

Optimasi Proses Steam Methane Reforming Melalui Penambahan Gas Hidrogen pada Hydrogen Plant di Industri Oleokimia

Zulfabri Ansyah¹, Mardian¹, Reni Desmiarti¹, Erda Rahmilaila Desfitri^{2*}

*Email corresponding author: rahmilaila@bunghatta.ac.id

¹Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Bung Hatta

²Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Bung Hatta

Article history: Received: 2 Januari 2025 | Revised: 27 Maret 2025 | Accepted: 28 Maret 2025

Abstract. Steam Methane Reforming (SMR) is a well-established hydrogen production technology operating at 750-900°C using nickel-based catalysts with highly endothermic characteristics. This study investigates the effect of hydrogen addition to feed as an alternative process optimization at PT Ecogreen Oleochemicals Batam, responding to natural gas composition changes from 86% to 82% methane and increased ethane-propane content. These changes caused process instability and excessive carbon formation, leading to catalyst deactivation when increasing the steam-to-carbon ratio was not feasible due to operational limitations. Results demonstrate correlations between reformer temperature, natural gas fuel consumption, and product yield. Hydrogen addition proves effective in preventing carbon formation and maintaining process stability. This study provides practical solutions for hydrogen production optimization through balancing hydrogen addition, reformer temperature, and fuel efficiency.

Keywords - Steam Methane Reforming; Ratio Steam to Carbon (S/C); Hydrogen Production; Carbon Formation; Hydrogen Addition

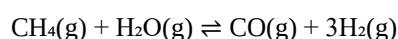
Abstrak. Steam Methane Reforming (SMR) merupakan teknologi produksi hidrogen yang beroperasi pada suhu 750-900°C menggunakan katalis berbasis nikel dengan sifat sangat endotermik. Penelitian ini mengkaji pengaruh penambahan hidrogen pada umpan sebagai alternatif optimasi proses di PT Ecogreen Oleochemicals Batam, merespons perubahan komposisi gas alam dari 86% menjadi 82% metana dan peningkatan etana-propana. Perubahan ini menyebabkan ketidakstabilan proses dan pembentukan karbon yang berlebih, mengakibatkan deaktivasi katalis ketika peningkatan rasio steam-to-carbon tidak memungkinkan karena keterbatasan operasional. Hasil penelitian menunjukkan korelasi antara suhu reformer, konsumsi bahan bakar NG, dan yield produk. Penambahan hidrogen terbukti efektif mencegah pembentukan karbon dan mempertahankan stabilitas proses. Studi ini memberikan solusi praktis untuk optimasi produksi hidrogen melalui keseimbangan penambahan hidrogen, suhu reformer, dan efisiensi bahan bakar.

Kata Kunci - Steam Methane Reforming; Ratio Steam to Carbon (S/C); Produksi Hidrogen; Pembentukan Karbon; Penambahan Hidrogen

PENDAHULUAN

Hidrogen merupakan gas yang memiliki peran penting dalam berbagai industri, seperti produksi amonia untuk pupuk, pengolahan minyak dan gas, produksi metanol, serta sebagai bahan bakar pada pembangkit listrik [1]–[3]. Teknologi dominan dan paling matang dalam produksi hidrogen saat ini adalah *steam methane reforming* (SMR), yang menyumbang sekitar 48% dari total produksi hidrogen global [4], [5]. Proses SMR beroperasi pada suhu tinggi antara 750-900°C dengan menggunakan katalis berbasis nikel dan bersifat endotermik, membutuhkan energi besar untuk memecah ikatan hidrogen dari elemen lainnya [6], [7].

Proses SMR melibatkan reaksi antara metana (CH₄) dan uap air (H₂O) untuk menghasilkan gas sintesis (*syngas*) yang kaya akan hidrogen, sesuai dengan reaksi berikut:



Kinerja proses SMR sangat dipengaruhi oleh rasio *steam-to-carbon* (S/C). Rasio S/C yang terlalu rendah dapat memicu pembentukan karbon (*coke*) yang menyumbat permukaan katalis, sementara rasio S/C yang terlalu tinggi akan meningkatkan kebutuhan energi untuk memproduksi uap bertekanan tinggi. Penelitian terdahulu, seperti yang dilakukan oleh Aasberg-Petersen, menemukan bahwa rasio S/C optimal untuk meminimalkan pembentukan karbon dan memaksimalkan konversi metana berada pada rentang 3,0-3,5 [6].

