



INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research

Volume 4 Nomor 5 Tahun 2024 Page 1920-1928

E-ISSN 2807-4238 and P-ISSN 2807-4246

Website: <https://j-innovative.org/index.php/Innovative>

Pengembangan Packed Flow Reactor Tipe Fixed Bed untuk Meningkatkan Efisiensi Metanasi CO₂ Menggunakan Katalis Nikel

Apriyansah^{1✉}, Muhammad Yerizam², Abu Hasan³

Politeknik Negeri Sriwijaya,

Email: Ancaapriansyah48@gmail.com^{1✉}

Abstrak

Peningkatan emisi karbon dioksida (CO₂) akibat aktivitas manusia menimbulkan tantangan besar terhadap perubahan iklim. Metanasi CO₂, proses konversi CO₂ menjadi metana (CH₄), merupakan solusi potensial untuk mengurangi jejak karbon dan menghasilkan bahan bakar yang berguna. Penelitian ini fokus pada pengembangan packed flow reactor tipe fixed bed berbahan stainless steel, dengan kapasitas ±2 liter, untuk meningkatkan efisiensi metanasi CO₂. Katalis nikel (Ni) dipilih karena biaya yang relatif rendah dan efisiensinya yang baik. Eksperimen dilakukan pada suhu hingga 400°C untuk mengoptimalkan produksi CH₄. Hasilnya menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi meningkatkan produksi metana, dengan suhu optimal 100°C menghasilkan CH₄ sebesar 39,41%. Laju alir CO₂ yang rendah juga meningkatkan produksi CH₄ karena waktu kontak yang lebih lama. Peningkatan suhu mengurangi sisa gas CO₂, dan jumlah sisi aktif pada katalis berpengaruh terhadap penurunan sisa gas CO₂.

Kata Kunci: *Metanasi CO₂, Katalis Nikel, Gas Metana, dan Temperatur Reaksi.*

Abstract

The increase in carbon dioxide (CO₂) emissions due to human activities poses a significant challenge to climate change. CO₂ methanation, the process of converting CO₂ into methane (CH₄), offers a potential solution for reducing carbon footprints and producing useful fuel. This study focuses on developing a fixed bed packed flow reactor made of stainless steel, with a capacity of ±2 liters, to enhance CO₂ methanation efficiency. Nickel (Ni) catalysts were selected due to their relatively low cost and good performance. Experiments were conducted at temperatures up to 400°C to optimize CH₄ production. The results show that higher temperatures increase methane production, with an optimal temperature of 100°C resulting in 39.41% CH₄. Lower CO₂ flow rates also increase CH₄ production due to longer contact times. Higher temperatures reduce residual CO₂, and the amount of active sites on the catalyst affects the reduction of residual CO₂.

Keyword: *CO₂ Methanation, Nickel Catalyst, Methane Gas, and Reaction Temperature.*

PENDAHULUAN

Perubahan iklim yang semakin mendesak adalah hasil dari meningkatnya emisi gas rumah kaca, terutama karbon dioksida (CO₂). Aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, dan kegiatan industri terus-menerus meningkatkan konsentrasi CO₂, yang sebagian besar berasal dari sektor listrik (42%), transportasi (23%), dan perumahan (6%). Kenaikan emisi CO₂ ini berbanding lurus dengan peningkatan konsumsi energi, menandakan perlunya solusi mitigasi yang lebih efektif.

Salah satu metode inovatif untuk mengurangi emisi CO₂ adalah konversi CO₂ menjadi metana (CH₄) melalui proses metanisasi CO₂. Proses ini tidak hanya mengurangi CO₂ tetapi juga menghasilkan bahan bakar yang berguna. Metanisasi, yang ditemukan oleh Paul Sabatier pada tahun 1902, melibatkan reaksi eksotermis antara hidrogen (H₂) dan CO₂ untuk membentuk CH₄ dan air. Meskipun reaksi ini secara termodinamika menguntungkan pada suhu rendah (25°C hingga 400°C), tantangan kinetik pada skala industri memerlukan pengembangan katalis dan reaktor yang lebih efisien.

Nikel (Ni) sering dipilih sebagai katalis untuk metanisasi CO₂ karena biaya yang relatif rendah dibandingkan dengan logam seperti rutenium (Ru) dan rodium (Rh). Katalis Ni terbukti efektif dengan stabilitas yang baik selama reaksi hingga 100 jam dan selektivitas tinggi untuk CH₄. Penelitian terbaru oleh Zhong et al. (2019) menunjukkan bahwa nanopartikel Ni yang disintesis secara in situ dapat menghasilkan metana hingga 98%, menggunakan logam melimpah seperti seng (Zn) atau besi (Fe) sebagai reduktor.

