Sharif University of Technology

Sharif Mechanical Engineering Journal

https://sjme.journals.sharif.edu

Research Article

Thermodynamic Modeling and Performance Assessment of a Clean Hydrogen Production Energy System Using a Palladium Separation Membrane Based on Gibbs Free Energy Minimization and Lagrange Undetermined Multipliers Method

Parisa Mojaver*

Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran
* Corresponding author:(p.mojaver@kut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 18 August 2025

Revised: 23 February 2026

Accepted: 25 February 2026

Keywords:

Gibbs free energy minimization,
Lagrange undetermined multipliers,
clean hydrogen,
Water-gas shift reactor,
Palladium separation membrane.

Abstract

In this study, an integrated system for producing clean hydrogen from eucalyptus biomass was designed and analyzed. The system consists of four main units: a gasification reactor, a steam-methane reforming reactor, a water-gas shift reactor, and a palladium membrane for hydrogen separation. The equations of the process were implemented and solved using Engineering Equation Solver (EES) software and the outcomes were validated against experimental data reported in the literature, showing good agreement. The findings indicate that gasification temperature plays a decisive role in determining the composition of the produced gas. Specifically, with increasing temperature, the hydrogen fraction at the gasification reactor outlet rose by 15.26% in the gasification reactor outlet and by 20.71% in the steam-methane reforming reactor, while it decreased by 2.12% in the water-gas shift reactor. Moreover, higher temperatures enhanced the hydrogen flux through the palladium membrane from 0.29 to 1.52 J/m^2.s, highlighting the strong influence of operating conditions on system performance.

Introduction

The combustion of fossil fuels results in greenhouse gas emissions, which are among the main drivers of climate change and global warming. Therefore, the design and development of clean and sustainable energy systems have received increasing attention [2]. Clean energy systems play a crucial role in ensuring sustainable energy supply and mitigating environmental degradation, making them a fundamental pillar in the transition toward a livable and sustainable future [3]. Biomass is recognized as one of the most important renewable energy resources and includes natural organic materials such as wood residues, agricultural residues, and forest wastes that can be converted into energy [4]. Due to its renewability and wide availability, biomass utilization offers an effective solution for reducing dependence on fossil fuels and limiting greenhouse gas emissions. Biomass gasification is an efficient thermochemical conversion process in which biomass is transformed into syngas at high temperatures in the presence of gasifying agents such as steam [5]. The produced syngas mainly consists of hydrogen, carbon monoxide, carbon dioxide, and methane and can be used as fuel in various power generation systems. The development of biomass-based gasification systems not only reduces environmental pollutants but also promotes efficient resource utilization and sustainable energy production [6,7].

Methodology

Figure 1 illustrates the configuration of the proposed system. Initially, eucalyptus along with steam enters the gasification reactor, where the biomass undergoes thermal decomposition

To Cite this article:
Mojaver, P. 2026. Thermodynamic modeling and performance assessment of a clean hydrogen production energy system using a palladium separation membrane based on gibbs free energy minimization and lagrange undetermined multipliers method, Sharif Mechanical Engineering Journal, **42**(1), 27-36. https://doi.org/10.24200/j40.2026.67527.1747

E-ISSN: 2676-4733 © 2026 The Author(s). Sharif Mechanical Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

at high temperatures, leading to the production of syngas through gasification reactions. The resulting syngas consists of hydrogen, carbon monoxide, methane, carbon dioxide, and steam. Subsequently, the syngas is directed to the steam methane reforming reactor, in which methane is converted into hydrogen and carbon dioxide, thereby increasing the hydrogen content of the gas mixture. The hydrogen-enriched syngas then enters the water-gas shift reactor, where the reaction between carbon monoxide and steam produces additional hydrogen and carbon dioxide, further enhancing the hydrogen fraction. In the final stage, the syngas is fed into a palladium-based separation membrane, which selectively separates hydrogen from the remaining gas components. Eq. (1) represents the steam gasification process of eucalyptus biomass, where $CH_{\alpha}O_{\beta}$ denotes the chemical composition of the biomass [25], and α and β indicate the hydrogen-to-carbon and oxygen-to-carbon ratios, respectively. According to Eqs. (2) to (11), the coefficients of the syngas components are determined using a combined Gibbs free energy minimization and Lagrange undetermined multipliers method [21-24]. For a reactive system at constant temperature and pressure, the Gibbs free energy minimization approach is applied subject to elemental balance constraints. The unknown molar amounts in the steam methane reforming (Eqs. (12) and (14)) and water-gas shift reaction (Eqs. (13) and (15)) [26] are also calculated using this combined thermodynamic method. According to Eqs. (16) and (17), hydrogen permeation through the palladium membrane is described using a temperature-dependent permeability model, highlighting the strong influence of operating temperature on hydrogen flux [27].

Results and Discussion

Figure 2 shows system validation, where a good agreement is observed between the present simulation results and the experimental data reported in Ref. [21]. The variation of syngas composition versus the steam-to-biomass ratio (STBR) is illustrated in Figure 3. Increasing STBR enhances steam participation, which decreases the molar fraction of carbon monoxide significantly due to the intensified water-gas shift reaction. Meanwhile, molar fractions of hydrogen and carbon dioxide also decrease. The effect of temperature on syngas composition is presented in Figure 4. As temperature increases, steam and methane fractions decrease, with methane dropping from 5.12% to 0.02%. In contrast, hydrogen and carbon monoxide increase from 35.32% to 40.71% and from 9.93% to 18.85%, respectively, while carbon dioxide decreases from 15.74% to 8.82%, mainly due to the Boudouard reaction.

After gasification, the syngas enters the steam methane reforming reactor. As shown in Figure 5, increasing temperature raises hydrogen and carbon monoxide fractions while reducing carbon dioxide by about 4.17%, consistent with Le Chatelier's principle. The temperature effect on the water-gas shift reactor is illustrated in Figure 6, where hydrogen slightly decreases and carbon dioxide increases due to the exothermic nature of the reaction. Figure 7 shows that increasing temperature enhances hydrogen permeation through the palladium membrane, with hydrogen flux increasing from 0.29 to 1.52, indicating improved separation performance.

Conclusion

This study investigated the feasibility of energy production and hydrogen purification from eucalyptus biomass through a gasification-based process. The integration enhanced system efficiency and produced clean hydrogen. The main findings can be summarized as follows:

- ✓ Increasing the temperature reduced the hydrogen fraction from 61.31% to 60.01% of the water-gas shift reactor while increasing carbon dioxide from 10.22% to 12.13%.
- ✓ Higher temperatures reduce the carbon dioxide fraction in the steam methane reforming reactor by approximately 4.17%..
- ✓ Increasing temperature improved hydrogen permeation through the palladium membrane from 0.29 to 1.52 and enhanced hydrogen and carbon monoxide fractions in the gasification reactor outlet.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

مجله علمی مهندسی مکانیک شریف

https://sjme.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

مدل‌سازی ترمودینامیکی و ارزیابی عملکرد یک سیستم انرژی تولید هیدروژن پاک با استفاده از غشاء جداساز پالادیومی با روش کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس و ضرایب نامعین لاگرانژ

پریسا مجاور *

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

*نویسنده مسئول (p.mojaver@kut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۴/۰۵/۲۷

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۴/۱۲/۰۴

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴ /۱۲/۰۶

واژگان کلیدی:

کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس،

ضرایب نامعین لاگرانژ،

هیدروژن پاک،

جابجایی آب- گاز،

غشاء جداساز پالادیومی.

