



Konversi Gas CO₂ menjadi Gas Metana (CH₄) menggunakan Katalis Ni/Al₂O₃

Mailanda Saputra^{1✉}, Jaksen M Amin², Robert Junaidi³

Politeknik Negeri Sriwijaya

Email: melanputra28@gmail.com^{1✉}

Abstrak

Pencemaran karbon dioksida (CO₂) merupakan masalah lingkungan global yang perlu ditangani. Data dari Badan Pusat Statistik Indonesia menunjukkan bahwa emisi CO₂ di Indonesia meningkat 4,54% dari 2015 hingga 2019. Salah satu solusi yang diteliti adalah konversi CO₂ menjadi gas metana (CH₄) melalui proses metanasi. Penelitian ini menggunakan katalis Nikel (Ni) dengan support Al₂O₃ untuk mempelajari pengaruh variasi suhu dan massa katalis terhadap konversi CO₂ menjadi CH₄. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh variasi massa katalis Ni/Al₂O₃ dan suhu produksi terhadap konversi CO₂ menjadi gas CH₄. Katalis Ni dipilih karena kemampuannya menyerap hidrogen dan selektivitas tinggi dalam pembentukan CH₄. Penggunaan reaktor stainless steel dengan koil pemanas memungkinkan suhu operasi yang lebih tinggi dibandingkan penelitian sebelumnya menggunakan reaktor kaca. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi massa katalis Ni/Al₂O₃ (5 g, 10 g, 15 g) dan suhu produksi (100°C, 120°C, 150°C), maka persentase konversi CO₂ menjadi CH₄ semakin meningkat. Persentase konversi CH₄ tertinggi diperoleh pada penggunaan 15 g katalis Ni/Al₂O₃ dan suhu produksi 150°C, yaitu mencapai 25,27%. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas gas CH₄ yang dihasilkan dipengaruhi secara signifikan oleh massa katalis dan suhu produksi. Selain itu, sisa gas CO₂ yang tidak bereaksi juga semakin menurun dengan peningkatan massa katalis dan suhu produksi.

Kata Kunci: *Karbon Dioksida, Metanasi, Katalis Ni/Al₂O₃*

Abstract

Carbon dioxide (CO₂) pollution is a global environmental issue that needs to be addressed. Data from the Indonesian Central Statistics Agency shows that CO₂ emissions in Indonesia increased by 4.54% from 2015 to 2019. One of the researched solutions is the conversion of CO₂ into methane gas (CH₄) through the methanation process. This study uses a Nickel (Ni) catalyst with Al₂O₃ support to investigate the effect of temperature and catalyst mass variations on the conversion of CO₂ into CH₄. The aim of this research is to study the impact of variations in Ni/Al₂O₃ catalyst mass and production temperature on the conversion of CO₂ into CH₄ gas. Ni catalyst was chosen for its ability to absorb hydrogen and its high selectivity in CH₄ formation. The use of a stainless steel reactor with a heating coil allows for higher operating temperatures compared to previous studies using glass reactors. The results of the study show that the higher the mass of the Ni/Al₂O₃ catalyst (5 g, 10 g, 15 g) and production temperature (100°C, 120°C, 150°C), the higher the percentage of CO₂ conversion into CH₄. The highest CH₄ conversion percentage was obtained using 15 g of Ni/Al₂O₃ catalyst and a production temperature of 150°C, reaching 25.27%. This indicates that the quality of the CH₄ gas produced is significantly influenced by the catalyst mass and production temperature. Additionally, the remaining unreacted CO₂ gas also decreases with increasing catalyst mass and production temperature.

Keywords: *Carbon Dioxide, Methanation, Ni/Al₂O₃ Catalyst*

PENDAHULUAN

Pencemaran karbon dioksida (CO₂) adalah salah satu permasalahan lingkungan global yang saat ini menjadi isu yang sangat penting. Menurut data dari Badan Pusat Statistik (BPS) Indonesia, emisi karbon dioksida di Indonesia meningkat sebesar 4,54% dari tahun 2015 hingga 2019. Pada tahun 2015, emisi karbon dioksida di Indonesia mencapai sekitar 505,3 juta ton CO₂. Namun pada tahun 2019, emisi karbon dioksida meningkat menjadi sekitar 527,3 juta ton CO₂. Konversi CO₂ menjadi Gas Metan merupakan salah satu cara penanggulangan dampak negative pencemaran gas CO₂.

