسان امروزی است که بخش قابل توجهی از آن از طریق سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود. اتکا به این منابع، پیامدهای ناگوار زیست‌محیطی مانند افزایش آلاینده‌ها و گرمایش زمین را به دنبال دارد. در ایران نیز شاهد روند روبه‌رشد انتشار گازهای گلخانه‌ای هستیم. از این رو، تلاش‌های علمی و پژوهشی برای بهینه‌سازی مصرف سوخت‌های فسیلی و توسعه منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، اهمیتی دوچندان یافته است. انرژی تجدیدپذیر شامل منابع مختلفی مانند انرژی خورشیدی، بادی، امواج و زیست‌توده می‌شود. زیست‌توده از زباله‌های شهری، صنعتی و کشاورزی به دست می‌آید و از طریق چهار روش احتراق مستقیم، تبدیل ترموشیمیایی (گازی‌سازی)، تبدیل شیمیایی و تبدیل بیولوژیکی قابل استفاده است. زیست‌توده به‌عنوان یکی از منابع اصلی انرژی در جهان پس از سوخت‌های فسیلی شناخته شده است. فراوانی، دسترسی آسان و خنثی بودن در تولید کربن، از جمله مزایای بارز این منبع انرژی تجدیدپذیر به شمار می‌روند. بیش از ۷۰ درصد از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر را زیست‌توده تشکیل می‌دهد. در میان انواع مواد زیست‌توده، پسماندهای کشاورزی و پساب‌های فرایند حاصل از آن کمترین اثرات زیست‌محیطی را نسبت به سایر مواد دارند. زیست‌توده به‌طور کلی به چهار روش احتراق، گازی‌سازی^۲، تخمیر و هضم بی‌هوازی فراوری می‌شود. گازی‌سازی مناسب‌ترین فرایند برای تولید گاز سنتز از زیست‌توده است. این فرایند شامل چهار مرحله خشک‌کردن، تجزیه در اثر حرارت (پیرولیز)، احتراق ناقص و پاک‌سازی گاز سنتز است. گاز سنتز که محصول نهایی این فرایند است، مخلوطی از هیدروژن، متان، مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن است. عامل گازی‌ساز که می‌تواند هوا، اکسیژن یا بخار آب باشد، برای انجام واکنش‌های شیمیایی در دمای بالا و تولید گاز سنتز ضروری است. گاز سنتز از تبدیل جامدات و مایعات کربن‌دار در محدوده دمایی ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد حاصل می‌شود. این محصول کاربردهای متنوعی در تولید گرما، برق و فرایندهای سنتز کاتالیزوری دارد. گازی‌سازی برای مواد لیگنوسلولزی به‌عنوان یک راهکار جذاب مطرح است. باگاس نیشکر به دلیل محتوای لیگنین کمتر و قند بالاتر در مقایسه با سایر مواد لیگنوسلولزی، گزینه مناسبی برای تبدیل به گاز سنتز محسوب می‌شود. نیشکر، با تولید ۱/۸۹ میلیارد تن در سال ۲۰۱۶، دومین محصول پرکاشت دنیا به شمار می‌رود. در فرایند تولید شکر از نیشکر، تنها ۲۷ درصد وزن خوراک ورودی به سیستم به محصول نهایی تبدیل می‌شود و ۷۳ درصد باقی‌مانده به صورت باگاس دفع می‌گردد. در ایران، باگاس، پسماند حاصل از تولید شکر، به‌طور سنتی دفن یا سوزانده می‌شود و یا در روش‌های صنعتی برای تولید کاغذ یا نئوپان به کار می‌رود. تمام این روش‌ها پیامدهای مخربی برای محیط زیست به همراه دارند. ایران سالانه حدود ۶ میلیون تن نیشکر تولید می‌کند؛ که از این فرایند، نزدیک به ۵ میلیون تن باگاس تر به‌عنوان ضایعات باقی می‌ماند. باگاس از ۴۶/۹۵٪ کربن، ۶/۰۶٪ هیدروژن، ۴۶/۷۸٪ اکسیژن، ۰/۱۳٪ نیتروژن و ۰/۰٪ گوگرد تشکیل شده است. فرایند گازی‌سازی باگاس نیشکر به دلیل وجود واکنش‌های پیچیده، از ابهامات زیادی برخوردار است. به همین دلیل، از نرم‌افزار اسپن پلاس برای شبیه‌سازی این فرایند استفاده شده است. این شبیه‌سازی مورد بررسی‌های گسترده‌ای قرار گرفته و نتایج قابل توجهی را به دست داده است. لی و همکاران یک مدل اسپن پلاس را برای ارزیابی تولید بوتانول از زیست‌توده لیگنوسلولزی با استفاده از فناوری گازی‌سازی حلقه شیمیایی ایجاد کرد. آنها ۴۵/۳۳ درصد راندمان انرژی را در فرایند گازی‌سازی پیشنهادی مشاهده کردند. ژانگ و همکاران با استفاده از نرم‌افزار اسپن پلاس، فرایند گازی‌سازی جزئی زیست‌توده را شبیه‌سازی کردند و تحلیل‌های اقتصادی، انرژی و انرژی را به همراه بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی ورودی بر روی این فرایند انجام دادند. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که راندمان گاز سرد، راندمان انرژی و راندمان حرارتی به ترتیب ۴۶/۸، ۶۷/۹۷ و ۴۴/۲۵ درصد است. کچه و همکاران با شبیه‌سازی یک فرایند گازی‌سازی در نرم‌افزار اسپن پلاس و بررسی خوراک‌های مختلف، به این نتیجه رسیدند که چوب به دلیل داشتن درصد هیدروژن بالاتر در گاز سنتز، نسبت به سایر خوراک‌ها، گزینه مناسب‌تری است. پالا و همکاران یک گازساز زیست‌توده با تنظیم متوالی گاز سنتز از طریق واکنش تغییر جهت تولید گاز سنتز در اسپن پلاس را نشان داد و به نسبت مولی هیدروژن و کربن مونو اکسید حدود ۲/۱۵ دست یافت. در این مطالعه، اثر پارامترهای اصلی بر فرایند به صورت جداگانه و همچنین به صورت ترکیبی بررسی شد تا نقطه بهینه برای دستیابی به حداقل ارزش حرارتی، حداکثر راندمان گاز سرد، بیشترین تولید هیدروژن و کمترین تولید دی‌اکسید کربن تعیین گردد. نتایج نشان داد که مدل‌های رگرسیونی به‌کاررفته برای پیش‌بینی نقاط بهینه از دقت بالایی برخوردارند. دمای تبدیل بهینه ۸۷۷/۲۷ درجه سانتی‌گراد، حداقل ارزش حرارتی ۷/۹۲ مگاژول بر مترمکعب نرمال، رطوبت ۱۰ درصد و راندمان گاز سرد ۷۴/۲۲ درصد به دست آمد. در این پژوهش، به‌منظور بررسی پارامترهای عملیاتی مؤثر بر فرایند گازی‌سازی باگاس و یافتن شرایط بهینه برای افزایش حداقل ارزش حرارتی، راندمان گاز سرد و کاهش اثرات زیست‌محیطی، تجهیزات مختلفی از جمله خشک‌کن، برج جاذب دی‌اکسید کربن و برج هیدروژن‌اسیون گوگرد برای گوگردزایی در نظر گرفته شد. پس از تعیین شرایط بهینه، با استفاده از نرم‌افزار اسپن