Namun, kondisi operasional di PT Ecogreen Oleochemicals Batam menunjukkan tantangan baru akibat perubahan komposisi gas alam sebagai bahan baku, di mana kadar metana mengalami penurunan dari 86% menjadi 82%, sedangkan etana dan propana meningkat masing-masing dari 6% menjadi 8% dan 1,5% menjadi 3%. Perubahan ini menyebabkan ketidakstabilan proses yang ditandai dengan peningkatan suhu pada reformer akibat tidak tercapainya rasio S/C optimal. Pembentukan karbon yang lebih tinggi menyebabkan katalis terdeaktivasi, mengurangi efisiensi reaksi reformasi metana, dan menurunkan produksi hidrogen secara signifikan [7].

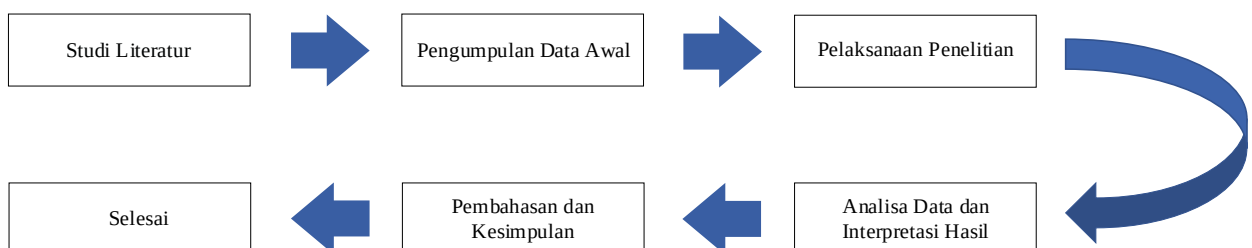
Beberapa studi sebelumnya fokus pada optimasi rasio S/C untuk mencegah pembentukan karbon dan menjaga kinerja katalis. Seperti pada penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa rasio S/C optimal pada kisaran 3,0–3,5 efektif dalam mencegah pembentukan karbon [6]. Namun, penelitian yang mempertimbangkan penambahan hidrogen (H_2) ke dalam umpan untuk mengatasi masalah deaktivasi katalis akibat pembentukan karbon masih terbatas. Hidrogen tambahan dapat membersihkan permukaan katalis, mengurangi pembentukan karbon, dan mempertahankan aktivitas katalis lebih lama sehingga meningkatkan efisiensi proses [8]–[10].

Penelitian terdahulu hanya berfokus pada optimasi rasio S/C tanpa mempertimbangkan penambahan hidrogen sebagai solusi alternatif. Selain itu, keterbatasan operasional di lapangan, seperti keterbatasan katup pengatur uap, membuat peningkatan rasio S/C tidak lagi memungkinkan. Oleh karena itu, masih terdapat kesenjangan penelitian dalam mengatasi ketidakstabilan proses akibat perubahan komposisi umpan gas alam dan keterbatasan rasio S/C. Penelitian ini penting untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas proses SMR dalam kondisi nyata. Penambahan hidrogen pada umpan gas alam dapat menjadi solusi praktis untuk mencegah deaktivasi katalis, mengurangi pembentukan karbon, dan meningkatkan produksi hidrogen tanpa memerlukan peningkatan rasio S/C yang sulit diterapkan dalam kondisi lapangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi dampak penyesuaian parameter suhu pada reaktor SMR dengan penambahan gas hidrogen terhadap efisiensi proses dan hasil produksi hidrogen.

METODE

Metoda yang digunakan pada penelitian ini adalah metoda kuantitatif melalui pengambilan data operasional lapangan. Penelitian ini memiliki tiga jenis variabel yaitu:

1. Variabel dependen (variabel terikat) adalah variabel yang nilainya bergantung pada perubahan variabel independen. Variabel dependen pada penelitian ini meliputi: Stabilitas suhu reaktor reformer, konsumsi bahan bakar gas alam, serta produksi gas hidrogen yang dihasilkan.
2. Variabel independen (variabel bebas) adalah variabel yang dimanipulasi untuk melihat pengaruhnya terhadap variabel lain. Pada penelitian ini, variabel independen adalah jumlah penambahan gas hidrogen pada umpan proses.
3. Variabel kontrol (variabel terkendali) adalah variabel yang dijaga konstan selama penelitian agar tidak mempengaruhi hasil eksperimen. Tujuannya adalah memastikan bahwa perubahan pada variabel dependen hanya disebabkan oleh manipulasi variabel independen, bukan oleh faktor lain. Pada penelitian ini, tekanan reaktor dan *flow* umpan dipertahankan tetap untuk memastikan kondisi operasi yang konsisten.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Diagram alir diatas menggambarkan tahapan metodologi penelitian yang dimulai dari studi literatur untuk memahami teori dan penelitian sebelumnya, dilanjutkan dengan pengumpulan data awal sebagai dasar pelaksanaan penelitian. Setelah itu, pelaksanaan penelitian dilakukan sesuai metode yang dirancang, diikuti oleh analisis data dan interpretasi hasil untuk mendapatkan temuan. Temuan tersebut dibahas lebih lanjut dalam tahap pembahasan dan kesimpulan, sebelum penelitian dinyatakan selesai.