Konversi CO₂ menjadi gas metana dilakukan melalui proses hidrogenasi karbon dioksida atau metanasi karbon dioksida, yang juga dikenal sebagai reaksi Sabatier. Reaksi eksotermik ini melibatkan hidrogen dan karbon dioksida untuk menghasilkan metana dan air sebagai produk sampingnya (Krisnandi dkk., 2020). Reaksi ini menguntungkan karena bisa berlangsung pada suhu rendah antara 25°C hingga 400°C, tetapi hidrogenasi karbon dioksida hanya dapat dilakukan dengan katalis yang efisien (Fan & Tahir, 2021). Konversi CO₂ menjadi gas Metan CH₄ menggunakan suhu rendah sangat penting dan berpengaruh dalam pemahaman tentang peran dan penggunaan CO₂, meskipun tingkat konversinya masih sangat rendah (Martin dkk., 2017). Pada proses metanasi CO₂ telah banyak diteliti dengan berbagai variasi katalis untuk menemukan jenis yang paling efektif. Katalis seperti

nikel, rhodium, dan rutenium adalah beberapa konstituen katalitik aktif yang paling banyak digunakan (Keshavarz, 2018).

Salah satu metode metanasi CO_2 adalah dengan menggunakan spons nikel (Ni) tanpa perlakuan awal. Spons Ni ini menunjukkan konversi CO_2 sebesar 83% pada 250°C dengan kecepatan ruang tinggi ($0,11 \text{ mol CO}_2 \text{ gcat}^{-1}\text{h}^{-1}$). Namun, jika diberikan perlakuan awal suhu tinggi, spons Ni kehilangan aktivitasnya dalam metanasi CO dan situs cacat permukaannya. Oleh karena itu, hilangnya aktivitas ini dapat dijelaskan oleh hilangnya situs cacat permukaan akibat perlakuan suhu tinggi (Tada dkk., 2017).

Selain itu, ada penelitian mengenai metode baru dan sederhana untuk mengonversi CO_2 menjadi metana dalam air menggunakan katalis nanopartikel nikel (Ni) yang disintesis secara in situ. Dalam metode ini, air digunakan sebagai sumber hidrogen dan logam yang melimpah di bumi (Zn atau Fe) digunakan sebagai reduktor yang dapat dihasilkan kembali. Hasilnya menunjukkan konversi metana sebesar 98% baik dari CO maupun HCO pada suhu 30°C . katalis nanopartikel Ni yang terbentuk di tempat tidak hanya menunjukkan aktivitas katalitik yang luar biasa tetapi juga stabilitas. Studi mekanistik menunjukkan bahwa pembentukan metana dari HCO; atau CO_2 mengikuti jalur $\text{HCO}^{2-} \rightarrow \text{CO}^{2-} \rightarrow \text{HCOOH}^- \rightarrow \text{CH}_4$. Penelitian ini menunjukkan pendekatan sederhana untuk konversi CO_2 menjadi metana yang sangat efisien dengan bahan yang melimpah di bumi (Stangeland dkk., 2017).

Pada penelitian ini, digunakan katalis Nikel dengan kombinasi Al_2O_3 sebagai support. Katalis Nikel dipilih karena dapat menyerap hidrogen dan sangat selektif dalam pembentukan metana (Loder dkk., 2020). Katalis Ni dapat mempertahankan aktivitas baik selama waktu reaksi yang lama dengan selektivitas CH_4 yang tinggi (Chein & Wang, 2020). Ditinjau dengan variable bebas, berdasarkan %konsentrasi katalis dan temperature proses terhadap gas metan yang terkonversi.

Pada penelitian sebelumnya menggunakan reaktor kaca guna untuk melihat reaksi yang terjadi secara langsung apa yang terjadi di dalam reaktor tersebut. Dari penelitian sebelumnya didapat konversi gas metan sebesar 9,5-15,5%. Persentase konversi CO_2 paling tinggi diperoleh pada sampel 15 dengan massa katalis Ni/ Al_2O_3 sebesar 8 gr yaitu 15,25 %. Dengan didapat kesimpulan semakin tinggi temperatur semakin juga nilai konversi gas metan yang didapat. Dikarenakan pada penelitian sebelumnya menggunakan reaktor yang berbahan kaca sehingga variasi temperatur yang digunakan tidak bisa menggunakan temperatur tinggi, hal ini merupakan salah satu kendala untuk meningkatkan nilai konversi gas metan menjadi lebih tinggi. Maka pada penelitian kali ini bahan reaktor yang tadinya berbahan kaca kita tingkatkan dengan menggunakan bahan metal yaitu berupa stainless steel yang dikelilingi koil pemanas, sehingga diharapkan bisa meningkatkan temperatur operasi

agar menjadi lebih tinggi dan dapat meningkatkan hasil konversi gas metan lebih tinggi lagi.

