

Research Article

Optimasi Produksi dan Purifikasi Hidrogen melalui Reformasi Uap Metana pada Reaktor Mikrokanal Menggunakan Simulasi DWSIM dan AspenPlus**Dannar Christyanto¹, Bambang Sudarmanta²**

Program Bidang Keahlian Rekayasa Energi Terbarukan dan Berkelanjutan, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember¹

Institut Teknologi Sepuluh Nopember²

Corresponding Author, Email: danchristyanto@gmail.com

Abstract

Hydrogen is one of the clean energy vectors with great potential to support the transition toward a sustainable energy system. However, hydrogen production is still predominantly based on fossil-fuel processes, particularly Steam Methane Reforming (SMR), which is endothermic in nature and requires optimal process control to achieve high efficiency and purity. This study aims to optimize the hydrogen production and purification process through steam methane reforming in a microchannel reactor using a simulation-based approach. Microchannel reactors are selected due to their high surface-to-volume ratio, which enhances heat and mass transfer as well as reaction temperature stability. Process simulations were conducted using DWSIM software with the Peng–Robinson thermodynamic model to analyze the effects of operating parameter variations, including reformer temperature, operating pressure, and steam-to-methane ratio, on methane conversion and hydrogen mole fraction. The simulation results indicate that increasing the reformer temperature significantly enhances hydrogen production, reaching optimal conditions in the range of 900–950 °C, where the system approaches thermodynamic equilibrium. The integration of Water Gas Shift and Pressure Swing Adsorption (PSA) units within the simulated system is shown to improve hydrogen purity to above 98%. This study demonstrates that a simulation-based microchannel reactor approach is effective in determining optimal operating conditions and has strong potential to serve as a foundation for the development of efficient, sustainable, small-scale, and modular hydrogen production systems.

Keywords: hydrogen, microchannel, aspen plus



INTRODUCTION

Peningkatan kebutuhan energi global yang diiringi dengan isu perubahan iklim dan degradasi lingkungan mendorong percepatan transisi menuju sistem energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Sektor energi masih menjadi kontributor utama emisi gas rumah kaca, terutama karbon dioksida (CO_2), yang sebagian besar dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil. Kondisi ini menuntut pengembangan teknologi energi alternatif yang tidak hanya efisien, tetapi juga ramah lingkungan dan berkelanjutan dalam jangka panjang.

Hidrogen telah lama dipandang sebagai salah satu vektor energi masa depan karena memiliki densitas energi yang tinggi serta tidak menghasilkan emisi karbon pada tahap pemanfaatannya. Hidrogen dapat diaplikasikan secara luas, mulai dari pembangkitan listrik, penyimpanan energi, hingga bahan bakar pada sektor transportasi dan industri. Meskipun demikian, produksi hidrogen saat ini masih didominasi oleh proses berbasis hidrokarbon, dengan Steam Methane Reforming (SMR) sebagai teknologi yang paling banyak digunakan secara komersial karena efisiensi dan kematangan teknologinya.

Proses SMR bersifat sangat endotermik dan beroperasi pada temperatur tinggi, sehingga membutuhkan pasokan energi panas yang besar serta pengendalian kondisi operasi yang presisi. Selain itu, hidrogen hasil reformasi masih bercampur dengan gas lain seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO_2), metana sisa (CH_4), dan uap air, sehingga diperlukan proses purifikasi lanjutan untuk memperoleh hidrogen dengan tingkat kemurnian yang sesuai untuk aplikasi energi dan industri. Tantangan ini mendorong perlunya optimasi proses SMR, baik dari sisi desain reaktor maupun kondisi operasinya.

Salah satu pendekatan inovatif yang berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir adalah penggunaan reaktor mikrokanal. Reaktor mikrokanal memiliki karakteristik rasio luas permukaan terhadap volume yang sangat tinggi, sehingga mampu meningkatkan perpindahan panas dan massa secara signifikan dibandingkan reaktor konvensional. Keunggulan ini memungkinkan pengendalian temperatur reaksi yang lebih baik, peningkatan laju reaksi, serta potensi integrasi beberapa tahapan proses dalam satu sistem yang kompak. Oleh karena itu, reaktor mikrokanal dinilai sangat sesuai untuk sistem produksi hidrogen skala kecil hingga menengah yang bersifat modular.

Seiring dengan perkembangan teknologi komputasi, perangkat lunak simulasi proses seperti DWSIM dan Aspen Plus menjadi alat yang sangat penting dalam analisis dan optimasi sistem produksi hidrogen. Pendekatan simulasi memungkinkan evaluasi pengaruh berbagai parameter operasi terhadap kinerja proses secara sistematis dengan biaya dan waktu yang lebih efisien dibandingkan eksperimen penuh. Simulasi juga berperan sebagai dasar perancangan dan pengembangan sistem sebelum diimplementasikan pada skala eksperimental maupun industri.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dan mengoptimasi proses produksi serta purifikasi hidrogen melalui reformasi uap metana pada

reaktor mikrokanal menggunakan pendekatan simulasi. Fokus utama penelitian meliputi analisis pengaruh suhu reformer, tekanan operasi, dan rasio steam-to-methane terhadap konversi metana dan fraksi mol hidrogen yang dihasilkan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dan teknis dalam pengembangan sistem produksi hidrogen yang efisien, terintegrasi, dan berkelanjutan, khususnya untuk aplikasi energi baru dan terbarukan.