¹ Green House gases

² Biomass

³ Gasification

پلاس، تحلیل اقتصادی فرایند گازی سازی باگاس انجام شد. نتایج این تحلیل نشان داد که این فرایند به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بوده و می‌تواند به‌عنوان منبع مناسبی برای تولید گاز سنتز مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱ نمودار جریان فرایند گازی سازی باگاس در اسپین پلاس

۲-شرح فرایند

در این پژوهش، از نرم‌افزار اسپین پلاس نسخه ۱۲ برای شبیه‌سازی فرایند گازی سازی استفاده شد. قابلیت تعریف خوراک نامتعارف به‌عنوان ورودی در این نرم‌افزار، امکان شبیه‌سازی دقیق فرایند را فراهم کرد. با توجه به عدم وجود مدل گازی ساز اختصاصی در نرم‌افزار، فرایند به چند بخش مجزا تقسیم و برای هر بخش، مدل‌های مناسب بر اساس مطالعات اولیه انتخاب و اعمال شد. در ادامه، با اعمال نوآوری‌هایی در مدل، نقاط بهینه فرایند تعیین و بهینه‌سازی شد. این نوآوری‌ها منجر به کاهش چشمگیر حداقل ارزش حرارتی گاز سنتز تولیدی و افزایش قابل توجه راندمان گاز سرد کل فرایند گردید. نمودار جریان شبیه‌سازی شده که در نرم‌افزار اسپین پلاس به دست آمده است، در شکل ۱ نشان داده شده است. عناصر تشکیل‌دهنده باگاس شامل هیدروژن، کربن، اکسیژن، نیتروژن و گوگرد هستند ترکیب در صد این عناصر در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱ آنالیز ترکیبی باگاس تر

ترکیب درصد	مواد تشکیل‌دهنده
۴۶/۹۵	کربن
۶/۰۶	هیدروژن
۰/۱۳	نیتروژن
۴۶/۷۸	اکسیژن
۰/۰۸	گوگرد

دو عنصر هیدروژن و کربن مهم‌ترین اجزاء در فرایند گازی سازی هستند که باعث افزایش ارزش حرارتی گاز سنتز می‌شوند. در جدول ۲، پارامترهای مختلف باگاس برای تعریف خوراک در نرم‌افزار اسپین پلاس نشان داده شده است. این پارامترها شامل مواردی مانند میزان رطوبت، کربن ثابت، مواد فرار و خاکستر هستند. جدول‌های ۱ و ۲، اطلاعاتی را که به نرم‌افزار اسپین پلاس برای تعریف خوراک باگاس ورودی به فرایند ارائه می‌شوند را نشان می‌دهند.