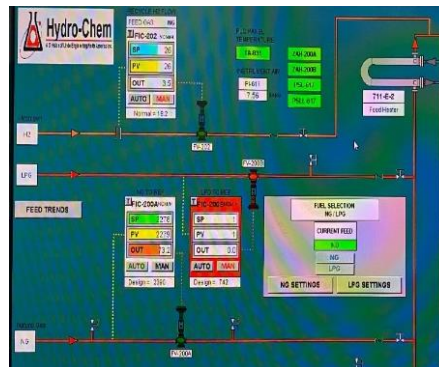
Prosedur kerja dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Persiapan jalur gas hidrogen untuk dimasukkan ke jalur natural gas



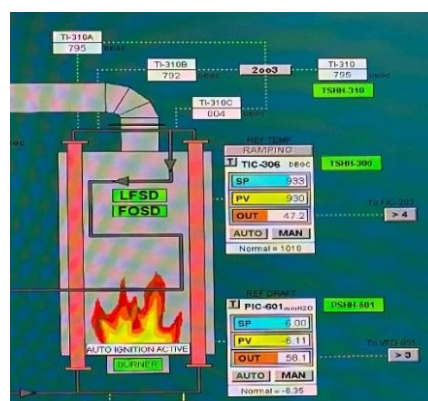
Gambar 2. Jalur H₂ Masuk Feed Natural Gas

- b. Memasukkan gas hidrogen ke jalur natural gas.



Gambar 3. Input Hydrogen Feed

- c. Gas hidrogen dimasukkan secara bertahap dengan memonitor perubahan kondisi operasi yang terjadi pada proses.



Gambar 4. Reformer Box

- d. Penambahan jumlah hidrogen dihentikan ketika kondisi operasi yang optimal tercapai.

Gas hidrogen dimasukkan secara bertahap dengan memonitor beberapa parameter proses seperti temperatur reformer, *supply* bahan bakar, dan hidrogen yang dihasilkan. Kondisi optimal tercapai ketika kondisi proses perlahan membaik dengan ditandai turunnya temperature reformer, naiknya *supply* bahan bakar serta meningkatnya produk hidrogen.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Hasil Eksperimen dan Observasi Proses *Steam Methane Reforming*

Tabel 1. Data eksperimen dan observasi penelitian

Jumlah H ₂ pada Umpan (Nm ³ /h)	Temperatur Reformer (°C)	NG Fuel (Nm ³ /h)	Produk H ₂ (Nm ³ /h)	Yield (%)
0	808	4834,91	125801,8	87,36
	809	3873,86	120380,09	83,60
	806	4678,68	122390,58	84,99
5	802	4953,78	125836,02	87,39
	803	5001,2	124978,66	86,79
	801	5301,88	125101,12	86,88
10	800	5536,21	127301	88,40
	793	5728,922	129221,35	89,74
	796	6023,55	129813,54	90,15
15	789	6850,35	133269,45	92,55
	790	6595,84	132689,25	92,15
	789	6504,56	134229,3	93,21
25	786	7723,65	143861,75	99,90
	784	7689,51	143396,75	99,58
	783	7765,45	143418	99,60
30	785	7721,36	143521,7	99,67
	783	7765,12	14396,2	99,98
	785	7700,44	143200	99,44

Tabel 1 menunjukkan performa reformer dalam memproduksi hidrogen (H₂) dengan variasi jumlah H₂ pada umpan, temperatur reformer, konsumsi bahan bakar gas alam (NG Fuel) serta yield produksi. Secara umum, peningkatan jumlah H₂ pada umpan meningkatkan efisiensi konversi atau yield (%). Pada umpan 0 Nm³/h, yield bervariasi dari 83,60% hingga 87,36%, sementara pada umpan 25-30 Nm³/h, yield mendekati 100%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan H₂ pada umpan dapat mengoptimalkan proses produksi. Dalam studi oleh Rostrup-Nielsen dan Chrostiansen dikemukakan bahwa proses reformasi uap metana (steam methane reforming, SMR) umumnya menghasilkan yield hidrogen hingga 85-95% tergantung pada rasio umpan, temperatur, dan tekanan operasi [11]. Hasil pada tabel menunjukkan bahwa yield hidrogen meningkat hingga 99,98% pada kondisi optimal (umpan H₂ sebesar 30 Nm³/h, temperatur 783°C). Yield ini lebih tinggi dibandingkan rata-rata pada penelitian Rostrup-Nielsen, yang mengindikasikan bahwa penambahan H₂ pada umpan serta kontrol temperatur mampu meningkatkan efisiensi reformasi.