METODE PENELITIAN

1. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan : gelas kimia 500 ml, spatula, labu ukur 500 ml, kaca arloji, elenmenyer, batang pengaduk kaca, neraca analitik, pipet tetes, corong kaca, regulator CO₂, tabung CO₂, karet sumbat, pipa pvc transparan, tube produk 2 liter 15, seltip/isolasi pipa, kabel TIS, reaktor FTB (tipe *fixed bed reactor*).

Bahan yang digunakan pada penelitian ini : Karbon Dioksida (CO₂) Natrium Hidroksida (NaOH), Aquadest, Katalis Ni/Al₂O₃.

2. Instrumen

Penelitian ini menggunakan alat plug flow reactor tipe fixed bed reactor, dengan memperhatikan variasi temperatur operasi terhadap proses metanasi CO₂. adapapun parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

Parameter Tetap

- A. Jenis katalis : Katalis Ni/Al₂O₃
- B. Waktu Operasi : 45 menit

Parameter Bebas (Variabel)

- a. Temperatur : 100°C, 120°C, 150°C.
- b. Massa Katalis : 5 gram, 10 gram, 15 gram.

3. Prosedur Kerja

Pertama, semua alat dan bahan yang akan digunakan dalam proses metanasi disiapkan, kemudian alat-alat tersebut disambungkan ke power supply. Pastikan semua katup mengarah ke aliran yang diinginkan dan periksa agar semua selang serta katup yang terhubung tidak longgar. Setelah memastikan semua peralatan siap, katalis Ni/Al₂O₃ yang telah ditimbang dimasukkan ke dalam reaktor, lalu selang CO₂ dihubungkan ke reaktor. Sekring dinaikkan hingga lampu indikator menyala dan tombol power ditekan. Percobaan dilakukan dengan variasi temperatur operasi. Gas CH₄ yang dihasilkan didistribusikan ke urine bag untuk dianalisis.

Produk gas yang dihasilkan dianalisis menggunakan Multi Gas Detector Analyzer, yang mengubah sampel gas menjadi fasa uap dan mengalirkannya melalui kolom kapiler dengan bantuan gas pembawa, memberikan hasil analisa dalam persentase volume (% volume).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari penelitian diperoleh hasil analisis gas yang dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2 hasil pengamatan suhu akhir reaksi dan perhitungan konversi CO_2 berdasarkan persamaan reaksi metanasi CO_2 pada Tabel 3,4, dan 5..

Tabel 1. Hasil Analisis Gas Metan, Karbon Dioksida, dan Hidrogen

No.	Massa Katalis (gr)	Temperature Operasi ($^{\circ}\text{C}$)	CH_4 (%Vol)	CO_2 (%Vol)	H_2 (ppm)
1	5	100	8,11	0,01	323
2		120	10,97	0,04	462
3		150	12,38	0,01	442
4	10	100	15,17	0,01	477
5		120	16,90	0,02	427
6		150	19,38	0,05	426
7	15	100	21,95	0,02	271
8		120	22,12	0,05	503
9		150	25,71	0,02	571

Sumber: Multi Gas Detector Analyzer Laboratorium Teknik Kimia POLSRI, 2024)

Tabel 2. Hasil Analisis Sample

Nama Sample	Metode Uji	Hasil Analisa		
		CH_4 (%)	CO_2 (%)	H_2 (ppm)
<i>Gas CO_2</i>	<i>Multi Gas detector analyzer</i>	<i>0</i>	<i>98,7</i>	<i>0,1</i>

Sumber: Multi Gas Detector Analyzer Laboratorium Teknik Kimia POLSRI, 2024)

Tabel 3. Analisis Statistik Anova CH_4 Dua Variabel Tanpa Pengulangan

Keragaman	DB	JK	KT	F hitung	F tabel 5%
Massa Katalis	2	244.8902	122.4451	237.7292	6.944272
Temperatur	2	25.38062	12.69031	24.63846	6.944272
galat	4	2.060244	0.515061		
total	8	272.331			