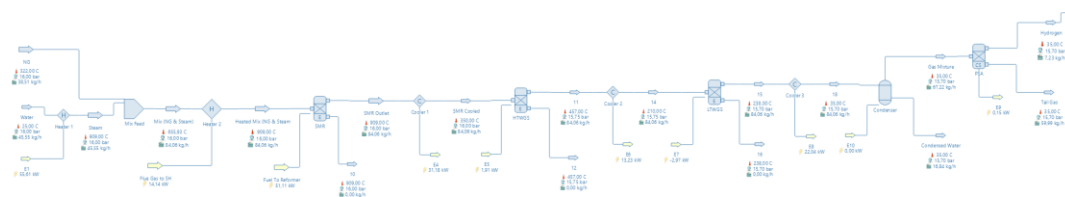
2. METHOD

1. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi proses untuk mengoptimasi produksi dan purifikasi hidrogen melalui Steam Methane Reforming (SMR) pada reaktor mikrokanal. Simulasi dilakukan menggunakan dua perangkat lunak berbeda, yaitu DWSIM dan Aspen Plus, dengan tujuan untuk memperoleh hasil yang lebih andal melalui metode validasi silang (cross validation). Penggunaan dua platform simulasi ini juga dimaksudkan untuk mengevaluasi keandalan perangkat lunak open-source dibandingkan dengan perangkat lunak komersial dalam memodelkan proses SMR.

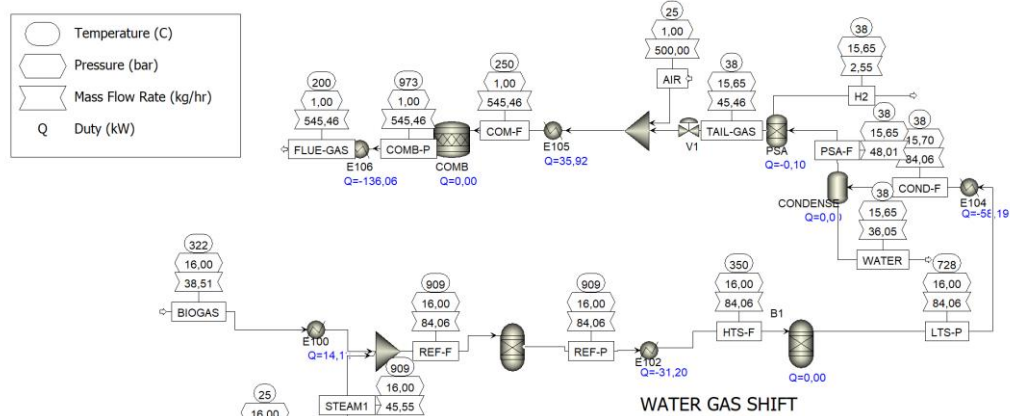
2. Pemodelan Proses pada DWSIM dan Aspen Plus

Pemodelan proses SMR pada DWSIM dan Aspen Plus dilakukan dengan menyamakan konfigurasi alur proses, asumsi reaksi, serta model termodinamika yang digunakan. Model termodinamika yang diterapkan pada kedua perangkat lunak adalah persamaan keadaan Peng–Robinson, yang dipilih karena mampu merepresentasikan sifat campuran gas pada kondisi temperatur dan tekanan tinggi yang khas pada proses reformasi uap metana.



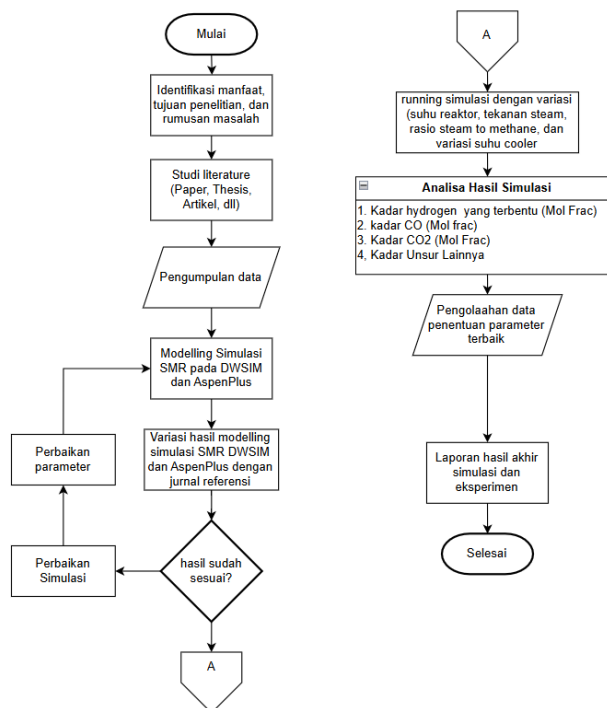
Simulasi DWSIM

Optimasi Produksi dan Purifikasi Hidrogen melalui Reformasi Uap Metana pada Reaktor Mikrokanal Menggunakan Simulasi DWSIM dan AspenPlus



Simulasi AspenPlus

Reaktor reformer dimodelkan sebagai equilibrium reactor dengan asumsi bahwa reaksi berlangsung mendekati kondisi kesetimbangan termodinamika. Reaksi kimia utama yang dimasukkan ke dalam model meliputi reaksi Steam Methane Reforming dan reaksi Water Gas Shift. Pemodelan kesetimbangan dianggap relevan karena reaktor SMR beroperasi pada temperatur tinggi dengan waktu tinggal reaksi yang cukup untuk mendekati kondisi kesetimbangan.



