

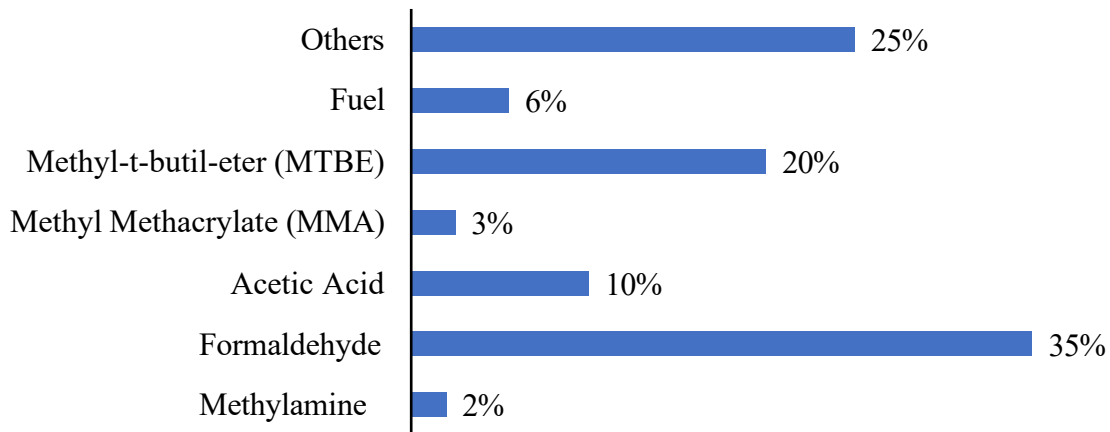
BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan industri di Indonesia semakin mengalami peningkatan kualitas maupun kuantitasnya khususnya industri kimia yang menghasilkan bahan jadi, bahan setengah jadi, atau bahan baku industri lain sehingga kebutuhan bahan baku maupun bahan pembantu mengalami peningkatan. Berdasarkan Peraturan Pemerintahan Republik Indonesia Nomor 14 Tahun 2015 tentang Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional (RIPIN) Tahun 2015- 2035 yang dibuat oleh Kementerian Perindustrian, industri kimia dasar berbasis migas dan batu bara yang menjadi pembangunan industri petrokimia hulu prioritas salah satunya adalah methanol (Kemenperin, 2015).

Methanol atau *methyl alcohol* (CH_3OH) adalah senyawa alkohol dengan rantai karbon pendek atau alifatik yang paling sederhana dari metil dan gugus alkohol yang diperoleh dari turunan gas alam dengan sifat mudah terbakar (E. Permana et al., 2021). Methanol merupakan bahan kimia dasar yang menempati posisi penting di industri hilir karena berperan sebagai senyawa intermediate yang menjadi bahan utama berbagai industri antara lain *formaldehyde*, tekstil, farmasi, *polyester*, *polyvinyl*, resin sitetis, plastik, asam asetat, farmasi, dan biodiesel (Kurniasih et al., 2020). Methanol juga diproyeksikan sebagai bahan bakar alternatif masa depan karena memiliki *Research Octan Number* yang tinggi yaitu 108 RON lebih tinggi dari pertamax yang hanya 92 dengan pembakaran yang lebih sempurna dan sedikit melepas gas karbon monoksida sebagai hasil samping (Sipahutar & Madona, 2015). Selain dapat digunakan sebagai bahan bakar langsung, methanol dapat dikonversi menjadi etilen atau propilen pada proses *Methyl-to Olefins* (MTO) yang dapat menghasilkan *hydrocarbon fuels* (Tian et al., 2015). Produk hasil turunan dan besar penggunaan methanol dapat dilihat pada Gambar 1.1 yang menunjukkan besarnya kebutuhan bahan baku berupa methanol untuk beberapa produk yang dapat dihasilkan.



Gambar 1.1 Pemanfaatan Methanol di Industri
(Dalena et al., 2018)

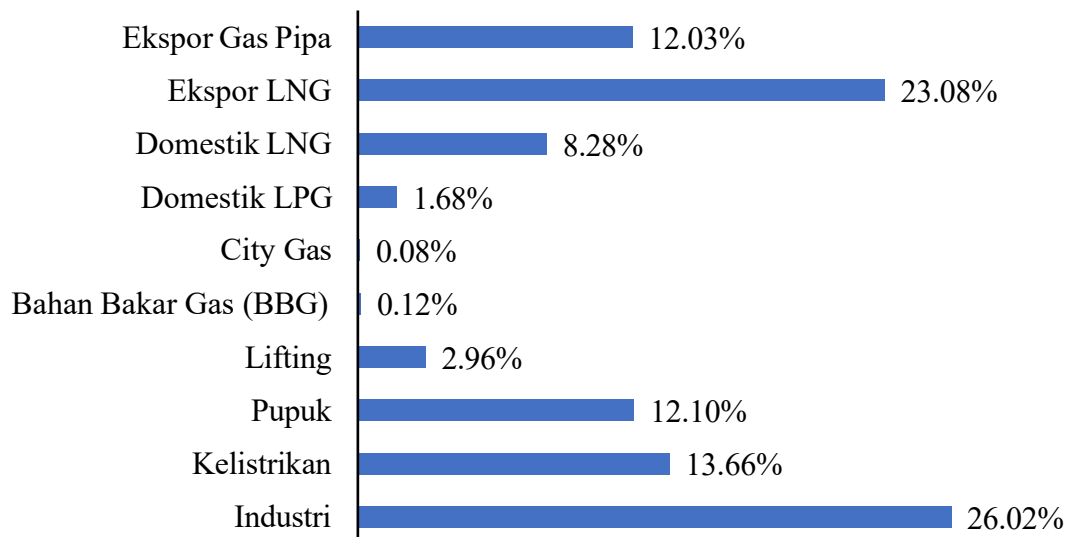
Seiring dengan berjalannya waktu terjadi penurunan nilai ekspor dan peningkatan nilai impor. Menurut data dari Badan Pusat Statistik, pada tahun 2015 nilai ekspor sebesar 422.884,226 ton mengalami penurunan menjadi 140.141,553 ton pada tahun 2021, dan mengalami peningkatan nilai impor pada tahun 2015 yaitu sebesar 219.413,82 ton mejadi sebesar 979.974,157 pada tahun 2021 untuk memenuhi kebutuhan methanol dalam negeri (BPS, 2022).

Methanol menjadi salah satu bahan baku penting bagi berbagai industri petrokimia hilir yang diprediksi akan meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah kebutuhan produk yang menggunakan methanol sebagai bahan baku atau pendukung lainnya. Produksi methanol dalam negeri tidak menunjukkan adanya produksi baru selama 5 tahun sehingga diperlukan peningkatan produksi methanol dalam negeri supaya mampu memenuhi kebutuhan domestik dan mengurangi jumlah impor methanol. Oleh karena itu, pembangunan industri kimia di Indonesia khususnya methanol sangat penting supaya dapat mengurangi ketergantungan terhadap industri luar negeri yang pada akhirnya dapat mengurangi pengeluaran devisa untuk mengimpor bahan-bahan industri kimia. Kebutuhan methanol yang tinggi jika tidak diimbangi dengan peningkatan produksi methanol di Indonesia, maka Indonesia terus harus mengimpor methanol dari luar negeri.

Potensi pendirian pabrik methanol di Indonesia cukup besar jika ditinjau dari ketersediaan bahan baku utamanya yaitu gas alam yang akan diolah menjadi *syngas* yang mengandung salah satu senyawa hidrogen melalui proses *reforming* sebagai bahan baku methanol. Salah satu industri produsen hidrogen di Indonesia yaitu PT. Aneka Gas Industri

Subang, Jawa Barat. Gas alam di Indonesia memiliki potensi yang cukup baik dalam hal ketersediaannya yang dinyatakan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral tahun 2019 dimana cadangan gas alam mencapai 77,29 triliun kaki kubik. Dalam kurun waktu 2025-2050 target pasokan energi primer gas alam mencapai 9.786,7 MMSCFD hingga 27.013 MMSCFD. Berdasarkan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), peran gas bumi dimanfaatkan sekitar 22-24% dalam kurun waktu 2025-2050 (Tampubolon & Kiono, 2021).

Produksi tahunan gas alam di Indonesia dimanfaatkan sebesar 64 % untuk sektor dalam negeri dan sisanya adalah ekspor berupa LNG maupun jaringan pipa. Pemanfaatan untuk sektor industri mendominasi penggunaan gas bumi dalam negeri, yaitu sebesar 26,02% dan diperkirakan akan semakin meningkat karena kebutuhan Industri di Indonesia dan gas yang tersedia di Indonesia dalam kurun waktu 2020-2050 juga meningkat (Tampubolon & Kiono, 2021). Proyeksi pemanfaatan gas alam dapat dilihat pada Gambar 1.2.