Tabel 4. Analisis Statistik Anova CO₂ Dua Variabel Tanpa Pengulangan

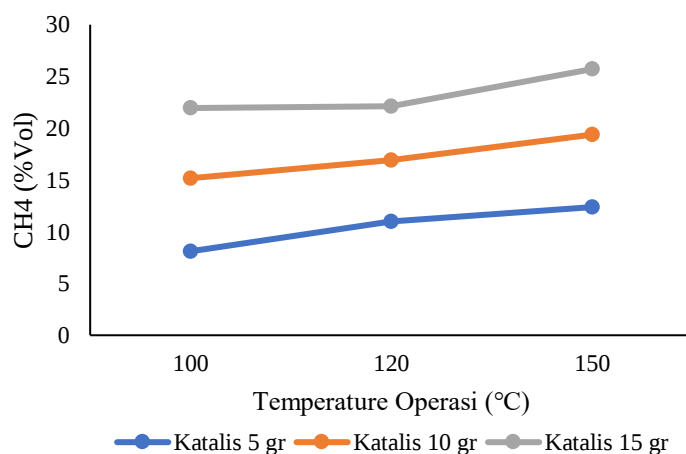
Keragaman	DB	JK	KT	F hitung	F tabel 5%
Massa Katalis	2	0.000156	7.78E-05	0.25	6.94427191
Temperatur	2	0.000822	0.000411	1.321428571	6.94427191
galat	4	0.001244	0.000311		
total	8	0.002222			

Tabel 5. Analisis Statistik Anova H₂ Dua Variabel Tanpa Pengulangan

Keragaman	DB	JK	KT	F hitung	F tabel 5%
Massa Katalis	2	2750.889	1375.444	0.153957	6.944272
Temperatur	2	26741.56	13370.78	1.496626	6.944272
galat	4	35735.78	8933.944		
total	8	65228.22			

A. Pengaruh Variasi Suhu dan Massa Katalis terhadap Produksi Gas CH₄

Berdasarkan Gambar 1 yang diambil dari Tabel 1 ternyata bahwa gas CH₄ yang dihasilkan berbanding lurus dan meningkat. Pada penelitian kali ini, digunakan 3 variasi Massa Katalis yaitu 5 gr, 10 gr, dan 15 gr dan juga 3 variasi suhu produksi yaitu 100°C, 120°C dan 150°C. Setelah dilakukan penelitian dan dilakukan uji sampel, dapat diketahui bahwa semakin banyak massa katalis Ni/Al₂O₃ yang digunakan dan semakin tinggi suhu produksi, maka produksi gas metana (CH₄) yang dihasilkan semakin meningkat dan persen semakin tinggi Hasil harus jelas dan ringkas.

Gambar 1. Grafik Analisis Pengaruh Variasi Suhu dan Massa Katalis terhadap CH₄

Berdasarkan data yang disajikan, dapat dibuktikan bahwa produksi gas metana (CH₄) mengalami peningkatan seiring dengan penambahan massa katalis Ni/Al₂O₃ dan kenaikan suhu produksi. Pada penggunaan massa katalis Ni/Al₂O₃ yang semakin

