

## Pengaruh Variasi Temperatur dan Promotor Zn terhadap Konversi Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>) Menggunakan Katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Mayra Novariana\*, Robert Junaidi, Apri Mujiyanti

Jurusan Teknik kimia Program Studi Teknologi Kimia Industri Politeknik Negeri Sriwijaya  
Politeknik Negeri Sriwijaya, Jl. Sriwijaya Negara, Bukit Besar, Kec. Ilir Barat I.

Kota Palembang, Sumatera Selatan - 30139

\*E-mail: mayra031107@gmail.com

### Abstract

---

**Article history:**

Received: 02-10-2025

Accepted: 31-10-2025

Published: 21-12-2025

**Keywords:**

carbon dioxide;

catalyst Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;

methanation;

methane;

zinc promoter.

*The ever-increasing need for fossil fuels, including natural gas, petroleum, and coal, to drive economic growth, has triggered a significant increase in carbon dioxide emissions. Methane is the most basic hydrocarbon compound, under standard temperature and pressure conditions, methane is a colorless and odorless gas. Nickel-based catalysts are the most widely used catalysts in the CO<sub>2</sub> methanation process because they have high activity and selectivity towards methane (CH<sub>4</sub>) formation. This study aims to optimize the conversion of carbon dioxide into methane gas using a Catalytic Batch Reactor with the help of a Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst with variations in temperature and NaOH flow rate. In this study, CO<sub>2</sub> is used as a raw material with a Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst and a Zn promoter. The Zn Promoter Mass and temperature will be regulated with variations. For methane gas analysis, a Multi Gas Detector Analyzer will be used. From this study, the results showed that the highest methane gas (CH<sub>4</sub>) was obtained at a temperature of 200°C with the addition of 15 grams of Zn promoter, which is 56.44%.*

---

### 1. Pendahuluan

Kebutuhan yang terus meningkat terhadap pemakaian bahan bakar fosil, termasuk gas alam, minyak bumi, dan batubara, untuk mendorong pertumbuhan ekonomi, telah memicu peningkatan signifikan dalam emisi karbon dioksida[1]. Hal ini menegaskan pentingnya upaya untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dan beralih ke sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan guna mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan[2].

Upaya untuk mengurangi emisi CO<sub>2</sub>, salah satunya adalah dengan memanfaatkan CO<sub>2</sub> sebagai bahan baku dalam produksi metana. Pendekatan ini tidak hanya membantu mengurangi jumlah karbon dioksida yang dilepaskan ke atmosfer, tetapi juga mengubahnya menjadi senyawa yang memiliki nilai ekonomi[3].

Reaksi Sabatier atau yang dikenal sebagai reaksi metanasi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) adalah reaksi eksotermik yang melibatkan reaksi antara hidrogen dan karbon dioksida untuk menghasilkan metana dengan air sebagai produk sampingan[4].

Secara termodinamika, proses metanasi paling efektif dilakukan pada suhu rendah, umumnya antara 200-450°C[5].

Pada suhu tinggi tersebut, proses metanasi cenderung menimbulkan dampak negatif terhadap stabilitas katalis, seperti pembentukan kokas yang dapat menurunkan umur katalis serta menyebabkan peningkatan konsumsi energi[6].

Aditya R dkk., telah meneliti metanasi dengan variasi temperatur dan jumlah promotor Zn. Hasil Produksi gas metana tertinggi secara in situ tercatat pada sampel ke-15, dengan hasil sebesar 13,56% pada suhu 60°C dan massa promotor sebesar 5,5 gram. Peningkatan massa katalis Zn serta suhu reaksi berkontribusi terhadap peningkatan jumlah metana (CH<sub>4</sub>) yang dihasilkan[7].

Toluna dkk., telah meneliti metanasi dengan variasi temperatur dan perlakuan katalis. Hasil Produksi gas metana tertinggi tercatat pada sampel ke-10, dengan hasil sebesar 50,56% pada suhu 120°C. Semakin tinggi suhu reaksi berkontribusi maka semakin besar peningkatan jumlah metana (CH<sub>4</sub>) yang dihasilkan[8].