جدول ۲ تجزیه و تحلیل تقریبی ترکیب درصد وزنی باگاس تر

خواص تعریف شده	کسر وزنی
میزان رطوبت	۷/۳۱۷
خاکستر	۴/۴۱
مواد فرار	۷۶/۹۳
کربن ثابت	۱۱/۳۳

باتوجه به رطوبت بالای باگاس، ابتدا باید باگاس تر به یک دستگاه خشک کن منتقل شود. در شبیه سازی انجام شده، از رآکتور R-Stoiche به عنوان خشک کن استفاده شده است. این رآکتور طبق اصول استوکیومتری، آب موجود در باگاس را به بخار تبدیل می کند. پس از خشک کن، یک جداکننده برای جدا سازی بخار آب تولید شده تعبیه شده است. این بخش از سیستم به منظور کاهش مصرف سوخت و جلوگیری از واکنش های ناخواسته در رآکتور تعبیه شده است. در این بخش، بخار آب با دبی ۱۲۴۸ کیلوگرم بر ساعت از باگاس جدا می شود. باگاس خشک شده سپس به رآکتور R-Yield منتقل می شود و در آنجا اجزای تشکیل دهنده آن بر اساس بازده تبدیل واکنش تجزیه به محصولات نهایی تبدیل می شوند. دبی جرمی جریان خروجی از این رآکتور در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳ دبی جرمی اجزا تشکیل دهنده ی جریان گازی خروجی از رآکتور

عناصر تشکیل دهنده	دبی جرمی کیلوگرم بر ساعت
کربن	۵۸۵۰
اکسیژن	۵۳۱۹
هیدروژن	۸۵۹
نیتروژن	۱۱۰
گوگرد	۹۱
خاکستر	۱۵۱۴

پس از این مرحله، گاز تولیدی از طریق جداسازی جریان اصلی، از خاکستر و مواد سنگین جدا شده و تصفیه می گردد. سپس، این گاز به برج هیدروژناسیون منتقل می شود. در این برج، گوگرد از جریان اصلی جدا می شود. این فرایند مانع از دخالت گوگرد در واکنش های گازی سازی و تولید ترکیبات مضر مانند هیدروژن سولفید در گاز سنتز می شود. از مزایای این فرایند می توان به افزایش میزان تولید هیدروژن قابلیت بازیابی گوگرد جذب شده اشاره کرد. گاز به دست آمده از رآکتور اول با دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد همراه با بخار آب ۱۵۰ درجه ی سانتی گراد وارد رآکتور دوم یعنی رآکتور R-Gibbs می شود. استفاده از بخار آب به جای عوامل گازی سازی دیگر مانند هوا و اکسیژن، به دلیل مزایایی همچون تجزیه مولکول آب در دمای بالا به اکسیژن و هیدروژن، بازده واکنش بالا و کاهش آلاینده ها بسیار مناسب است. در رآکتور گازی ساز، واکنش های نشان داده شده در جدول ۴ در دمای ۸۰۰ درجه ی سانتی گراد و فشار ۱ بار صورت می گیرند.

جدول ۴ واکنش های شیمیایی انجام شده در فرایند گازی سازی

معادلات شیمیایی	نام واکنش ها	آنتالپی واکنش ها
$C + 0.5O_2 \rightarrow CO$	اکسایش ناقص کربن	-۱۱۱
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	اکسایش کامل کربن	-۳۹۴
$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2$	اکسایش منوکسید	-۲۸۳
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	واکنش بودوارد	۱۷۲
$C + H_2O \rightarrow H_2 + CO$	واکنش بخار آب و کربن	۱۳۱
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	واکنش هیدروژناسیون کربن	-۷۴/۸
$CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$	واکنش شیفیت آب - گاز	-۴۱/۲
$CO + 3H_2O \rightarrow CH_4 + H_2O$	واکنش تولید متان	-۲۰۶

به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی در مورد سینتیک و استوکیومتری واکنش‌ها، از روش حداقل‌سازی انرژی آزاد گیبس برای تحلیل این واکنش‌ها استفاده شد. با تغییر در پارامترهای مؤثر، معادلات شیمیایی نیز دستخوش تغییر می‌شوند و با استفاده از تحلیل حساسیت، می‌توان مناسب‌ترین شرایط را برای تولید محصولات مطلوب به دست آورد. رآکتور گازی ساز، گاز سنتز را با دبی ۱۵۶۳۹ کیلوگرم بر ساعت تولید می‌کند. دبی جرمی ترکیبات جریان گاز سنتز تولیدی از رآکتور گازی ساز در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵ اجزا تشکیل‌دهنده گاز سنتز

محصولات رآکتور گازی ساز	دبی جرمی کیلوگرم بر ساعت
هیدروژن	۱۱۷۶/۲۲
کربن منوکسید	۱۲۹۵۲/۳
کربن دی‌اکسید	۸۴۱/۸
متان	۸۸/۸
آب	۴۶۹/۸
نیترژن	۱۰۹/۹

