



Studi Pengaruh Suhu dan Tekanan Terhadap Keseimbangan Termodinamika Dalam Proses Steam Reforming Dalam Reaksi Gas Alam

Study of the Effect of Temperature and Pressure on Thermodynamic Balance in the Steam Reforming Process in Natural Gas Reactions

Adelyna Oktavia Nasution^{1*}, Dian Namira², Nurul Hizlin³, Rabiatul Awiyah⁴, Ramina Azmi Ritonga⁵, Tiara Azura⁶

¹⁻⁶Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Indonesia

*Corresponding Author: E-mail: adelyna110000198@uinsu.ac.id

Artikel Penelitian

Article History:

Received: 15 Jan, 2025

Revised: 09 Mar, 2025

Accepted: 15 Mar, 2025

Kata Kunci:

Steam Reforming, Gas Alam, Kesetimbangan Termodinamika, Katalis Nio, Reformasi Metana, Hidrogen, Prinsip Le Châtelier, Persamaan Van't Hoff.

Keywords:

Steam Reforming, Natural Gas, Thermodynamic Equilibrium, Nio Catalyst, Methane Reforming, Hydrogen, Le Châtelier's Principle, Van't Hoff Equation

DOI: [10.56338/jks.v8i3.6882](https://doi.org/10.56338/jks.v8i3.6882)

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi pengaruh suhu dan tekanan terhadap kesetimbangan termodinamika dalam proses steam reforming pada reaksi gas alam. Proses ini penting dalam produksi hidrogen melalui reformasi metana dan uap pada kondisi suhu dan tekanan tinggi, menggunakan katalis NiO. Reaksi kimia yang terjadi meliputi reaksi eksotermis dan endotermis yang dipengaruhi oleh perubahan entalpi dan tekanan. Prinsip Le Châtelier digunakan untuk memprediksi pergeseran posisi kesetimbangan akibat perubahan kondisi sistem. Penelitian ini mengonfirmasi bahwa suhu dan tekanan secara signifikan memengaruhi hasil produk dan laju reaksi pada proses reformasi gas alam. Melalui analisis termodinamika menggunakan persamaan Van't Hoff, perubahan entalpi reaksi dihitung untuk memberikan wawasan lebih dalam tentang efisiensi produksi hidrogen dalam reaksi shift dua tahap. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan metode produksi hidrogen yang lebih efisien dengan memaksimalkan pemanfaatan energi dan sumber daya.

ABSTRACT

This study aims to explore the effect of temperature and pressure on thermodynamic equilibrium in the steam reforming process of natural gas. This process is essential for hydrogen production through methane and steam reforming under high temperature and pressure conditions, using NiO catalysts. The chemical reactions involved include both exothermic and endothermic reactions, influenced by changes in enthalpy and pressure. Le Châtelier's principle is used to predict the shifts in equilibrium position due to changes in the system's conditions. The study confirms that temperature and pressure significantly affect product yield and reaction rates in natural gas reforming. Thermodynamic analysis using the Van't Hoff equation was employed to calculate the reaction enthalpy changes, providing deeper insights into the efficiency of hydrogen production in the two-stage shift reaction. The findings are expected to serve as a reference for developing more efficient hydrogen production methods by maximizing energy and resource utilization.

PENDAHULUAN

Menurut para ahli, termodinamika merupakan cabang ilmu yang mempelajari prinsip-prinsip yang mengatur peralihan energi dari satu bentuk ke bentuk lainnya, termasuk aliran energi dan kemampuannya dalam melakukan kerja. Cabang ilmu fisika yang dikenal sebagai termodinamika

menyelidiki bagaimana energi panas dan usaha berinteraksi satu sama lain (Tanamar1 dkk., 2024).

