

Analisis Pengaruh *Steam to Carbon Ratio* Pada *Water Gas Shift* Melalui Proses *Steam Methane Reforming* Terhadap Laju Konversi Karbon Monoksida

Dyorlando S, Made Sucipta, Wayan Nata, dan Ketut Astawa
Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit, Jimbaran, Bali

Abstrak

Energi fosil masih mendominasi kebutuhan energi saat ini, namun keterbatasannya mendorong transisi menuju energi terbarukan. Hidrogen merupakan energi terbarukan yang memiliki keunggulan menghasilkan energi tinggi sebesar 142,35 MJ/kg dan ramah lingkungan. Di antara berbagai metode produksi hidrogen, steam methane reforming (SMR) banyak digunakan pada skala industri, dengan melibatkan reaksi reformer dan water gas shift (WGS) untuk memproduksi hidrogen. Beberapa parameter yang mempengaruhi reaksi WGS seperti katalis, suhu dan steam to carbon ratio (S/C). S/C merupakan parameter penting dalam reaksi WGS karena dengan penambahan steam yang ditunjukkan melalui peningkatan S/C pada sisi reaktan WGS dapat mempercepat laju konversi CO dan mendorong reaksi ke arah produk. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh S/C terhadap laju konversi CO pada keluaran WGS menggunakan komposisi gas masukan 70% CH₄ dan 30% CO₂, katalis Fe-Cr seberat 30 gram, dengan variasi S/C 2:1 pada reaktor WGS. Hasil menunjukkan dengan S/C 2:1 dapat mempercepat laju konversi CO dimana dari keluaran reformer sebesar 54.45% menjadi sebesar 47.04% pada keluaran reaktor WGS. Hal ini menegaskan ketersediaan peran steam dalam mendorong konversi CO dengan H₂O ke arah pembentukan produk.

Kata kunci: steam methane reforming, hidrogen, steam to carbon ratio

Abstract

Fossil fuels still dominate current energy needs, but their limitations are driving a transition to renewable energy. Hydrogen is a renewable energy source that has the advantage of producing 142.35 MJ/kg of high energy and is environmentally friendly. Among the various methods of hydrogen production, steam methane reforming (SMR) is widely used on an industrial scale, involving reformer and water gas shift (WGS) reactions for hydrogen production. Several parameters that influence the WGS reaction include catalyst, temperature, and steam to carbon ratio (S/C). S/C is an important parameter in the WGS reaction because the addition of steam, as indicated by an increase in the S/C ratio on the WGS reactant side, can accelerate the rate of CO conversion and drive the reaction towards the product. This study was conducted to determine the effect of S/C on CO conversion in WGS output using an input gas composition of 70% CH₄ and 30% CO₂, 30 grams of FeCr catalyst, with a variation of S/C 2:1 in the WGS reactor. The results show that S/C 2:1 can accelerate the CO conversion rate from 54.45% at the reformer output to 47.04% at the WGS reactor output. This confirms the role of water vapor in promoting the conversion of CO with H₂O towards product formation.

Keywords: steam methane reforming, hydrogen, steam to carbon ratio

1. Pendahuluan

Energi fosil masih menjadi salah satu pemasok energi yang banyak digunakan di berbagai negara terutama Indonesia. Namun, ketersediaan energi fosil yang terbatas menjadikan energi fosil bukan merupakan energi yang berkelanjutan dalam jangka panjang [1]. Ditengah meningkatnya penggunaan energi, diperlukan transisi menuju energi terbarukan yang berkelanjutan, ramah lingkungan serta tersedia dalam waktu yang panjang [2]. Hidrogen merupakan energi terbarukan yang mempunyai tingkat kepadatan energi yang tinggi sekitar 142.35 MJ/Kg serta bersifat ramah lingkungan [3][4].