چکیده

در پژوهش حاضر، یک سیستم یکپارچه‌ی راکتور گازی‌سازی برای تولید هیدروژن پاک از زیست‌توده‌ی اکالیپتوس طراحی و بررسی شده است؛ که شامل: راکتور اصلاح بخار- متان، راکتور جابجایی آب- گاز، و غشاء پالادیومی برای جداسازی هیدروژن است. ترکیب فرآیندهای ذکرشده، امکان افزایش سهم هیدروژن در گاز سنتز و کاهش آلاینده‌ها را فراهم می‌سازد. معادله‌های حاکم در نرم‌افزار حل‌گر معادله‌های مهندسی پیاده‌سازی، حل، و نتایج حاصل استخراج شده است. روش کار بر مبنای شبیه‌سازی ترمودینامیکی بوده و اعتبارسنجی نتایج با داده‌های تجربی موجود در ادبیات انجام شده است، که تطابق خوبی را نشان داده است. یافته‌ها حاکی از آن است که دمای گازی‌سازی، نقش تعیین‌کننده‌ای در ترکیب گاز تولیدی دارد؛ به‌طوری که با افزایش دما، سهم هیدروژن در خروجی راکتور گازساز به میزان ۱۵/۲۶٪ و در راکتور اصلاح بخار-متان به میزان ۲۰/۷۱٪ افزایش یافته است، در حالی که این مقدار در راکتور جابجایی آب-گاز ۲/۱۲٪ کاهش نشان داده است. همچنین، افزایش دما موجب افزایش شار عبوری هیدروژن از غشاء پالادیومی از مقدار ۰/۲۹ به ۱/۵۲ ژول بر مترمربع ثانیه شده است.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، رشد فزاینده‌ی جمعیت جهانی و توسعه‌ی شتابان صنایع منجر به افزایش قابل‌توجه تقاضای انرژی شده است. هم‌زمان، محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی و پیامدهای منفی زیست‌محیطی ناشی از مصرف آن‌ها، نگرانی‌های جدی را در سطح جهانی ایجاد کرده است.[۱] سوزاندن سوخت‌های فسیلی باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، که از عوامل اصلی تغییرات اقلیمی و گرمایش زمین به شمار می‌روند. در نتیجه، با توجه به طراحی و توسعه‌ی سیستم‌های انرژی پاک و پایدار، بیش از پیش تأکید شده است.[۲] نقش کلیدی سیستم‌های انرژی پاک در تأمین انرژی پایدار و کاهش آثار مخرب زیست‌محیطی، آن‌ها را به یکی از ارکان اساسی حرکت به سوی آینده‌ای پایدار و قابل‌زیست تبدیل کرده است.[۳]

زیست‌توده به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تجدیدپذیر انرژی، جایگاه ویژه‌ای در تأمین انرژی پایدار دارد؛ که شامل مواد آلی طبیعی، نظیر: چوب، پسماندهای کشاورزی، و ضایعات جنگلی است، که قابلیت تبدیل به انرژی را دارند.[۴] به دلیل تجدیدپذیری و دسترسی گسترده‌ی زیست‌توده در نقاط مختلف جهان، استفاده از آن راهکاری مؤثر برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و محدودسازی انتشار گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود. گازی‌سازی زیست‌توده، یکی از روش‌های کارآمد تبدیل منبع اخیر به انرژی است، که در آن، زیست‌توده در دماهای بالا و در حضور عوامل گازی‌ساز نظیر بخار آب به گاز سنتز تبدیل می‌شود.[۵] گاز سنتز حاصل عمدتاً شامل هیدروژن، مونوکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن، و متان است و می‌تواند به‌عنوان سوخت در انواع سیستم‌های تولید توان استفاده شود. توسعه‌ی سیستم‌های انرژی مبتنی بر زیست‌توده و گازی‌سازی، علاوه‌بر کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، موجب استفاده‌ی بهینه از منابع طبیعی و کاهش ضایعات آلی می‌شود.[۶] افزون بر این، چنین سیستم‌هایی قابلیت استقرار در مناطق روستایی و دورافتاده را دارند و می‌توانند به‌عنوان منبعی مستقل و پایدار برای تأمین انرژی، نقش مؤثری در ارتقاء کیفیت زندگی و تحقق توسعه‌ی پایدار ایفا کنند. مزایای ذکرشده، اهمیت زیست‌توده و فناوری گازی‌سازی آن را در مسیر تولید انرژی پاک و پایدار بیش از پیش نمایان می‌سازد.[۷]

به‌کارگیری غشاهای جداساز پالادیومی در سیستم‌های انرژی مبتنی بر گازی‌سازی، نقش اساسی در جداسازی و خالص‌سازی هیدروژن از گاز سنتز ایفا می‌کنند؛ که به‌دلیل خواص منحصر به فرد خود، از جمله نفوذپذیری بسیار بالا نسبت به هیدروژن و پایداری مناسب در دماهای بالا و محیط‌های خورنده، قادر به تفکیک مؤثر هیدروژن از سایر اجزاء گاز سنتز، نظیر: مونوکسیدکربن،

استناد به این مقاله:

مجاور، پریسا، ۱۴۰۵. مدل‌سازی ترمودینامیکی و ارزیابی عملکرد یک سیستم انرژی تولید هیدروژن پاک با استفاده از غشاء جداساز پالادیومی با روش کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس و ضرایب نامعین لاگرانژ. مهندسی مکانیک شریف، ۴۲(۱)، صص.۲۷-۳۶. https://doi.org/10.24200/j40.2026.67527.1747

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶- ۴۷۳۳

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

دی‌اکسیدکربن، و بخار آب هستند.[۸ و ۹] استخراج هیدروژن با خلوص بالا از گاز سنتز، تأثیر مستقیمی در افزایش بازده‌ی سیستم‌های انرژی دارد. هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی پاک و کارآمد، کاربردهای گسترده‌ای در بخش‌های صنعتی و حمل‌ونقل دارد و استفاده از آن به‌دلیل عدم تولید گازهای گلخانه‌ای، به کاهش آثار زیست‌محیطی کمک شایانی می‌کند.[۱۰] علاوه‌بر این، هیدروژن می‌تواند نقش مهمی در ذخیره‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر ایفا کند و پایداری و قابلیت اطمینان سیستم‌های انرژی را افزایش دهد.

مطالعات پیشین نشان می‌دهند که گازی‌سازی زیست‌توده می‌تواند هم کیفیت سوخت را بهبود بخشد و هم آثار زیست‌محیطی را کاهش دهد. به‌عنوان مثال، وندرا[۱] و همکاران (۲۰۲۵)،[۱۱] کاهش قابل توجه آثار زیست‌محیطی و بهبود کیفیت سوخت را با گازی‌سازی زیست‌توده نشان داده‌اند، در حالی که ناندگانی و ساندن[۲] (۲۰۲۳)،[۱۲] بر اهمیت تحلیل ترمودینامیکی برای بهینه‌سازی عملکرد ترمودینامیکی تأکید داشته‌اند.. براساس مطالعات اخیر، یین[۳] و همکاران (۲۰۲۵)،[۱۳] یک سیستم ترکیبی سرمایش، گرمایش، و توان را پیشنهاد کرده‌اند، که گازی‌سازی هم‌زمان زیست‌توده، پیل‌های سوختی اکسید جامد و چرخه‌های برایتون را ادغام کرده و بازده انرژی آن تا ۲۰/۹۳٪ افزایش یافته است.