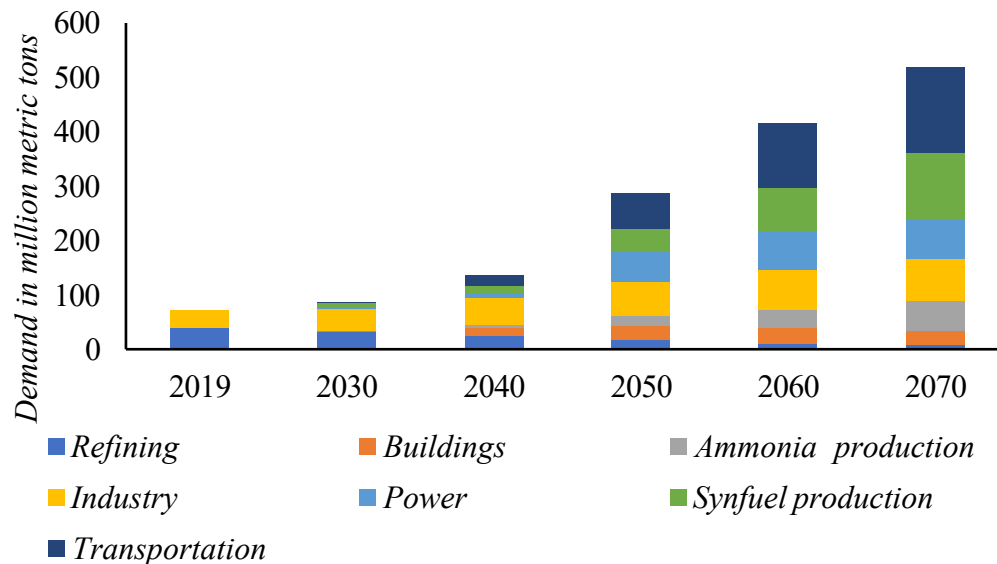


Gambar 1.2 Pemanfaatan Gas Alam Untuk Industri

(Tampubolon & Kiono, 2021)

Hidrogen atau H₂ dapat digunakan sebagai sumber energi dan bahan bakar bebas karbon. H₂ berperan penting dalam dekarbonisasi untuk mencapai emisi *net zero* CO₂ pada tahun 2050. Pada tahun 2070, permintaan global untuk H₂ diperkirakan akan mencapai lebih dari 500 juta ton (Nnabuiife et al., 2022). Produksi hidrogen dimanfaatkan di berbagai industri karena banyak dibutuhkan untuk banyak proses kimia. Pada tahun 2019, sekitar 70 juta ton hidrogen diproduksi setiap tahun di seluruh dunia untuk berbagai kegunaan seperti penyulingan minyak, pembuatan ammonia, methanol, dan juga bahan bakar untuk

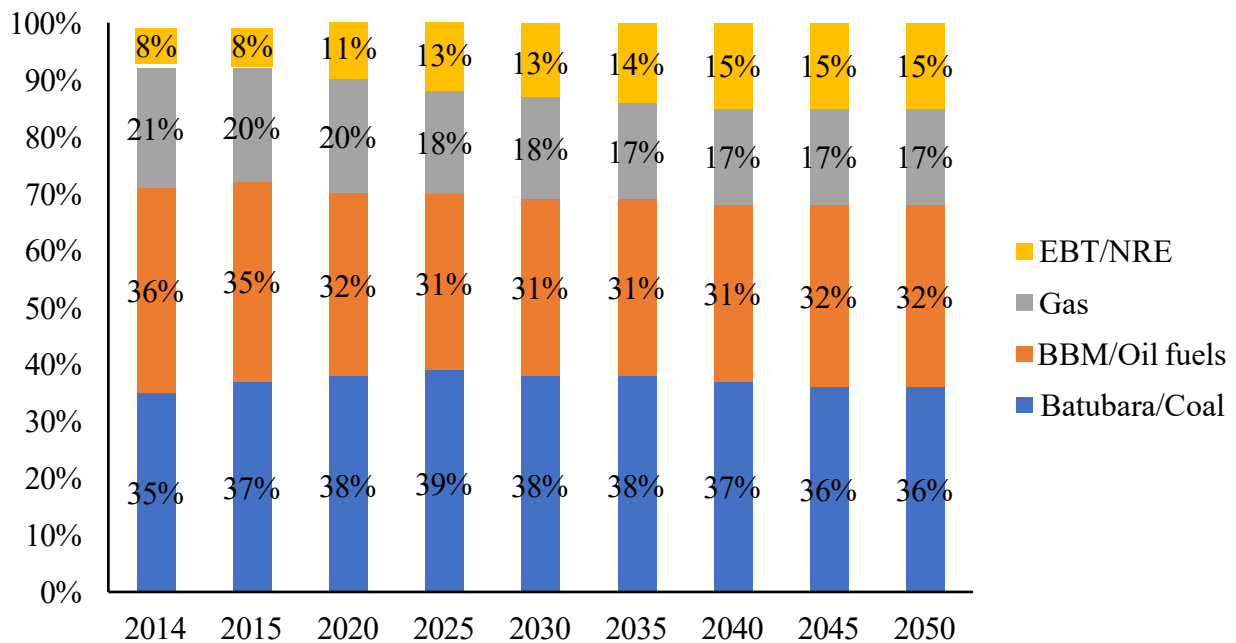
transportasi. Hidrogen dapat diproduksi melalui proses termokimia (*steam methane reforming*, *coal gasification*, dan *biomass gasification*), elektrolisa, dan biologi (Sutardi & Budiman, 2020). Di bawah ini merupakan gambar berbagai macam pemanfaatan hidrogen.



Gambar 1.3 Pemanfaatan Hidrogen di Berbagai Sektor

(Nnabuife et al., 2022)

Peningkatan konsumsi energi sejalan dengan pertumbuhan industri di Indonesia. Kebutuhan energi rata rata 4,7% per tahun selama 2011-2030. Bahan bakar fosil seperti batubara, minyak, dan gas adalah sumber energi utama dalam industri saat ini. Penggunaan batubara sejak 2020 mencapai 38% dan terus meningkat hingga 39% pada tahun 2025. Penggunaan batubara banyak digunakan untuk energi pembakaran di proses kalsinasi produksi semen. Konsumsi energi semen mencapai 2% dari energi primer dunia. Proyeksi bauran energi primer dapat dilihat pada Gambar 1.4.



Gambar. 1.4 Proyeksi Bauran Energi Primer
(D. I. Permana & Mahardika, 2019)

Pengembangan industri pengolahan mineral untuk peningkatan nilai tambah akan menciptakan peningkatan kebutuhan energi. Industri semen merupakan sektor industri yang berkembang dalam 1 dasawarsa terakhir. Industri semen menghasilkan emisi CO₂ cukup besar dengan konsentrasi 380 ppm dan terus meningkat lebih dari 2 ppm per tahunnya. Emisi gas CO₂ tertinggi pabrik semen yaitu 15.107.267 ton dihasilkan dari pembakaran batubara yang digunakan dalam kiln (tanur) pembakaran suhu 2000°C untuk produksi semen (Minallah & Taufany, 2017).

Peningkatan kebutuhan energi, berbanding lurus dengan peningkatan gas rumah kaca yang dihasilkan. Gas rumah kaca terdiri dari CO₂, CH₄, N₂O, CFC, dan uap air yang menyebabkan pemanasan global di lingkungan. Jika tidak ada tindakan untuk mengurangi emisi gas maka 40% spesies akan punah di masa mendatang (Sayah et al., 2010). Protokol Kyoto menyepakati pemberlakuan kredit karbon yang didefinisikan sebagai hak bagi sebuah negara atau lembaga industri untuk membuang emisi CO₂ ke atmosfer setelah negara atau lembaga industri membayar sejumlah nominal tertentu sebagai kompensasi atas volume CO₂ yang dibuangnya. Harga kredit karbon sekitar USD 10-30 per ton CO₂ dengan mekanisme pembayaran dan klaim diurus oleh Perserikatan Bangsa Bangsa (PBB), Bank Dunia, dan *European Union* (EU). Salah satu cara untuk mengurangi emisi bahan bakar fosil adalah

adanya teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon, atau mengonversi CO₂ menjadi bahan lain misalnya methanol (Minallah & Taufany, 2017).

Flue gas merupakan sumber panas buang terbesar dari beberapa sektor industri salah satunya adalah industri semen. Potensi yang dimiliki *flue* gas masih dapat dimanfaatkan. Kandungan *flue* gas pabrik semen yaitu gas CO₂, NO₂, NO_x, SO_x. Kandungan CO₂ dalam *flue* gas dapat diserap untuk menjadi bahan baku pembuatan methanol dengan proses absorpsi. Ketersediaan gas alam sebagai bahan baku penyedia hidrogen dan *flue* gas yang mengandung CO₂ dari proses produksi semen dalam pembuatan methanol memiliki peranan penting dalam proses produksi methanol karena ketersediaan gas bumi akan mempengaruhi terhadap besarnya kapasitas pabrik yang akan direncanakan untuk memproduksi methanol.

Saat ini Indonesia baru memiliki satu pabrik methanol yakni PT Kaltim Methanol Industri (PT KMI) kapasitas 660.000 MTPY di Kota Bontang, Kalimantan Timur dengan produk yang dihasilkan yaitu *Pure Methanol grade AA* atau methanol dengan kemurnian 99,85%. Dalam prosesnya pabrik methanol ini menggunakan bahan baku gas alam dari Badak *Gas Field Center*. Produksi dari PT Kaltim Methanol Industri telah dipasarkan di berbagai wilayah Indonesia maupun luar negeri. Pada pemasaran luar negeri dilakukan oleh *Sojitz Corporation* Tokyo sebesar 70% (480.000 MT), dan sebanyak 30% (180.000 MT) untuk wilayah Indonesia oleh PT. Humpuss.

Ketersediaan bahan baku *flue* gas dan hidrogen dalam pembuatan methanol merupakan peranan penting, karena ketersediaan bahan baku tersebut dapat mempengaruhi besarnya kapasitas pabrik yang akan didirikan. Kebutuhan methanol terus bertambah seiring dengan perkembangan industri-industri di Indonesia. Namun, saat ini hanya terdapat satu perusahaan di Indonesia yang memproduksi methanol yaitu PT. Kaltim Methanol Industri. Selain dari PT KMI, Pemerintah Indonesia melakukan kegiatan impor untuk memenuhi kebutuhan methanol dalam negeri. Dengan adanya peningkatan kebutuhan dan potensi ketersediaan bahan baku tersebut, maka terdapat peluang untuk mendirikan pabrik methanol di Indonesia. Secara ekonomi, produksi methanol mempunyai dampak yang besar selain memenuhi kebutuhan dalam negeri yaitu dapat meningkatkan pendapatan dengan mengurangi impor dan meningkatkan produksi sehingga dapat melakukan ekspor methanol ke luar negeri dan mendapatkan pendapatan serta dapat menciptakan lapangan kerja. Saat ini di Indonesia belum terdapat pendirian pabrik methanol yang memanfaatkan limbah *flue* gas sebagai bahan bakunya. Pabrik methanol ini diharapkan menjadi pabrik yang mendukung program *green*

energy dengan menghasilkan produk methanol yang memanfaatkan bahan baku *CO₂ capture* dari limbah gas buang (*flue gas*). Hal ini mendukung cita cita Indonesia dalam mencapai *net zero emission 2045* dan selaras dengan program *Sustainable Development Goals (SDGs)* nomor 7 yaitu terciptanya energi bersih dan terjangkau.