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK) sedang berusaha untuk menggunakan dan memanfaatkan energi untuk memenuhi kebutuhan hidup masyarakat, seperti pemanasan dan pendinginan (Fatiatun dkk., 2022). Termodinamika juga mencakup kajian mengenai sistem dalam kondisi kesetimbangan, yang dapat digunakan untuk menentukan jumlah energi yang diperlukan untuk mengubah sistem dari satu kondisi kesetimbangan ke kondisi lainnya (Desa Warnana, 2007). Dalam ilmu termodinamika, terdapat dua kondisi utama yang dikenal, yaitu kesetimbangan termodinamika yang bersifat reversibel dan kondisi termodinamika tidak setimbang yang bersifat irreversibel (Suhartono, 2000). Terlepas dari fakta bahwa ada banyak proses reversible, proses reversible adalah kasus terbatas di mana irreversibilitas internal maupun eksternal terus-menerus dikurangi (Kirom dkk., 2021). Sedangkan, proses inversible adalah kebalikan dari proses reversible (Syaka, 2020).

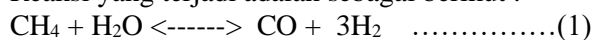
Kesetimbangan termodinamika adalah kondisi di mana suatu sistem stabil dan tidak mengalami perubahan seiring waktu, ditandai oleh kuantitas fisik seperti suhu, tekanan, dan volume yang berfungsi sebagai fungsi keadaan. Ini mencakup kesetimbangan termal, di mana dua benda memiliki suhu yang sama setelah aliran panas berhenti, dan kesetimbangan mekanis, di mana tekanan di seluruh bagian sistem sama tanpa adanya gaya eksternal (Chen, 2022). Menurut Ralph H, hukum ini menyatakan bahwa dua benda berada dalam keadaan kesetimbangan panas jika tidak ada perpindahan kalor di antara keduanya ketika saling bersentuhan. Keadaan ini hanya bisa tercapai jika suhu kedua benda tersebut sama, karena perpindahan kalor terjadi akibat adanya perbedaan suhu. Prinsip ini menjadi inti dari hukum ke nol termodinamika yang berkaitan dengan kesetimbangan panas. Sedangkan Julius Robert Mayer menyatakan tentang energi dalam suatu sistem yang dikenal sebagai Hukum Kekekalan Energi (Desa Warnana, 2007). Menurut hukum kekekalan energi (HKE), energi tidak dapat dibuat atau dimusnahkan; satu-satunya cara untuk menghasilkannya adalah dengan mengubahnya ke bentuk energi lain (Jati, 2018).

Menurut Lukman H, Termodinamika menyelidiki energi, bagaimana ia berubah, dan bagaimana perubahan ini berhubungan dengan berbagai sifat sistem. Konsep energi sangat penting untuk semua bidang penelitian, terutama dalam ilmu alam. Termodinamika adalah bahasa internasional yang digunakan oleh peneliti dari berbagai bidang untuk berbicara tentang energi dan transformasinya (Masruroh, 2021). Dalam bidang termodinamika, ilmuwan memanfaatkannya untuk memprediksi dan menghubungkan berbagai sifat zat yang dipengaruhi oleh kalor, serta untuk mengembangkan data termodinamika. Termodinamika menjelaskan keadaan kesetimbangan sistem melalui besaran fisika tertentu yang dikenal sebagai koordinat sistem atau variabel keadaan system (Lukman Hakim, 2023). Kimia adalah bidang ilmu yang mempelajari materi, bagaimana ia berubah, dan energi yang berkontribusi pada perubahan tersebut. Termodinamika adalah sepertiga dari kimia. Dalam bidang kimia, termodinamika adalah cabang penting. Ini disebabkan oleh fakta bahwa itu memungkinkan kimiawan untuk menganalisis secara menyeluruh kesetimbangan sistem kimia. Dalam rekayasa kimia, termodinamika digunakan untuk memprediksi komposisi kesetimbangan reaktor kimia, menentukan suhu dan tekanan yang mengoptimalkan produksi reaksi kimia, dan menghitung besaran kuantitatif untuk kondisi yang tidak ideal (Masruroh, 2021). Hukum ke-nol termodinamika secara sederhana menjelaskan bahwa sistem-sistem suhunya akan sama dengan suhu yang berada dalam kesetimbangan termal. Artinya, jika suatu sistem berada dalam kesetimbangan termal, tidak akan terjadi perpindahan panas. Sebagai ilustrasi, bayangkan terdapat dua gelas air, satu berisi air panas dan yang lainnya berisi air dingin. Ketika keduanya dibiarkan di meja selama beberapa jam, suhu keduanya akan menyesuaikan hingga mencapai kesetimbangan termal dengan suhu ruangan (wulandari dkk., 2020).