در زمینه‌ی مدل‌سازی و شبیه‌سازی گازی‌سازی، بیانسینی[۴] و همکاران (۲۰۲۳)،[۱۴] یک مدل گازساز بستر سیال برای گازی‌سازی هوایی زباله‌های شهری در اسپن پلاس[۵] توسعه داده و توانسته‌اند ارزش حرارتی پایین گاز سنتز را در بازه‌ی ۴/۲-۷/۳ (MJ/Nm^3) پیش‌بینی کنند. جادون[۶] و همکاران (۲۰۲۵)،[۱۵] نیز سه رویکرد مدل‌سازی ترمودینامیکی و سینتیکی را برای گازی‌سازی زیست‌توده‌ی چوبی مقایسه و با داده‌های تجربی اعتبارسنجی کرده‌اند، تا انتخاب مدل مناسب برای شبیه‌سازی دقیق فرآیندها را تسهیل سازند. فخیم قنبرزاده و همکاران (۲۰۱۱)،[۱۶] در پژوهشی به بررسی پتانسیل استفاده از ضایعات زیست‌توده‌ای به‌عنوان منبعی تجدیدپذیر برای تولید انرژی پرداخته و به فرآیند گازی‌سازی زیست‌توده در حضور هوا و رطوبت به‌منظور تولید گاز تمیز و قابل احتراق توجه کرده و گازساز بستر سیال به‌عنوان یکی از روش‌های کارآمد گازی‌سازی انتخاب شده است.

فرجی و سعیدی (۲۰۲۲)،[۱۷] با توسعه‌ی یک مدل سه مرحله‌ای شامل: خشک‌کردن، پیرولیز، و گازی‌سازی، شرایط بهینه برای تولید گاز سنتز غنی از هیدروژن از پوسته‌ی بادام‌زمینی را شناسایی کرده‌اند. همچنین، سوپارمین[۷] و همکاران (۲۰۲۴)،[۱۸] با انجام متا آنالیز، تأثیر پارامترهایی مانند ویژگی‌های زیست‌توده، نوع راکتور، عامل گازی‌کننده، و نسبت‌های عملیاتی بر بازده گاز سنتز را بررسی کرده و نشان داده‌اند که نتایج می‌تواند بسته به شرایط، روندهای بیشینه یا کمینه داشته باشد. صفری ثابت و همکاران (۲۰۲۰)،[۱۹] یک سیستم نوین الکترولیز بخار در دمای بالا با هسته‌ی اصلی چرخه‌ی برایتون یکپارچه با انرژی خورشیدی را برای تولید هیدروژن پیشنهاد و به‌صورت عددی شبیه‌سازی کرده‌اند. به‌منظور ارزیابی دقیق عملکرد سیستم، تحلیل‌های انرژی و اگزرژی[۸] انجام و برای افزایش بازده کلی، از چرخه‌های رانکین و رانکین آلی در کنار هسته‌ی اصلی استفاده شده است.

پژوهش حاضر با تمرکز بر استفاده از زیست‌توده‌ی اکالیپتوس برای تولید هیدروژن پاک و انرژی پایدار، مجموعه‌ای از نوآوری‌های مهم در حوزه‌ی انرژی ارائه داده است. نخست، بهره‌گیری از زیست‌توده‌ی فراوان، تجدیدپذیر و کم هزینه، مانند اکالیپتوس، جایگزینی مؤثر برای سوخت‌های فسیلی محدود و آلاینده به شمار می‌رود. دوم، طراحی یک سیستم یکپارچه‌ی مبتنی بر فناوری‌های پیشرفته، شامل راکتور گازی‌سازی، راکتور اصلاح بخار- متان، راکتور جابجایی آب- گاز، و غشای جداسازی پالادیوم، امکان تولید هیدروژن با خلوص بالا و کارایی انرژی قابل‌توجه را فراهم می‌کند. یکی از جنبه‌های نوآورانه‌ی پژوهش حاضر، ترکیب فرآیندهای ترمودینامیکی و غشایی برای افزایش درصد هیدروژن در گاز سنتز است؛ به‌طوری که هر مرحله از سیستم باعث ارتقاء سهم هیدروژن و کاهش آلاینده‌ها می‌شود. علاوه‌بر این، تحلیل دقیق اثر دمای گازی‌سازی در ترکیب گاز سنتز و عملکرد غشای پالادیوم، بهینه‌سازی شرایط عملیاتی و افزایش بهره‌وری سیستم را ممکن می‌سازد. پژوهش حاضر هم در زمینه‌ی تولید انرژی پاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مؤثر است و هم به توسعه‌ی فناوری‌های بومی، ارتقاء توانمندی‌های صنعتی داخلی و تأمین انرژی پایدار در مناطق دورافتاده کمک می‌کند. لذا، نوشتار حاضر گامی مهم در راستای دستیابی به اهداف توسعه‌ی پایدار، تولید هیدروژن پاک، و افزایش امنیت انرژی محسوب می‌شود.

۲. معرفی و مدل‌سازی سیستم

در شکل ۱، آرایش کلی سیستم انرژی پیشنهادی مشاهده می‌شود. در ابتدا، زیست‌توده‌ی اکالیپتوس به همراه بخار آب وارد راکتور گازی‌سازی شده است.

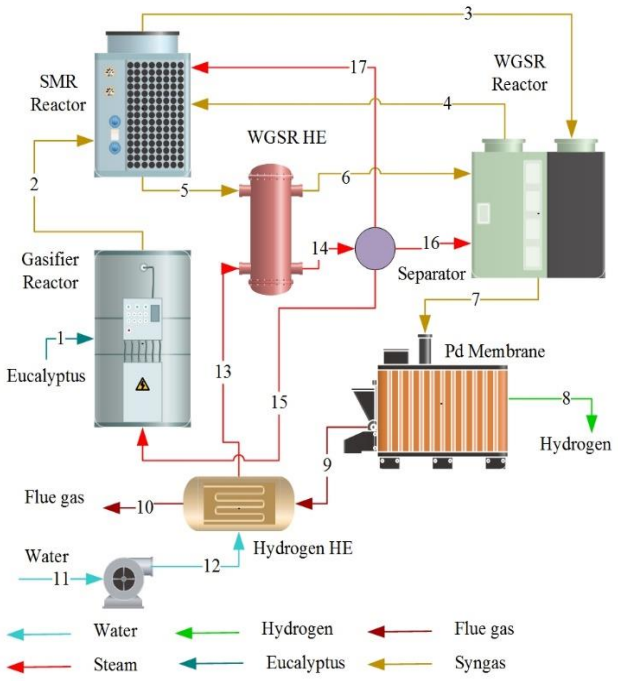

Figure 1. Schematic of the system contains the gasifier, SMR, WGSR reactors and palladium separation membrane.

شکل ۱. شماتیک سیستم ترکیبی متشکل از راکتورهای گازی‌سازی، اصلاح بخار- متان، و جابجایی آب- گاز، و غشاء جداساز پالادیوم.