Alur proses yang dimodelkan meliputi unit pemanas untuk menghasilkan uap air, unit pencampuran umpan metana dan uap air, reaktor reformer mikrokanal, unit High Temperature Water Gas Shift (HTWGS), unit Low Temperature Water Gas Shift (LTWGS), kondensor untuk pemisahan uap air, serta unit Pressure Swing Adsorption (PSA) sebagai tahap akhir pemurnian hidrogen. Seluruh unit operasi dimodelkan berdasarkan prinsip neraca massa dan energi yang berlaku.

3. Variasi Parameter Operasi

Untuk menentukan kondisi operasi optimum, dilakukan variasi terhadap beberapa parameter utama yang berpengaruh terhadap kinerja sistem, yaitu:

- a) Suhu reformer, divariasikan pada rentang 500–1200 °C pada tekanan 16 bar dan rasio steam to methane 1.
- b) Tekanan operasi, divariasikan pada rentang 10–20 bar
- c) Rasio steam-to-methane, divariasikan pada kisaran 2–5

Setiap variasi parameter dianalisis terhadap konversi metana, fraksi mol hidrogen, serta distribusi komponen gas hasil reformasi.

3. RESULT AND DISCUSSION

Analisis dan Validasi Hasil Simulasi

Analisis dan validasi hasil simulasi dilakukan untuk mengevaluasi keandalan model proses Steam Methane Reforming (SMR) pada reaktor mikrokanal yang dikembangkan menggunakan perangkat lunak DWSIM dan Aspen Plus. Validasi dilakukan melalui perbandingan tren dan nilai hasil simulasi dari kedua perangkat lunak dengan landasan teori termodinamika serta referensi literatur yang relevan.

Pengaruh Suhu Reformer

Hasil simulasi menunjukkan bahwa suhu reformer merupakan parameter operasi yang paling dominan dalam menentukan kinerja produksi hidrogen. Peningkatan suhu reformer secara konsisten meningkatkan fraksi mol hidrogen dan konversi metana pada kedua perangkat lunak. Kenaikan produksi hidrogen paling signifikan terjadi pada rentang suhu 500–900 °C, yang sejalan dengan karakter reaksi Steam Methane Reforming yang bersifat endotermik. Pada suhu di atas 900–950 °C, peningkatan fraksi mol hidrogen mulai menunjukkan kecenderungan mendatar (plateau), menandakan bahwa sistem telah mendekati kondisi kesetimbangan termodinamika. Fenomena ini konsisten dengan prinsip Le Chatelier dan temuan

dalam literatur yang merekomendasikan suhu operasi optimum SMR pada kisaran 850–950 °C.

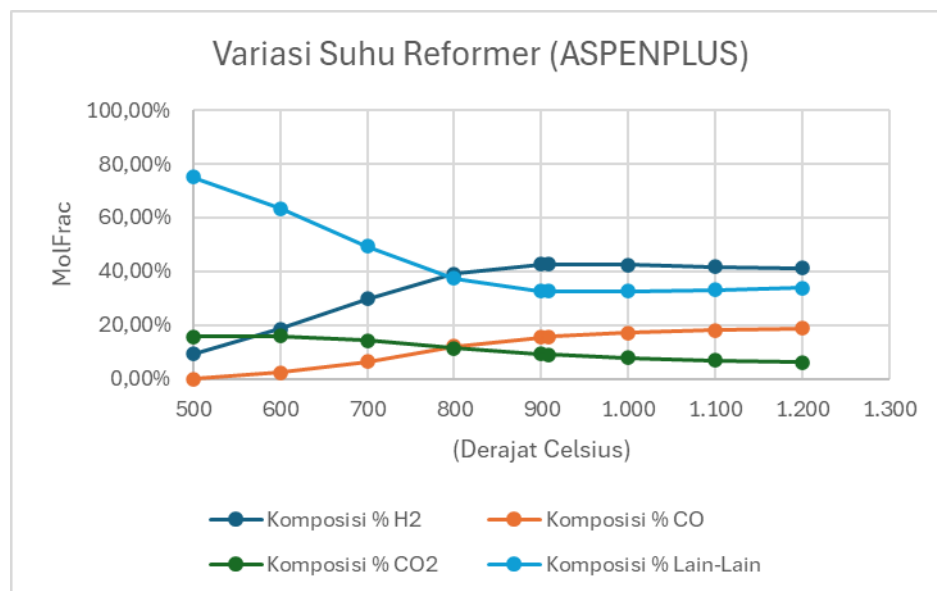
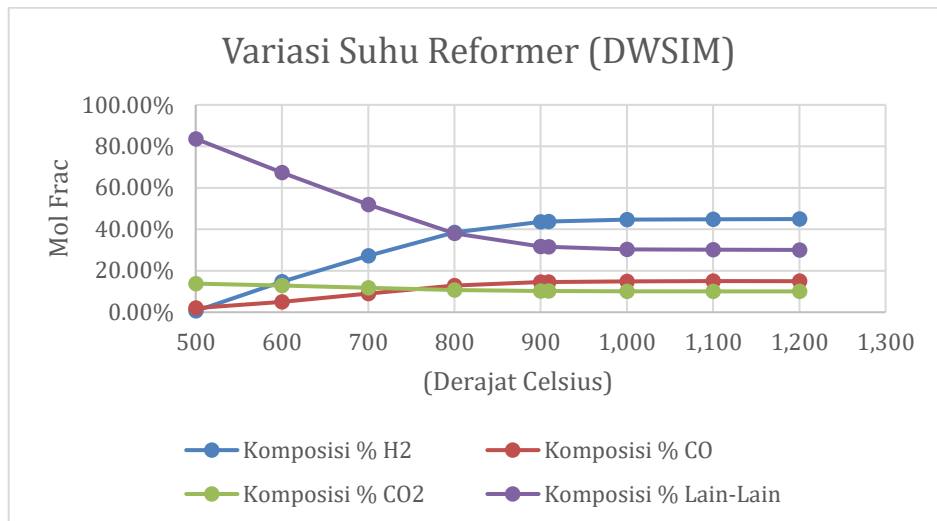
Selain itu, peningkatan suhu juga diikuti dengan peningkatan fraksi karbon monoksida (CO) dan penurunan karbon dioksida (CO₂), yang menunjukkan dominasi reaksi reforming dibandingkan reaksi Water Gas Shift pada tahap reformer. Tren ini ditunjukkan secara konsisten baik pada hasil simulasi DWSIM maupun Aspen Plus, sehingga memperkuat validitas model yang digunakan.