Temperatur reformer juga berperan penting di mana temperatur yang lebih rendah (783°C) pada umpan tinggi (30 Nm³/h) menghasilkan yield maksimal sebesar 99,98%. Sebaliknya, temperatur tinggi (809°C) pada umpan rendah memberikan yield yang lebih rendah, mungkin disebabkan oleh ketidakefisienan termal. Konsumsi NG Fuel meningkat seiring bertambahnya H₂ pada umpan, misalnya dari 3873,86 Nm³/h pada umpan 0 Nm³/h hingga 7765,12 Nm³/h pada umpan 30 Nm³/h. Hal ini mencerminkan kebutuhan energi yang lebih besar untuk mendukung peningkatan kapasitas produksi H₂. Pada penelitian terdahulu dinyatakan bahwa temperatur reformasi yang lebih tinggi (800-900 °C) sering digunakan untuk mempercepat reaksi endotermik, namun efisiensi cenderung menurun karena peningkatan kehilangan panas [12]. Data pada tabel mendukung hal ini, di mana yield yang lebih rendah (83,60–87,36%) terjadi pada temperatur tinggi (809°C) dengan umpan H₂ nol. Sebaliknya, temperatur lebih rendah (783°C) pada umpan tinggi memberikan yield mendekati 100%, konsisten dengan pengamatan bahwa pengendalian temperatur yang lebih rendah tetapi stabil meningkatkan efisiensi proses.

Produksi H₂ juga meningkat seiring bertambahnya H₂ pada umpan, dari kisaran 120380,09 Nm³/h pada umpan 0 Nm³/h hingga 143965,2 Nm³/h pada umpan 30 Nm³/h. Kondisi optimal untuk yield tertinggi dicapai pada umpan H₂ sebesar 30 Nm³/h, temperatur 783°C, dan konsumsi NG Fuel sebesar 7765,12 Nm³/h, menghasilkan produk H₂ sebesar

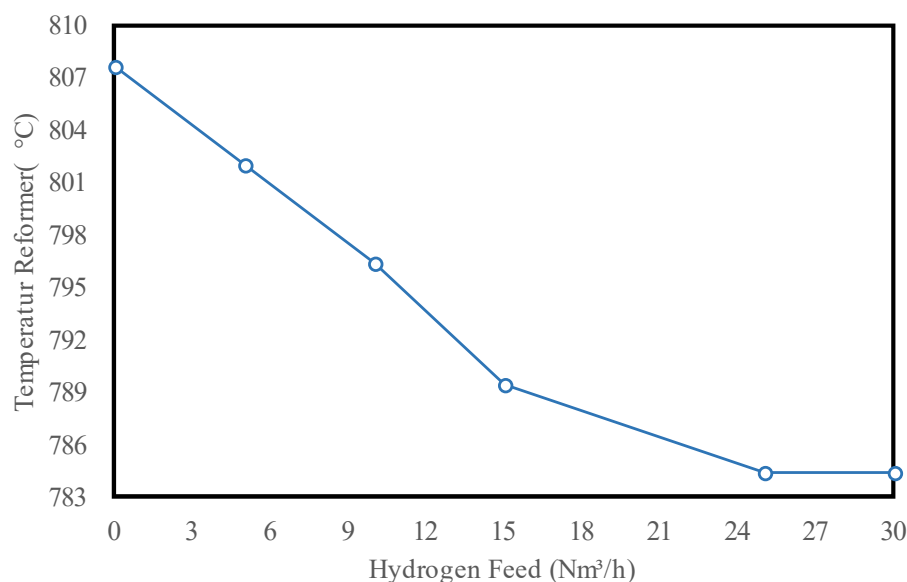
143965,2 Nm³/h. Kesimpulannya, optimasi proses reformasi untuk mencapai efisiensi tinggi melibatkan penambahan H₂ pada umpan, pengaturan temperatur reformer yang tepat, dan kontrol konsumsi bahan bakar secara efisien. Sesuai dengan teori menurut Le Chatelier bahwa penambahan H₂ pada umpan dapat menggeser kesetimbangan reaksi reformasi, meningkatkan konversi metana menjadi hidrogen dengan konsumsi bahan bakar yang lebih besar [13].