Studi lain, seperti oleh Daroughegi et al. (2019), menunjukkan bahwa katalis Ni/Al₂O₃ yang dipromosikan dengan mangan (Mn) memiliki kinerja superior dalam konversi CO₂

menjadi CH₄. Sebaliknya, Liza (2022) menemukan bahwa pembentukan metana pada suhu di bawah 100°C tanpa katalis tidak optimal. Jihan (2023) mengkaji efektivitas katalis Ni/Al₂O₃ dengan Mn pada suhu yang berbeda (25°C, 40°C, dan 55°C), dengan hasil terbaik mencapai 12,11% CH₄ pada suhu 55°C dengan rasio promotor dan katalis 1:3.

Temuan ini mengindikasikan bahwa suhu rendah dapat menyebabkan masalah seperti deposisi karbon dan sintering pada katalis, yang mengurangi efisiensi. Untuk mengatasi hal ini, penelitian ini mengusulkan desain reaktor packed flow tipe fixed bed dari stainless steel yang dapat mencapai suhu hingga 400°C. Rancangan ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi proses metanisasi. Evaluasi dilakukan dengan menggunakan Multi Gas Detector Analyzer untuk menganalisis gas yang dihasilkan dan Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk menilai perubahan pada katalis Ni/Al₂O₃.

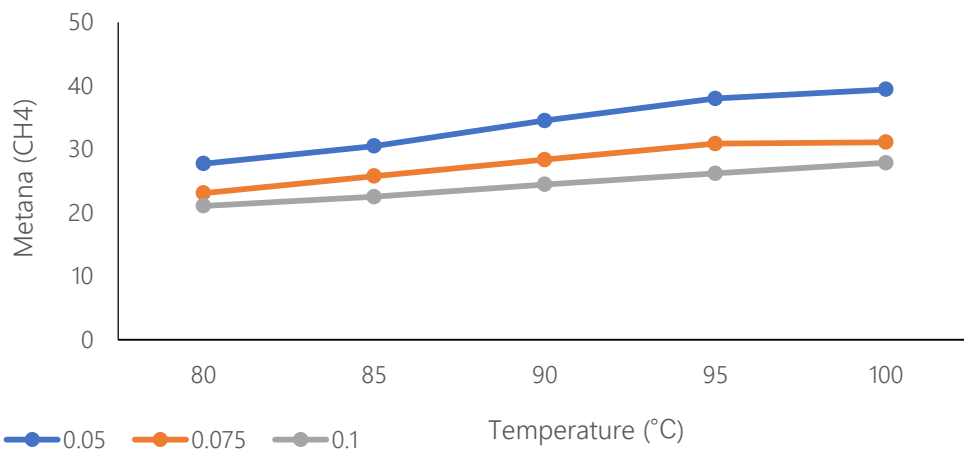
METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan gas metana CH₄ dengan proses metanasi CO₂ menggunakan alat Plug Flow Reactor tipe Fixed Bed Reactor dengan memvariasikan parameter suhu operasi dan laju alir CO₂. Penelitian ini menggunakan katalis Ni/Al₂O₃ dengan jumlah 50 gram dan larutan NaOH 4M sebagai parameter tetap, serta variasi suhu operasi 80-100°C dan laju alir CO₂ 0,05-0,1 L/min. Prosedur penelitian meliputi pembuatan larutan NaOH, pengoperasian reaktor, dan analisis produk gas metana (CH₄) menggunakan Multi Gas Detector Analyzer. Data yang diamati dalam penelitian ini adalah komposisi CH₄ dan CO₂ yang dihasilkan dari proses metanasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pengaruh Temperatur dan Laju alir CO₂ terhadap Gas Metana (CH₄)

Proses metanasi CO₂ merupakan proses yang cukup menantang karena melibatkan reaksi yang bersifat eksotermik dan memerlukan pengaturan parameter operasi yang tepat. Dalam penelitian ini, variasi suhu operasi dan laju alir CO₂ telah digunakan untuk mengkaji pengaruhnya terhadap produksi gas metana (CH₄).