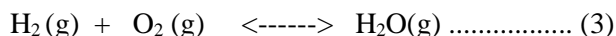
Gas alam adalah salah satu sumber energi dari alam yang banyak dimanfaatkan. Digunakan sebagai sumber energi atau sebagai bahan baku untuk berbagai proses produksi kimia, seperti sebagai bahan bakar boiler dan reformer. sumber amoniak, metanol, dan bahan kimia lainnya. Komponen gas alam adalah sebagai berikut: Selain metana (CH_4), ada hidrokarbon ringan lain yang terbentuk secara alami. Beberapa senyawa yang tidak bersifat hidrokarbon juga tercampur di dalamnya.

1) Komponen	2) (%) mol
3) Metana	4) 87.0 – 96.0
5) Etana	6) 1.8 – 5.1
7) Propana	0.11.5
8) Iso-butana	9) 0.01 – 0.3
10) n-butana	11) 0.01 – 0.3
12) Iso-pentana	13) trace – 0.14
14) n-pentana	15) trace – 0.04
16) Heksana dan yang lebih tinggi	17) trace – 0.016
18) Nitrogen	19) 1.3 – 5.6
20) Karbondioksida	0.11.0
21) Oksigen	22) 0.01 – 0.1
23) Hidrogen	24) trace – 0.02
25) Mercaptan	²⁶⁾ 4.9 mg/m ³
27) Air	²⁸⁾ 16 – 32 mg/m ³
29) Hidrogen sulfida	30) 4 ppmv
³¹⁾ HHV kering, MJ/m ³	32) 36.0 – 40.2

Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut :



Untuk menyempurnakan reaksi di reformer primer, suatu reformer sekunder dibutuhkan. Gas hidrogen direaksikan dengan oksigen untuk menghasilkan uap panas yang dikenal sebagai eksotermis. Berikut adalah hasilnya:



Tekanannya 35 kg/cm², suhu berkisar antara 520 hingga 560 °C pada masukan hingga 920 hingga 1050 °C pada aliran keluar. Reaksi 1 dan 2 identik dengan reaksi reformer sekunder. Hidrogen terbentuk ketika gas alam (metana) dan air bereaksi pada suhu tinggi selama proses konversi uap. Gas alam adalah bahan bakar fosil. Sebagian besar terdiri dari molekul hidrokarbon rantai pendek dan ringan seperti metana (CH₄). Selain itu, molekul hidrokarbon yang lebih besar seperti propana (C₃H₈), butana (C₄H₁₀), dan etana (C₂H₆). Tabel 1 menunjukkan komposisi gas alam. Karena kualitas gas alam yang diperlukan sebagai umpan, pengolahan awal, atau pengolahan umpan, diperlukan sebelum proses reforming menjadi synthetis gas alam. Untuk memulai, fase cair dari reaksi dikeluarkan. Setelah itu, metode desulfurisasi digunakan untuk mengeluarkan sulfur dari gas alam, baik anorganik maupun organik, hingga 0,1 bagian per juta. Proses reforming dilakukan pada suhu masuk reformer primer antara 530–650 °C, suhu keluar antara 770–811 °C, dan tekanan 35–40 kg/cm₂ (Alimah dkk., 2015). Setelah munculnya minyak sebagai sumber energi yang signifikan berkurang di Indonesia, gas alam sekarang digunakan untuk industri, bukan hanya untuk rumah tangga dan transportasi. Gas alam merupakan sumber daya alam terbesar ketiga di dunia setelah batu bara dan minyak bumi, dan selalu terbakar saat diproduksi bersama keduanya. Penyebab utama penurunan tingkat polusi adalah komitmen pemerintah terhadap Mechanism Pembangunan Hijau Protokol Kyoto dan tingkat polusi yang lebih rendah [8].