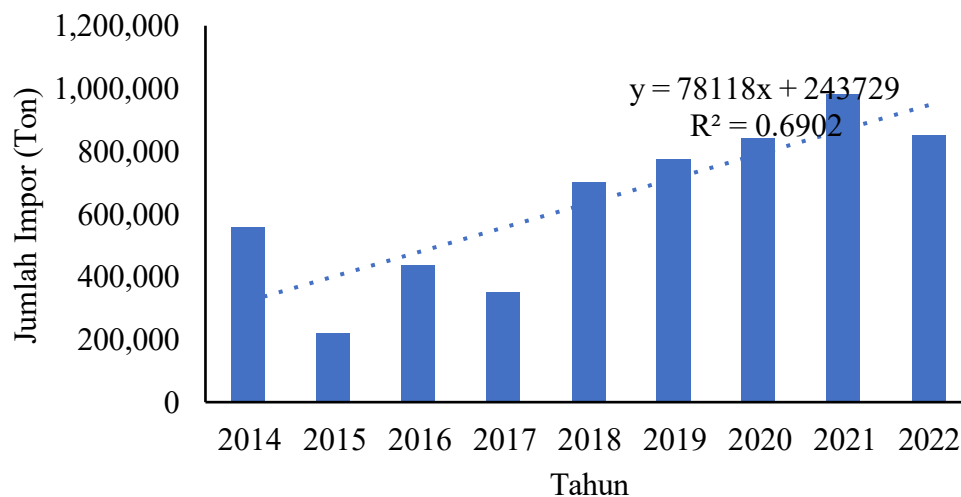
1.2 Kapasitas Rancangan

Penentuan kapasitas rancangan pabrik methanol didasarkan pada beberapa pertimbangan, antara lain:

- Prediksi kebutuhan methanol
- Ketersediaan bahan baku untuk produksi methanol
- Kapasitas pabrik methanol yang sudah beroperasi
- Kapasitas pabrik methanol yang akan direncanakan

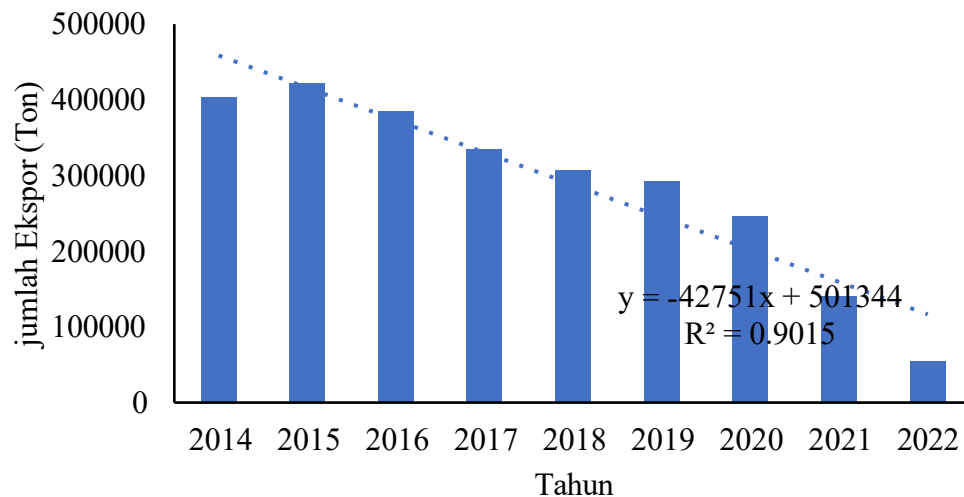
1.2.1 Prediksi Kebutuhan Methanol di Indonesia

Kapasitas produksi suatu pabrik yang akan didirikan harus lebih besar dari kapasitas minimum atau paling tidak sama dengan kapasitas terkecil suatu pabrik yang sudah berjalan. Selain itu, kapasitas pabrik yang akan didirikan harus berada di atas jumlah permintaan dengan tujuan untuk mengantisipasi peningkatan jumlah permintaan dan untuk orientasi pasar ekspor methanol. Proyeksi volume ekspor dan impor methanol dari luar negeri seperti pada Tabel 1.1 di bawah ini.



Gambar 1.5 Grafik Data Impor Methanol

(BPS, 2022)



Gambar 1.6 Grafik Data Ekspor Methanol
(BPS, 2022)

Berdasarkan kedua grafik diatas, grafik ekspor methanol mendapatkan hasil nilai $R^2 < 0,9$ maka metode interpolasi linear tidak bisa digunakan untuk memprediksi kapasitas dari pabrik yang akan didirikan. Sehingga metode yang akan digunakan untuk memprediksi data pembangunan pabrik methanol di tahun 2027 menggunakan metode pertumbuhan rata-rata per tahun.

Tabel 1.1 Data Ekspor Impor Methanol di Indonesia dan Pertumbuhannya
(BPS, 2022)

Tahun	Jumlah		% Kenaikan	
	Ekspor (Ton)	Impor (Ton)	Ekspor (Ton)	Impor (Ton)
2014	404.151,91	557.361,73	-	-
2015	422.884,23	219.413,82	4,63%	-60,63%
2016	384.933,65	436.987,82	-8,97%	99,16%
2017	335.007,86	350.026,05	-12,97%	-19,90%
2018	307.366,26	699.945,89	-8,25%	99,97%
2019	292.694,34	773.651,43	-4,77%	10,53%
2020	246.269,45	840.408,30	-15,86%	8,62%
2021	140.141,55	979.974,16	-43,09%	16,60%
2022	54.853,54	851.090,33	-60,85%	-13,15%
Total (% Prediksi)			-150,14%	141,21%
i (Rata-Rata)			-18,768%	17,651%

Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (2022), kebutuhan impor produk methanol meningkat selama 2014-2022 dan ekspor mengalami penurunan. Pertumbuhan kebutuhan produk methanol terlihat besar selalu mengalami peningkatan dari tahun 2017 ke tahun 2021, yaitu dari 699 KTPY hingga mencapai 979 KTPY. Rata rata impor dari tahun 2014-2022 sebesar 17,651% dan ekspor berkurang sebesar 18,768%. Kebutuhan Impor methanol Indonesia dari luar negeri seperti Bahrain, Brunei Darussalam, Canada, China, India, Jerman, Prancis. Impor methanol terbesar yaitu sebanyak 9.194.251 juta ton dari Brunei Darussalam berdasarkan data BPS Tahun 2020-2021. Produksi methanol dalam negeri tidak menunjukkan adanya produksi baru selama 10 tahun terakhir, sehingga menjadi salah satu faktor yang mendukung potensi penghasilan dari produksi methanol.

Tabel 1.2 Prediksi Konsumsi Kebutuhan Methanol di Indonesia

Tahun	Jumlah		% Prediksi	
	Produksi (Ton)	Konsumsi (Ton)	Produksi (Ton)	Konsumsi (Ton)
2014	660.000	823.587,00	-	-
2015	660.000	615.436,00	0%	-25,27%
2016	660.000	518.816,00	0%	-15,69%
2017	660.000	866.487,00	0%	67,01%
2018	660.000	951.790,49	0%	9,84%
2019	660.000	729.467,00	0%	-23,35%
2020	660.000	735.822,00	0%	0,87%
2021	660.000	938.303,00	0%	27,51%
2022	660.000	955.897,00	0%	1,87%
Total (% Prediksi)			0%	42,78%
I (Rata-Rata)			0%	5,34%

Berdasarkan tabel di atas, dapat diprediksi konsumsi impor, ekspor, dan kebutuhan methanol di Indonesia pada tahun 2027 dengan rumus *discounted methode* (Lestari & Rabiah, 2020) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 M &= P (1+i)^n M_{(2027)} \\
 &= M_{(2022)} (1 + i)^n
 \end{aligned}$$

Dimana:

M = Jumlah produk pada akhir tahun perhitungan atau kapasitas produksi

P = Data besarnya impor dan ekspor pada tahun 2022

M₁ = Nilai impor pada Tahun 2027

M₂ = Nilai produksi pabrik lama dalam negeri pada tahun 2027

M₃ = Nilai produksi pabrik baru pada tahun 2027

M₄ = Nilai ekspor pada tahun 2027

M₅ = Nilai konsumsi pada tahun 2027

i = Rata-rata kenaikan impor setiap tahun

n = Selisih tahun 2022 dan tahun 2027 (2027-2022 = 5 tahun)

Neraca Massa Peluang Kapasitas

$$M_1 + M_2 + M_3 = M_4 + M_5$$

$$M_3 = (M_1 + M_2) - (M_4 + M_5)$$

Dimana:

M₁ = Nilai impor pada Tahun 2027

M₂ = Nilai produksi pabrik lama dalam negeri pada tahun 2027

M₃ = Nilai produksi pabrik baru pada tahun 2027

M₄ = Nilai ekspor pada tahun 2027

M₅ = Nilai konsumsi pada tahun 2027

a. Perkiraan Nilai Impor pada tahun 2027

$$M_{2027} = P(1+i)^n$$

$$M_{2027} = 851.090,33 (1+17,651\%)^{(2027-2022)}$$

$$M_{2027} = 851.090,33 (1+17,651\%)^{(5)}$$

$$M_{2027} = 851.090,33 (1,17651)^{(5)}$$

$$M_{2027} = 1.918.464,513 \text{ Ton/Tahun}$$

b. Perkiraan Nilai Ekspor pada tahun 2027

$$M_{2027} = P(1+i)^n$$

$$M_{2027} = 54.853,54 (1+(-18,768\%))^{(2027-2022)}$$

$$M_{2027} = 54.853,54 (1+(-18,768\%))^{(5)}$$

$$M_{2027} = 54.853,54 (0,81232)^{(5)}$$

$$M_{2027} = 19.401,190 \text{ Ton/Tahun}$$

c. Perkiraan Konsumsi Dalam Negeri pada Tahun 2027

$$M_{2027} = P(1+i)^n$$

$$M_{2027} = 955.897 (1+(5,34\%))^{(2027-2022)}$$

$$M_{2027} = 955.897 (1+(5,34\%))^{(5)}$$

$$M_{2027} = 955.897 (1,0534)^{(5)}$$

$$M_{2027} = 1.240.385,493 \text{ Ton/Tahun}$$

d. Menghitung Peluang Kapasitas Berdasarkan Prediksi Data Impor, Ekspor, dan Konsumsi Pada Tahun 2027

$$M_2 = 660.000 \text{ Ton/tahun}$$

$$M_1 + M_2 + M_3 = M_4 + M_5$$

$$M_3 = (M_1 + M_2) - (M_4 + M_5)$$

$$M_3 = (1.918.500 + 660.000) - (19.401,190 + 1.240.385,493)$$

$$M_3 = 1.318.713,317 \text{ Ton/Tahun}$$

e. Menghitung Peluang Kapasitas Produksi Tahun 2027

Kapasitas produksi maksimal yang bisa diambil adalah 60% dari peluang kapasitas.

$$\text{Kapasitas Produksi} = 0,6 \times \text{Peluang Kapasitas}$$

$$= 0,6 \times 1.318.713,317 \text{ Ton/tahun}$$

$$= 329.678,329 \text{ Ton/Tahun}$$

$$= 330.000 \text{ Ton/Tahun}$$

Berdasarkan data prediksi untuk kebutuhan methanol di Indonesia pada tahun 2027 sebesar 1.240.385,493 ton/tahun dengan perkiraan laju impor sebesar 1.918.464,513 ton/tahun dan perkiraan laju ekspor sebesar 19.401,190 ton/tahun. Ketersediaan bahan baku *flue gas* dari PT. Indocement Tunggal Prakarsa, Citeureup, Bogor, Jawa Barat mencapai 464.437,6 ton/tahun dan hidrogen dari PT. Aneka Gas Industri, Subang, Jawa Barat mencapai 498.000 ton/tahun, serta kapasitas minimal pabrik methanol yang sudah beroperasi yaitu 430.000 ton/tahun, dan penentuan kapasitas awal produksi pabrik methanol yang sudah beroperasi yaitu PT Kaltim Methanol Industri sebesar 660.000 ton/tahun, kapasitas methanol pada pabrik methanol yang akan didirikan sebesar 330.000 ton/tahun yang dapat memenuhi kebutuhan methanol dalam negeri sebesar 17,201% di tahun 2027.

Tabel 1.3 Proyeksi Kebutuhan Methanol di Indonesia (2027-2040)

Tahun	Kebutuhan (Ton)	Produksi (Ton/Tahun)	Kontribusi Pemenuhan Kebutuhan (%)
2027	1.918.500,224	330.000	17,201 %
2028	2.257.143,102	330.000	14,620 %
2029	2.655.561,317	330.000	12,427 %
2030	3.124.306,077	330.000	10,562 %
2031	3.675.791,027	330.000	8,978 %
2032	4.324.621,001	330.000	7,631 %
2033	5.087.978,796	330.000	6,486 %
2034	5.986.080,218	330.000	5,513 %
2035	7.042.709,457	330.000	4,686 %
2036	8.285.848,95	330.000	3,983 %
2037	9.748.420,44	330.000	3,385 %
2038	11.469.156,83	330.000	2,877
2039	13.493.627,94	330.000	2,446
2040	15.875.447,31	330.000	2,079

1.2.2 Ketersediaan Bahan Baku

Bahan baku berupa hidrogen dan *flue* gas pada pembuatan methanol ini dapat diperoleh dari dalam negeri. Dalam kurun waktu 2025-2050 target pasokan energi primer gas alam mencapai 9.786,7 MMSCFD hingga 27.013 MMSCFD. Berdasarkan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), peran gas bumi termamfaatkan sekitar 22-24% dalam kurun waktu 2025-2050. Indonesia memiliki produsen energi bersih yang potensial untuk bahan baku methanol yaitu hidrogen dari proses *reforming* gas alam. Pada tahun 2019, sebanyak 70 juta ton/tahun hidrogen diproduksi untuk berbagai kegunaan. Untuk produksi hidrogen di Indonesia mencapai 876.616 ton/tahun. Untuk *flue* gas didapatkan dari industri mineral semen karena menghasilkan emisi gas CO₂ paling tinggi disusul oleh industri produksi kapur dan kaca/gelas.

Penyediaan bahan baku direncanakan bersumber dari PT. Aneka Gas Industri Subang, Jawa Barat dengan kapasitas 498.000 ton/tahun dan *flue* gas dari PT Indocement Tungal Perkasa Citeureup Bogor, Jawa Barat dengan jumlah kapasitas semen mencapai 4.400.000 ton/tahun, dimana 1 ton *flue* gas mengandung 593 kg CO₂ dan mol fraksi CO₂ dalam *flue* gas sebesar 17,8% basis *wet* sehingga menghasilkan kandungan CO₂ dalam *flue* gas sebesar

2.609.200 ton/tahun. Bahan baku pembuatan methanol dapat disediakan oleh perusahaan-perusahaan yang memproduksi hidrogen dan *flue* gas dalam jumlah besar. Berikut ini merupakan beberapa perusahaan yang memproduksi hidrogen dan menghasilkan *flue* gas jumlah besar.

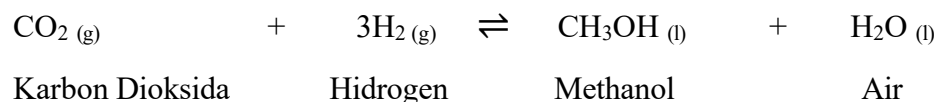
Tabel 1.4 Cadangan Pabrik Hidrogen di Indonesia

Nomor	Nama Pabrik	Lokasi Pabrik	Kapasitas
1.	PT. Samator Gas Industri	Gresik, Jawa Timur	96.960 ton/tahun
2.	PT. BOC Gas	Jakarta	48.480 ton/tahun
3.	PT. Sarimitra Jaya	Jakarta	15.000 ton/tahun
4.	PT. Air Liquid	Bekasi, Jawa Barat	218.176 ton/tahun
5.	PT. Aneka Gas Industri	Subang, Jawa Barat	498.000 ton/tahun

Tabel 1.5 Cadangan CO₂ *Flue* Gas di Indonesia

Nomor	Nama Pabrik	Lokasi Pabrik	Kapasitas
1.	PT Semen Gresik	Tuban, Jawa Timur	326.624 ton/tahun
2.	PT Semen Gresik	Rembang, Jawa Tengah	272.187 ton/tahun
3.	PT. Solusi Bangun Indonesia	Cilacap, Jawa Tengah	308.478 ton/tahun
4.	PT. Indocement Tungal Prakarsa	Cirebon, Jawa Barat	371.988 ton/tahun
5.	PT Indocement Tungal Prakarsa	Citeureup Bogor, Jawa Barat	4.400.000 ton/tahun

Untuk memenuhi kebutuhan bahan baku pembuatan methanol dapat dilakukan perhitungan stoikiometri menggunakan kapasitas produksi sebesar 330.000 ton/tahun sehingga kebutuhan CO₂ dan hidrogen (H₂) dapat dihitung sbagai berikut:



$$\text{Mol CH}_3\text{OH} = \frac{\text{Massa CH}_3\text{OH}}{\text{Berat Molekul CH}_3\text{OH}}$$

$$\text{Mol CH}_3\text{OH} = \frac{330.000.000.000 \text{ gram/tahun}}{32,04 \text{ gram/mol}}$$

$$\text{Mol CH}_3\text{OH} = 10.299.625.468,165 \text{ mol/tahun}$$

$$\text{Massa CO}_2 = \frac{\text{Koefisien CO}_2}{\text{Koefisien CH}_3\text{OH}} \times \text{Berat Molekul CO}_2 \times \text{Mol CH}_3\text{OH}$$

$$\text{Massa CO}_2 = \frac{1}{1} \times 44 \text{ gram/mol} \times 10.299.625.468,165 \text{ mol/tahun}$$

$$\text{Massa CO}_2 = 45,31 \times 10^{10} \text{ gram/tahun}$$

$$\text{Massa CO}_2 = 453.183 \text{ ton/tahun}$$

$$\text{Massa H}_2 = \frac{\text{Koefisien H}_2}{\text{Koefisien CH}_3\text{OH}} \times \text{Berat Molekul H}_2 \times \text{Mol CH}_3\text{OH}$$

$$\text{Massa H}_2 = \frac{3}{1} \times 2,016 \text{ gram/mol} \times 10.299.625.468,165 \text{ mol/tahun}$$

$$\text{Massa H}_2 = 6,229 \times 10^{13} \text{ gram/tahun}$$

$$\text{Massa H}_2 = 62.292.000 \text{ ton/tahun}$$

1.2.3 Kapasitas Pabrik Methanol yang Sudah Beroperasi

Pabrik methanol yang sedang beroperasi di Indonesia hanya ada pada PT. Kaltim Methanol Industri dengan kapasitas produksi 660.000 Ton/tahun. Untuk pabrik methanol yang sudah ada di luar Indonesia dapat dilihat pada Tabel 1.6 di bawah ini.