Gambar 1 Pengaruh Variasi Laju Alir dan Temperatur terhadap Produksi Gas Metana

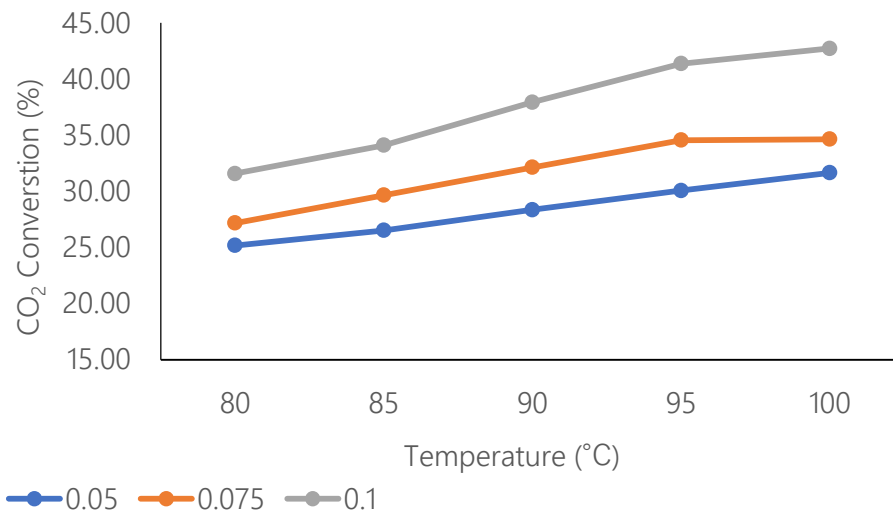
Dari hasil pengamatan pada Gambar 1, terlihat bahwa pada suhu 80 °C, gas CH₄ yang dihasilkan hanya berada diangka 21,7%; 23,1%; 27,2% kemudian pada suhu 100 °C, gas CH₄ yang dihasilkan adalah yang terbaik sebesar 39,41%. Dari hasil ini dapat dikatakan bahwa seiring dengan meningkatnya temperature, maka kenaikan suhu dapat meningkatkan stabilitas katalis Ni/Al₂O₃ yang digunakan, sehingga mempercepat laju reaksi metanasi (Stangeland, 2017).

Di sisi lain, penurunan laju alir CO₂ juga menunjukkan peningkatan konversi menjadi CH₄. Pada laju alir tertinggi 0,05 L/min, persentase CH₄ yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan pada laju alir 0,075 dan 0,1 L/min. Hal ini disebabkan oleh semakin lamanya waktu kontak antara CO₂ dan larutan NaOH pada laju alir rendah, sehingga transfer massa dan penyerapan CO₂ menjadi lebih optimal (Maarif & Arif, 2009).

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa suhu operasi yang lebih tinggi dan laju alir CO₂ yang lebih rendah akan meningkatkan konversi CO₂ menjadi CH₄ dalam proses metanasi menggunakan reaktor fixed bed. Kondisi operasi optimal berdasarkan hasil penelitian ini adalah suhu 100°C dan laju alir CO₂ 0,05 L/min, yang menghasilkan persentase CH₄ tertinggi mencapai 39,41%.

2. Pengaruh Variasi Suhu dan Katalis terhadap Konversi CO₂

Selain produk gas metana (CH₄), proses metanasi CO₂ juga menghasilkan gas CO₂ yang tidak bereaksi, yang sering disebut sebagai "CO₂ sisa". Berikut merupakan gambar grafik dari %CO₂ sisa yang tidak beraksi dalam pembentukan gas metana.



Gambar 2. %CO₂ sisa yang tidak beraksi dalam pembentukan gas metana

Berdasarkan grafik Gambar 2 bahwa terdapat kenaikan pada nilai konversi CO₂ yang dipengaruhi oleh temperature dan laju alir, dimana nilai terendah ada pada temperature 80 °C dan laju alir 0.05 L/menit, dan tertinggi ada di temperature 100 °C dengan laju alir 0.1 L/menit. Hal ini sesuai dengan prinsip kesetimbangan termodinamika dimana reaksi metanasi ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$) akan bergeser ke arah pembentukan CH₄ yang lebih banyak pada suhu yang lebih tinggi. Namun, grafik juga menunjukkan bahwa semakin tinggi rasio umpan CO₂/H₂, konversi CO₂ cenderung menurun, mengindikasikan adanya batasan kemampuan katalis dalam mereduksi CO₂ menjadi CH₄ meskipun suhu operasi ditingkatkan. Secara keseluruhan, grafik ini menggambarkan bahwa suhu operasi dan rasio umpan merupakan faktor-faktor penting yang memengaruhi konversi CO₂ dalam proses metanasi, dimana peningkatan suhu dapat meningkatkan konversi, tetapi kemampuan katalis juga memiliki keterbatasan dalam menangani beban CO₂ yang terlalu tinggi.