DWSIM
Variasi Suhu Reformer

Suhu	Komposisi %			
°C	H ₂	CO	CO ₂	Lain-Lain
500	0,59%	1,99%	13,78%	83,64%
600	14,77%	4,92%	12,93%	67,38%
700	27,21%	9,07%	11,74%	51,98%
800	38,44%	12,81%	10,67%	38,08%
900	43,56%	14,52%	10,18%	31,74%
909	43,75%	14,58%	10,16%	31,51%
1.000	44,69%	14,89%	10,07%	30,35%
1.100	44,89%	14,96%	10,05%	30,10%
1.200	44,93%	14,97%	10,05%	30,05%

ASPEN
Variasi Suhu Reformer

Suhu	Komposisi %			
°C	H ₂	CO	CO ₂	Lain-Lain
500	9,25%	0,05%	15,59%	75,11%
600	18,55%	2,23%	15,83%	63,39%
700	29,78%	6,47%	14,35%	49,40%
800	39,06%	12,01%	11,45%	37,48%
900	42,57%	15,51%	9,20%	32,72%
909	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%
1.000	42,50%	17,08%	7,89%	32,53%
1.100	41,80%	18,04%	6,98%	33,18%
1.200	41,13%	18,76%	6,27%	33,84%



Pengaruh Tekanan Reformer

Variasi tekanan reformer menunjukkan bahwa peningkatan tekanan cenderung menurunkan fraksi mol hidrogen, meskipun pengaruhnya relatif lebih kecil dibandingkan pengaruh suhu. Hal ini sesuai dengan karakter reaksi SMR yang menghasilkan jumlah mol gas lebih besar, sehingga tekanan tinggi akan menggeser kesetimbangan reaksi ke arah reaktan. Pada simulasi DWSIM, penurunan fraksi hidrogen terlihat secara bertahap seiring kenaikan tekanan, sedangkan Aspen Plus menunjukkan perubahan yang lebih moderat. Perbedaan respons ini disebabkan oleh perbedaan algoritma perhitungan kesetimbangan dan basis data termodinamika

pada masing-masing perangkat lunak. Meskipun demikian, tren umum yang ditunjukkan kedua simulator tetap konsisten secara fisik.