Saputra dkk., telah meneliti metanasi dengan variasi temperatur. Hasil gas metana yang paling banyak dihasilkan dengan temperatur 150°C dengan massa katalis sebanyak 15 gram yaitu sebesar 25,71%. Semakin banyak massa katalis dan semakin

tinggi suhu maka gas metana yang dihasilkan semakin banyak[9].

Apriansyah dkk., telah meneliti menggunakan *Packed Flow Reactor Tipe Fixed Bed* untuk meningkatkan efisiensi metanasi CO<sub>2</sub> menggunakan katalis nikel dengan menggunakan variasi temperatur dan laju alir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai gas metana tertinggi terdapat pada temperatur 100°C dengan laju alir 0,1 L/min, dihasilkan gas metana sebesar 39,41%[10].

Berdasarkan uraian tersebut, terdapat dua permasalahan utama yang menjadi fokus penelitian ini, yaitu bagaimana hasil konversi karbon dioksida menjadi gas metana menggunakan *Catalytic Batch Reactor* dengan bantuan katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; dan bagaimana pengaruh variasi temperatur dan massa promotor Zn terhadap persentase konversi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) menjadi metana (CH<sub>4</sub>) melalui proses metanasi.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur dan massa promotor Zn terhadap persentase konversi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) menjadi metana (CH<sub>4</sub>) melalui proses metanasi.

Kebaruan penelitian ini dibandingkan dengan penelitian sebelumnya terletak pada modifikasi reaktor yang digunakan, yaitu dengan penambahan refluks kondensor. Penambahan refluks kondensor berfungsi untuk mengembunkan kembali uap yang keluar dari reaktor agar dapat dikembalikan ke dalam sistem reaksi. Mekanisme ini menyebabkan proses reaksi berlangsung secara lebih efisien karena mengurangi kehilangan bahan reaktan maupun produk yang mudah menguap, serta mempertahankan kestabilan volume reaksi. Penggunaan refluks kondensor dalam pengoperasian reaktor dapat dioperasikan pada suhu yang lebih tinggi dibandingkan penelitian sebelumnya tanpa menyebabkan kehilangan zat atau peningkatan tekanan yang berlebihan. Dengan demikian, efisiensi reaksi meningkat dan persentase konversi CO<sub>2</sub> menjadi CH<sub>4</sub> yang dihasilkan menjadi lebih tinggi.

## 2. Metode

### 2.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan selama dua bulan, yaitu dari Mei hingga Juni 2025, di Laboratorium Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang.

### 2.2 Bahan dan Peralatan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah gas CO<sub>2</sub>, NaOH, larutan deionisasi Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Zn powder. Sedangkan peralatan yang digunakan adalah seperangkat alat *catalytic batch reactor*, labu ukur 250 mL, neraca analitik, gelas kimia, pipet ukur, spatula, bola karet, batang pengaduk, kaca arloji, *furnace*, *gas analyzer*.

### 2.2 Prosedur Penelitian

#### 2.2.1 Preparasi Larutan NaOH 4M

Preparasi larutan NaOH 4M dilakukan dengan menimbang padatan Natrium Hidroksida (NaOH) sebanyak 40 gram, kemudian ditambahkan aquadest dan dimasukkan ke dalam labu ukur 250 mL sampai tanda batas dan larutan dihomogenkan.

#### 2.2.2 Proses Aktivasi Katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Sebanyak 50 gram katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ditimbang dan secara perlahan ditambahkan larutan NaOH 4 M, lalu dipanaskan selama 2 jam di atas penangas air dengan suhu 110°C. Setelah proses pemanasan, katalis dicuci dengan air deionisasi dan kemudian dikeringkan menggunakan vakum. Selanjutnya, katalis yang telah di vakum, dibakar pada *furnace* dengan suhu 600 °C dalam waktu 4 jam.

#### 2.2.3 Prosedur Pengoperasian

Prosedur pengoperasian dilakukan dengan menyiapkan seluruh peralatan dan bahan yang dibutuhkan untuk proses metanasi. Kemudian dimasukkan katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ke dalam reaktor dan menambahkan logam Zn sesuai dengan variabel yaitu sebesar 10 gram, 12,5 gram, dan 15 gram. Temperatur reaktor diatur pada suhu 170°C, 180°C, 190°C, dan 200°C. Laju alir gas CO<sub>2</sub> yang digunakan sebesar 0,1 L/min. Setelah temperatur mencapai set point, pompa dinyalakan dan katup dibuka untuk mengalirkan NaOH 4M sebanyak 250 mL ke dalam reaktor, dan ditunggu hingga bereaksi. Kemudian gas CO<sub>2</sub> dialirkan dengan memperhatikan tekanan. Setelah reaksi berlangsung selama satu jam, katup kondensor refluks dan katup produk dibuka. Gas yang dihasilkan kemudian dianalisa menggunakan alat *gas analyzer*. Penelitian dilakukan pada variasi temperatur dan logam Zn yang telah ditetapkan.