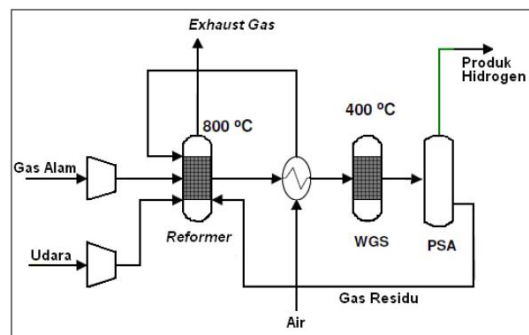
METODE

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan metode literatur dan simulasi untuk menganalisis pengaruh suhu, tekanan, dan rasio steam terhadap keseimbangan termodinamika dalam proses *reformasi steam* gas alam. Metode literatur diterapkan dengan melakukan kajian terhadap berbagai sumber ilmiah, seperti jurnal, artikel, dan buku teks yang membahas teori dasar serta aplikasi praktis dari reaksi reformasi steam. Fokus kajian literatur tertuju pada prinsip-prinsip termodinamika yang relevan, termasuk prinsip *Le Chatelier*, yang menjelaskan bagaimana variabel suhu dan tekanan memengaruhi keseimbangan reaksi. Proses reformasi steam disimulasikan menggunakan model reaktor satu dimensi *pseudo-homogen*, yang mempertimbangkan keseimbangan massa dan energi pada reaktor bed tetap. Parameter utama seperti suhu, tekanan, dan rasio steam terhadap karbon dimodifikasi dalam rentang yang luas (tekanan 5-30 atm, suhu 454-927°C) untuk menilai dampaknya terhadap konversi CH_4 .

HASIL

Steam Reforming Gas Alam Proses Konvensional

Teknik yang paling populer dan mapan untuk steam reforming gas alam adalah pendekatan tradisional. Proses ini diperkirakan menghasilkan hampir 85% hidrogen yang diproduksi di seluruh dunia. Dua reaksi utama dalam proses ini adalah reaksi pergeseran gas air, yang melepaskan sedikit energi (eksotermik), dan reaksi reforming, yang menggunakan banyak energi (endotermik).



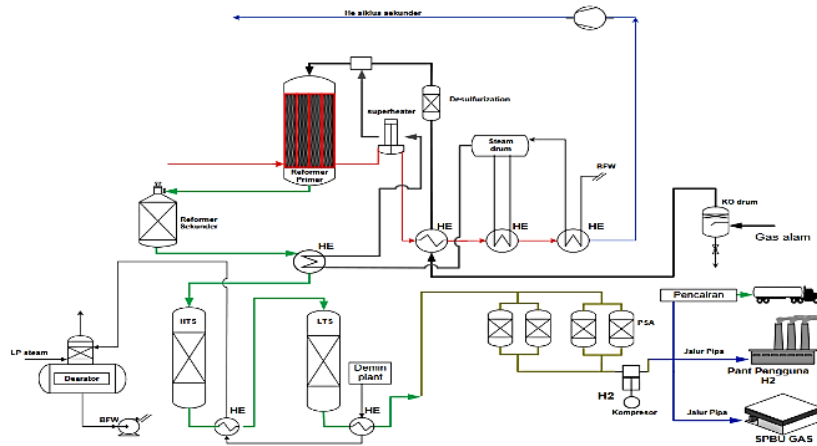
Gambar 1. Diagram Alir Proses Steam Reforming Gas Alam