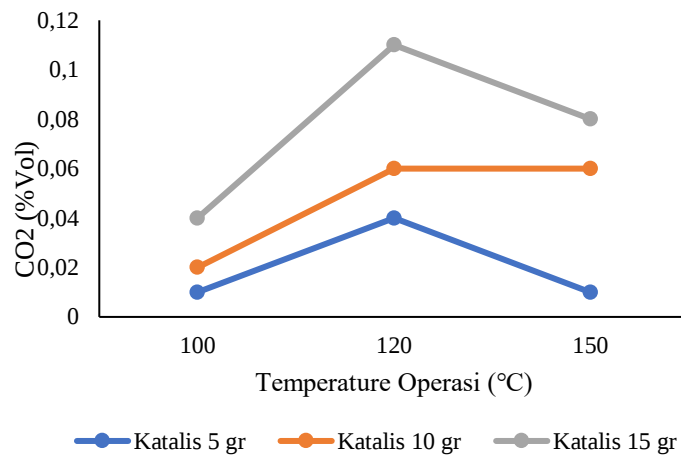
banyak, dari 5 gr, 10 gr, hingga 15 gr, persentase produksi gas CH_4 menunjukkan peningkatan yang signifikan. Hal ini disebabkan karena semakin banyak massa katalis $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ yang digunakan, maka semakin banyak pula situs aktif katalis yang tersedia untuk mempromosikan reaksi pembentukan CH_4 . Demikian pula, peningkatan suhu produksi dari 100°C , 120°C , hingga 150°C , juga menunjukkan kenaikan persentase produksi gas CH_4 secara konsisten. Kenaikan suhu reaksi dapat meningkatkan laju reaksi dan mempercepat pembentukan CH_4 melalui reaksi katalitik yang didukung oleh katalis $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Untuk melihat perbedaan yang signifikan atau nyatanya analisa kadar CH_4 maka dilanjutkan analisa menggunakan annova. Berdasarkan Tabel 4 menunjukkan perbedaan yang signifikan antar massa katalis, dengan nilai $F_{\text{Hitung}} = 237.7292$ dan Temperatur, dengan nilai $F_{\text{Hitung}} = 24.63846$ diketahui bahwa pada nilai $F_{\text{Hitung}} > 0,05$ yang berarti beda Massa katalis dan perubahan temperatur berpengaruh tidak nyata terhadap kadar CH_4 . Berdasarkan hasil ANOVA, terdapat perbedaan yang signifikan baik pada massa katalis maupun temperatur pada data yang diberikan. Perbedaan antar massa katalis memberikan kontribusi yang jauh lebih besar terhadap total variasi dibandingkan dengan perbedaan antar Temperatur.

Hal tersebut menunjukkan kualitas gas metana yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh massa katalis $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ dan suhu produksi. Produksi gas metana tertinggi diperoleh pada penggunaan 15 gr katalis $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ dan suhu produksi 150°C . Hasil ini konsisten dengan penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Huang dkk. (2013), yang menunjukkan bahwa peningkatan massa katalis $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ dari 10% hingga 30% berat dapat meningkatkan produksi gas metana. Selain itu, penelitian Dang dkk. (2019) juga menunjukkan bahwa peningkatan suhu reaksi dari 700°C hingga 900°C dapat meningkatkan konversi karbon menjadi gas metana menggunakan katalis $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

B. Pengaruh Variasi Suhu dan Massa Katalis terhadap CO_2 Akhir

Berdasarkan Gambar 2 yang diambil dari Tabel 1 menunjukkan bahwa penurunan pada sisa gas CO_2 atau gas CO_2 yang tidak bereaksi seiring dengan variasi suhu dan peningkatan massa katalis. Semakin tinggi suhu produksi dan semakin banyak katalis Ni yang digunakan, gas metana yang dihasilkan serta gas CO_2 yang bereaksi semakin meningkat. Tabel 1 menunjukkan jumlah gas CO_2 yang gagal bereaksi dengan H_2 .



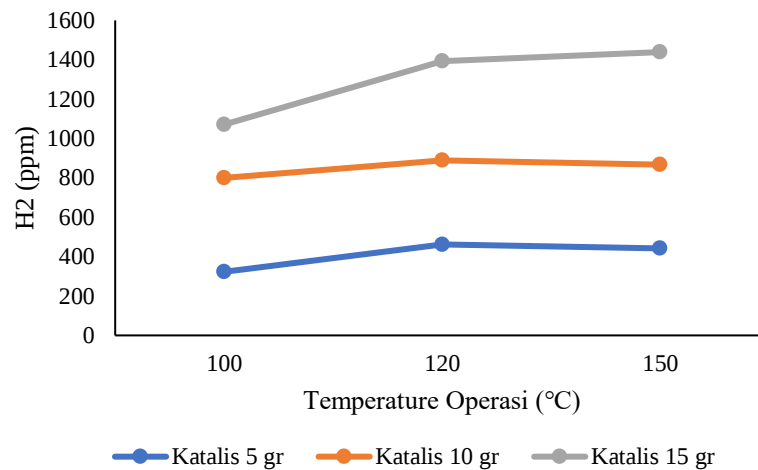
Gambar 2. Grafik Analisis Pengaruh Variasi Suhu dan Massa Katalis terhadap CO₂ Akhir