### 2.2.4 Analisis Hasil Percobaan

Analisis kandungan senyawa gas dilakukan dengan menggunakan peralatan *multi gas detector analyzer*, yang berfungsi untuk mengidentifikasi kandungan dalam gas. Alat ini mampu melakukan analisis secara langsung terhadap hasil proses metanasi CO<sub>2</sub>, dengan *output* berupa persentase volume (% volume). Gas yang dapat terdeteksi meliputi gas yang tidak berbahaya, seperti CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, dan N<sub>2</sub>, serta gas berbahaya seperti CO, HC, NO<sub>x</sub>, dan H<sub>2</sub>S.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Hasil Penelitian

Hasil penelitian, diperoleh data analisis gas yang seperti tercantum dalam Tabel 1, yang merupakan hasil pengamatan terhadap variasi temperatur dan promotor Zn. Proses pengukuran dilakukan menggunakan alat *multi gas detector analyzer*. Melalui analisis ini dapat diketahui sejauh mana pengaruh perubahan temperatur dan promotor Zn terhadap jumlah gas metana (CH<sub>4</sub>) yang dihasilkan. Data ini penting untuk menentukan kondisi operasi yang paling optimal dalam proses metanasi.

Tabel 1. Hasil penelitian

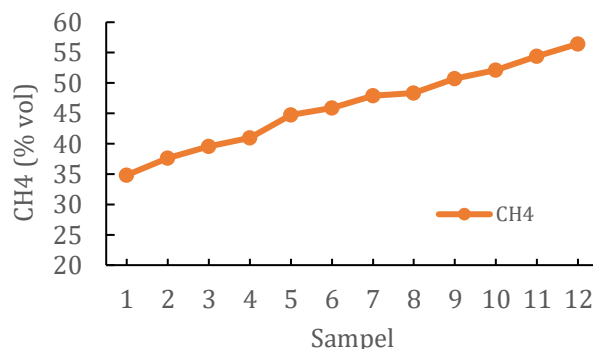
No.	Variabel		Hasil pemeriksaan (% Volume)		
	Temp (°C)	Promotor Zn (gr)	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
1	170	10	34,82	61,92	1,96
2		12,5	37,66	59,22	1,87
3		15	39,58	57,40	1,81
4	180	10	40,95	56,10	1,77
5		12,5	44,76	52,48	1,66
6		15	45,88	51,41	1,62
7	190	10	47,92	49,48	1,56
8		12,5	48,37	49,05	1,55
9		15	50,67	46,86	1,48
10	200	10	52,09	45,51	1,44
11		12,5	54,36	43,36	1,37
12		15	56,44	41,38	1,31

### 3.1 Pembahasan

#### 3.1.1 Produksi Hasil Gas Metana (CH<sub>4</sub>)

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hasil % konversi gas metana (CH<sub>4</sub>) dari gas karbondioksida (CO<sub>2</sub>). Proses metanasi merupakan reaksi konversi secara katalitik yang memanfaatkan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan gas hidrogen (H<sub>2</sub>) untuk menghasilkan metana (CH<sub>4</sub>) dan air (H<sub>2</sub>O) sebagai produk utama. Efisiensi dari reaksi ini dipengaruhi oleh beberapa parameter operasi, diantaranya temperatur reaksi, tekanan, waktu proses, serta

penambahan promotor seng (Zn) yang berperan dalam meningkatkan aktivitas katalis. Pada reaksi metanasi CO<sub>2</sub> ini digunakan 2 variasi yaitu temperatur 170, 180, 190, 200°C dan massa promotor Zn 10 gram, 12,5 gram dan 15 gram.