[1] Wondra
[2] Nanadegani & Sunden
[3] Yin
[4] Biancini
[5] Aspen Plus
[6] Jadoon
[7] Suparmin
[8] Exergy

سپس، اکالیپتوس تحت دماهای بالا دچار تجزیه‌ی حرارتی و در نتیجه‌ی واکنش‌های گازی‌سازی، گاز سنتز تولید شده است. گاز سنتز حاصل، شامل: هیدروژن، مونواکسیدکربن، متان، دی‌اکسیدکربن، و بخار آب بوده است. در ادامه، گاز سنتز تولیدشده به راکتور اصلاح بخار- متان هدایت شده است، که در آن متان موجود به هیدروژن و دی‌اکسیدکربن تبدیل شده و در نتیجه، سهم هیدروژن در ترکیب گاز افزایش یافته است. سپس، گاز سنتز غنی‌شده از هیدروژن وارد راکتور جابجایی آب- گاز شده است؛ که در آن، واکنش میان مونواکسیدکربن و بخار آب منجر به تولید بیشتر هیدروژن و دی‌اکسیدکربن شده و درصد هیدروژن در گاز خروجی افزایش یافته است. در مرحله‌ی پایانی، گاز سنتز وارد غشاء جداساز پالادیومی شده است، که توانایی جداسازی انتخابی هیدروژن از سایر اجزاء گاز را دارد. سپس، هیدروژن خالص جداشده در یک مخزن ذخیره‌سازی جمع‌آوری شده است. به‌صورت کلی، در مرحله‌ی نخست، گازی‌سازی زیست‌توده‌ی اکالیپتوس با بخار آب منجر به تولید گاز سنتز با درصد قابل‌توجهی هیدروژن می‌شود. در مراحل بعدی، راکتور اصلاح بخار- متان و راکتور جابجایی آب- گاز با تبدیل متان و مونوکسیدکربن به هیدروژن (در اثر واکنش با بخارآب)، بدون افزودن منبع کربنی جدید، سهم مولی‌هیدروژن را به‌طور پیوسته افزایش می‌دهند.

در رابطه‌ی ۱، فرآیند گازی‌سازی زیست‌توده‌ی اکالیپتوس با عامل گازی‌سازی بخار آب ارائه شده است:[۲۰]

$$CH_{\alpha}O_{\beta}+\gamma_{H_2O}H_2O \rightarrow \delta_{CO}\ CO+\delta_{CO_2}CO_2+ \delta_{CH_4}CH_4+\delta_{H_2}H_2+\delta_{H_2O}H_2O \quad (1)$$

که در آن، $CH_{\alpha}O_{\beta}$ ترکیب شیمیایی زیست‌توده‌ی اکالیپتوس است و پارامترهای α و β نسبت‌های هیدروژن به کربن و اکسیژن به کربن را بیان می‌کنند. γ_{H2O} مول بخار آب به‌عنوان عامل گازی‌سازی و δ_i مول ترکیب‌های گاز سنتز را نشان می‌دهند، که برای پیداکردن δ_i از روش ترکیبی کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس و ضرایب نامعین لاگرانژ که در جدول ۱ ارائه شده‌اند، استفاده شده است.[۲۱-۲۴]

برای یک سیستم واکنش‌پذیر شیمیایی در دما و فشار ثابت، روش کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس، تابعی از مقادیر مولی اجزا (ν_i) است، که در رابطه‌ی ۲ ارائه شده است. در حالت تعادل دیفرانسیل کل، G طبق رابطه‌ی ۳ باید صفر باشد. تعداد مول‌های هر گونه تابع، مجموعه‌ای از معادله‌هاست، که مستلزم آن است که تعداد کل مول‌های هر عنصر مانند رابطه‌ی ۴ ثابت باشد. $E_{in,j}$ مقدار ورودی هر جزء در مخلوط خوراک را نشان می‌دهد. تابع λ_j به گونه‌ای فرموله شده است، که وقتی تعادل عنصری برای عنصر j برقرار باشد، مقداری برابر با صفر داشته باشد. عدد m نشانگر تعداد کل عناصر مختلف موجود در همه‌ی گونه‌هاست. از آنجایی که قید تساوی باید مقداری برابر با صفر داشته باشد، مشتق کل رابطه‌ی ۴ نیز باید صفر باشد. با نوجه به آنکه، λ_j فقط به مقادیر مولی اجزا بستگی دارد، مشتق کل λ_j توسط رابطه‌ی ۵ گرفته می‌شود. مطابق با رابطه‌ی ۴، باید موازنه‌ی دقیقی به‌دست آید، به‌طوری که مشتق جزئی λ_j نسبت به ν_i برابر با $e_{i,j}$، یعنی تعداد مول‌های عنصر j در ماده‌ی i، مطابق رابطه‌ی ۶ باشد. در روش ضرایب نامعین لاگرانژ ، مشتق کل هر معادله در ضریب ξ_j ضرب می‌شود، که اغلب با مشتق کل G ترکیب می‌شود. در رابطه‌ی ۷، عبارت dG با عبارت رابطه‌ی ۳ و مقدار $d\lambda_j$ در عبارت دوم با عبارت رابطه‌ی ۵ جایگزین می‌شوند. در نتیجه، رابطه‌ی ۷ به رابطه‌ی ۸ تبدیل و رابطه‌ی ۸ به رابطه‌ی ۹ تغییر می‌یابد. همان‌طور که در رابطه‌ی ۱۰ نشان داده شده است، برای اینکه مشتق کل dG در تمام موارد صفر و ثابت باشد، عبارت داخل پرانتز برای هر جمع باید برابر با صفر باشد. با جایگزینی رابطه‌ی ۶ در رابطه‌ی ۱۰، رابطه‌ی ۱ به‌دست می‌آید.

جدول ۱. روش کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس و ضرایب نامعین لاگرانژ.

Table 1. Gibbs free energy minimization approach coupled Lagrangeundetermined multipliers method.

$G=\sum_{i=1}^{k}\nu_i\mu_i$	(2)
$dG=\sum_{i=1}^{k}\mu_i d\nu_i=0$	(3)
$\left(\lambda_i=\sum_{i=1}^{k}\nu_i e_{i,j}-E_{in,j}=0\right)_{j=1..m}$	(4)
$\left(d\lambda_i=\sum_{i=1}^{k}\left(\frac{\partial\lambda_j}{\partial\nu_i}\right)_{\nu_i,j\neq i}d\nu_i=0\right)_{j=1..m}$	(5)
$\left(\frac{\partial\lambda_j}{\partial\nu_i}\right)_{\nu_i,j\neq i}=e_{i,j}$	(6)
$dG+\sum_{j=1}^{m}\xi_j d\lambda_j=0$	(7)
$dG=\sum_{i=1}^{k}\mu_i d\nu_i+\sum_{j=1}^{m}\xi_j\sum_{i=1}^{k}\left(\frac{\partial\lambda_j}{\partial\nu_i}\right)_{\nu_i,j\neq i}d\nu_i=0$	(8)
$dG=\sum_{i=1}^{k}\left[\mu_i+\sum_{j=1}^{m}\xi_j\left(\frac{\partial\lambda_j}{\partial\nu_i}\right)_{\nu_i,j\neq i}\right]d\nu_i=0$	(9)
$\left(\mu_i+\sum_{j=1}^{m}\xi_j\left(\frac{\partial\lambda_j}{\partial\nu_i}\right)_{\nu_i,j\neq i}=0\right)_{i=1..k}$	(10)
$\left(\mu_i+\sum_{j=1}^{m}\xi_j e_{i,j}=0\right)_{i=1..k}$	(11)

زیست توده‌ی به‌کاررفته در پژوهش حاضر به عنوان خوراک، اکالیپتوس به مشخصات: ۵۲/۸۰٪ کربن، ۶/۴۰٪ هیدروژن، ۴۰/۴۰٪ اکسیژن، و ۰/۴۰٪ نیتروژن بوده است.[۲۵]

در رابطه‌ی ۱۲، واکنش اصلاح بخار- متان و در رابطه‌ی ۱۳، واکنش جابجایی آب- گاز،[۲۶] ارائه شده‌اند:

$$CH_4+H_2O \leftrightarrow 3H_2+CO \quad (12)$$

$$CO + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO_2 \quad (13)$$

رابطه‌ی ۱۴، واکنش شکل‌گرفته در راکتور اصلاح بخار- متان را نشان می‌دهد:

$$\delta_{CO}CO + \delta_{CO_2}CO_2 + \delta_{CH_4}CH_4 + \delta_{H_2}H_2 + \left(\delta_{H_2O} + \varepsilon_{H_2O}\right)H_2O \leftrightarrow \varphi_{CO}CO + \varphi_{CO_2}CO_2 + \varphi_{H_2}H_2 + \varphi_{H_2O}H_2O \quad (14)$$

که در آن، ε_{H2O} بخار آب اضافه‌شده به واکنش است و φ_i به مول‌های اجزاء گاز سنتز در خروجی راکتور اصلاح بخار- متان اشاره دارد.