B. Pengaruh Penambahan Gas Hidrogen pada Umpan terhadap Stabilitas Proses *Steam Methane Reforming*

Penambahan gas hidrogen ke dalam *feed* memiliki peran yang sangat kompleks dan krusial dalam proses katalitik. Penambahan gas hidrogen memberikan berbagai efek positif yang saling berkaitan dalam sistem reaksi [14]. Dalam aspek pengurangan pembentukan karbon (*carbon formation*), gas hidrogen berperan sebagai agen pembersih permukaan katalis. Ketika molekul hidrokarbon mengalami dekomposisi termal pada permukaan katalis, terdapat kecenderungan pembentukan deposit karbon yang dapat menutupi situs aktif katalis. Kehadiran gas hidrogen dalam jumlah yang cukup akan bereaksi dengan prekursor karbon ini membentuk hidrokarbon yang lebih ringan, mencegah akumulasi karbon pada permukaan katalis. Menurut penelitian E. Furimsky and F. E. Massoth dalam "*Deactivation of hydroprocessing catalyst*", mekanisme ini dikenal sebagai hidrogenolisis, dimana gas hidrogen memutus ikatan C-C yang berpotensi membentuk *coke*, mengubahnya menjadi spesies hidrokarbon yang lebih stabil [15].

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai efek penambahan gas hidrogen ini, beberapa variabel proses yang akan dianalisis meliputi temperatur reformer, pemakaian bahan bakar NG, serta *yield* produk. Berikut disajikan beberapa grafik yang menyajikan data untuk analisis pada berbagai kondisi percobaan.

1. Pengaruh Penambahan Gas Hidrogen Terhadap Stabilitas Proses (*Temperatur Reformer*)



Gambar 5. Pengaruh penambahan gas hidrogen terhadap stabilitas proses (temperatur reformer)

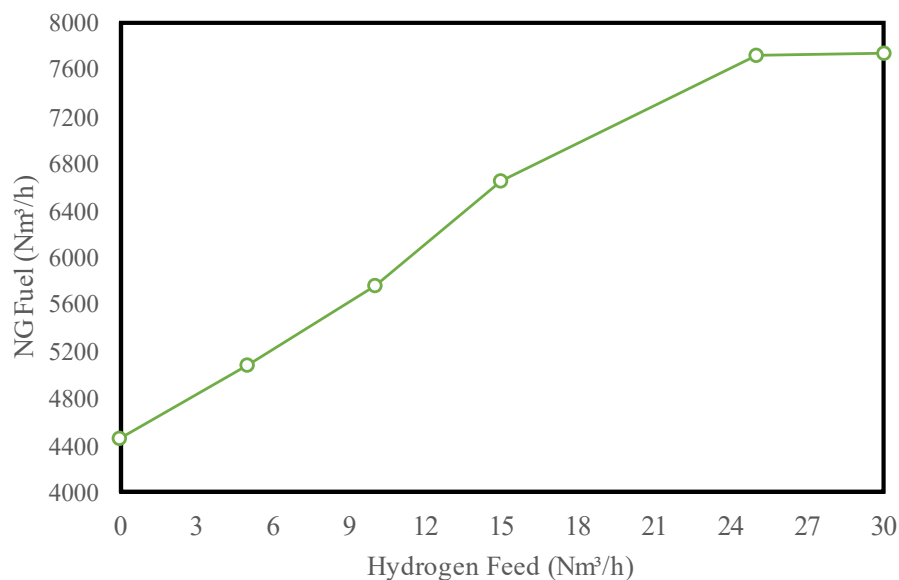
Penambahan gas hidrogen ke dalam *feed natural gas* dapat berpengaruh terhadap pembentukan karbon (*coking*) di dalam reformer dengan cara penurunan pembentukan karbon. Pembentukan karbon (*coking*) di dalam reformer sering terjadi ketika reaksi reforming menghasilkan produk samping yang lebih tidak stabil atau lebih cenderung mengendap, seperti karbon (C) yang terbentuk pada kondisi tertentu. Pembentukan karbon lebih sering terjadi pada hidrokarbon yang lebih berat seperti etana dan propana. Namun, penambahan gas hidrogen dapat mengurangi pembentukan karbon dengan beberapa cara seperti reduksi karbon monoksida, gas hidrogen bertindak sebagai agen pemulihan yang mengurangi karbon monoksida (CO) atau produk samping karbon menjadi hidrogen, yang pada gilirannya mengurangi akumulasi karbon di dalam sistem sehingga membantu menjaga permukaan katalis tetap bersih [16], [17].