Gambar 1. Hasil gas metana (CH<sub>4</sub>) yang terkonversi

Pada titik awal sampel yaitu sampel 1 dengan temperatur 170 °C dan massa promotor Zn sebesar 10 gram terlihat gas metana yang terkonversi sebesar 34,82% kemudian mengalami peningkatan secara bertahap pada setiap sampel selanjutnya. Pada sampel ke 12 dengan menggunakan suhu 200 °C dan massa promotor Zn sebesar 15 gram menghasilkan gas metana yang terkonversi itu sebesar 56,44%, hal ini menunjukkan kondisi operasi yang optimum. Hasil yang dicapai ini relatif lebih tinggi dibandingkan beberapa penelitian sebelumnya.

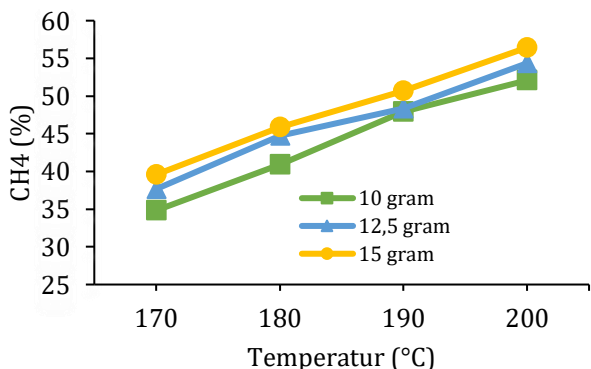
Sebagai perbandingan, penelitian Aditya R dkk., melaporkan bahwa konversi gas metana hanya sebesar 13,56% pada suhu reaksi rendah yaitu 60°C [7]. Sementara itu, penelitian yang dilakukan oleh Apriansyah dkk., menunjukkan bahwa peningkatan suhu reaksi hingga 100°C menghasilkan gas metana sebesar 39,41% [10]. Toluna dkk., berhasil memperoleh kadar metana (CH<sub>4</sub>) sebesar 50,56% pada suhu 120°C [8]. Jika dibandingkan dengan ketiga penelitian tersebut, hasil yang diperoleh membuktikan bahwa peningkatan suhu reaksi hingga 200°C dan penambahan promotor Zn memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan efisiensi konversi CO<sub>2</sub> menjadi CH<sub>4</sub>.

#### 3.1.2 Pengaruh Temperatur dan Massa Promotor Zn terhadap Gas Metana(CH<sub>4</sub>)

Pengaruh temperatur dan massa promotor Zn terhadap gas metana (CH<sub>4</sub>) diperlihatkan pada Gambar 2. Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa jumlah metana (CH<sub>4</sub>) yang

dihasilkan berbanding lurus dengan temperatur.

Energi panas yang dihasilkan pada suhu tinggi mampu mempercepat laju reaksi metanasi sekaligus dapat membantu mempertahankan stabilitas dan aktivitas katalis selama reaksi berlangsung[11]. Penambahan promotor juga dapat memperkuat ikatan antara nikel dan alumina pada permukaan katalis[12].



Gambar 2. Pengaruh temperatur dan massa promotor Zn terhadap gas metana (CH<sub>4</sub>)

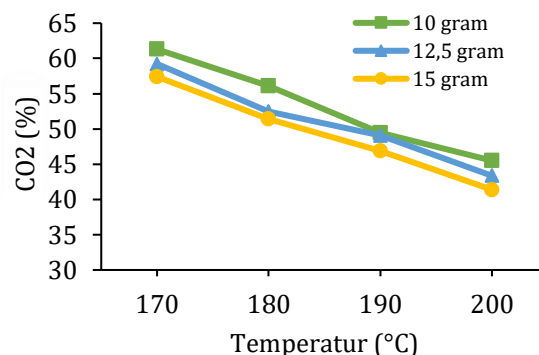
Pada grafik terlihat bahwa nilai konversi metana tertinggi diperoleh pada suhu 200 °C dengan penambahan promotor Zn sebanyak 15 gram, yaitu sebesar 56,44%. Hal ini sejalan dengan penelitian Zhong dkk., yang menyatakan bahwa peningkatan gas metana yang mencapai 98% tersebut menggunakan suhu yang tinggi yaitu sebesar 300 °C dalam rentang waktu 4 jam[13].

