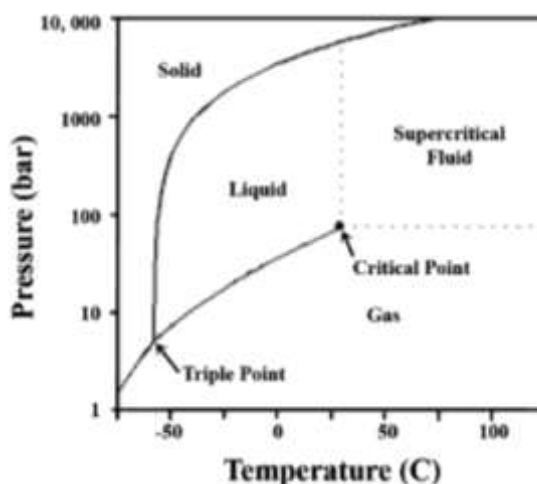


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karbon Dioksida (CO₂)

Karbon dioksida (CO₂) dengan Mr 44,010 adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak mudah terbakar pada suhu dan tekanan normal (UCAR). Karbon dioksida adalah molekul yang bersifat inert (tidak mudah bereaksi) dan tidak mudah teraktivasi pada temperature rendah (Jiang et al., 2018).

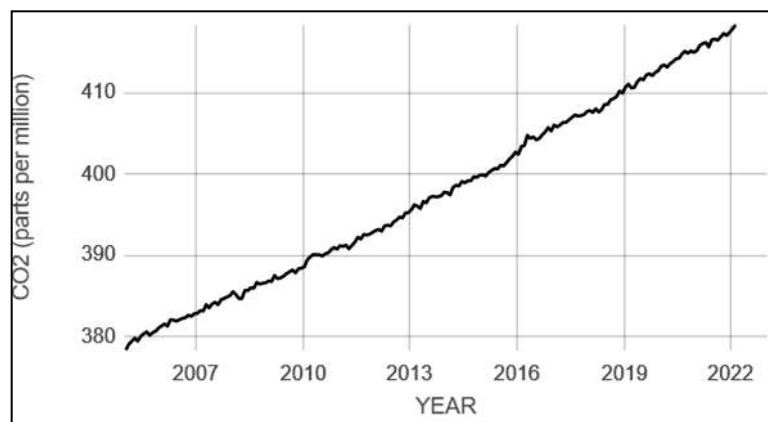


Gambar 2.1 Diagram P-T CO₂
(Sumber: T. Yu et al., 2020)

Karbon dioksida merupakan satu diantara banyak gas penyusun lapisan atmosfer bumi seperti halnya nitrogen, oksigen, dan argon (Subkhan, 2017). Lutgens (1979) dalam Skripsi Subkhan (2017) memperinci bahwa karbon dioksida berperan penting karena dapat menyerap radiasi matahari dengan sangat efisien. Selain itu, konsentrasi gas CO₂ di atmosfer terus meningkat tiap tahunnya yang dipengaruhi oleh aktivitas manusia terutama dari pembakaran bahan bakar fosil, minyak dan gas alam. Kenaikan konsentrasi CO₂ di atmosfer dapat dilihat pada Gambar 2.2 yang sebesar 418 ppm per Februari 2022.

Meningkatnya konsumsi bahan bakar fosil, berdampak langsung pada peningkatan produksi karbon dioksida. Hal ini adalah salah satu faktor penyebab fenomena efek rumah kaca. Berdasarkan data IEA, emisi karbon dioksida (CO₂) terkait energi meningkat sebesar 6% pada tahun 2021 menjadi 36,3 miliar ton. Hal ini disebabkan karena ekonomi dunia pulih dari krisis Covid-19 dengan bergantung pada batu bara. Emisi CO₂ dari pembakaran energi dan proses industri

menyumbang hampir 89% dari emisi gas rumah kaca sektor energi tahun 2021, sedangkan emisi CO₂ dari pembakaran gas menyumbang 0,7%.