گاز سنتز تولیدی دارای حداقل ارزش حرارتی معادل ۱۷/۶۶ مگاژول بر کیلوگرم است که ۴/۶۶ مگاژول بر کیلوگرم نسبت به نتایج پژوهش افزایش نشان می‌دهد. گاز سنتز تولیدی حاوی مقادیر نامطلوبی از آب، دی‌اکسیدکربن و نیترژن است. جداسازی این آلاینده‌ها می‌تواند ۲ تا ۸ مگاژول بر کیلوگرم به حداقل ارزش حرارتی گاز تولیدی اضافه کند. در رآکتور گازی ساز، مقدار ناچیزی اتان و اتیلن نیز تولید شد که به دلیل کمبود، در فهرست محصولات نهایی لحاظ نشده است. گاز سنتز تولیدی از رآکتور دوم به منظور خنک‌سازی، وارد مبدل حرارتی با سیال عامل آب می‌شود. در این مرحله، دمای جریان به ۵۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. سپس، جریان سرد وارد جداساز شده و آب موجود در آن جداسازی می‌شود. گاز سنتز عاری از آب، به برج جاذب کربن منتقل می‌شود. در این برج، حدود ۹۵ درصد از کربن دی‌اکسید موجود در جریان، جذب جاذب کربن می‌شود. در نهایت، جریانی غنی از گازهای قابل اشتعال هیدروژن، متان و مونوکسید کربن حاصل می‌شود که از نظر ارزش حرارتی مطلوب هستند. انجام این فرآیندها سبب افزایش قابل توجهی در ارزش حرارتی گاز و راندمان گاز سرد شده است، که نشان‌دهنده پتانسیل بالای این فرایند می‌باشد.

۳- فرضیات مسئله

باتوجه به واکنش‌های فرایند گازی سازی در نرم‌افزار اسپن پلاس و وجود محدودیت‌هایی مانند عدم دسترسی به اطلاعات کافی در مورد استوکیومتری، سرعت واکنش‌ها و موارد دیگر، شبیه‌سازی این فرایند نیازمند تعدادی فرض است. لازم به ذکر است که استفاده از این فرضیات تا حدی دقت محاسبات را کاهش می‌دهد، اما دید کلی مناسبی از این فرایند ارائه می‌دهد:

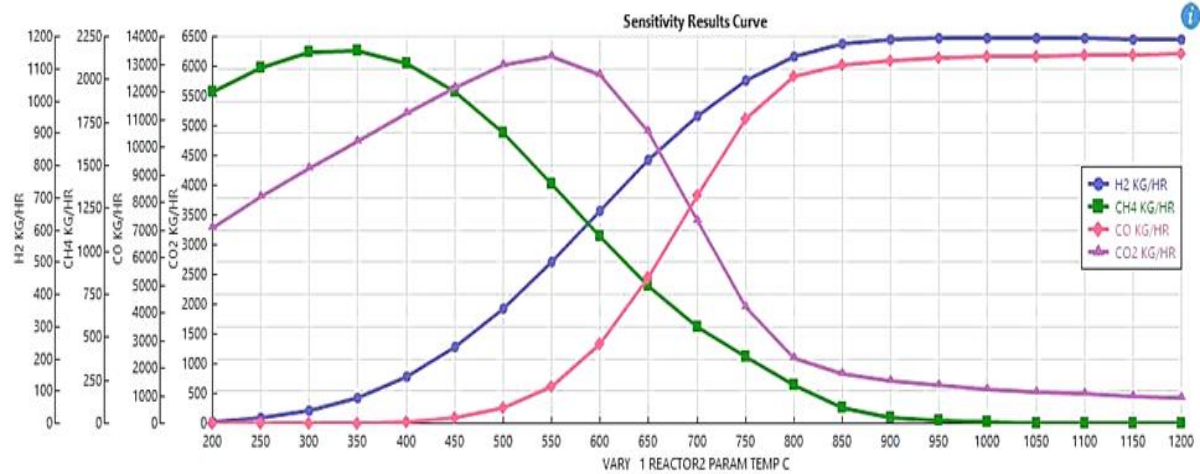
- فرایند گازی‌سازی هم‌دما بوده و در شرایط حالت پایدار عمل می‌کند.
- خاکستر بی‌اثر بوده و در واکنش‌های شیمیایی شرکت نمی‌کند.
- قطران و هیدروکربن‌های سنگین محصول واکنش‌های غیرتعادلی هستند و به همین دلیل در مدل لحاظ نشده‌اند.
- اندازه ذرات در نظر گرفته نمی‌شود.
- افت فشار و اتلاف حرارت برای راکتورها نادیده گرفته می‌شود.
- عناصر و ترکیبات تشکیل‌دهنده گاز سنتز عمدتاً شامل هیدروژن، کربن مونو اکسید، کربن دی‌اکسید، متان و آب در کنار زغال، اکسیژن، نیترژن و گوگرد است.^۱

۴- نتایج و بحث

در این پژوهش، تحلیل حساسیت فرایند گازی سازی با تمرکز بر چهار ماده تشکیل‌دهنده گاز سنتز (هیدروژن، متان، کربن مونوکسید و کربن دی‌اکسید) و سه پارامتر تعیین‌کننده عملکرد رآکتور (دما، فشار و دبی بخار آب ورودی) انجام شد. ابتدا، بهینه‌سازی پارامترهای مذکور جهت دستیابی به حداکثر تولید گاز سنتز و حداقل هزینه تولید صورت گرفت. سپس، به بررسی اقتصادی بودن فرایند در نقاط بهینه پرداخته شد.