Dari penelitian yang telah dilakukan oleh Gac (2020), menurut kesetimbangan termodinamik, kenaikan temperature akan mengarah dengan penurunan gas CO₂ yang disebabkan terjadinya kesetimbang reaksi bergeser ke arah CH₄. Selain itu, peningkatan suhu juga dapat menyebabkan perubahan pada permukaan katalis Ni/Al₂O₃ yang digunakan. Semakin banyak sisi aktif pada permukaan katalis, maka semakin banyak CO₂ yang dapat direduksi menjadi CH₄. Dengan demikian, jumlah CO₂ sisa yang keluar dari reaktor akan semakin berkurang seiring kenaikan suhu.

SIMPULAN

Berdasarkan penelitian ini menggunakan alat *Plug Flow Reactor* tipe *Fixed Bed Reactor*, dengan variasi temperatur operasi terhadap proses metanasi CO₂ yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Pengaruh Temperatur dan Laju Alir CO₂ terhadap Gas Metana (CH₄):
 - Semakin tinggi suhu, semakin banyak gas CH₄ yang dihasilkan. Pada suhu 80°C, persentase CH₄ hanya 21,7-27,2%, sedangkan pada suhu 100°C, persentase CH₄ meningkat menjadi 39,41%. Kenaikan suhu dapat meningkatkan stabilitas katalis, sehingga berdampak pada peningkatan produksi CH₄.
 - Laju alir CO₂ yang rendah menghasilkan CH₄ terbanyak. Hal ini disebabkan semakin rendah laju alir, semakin lama waktu kontak antara NaOH dan CO₂, sehingga transfer massa terjadi lebih banyak dan CO₂ yang terserap juga lebih banyak.
2. Pengaruh Variasi Suhu dan Katalis terhadap Konversi CO₂:
 - Kenaikan suhu menyebabkan penurunan sisa gas CO₂ yang tidak bereaksi. Hal ini sesuai dengan kesetimbangan termodinamika, di mana peningkatan suhu akan mendorong reaksi ke arah pembentukan CH₄.
 - Peningkatan jumlah sisi aktif pada katalis juga dapat menyebabkan penurunan sisa gas CO₂, karena semakin banyak CO₂ yang dapat bereaksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aghayan, M., Potemkin, D. 1., Rubio-Marcos, F., Uskov, S. 1., Snytnikov, P. v., & Hussainova, I. (2017). Template-Assisted Wet-Combustion Synthesis of Chembk. (2020). nikel nitrat heksahidrat. PubChem.
- Andrigo, P., Bagatin, R., Pagani, G., et al. (1999) Fixed Bed Reactor. *Catalyst Today*, 52, 197-221.
- Chembk. (2022). metana _ CH₄ - PubChem.
- Cunha, C.S., Lopes, N.L., Veloso, C.M., Jacovine, L.A.G., Tomich, T.R., Pereira, L.G.R., Marcondes, (2016). Greenhouse Gases Inventory and Carbon Balance of Two Dairy Systems Obtained From Two Methane Estimation Methods, *Science of The Total Environment*.
- Danaci S, Protasova L, Lefevere J, Bedel L, Guilet R, Marty P. (2016) Efficient CO₂ methanation over Ni/Al₂O₃ coated structured catalysts. *Catal Today*;273:234–43.