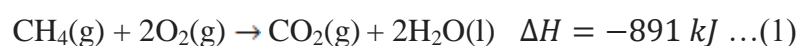


Gambar 2.2. Grafik konsentrasi CO₂ di atmosfer
(Sumber: NASA, 2022)

2.2 Metana

Metana (CH₄) dengan massa molar 16,043 adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak beracun namun mudah terbakar dan berbahaya (Chembk, 2022). Metana memiliki titik didih -285°F pada 760 mmHg, titik leleh -296°F (USCG,1999), titik nyala -306°F dan kelarutan 3,5 ml/100ml pada 63°F (NTP,1992). Dalam industri kimia, metana merupakan bahan baku untuk pembuatan metanol (CH₃OH), formaldehida (CH₂O), nitromethane (CH₃NO₂), kloroform (CH₃Cl), karbon tetraklorida (CCl₄), dan beberapa freon. Metana juga digunakan dalam pembuatan bahan kimia lain dan sebagai penyusun bahan bakar, gas alam.

Sebagai komponen utama gas alam, metana adalah sumber bahan bakar utama. Pembakaran satu molekul metana dengan oksigen akan melepaskan satu molekul CO₂ (karbondioksida) dan dua molekul H₂O (air), yang lebih jelasnya dapat dilihat pada persamaan (1), (Keshavarz, 2018). Energi yang dilepaskan oleh pembakaran metana, dari gas alam, digunakan langsung untuk memanaskan rumah dan bangunan komersial. Hal ini juga digunakan dalam pembangkit tenaga listrik.



Pada penelitian kali ini, metana adalah produk yang akan dihasilkan. Kemurnian CH₄ yang dihasilkan menjadi pertimbangan yang sangat penting, hal

ini dikarenakan berpengaruh terhadap nilai kalor (panas) yang dihasilkan. Sehingga CH_4 yang dihasilkan perlu dilakukan pemurnian terhadap komponen-komponen yang lain. Dalam hal ini komponen yang berpengaruh terhadap nilai kalor (panas) adalah CO_2 . Keberadaan CO_2 dalam gas CH_4 sangat tidak diinginkan, hal ini dikarenakan semakin tinggi kadar CO_2 dalam CH_4 maka akan semakin menurunkan nilai kalor CH_4 dan sangat mengganggu dalam proses pembakaran. Hal ini menyebabkan kemurnian CH_4 menjadi rendah. Jika CH_4 dimurnikan atau dibersihkan dari pengotor secara baik, ia akan memiliki karakteristik yang sama dengan gas alam (Ngamel & Uwar, 2020).

2.3 Metanasi Karbon Dioksida (CO_2)

Hidrogenasi karbon dioksida menjadi metana atau metanasi karbon dioksida atau juga dikenal sebagai reaksi Sabatier adalah reaksi eksotermik dimana hidrogen dan karbon dioksida bereaksi membentuk metana dan air sebagai produk sampingnya (Krisnandi et al., 2020). Reaksi ini pertama kali diusulkan oleh Paul Sabatier dan Senderens pada tahun 1902 yang ditunjukkan pada persamaan (2) dan persamaan (3). Hidrogen yang dibutuhkan untuk reaksi ini dihasilkan dari sumber energi terbarukan (Shafiee et al., 2022).



Elektrolisis air adalah salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk menghasilkan hidrogen dan CO_2 dapat dengan mudah diperoleh kembali dari beberapa proses industri, seperti pembakaran biomassa dan gasifikasi, fasilitas biogas, pembangkit listrik, kilang minyak dan tempat pembakaran semen (Frontera et al., 2017). Metana yang dihasilkan terkadang dilambangkan dengan *synthetic* atau *Substitute Natural Gas* (SNG) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar hijau dan diinjeksikan ke jaringan pipa gas alam yang ada (Garbarino et al., 2019).

Metanasi CO_2 adalah reaksi eksotermik sedangkan hidrogenasi CO_2 menjadi CO adalah reaksi endotermik. Menurut termodinamika, kisaran suhu untuk percobaan dalam penelitian ini dijaga jauh di bawah 700°K untuk mendukung metanasi CO_2 dan menjauhi pembentukan CO (Loder et al., 2020).