Melati dkk., mendapatkan bahwa semakin besar jumlah promotor Zn yang ditambahkan, maka semakin tinggi pula produksi gas CH<sub>4</sub> yang dihasilkan[14]. Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kenaikan suhu reaksi hingga 200°C disertai dengan penambahan promotor Zn sebanyak 15 gram memberikan kenaikan persentase sebesar 6,71% yaitu menjadi 56,44% terhadap peningkatan efisiensi konversi CO<sub>2</sub> menjadi CH<sub>4</sub>.

### 3.1.3 Pengaruh Temperatur dan Massa Promotor Zn terhadap Sisa Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>)

Pengaruh temperatur dan massa promotor Zn terhadap sisa Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) diperlihatkan pada Gambar 3. Berdasarkan Gambar 3 dapat diamati bahwa terjadi penurunan persentase gas CO<sub>2</sub> sisa, yang menunjukkan hubungan berbanding terbalik dengan peningkatan konsentrasi dalam proses pembentukan gas metana. Semakin besar jumlah

katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan promotor Zn yang digunakan, maka jumlah gas metana yang terbentuk serta gas CO<sub>2</sub> yang bereaksi juga akan semakin meningkat.



Gambar 3. Pengaruh temperatur dan massa promotor Zn terhadap sisa karbon dioksida (CO<sub>2</sub>).

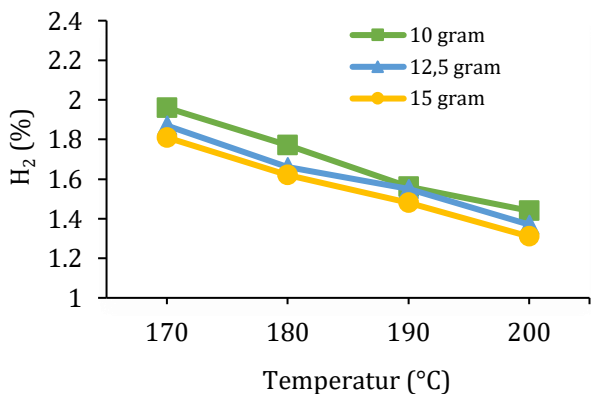
Pada grafik dapat terlihat bahwa gas CO<sub>2</sub> yang tidak terkonversi tertinggi pada temperatur 170 °C dengan massa promotor Zn sebanyak 10 gram yakni 61,92% dengan katalis sebanyak 50 gram.

Berdasarkan penelitian Liu dkk., menyatakan bahwa untuk dapat mencapai tingkat konversi CO<sub>2</sub> tertinggi dan hasil metana (CH<sub>4</sub>) yang maksimal, katalis yang berbasis Ni membutuhkan suhu aktivasi yang tinggi tetapi suhu reaksi yang terlalu tinggi dapat memberikan dampak negatif terhadap struktur katalis dan menyebabkan peningkatan konsumsi energi[15].

Menurut penelitian Toluna dkk., menyatakan bahwa gas CO<sub>2</sub> sisa tertinggi diperoleh pada suhu 110°C yaitu sebesar 69,00%, dan menunjukkan penurunan gas CO<sub>2</sub> sisa seiring dengan kenaikan temperatur [8]. Hal ini dibuktikan berdasarkan kesetimbangan termodinamika, kenaikan temperatur akan menyebabkan penurunan jumlah gas CO<sub>2</sub> dikarenakan kesetimbangan reaksi bergeser ke arah CH<sub>4</sub>[16].

### 3.1.4 Pengaruh Temperatur dan Massa Promotor Zn terhadap Hidrogen (H<sub>2</sub>)

Pengaruh temperatur dan massa promotor Zn terhadap Hidrogen (H<sub>2</sub>) ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengaruh temperatur dan massa promotor Zn terhadap Hidrogen (H<sub>2</sub>)

Berdasarkan Gambar 4 dapat diamati bahwa hubungan antara temperatur dan promotor Zn terhadap H<sub>2</sub> yang tidak bereaksi mengalami penurunan. Dari Gambar 4 terlihat bahwa gas H<sub>2</sub> tertinggi dihasilkan pada temperatur 170 °C dengan massa promotor Zn sebanyak 10 gram yaitu sebesar 1,96% dengan jumlah katalis sebanyak 50 gram. Hal ini mengindikasikan bahwa reaksi di dalam tabung reaktor menghasilkan gas H<sub>2</sub>, namun sebagian gas H<sub>2</sub> tersebut tidak bereaksi lebih lanjut karena kurang optimalnya proses adsorpsi gas H<sub>2</sub> pada permukaan logam Ni[13].