Pada sistem konvensional, produksi hidrogen berlangsung dalam memanfaatkan katalis berbasis nikel dalam unit reforming pada suhu sekitar 850–900°C dan tekanan 2-3 MPa. Reaktor khusus untuk reaksi pergeseran gas air disertakan dalam beberapa desain reaktor, yang bertujuan meningkatkan kadar hidrogen dalam produk akhir. Selain itu, sejumlah teknologi telah mengintegrasikan unit pre-reformer, yang berperan dalam menjalankan sebagian proses reforming sekaligus mengonversi senyawa alkana dengan lebih dari dua atom karbon menjadi metana. Campuran hasil dari pre-reformer kemudian dialirkan kembali ke unit reformer utama untuk menyelesaikan proses reforming yang belum sempurna. Penggunaan pre-reformer memungkinkan pemanfaatan bahan baku alternatif selain gas alam, seperti berbagai hidrokarbon yang berasal dari minyak bumi. Selain itu, pre-reformer membantu mengurangi kebutuhan energi panas selama prosedur reforming dan mengurangi jumlah gas alam yang terbuang, karena daur ulang menggunakan lebih banyak energi dan menurunkan efisiensi termal. Gambar 1 menunjukkan diagram alir untuk memproduksi hidrogen menggunakan proses steam reforming gas alam [9].

Produksi hidrogen dengan steam reforming

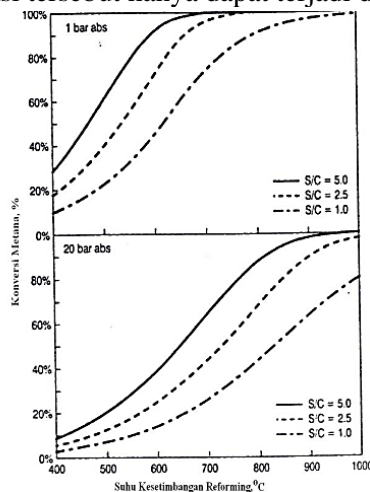
Memang, suhu tinggi diperlukan untuk mempercepat reaksi, tetapi reaksi yang menghasilkan produk terjadi pada suhu rendah. Masalah ini diatasi dengan penerapan reaksi shift dalam dua tahap, yaitu High Temperature Shift (HTS) pada suhu sekitar 350°C menggunakan katalis Fe_3O_4 dan Low

Temperature Shift (LTS) pada suhu 190-210°C menggunakan katalis Cu, ZnO, dan Al. Reaksi tersebut masih jauh dari kondisi kesetimbangan kimia pada tahap HTS, tetapi semakin mendekatinya pada tahap LTS. Penurunan suhu pada tahap ini mendorong reaksi bergeser ke kanan, menghasilkan H₂ dalam jumlah lebih besar. Meskipun demikian, selain H₂ dengan kadar tinggi, produk juga mengandung sejumlah kontaminan seperti CO₂, H₂O, sisa metana, sedikit CO, dan nitrogen, sehingga proses pemurnian menjadi langkah yang diperlukan. Gambar 2 menunjukkan diagram alir untuk memproduksi hidrogen menggunakan proses steam reforming gas alam.



Gambar 2. Diagram Alir Proses Produksi Hidrogen Dengan Steam Reforming Gas Alam

Gambar 2 menunjukkan bahwa pemanas untuk reformer primer menggunakan helium panas yang dihasilkan oleh reaktor suhu tinggi pembangkit listrik tenaga nuklir. Termodinamika reaksi steam reforming metana menjadi CO dan H₂ (reaksi 3) dan pergeseran reaksi yang menghasilkan CO₂ dan H₂ (reaksi 4) menentukan kondisi reaksi dalam produksi hidrogen dari metana. Menurut hukum termodinamika, reaksi kimia dapat terjadi dengan sendirinya jika energi bebasnya negatif. Di sisi lain, jika energi bebas reaksi positif, reaksi tersebut hanya dapat terjadi dengan energi eksternal.