Gambar 2.3 menunjukkan fraksi mol CH_4 , H_2O dan produk sampingan dalam kesetimbangan termodinamika tergantung pada suhu dan tekanan yang berbeda dengan komposisi molar awal 80% H_2 dan 20% CO_2 . Pada grafik tersebut dapat disimpulkan CH_4 mengalami peningkatan tekanan. Pembentukan CO sebagai produk samping juga ditekan dengan penurunan suhu dan peningkatan tekanan, sedangkan pembentukan hidrokarbon (C_nH_{2n} dan $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ dengan $2 \leq n \leq 5$) turun dengan penurunan suhu dan tekanan (Ghaib & Ben-Fares, 2018).

Ghaib & Ben-Fares (2018) menerangkan bahwa pembentukan karbon dapat menyebabkan pengotoran permukaan katalis dan penyumbatan pori-pori katalis. Secara termodinamika, karbon terbentuk di bawah rasio stoikiometri H_2 ke CO_2 . Gambar 2.4 menunjukkan pengaruh suhu dan rasio awal H_2 ke CO_2 (H/C) saat pembentukan karbon pada tekanan 10 bar menurut termodinamika. Dapat dilihat bahwa pembentukan karbon secara termodinamika ditekan dengan peningkatan suhu dan rasio H_2 ke CO_2 . Penelitian yang telah dilakukan oleh Zhong et al., (2019) merupakan metode baru dalam metanasi CO_2 , yakni secara *in situ*. Air digunakan sebagai sumber hidrogen dan logam yang melimpah di bumi (Zn atau Fe) digunakan sebagai reduktor yang dapat dihasilkan kembali. Studi mekanistik menunjukkan bahwa pembentukan metana dari HCO_3^- atau CO_2 mengikuti jalur $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_2 \rightarrow \text{HCOOH} \rightarrow \text{CH}_4$, yang lebih jelasnya dapat dilihat pada persamaan (4).



2.4 Katalis

Katalis adalah sesuatu materi atau bahan/zat yang dapat meningkatkan laju reaksi kimia untuk mencapai kesetimbangan, dimana katalis terlibat dalam reaksi secara tidak permanen. Meskipun katalis dapat meningkatkan laju reaksi, katalis tidak dapat digunakan untuk mengawali suatu reaksi yang secara termodinamika tidak mungkin terjadi (hanya reaksi-reaksi spontan yang dapat dikatalisasi, sedangkan reaksi nonsontan tidak) (Trisunaryanti, 2018). Secara sederhana, katalis dibagi menjadi dua jenis berdasarkan kesamaan fase dengan reaktan dan produk, yaitu katalis homogen dan katalis heterogen. Katalis homogen adalah kondisi dimana katalis berada pada fase yang sama dengan reaktan dan produk, sedangkan katalis heterogen adalah kebalikannya, kondisi dimana katalis berada

pada fase yang berlainan dengan reaktan dan produk. Pada system katalis heterogen ini, katalisis terjadi melalui difusi dan penyerapan/adsorpsi molekul reaktan pada permukaan katalis (Widi, 2018).

Reaksi metanasi CO₂ menguntungkan karena dapat digunakan pada suhu rendah antara 25°C dan 400°C, namun hidrogenasi karbon dioksida hanya dapat dicapai dengan katalis yang efisien (Fan & Tahir, 2021). Katalis dalam metanasi CO₂ diharapkan memberikan aktivitas yang tinggi pada suhu rendah untuk menghindari pembentukan karbon monoksida. Karena metanasi CO₂ sangat eksotermik, maka unit pemulihan panas harus diterapkan dalam prosesnya (Loder et al., 2020).

Menurut Utami (2019), terdapat berbagai kriteria dalam pemilihan katalis yang baik, yakni :

1. Aktivitas

Aktivitas merupakan kemampuan suatu katalis untuk mengkonversi reaktan menjadi suatu produk yang diinginkan.