در رابطه‌ی ۱۵، واکنش شکل‌گرفته در راکتور جابجایی آب- گاز ارائه شده است:

$$\varphi_{CO}CO + \varphi_{CO_2}CO_2 + \varphi_{H_2}H_2 + \left(\varphi_{H_2O} + \kappa_{H_2O}\right)H_2O \leftrightarrow \tau_{CO_2}CO_2 + \tau_{H_2}H_2 + \tau_{H_2O}H_2O \quad (15)$$

که در آن، κ_{H2O} بخار آب اضافه‌شده به راکتور جابجایی آب- گاز ارائه شده است؛ و τ_i به مول‌های اجزاء گاز سنتز در خروجی راکتور جابجایی آب- گاز اشاره دارد.

این تذکر لازم است که تعداد مول‌های مجهول در راکتورهای اصلاح بخار- متان و جابجایی آب- گاز با استفاده از روش ترکیبی کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس و ضرایب نامعین لاگرانژ با استفاده ار روابط ۲ الی ۱۱ محاسبه شده‌اند.

رابطه‌ی ۱۶، شار هیدروژن (J_H) در غشاء جداساز پالادیوم را نشان می‌دهد:[۲۷]

$$J_H = \frac{Pe\left(\sqrt{P_f} - \sqrt{P_p}\right)}{x} \quad (16)$$

که در آن، Pe نفوذپذیری هیدروژن، P_f فشار سمت تغذیه، و P_p فشار در سمت نفوذ هستند. همچنین، Pe نفوذپذیری هیدروژن، مطابق رابطه‌ی ۱۷ به دست می‌آید:[۲۶]

$$Pe = Pe_0 exp\left(-\frac{E_a}{\bar{R}T}\right) \quad (17)$$

که در آن، Pe_0 بیشینه‌ی نفوذپذیری، E_a انرژی فعال‌سازی، $\bar{R}$ ثابت جهانی گازها، و T دما را نشان می‌دهند.

در جدول ۲، پارامترهای ورودی و پایه‌ی استفاده‌شده در مدل‌سازی سیستم پیشنهادی ارائه شده است.

جدول ۲. پارامترهای پایه و ورودی.[۲۱-۲۰ و ۲۵-۲۷]

Table 2. Baseline and input parameters.[18-19, 23-25]

Parameter	Value	Unit
Pressure of gasifier	500	kPa
Temperature of gasifier (Baseline)	850	°C
Steam to Eucalyptus ratio	1.5	-
Pressure of SMR	498.1	kPa
Temperature of SMR	823.2	°C
Pressure of WGSR	497.1	kPa
Temperature of WGSR	623.2	°C
Pressure of palladium membrane	496.2	kPa
Temperature of palladium membrane	623.2	°C
Exponent of palladium membrane	0.5	-
Thickness of palladium membrane	6	µm
Activation energy of palladium membrane	16700	J/mol
Pressure drops	5	%
Atmospheric pressure	101.3	kPa
Atmospheric temperature	25	°C
Eucalyptus chemical data (wt %)		

Ultimate analysis		Proximate analysis	
Carbon	52.80	**Combustible**	88.70
Hydrogen	6.40	**Moisture**	0.70
Oxygen	40.40	**Ash**	10.60
Nitrogen	0.40		
Sulfur	-		

۳. نتایج و بحث

پیش از بررسی اثر پارامترهای عملیاتی در خروجی‌های سیستم انرژی، راستی‌آزمایی محرک اصلی سیستم انجام شده است (شکل ۲). با دقت در شکل ۲ می‌توان دریافت که نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی حاضر، همخوانی مناسبی با داده‌های تجربی گزارش‌شده در نوشتار لوها[9] و همکاران (۲۰۱۱)،[۲۱] دارد؛ که بیانگر دقت و اعتبار مدل توسعه‌یافته است.

در شکل ۳، تغییرات ترکیب گاز سنتز تولیدی از فرآیند گازی‌سازی بر حسب نسبت بخار به زیست‌توده (STBR) مشاهده می‌شود. با افزایش نسبت بخار به زیست‌توده، مشارکت بخار در واکنش‌های گازسازی افزایش یافته و در نتیجه، سهم بخار در گاز خروجی بیشتر شده است. هم‌زمان، کسر مولی مونوکسیدکربن به طور قابل‌توجهی (۳۰/۲ به ۱۲/۲ درصد) کاهش یافته است، که عمدتاً ناشی از تقویت واکنش جابجایی آب-گاز بوده است. در مقابل، متان کمترین سهم مولی را داشته و تغییرات کسر مولی متان با افزایش نسبت بخار به زیست‌توده چندان محسوس نبوده است، که نشانگر پایداری نسبی تعادل واکنش‌های مرتبط در بازه‌ی عملیاتی مذکور است. درصد تولید هیدروژن (۴۶/۹ به ۳۸/۰ درصد) کاهش و دی اکسیدکربن (۷/۶ به ۱۱/۲ درصد) افزایش یافته است. شایان ذکر است که تحلیل بر مبنای مول تر انجام شده است.

در شکل ۴، تأثیر تغییرات دمای فرآیند گازی‌سازی در ترکیب گاز تولیدی شامل هیدروژن، مونواکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن، بخار آب، و متان مشاهده

[9] Loha

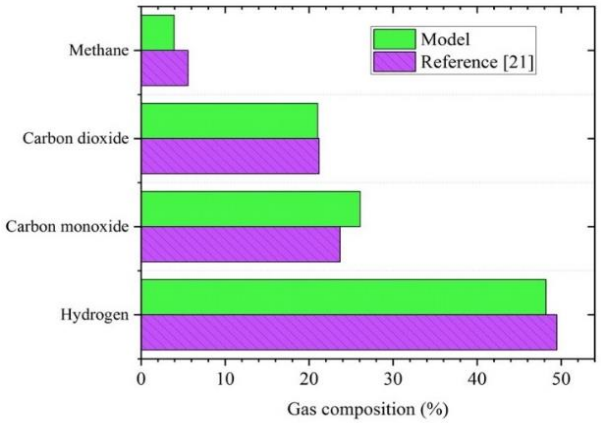

Figure 2. Validation of gases contribution in syngas production in the gasifier.

شکل ۲. راستی‌آزمایی سهم مشارکت گازها در گاز سنتز تولیدی در گازی‌ساز.