Gambar 3. Konversi Metana Pada Berbagai Suhu

Karakteristik Responden Menurut Siti Alimah (2010), reaksi reforming secara termodinamika dipengaruhi oleh berbagai parameter yang membatasi tingkat konversi metana. Gambar 2 menunjukkan bahwa metana yang tidak berhasil dikonversi biasanya dibuang atau dialirkan kembali ke unit reformer

melalui unit PSA. Dalam praktiknya, bagian metana kurang dari 2,5 persen dari keseluruhan volume tidak bereaksi. Dengan rasio uap terhadap karbon yang rendah, suhu tinggi, dan proses endotermik yang melibatkan interaksi karbon dan uap air, reaksi reforming biasanya digunakan dalam instalasi hidrogen. Akan ada lebih sedikit pergerakan massa melalui sistem jika rasio uap terhadap karbon kurang dari 2,5. Selanjutnya, penggunaan energi meningkat secara keseluruhan (Alimah dkk., 2015).

PEMBAHASAN

Prinsip Le Chatelier menjelaskan bagaimana suatu sistem dalam keadaan kesetimbangan akan merespons perubahan untuk memulihkan kembali kesetimbangannya. Faktor utama yang memengaruhi kesetimbangan reaksi mencakup perubahan suhu, tekanan, dan penambahan atau pengurangan reaktan dan produk. Pada reaksi endotermis (reaksi yang menyerap panas dengan ΔH positif), kenaikan temperatur menyebabkan sistem bergerak ke arah pembentukan lebih banyak produk, karena energi panas tambahan dimanfaatkan untuk mendukung jalannya reaksi ke arah kanan. Sebaliknya, pada reaksi eksotermis (reaksi yang melepaskan panas dengan ΔH negatif), penurunan temperatur akan meningkatkan jumlah produk karena energi panas yang dilepaskan oleh reaksi mendukung kesetimbangan ke arah kanan. Faktor lain yang memengaruhi kesetimbangan adalah tekanan, terutama pada campuran gas. Perubahan tekanan tidak terlalu berpengaruh pada reaksi dalam larutan atau padatan, karena kedua fase ini relatif tidak terkompresi. Namun, dalam campuran gas, perubahan tekanan dapat memengaruhi jumlah mol gas yang dihasilkan pada kesetimbangan. Ketika tekanan dinaikkan, misalnya dengan mengecilkan volume sistem, reaksi akan bergeser ke arah yang menghasilkan jumlah mol gas lebih sedikit untuk mengurangi tekanan. Sebaliknya, penurunan tekanan mendorong reaksi ke arah yang menghasilkan lebih banyak mol gas. Selain itu, penambahan pereaksi atau pengurangan produk menyebabkan sistem bergerak ke arah kanan, menghasilkan lebih banyak produk untuk menyeimbangkan konsentrasi. Sebaliknya, pengurangan pereaksi atau penambahan produk akan mendorong reaksi ke arah kiri untuk meningkatkan jumlah pereaksi hingga mencapai kesetimbangan baru (Hidayana, 2010). Dalam konteks gas, molekul-molekulnya bergerak secara acak dan konstan dengan kecepatan yang meningkat seiring kenaikan suhu. Molekul-molekul ini saling terpisah oleh jarak yang cukup jauh, kecuali saat terjadi tabrakan. Sifat inilah yang membuat gas mampu mengisi seluruh ruang wadah secara merata (Prof. Dr. Mukhamad Nurhadi, 2021).

Prinsip-prinsip ini sangat relevan dalam berbagai aplikasi kimia, salah satunya adalah produksi hidrogen melalui proses steam reforming. Metode ini melibatkan reaksi kimia kompleks yang bertujuan mengonversi metana dan uap air menjadi hidrogen. Proses ini biasanya berlangsung dalam dua tahap utama, yaitu dua jenis pergeseran suhu adalah tinggi (HTS) dan rendah (LTS).