- Darouhegi, R. (2019). Characterization and evaluation of mesoporous high surface area promoted Ni- Al₂O₃ catalysts in CO₂ methanation; ResearchGate
- Fan, W. K., dan Tahir, M. (2021). Recent Trends in Developments of Active Metals and Heterogenous Materials for Catalytic CO₂ Hydrogenation to Renewable Methane: a Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105460
- Farmasi, Jurnal Sains, and Helmi Arifin. 2016. "Kajian Penggunaan Antibiotik Pada Pasien Sepsis Dengan Gangguan Ginjal." 2(May):129–37.
- Fu Chen, Xiaoxiao Li, Junfeng Qu, Jing Ma, Qianlin Zhu, (2020). Gasification of coking wastewater in supercritical water adding alkali catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, pp.1608 - 1614.
- Hartig, F; Keil, F J. (1993). Large-scale spherical fixed bed reactors: Modeling and optimization; OSTI.GOV
- Hermawan, P., & Nugroho, A. R. (2021). Studi Pemanfaatan Gas Co₂ (Karbon Dioksida) Sebagai Sumber Asam Alternatif Untuk Pikling Pada Pengolahan Kulit Kambing. *Berkala Penelitian Teknologi Kulit, Sepatu, dan Produk Kulit*, 20(2), 148-160.
- House, J. E. and House, K. A. (2016) 'Hydrogen', *Descriptive Inorganic Chemistry*, 3, pp. 111–121. doi: 10.1016/B978-0-12-804697-5.00007-5. li, B. A. B. and Pustaka, T. (2008) '(sumber : Neni Muliawati, 2008. Hidrogen 125 Sebagai Bahan Bakar : Sumber Energi Masa Depan) 5', 2(l), pp. 5–22.
- Jalama, K. (2017). Carbon dioxide hydrogenation over nickel-, ruthenium-, and copper-based catalysts: Review of kinetics and mechanism; Semantic Scholar
- Jihan, S. (2023). Pembentukan Gas Metan Dari Karbon Dioksida Menggunakan Katalis Ni/Al₂O₃ Dengan Penambahan Mn Sebagai Promotor. Palembang; POLSRI
- Kiewidt L, Thöming J. (2015). Predicting optimal temperature profiles in single-stage fixed-bed reactors for CO₂-methanation. *Chem Eng Sci*;132:59–71.
- Krisnandi. Y. K.. Abdullah. L. Prabawanta, I. B. G., & Handayani, M. (2020). Insitu hydrothermal synthesis of nickel nanoparticle/reduced graphene oxides as catalyst on CO₂ methanation. *AIP Conference Proceedings*.
- Liza, Yurika Dewi Safitri. (2022). Optimasi Proses Metanasi Co₂ Menggunakan Katalis Ni-Fe/Al₂O₃ Pada Suhu Rendah; POLSRI
- Le TA, Kim TW, Lee SH, Park ED. (2018). Effects of Na content in Na/Ni/SiO₂ and Na/Ni/CeO₂ catalysts for CO and CO₂ methanation. *Catal Today*;303:159–67.
- Liu Q, Bian B, Fan J, Yang J. (2018). Cobalt doped Ni based ordered mesoporous catalystsfor CO₂ methanation with enhanced catalytic performance. *Int J Hydrogen*

Energy;43:4893–901.

- Muroyama, H., Tsuda, Y., Asakoshi, T., Masitah, H., Okanishi, T., Matsui, T., & Eguchi, K. (2016). Carbon dioxide methanation over Ni catalysts supported on various metal oxides. *Journal of Catalysis*, 343, 178—184.
- Perry, G. (2008). *Perry's Chemical Engineers ' Handbook*, 8th edition. United States: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Sabatier, P. (1902). Senderens, J.B. New synthesis of methane. *J. Chem. Soc.* 82, 333.
- Satterfield. (1980). *Heterogeneous Catalyst in Practice..* New York : Mc Graw Hill Book Company.
- Sholeha, N., Amalia. (2017). Perbandingan Material Oksida Alumina, Silika, dan Zeolit sebagai Material Pendukung Logam Ni pada Konversi CO₂ menjadi CH₄; IPB.
- Sugiyarto, K. H. dan Suyanti, R. D. 2010. *Kimia Anorganik Logam*. Graha Ilmu.Yogyakarta.
- Sopaheluwakan, A., Setiawan, B., Nahas, C.A., Devytasari, Y., Putri., S.A. (2022). *Buletin Gas Rumah Kaca*. Volume 02 Nomor 01.
- Subkhan Akhmad. (2017). *Kajian Emisi Karbondioksida (CO₂) Dari Pemanfaatan Energi Rumah Tangga Di Kelurahan Candi Kota Semarang; UNNES*
- Tahir, M. Fan W., (2021). Recent trends in developments of active metals and heterogenous materials for catalytic CO₂ hydrogenation to renewable methane: A review; *Semantic Scholar*
- Zevenhoven R, Virtanen M. CO₂ mineral sequestration integrated with water-gas shift reaction. *Energy* 2017;141:2484–9.
- Zhong, H., Yao, G., Cui, X., Yan, P., Wang, X., & Jin, F. (2019). Selective conversion of carbon dioxide into methane with a 98% yield on an in situ formed Ni nanoparticle catalyst in water. *Chemical Engineering Journal*, 357(April 2018), 421-427.