۴-۱ تحلیل دمایی راکتور گازی ساز

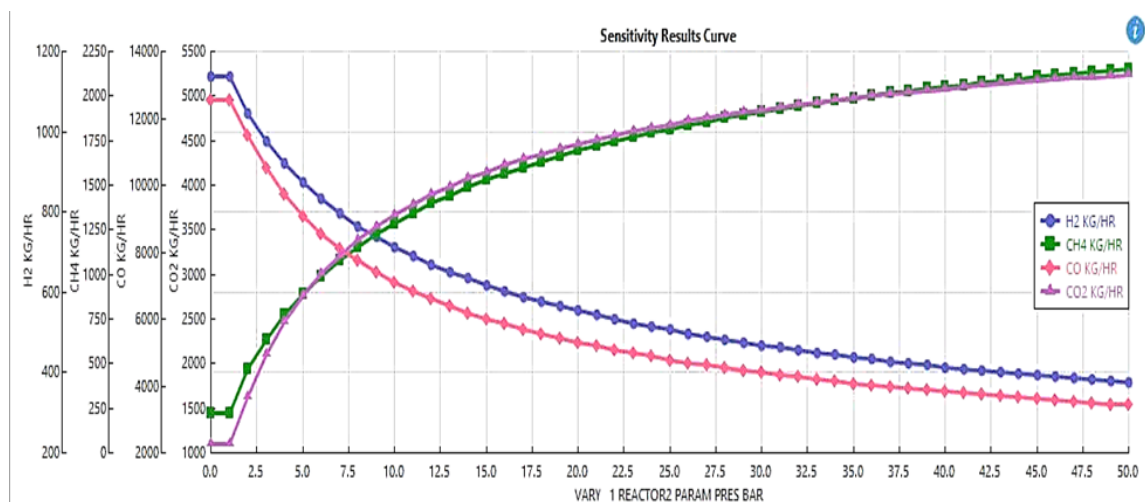
در این تحلیل، متغیر تصمیم‌گیری دمایی است که واکنش گازی ساز در آن انجام می‌شود. بازه دمایی ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برای دمای راکتور تعیین شد. شکل ۲ نتایج تحلیل حساسیت انجام شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار زیادی گاز متان و کربن دی‌اکسید در راکتور گازی ساز تولید می‌شود، در حالی که مقدار گاز هیدروژن و مونوکسید کربن تقریباً صفر است. با افزایش دما، میزان تولید متان و کربن دی‌اکسید در ابتدا به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. با عبور از دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، تولید متان شروع به کاهش می‌کند. همچنین، مقدار کربن دی‌اکسید با گذر از دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد روند نزولی به خود می‌گیرد. مطابق شکل ۲ نقطه ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان بهینه‌ترین دما برای فرایند گازی‌سازی انتخاب می‌شود. دلیل این انتخاب آن است که در دماهای بالاتر، شیب رشد تولید هیدروژن و مونوکسید کربن به‌کندی ادامه پیدا می‌کند. علاوه بر این، در دماهای بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، واکنش تف‌جوشی در راکتور رخ می‌دهد که می‌تواند منجر به انسداد جریان‌های گازی در راکتور گازی ساز شود.