Dari beberapa teknologi proses hidrogen yang sudah ada, teknologi yang sering digunakan dalam produksi hidrogen adalah *steam methane reforming* (SMR) [5][6]. Proses SMR terdiri dari beberapa tahapan utama yaitu *reformer* dan *water gas shift* (WGS) [7]. *Reformer* merupakan reaksi endotermik

yang mereaksikan metana (CH₄) bersama *steam* (H₂O) menggunakan katalis sehingga membentuk karbon monoksida (CO) serta hidrogen (H₂) [8]. CH₄ merupakan kandungan yang dominan pada biogas yang telah dimurnikan dari gas pengotor hidrogen sulfida (H₂S), sehingga biogas tersebut dapat digunakan pada proses SMR [9]. Reaksi WGS merupakan reaksi eksotermik, di mana gas CO bereaksi dengan *steam* dengan bantuan katalis, menghasilkan produk berupa karbon dioksida (CO₂) dan hidrogen (H₂) pada aliran keluaran reaktor WGS [10][11].

Steam to carbon ratio (S/C) merupakan faktor penting yang berpengaruh terhadap jalannya reaksi WGS [11]. Peningkatan S/C melalui penambahan *steam* pada sisi reaktan akan mengarahkan reaksi WGS lebih dominan ke pembentukan produk, sehingga konversi CO meningkat dan produksi H₂ bertambah. [10][12].

Dalam penelitian ini akan dilakukan kajian eksperimental bagaimana pengaruh *steam to carbon ratio* (S/C) 2:1 pada reaktor WGS terhadap laju konversi CO yang dihasilkan.

2. Dasar Teori

2.1 Hidrogen

Hidrogen dianggap sebagai bahan bakar alternatif yang tidak menghasilkan emisi gas karbon ketika digunakan [5]. Energi hidrogen mempunyai tingkat kepadatan energi yang tinggi sebesar 142.35 MJ/Kg [13]. Berdasarkan sumber dan metode produksinya, hidrogen diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis yaitu *grey*, *blue*, *green*, *turquoise*, *brown* dan *purple* hidrogen [14].

2.2 Steam Methane Reforming (SMR)

SMR dibagi dalam dua tahapan yaitu reformer dan water gas shift (WGS) serta pressure swing adsorption (PSA) sebagai pemurnian tambahan hidrogen. *Reformer* sebuah proses CH_4 akan bereaksi dengan *steam* sebagai reaktan dan menghasilkan produk CO dan H_2 dengan bantuan katalis pada suhu $700\text{ }^\circ\text{C} - 1000\text{ }^\circ\text{C}$ [15]. Reaksi pada *reformer* ditunjukkan pada persamaan berikut (1) [8]:



WGS merupakan tahap lanjut dalam produksi hidrogen untuk mendapatkan H_2 tambahan dengan menurunkan kandungan CO pada gas keluaran *reformer*. Pada reaksi WGS, CO bereaksi dengan *steam* membentuk produk CO_2 dan H_2 [8]. Reaksi WGS dapat ditunjukkan pada persamaan berikut (2) [8]:



2.3 Steam to carbon ratio (S/C)

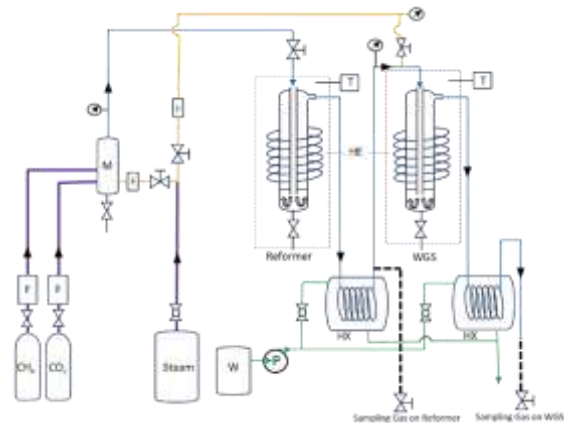
Steam carbon ratio merupakan perbandingan molar rasio antara *steam* dengan karbon yang dimiliki pada bahan baku [16]. Dengan menambah *steam* yang ditunjukkan melalui peningkatan S/C pada sisi reaktan aliran reaksi WGS, sistem akan menggeser reaksi ke arah pembentukan produk yang dapat meningkatkan H_2 dan CO_2 [7]. Rumus S/C dapat digunakan melalui persamaan (3) [16]:

$$S/C = \left[\frac{\dot{n}(\text{H}_2\text{O})}{\sum_{i=1}^N \left(x_i \cdot \dot{n}(\text{C}_{x_i}\text{H}_{y_i}\text{O}_{z_i}) \right) \right]_{\text{feed}} \quad (3)$$

3. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dalam skala laboratorium. Produksi hidrogen menggunakan metode SMR dengan menggunakan komposisi bahan baku biogas 70 % CH_4 dan 30% CO_2 serta *steam* yang dicampur pada mixer. Gas campuran akan bereaksi pada tabung *reformer* dengan set temperatur 500°C menggunakan katalis MgNi. Lalu, keluaran *reformer* akan mengalir ke

reaktor WGS dengan set temperatur 340°C dengan bantuan katalis Fe-Cr serta penambahan *steam* dengan S/C 2:1 pada reaktan WGS. Pengambilan sampel gas pada keluaran reaktor WGS dilakukan guna menganalisis laju konversi CO yang dihasilkan. Gambar 1a dan 1b secara berturut-turut menunjukkan skematik penelitian serta gambar aktual *setup* eksperimental produksi hidrogen.



Keterangan :

- : Primary channel
- : Water cooling channel
- : Hose
- : Steam pipe
- WGS : Water Gas Shifter
- F : Flow Meter
- T : Thermocouple
- M : Mixer
- HX : Heat Exchanger
- HE : Heater
- W : Water

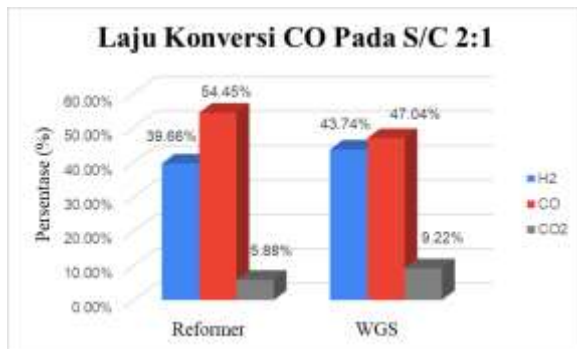


Gambar 1. (a. Skematik Penelitian Hidrogen) (b. Set Up Eksperimental Hidrogen)

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Pengaruh *steam to carbon ratio* (S/C) 2:1 terhadap Laju Konversi CO

Dari hasil eksperimen yang telah dilakukan, maka didapatkan pengaruh *steam to carbon ratio* (S/C) 2:1 terhadap laju konversi CO pada keluaran WGS dapat diinterpretasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik hubungan S/C 2:1 terhadap Laju Konversi CO pada outlet WGS

Berdasarkan Gambar 2. dapat dilihat bahwa laju konversi CO dengan H₂O berlangsung lebih cepat dengan adanya penambahan *steam* dengan S/C 2:1 pada reaktor WGS. Konversi CO mengalami penurunan sebesar 7.41%, yaitu dari 54.45% pada keluaran *reformer* menjadi 47.04% pada keluaran WGS, yang disebabkan oleh ketersediaan *steam* pada reaktan WGS. Penurunan fraksi gas CO ini secara langsung diikuti dengan peningkatan fraksi gas H₂ sekitar 4.08% yaitu dari 39.66% pada keluaran *reformer* menjadi 43.74% pada keluaran WGS serta CO₂ mengalami peningkatan sekitar 3.34% yaitu dari 5.88% pada keluaran *reformer* menjadi 9.22% pada keluaran WGS. Dengan demikian, tren peningkatan gas H₂ dan CO₂ serta penurunan gas CO yang terlihat pada grafik menunjukkan bahwa penambahan *steam* dengan S/C 2:1 dapat mendorong reaksi WGS ke arah pembentukan produk.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh S/C 2:1 terhadap laju konversi CO dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Penambahan *Steam to carbon ratio* (S/C) yang ditunjukkan dengan S/C 2:1 pada reaktor WGS dapat mempercepat laju konversi CO dan membentuk H₂ dan CO₂ pada sisi produk, yang sekaligus menggambarkan arah reaksi bergerak lebih dominan ke sisi produk.