Pada Gambar 2, menunjukkan pengaruh variasi suhu dan massa katalis Ni/Al₂O₃ terhadap konsentrasi CO₂ akhir dalam suatu proses. Terlihat bahwa peningkatan suhu reaksi dan jumlah katalis cenderung menurunkan konsentrasi CO₂ akhir, mengindikasikan bahwa kondisi operasi yang lebih tinggi suhu dan massa katalis yang lebih besar dapat meningkatkan efisiensi konversi CO₂ menjadi produk lain, seperti metana. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Liu dkk. (2016) dan Wang dkk. (2018) yang menemukan bahwa peningkatan suhu dan penambahan logam promotor dapat meningkatkan aktivitas dan stabilitas katalis Ni/Al₂O₃ dalam reaksi metanasi. Pola grafik yang bersifat periodik dan berfluktuasi mengindikasikan adanya fenomena siklik yang terkait dengan perubahan kondisi reaksi atau pengambilan data, sebagaimana juga diobservasi oleh Ding dkk. (2021) dalam penelitiannya tentang pengaruh metode preparasi katalis Ni/Al₂O₃. Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa optimalisasi suhu reaksi dan jumlah katalis Ni/Al₂O₃ pada setiap sampel dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kinerja proses konversi CO₂ menjadi produk CH₄.

Pada Tabel 4 melihat perbedaan yang signifikan atau nyatanya analisa kadar CO₂ maka dilanjutkan analisa menggunakan annova. Berdasarkan menunjukkan tidak ada perbedaan yang signifikan antar baris (Massa katalis), F_{Hitung} (0.25) lebih besar dari tingkat signifikansi 0.05 dan antar kolom (Temperatur), dengan nilai F_{Hitung} (1.32) lebih besar dari tingkat signifikansi 0.05 diketahui bahwa pada pelarut nilai $F > 0,05$ yang berarti beda Massa katalis dan perubahan suhu tidak berpengaruh nyata terhadap kadar CO₂. Dengan demikian, hasil analisa anova menolak hipotesis nol, baik untuk faktor Massa Katalis maupun Temperatur. Kedua faktor tersebut memberikan pengaruh yang signifikan terhadap respons yang diukur.

C. Pengaruh Variasi Suhu dan Massa Katalis terhadap H₂ Akhir

Berdasarkan pada gambar 3 terlihat adanya naik turun yang menunjukkan produksigas H₂. Faktor penyebab naik turunnya produksi gas H₂ ini ialah kondisi dari katalis Ni/Al₂O₃. Pada gambar dapat dilihat bahwa gas H₂ banyak dihasilkan pada variasi katalis tertinggi yaitu, 8 gr. Hal ini, mengindikasikan bahwa semakin banyak katalis yang digunakan, maka produksi gas H₂ semakin tinggi.



Gambar 3. Grafik Analisis Anova Pengaruh Variasi Suhu dan Massa Katalis terhadap H₂

Menurut penelitian yang dilakukan Cassanova dkk. (2021), semakin banyak jumlah katalis yang digunakan Ni/Al₂O₃ maka gas H₂ yang dihasilkan juga semakin tinggi jumlahnya. Hal ini terjadi disebabkan oleh adanya reaksi antara Al dengan NaOH yang menghasilkan gas H₂. Pada gambar juga menunjukkan titik tertinggi dari produksi H₂ ialah di suhu 150°C dan massa katalis 150 gr, yang mengindikasikan produksi H₂ yang optimal terjadi pada kondisi operasi tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu cenderung meningkatkan konsentrasi H₂, sejalan dengan temuan Dang dkk. (2019) yang menyatakan bahwa kenaikan suhu dapat mendorong reaksi reformasi uap metana dan water-gas shift untuk memproduksi hidrogen. Sebaliknya, penambahan jumlah katalis justru menurunkan konsentrasi H₂, kemungkinan disebabkan oleh peningkatan aktivitas katalis dalam mengkonversi H₂ menjadi produk lain seperti metana, sebagaimana dilaporkan oleh Huang dkk. (2017) dalam penelitiannya tentang katalisis Ni/Al₂O₃ untuk reaksi metanasi.

Jika suhu terlalu tinggi, dapat menyebabkan sintering atau kokas pada katalis, yang menyebabkan penurunan aktivitas dan stabilitas. Di sisi lain, jika suhu terlalu rendah, panas yang dihasilkan tidak cukup untuk mendorong reaksi metanasi, yang menyebabkan aktivitas katalis rendah (Fan and Tahir, 2021). Dari Penelitian ini, dapat

ditarik kesimpulan bahwa produksi H_2 maksimal terjadi pada suhu $150^\circ C$ karena tidak terlalu rendah dan tidak terlalu tinggi.