Kajian yang dilakukan Chein & Wang, menunjukkan bahwa keberadaan H<sub>2</sub> yang tidak ikut bereaksi ini disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain sebagian H<sub>2</sub> tidak terserap oleh katalis untuk bereaksi, efisiensi H<sub>2</sub> yang rendah akibat suhu reaktor yang masih relatif rendah, pencapaian efisiensi H<sub>2</sub> maksimum umumnya terjadi pada suhu sekitar 400 °C[17].

Hal ini sejalan dengan penelitian Aditya R dkk., yang mendapatkan kuantitas gas H<sub>2</sub> yang dihasilkan menunjukkan pola fluktuatif. Pada temperatur 40°C, terjadi peningkatan produksi gas H<sub>2</sub> seiring dengan bertambahnya massa katalis Zn. Namun, pada temperatur 50°C, jumlah gas H<sub>2</sub> yang terbentuk justru mengalami penurunan. Selanjutnya, pada temperatur 60°C, produksi gas H<sub>2</sub> kembali menunjukkan tren peningkatan[7].

Hasil penelitian yang dilakukan sesuai dengan penelitian sebelumnya, gas H<sub>2</sub> yang terbentuk lebih sedikit dari pada peneliti sebelumnya. Sisa gas H<sub>2</sub> yang tidak terkonversi akan semakin menurun (berkurang) karena proses metanasi yang lebih lama dan temperatur yang tinggi membuat gas H<sub>2</sub> yang terbentuk banyak yang ikut bereaksi menjadi gas metana

(CH<sub>4</sub>).

Data penelitian menunjukkan bahwa konversi CO<sub>2</sub> menjadi CH<sub>4</sub> paling optimal diperoleh sebesar 56,44% pada suhu 200°C dengan penggunaan promotor Zn sebanyak 15 gram. Peningkatan konversi CO<sub>2</sub> ini dipengaruhi oleh kenaikan suhu reaksi serta massa promotor Zn yang berada pada kondisi optimal. Selain itu, peningkatan efisiensi juga disebabkan oleh modifikasi reaktor dengan penambahan refluks kondensor, yang berfungsi mengembunkan kembali uap yang terbentuk selama reaksi sehingga dapat dialirkan kembali ke dalam reaktor. Mekanisme ini menjaga jumlah reaktan tetap stabil, menciptakan sistem reaksi tertutup yang lebih efisien dan terkendali, serta memungkinkan proses dijalankan pada suhu tinggi tanpa kehilangan bahan maupun peningkatan tekanan yang berlebihan.

Penambahan refluks kondensor tidak hanya meningkatkan efisiensi sistem, tetapi juga mengoptimalkan kinetika reaksi metanasi melalui pengendalian fasa uap dan pencapaian keseimbangan termodinamika yang lebih baik. Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, sistem reaktor hasil modifikasi ini menunjukkan persentase konversi CO<sub>2</sub> yang lebih tinggi, menandakan bahwa penerapan refluks kondensor memberikan dampak positif terhadap performa reaksi metanasi secara keseluruhan.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan bahwa proses metanasi gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) menggunakan katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan promotor Zn diperoleh nilai % konversi metana tertinggi sebesar 56,44% pada temperatur 200°C dengan massa promotor Zn sebanyak 15 gram. Variasi temperatur reaksi dan massa promotor Zn berpengaruh signifikan terhadap peningkatan persentase konversi CO<sub>2</sub> menjadi CH<sub>4</sub>. Peningkatan temperatur dari 170°C hingga 200°C dan penambahan massa promotor Zn dari 10 gram hingga 15 gram memberikan hasil kenaikan persentase konversi metana tertinggi sebesar 56,44%, penurunan gas CO<sub>2</sub> sisa, serta penurunan gas H<sub>2</sub> yang tidak terkonversi.

#### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Laboratorium Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya yang telah menyediakan

fasilitas dan bantuan teknis, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

#### Daftar Pustaka

- [1] Brown, P. T. & Saunders, H., 2020. *Approximate calculations of the net economic impact of global warming mitigation targets under heightened damage estimates*. PLoS One, Vol. 15, No. 10, p. e0239520.
- [2] Palupi, S., Galih, P., Muchtar, M., & Sihombing, P. R., 2023. *Pengaruh pajak karbon, penggunaan bahan bakar fosil, dan pertumbuhan pdb terhadap emisi karbon*. Journalku, Vol. 3, pp. 119-127.
- [3] Dwisari, V., Sudarti, S., & Yushardi, Y., 2023. *Pemanfaatan energi matahari: Masa depan energi terbarukan*. OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika, Vol. 7, No. 2, pp. 376-384.
- [4] Krisnandi, Y., Abdullah, I., Prabawanta, I., & Handayani, M., 2020. *In-situ hydrothermal synthesis of nickel nanoparticle/reduced graphene oxides as catalyst on co2 methanation*. in *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2242, No. 1: AIP Publishing LLC.
- [5] Wijaya, F. M., Meidinariasty, A., & Zikri, A., 2024. *Pembuatan gas metana (CH<sub>4</sub>) dari gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) menggunakan katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan penambahan co-catalyst NaOH dan KOH*. Teknik Sains: Jurnal Ilmu Teknik, Vol. 9, No. 1, pp. 102-107.
- [6] Lee, W. J. *et al.*, 2021. *Recent trend in thermal catalytic low temperature CO<sub>2</sub> methanation: A critical review*. Catalysis today, Vol. 368, pp. 2-19.
- [7] Aditya, A. R., Junaidi, R., & Ramayanti, C., 2023. *Metanasi CO<sub>2</sub> menggunakan katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan variasi temperatur dan zn sebagai promotor*. DE FACTO: Journal Of International Multidisciplinary Research, Vol. 1, No. 02, pp. 106-118.
- [8] Toluna, Y., Junaidi, R., & Zamhari, M., 2025. *Pengaruh temperatur terhadap pembentukan metana dari CO<sub>2</sub> dengan Zn dan katalis ni/al<sub>2</sub>o<sub>3</sub>*. Jurnal Inovator, Vol. 8, No. 1, pp. 6-8.
- [9] Parega, S., Junaidi, R., Nugroho, D. H., & Niawanti, H., 2024. *The ability of the Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst in the CO<sub>2</sub> methanation process in terms of variations in co2 flow rate and catalyst*. Konversi, Vol. 13, No. 2.
- [10] Apriyansah, A., Yerizam, M., & Hasan, A., 2024. *Pengembangan packed flow reactor tipe fixed bed untuk meningkatkan efisiensi metanasi CO<sub>2</sub> menggunakan katalis nikel*. Innovative: Journal Of Social Science Research, Vol. 4, No. 5, pp. 1920-1928.
- [11] Fan, W. K. & Tahir, M., 2021. *Recent trends in developments of active metals and heterogenous materials for catalytic CO<sub>2</sub> hydrogenation to renewable methane: A review*. Journal of environmental chemical engineering, Vol. 9, No. 4, p. 105460.
- [12] Daroughegi, R., Meshkani, F., & Rezaei, M., 2021. *Enhanced low-temperature activity of CO<sub>2</sub> methanation over ceria-promoted Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocatalyst*. Chemical Engineering Science, Vol. 230, p. 116194.
- [13] 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, Vol. 357, pp. 421-427.
- [14] Melati, R., Junaidi, R., & Zamhari, M., 2024. *Regeneration of Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst in CO<sub>2</sub> methanation*. Konversi, Vol. 13, No. 2.
- [15] Liu, J. *et al.*, 2013. *Enhanced low-temperature activity of CO<sub>2</sub> methanation over highly-dispersed Ni/TiO<sub>2</sub> catalyst*. Catalysis Science & Technology, Vol. 3, No. 10, pp. 2627-2633.
- [16] Gao, J. *et al.*, 2012. *A thermodynamic analysis of methanation reactions of carbon oxides for the production of synthetic natural gas*. RSC advances, Vol. 2, No. 6, pp. 2358-2368.
- [17] Chein, R.-Y. & Wang, C.-C., 2020. *Experimental study on CO<sub>2</sub> methanation over Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Ru-Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts*. Catalysts, Vol. 10, No. 10, p. 1112.