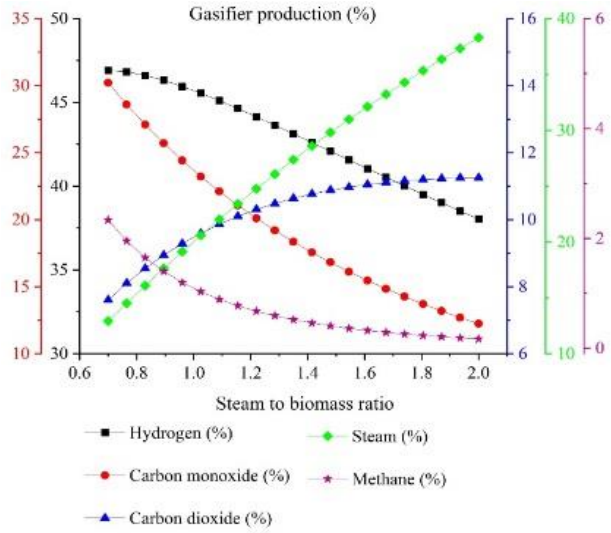

Figure 3. Variation of gasification process syngas versus steam to biomass ratio.

شکل ۳. تغییرات گاز سنتز فرآیند گازی‌سازی در اثر تغییرات بخار به زیست‌توده.

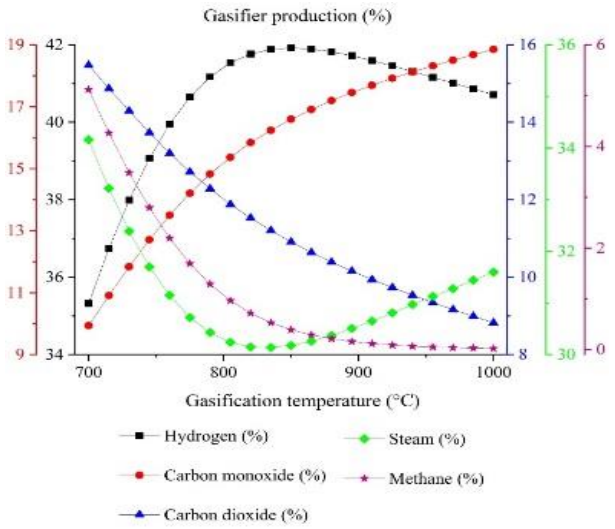

Figure 4. Variation of gasification process syngas versus temperature.

شکل ۴. تغییرات گاز سنتز فرآیند گازی‌سازی در اثر تغییرات دما.

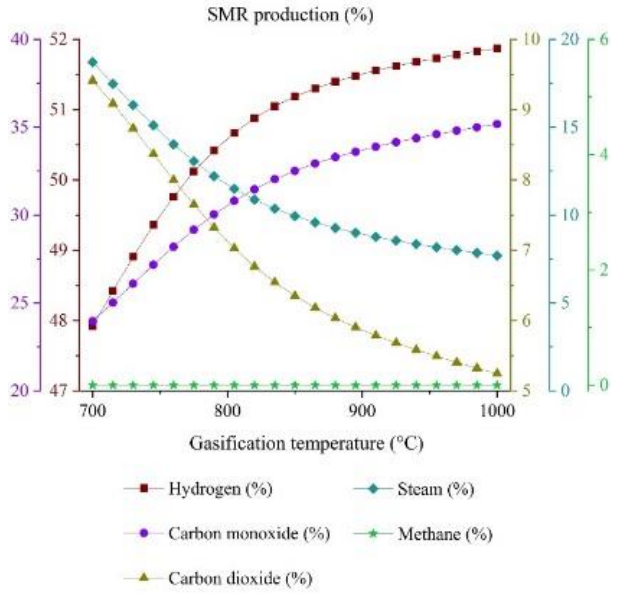

Figure 5. Variation of steam methane reforming process syngas versus temperature.

شکل ۵. تغییرات گاز سنتز فرآیند اصلاح بخار- متان در اثر تغییرات دما.

می‌شود. افزایش دمای فرآیند گازی‌سازی اثر کاهنده‌ای در تولید بخار آب و متان داشته است، به‌گونه‌ای که سهم متان از ۵/۱۲ به ۰/۰۲ درصد شده است. در حالی که سهم هیدروژن در گاز تولیدی از ۳۵/۳۲ به ۴۰/۷۱ درصد و سهم مونواکسیدکربن از ۹/۹۳ به ۱۸/۸۵ درصد افزایش یافته است. همچنین میزان دی‌اکسیدکربن از ۱۵/۷۴ به ۸/۸۲ درصد کاهش یافته است. این روند را می‌توان با واکنش بودوارد توضیح داد؛ واکنشی گرماگیر، که در دماهای بالاتر به سمت مصرف دی‌اکسیدکربن و تولید مونواکسیدکربن پیش می‌رود. روند تغییرات مشاهده‌شده با نتایج گزارش‌شده در مطالعات پیشین تطابق مناسبی دارد.[۲۸-۳۱]

پس از خروج گازها از راکتور گازی‌سازی، جریان حاصل به راکتور اصلاح بخار- متان هدایت شده است. دمای عملکرد راکتور اخیر به‌صورت تابعی از دمای راکتور گازساز تعریف شده است؛ به‌طوری که افزایش دمای گازی‌سازی مستقیماً منجر به افزایش دمای راکتور اصلاح بخار- متان شده است. تأثیر تغییرات دمایی ایجادشده در ترکیب گازهای حاصل از فرآیند اصلاح بخار- متان در شکل ۵ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن با افزایش دما، سهم هیدروژن در گاز تولیدی از ۴۲/۹۷ به ۵۱/۸۷ درصد افزایش یافته است. هم‌زمان، میزان مشارکت مونواکسیدکربن نیز رشد قابل‌توجهی داشته و از ۲۳/۹۷ به ۳۵/۱۸ درصد رسیده است. این روند رفتاری را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۱۲ و براساس اصل لوشاتلیه تحلیل کرد. از آنجا که واکنش اصلاح بخار- متان ماهیت گرماگیر دارد، افزایش دمای واکنش موجب جابجایی تعادل به سمت تشکیل محصولات شده و در نتیجه تولید هیدروژن و مونواکسیدکربن افزایش یافته است. در مقابل، افزایش دمای راکتور سبب کاهش سهم دی‌اکسیدکربن در ترکیب گاز خروجی به میزان ۴/۱۷٪ شده است، در حالی که تغییرات مربوط به بخار آب در ترکیب گاز بسیار محدود و تقریباً ناچیز بوده است.

تغییرات ترکیب گاز در فرآیند جابجایی آب- گاز تحت تأثیر افزایش دمای راکتور در شکل ۶ بررسی شده است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، دمای راکتور جابجایی آب- گاز نیز مشابه راکتور اصلاح بخار- متان، وابسته به دمای راکتور گازی‌سازی است؛ لذا، افزایش دمای گازی‌سازی موجب افزایش دمای

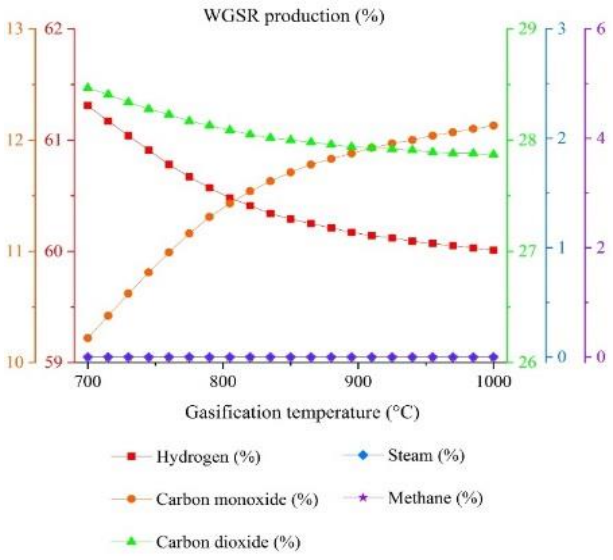

Figure 6 .Variation of water-gas shift process syngas versus temperature.