DWSIM

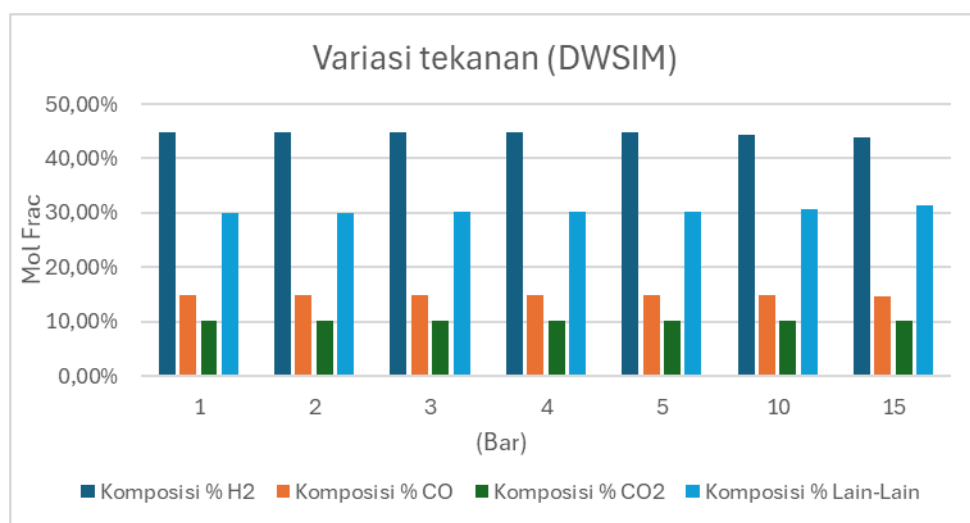
Variasi Tekanan Reformer

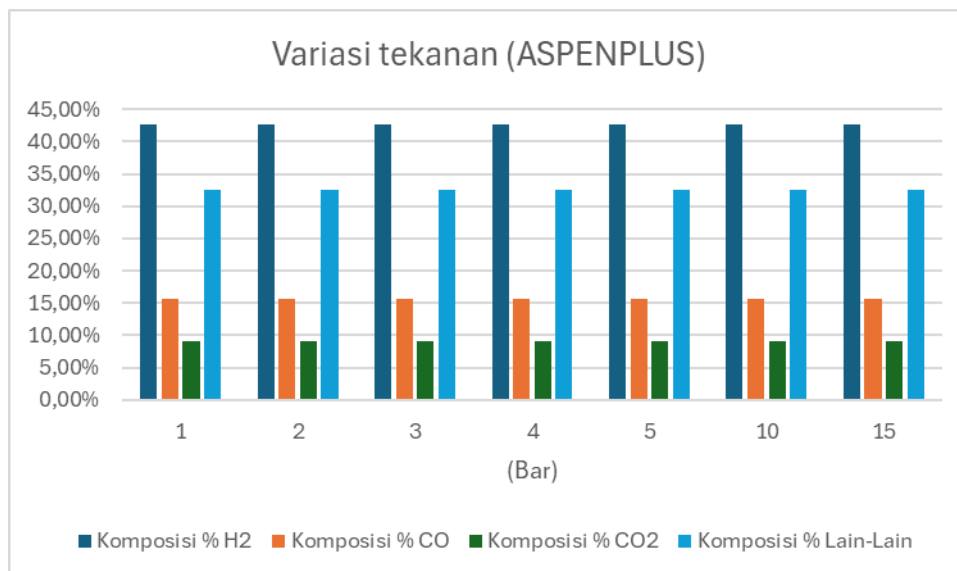
Tekanan	Komposisi %			
Bar	H ₂	CO	CO ₂	Lain-Lain
1	44,93%	14,97%	10,05%	30,05%
2	44,92%	14,97%	10,05%	30,06%
3	44,89%	14,96%	10,05%	30,10%
4	44,86%	14,95%	10,06%	30,13%
5	44,81%	14,93%	10,06%	30,20%
10	44,44%	14,81%	10,10%	30,65%
15	43,92%	14,63%	10,15%	31,30%
16	43,75%	14,58%	10,16%	31,51%

ASPEN

Variasi Tekanan Reformer

Tekanan	Komposisi %			
Bar	H ₂	CO	CO ₂	Lain-Lain
1	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%
2	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%
3	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%
4	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%
5	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%
10	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%
15	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%
16	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%





Pengaruh Rasio Steam-to-Methane

Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi rasio steam-to-methane tidak memberikan peningkatan signifikan terhadap fraksi mol hidrogen pada kondisi suhu tinggi. Pada kondisi tersebut, sistem telah mendekati kesetimbangan termodinamika sehingga penambahan steam tidak secara langsung meningkatkan produksi hidrogen. Peran utama steam berlebih lebih berkaitan dengan pencegahan pembentukan karbon (coking) dan menjaga stabilitas katalis. Berdasarkan hasil simulasi dan tinjauan literatur, rasio steam-to-methane optimum berada pada kisaran 2–3 sebagai kompromi terbaik antara efisiensi energi dan stabilitas operasi.