2. Selektivitas

Selektivitas adalah ukuran katalis dalam mempercepat reaksi dalam pembentukan suatu produk.

3. Stabilitas

Stabilitas merupakan lamanya katalis memiliki aktivitas dan selektivitas pada keadaan seperti semula

4. Hasil (*yield*)

Jumlah produk tertentu yang terbentuk untuk setiap satuan reaktan yang dikonsumsi.

5. Kemudahan diregenerasi

Artinya proses pengembalian aktivitas dan selektivitas katalis seperti semula.

6. Toksisitas katalis

Pemilihan katalis harus diperhatikan sifat toksik katalis tersebut. Suatu katalis yang bersifat toksik akan membahayakan dalam penggunaannya

Katalis homogen maupun katalis heterogen banyak digunakan dalam metanasi Karbon Dioksida. Pada penelitian kali ini, digunakan katalis heterogen. Katalis homogen memang menunjukkan aktivitas dan selektivitas yang memuaskan, namun pemulihan dan regenerasi masih menjadi masalah untuk metanasi Karbon Dioksida (Aghayan et al., 2017). Katalis Nikel, Rhodium dan Rutenium adalah beberapa konstituen katalitik aktif yang paling banyak digunakan. Al_2O_3 , MgO , SiO_2 , CeO_2 , ZrO_2 , TiO_2 , Nb_2O_5 dan kombinasi katalis dari konstituen lainnya telah banyak diusulkan dan diteliti sebagai *support*. Salah satu komponen terpenting dalam katalis heterogen adalah *support* katalis. *Support* katalis merupakan komponen katalis yang memiliki luas permukaan yang tinggi, porositas, sifat-sifat mekanik, dan kestabilan yang baik (Alviany et al., 2018). Bahan *support* ini berperan penting dalam kinerja katalis heterogen, seringkali dengan meningkatkan aktivitas katalis melalui: dispersi logam katalis, interaksi dukungan logam, transfer electron antara logam dan *support* dan lainnya (Lee et al., 2021).

Kebanyakan katalis heterogen dapat mengalami *sintering* (penggabungan atau penggumpalan bahan) sampai batas tertentu ketika digunakan. *Sintering* komponen aktif dapat menimbulkan penurunan luas permukaan, dan kemudian mengurangi aktivitas katalis. Katalis logam yang didispersikan pada bahan pengemban menunjukkan resistansi yang lebih tinggi terhadap *sintering*. Pengemban dapat bertindak sebagai "*spacer*" (pemberi celah) fisik antara kristal atau komponen aktif katalis, dan jika ada pengemban yang cukup tersedia akan menghambat *sintering* terjadi. Dengan demikian, *support* memiliki banyak fungsi, antara lain:(a) mempertahankan luas permukaan komponen aktif tetap tinggi; (b) permukaan yang stabil di mana komponen aktif terdispersi sedemikian rupa sehingga *sintering* berkurang, (c) memberikan dampak pada kekuatan mekanik partikel katalis, (d) memberikan dampak pada stabilitas termal partikel katalis, (e) *inert*, (f) memberikan efek terhadap porositas, (g) aktivitas katalitik (idealnya, bahan pengemban seharusnya tidak memiliki aktivitas katalitik yang mengarah ke reaksi yang tidak diinginkan) (Widi, 2018).

Promoter didefinisikan sebagai zat yang meningkatkan aktivitas katalis, biasanya dengan peningkatan simultan dalam selektivitas atau efek stabilitas. Pada

prinsipnya, setiap aditif yang meningkatkan atau menghambat fungsi katalitik dapat digolongkan sebagai *promoter*. *Promoter* dirancang untuk membantu *support* atau komponen aktif. Salah satu contoh penting dari promosi *support* adalah untuk mengendalikan stabilitas. Dengan adanya *promoter*, *support* terlindungi dari segala gangguan dan perubahan jangka panjang. Kebanyakan *promoter* ditambahkan ke *support* untuk menghambat aktivitas yang tidak diinginkan seperti pembentukan kokas (Widi, 2018).