شکل ۶. تغییرات گاز سنتز فرآیند جابجایی آب- گاز در اثر تغییرات دما.

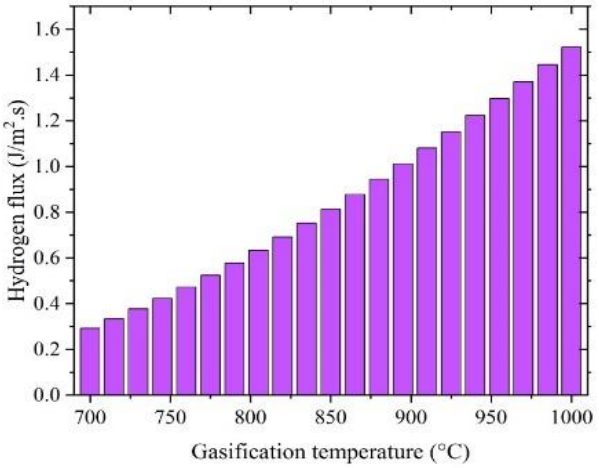

Figure 7. Variation of hydrogen flux versus temperature.

شکل ۷. تغییرات شار هیدروژن در اثر تغییرات دما.

این بخش از سیستم نیز می‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با بالارفتن دما، میزان تبدیل به هیدروژن در گاز خروجی از ۶۱/۳۱ به ۶۰/۰۱ درصد کاهش یافته است، در حالی که سهم دی‌اکسیدکربن از ۱۰/۲۲ به ۱۲/۱۳ درصد افزایش پیدا کرده است. تغییرات درصد بخار آب در این مرحله بسیار محدود بوده و حدود ۰/۶۰٪ گزارش شده است. علت این رفتار به ماهیت گرماده واکنش جابجایی آب- گاز باز می‌گردد؛ به‌طوری که افزایش دمای واکنش باعث جابجایی تعادل به سمت کاهش تولید هیدروژن و افزایش محصولات جانبی شده است.

تأثیر افزایش دمای راکتور گازی‌سازی در شار عبوری هیدروژن از غشاء جداساز پالادیومی در شکل ۷ مشاهده می‌شود. دمای غشاء پالادیوم نیز مشابه سایر اجزاء سیستم، تابعی از دمای راکتور گازی‌سازی در نظر گرفته شده و با افزایش آن، دمای غشا نیز افزایش یافته است. نتایج بیانگر آن است که با افزایش دما، شار هیدروژن از ۰/۲۹ به ۱/۵۲ افزایش پیدا کرده است. این موضوع نشان می‌دهد که عملکرد جداسازی هیدروژن در دماهای بالاتر به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بهبود یافته است. این افزایش شار را می‌توان با درنظرگرفتن رابطه‌ی مستقیم بین شار هیدروژن و نفوذپذیری آن توضیح داد. براساس معادله‌ی ۱۶، شار هیدروژن تابعی از نفوذپذیری بوده و مطابق معادله‌ی ۱۷، نفوذپذیری هیدروژن با افزایش دما افزایش یافته است. بنابراین، افزایش دمای سیستم منجر به بهبود نفوذپذیری و در نتیجه افزایش شار هیدروژن عبوری از غشا شده است.

این تذکر لازم است که براساس نتایج مدل‌سازی ترمودینامیکی، حدود ۸۵٪ از زیست‌توده‌ی اکالیپتوس ورودی به گاز سنتز قابل‌استفاده تبدیل شده است. بازده گاز سرد در پژوهش حاضر برابر با ۷۹/۷٪ محاسبه شده است. پارامتر مذکور براساس نسبت ارزش حرارتی گاز سنتز خروجی به ارزش حرارتی زیست‌توده‌ی ورودی و با درنظرگرفتن گازهای خروجی از گازی‌ساز محاسبه شده است، زیرا بازده گاز سرد یکی از شاخص‌های ذاتی عملکرد گازی‌ساز است و به مراحل پایین‌دستی سیستم وابسته نیست.

۴. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در پژوهش حاضر به مطالعه‌ی امکان تولید انرژی و خالص‌سازی هیدروژن از اکالیپتوس از طریق فرآیند گازی‌سازی پرداخته شده است. استفاده از منابع تجدیدپذیر در کنار فناوری‌های پیشرفته، علاوه‌بر افزایش بازده و بهره‌وری سیستم، نقش مؤثری در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کند و زمینه‌ی تولید هیدروژن پاک و سبز را فراهم می‌سازد. نتایج کلی حاصل از مطالعه‌ی حاضر به این صورت جمع‌بندی شده است:

- افزایش دما در راکتور جابجایی آب- گاز سبب کاهش سهم هیدروژن از ۶۱/۳۱ به ۶۰/۰۱ درصد و افزایش سهم دی‌اکسیدکربن از ۱۰/۲۲ به ۱۲/۱۳ درصد شده است.
- با بالارفتن دمای راکتور اصلاح بخار- متان، سهم دی‌اکسیدکربن در گاز خروجی این بخش حدود ۴/۱۷٪ کاهش یافته است.
- افزایش دمای راکتور گازی‌سازی موجب بهبود شار هیدروژن عبوری از غشای پالادیومی از ۰/۲۹ به ۱/۵۲ شده است.
- افزایش دمای راکتور گازی‌سازی موجب بهبود سهم هیدروژن در گاز خروجی از ۳۵/۳۲ به ۴۰/۷۱ درصد و افزایش مونواکسیدکربن از ۹/۹۳ به ۱۸/۸۵ درصد شده است.

"علائم اختصاری"

E_a	انرژی فعال‌سازی (J)
$E_{in,j}$	مقدار ورودی هر جزء در مخلوط خوراک (mol)
G	انرژی آزاد گیبس (J)
J_H	شار هیدروژن ($J/m^2.s$)
P_e	نفوذپذیری هیدروژن ($mol/m.s.Pa^{0.5}$)
P_{e0}	بیشینه‌ی نفوذپذیری هیدروژن ($mol/m.s.Pa^{0.5}$)
P_f	فشار در سمت تغذیه (Pa)
P_p	فشار در سمت نفوذ (Pa)
$\overline{R}$	ثابت جهانی گاز (kJ/kg.K)
T	دما (K)

x	فاصله (m)	λ	تابع اجزا
α	نسبت هیدروژن به کربن (mol/mol)	μ	پتانسیل شیمیایی (J/mol)
β	نسبت اکسیژن به کربن (mol/mol)	ν	مقادیر مولی اجزا (mol)
γ	مول ورودی بخار آب در راکتور گازی‌سازی (mol)	ξ	ضریب لاگرانژ (-)
δ	مول اجزاء گاز تولیدی راکتور گازی‌سازی (mol)	τ	مول اجزاء گاز تولیدی راکتور جابجایی آب- گاز (mol)
ε	مول ورودی بخار آب در راکتور اصلاح بخار- متان (mol)	ϕ	مول اجزاء گاز تولیدی راکتور اصلاح بخار- متان (mol)
κ	مول ورودی بخار آب در راکتور جابجایی آب- گاز (mol)		