Daftar Pustaka

- [1] H. Meilani and D. Wuryandani, "Potensi Panas Bumi sebagai Energi Alternatif Pengganti Bahan Bakar Fosil untuk Pembangkit Tenaga Listrik di Indonesia," *J.*

Ekon. dan Kebijak. Publik, vol. 1, no. 1, pp. 47–74, 2010, [Online]. Available: <http://www.esdm.go.id/siaran-pers/55-siaran-pers/3271-pelaksanaan-program-prioritas->

- [2] A. G. Olabi, T. Wilberforce, and M. A. Abdelkareem, "Fuel cell application in the automotive industry and future perspective," *Energy*, vol. 214, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.118955.
- [3] W. Ariyanti, J. Kimia, U. N. Semarang, K. Sekaran, and I. Artikel, "Indonesian Journal of Chemical Science," vol. 10, no. 2, 2021.
- [4] G. Wang, T. Xiang, X. Ren, L. Zhang, and C. Chen, "Transition metal-based electrocatalysts for hydrogen production from seawater: A review," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 73, pp. 775–790, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.471.
- [5] P. Afanasev *et al.*, "An overview of hydrogen production methods: Focus on hydrocarbon feedstock," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 78, pp. 805–828, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.369.
- [6] B. Liu, X. Yu, W. Shi, Y. Shen, D. Zhang, and Z. Tang, "Two-stage VSA/PSA for capturing carbon dioxide (CO₂) and producing hydrogen (H₂) from steam-methane reforming gas," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 46, pp. 24870–24882, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.264.
- [7] C. Song, Q. Liu, N. Ji, Y. Kansha, and A. Tsutsumi, "Optimization of steam methane reforming coupled with pressure swing adsorption hydrogen production process by heat integration," *Appl. Energy*, vol. 154, pp. 392–401, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.05.038.
- [8] D.-H. Hwang, Y.-S. Choi, and T.-W. Lim, "Performance analysis in water-gas shift reactor for hydrogen yield improvement," *J. Adv. Mar. Eng. Technol.*, vol. 47, no. 4, pp. 168–174, Aug. 2023, doi: 10.5916/jamet.2023.47.4.168.
- [9] K. Metty *et al.*, "Pemurnian Biogas Dari Gas Pengotor Hidrogen Sulfida (H₂S) Dengan Memanfaatkan Limbah Geram Besi Proses Pembubutan," *J. Energi Dan Manufaktur*, vol. 5, no. 1, pp. 33–41, 2013.
- [10] E. Baraj, K. Ciahotný, and T. Hlinčík, "The water gas shift reaction: Catalysts and reaction mechanism," *Fuel*, vol. 288, no. June, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119817.
- [11] D. B. Pal, R. Chand, S. N. Upadhyay, and P. K. Mishra, "Performance of water gas shift reaction catalysts : A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 93, no. December 2017, pp. 549–565, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.05.003.
- [12] S. K. Desi *et al.*, "Effect of Temperature and Steam-to-Carbon Monoxide (CO) Ratio on

- Hydrogen Production in Water-Gas Shift Reaction using Cu-ZnO-Al₂O₃ Catalyst,” *Makara J. Sci.*, vol. 27, no. 4, pp. 337–344, 2023, doi: 10.7454/mss.v27i4.2138.
- [13] Q. Wang, X. Liu, J. Zhu, and H. Jiang, “Chlorine-oxidation-free dual hydrogen production by seawater electrolysis coupling formaldehyde oxidation,” *Electrochim. Acta*, vol. 496, 2024, doi: 10.1016/j.electacta.2024.144490.
- [14] Q. Hassan, I. D. J. Azzawi, A. Z. Sameen, and H. M. Salman, “Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Opportunities and Challenges,” *Sustain.*, vol. 15, no. 15, 2023, doi: 10.3390/su15151501.
- [15] Z. Lian *et al.*, “Hydrogen Production by Fluidized Bed Reactors: A Quantitative Perspective Using the Supervised Machine Learning Approach,” *J.*, vol. 4, no. 3, pp. 266–287, Jul. 2021, doi: 10.3390/j4030022.
- [16] K. Großmann, P. Treiber, and J. Karl, “Steam methane reforming at low S/C ratios for power-to-gas applications,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 40, pp. 17784–17792, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.007.



Foto close-up

Dyorlando S menyelesaikan studi sarjana di Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana, dari tahun 2021 hingga 2025, dengan fokus utama pada bidang konversi energi.

Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan *renewble energy*, khususnya produksi hidrogen yang kemudian ditekuni sebagai topik penelitian tugas akhir.