DWSIM

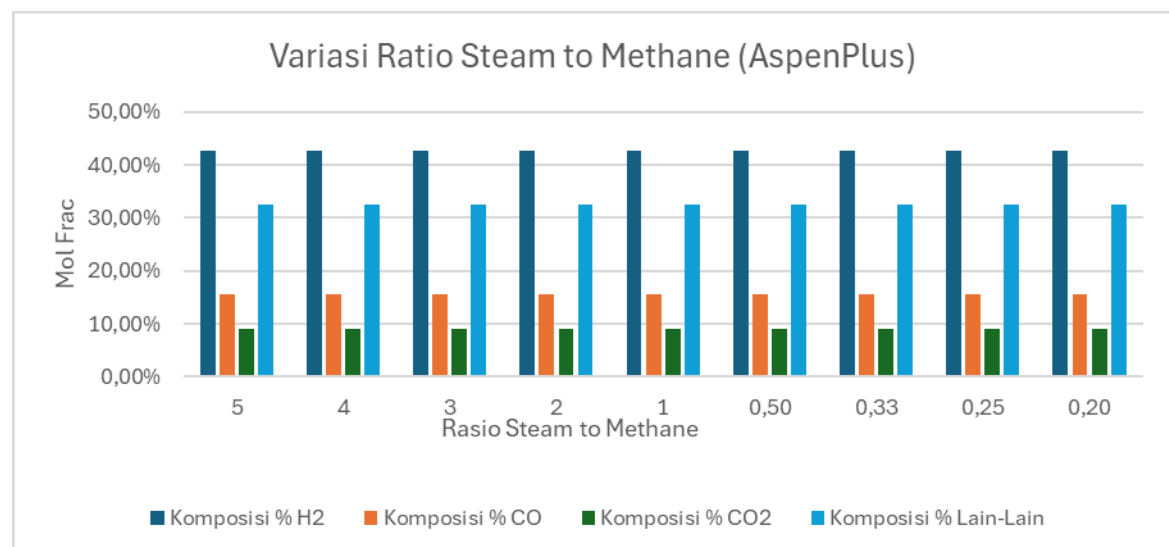
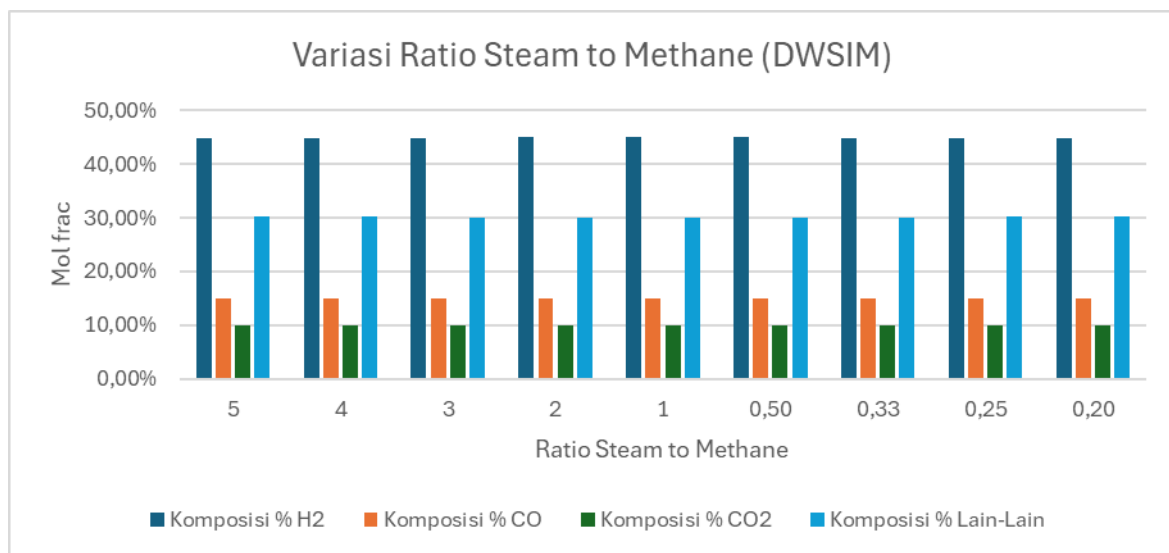
Variasi rasio steam/methane

Tekanan (Bar)			Komposisi %			
Steam	CNG	Rasio	H2	CO	CO2	Lain-Lain
5	1	5	44,81%	14,93%	10,06%	30,20%
4	1	4	44,86%	14,95%	10,06%	30,13%
3	1	3	44,89%	14,96%	10,05%	30,10%
2	1	2	44,92%	14,97%	10,05%	30,06%
1	1	1	44,93%	14,97%	10,05%	30,05%
1	2	0,50	44,92%	14,97%	10,05%	30,06%
1	3	0,33	44,89%	14,96%	10,05%	30,10%
1	4	0,25	44,86%	14,95%	10,06%	30,13%
1	5	0,20	44,81%	14,93%	10,06%	30,20%

ASPEN

Variasi rasio steam/methane

Tekanan (Bar)			Komposisi %			
Steam	CNG	Rasio	H ₂	CO	CO ₂	Lain-Lain
5	1	5	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%
4	1	4	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%
3	1	3	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%
2	1	2	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%
1	1	1	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%
1	2	0,50	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%
1	3	0,33	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%
1	4	0,25	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%
1	5	0,20	42,65%	15,70%	9,05%	32,60%



Pengaruh Suhu Cooler dan Unit Water Gas Shift

Variasi suhu cooler tidak menunjukkan perubahan signifikan terhadap komposisi gas hasil reformasi pada kedua perangkat lunak simulasi. Hal ini sesuai dengan teori bahwa cooler merupakan unit non-reaktif yang hanya berfungsi menurunkan temperatur fluida tanpa memengaruhi kesetimbangan kimia. Namun demikian, pengaturan suhu cooler menjadi penting untuk menyiapkan kondisi optimal sebelum memasuki unit Water Gas Shift (WGS).