References - منابع

1. Yu Z. Kamran H.W. Amin A. Ahmed B. and Peng S. 2023. Sustainable synergy via clean energy technologies and efficiency dynamics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *187*, pp.113744. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113744
2. Hamidieh A. Akhgari B. (2024). Biogas Reverse Supply Chain Network Design based on Biomass Quality Levels using Robust Programming and Benders decomposition approach, *Scientia Iranica*. https://doi.org/10.24200/sci.2024.61889.7541
3. Gharibi A. Doniavi E. and Hasanzadeh R. 2024. A metaheuristic particle swarm optimization for enhancing energetic and exergetic performances of hydrogen energy production from plastic waste gasification. *Energy Conversion and Management*, *308*, pp.118392. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118392
4. Rubinsin N.J. Karim N.A. Timmiati S.N. Lim K.L. Isahak W.N.R.W. and Pudukudy M. 2024. An overview of the enhanced biomass gasification for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy,* *49*, pp.1139-1164. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.043
5. Adeniyi A. G. Onifade D. V. Ighalo J. O. (2022). Evaluating the nature of captured exhaust soot from a retort heating carbonization system, *Scientia Iranica*, 29(3), pp. 1427-1435. https://doi.org/10.24200/sci.2021.57008.5017
6. Yan B. Jia X. Li J. Li Z. Che Y. Zhou Z. Zhao J. Zhou S. and Chen G. 2024. In-situ elimination of biomass gasification tar based on the understanding of tar formation process: *A review. Journal of the Energy Institute*, *112*, pp.101477. https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101477
7. Ajorloo M. Ghodrat M. Scott J. and Strezov V. 2025. Evaluating the role of feedstock composition and component interactions on biomass gasification. *Fuel*, *381*, pp.133528. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133528
8. Jokar S.M. Farokhnia, A. Tavakolian M. Pejman M. Parvasi P. Javanmardi J. Zare F. Goncalves M.C. and Basile, A. 2023. The recent areas of applicability of palladium based membrane technologies for hydrogen production from methane and natural gas: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, *48*(16), pp.6451-6476. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.296
9. Ghasemzadeh K. Torabi T. Amiri T.Y. Fortunelli A. and Iulianelli A. 2024. Parametric and sensitive analysis of Pd-Ag membrane reactor performance in biogas reforming to generate decarbonized hydrogen by Computational Fluid Dynamic-Response Surface Methodology. *Fuel*, *365*, pp.131205. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131205
10. Nemitallah, M.A. 2023. Characteristics of hydrogen separation and methane steam reforming in a Pd-based membrane reactor of shell and tube design. *Case Studies in Thermal Engineering*, *45*, pp.102939. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102939
11. Wondra, C. Hafner M. Treiber P. and Karl J. 2025. Conditioning of synthesis gases from gasification for direct use in conventional burner systems. *Thermal Science and Engineering Progress*, *60*, pp.103489. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103489
12. Nanadegani, F.S. and Sunden, B. 2023. Review of exergy and energy analysis of fuel cells. International *Journal of Hydrogen Energy*, *48*(84), pp.32875-32942. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.052
13. Yin, Z. Yang J. Feng Y. Ma Z. Wang J. and Liu Q. 2025. Thermodynamics analysis of a biomass co-gasification based combined cooling, heating and power system. *Renewable Energy*, *248*, pp.123195. https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123195
14. Biancini G. Moradi R. Cioccolanti L. Marchetti B. Moglie M. and Del Zotto L. 2023. A general model for air gasification of heterogenous municipal solid waste. *Energy Conversion and Management*, *278*,

pp.116749. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116749

15. Jadoon U.K. Diaz I. and Rodriguez M. 2025. Comparative analysis of aspen plus simulation strategies for woody biomass air gasification processes. *Biomass and Bioenergy*, *194*, pp.107626. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107626
16. Fakhim-Ghanbarzadeh B. Fani M. Farhanieh B. (2011). Exergoeconomic optimization of combined heat and power system incorporating fluidized bed gasifier, *Sharif Journal of Mechanical Engineering (SJME)*, *27.3*(2), pp. 3-13 [In Persian].
17. Faraji M. and Saidi M. 2022. Process simulation and optimization of groundnut shell biomass air gasification for hydrogen-enriched syngas production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*(28), pp.13579-13591. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.105
18. Suparmin, P. Purwanti N. Nelwan L.O. and Tambunan A.H. 2024. Syngas production by biomass gasification: A meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *206*, 114824. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114824
19. Safary Sabet S. Mostafa Namar M. Sheikholeslami M. Shafee A. (2020). Thermodynamic analysis of a high-temperature hydrogen production system, *Scientia Iranica*, *27*(4), pp. 1962-1971. https://doi.org/10.24200/sci.2019.52022.2487
20. Xiao Z. and Wu W. 2024. Environmental sustainability by an integrated system based on municipal solid waste fluidized bed gasification using energy, exergy, and environmental analyses. *Applied Thermal Engineering*, *239*, pp.122171. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122171
21. Loha C. Chattopadhyay H. and Chatterjee P.K. 2011. Thermodynamic analysis of hydrogen rich synthetic gas generation from fluidized bed gasification of rice husk. *Energy*, *36*(7), pp.4063-4071. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.042
22. Shabbar S. and Janajreh I. 2013. Thermodynamic equilibrium analysis of coal gasification using Gibbs energy minimization method. *Energy conversion and management*, *65*, pp.755-763. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.02.032
23. Gambarotta A. Morini M. and Zubani A. 2018. A non-stoichiometric equilibrium model for the simulation of the biomass gasification process. *Applied Energy*, *227*, pp.119-127. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.135
24. Kangas P. Hannula I. Koukkari P. and Hupa M. 2014. Modelling super-equilibrium in biomass gasification with the constrained Gibbs energy method. *Fuel*, *129*, pp.86-94. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.03.034
25. Mojaver P. Jafarmadar S. Khalilarya S. and Chitsaz A. 2019. Study of synthesis gas composition, exergy assessment, and multi-criteria decision-making analysis of fluidized bed gasifier. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(51), pp.27726-27740. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.240
26. Chen J. Wang X. Gai D. and Wang J. 2025. B-site semi-doped LaFeO3 perovskite oxygen carrier for biomass chemical looping steam gasification to produce hydrogen-rich syngas. *International Journal of Hydrogen Energy*, *103*, pp.446-455. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.190
27. Al-Mufachi N.A. Rees N.V. and Steinberger-Wilkens, R., 2015. Hydrogen selective membranes: A review of palladium-based dense metal membranes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *47*, pp. 540-551. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.026
28. Khattak O.A. and Zhang Q. 2025. Catalytic Gasification of Petroleum Coke with K_2CO_3: Impact of Catalyst-Carbon Contact and the Role of the Boudouard Reaction at 950° C. *European Journal of Applied Science, Engineering and Technology*, *3*(3), pp.44-50. https://doi.org/10.59324/ejaset.2025.3(3).05
29. Wu C.H. Chang C.Y. Cheng C.M. and Huang H.C. 2003. Glycolysis of waste flexible polyurethane foam. *Polymer Degradation and Stability*, *80*(1), pp.103-111. https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00390-7
30. Chang S. Zhang Z. Cao L. Ma L. You S. and Li W. 2020. Co-gasification of digestate and lignite in a downdraft fixed bed gasifier: Effect of temperature. *Energy Conversion and Management*, *213*, pp..112798. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112798
31. Han S.W. Lee J.J. Tokmurzin D. Lee S.H. Nam J.Y. Park S.J. Ra H.W. Mun T.Y. Yoon S.J. Yoon S.M. and Moon J.H. 2022. Gasification characteristics of waste plastics (SRF) in a bubbling fluidized bed: Effects of temperature and equivalence ratio. *Energy*, *238*, pp.121944. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121944