شکل ۲ تحلیل حساسیت دبی ۴ جزء اساسی گاز سنتز نسبت به تغییرات دمای راکتور گازی ساز

۴-۲ تحلیل فشاری راکتور گازی ساز

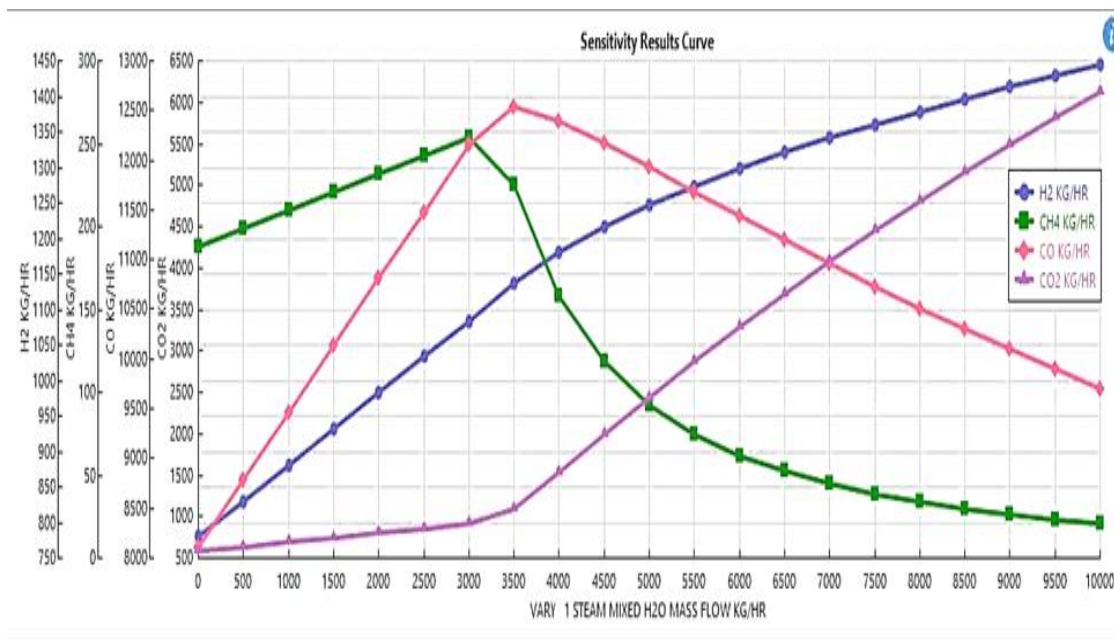
در این تحلیل تغییرات فشار در راکتور گازی ساز برای تولید گاز سنتز با ارزش حرارتی بالا بررسی شد. بازه ۱ تا ۵۰ بار برای راکتور در نظر گرفته شد. طبق شکل ۳ بدست آمده از شبیه‌سازی کاهش فشار در راکتور گازی ساز نسبت به فشار محیط هیچ تفاوتی در تولید گاز سنتز ندارد اما با افزایش فشار به بیش از ۱ بار تغییراتی در دبی اجزا گاز سنتز به وجود می‌آید. طبق اصل لوشاتلیه واکنش‌های ذکر شده در راکتور گازی ساز به سمت تولید فرآورده‌هایی با تعداد مول کمتر سوق پیدا می‌کنند. این امر سبب تولید متان و کربن دی‌اکسید به‌جای هیدروژن و کربن مونوکسید می‌شود. با افزایش فشار حداقل ارزش حرارتی و راندمان گاز سرد کاهش پیدا می‌کند، بنابراین طبق مشاهدات انجام شده فشار ۱ بار برای راکتور گازی ساز بهینه‌ترین حالت ممکن می‌باشد.



شکل ۳ تحلیل حساسیت دبی ۴ جزء اصلی نسبت به تغییرات فشار راکتور گازی ساز

۳-۴ تحلیل دبی بخار ورودی به راکتور گازی ساز

راکتور گازی ساز بر اساس قانون گیس عمل می‌کند و با به حداقل رساندن انرژی آزاد گیس تمام عناصر شرکت‌کننده، فرایند را انجام می‌دهد. برای تولید چهار جزء اصلی گاز سنتز به یک سیال عامل نیاز است. همان‌طور که اشاره شد، بخار آب به دلیل آزاد کردن هم‌زمان هیدروژن و اکسیژن در راکتور، به‌عنوان عامل گازی ساز، نسبت به هوا و اکسیژن خالص، انتخابی مناسب شناخته می‌شود. شکل ۴ نشان می‌دهد که افزایش دبی بخار آب ورودی تا نقطه بهینه، حداقل ارزش حرارتی را برای تولید گاز سنتز به همراه دارد، که برابر با ۶/۴۳ مگاژول بر کیلوگرم است. با افزایش دبی بخار آب تا ۳۵۰۰ کیلوگرم بر ساعت، تولید هیدروژن و متان به ترتیب ۳۷۰ و ۵۰ کیلوگرم بر ساعت افزایش می‌یابد. همچنین، تولید کربن مونوکسید و کربن دی‌اکسید به ترتیب ۴۵۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر ساعت افزایش پیدا می‌کند. با افزایش دبی بخار آب، تولید هیدروژن و کربن دی‌اکسید به طور قابل‌توجهی افزایش یافت. با وجود مطلوب بودن تولید گاز هیدروژن، به دلیل افزایش قابل‌توجه تولید کربن دی‌اکسید، کاهش متان و کربن مونوکسید با افزایش بیش از حد بخار آب امکان‌پذیر نیست. دلیل این امر کاهش حداقل ارزش حرارتی و راندمان گاز سرد فرایند (به دلیل افزایش تولید کربن دی‌اکسید) است. بررسی انجام شده نشان می‌دهد که ۳۵۰۰ کیلوگرم بر ساعت، مقدار بهینه‌ای برای بخار آب در فرایند مورد نظر است. در این نقطه، تولید هیدروژن در سطح مطلوبی قرار دارد، کربن مونوکسید به حداکثر مقدار خود می‌رسد، میزان تولید متان ۳۰ کیلوگرم بر ساعت کمتر از حداکثر مقدار آن است و کربن دی‌اکسید نیز به مقدار ناچیزی تولید می‌شود.