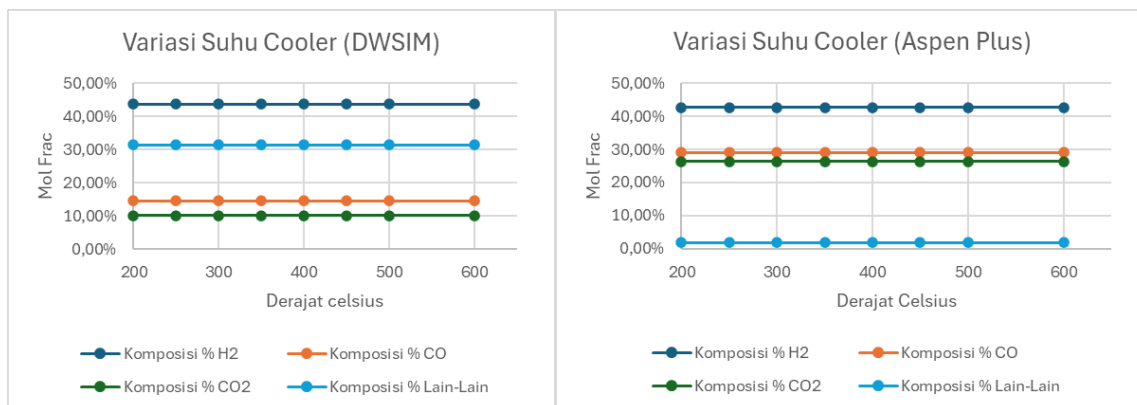
DWSIM

Variasi Cooler

Suhu °C	Komposisi %				Suhu °C	Komposisi %			
	H2	CO	CO2	Lain-Lain		H2	CO	CO2	Lain-Lain
200	43,75%	14,58%	10,16%	31,51%	200	42,65%	29,11%	26,37%	1,87%
250	43,75%	14,58%	10,16%	31,51%	250	42,65%	29,11%	26,37%	1,87%
300	43,75%	14,58%	10,16%	31,51%	300	42,65%	29,11%	26,37%	1,87%
350	43,75%	14,58%	10,16%	31,51%	350	42,65%	29,11%	26,37%	1,87%
400	43,75%	14,58%	10,16%	31,51%	400	42,65%	29,11%	26,37%	1,87%
450	43,75%	14,58%	10,16%	31,51%	450	42,65%	29,11%	26,37%	1,87%
500	43,75%	14,58%	10,16%	31,51%	500	42,65%	29,11%	26,37%	1,87%
600	43,75%	14,58%	10,16%	31,51%	600	42,65%	29,11%	26,37%	1,87%

ASPEN

Variasi Cooler



Validasi Silang DWSIM dan Aspen Plus

Validasi hasil simulasi dilakukan dengan membandingkan tren dan nilai hasil simulasi antara DWSIM dan Aspen Plus. Secara umum, kedua perangkat lunak menunjukkan kesesuaian tren terhadap variasi parameter operasi utama, khususnya suhu, tekanan, dan rasio steam-to-methane. Perbedaan nilai absolut yang muncul masih berada dalam batas yang dapat diterima dan terutama disebabkan oleh perbedaan metode numerik dan basis data properti termodinamika. Konsistensi hasil

ini menunjukkan bahwa DWSIM, sebagai perangkat lunak open-source, memiliki tingkat keandalan yang baik dan dapat digunakan sebagai alternatif dalam studi optimasi proses produksi hidrogen.

4. CONCLUSION

Berdasarkan hasil simulasi proses Steam Methane Reforming (SMR) yang telah dilakukan menggunakan perangkat lunak DWSIM dan ASPEN PLUS dengan berbagai variasi parameter operasi, dapat disimpulkan bahwa suhu reformer merupakan parameter paling dominan dalam menentukan kinerja proses produksi hidrogen. Peningkatan suhu reformer secara signifikan meningkatkan fraksi mol hidrogen hingga mencapai kondisi optimum pada kisaran 900–950 °C. Pada rentang suhu tersebut, reaksi SMR yang bersifat endotermik berlangsung secara optimal dan sistem mendekati kesetimbangan termodinamika. Peningkatan suhu di atas nilai tersebut tidak memberikan kenaikan hidrogen yang signifikan, namun meningkatkan kebutuhan energi pemanas dan berpotensi menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

Variasi tekanan reformer menunjukkan bahwa peningkatan tekanan cenderung menurunkan fraksi mol hidrogen, meskipun penurunannya relatif kecil dibandingkan pengaruh suhu. Meskipun tekanan rendah lebih menguntungkan secara termodinamika, tekanan operasi pada kisaran 15–20 bar tetap dipilih sebagai kondisi optimum karena memberikan kompromi terbaik antara kinerja reformer dan kebutuhan integrasi dengan unit pemurnian hilir, khususnya Pressure Swing Adsorption (PSA).

Hasil simulasi variasi rasio steam-to-methane (S/C) menunjukkan bahwa perubahan rasio steam pada rentang yang diuji tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan fraksi mol hidrogen ketika sistem telah beroperasi pada temperatur tinggi dan mendekati kesetimbangan termodinamika. Rasio steam yang terlalu tinggi tidak meningkatkan produksi hidrogen secara berarti, namun meningkatkan konsumsi energi untuk pemanasan uap. Oleh karena itu, rasio steam-to-methane yang moderat, yaitu sekitar 2–3, dinilai sebagai kondisi paling rasional karena mampu menjaga kestabilan reaksi, meminimalkan risiko pembentukan karbon, dan meningkatkan efisiensi energi sistem.

Variasi suhu cooler menunjukkan bahwa perubahan temperatur pada unit pendingin tidak mempengaruhi komposisi gas keluaran, baik pada simulasi DWSIM maupun ASPEN PLUS. Hal ini menegaskan bahwa cooler berfungsi sebagai unit operasi non-reaktif yang hanya berperan dalam pengkondisian temperatur aliran gas tanpa mengubah kesetimbangan kimia. Meskipun tidak berdampak langsung pada

produksi hidrogen, pemilihan suhu cooler sekitar 350 °C menjadi sangat penting untuk menyiapkan kondisi operasi yang sesuai bagi unit Water Gas Shift (WGS), sehingga mendukung peningkatan efisiensi proses secara keseluruhan.

Parameter operasi terbukti mempengaruhi efisiensi reformasi dan konversi CH₄ pada reaktor skala mikro, dengan temperatur reformer sebagai faktor paling dominan karena sifat reaksi SMR yang endotermik. Kondisi operasi optimal dicapai melalui kombinasi temperatur reformer tinggi, tekanan menengah, dan rasio steam-to-methane yang moderat, yang mampu memaksimalkan konversi CH₄ sekaligus mendukung pencapaian kemurnian hidrogen secara efisien. Pengaturan suhu cooler berperan penting dalam menyiapkan kondisi lanjutan proses tanpa mempengaruhi komposisi gas secara langsung. Kondisi operasi optimal dicapai melalui kombinasi suhu tinggi (900 °C), tekanan menengah (16 Bar), S/C moderat (2) dengan hasil H₂ terkonversi sebesar 43,56%, dengan cooler sebagai pengkondisi proses lanjutan.