Stabilisasi proses terjadi melalui beberapa mekanisme yang saling terkait. Keberadaan gas hidrogen dalam jumlah yang memadai membantu menjaga kesetimbangan reaksi pada kondisi yang diinginkan. Seperti yang terlihat pada gambar 5, penambahan gas hidrogen secara bertahap berpengaruh terhadap temperatur reformer. Pada awalnya, sebelum gas hidrogen masuk kedalam *feed natural gas* temperatur reformer yaitu berkisar pada 808 °C. Kemudian secara perlahan dengan Penambahan gas hidrogen sebanyak 5 Nm³/h – 15 Nm³/h grafik menunjukkan penurunan

temperatur yang cepat. Hal ini menandai bahwa gas hidrogen mulai mengurangi pembentukan karbon. Kemudian lanjut pada penambahan gas hidrogen sebanyak 20 Nm³/h, dari grafik pada fase ini gas hidrogen mulai mempengaruhi mekanisme pembentukan karbon lebih dalam dengan cara menghambat reaksi pembentukan karbon maupun dekomposisi metana. Selanjutnya pada penambahan 25 Nm³/h – 30 Nm³/h terjadi penurunan yang mulai melambat dan mencapai kondisi stabil, ini mengindikasikan sistem telah mencapai kondisi kesetimbangan termal yang baru. Kondisi ini mengindikasikan bahwa proses pembentukan deposit karbon telah diminimalisir.

2. Pengaruh penambahan gas hidrogen terhadap penggunaan bahan bakar NG

Analisa penambahan gas hidrogen terhadap penggunaan bahan bakar NG disajikan pada gambar 6 berikut ini.



Gambar 6. Pengaruh penambahan gas hidrogen terhadap penggunaan bahan bakar NG

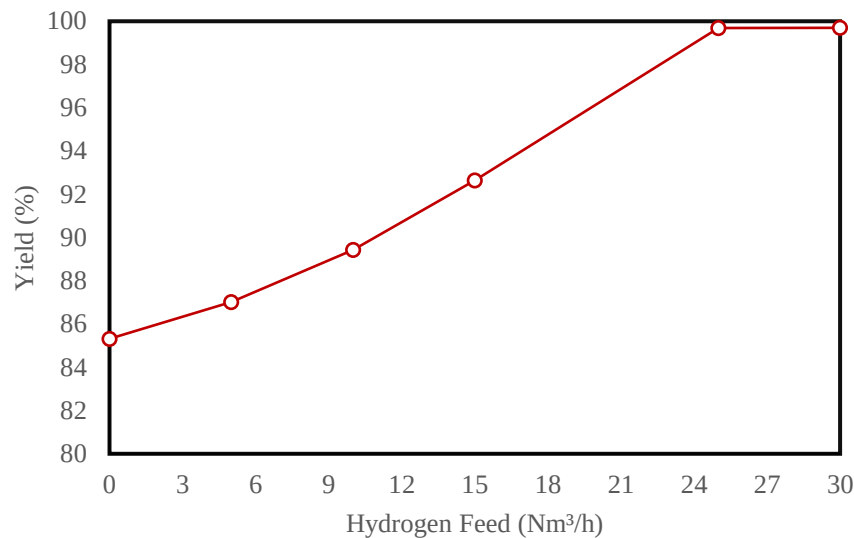
Karbon yang terbentuk di *tube* reformer bertindak sebagai isolator panas, sehingga menghambat transfer panas dari luar *tube* ke dalam *tube*, Akibatnya panas terperangkap di dinding *tube* yang kemudian menyebabkan *hot spot*. *Hot spot* ini menyebabkan pembacaan temperatur tinggi di beberapa titik. Reaksi *cracking* hidrokarbon juga bersifat eksotermis.



Reaksi ini menghasilkan panas tambahan di dalam *tube*. Kontribusi panas dari reaksi ini menambah kenaikan temperatur pada *tube* reformer. Secara otomatis ketika terjadi kenaikan temperatur pada *tube* reformer maka akan menurunkan *supply* bahan bakar. Tindakan ini untuk mencegah *overheating* lebih parah. Dapat dilihat dari gambar 6 bahwa tanpa penambahan gas hidrogen, penggunaan bahan bakar NG untuk *burner* berada di angka rata-rata 4400 Nm³/day, kemudian pada Penambahan gas hidrogen pada 5 Nm³/h – 25 Nm³/h penggunaan bahan bakar NG mulai meningkat hingga pada 7700 Nm³/day yang menunjukkan bahwa penambahan gas hidrogen membantu membersihkan karbon pada *tube* reformer. Setelah karbon berkurang, transfer panas kembali efektif yang pada akhirnya meningkatkan penggunaan bahan bakar dan kembali pada kondisi normal. Pada penambahan gas hidrogen sebanyak 30 Nm³/h tidak lagi memberikan dampak yang berarti pada penggunaan bahan bakar sehingga dari data pada grafik tersebut dapat diketahui bahwa pada penambahan gas hidrogen sebanyak 25 Nm³/h sudah menunjukkan kondisi yang kembali stabil sehingga dapat dikatakan bahwa optimal penambahan gas hidrogen berada pada jumlah penambahan gas H₂ sebanyak 25 Nm³/h. Pada penelitian sebelumnya juga ditemukan konsumsi bahan bakar dalam reformasi uap metana meningkat secara linier dengan penambahan hidrogen pada sistem reformasi, serupa dengan pola grafik ini. Penelitian tersebut juga mencatat bahwa efisiensi termal cenderung tetap stabil jika temperatur reformasi dikontrol dengan baik dalam rentang 700–900°C. Selain itu dinyatakan bahwa konsumsi gas alam meningkat 10–15% untuk setiap peningkatan 10% hidrogen dalam umpan, mendukung pola grafik ini. Namun, disarankan bahwa efisiensi bahan bakar dapat ditingkatkan dengan memanfaatkan panas buang (*waste heat*) dari reformer [11], [18].