2.5 Nikel

Umumnya sebagian besar katalis heterogen pada metanasi CO_2 membutuhkan kondisi suhu tertentu untuk aktif pada selektivitas reaksi metanasi (Ashok et al., 2020). Diantara berbagai katalis logam yang telah diteliti, katalis Ni, Ru, Pd dan Rh terbukti memiliki aktivitas dan selektivitas yang tinggi terhadap metanasi Karbon Dioksida karena kemampuannya yang tinggi dalam memisahkan CO_2 . Nickel Nitrate Hexahydrate ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) adalah padatan kristal hijau dengan masa molar 290,79, titik lebur $56,7^\circ\text{C}$, titik didih $136,7^\circ\text{C}$, larut dalam air dan digunakan dalam elektroplating, keramik, pembuatan garam nikel dan produksi katalis (Chembk, 2020). Katalis Ni adalah katalis yang paling umum digunakan karena harganya yang murah dan selektivitasnya yang tinggi meskipun katalis ini sering mengalami deposisi kokas, sintering partikel dan interaksi dengan CO (Aghayan et al., 2017). Selain itu, katalis berbasis nikel juga banyak digunakan dalam aspek lain dari pengolahan bahan bakar, seperti metanasi CO, reformasi uap etanol, desulfurisasi dan denitrogenasi bahan bakar minyak (Guo et al., 2021). Al_2O_3 , MgO, ZrO_2 , TiO_2 , CeO_2 dan SiO_2 serta kombinasi Ni dengan katalis *support* lainnya telah banyak diusulkan dan diteliti (Loder et al., 2020).

Katalis Ni dapat mempertahankan aktivitas baik selama waktu reaksi yang lama dengan selektivitas CH_4 yang tinggi. Namun, pada suhu rendah sulit didapatkan konversi CO_2 yang tinggi karena memerlukan energi aktivasi yang tinggi (Chein & Wang, 2020). Metanasi suhu tinggi sering mengakibatkan pengaruh yang tidak diinginkan pada stabilitas (masalah kokas)/masa pakai katalis serta peningkatan konsumsi energi (Lee et al., 2021). Oleh karena itu,

penyelidikan ekstensif telah dilakukan untuk meningkatkan aktivitas katalitik katalis Ni pada suhu rendah.

2.6 Aluminium Oksida

Reaksi Sabatier adalah reaksi eksotermik yang telah banyak diusulkan dan diteliti dengan menggunakan konstituen katalitik seperti Katalis Nikel, Rhodium dan Rutenium yang didukung katalis *support* seperti Al_2O_3 , MgO , SiO_2 , CeO_2 , ZrO_2 , TiO_2 , Nb_2O_5 dan lainnya. Kombinasi antara konstituen katalitik dengan katalis *support* selalu menjadi tujuan pengembangan katalis karena interaksi antar keduanya secara signifikan mempengaruhi struktur dan kinerja reaksi dari katalis *support* (Wang et al., 2020).

Aluminium oksida adalah sebuah senyawa kimia dari aluminium dan oksigen dengan rumus kimia Al_2O_3 . Nama mineralnya adalah alumina dan nama ini banyak dipakai khususnya dalam bidang pertambangan, keramik dan teknik material. Aluminium oksida adalah bubuk kristal putih tidak berbau dan tidak larut dalam air. Metode yang berbeda memberikan modifikasi kristal yang berbeda. Aluminium oksida bersifat amfoter, dan digunakan dalam berbagai aplikasi kimia, industri dan komersil seperti sebagai adsorben, zat pengering, dan katalis, dan dalam pembuatan semen gigi dan refraktori.

Alumina (Al_2O_3) terdapat sebagai alumina hidrat dan alumina anhidrat. Alumina anhidrat, Al_2O_3 , terdapat dalam bentuk alumina stabil berupa α -alumina dan alumina metastabil yaitu, gamma alumina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$), delta alumina ($\delta\text{Al}_2\text{O}_3$), theta alumina ($\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$), kappa alumina ($\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$) dan chi alumina ($\chi\text{Al}_2\text{O}_3$), sedangkan hidratnya berada dalam bentuk aluminium hidroksida seperti gibsite, bayerit, boehmite dan diaspore. Aluminium hidroksida merupakan komponen utama di dalam bauksit, sehingga umumnya aluminium hidroksida dibuat dari bauksit, sedangkan alumina anhidrat dibuat dari dehidrasi aluminium hidroksida. Di alam alumina anhidrat juga terdapat sebagai mineral korundum.