Tabel 1.6 Pabrik Methanol yang Sudah Beroperasi di Dunia

No	Pabrik	Tahun Beroperasi	Teknologi	Kapasitas
1	Methanex-New Zealand Plant	1980	Lurgi Mega Methanol	2.200.000 Ton/Tahun
2	Methanex-Chile Plant	1988	Lurgi Mega Methanol	1.700.000 Ton/Tahun
3	Methanex-Trinidad (mx Share)	1999	Lurgi Mega Methanol	1.960.000 Ton/Tahun
4	Methanex-Egypt (mx Share)	2011	Lurgi Mega Methanol	630.000 Ton/Tahun
5	Methanex- Geismar Plant	2015	Lurgi Mega Methanol	2.200.000 Ton/Tahun
6	Atlantic Methanol	2001	Lurgi Mega Methanol	1.000.000 Ton/Tahun
7	PT. Kaltim Methanol Industri	1991	Lurgi Low Pressure	660.000 Ton/Tahun

8	Methanol Holdings (Trinidad) Limited/M1	1984	<i>ICI Low Pressure</i>	483.000 Ton/Tahun
9	Methanol Holdings (Trinidad) Limited/M2	1993	<i>ICI Low Pressure</i>	525.000 Ton/Tahun
10	Methanol Holdings (Trinidad) Limited/M3	1996	<i>ICI Low Pressure</i>	577.500 Ton/Tahun
11	Methanol Holdings (Trinidad) Limited/M4	1998	<i>ICI Low Pressure</i>	577.500 Ton/Tahun
12	Methanol Holdings (Trinidad) Limited/M5000	2005	<i>ICI Low Pressure</i>	1.890.000 Ton/Tahun
13	Bio MCN	2018	<i>ICI Low Pressure</i>	430.000 Ton/Tahun

1.2.4 Kapasitas Pabrik Methanol yang direncanakan

Berdasarkan beberapa pertimbangan seperti yang telah disebutkan di atas yaitu antara lain perkiraan impor methanol di Indonesia yang mengalami peningkatan yaitu diprediksi tahun 2027 sebesar 1.918.464,513 ton/tahun. Ketersediaan bahan baku gas alam berupa hidrogen didapatkan dari PT. Aneka Gas Industri Subang, Jawa Barat dengan kapasitas 498.000 ton/tahun dan *flue* gas dari PT Indocement Tungal Perkasa Citeureup Bogor, Jawa Barat dengan jumlah kapasitas semen mencapai 4.400.000 ton/tahun, dimana 1 ton *flue* gas mengandung 593 kg CO₂ dan mol fraksi CO₂ dalam *flue* gas sebesar 17,8% basis *wet* sehingga menghasilkan kandungan CO₂ dalam *flue* gas sebesar 2.609.200 ton/tahun. Pabrik methanol yang sudah beroperasi yaitu PT. Kaltim Methanol Industri kapasitas 660.000 ton/tahun.

Oleh karena itu, dinyatakan bahwa dengan kapasitas pabrik methanol yang akan didirikan sebesar 330.000 ton/tahun pada tahun 2027 dalam pra-rancangan pabrik ini dinyatakan layak untuk didirikan dengan pertimbangan:

- a. Memenuhi kebutuhan methanol dalam negeri. Pabrik methanol yang akan didirikan dapat memenuhi kebutuhan methanol dalam negeri pada tahun 2027 sebesar 17,201% dan dengan kapasitas tersebut diharapkan dapat mengurangi jumlah impor methanol ke Indonesia. Kapasitas pabrik yang akan didirikan diharapkan dapat menambah kebutuhan methanol di Indonesia selain dari PT. Kaltim Methanol Industri.

- b. Tahun 2027 dapat memenuhi kebutuhan methanol di Indonesia karena jumlah kapasitas pabrik methanol di Indonesia mengalami peningkatan sehingga dapat mengantisipasi peningkatan permintaan dan untuk orientasi pasar ekspor methanol.
- c. Mendorong berdirinya industri-industri lainnya yang menggunakan methanol terutama pada penyediaan bahan baku.
- d. Menarik investor dalam negeri dan asing untuk berinvestasi di Indonesia.
- e. Menekan devisa negara untuk kegiatan impor sekaligus meningkatkan devisa negara dengan melakukan ekspor produk methanol ke luar negeri.
- f. Menyediakan lapangan kerja baru sehingga dapat menurunkan angka pengangguran.
- g. Menjalin kerjasama dengan berbagai pihak industri.
- h. Mewujudkan cita-cita Indonesia yaitu energi bersih dan terjangkau dengan mengurangi emisi gas CO₂.

1.3 Penentuan Lokasi Pabrik

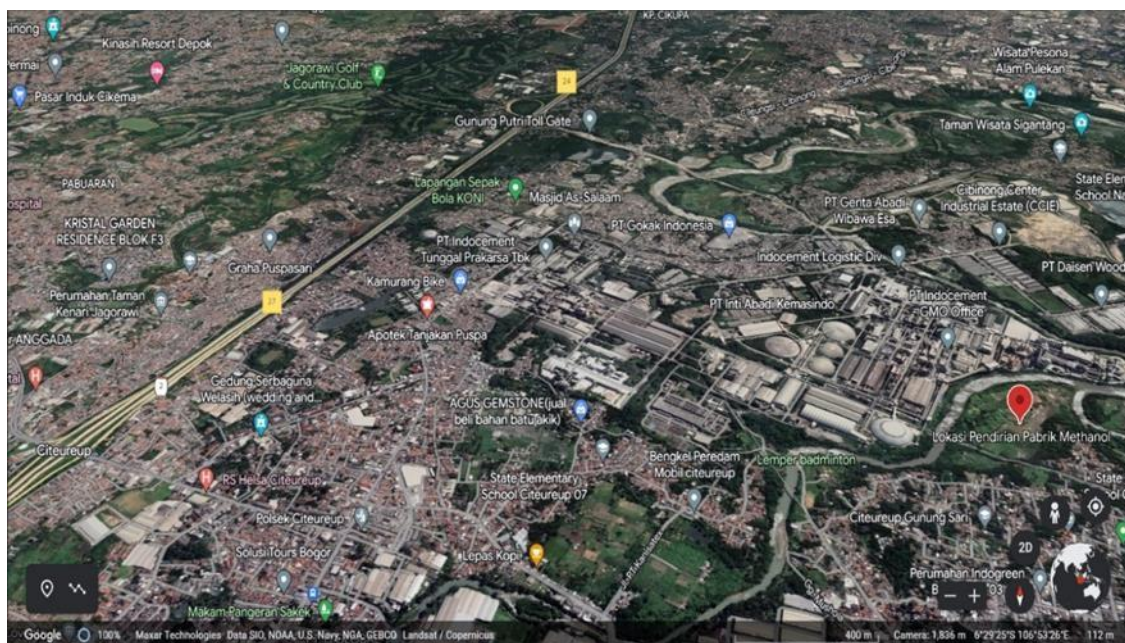
Pemilihan lokasi pabrik akan berpengaruh terhadap penentuan keberlangsungan produksi, persaingan, dan keberhasilan suatu pabrik. Lokasi pabrik yang tepat, ekonomis, dan menguntungkan akan menentukan harga jual produk yang dapat memberikan keuntungan dalam jangka panjang. Pemilihan lokasi pabrik didasarkan atas pertimbangan yang secara praktis lebih menguntungkan, baik ditinjau dari segi teknis maupun ekonomis. Terdapat beberapa teori yang digunakan untuk menentukan lokasi pabrik diantaranya:

1. Teori Lokasi Industri (*Theory of Industrial Location*) oleh Alfred Weber
Teori ini menentukan suatu lokasi industri dengan mempertimbangkan risiko biaya atau ongkos paling minimum (Aulia et al., 2021).
2. Teori Lokasi Industri Optimal (*Theory of Optimal Industrial Location*) oleh Losch
Teori ini didasarkan pada permintaan (*demand*) sehingga diasumsikan bahwa lokasi optimal dari suatu pabrik atau industri yaitu apabila dapat menguasai wilayah pemasaran yang luas sehingga dapat dihasilkan pendapatan paling besar. Semakin jauh dari pusat industri, maka semakin berkurang volume penjualan barang karena harganya semakin tinggi, akibat dari naiknya ongkos transportasi. Teori ini tidak menghendaki wilayah pasarannya terjadi tumpang tindih dengan wilayah pemasaran milik pabrik lain yang menghasilkan barang yang sama (Indriani et al., 2021).
3. Model Gravitasi dan Interaksi (*Model of Gravitation and Interaction*) oleh Issac Newton dan Ullman