3. Pengaruh penambahan gas hidrogen terhadap *yield* produk

Selanjutnya pengaruh penambahan hidrogen % *yield* produk yang dihasilkan seperti yang disajikan pada grafik 7 berikut.



Gambar 7. Pengaruh penambahan gas hidrogen terhadap *yield* produk

Peningkatan produksi hidrogen setelah penambahan gas hidrogen ke *feed* dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme yaitu dimulai dengan pencegahan deaktivasi katalis oleh karbon untuk mempertahankan luas permukaan aktif katalis untuk reaksi. Kemudian distribusi panas yang lebih baik meningkatkan efisiensi reaksi endotermis sehingga akan meningkatkan konversi reaktan yang pada akhirnya akan meningkatkan produk yang dihasilkan. Kestimbangan reaksi yang lebih stabil memungkinkan konversi yang lebih tinggi. Dari gambar 7 diatas dapat dilihat bahwa tanpa Penambahan gas hidrogen *yield* produk hanya berkisar pada angka 85.31%. Kemudian dengan Penambahan gas hidrogen secara bertahap dapat dilihat dari grafik bahwa terjadi kenaikan *yield* produk hingga maksimal mencapai 99.69%. Pada penelitian ini variasi Penambahan gas hidrogen dilakukan dari 0 Nm³/h hingga 30 Nm³/h. Kondisi stabil proses operasi pada penelitian didapat ketika mulai pada Penambahan sebanyak 25 Nm³/h. Dapat dilihat dari grafik bahwa pada penambahan 30 Nm³/h *yield* produk tidak lagi bertambah dikarenakan kondisi pada sistem sudah setimbang.

Keseluruhan efek penambahan gas hidrogen saling terkait dalam satu siklus positif :

1. H₂ mencegah pembentukan karbon → Katalis tetap aktif
2. Katalis aktif → Reaksi berjalan efisien
3. Transfer panas lebih baik → Temperatur lebih seragam
4. Temperatur optimal → Kestimbangan reaksi terjaga
5. Kestimbangan terjaga → Produksi H₂ meningkat

Hasil temuan ini didukung oleh peneliti bahwa rasio hidrogen-karbon yang lebih tinggi dalam umpan mampu mengurangi pembentukan karbon dan meningkatkan *yield* produk hingga lebih dari 90% [19]. Dengan demikian, grafik ini mengkonfirmasi pentingnya peran hidrogen dalam meningkatkan efisiensi reformasi dan menghasilkan *yield* hidrogen yang mendekati sempurna.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan gas hidrogen pada umpan proses *steam methane reforming* memberikan dampak positif terhadap peningkatan *yield* produk. Peningkatan *yield* ini terjadi melalui beberapa mekanisme, termasuk pencegahan deaktivasi katalis dan distribusi panas yang lebih efisien dalam reaktor. Hasil eksperimen menunjukkan peningkatan *yield* yang signifikan dari kondisi awal 85,31% hingga mencapai nilai optimal 99,69% pada penambahan hidrogen sebesar 25-30 Nm³/h. Penambahan gas hidrogen di atas nilai tersebut tidak menunjukkan peningkatan *yield* yang berarti, mengindikasikan tercapainya kondisi setimbang sistem. Penyesuaian parameter temperatur reaktor juga berkontribusi positif terhadap efisiensi proses, terutama dalam mengurangi pembentukan karbon dan menjaga stabilitas reaksi endotermis. Temuan ini membuka peluang untuk penelitian lanjutan mengenai optimasi parameter operasi lainnya untuk meningkatkan efisiensi proses *steam methane reforming* secara keseluruhan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Ecogreen Oleochemicals Batam yang telah memberikan kesempatan dan fasilitas untuk melakukan penelitian di Unit *Hydrogen Plant*. Terima kasih khusus ditujukan kepada tim *Production Fatty Alcohol* EOB3 atas dukungan teknis dan bantuan dalam pengambilan data operasional.