Gamma aluminium oksida ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) banyak digunakan sebagai katalis dan adsorben. Hal ini dikarenakan katalis $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ memiliki luas permukaan yang besar ($150\text{-}300\text{ m}^2/\text{g}$), volume pori (3-12 nm). Selain itu, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ stabil dalam

proses pada suhu tinggi. γ - Al_2O_3 terbentuk melalui pemanasan pada suhu 500°C - 800°C (Zurohaina et al., 2020).

2.7 Besi

Besi (Fe) dengan nomor atom 26 merupakan padatan metalik mengkilap keabu-abuan dengan massa atom 55,854 g/mol. Besi memiliki titik lebur pada 1538°C dan titik didih pada 2861°C dengan kapasitas kalor $25,10 \text{ J}/(\text{mol}\cdot^\circ\text{K})$. Besi merupakan logam penting yang dapat dicampur dengan logam-logam lain dan karbon untuk membentuk baja dan selanjutnya sebagai bahan untuk pembuatan baja yang tidak berkarat (stainless steel) sebagai alat-alat pemotong, alat-alat rumah sakit, alat-alat laboratorium dan peralatan pelayanan makanan (Harahap, 2019). Besi juga dibutuhkan sebagai logam pada titik aktif (active site) untuk banyak jenis enzim-enzim redoks yang berhubungan dengan sel-sel pernapasan serta oksidasi dan reduksi (Lippard, S.J. and Berg, 1994).

Dalam konversi abiotik CO_2 menjadi organik, mineral (hematite, magnetit, olivine serpentinisasi, paduan Ni-Fe) telah digunakan sebagai katalis sebagai *promoter* konversi CO_2 (Zhong et al., 2019). Liang et al., (2019) telah menemukan bahwa semua katalis yang dimodifikasi Cr, Mn, Fe, Co, La, dan Ce disediakan dengan beberapa kekosongan oksigen, menjanjikan aktivitas katalitik yang lebih tinggi daripada katalis Ni- Al_2O_3 dengan peningkatan chemisorption dan aktivasi adsorpsi CO_2 . Katalis Ni-Fe/ Al_2O_3 menunjukkan kinerja katalitik terbaik karena penambahan Fe mengubah sifat fisik katalis dan meningkatkan jumlah pusat aktif permukaan yang terpapar (Lv et al., 2020).

Aktivitas katalitik suhu rendah dari katalis paduan Ni-Fe biasanya lebih tinggi daripada rekan referensi logam tunggal Ni, terutama pada tekanan yang lebih tinggi karena energi disosiasi CO_2 yang optimal. Bersamaan dengan penambahan Fe, stabilitas katalis, konversi CO_2 dan selektivitas CH_4 semuanya meningkat, menunjukkan bahwa Ni dan Fe memiliki efek sinergis. Dilihat dari mekanisme reaksinya, penambahan Fe dapat mempermudah pembentukan hidrokarbon, meningkatkan kapasitas adsorpsi CO_2 , dan mempercepat laju reaksi. Dilaporkan bahwa efek peningkatan rasio Ni/Fe pada reduksibilitas katalis menjadi jelas dan reduksibilitas katalis secara bertahap menjadi lebih baik dengan

peningkatan pemuatan Fe. Lingkungan elektronik yang sesuai dan sifat reduktif yang ditingkatkan dari Fe adalah faktor kunci dalam peningkatan kinerja katalitik suhu rendah terhadap metanasi CO₂.