Produksi gas H_2 yang dianalisa melalui anova pada Tabel 5 menunjukkan tidak ada perbedaan yang signifikan antar baris (Massa katalis), Nilai F Hitung (0.153957) lebih besar dari tingkat signifikansi 0.05, sehingga tidak ada perbedaan yang signifikan antar kelompok massa katalis. Sedangkan Nilai F Hitung (1.496626) lebih kecil dari tingkat signifikansi 0.05, sehingga tidak ada perbedaan yang signifikan antar kelompok temperatur. Diketahui bahwa pada pelarut nilai F hitung $> 0,05$ yang berarti beda Massa katalis dan perubahan suhu tidak berpengaruh nyata terhadap kadar H_2 . Berdasarkan hasil ANOVA, menyatakan bahwa baik faktor Massa Katalis maupun Temperatur tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respons yang diukur. Dengan kata lain, perbedaan dalam massa katalis dan temperatur tidak menyebabkan perbedaan yang signifikan pada hasil pengukuran.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Persentase hasil gas metana paling banyak yang dihasilkan secara in situ diperoleh pada kondisi operasi dengan massa katalis Ni/Al_2O_3 sebesar 15 gr dengan temperature produksi $150^\circ C$ yaitu 25,71 %
2. Persentase konversi CO_2 paling tinggi diperoleh pada sampel 6 dan 8 dengan kondisi operasi masing-masing massa katalis Ni/Al_2O_3 sebesar 10 dan 15 gr yaitu 0,05 %
3. Semakin banyak massa katalis Ni/Al_2O_3 dan semakin tinggi suhu produksi yang digunakan, maka semakin banyak CH_4 yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alviany, R., Marbun, M. P., & Kurniawansyah, F. (2018). Production Of $\gamma-Al_2O_3$ Catalysts Using Impregnation Method. *Jurnal Teknik Kimia*, 12(2), 64–68.
- Ashok, J., Pati, S., Hongmanorom, P., Tianxi, Z., Junmei, C., & Kawi, S. (2020). A review of recent catalyst advances in CO_2 methanation processes. *Catalysis Today*, 356(July), 471–489.
- Chein, R.-Y., & Wang, C.-C. (2020). Experimental Study on CO_2 Methanation over.
- Chembook. (2020). nikel nitrat heksahidrat.
- Chembook. (2022). metana _ CH_4 - Pubchem

- Dang, Q., Yu, C., & Luo, Z. (2019). Hydrogen-rich gas production from catalytic gasification of biomass with NiO/Al₂O₃ catalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(5), 2612-2623.
- Dias, Y. R., & Perez-Lopez, O. W. (2021). CO₂ conversion to methane using Ni/SiO₂ catalysts promoted by Fe, Co and Zn. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104629.
- Ding, Y., Hu, Y., Xu, D., Shao, J., Xiao, R., & de Vries, S. (2021). Catalytic Gasification of Pine Sawdust Using Ni/Al₂O₃ Catalysts for Hydrogen Production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(1), 443-452.
- Fan, W. K., & 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.
- Frontera, P., Macario, A., Ferraro, M., & Antonucci, P. L. (2017). Supported catalysts for CO₂ methanation: A review. *Catalysts*, 7(2), 1-28.
- Garbarino, G., Wang, C., Cavattoni, T., Finocchio, E., Riani, P., Flytzani-Stephanopoulos, M., & Busca, G. (2019). A study of Ni/La-Al₂O₃ catalysts: A competitive system for CO₂ methanation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 248 (December 2018), 286-297.
- Guo, X., Gao, D., He, H., Traitangwong, A., Gong, M., Meeyoo, V., Peng, Z., & Li, C. (2021). Promotion of CO₂ methanation at low temperature over hydrotalcite-derived catalysts-effect of the tunable metal species and basicity. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(1), 518-530.
- Huang, B. S., Chen, H. Y., Chuang, K. H., Yang, R. X., & Wey, M. Y. (2013). Hydrogen-rich gas from rice straw by gasification in the presence of different pore-size alumina-supported nickel catalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(22), 9342-9349.
- Huang, X., Gao, Y., Wu, Z., Zheng, L., Ding, W., & Lu, X. (2017). Tuning the selectivity of Ni/Al₂O₃ catalysts for CO₂ methanation via Fe doping. *Applied Catalysis B: Environmental*, 201, 286-293.
- Keshavarz, M. H. (2018). 4. Heat of Combustion. *Combustible Organic Materials*, 85-99.
- Krisnandi, Y. K., Abdullah, I., Prabawanta, I. B. G., & Handayani, M. (2020). In-situ hydrothermal synthesis of nickel nanoparticle/reduced graphene oxides as catalyst on CO₂ methanation. *AIP Conference Proceedings*, 2242(June).
- Liu, B., Zhang, R., Bi, J., Fan, P., & Cheng, D. (2016). Hydrogen production from catalytic steam gasification of municipal solid waste (MSW) using Ni-Ce/ γ -Al₂O₃ catalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(48), 22858-22866.