شکل ۴ تحلیل حساسیت دبی ۴ جزء اصلی گاز سنتز نسبت به تغییرات دبی بخار آب ورودی به راکتور راکتور گازی ساز

۴-۴ بررسی اقتصادی فرایند گازی سازی در حالت بهینه

پس از تحلیل حساسیت‌های انجام شده نقاط بهینه به دست آمد. در این قسمت با اتمام شبیه‌سازی بررسی اقتصادی فرایند گازی سازی شروع می‌شود. با توجه به داده‌های به دست آمده از بخش شبیه‌سازی به وسیله یک سناریو اقتصادی طرح‌ریزی می‌شود. در این سناریو نوع و سایز دستگاه‌های مورد نیاز انتخاب و اندازه‌گیری می‌شود، علاوه بر آن با داشتن یک قیمت تقریبی از خوراک مصرفی و محصول تولیدی می‌توان میزان سوددهی این فرایند را مشاهده نمود. با توجه به مطالب گفته شده در جدول ۶ میزان هزینه سرمایه‌گذاری، میزان مصرفی کارخانه و نرخ بازگشت سرمایه را مشاهده می‌کنید. قیمت باگاس ورودی به فرایند ۱۰ سنت به ازای هر کیلو در نظر گرفته شد، گاز سنتز خروجی نیز با قیمت ۷۵ سنت در کمینه‌ترین حالت در نظر گرفته شد تا میزان سوددهی مشخص شود داده‌های تقریبی از منابع علمی برداشت شده است. لازم به ذکر است که اسپن قادر به محاسبه اندازه و قیمت دو راکتور در نظر گرفته نبود و قیمت این دو دستگاه طبق تحقیقات انجام شده به طور میانگین در حدود ۱۰ میلیون دلار به ازای هر دستگاه است. تمام هزینه‌های در نظر گرفته شده در تحلیل اقتصادی به دلار آمریکا محاسبه شده است.

جدول ۶ داده‌های بدست آمده از تحلیل اقتصادی

۲۵۳۱۵۸۸۰۲	هزینه سرمایه‌گذاری	برآورد هزینه‌های فرایند
۳۸۶۷۳۰۰	هزینه مصرفی کارخانه	
۵۸/۸	بازگشت سرمایه داخلی	درآمد و هزینه مواد اولیه فرایند
۴۳۸۲۱۶۰۰	هزینه مواد اولیه	
۹۴۷۵۵۹۰۰	درآمد محصولات تولیدی	
۱۵۷۱۸۰۰	هزینه تجهیزات موردنیاز	
۲۵۴۹۹۰۰	هزینه نصب تجهیزات	برآوردهای جانبی
۱۸	مدت‌زمان ساخت (ماه)	
۵۵	نرخ بازگشت سرمایه (درصد)	

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، از یک راکتور گازی سازی بستر ثابت برای تولید گاز سنتز از باگاس تر استفاده شد. پارامترهای عملیاتی مختلف شامل رطوبت باگاس، دمای گازی‌سازی، نسبت باگاس به بخار آب و نوع کاتالیزگر مورد بررسی قرار گرفتند. برای بازیافت گوگرد از گاز سنتز تولیدی، از برج هیدروژناسیون گوگرد استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از خشک‌کن برای باگاس تر، راندمان راکتور را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد و مصرف سوخت آن را کاهش می‌دهد. این امر به دلیل کاهش محتوای آب باگاس و افزایش دمای احتراق آن در راکتور است. استفاده از برج هیدروژناسیون گوگرد علاوه بر بازیافت گوگرد (۹۱ کیلوگرم بر ساعت)، منجر به افزایش تولید هیدروژن (۱۴۰ تا ۱۹۰ کیلوگرم بر ساعت) در فرایند گازی‌سازی می‌شود. این امر به دلیل حذف گوگرد از گاز سنتز و جلوگیری از واکنش‌های جانبی ناخواسته است. تحلیل حساسیت نشان داد که دبی بهینه برای باگاس و بخار آب ورودی به راکتور به ترتیب ۱۵۰۰۰ و ۳۵۰۰ کیلوگرم در ساعت است. در این شرایط، حداکثر تولید گاز سنتز با کیفیت مطلوب حاصل می‌شود. راکتور گازی ساز در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ بار عمل می‌کند. واکنش قطران و هیدروکربن‌های سنگین در این راکتور نادیده گرفته شده است. با توجه به نوع باگاس و بخار آب ورودی و در شرایط ذکر شده، راکتور در هر ساعت ۱۱۷۶ کیلوگرم هیدروژن، ۸۸ کیلوگرم متان، ۱۲۹۵۲ کیلوگرم مونوکسید کربن و ۸۴۱ کیلوگرم دی‌اکسید کربن تولید می‌کند. دو پارامتر کلیدی حداقل ارزش حرارتی گاز سنتز و راندمان گاز سرد مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج با یافته‌های موتاز و همکاران مقایسه شد، نتایج نشان داد که حداقل ارزش حرارتی گاز سنتز برابر ۴/۶۶ مگاژول بر کیلوگرم و راندمان گاز سرد فرایند ۳۰ درصد افزایش یافته است. علاوه بر این، با طراحی برج جاذب کربن، ۹۵ درصد کربن دی‌اکسید تولیدی جذب می‌شود. این امر منجر به کاهش قابل توجه آثار زیست‌محیطی این فرایند صنعتی می‌شود. همچنین، جداسازی ترکیبات نامطلوب، حداقل ارزش حرارتی گاز سنتز را به ۱/۷۷ مگاژول بر کیلوگرم افزایش می‌دهد.