2.8 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Metanasi CO₂

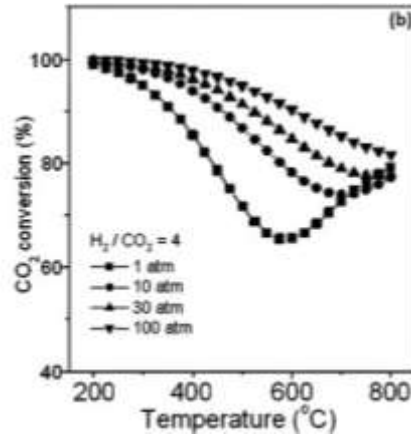
Metanasi karbon dioksida dalam prosesnya memiliki faktor-faktor yang mempengaruhinya, (Yeo et al., 2021) telah menginvestigasi beberapa faktor yang mempengaruhi metanasi karbon dioksida, yakni:

1. Temperatur

Katalis dalam metanasi CO₂ diharapkan memberikan aktivitas yang tinggi pada suhu rendah untuk menghindari pembentukan karbon monoksida. Karena metanasi CO₂ sangat eksotermik, maka unit pemulihan panas harus diterapkan dalam prosesnya (Loder et al., 2020). Temperatur reaksi rendah diinginkan untuk mencapai selektivitas CH₄ yang lebih tinggi. Oleh karena itu, penting untuk meningkatkan laju reaksi RWGS (*reversed water gas shift*) dan metanasi CO pada suhu rendah (Chein & Wang, 2020). Peningkatan temperatur menguntungkan untuk reaksi RWGS namun temperature yang tinggi juga memerlukan peningkatan stabilitas katalis dan dapat mengakibatkan deposisi karbon (Stangeland et al., 2017).

2. Tekanan

Menurut prinsip le Chatelier, metanasi karbon dioksida lebih disukai pada tekanan tinggi. Hasil perhitungan termodinamika menunjukkan bahwa tekanan yang lebih tinggi dan suhu yang lebih rendah lebih cocok untuk proses metanasi (Lv et al., 2020). Peningkatan tekanan hingga titik tertentu dapat meningkatkan efisiensi reaksi dalam rentang temperature umum (Yeo et al., 2021). Pengaruh tekanan pada konversi CO₂ dapat dilihat pada Gambar 2.5. Pada gambar tersebut terlihat dalam kisaran temperature 200-500°C, peningkatan tekanan efektif hanya sampai di titik tertentu dan peningkatan lebih lanjut kurang efektif. (Stangeland et al., 2017).



Gambar 2.3 Pengaruh tekanan pada konversi CO₂ pada suhu yang berbeda

3. Rasio H/C

Faktor fundamental untuk selektivitas produk adalah rasio H/C permukaan yang disesuaikan dengan penggunaan katalis. Peningkatan Rasio H/C dapat menghindari pengendapan karbon pada katalis karena hidrogen bereaksi dengan endapan karbon dan mencegah penonaktifan katalis (Li et al., 2018). Pengendapan karbon secara teoritis tidak terjadi jika rasio H/C sama dengan atau lebih tinggi dari rasio stoikiometri (Stangeland et al., 2017).

4. *Space velocity*

Space velocity adalah jumlah volume umpan reaktor pada kondisi tertentu yang dapat diperlakukan dalam satuan waktu yang ditunjukkan pada persamaan (5) (Levenspiel, 1999). *Space velocity* juga digunakan pada reaktor katalitik khususnya reaktor *three-phase fixed-beds* dan disebut sebagai *liquid hourly space velocity* (LHSV) untuk fase cair dan *gas hourly space velocity* (GHSV) untuk fase gas serta *Weight Hourly Space Velocity* (WHSV) untuk berat umpan yang mengalir per satuan berat katalis per jam.

$$s = \frac{1}{\tau} = \left(\frac{\text{number of reactor volumes of}}{\text{feed at specified conditions which}} \right) = [\text{time}^{-1}] \quad (5)$$

can be treated in unit time

Space velocity memiliki pengaruh terhadap konversi CO₂ dan selektivitas CH₄. Bertambahnya *space velocity* mempengaruhi konversi CO dan CO₂ menurun tajam (J. Yu et al., 2019).