- Wang, Y., Li, X., Mourant, D., Gunawan, R., Zhang, S., & Li, C. Z. (2018). Catalytic Gasification of Biomass for Hydrogen-Rich Gas Production. *Energy & Fuels*, 32(8), 8057-8067.
- Lee, W. J., Li, C., Prajitno, H., Yoo, J., Patel, J., Yang, Y., & Lim, S. (2021). Recent trend in thermal catalytic low temperature CO₂ methanation: A critical review. *Catalysis Today*, 368 (February) 2–19.
- Levenspiel. (1999). Chemical reaction engineering. In *The Engineering Handbook*, Second Edition.
- Li, W., Wang, H., Jiang, X., Zhu, J., Liu, Z., Guo, X., & Song, C. (2018). A short review of recent advances in CO₂ hydrogenation to hydrocarbons over heterogeneous catalysts. *RSC Advances*, 8(14), 7651–7669.
- Liang, C., Ye, Z., Dong, D., Zhang, S., Liu, Q., Chen, G., Li, C., Wang, Y., & Hu, X. (2019). Methanation of CO₂: Impacts of modifying nickel catalysts with variable-valence additives on reaction mechanism. *Fuel*
- Lippard, S.J. and Berg, J. . (1994). *Principles of Bioinorganic Chemistry*. University Science Books, Mill Valley.
- Loder, A., Siebenhofer, M., & Lux, S. (2020). The reaction kinetics of CO₂ methanation on a bifunctional Ni/MgO catalyst. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 85, 196–207.
- Lv, C., Xu, L., Chen, M., Cui, Y., Wen, X., Li, Y., Wu, C. E., Yang, B., Miao, Z., Hu, X., & Shou, Q. (2020). Recent Progresses in Constructing the Highly Efficient Ni Based Catalysts With Advanced Low-Temperature Activity Toward CO₂ Methanation. *Frontiers in Chemistry*,
- Martin, N. M., Velin, P., Skoglundh, M., Bauer, M., & Carlsson, P. A. (2017). Catalytic hydrogenation of CO₂ to methane over supported Pd, Rh and Ni catalysts. *Catalysis Science and Technology*, 7(5), 1086–1094.
- Shafiee, P., Alavi, S. M., Rezaei, M., & Jokar, F. (2022). Promoted Ni–Co–Al₂O₃ nanostructured catalysts for CO₂ methanation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(4), 2399–2411.
- UCAR. (n.d.). Hurricanes | Center for Science Education.
- Valinejad Moghaddam, Shima, Mehran Rezaei, Fereshteh Meshkani, and Reihaneh Darouhegi. 2018. "Carbon Dioxide Methanation over Ni- M/Al₂O₃ (M: Fe, CO, Zr, La and Cu) Catalysts Synthesized Using the One- Pot Sol-Gel Synthesis Method." *International Journal of Hydrogen Energy* 43(34): 16522–33.
- Widi, R. K. (2018). *Pemanfaatan Material Anorganik: Pengenalan dan Beberapa Inovasi di bidang Penelitian* (p. 119).

- Yeo, C. E., Seo, M., Kim, D., Jeong, C., Shin, H. S., & Kim, S. (2021). Optimization of operating conditions for CO₂ methanation process using design of experiments. *Energies*,
- Yu, J., Yu, J., Shi, Z., Guo, Q., Xiao, X., Mao, H., & Mao, D. (2019). The effects of the nature of TiO₂ supports on the catalytic performance of Rh-Mn/TiO₂ catalysts in the synthesis of C₂ oxygenates from syngas. *Catalysis Science and Technology*, 9(14), 3675–3685.
- Yu, T., Niu, L., & Iwahashi, H. (2020). High-Pressure Carbon Dioxide Used for Pasteurization in Food Industry. *Food Engineering Reviews*, 12(3), 364–380
- 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.