REFERENSI

- [1] I. Dincer and C. Acar, "Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 34, pp. 11094–11111, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>.
- [2] C. H. Bartholomew, "Carbon Deposition in Steam Reforming and Methanation," *Catal. Rev.*, vol. 24, no. 1, pp. 67–112, Jan. 1982, <https://doi.org/10.1080/03602458208079650>.
- [3] M. M. Aba, I. L. Sauer, and N. B. Amado, "Comparative review of hydrogen and electricity as energy carriers for the energy transition," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 57, pp. 660–678, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.034>.
- [4] P. Ferreira-Aparicio, M. J. Benito, and J. L. Sanz, "New Trends in Reforming Technologies: from Hydrogen Industrial Plants to Multifuel Microreformers," *Catal. Rev.*, vol. 47, no. 4, pp. 491–588, Oct. 2005, <https://doi.org/10.1080/01614940500364958>.
- [5] G. Garbarino, F. Pugliese, T. Cavattoni, G. Busca, and P. Costamagna, "A study on CO₂ methanation and steam methane reforming over commercial Ni/calcium aluminate catalysts," *Energies*, vol. 13, no. 11, 2020, <https://doi.org/10.3390/en13112792>.
- [6] K. Aasberg-petersen, C. S. Nielsen, and L. Susanne, "Membrane reforming for hydrogen," vol. 46, 1998.
- [7] W. Taifan and J. Baltrusaitis, "CH₄ conversion to value added products: Potential, limitations and extensions of a single step heterogeneous catalysis," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 198, pp. 525–547, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.05.081>.
- [8] D. Pashchenko and I. Makarov, "Carbon deposition in steam methane reforming over a Ni-based catalyst: Experimental and thermodynamic analysis," *Energy*, vol. 222, p. 119993, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119993>.
- [9] H. Khani, N. Khandan, M. Hassan Eikani, and A. Eliassi, "Production of clean hydrogen fuel on a bifunctional iron catalyst via chemical loop reforming of methanol," *Fuel*, vol. 334, p. 126607, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126607>.
- [10] New York State Energy Research and Development Authority, "Hydrogen Fact Sheet Hydrogen Production – Steam Methane Reforming (SMR)," p. 4, 2004, [Online]. Available: www.nysesda.org.
- [11] J. R. Rostrup-Nielsen and L. J. Christiansen, "Concepts in Syngas Manufacture," 2011, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:137427668>.
- [12] T. Antonini, A. Di Carlo, P. U. Foscolo, K. Gallucci, and S. Stendardo, "Fluidized bed reactor assisted by Oxygen Transport Membranes: Numerical simulation and experimental hydrodynamic study," *Chem. Eng. J.*, vol. 377, p. 120323, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.021>.
- [13] E. Science and H. Sharma, "Tri-Reforming Of Natural Gas For Hydrogen Production Submitted on partial fulfilment of the requirement for the award of degree of Masters in Technology in Environment Science & Technology Himanshu Sharma," no. June, 2018, [doi: 10.13140/RG.2.2.32514.09921](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32514.09921).
- [14] B. Iswanto, W. Astono, and Y. Rezi, "Pengaruh Penambahan Gas Hidrogen Terhadap Peningkatan Gas Metan (CH₄) Pada Proses Dekomposisi Sampah Organik," *Indones. J. Urban Environ. Technol.*, vol. 8, no. 1, p. 97, 2016, [doi: 10.25105/urbanenvirotech.v8i1.723](https://doi.org/10.25105/urbanenvirotech.v8i1.723).
- [15] E. Furimsky and F. E. Massoth, "Deactivation of hydroprocessing catalysts," vol. 52, 1999.
- [16] R. S. Postma and L. Lefferts, "Effect of Hydrogen Addition on Coke Formation and Product Distribution in Catalytic Coupling of Methane," *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2024, [doi: 10.1021/acs.iecr.4c00381](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c00381).
- [17] C. Agrafiotis, H. Von Storch, M. Roeb, and C. Sattler, "Solar thermal reforming of methane feedstocks for hydrogen and syngas production - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 656–682, 2014, [doi: 10.1016/j.rser.2013.08.050](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.050).
- [18] T. M. Rizki, M. I. Yusuf, A. Hiendro, K. . Kwee, and Yandri, "Analisis Konsumsi Bahan Bakar Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (Pltu) (Studi Kasus Pltu Harjohn Timber Kubu Raya)," *Tek. Elektro*, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26418/j3eit.v9i2.48816>.
- [19] J. J. H. B. Sattler, J. Ruiz-Martinez, E. Santillan-Jimenez, and B. M. Weckhuysen, "Catalytic Dehydrogenation of Light Alkanes on Metals and Metal Oxides," *Chem. Rev.*, vol. 114, no. 20, pp. 10613–10653, Oct. 2014, [doi: 10.1021/cr5002436](https://doi.org/10.1021/cr5002436).