Daftar pustaka

- Achebe, C. H., & Chinweze, A. (2022). Review of Alternative Energy Production Methods by Oxidation of Electrolysed Hydrogen in a Hydrogen Fuel Cell. <https://www.researchgate.net/publication/359506900>
- Aditiyawan, I. (2020). OPTIMASI PANJANG DAN KEDALAMAN CHANNEL PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC) TIPE ALIRAN PARALEL UNTUK PENURUNAN TEKANAN DAN LAJU ALIRAN H₂ MENGGUNAKAN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Aziaba, K., Jordan, C., Haddadi, B., & Harasek, M. (2022). Design of a Gas Permeation and Pervaporation Membrane Model for an Open Source Process Simulation Tool. *Membranes*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/membranes12121186>
- Bento, C., Lopes, T. F., Rodrigues, P., Gírio, F., & Silva, C. (2024a). Biogas reforming as a sustainable solution for hydrogen production: Comparative environmental metrics with steam-methane reforming and water electrolysis in the Portuguese context. *International Journal of Hydrogen Energy*, 66, 661–675. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.113>
- Bento, C., Lopes, T. F., Rodrigues, P., Gírio, F., & Silva, C. (2024b). Biogas reforming as a sustainable solution for hydrogen production: Comparative environmental metrics with steam-methane reforming and water electrolysis in the Portuguese context. *International Journal of Hydrogen Energy*, 66, 661–675. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.113>

- Chisholm, G., & Cronin, L. (2016). Hydrogen From Water Electrolysis. In *Storing Energy* (pp. 315–343). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00016-6>
- David, O. C., Gorri, D., Nijmeijer, K., Ortiz, I., & Urtiaga, A. (2012). Hydrogen separation from multicomponent gas mixtures containing CO, N₂ and CO₂ using Matrimid[®] asymmetric hollow fiber membranes. *Journal of Membrane Science*, 419–420, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.06.038>
- David, O. C., Gorri, D., Urtiaga, A., & Ortiz, I. (2011). Mixed gas separation study for the hydrogen recovery from H₂/CO/N₂/CO₂ post combustion mixtures using a Matrimid membrane. *Journal of Membrane Science*, 378(1–2), 359–368. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.05.029>
- Kayfeci, M., Keçebaş, A., & Bayat, M. (2019a). Hydrogen production. In *Solar Hydrogen Production* (pp. 45–83). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00003-5>
- Kayfeci, M., Keçebaş, A., & Bayat, M. (2019b). Hydrogen production. In *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies* (pp. 45–83). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00003-5>
- Lim, T. W., Hwang, D. H., & Choi, Y. S. (2024). Design and optimization of a steam methane reformer for ship-based hydrogen production on LNG-fueled ship. *Applied Thermal Engineering*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122588>
- Patlolla, S. R., Katsu, K., Sharafian, A., Wei, K., Herrera, O. E., & Mérida, W. (2023). A review of methane pyrolysis technologies for hydrogen production. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 181). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113323>
- Phan, T. S., Pham Minh, D., Espitalier, F., Nzihou, A., & Grouset, D. (2022). Hydrogen production from biogas: Process optimization using ASPEN Plus[®]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(100), 42027–42039. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.100>
- Qussay, R., Khalid Al-Zubaidi, D., Mahmood, M., Al-Zaidi, M. K., Al-Khafaji, R. Q., Al-Zubaidy, D. K., & Salman, M. M. (2021). A Review: Fuel Cells Types and their Applications. In *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)* (Issue 7). www.ijseas.com

- Salimy, D. H., Pengembangan, P., Nuklir, E., Ppen) -Batan, (, Rohim, J. A., Barat, K., & Prapatan, M. (n.d.). Steam Reforming Gas Alam dengan Reaktor Membran Menggunakan Reaktor Nuklir Temperatur Medium (Djati H. Salimy) STEAM REFORMING GAS ALAM DENGAN REAKTOR MEMBRAN MENGGUNAKAN REAKTOR NUKLIR TEMPERATUR MEDIUM.
- Sánchez-Bastardo, N., Schlögl, R., & Ruland, H. (2021). Methane Pyrolysis for Zero-Emission Hydrogen Production: A Potential Bridge Technology from Fossil Fuels to a Renewable and Sustainable Hydrogen Economy. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(32), 11855–11881. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c01679>
- Sigit Cahyono, M., Noviansyah Aridito, M., Syamsiro, M., & Setiawan, H. (2023). Proses Konversi Metana Menjadi Hidrogen dengan Proses Pirolisis dalam Reaktor Kolom Gelembung Menggunakan Logam Cair. *Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy*, 7(Juni), 53–58.
- Wahyono, Y., Sutanto, H., & Hidayanto, E. (2017). Produksi gas hydrogen menggunakan metode elektrolisis dari elektrolit air dan air laut dengan penambahan katalis NaOH. In *Youngster Physics Journal* (Vol. 6, Issue 4).