Pada tahap HTS, reaksi berlangsung pada suhu tinggi sekitar 350°C dengan menggunakan katalis Fe_3O_4 . Tahap ini dirancang untuk memulai konversi awal, tetapi reaksi belum mencapai kesetimbangan kimia sepenuhnya, sehingga hasil hidrogen masih dapat ditingkatkan. Reaksi kemudian berlanjut ke tahap LTS, di mana suhu diturunkan menjadi $190\text{-}210^{\circ}\text{C}$ dengan bantuan katalis berbasis Cu, ZnO, dan Al. Penurunan suhu ini memiliki tujuan penting, yaitu menggeser kesetimbangan reaksi ke arah pembentukan hidrogen yang lebih besar, sesuai dengan prinsip Le Chatelier. Dengan demikian, kedua tahap ini dirancang untuk mengoptimalkan hasil hidrogen dalam kondisi yang sesuai dengan sifat termodinamika reaksi.

Setelah kedua tahap ini, hasil produk tidak hanya berupa hidrogen, tetapi juga mengandung sejumlah kontaminan seperti CO_2 , H_2O , beberapa CO dan nitrogen, dan sisa metana. Untuk memastikan bahwa hidrogen yang diproduksi memenuhi standar kualitas yang diperlukan, pengotor ini harus dihilangkan melalui prosedur pemurnian. Oleh karena itu, penting untuk merancang sistem pemurnian yang efisien. Dari sudut pandang termodinamika, reaksi kimia akan berlangsung secara spontan jika energi bebasnya bernilai negatif. Sebaliknya, jika energi bebasnya positif, diperlukan energi tambahan untuk mendorong reaksi tersebut. Dalam konteks steam reforming, beberapa faktor seperti suhu, tekanan, dan rasio antara uap dan karbon mempengaruhi seberapa banyak metana yang

dapat dikonversi. Penelitian yang dilakukan oleh Siti Alimah (2010) menunjukkan bahwa pengaturan parameter-parameter ini dapat meningkatkan efisiensi reaksi dan mengurangi jumlah metana yang tidak terkonversi. Rasio uap terhadap karbon sangat penting dalam proses ini. Jika rasio ini terlalu rendah (kurang dari 2,5), karena aliran massa yang lebih sedikit akan dibutuhkan, ukuran peralatan dan pengeluaran awal dapat dikurangi. Namun, hal ini juga berpotensi mengurangi tingkat konversi metana. Di sisi lain, jika suhu ditingkatkan hingga 920°C pada rasio uap-karbon yang rendah, konversi metana dapat meningkat secara signifikan. Ini menunjukkan adanya trade-off antara efisiensi produksi dan kebutuhan energi (Alimah dkk., 2010).