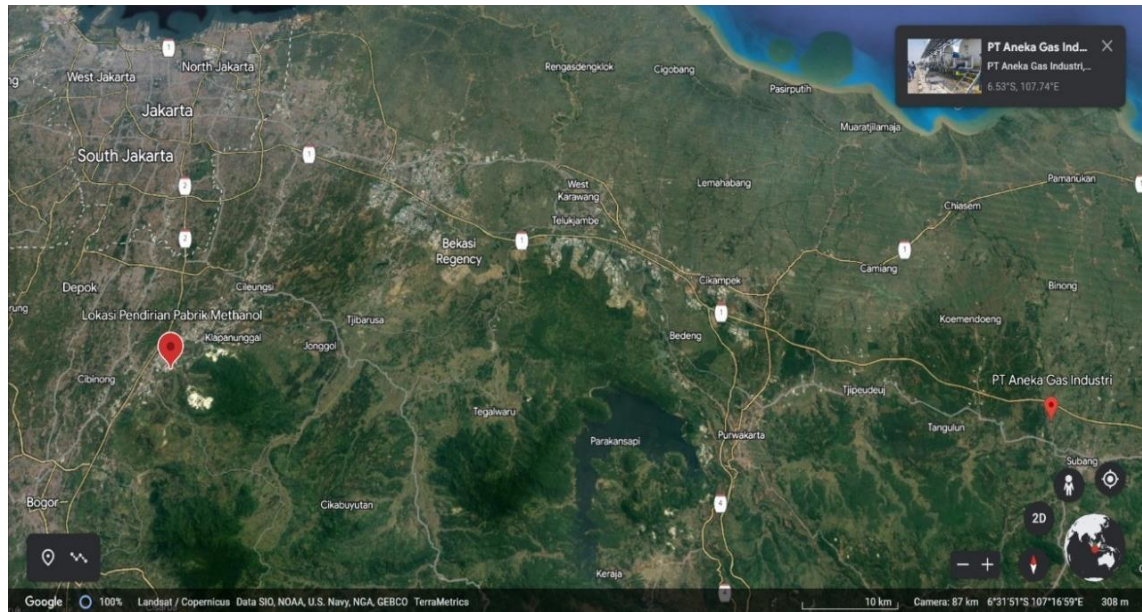
Teori ini didasarkan pada asumsi bahwa tiap massa mempunyai gaya tarik (gravitasi) untuk berinteraksi di tiap titik yang ada di *region* yang saling melengkapi (*regional complementarity*), kemudian memiliki kesempatan berintervensi (*intervening opportunity*), dan kemudahan transfer atau pemindahan dalam ruang (*spatial transfer ability*). Teori interaksi ialah teori mengenai kekuatan hubungan-hubungan ekonomi (*economic connection*) antara dua tempat yang dikaitkan dengan jumlah penduduk dan jarak antara tempat-tempat tersebut. Semakin besar jumlah penduduk, maka akan semakin besar interaksi ekonominya. Sebaliknya, semakin jauh jarak kedua tempat maka interaksi yang terjadi semakin kecil (Wicaksana & Rachman, 2018).

4. Teori Tempat yang Sentral (*Theory of Cental Place*) oleh Walter Christaller

Teori ini didasarkan pada konsep jangkauan dan ambang. *Range* (jangkauan) adalah jarak tempuh yang diperlukan untuk mendapatkan barang yang dibutuhkan masyarakat, sedangkan *threshold* (ambang) adalah jumlah minimal anggota masyarakat yang diperlukan untuk menjaga keseimbangan suplai barang (Gitleman & Kleberger, 2014).



Gambar 1.7 Gambaran Lokasi Pabrik Methanol



Gambar 1.8 Gambaran Lokasi Sumber Bahan Baku

Tujuan penentuan lokasi pabrik adalah supaya dapat membantu pabrik beroperasi secara lancar dan efisien. Dari teori penentuan lokasi pendirian pabrik tersebut, maka lokasi pendirian pabrik methanol berdasarkan pertimbangan beberapa faktor. Lokasi pendirian pabrik berada di daerah industri Citeureup, Kabupaten Bogor, Jawa Barat. Titik koordinat pusat pada luas lahan utama sebesar 3 ha atau 30.000 m² adalah 6°29'01.2"S 106°54'08.7"E. Titik koordinat tersebut didapatkan dari aplikasi *google earth*. Lokasi pabrik ini berdekatan sumber bahan baku *flue* gas dari PT. Indocement Tungal Perkasa dan bahan baku hidrogen dengan jalur darat dari PT. Aneka Gas Industri Subang Jawa Barat. Secara Adminisitratif Kabupaten Bogor memiliki batas wilayah sebagai berikut:

- Utara : Kabupaten Tangerang, Kabupaten/Kota Bekasi, Kota Depok
- Selatan : Kabupaten Sukabumi dan Kabupaten Cianjur
- Timur : Kabupaten Karawang, Kabupaten Purwakarta
- Barat : Kabupaten Lebak

Menurut Teori Splenger dan Kleir, penentuan lokasi pabrik dibagi menjadi 2 faktor yaitu:

1. Faktor Utama

a. Sumber Bahan Baku

Kebutuhan utama untuk keberlangsungan pabrik yang sangat menjadi prioritas adalah bahan baku. Bahan baku harus selalu tersedia dalam jumlah cukup agar kontinuitas ketersediaan bahan baku dapat dijamin. Salah satu karakteristik letak pabrik yang ideal adalah dekat dengan sumber bahan baku karena akan sangat menguntungkan untuk menghemat biaya transportasi dan mengurangi tingkat resiko kerusakan bahan baku saat proses pengiriman.

Produksi methanol menggunakan bahan baku *flue* gas untuk mendapatkan CO₂ termasuk kategori *weight loss*. Bahan *flue* gas mengandung banyak *impurities* (CO₂, CO, NO_x, SO₂) sehingga untuk efisiensi pengiriman atau transportasi dan biaya pemeliharaan alat, pemilihan lokasi pabrik diprioritaskan dibangun dekat dengan sumber bahan baku yaitu *flue* gas dari PT. Indocement Tunggul Prakarsa, Citeureup, Kabupaten Bogor, Jawa Barat. Proses pengiriman bahan baku *flue* gas dapat dengan menggunakan jalur pipa dan tanki. Untuk bahan baku hidrogen didapatkan dari PT. Aneka Gas Industri, Subang, Jawa Barat. Pengiriman gas hidrogen dapat menggunakan tanki melewati jalur darat melalui akses tol Subang.

b. Sarana Transportasi

Sarana transportasi sangat diperlukan untuk memudahkan mobilisasi bahan baku dan pemasaran produk. Untuk mempermudah pengangkutan bahan baku, produk, maupun bahan pendukung lainnya sebaiknya dipilih lokasi pabrik yang berada di daerah mudah dijangkau oleh kendaraan-kendaraan besar yaitu seperti dekat dengan jalan raya dan jalan utama. Dengan adanya sarana transportasi yang memadai seperti transportasi darat, laut, maupun udara dapat mempermudah pemenuhan kebutuhan dalam negeri maupun proses ekspor ke luar negeri.

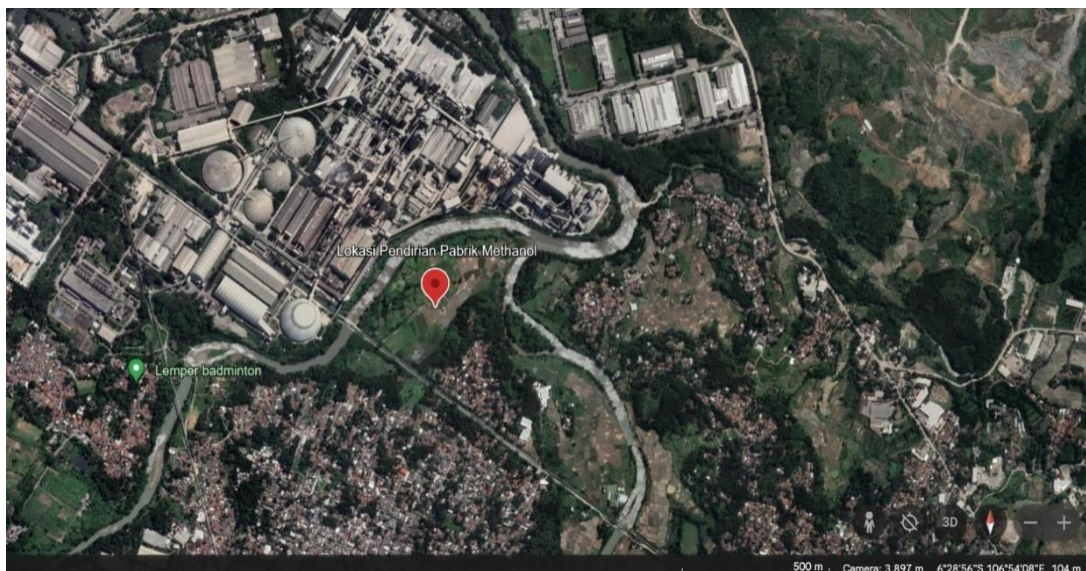
Kabupaten Bogor merupakan wilayah yang letaknya cukup strategis, berada pada jalur antar provinsi sehingga sarana dan prasarana transportasi yang tersedia sangat memadai. Lokasi pabrik methanol yang akan didirikan terdapat akses jalur darat, laut, dan udara. Jalur laut dekat dengan Pelabuhan Merak di Cilegon Banten, jalur darat terdapat akses tol Subang, dan jalur udara terdapat Bandara Internasional

Soekarno-Hatta di Tangerang, Banten. Lokasi ini sangat membantu untuk peyediaan bahan baku, bahan pendukung, dan pemasaran produk.

c. Utilitas

Unit utilitas pada suatu pabrik merupakan unit yang sangat penting untuk sarana kelancaran proses produksi. Unit utilitas terbagi atas air, listrik, dan bahan bakar. Air merupakan salah satu kebutuhan penting bagi suatu industri yang digunakan untuk kebutuhan proses, media pendingin, air sanitasi, dan kebutuhan lainnya.

Untuk kebutuhan air, industri dapat memperolehnya dari air sungai atau air laut. Pabrik methanol yang akan didirikan mendapatkan sumber air dari sungai Ci Baranta yang cukup melimpah dan air dari Gunung Sari. Sementara kebutuhan listrik diperoleh dari Perusahaan Listrik Negara (PLN) dan cadangan generator.



Gambar 1.9 Lokasi Aliran Sungai Sekitar Pabrik

d. Tenaga Kerja

Untuk pendirian suatu pabrik, perlu ditunjang dengan adanya Sumber Daya Manusia yang memadai dan produktif. Dalam hal ini, tenaga kerja yang dipilih diperoleh dari lulusan strata 1 (S1), diploma 3 (D3), diploma 4 (D4), maupun lulusan SMA/SMK sederajat yang memiliki pengalaman dan keahlian di bidang tersebut.