منابع

- A. Anukam, S. Mamphweli, P. Reddy, E. Meyer, and O. Okoh, Pre-processing of sugarcane bagasse for gasification in a downdraft biomass gasifier system: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 66, pp. 775–780, 2016.
- A. Converti, R. P. S. Oliveira, B. R. Torres, A. Lodi, and M. Zilli, Biogas production and valorization employing a two-step biological process, *Bioresource Technology*, vol. 100, no. 23, pp. 5771–5776, 2009.
- A. Demirbas, Thermochemical conversion processes, *Biofuels: Securing the Planet's Future Energy Needs*, Springer, Trabzon, Turkey, 2009, pp. 261–304.
- A. J. Keche, A. P. R. Gaddale, and R. G. Tated, Simulation of biomass gasification in downdraft gasifier for different biomass fuels using ASPEN PLUS, *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 17, no. 2, pp. 465–473, 2015.
- A. Raheem, M. Zhao, W. Dastyar, A. Q. Channa, G. Ji, and Y. Zhang, Parametric gasification process of sugarcane bagasse for syngas production, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 31, pp. 16234–16247, 2019.
- Community Research and Development Information Service, CANEBIOFUEL Report Summary, 2018.

- D. Roy, S. Samanta, and S. Ghosh, Techno-economic and environmental analyses of a biomass-based system employing solid oxide fuel cell, externally fired gas turbine and organic Rankine cycle, *Journal of Cleaner Production*, vol. 225, pp. 36–57, 2019.
- F. Ebrahimian and K. Karimi, Efficient biohydrogen and advanced biofuel coproduction from municipal solid waste through a clean process, *Bioresource Technology*, vol. 300, p. 122656, 2020.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, *Crops*, FAOSTAT, 2018.
- H. Kouchaki-Penchah, M. Sharifi, H. Mousazadeh, and H. Zarea-Hosseiniabadi, Life cycle assessment of medium-density fiberboard manufacturing process in Islamic Republic of Iran, *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 351–358, 2016.
- I. L. Motta, N. T. Miranda, et al., Sugarcane bagasse gasification: Simulation and analysis of different operating parameters, fluidizing media, and gasifier types.
- International Energy Agency (IEA), *Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy*, 2017.
- J. A. Ramirez and T. J. Rainey, Comparative techno-economic analysis of biofuel production through gasification, thermal liquefaction and pyrolysis of sugarcane bagasse, *Journal of Cleaner Production*, vol. 229, pp. 513–527, 2019.
- J. Han, Y. Liang, J. Hu, L. Qin, J. Street, Y. Lu, et al., Modeling downdraft biomass gasification process by restricting chemical reaction equilibrium with Aspen Plus, *Energy Conversion and Management*, vol. 153, pp. 641–648, 2017.
- L. P. R. Pala, Q. Wang, G. Kolb, and V. Hessel, Steam gasification of biomass with subsequent syngas adjustment using shift reaction for syngas production: An Aspen Plus model, *Renewable Energy*, vol. 101, pp. 484–492, Feb. 2017
- M. Zakzeski et al., The Catalytic Valorization of Lignin for the Production of Renewable Chemicals, *Chemical Reviews*, vol. 110, no. 6, pp. 3552–3599, Jun. 2010
- R. C. Brown, "Introduction to thermochemical processing of biomass into fuels, chemicals and power, *Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power*, R. C. Brown, Ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011, pp. 1–12.
- R. Tavares, E. Monteiro, F. Tabet, and A. Rouboa, Numerical investigation of optimum operating conditions for syngas and hydrogen production from biomass gasification using Aspen Plus, *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 1309–1314, 2020.
- S. A. Zaman, D. Roy, and S. Ghosh, "Process modeling and optimization for biomass steam-gasification employing response surface methodology, *Biomass and Bioenergy*, vol. 143, p. 105847, 2020.
- S. E. Hosseini, A. M. Andwari, M. A. Wahid, and G. Bagheri, A review on green energy potentials in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 533–545, 2013.
- S. Heidenreich and P. U. Foscolo, New concepts in biomass gasification, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 46, pp. 72–95, 2015.
- S. Kaewluan and S. Pipatmanomai, Potential of synthesis gas production from rubber wood chip gasification in a bubbling fluidised bed gasifier, *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 1, pp. 75–84, 2011.
- W. Doherty, A. Reynolds, and D. Kennedy, The effect of fair preheating in a biomass CFB gasifier using Aspen Plus simulation, *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 9, pp. 1158–1167, 2009.
- W. X. Peng, L. S. Wang, M. Mirzaee, H. Ahmadi, M. J. Esfahani, and S. Fremaux, Hydrogen and syngas production by catalytic biomass gasification, *Energy Conversion and Management*, vol. 135, pp. 270–273, 2017.
- WWW.Irda.ir
- X. Zhang et al., Thermodynamic and economic analysis of biomass partial gasification process, *Applied Thermal Engineering*, vol. 129, pp. 410–420, Feb. 2018.