KESIMPULAN

Pengaruh suhu dan tekanan terhadap kesetimbangan termodinamika dalam proses steam reforming gas alam, yang merupakan metode utama untuk produksi hidrogen. Proses ini memerlukan suhu dan tekanan tinggi, dengan bantuan katalis nikel oksida (NiO), untuk mengubah metana dan uap air menjadi hidrogen dan karbon monoksida, yang kemudian dapat direaksikan lebih lanjut menghasilkan karbon dioksida dan hidrogen. Penelitian ini mengidentifikasi dua tahap penting, yaitu reaksi utama steam proses pergeseran gas air yang agak eksotermik dan reformasi yang sangat endotermik. Prinsip Le Châtelier digunakan untuk memahami bagaimana perubahan suhu dan tekanan mempengaruhi kesetimbangan reaksi. Untuk reaksi endotermis, peningkatan suhu akan meningkatkan jumlah produk, sementara untuk reaksi eksotermis, penurunan suhu akan meningkatkan hasil produk. Analisis termodinamika dengan persamaan Van't Hoff membantu menghitung perubahan entalpi dan menilai efisiensi produksi hidrogen pada berbagai kondisi reaksi. Penelitian ini menunjukkan bahwa pengaturan optimal suhu, tekanan, dan rasio uap terhadap karbon dapat meningkatkan konversi metana menjadi hidrogen, mengurangi metana yang tidak terkonversi, dan meminimalkan konsumsi energi. Dengan melalui proses yang lebih efisien, produksi hidrogen dapat dimaksimalkan untuk memenuhi kebutuhan bahan baku dan energi yang lebih ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alimah, S., Hoesen, D., Pusat, S., Sistem, K., Nuklir, E., Pksen)-Batan, (, Kuningan Barat, J., Prapatan, M., Selatan, J., & Diterima, D. (2015). ANALISIS PASOKAN PANAS PADA PRODUKSI HIDROGEN PROSES STEAM REFORMING KONVENSIONAL DAN NUKLIR. Dalam Jurnal Pengembangan Energi Nuklir (Vol. 17, Nomor 1).
- Alimah, S., Tenaga, B., & Nasional, N. (2010). ASPEK TERMODINAMIKA PRODUKSI HIDROGEN DENGAN PROSES STEAM REFORMING GAS ALAM. <https://www.researchgate.net/publication/282388350>
- Chen, L.-Q. (2022). Thermodynamic Equilibrium and Stability of Materials. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8691-6>
- Desa Warnana, D. (2007). Kesetimbangan Termal dan Hukum ke Nol Termodinamika.
- Fatiatun, F., Pratiwi, A. D., Wirdati, A. C., Avifatun, N., Fisika, P. P., Tarbiyah, I., Keguruan, D., & Artikel, R. (2022). PENERAPAN TERMODINAMIKA HEATING DAN COLLING PADA DISPENSER INFO ARTIKEL ABSTRAK. Jurnal Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat UNSIQ, 9(2), 146–150.
- Hudayana. (2010). Studi Pengaruh Katalis Rhodium terhadap Perengkahan Hidrokarbon Berat Menjadi Metana pada Pre-Reformer Untuk Meningkatkan Produksi Syngas di PT Pusri II*) 1 Desi.
- Jati, B. M. E. (2018). Pengantar Fisika 1. Gajah Mada Universitas.
- Kirom, M. R., Tri Ayodha Ajiwiguna, & Amaliyah Rohsari Indah Utami. (2021). Termodinamika Teknik. Syiah Kuala University Press.
- Lukman Hakim. (2023). Termodinamika Kimia. Universitas Brawijaya Press.
- Masruroh, L. N. I. (2021). Termodinamika: Tinjauan Sains dan Rekayasa. Universitas Brawijaya Press.

- Prof. Dr. Mukhamad Nurhadi, M. S. (2021). Gas dan Termodinamika. Media Nusa Creative (MNC Publishing).
- Suhartono, E. (2000). THE MULTIELECTRODES OSCILLATION SYSTEM STUDIED BY IRREVERSIBLE THERMODYNAMICS Sistem Osilasi Multielektroda Ditinjau Secara Termodinamika Irreversibel. Dalam Journal of Chemistr.
- Syaka, D. R. B. dan R. (2020). PENGANTAR TERMODINADIMA Untuk Siklus Tenaga. UNJ Press.
- Tanamar¹, S. A., Andini², A. I., Alatas, F., Fisika, P., Tarbiyah, I., Keguruan, D., Islam, U., Syarif, N., & Jakarta, H. (2024). Eksplorasi Miskonsepsi Siswa Terhadap Hukum Kedua Termodinamika : Pendekatan Studi Literatur. Seminar Nasioanl FITK UIN Jakarta, 1(1).
- wulandari, dewi, roza, destria, rungkit, muhammad aswin, tanjung, yul ifda, ramadhani, irham, raiham, muhammad fadlan, abrori, sysaugi abdurrahman, & irmaniar. (2020). FISIKA DASAR BERBASIS STEM UNTUK MAHASISWA KIMIA (PENERBIT MEDIA SAINS INDONESIA, Penerj.).