Tentunya di daerah Citeureup, Bogor, Jawa Barat tidak akan mengalami kesulitan dalam pemenuhan kebutuhan tenaga kerja karena menurut data BPS Kabupaten Bogor tahun 2021, jumlah penduduk usia produktif (15-65 tahun) di Kabupaten Bogor mencapai 3.523.107 jiwa dengan tingkat pendidikan mencapai

60%. Masyarakat yang memiliki pendidikan dapat dikatakan bahwa masyarakat di sekitar pabrik dapat menerima adanya pendirian pabrik. Pabrik ini diharapkan dapat meningkatkan sosial ekonomi masyarakat di sekitar pabrik. Sikap dan tanggapan masyarakat dapat mendukung pendirian pabrik karena dapat menyerap tenaga kerja sehingga dapat meningkatkan pendapatan perekonomian masyarakat, serta tidak mengganggu keselamatan dan keamanan masyarakat di sekitar pabrik.

Adapun Upah Minimum Kabupaten atau Kota (UMK) Kabupaten Bogor pada tahun 2023 sesuai dengan Keputusan Gubernur Jawa Barat No 561.7/Kep.776-Kesra/2022 tentang Penetapan UMK 2023 yaitu Kabupaten Bogor sebesar Rp.4.520.212,25.

e. Letak Pabrik dengan Daerah Pemasaran Produk

Faktor yang sangat penting dalam suatu industri adalah pemasaran. Berhasil atau tidaknya pemasaran produk merupakan parameter keuntungan yang didapatkan dari industri tersebut. Letak pabrik yang strategis dan berdekatan dengan pasar industri menjadi salah satu kemudahan konsumen dalam memperoleh barang yang dipasarkan. Prioritas utama produk methanol untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri, maka diharapkan hasil penjualan methanol optimal serta Sebagian produk akan diekspor ke luar negeri. Berikut industri pengguna methanol di Jawa Barat.

Tabel 1.7 Industri Pengguna Methanol di Jawa Barat

Nomor	Nama Pabrik	Bidang Industri	Kota
1.	PT. Pupuk Kujang	Pupuk	Cikampek
2.	PT. Biofarma	Farmasi	Bandung
3.	PT. Kimia Farma	Farmasi	Bandung
4.	PT. Combiphar	Farmasi	Bandung
5.	PT. Afiat Pharmaceutical Industries	Farmasi	Bandung
6.	PT. Chandra Asri Petrochemical	Polyethylene	Cilegon
7.	PT. Adyawinsa Plastics Industries	Plastik	Bogor
8.	PT. Sin Young Abadi	Plastik	Bogor
9.	PT. Surya Pancaprima Lestari	Plastik	Bogor
10.	PT. Kencana Plastik Industri	Plastik	Bogor
11.	PT. Citra Resin Industries	Resin	Serang
12.	PT. Nipsea Paint Chemical	Cat	Purwakarta

13.	PT Parmasindo Indah Jaya	Cat	Serang
14.	PT. Bandung Sakura Tekstil	Tekstil	Bandung
15.	PT. Grand Textile Industry	Tekstil	Bandung
16.	PT. Candratex Sejati	Tekstil	Bandung
17.	PT. Fardung Textile Industry	Tekstil	Bandung
18.	PT. Asturo Paper Indonesia	Kertas	Bandung
19.	PT. Papyrus Sakti Paper Mill	Kertas	Bandung
20.	PT. Pabrik Kertas Noree Indonesia	Kertas	Bekasi

f. Perluasan Area Pabrik

Pendirian pabrik harus memperhitungkan rencana untuk area pabrik tersebut dalam jangka waktu 10-20 tahun kedepan. Apabila suatu saat kedepannya akan memperluas area pabrik, maka tidak mengalami kesulitan dalam mencari lahan untuk perluasan pabrik. Di daerah Citeureup, Bogor, Jawa Barat masih terdapat banyak lahan kosong dengan harga yang murah dan sebagian masih wilayah hutan.

2. Faktor Pendukung

a. Kondisi Iklim Cuaca dan Gempa

Iklim dan cuaca di suatu lokasi sangat mempengaruhi proses produksi dan distribusi bahan baku maupun produk. Indonesia merupakan negara beriklim tropis serta letaknya sebagai daerah yang rawan gempa bumi. Pengaruh angin kencang saat musim hujan, suhu tinggi (panas) saat musim kemarau, serta gempa, tanah longsor dapat diantisipasi dengan menyertakan pengaruh pengaruh tersebut ke dalam perhitungan perancangan pemilihan bahan material alat sehingga peralatan dapat tetap beroperasi dengan maksimal. Kondisi iklim dari suatu area yang akan dibangun pabrik juga harus mendukung dimana situasi dan kondisi tidak terlalu mengganggu jalannya operasi pabrik.

Tipe iklim di wilayah Citeureup, Kabupaten Bogor, Jawa Barat memiliki iklim tropis yang relatif stabil, memiliki dua musim yaitu musim hujan dan kemarau dengan suhu udara 25°C-32°C. Curah hujan baik yang dapat mempengaruhi penggunaan tanah dan ketersediaan air pengairan untuk proses pabrik. Kondisi wilayah yang relatif stabil terhadap cuaca dan tidak rawan gempa bumi karena berada di daratan yang landai atau dataran rendah dan sebagian masih merupakan hutan.

b. Bahaya Banjir dan Kebakaran

Pabrik yang akan didirikan harus memperhatikan keselamatan dari bencana. Pemilihan lokasi pabrik harus menghindari daerah yang rawan banjir dan tanah longsor. Daerah Citeureup, Kabupaten Bogor, Jawa Barat merupakan daerah tanah datar dengan sungai Ci Baranta dipinggirnya. Terdapat tanggul Kahuripan untuk melindungi tempat jika terjadinya banjir.

c. Pembuangan Limbah

Pendirian pabrik harus mempunyai pengolahan limbah atau Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) yang baik agar limbah buang pabrik tidak mencemari lingkungan. Pemilihan lokasi pabrik dianjurkan untuk dekat dengan sungai dan laut. Lokasi pabrik methanol yang akan didirikan dekat dengan sungai Ci Baranta untuk proses Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) pabrik.

d. Kondisi Tanah dan Daerah

Kondisi tanah yang relatif masih luas dan tanah datar dengan kondisi iklim yang relatif stabil sepanjang tahun sangat menguntungkan untuk pendirian dan keberlangsungan pabrik yang akan didirikan. Kondisi tempat masih terdapat banyak lahan kosong dengan harga murah di daerah Citeureup, Kabupaten Bogor.

e. Kebijakan Pemerintah dan Perundang-Undangan

Pendirian pabrik adalah salah satu usaha untuk mewujudkan kebijakan pemerintah mengenai perkembangan industri, pemerataan, dan kesempatan kerja. Keberlangsungan pabrik akan sangat dipengaruhi dari kebijakan yang dikeluarkan oleh pemerintah untuk kemudahan pendirian dan keberlangsungan proses pabrik. Hukum yang berlaku merupakan peraturan yang harus dipatuhi oleh perusahaan dalam membangun pabrik. Pabrik yang akan didirikan juga berperan aktif untuk memberi kontribusi kepada pemerintah berupa pemasukan pajak dan penyedia lapangan kerja baru bagi masyarakat.

Pemerintah Kabupaten Bogor telah mengatur perizinan pendirian industri di Kabupaten Bogor yang diatur pada Peraturan Daerah Kabupaten Bogor Nomor 11 Tahun 2012 tentang Izin Usaha Industri, Perdagangan, dan Pendaftaran Perusahaan. Selain itu terdapat juga perpajakan yang berlaku. Pajak merupakan insentif untuk

pemerintah atas keuntungan yang didapatkan dari proses produksi pabrik. Pajak merupakan hal penting untuk menjamin infrastruktur negara yang dapat digunakan untuk memberikan kemudahan, mobilisasi produk kepada konsumen. Perpajakan mengenai methanol terdapat pada Keputusan Menteri Keuangan 542/KMK.01/1994 bahwa dalam rangka menjamin tersedianya bahan baku methanol untuk memenuhi kebutuhan industri dalam negeri.

Berdasarkan pada faktor-faktor pertimbangan di atas, maka terdapat tiga alternatif lokasi yang dapat dipilih yaitu:

1. Kawasan Industri Cilacap (KIC)
2. Kawasan Industri Tuban (KIT)
3. Kawasan Industri Indocement Citeureup Bogor (KIIC)

Tabel 1.8 Perbandingan Pemilihan Lokasi Pabrik

Parameter		Lokasi		
		KIC (Cilacap)	KIT (Tuban)	KIIC (Bogor)
Letak	Sumber	Dekat dengan PT. Semen Solusi Bangun Indonesia untuk bahan baku CO ₂ <i>flue</i> gas yang berlokasi di Cilacap, Jawa Tengah.	Dekat dengan PT. Semen Gresik plant Tuban untuk bahan baku CO ₂ <i>flue</i> gas yang berlokasi di Tuban, Jawa Timur.	Dekat dengan PT. Indocement Tunggal Prakarsa untuk bahan baku CO ₂ <i>flue</i> gas dengan kapasitas paling besar yang berlokasi di Citeureup, Kabupaten Bogor, Jawa Barat.
Bahan Baku			Dekat dengan PT. Samator Gas Industri untuk bahan baku hidrogen yang berlokasi di Gresik, Jawa Timur.	Dekat dengan PT. Aneka Gas Industri dengan kapasitas paling besar untuk bahan baku hidrogen yang berlokasi di

Subang, Jawa Barat.

Tenaga Kerja	Potensi Sumber Daya Manusia Baik dan Produktif. Terdapat instansi Perguruan Tinggi Politeknik Cilacap.	Potensi Sumber Daya Manusia Baik dan Produktif. Terdapat instansi Perguruan Tinggi Universitas Sunan Bonang, Universitas PGRI Ronggolawe, Universitas Terbuka.	Potensi Sumber Daya Manusia Baik dan Produktif. Terdapat Instansi Perguruan Tinggi Institut Pertanian Bogor, Universitas Pakuan, Universitas Djuanda.
	UMK Kabupaten Cilacap Rp. 2.383.090.	UMK Kabupaten Tuban Rp. 2.727.128.	UMK Kabupaten Bogor Rp. 4.520.212.
	Harga tanah Rp. 1.000.000/m ²	Harga tanah Rp. 980.000/m ²	Harga tanah Rp. 250.000/m ²
Sarana Transportasi	Jalur transportasi darat memadai dengan adanya akses jalan tol Cilacap, jalur udara memadai dengan adanya Bandara Tunggal Wulung, dan jalur laut dengan adanya Pelabuhan Tanjung Intan, Cilacap.	Jalur transportasi darat memadai dengan adanya akses jalan tol Tuban, jalur udara cukup memadai, jalur laut memadai dengan adanya Pelabuhan Jenu dan Tambakboyo.	Jalur transportasi darat memadai dengan adanya akses jalan tol Subang, jalur udara memadai adanya Bandara Internasional Soekarno-Hatta di Tangerang, dan jalur laut dengan adanya Pelabuhan Merak di Cilegon Banten.
Letak Pasar	Prospek Pemasaran	Prospek Pemasaran	Prospek Pemasaran

	sangat baik karena merupakan daerah Kawasan industri, sehingga jarak antara lokasi pabrik dengan area segmen pasar relatif dekat.	sangat baik karena merupakan daerah Kawasan industri, sehingga jarak antara lokasi pabrik dengan area segmen pasar relatif dekat.	sangat baik karena merupakan daerah Kawasan industri, sehingga jarak antara lokasi pabrik dengan area segmen pasar relatif dekat.
	Industri yang membutuhkan methanol: PT. Kertas Noor Indonesia, PT. Kertas Kraft, PT. SM Asia Jaya.	Industri yang membutuhkan methanol: PT. Polytama Propindo, PT. Transpacific Petrochemical Indotama Tuban.	Industri yang membutuhkan methanol: PT Pupuk Kujang, PT. Biofarma, PT. Citra Resin Industries, PT. Asturo Paper Indonesia.
	Pendistribusian produk untuk ekspor mudah karena dekat dengan Pelabuhan.	Pendistribusian produk untuk ekspor mudah karena dekat dengan Pelabuhan.	Pendistribusian produk untuk ekspor mudah karena dekat dengan Pelabuhan.
Utilitas	Unit utilitas seperti listrik, air, dan bahan bakar terpenuhi dengan baik.	Unit utilitas seperti listrik, air, dan bahan bakar terpenuhi dengan baik.	Unit utilitas seperti listrik, air, dan bahan bakar terpenuhi dengan baik.
Perluasan Pabrik	Perluasan area pabrik masih dapat dilakukan.	Perluasan area pabrik masih dapat dilakukan.	Perluasan area pabrik masih dapat dilakukan.
Akses Geografi dan Sosial	Relatif dekat dengan pemukiman penduduk.	Relatif dekat dengan pemukiman penduduk.	Jauh dari pemukiman dan sangat dekat dengan industri PT

					Indocement Tunggul Prakarsa.
		Iklm relatif stabil, tanah datar tidak rawan banjir dan gempa.		Iklm relatif stabil, tanah datar tidak rawan banjir dan gempa.	Iklm relatif stabil, tanah datar tidak rawan banjir dan gempa.
Peraturan Pemerintah Keadaan Masyarakat	Regulasi sudah diatur dalam Peraturan Daerah. Peraturan Daerah Kabupaten Cilacap Nomor 9 Tahun 2014 tentang Izin Usaha Industri.		Regulasi sudah diatur dalam Peraturan Daerah. Peraturan Daerah Kabupaten Tuban Nomor 5 Tahun 2008 tentang Izin Pemberian Izin Kegiatan Usaha Pengembangan Usaha Kawasan Industri.		Regulasi sudah diatur dalam Peraturan Daerah. Peraturan Daerah Kabupaten Bogor Nomor 11 Tahun 2012 tentang Izin Usaha Industri, Perdagangan, dan Pendaftaran Perusahaan.
		Mendukung dan menguntungkan.		Mendukung dan menguntungkan	Mendukung dan menguntungkan.

Setelah meninjau hasil komparasi pada tabel 1.8 di atas, maka lokasi yang dipilih untuk pendirian pabrik methanol adalah pada Kawasan Industri Indocement Citeureup (KIIC), Kabupaten Bogor, Jawa Barat. Pertimbangan-pertimbangan yang mendasari pemilihan Citeureup, Kabupaten Bogor adalah sebagai berikut:

1. Bahan baku CO₂ *flue* gas didapatkan dari PT. Indocement Tunggul Prakarsa, Citeureup Kabupaten Bogor, Jawa Barat. Pabrik methanol yang akan didirikan berada dekat samping PT Indocement untuk memudahkan transportasi bahan baku. Untuk bahan baku hidrogen didapatkan dari PT. Aneka Gas Industri, Subang, Jawa Barat melalui jalur darat dengan tanki gas.
2. Penyediaan air diperoleh dari air sungai yang harus melalui proses desalinasi terlebih dahulu sebelum digunakan. Kebutuhan utilitas seperti air, *steam*, dan listrik dapat tersedia

- dengan baik karena dekat dengan sumber air dari sungai Ci Baranta dan air dari Gunung Sari. Citeureup merupakan Kawasan industri terpadu yang dapat dimungkinkan kebutuhan utilitas dapat disediakan oleh sejumlah pabrik tertentu.
3. Kebutuhan tenaga kerja untuk pabrik methanol dapat terpenuhi dari wilayah di sekitar dekat pabrik. Adanya pabrik baru, akan menyerap tenaga kerja sehingga dapat mengurangi tingkat pengangguran di Indonesia. Tentunya di daerah Citeureup, Bogor, Jawa Barat tidak akan mengalami kesulitan dalam pemenuhan kebutuhan tenaga kerja karena menurut data BPS Kabupaten Bogor tahun 2021, jumlah penduduk usia produktif (15-65 tahun) di Kabupaten Bogor mencapai 3.523.107 jiwa.
 4. Harga tanah di daerah Citeureup telah diatur oleh Pemerintah dan ditetapkan sebagai Kawasan Industri, dekat dengan PT. Indocement Tungal Prakarsa sebagai produsen semen terbesar di Indonesia sehingga tidak perlu pembebasan tanah penduduk. Citeureup sebagai kawasan industri, maka perluasan pemukiman penduduk dibatasi untuk memperlancar perluasan area pabrik. Pemerintah Kabupaten Bogor banyak memberi kemudahan untuk pengembangan pabrik di Kawasan industri sehingga hal ini dapat membantu industri-industri yang akan didirikan disana.
 5. Ketersediaan lahan di Citeureup, Kabupaten Bogor juga masih besar dibandingkan Kawasan industri Cilacap dan Tuban yang relatif lebih padat, begitu juga dari segi infrastruktur, dan transportasinya.

1.4 Tinjauan Proses

1.4.1 Tipe Tipe Proses

Proses perancangan pabrik methanol ini menggunakan *flue gas* dari PT. Indocement Tungal Prakarsa, Citeureup Bogor, Jawa Barat sebagai bahan baku. Proses produksi methanol mengacu pada proses umum yaitu preparasi *synthetic gas*, *synthetic methanol*, dan pemurnian methanol.

1. Persiapan *Synthetic Gas*

Terdapat lima pilihan proses sintesis gas yaitu *steam reforming*, *partial oxidation*, *dry reforming*, *autothermal reforming*, serta absorpsi. Berikut merupakan tabel perbandingan proses sintesis gas.

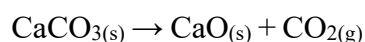
Tabel 1.9 Perbandingan Proses Sintesis Gas

No.	Nama Proses	Penjelasan Proses	Reaksi	Kelebihan	Kekurangan
1.	<i>Steam Reforming</i>	<i>Feed gas</i> berupa natural gas direaksikan dengan <i>steam</i>	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 3\text{H}_2 + \text{CO}$	Menghasilkan lebih banyak hidrogen.	Perlu menambahkan <i>steam</i> sehingga membutuhkan biaya yang lebih besar.
2.	<i>Partial Oxidation</i>	<i>Feed gas</i> berupa natural gas direaksikan dengan O_2	$\text{CH}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}_2 + \text{CO}$	Ekonomis karena harga oksigen lebih murah.	Hidrogen yang dihasilkan lebih sedikit.
3.	<i>Dry Reforming</i>	<i>Feed gas</i> direaksikan dengan CO_2	$\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO} + 2\text{H}_2$	Aktivitas dan stabilitas tinggi.	Menggunakan katalis logam mulia yang mahal.
4.	<i>Autothermal Reforming</i>	Gabungan dari proses <i>steam reforming</i> dan <i>partial oxidation</i> . Menggunakan O_2 dan CO_2 . Terdapat reaksi pembakaran.	i. Pembakaran Metana $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ii. Oksidasi Parsial Metana $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$ iii. Pemecahan Metana $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3\text{H}_2$	Dapat mengonversi sisa methana yang ada. Proses lebih cepat.	Dapat menimbulkan emisi CO_2 , Kontrol proses yang lebih kompleks, biaya investasi tinggi.
5	Absorbsi	Gas buang atau <i>flue gas</i>	$\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH}$	CO_2 didapatkan	Diperlukan biaya untuk

sebagai bahan baku	$\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	secara gratis.	membeli
diabsorpsi		Menggunakan	Hidrogen.
atau diserap		larutan	
dengan suatu		penyerap	
larutan		yang	
penyerap		efektivitas	
untuk		tinggi dan	
menghasilkan		mudah	
CO_2 sebelum		didapatkan	
terjadi reaksi		dengan harga	
dengan		murah.	
Hidrogen			
(H_2).			

Teknologi yang dapat digunakan untuk menurunkan kadar CO_2 di atmosfer disebut dengan teknologi *carbon capture* (CC) atau *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS). *Carbon capture* adalah teknologi untuk menangkap CO_2 dari gas buang hasil pembakaran bahan bakar fosil, misalnya dengan absorpsi kimia atau dengan teknologi membran. CO_2 yang tertangkap, dapat digunakan sebagai alternatif bahan baku industri atau disimpan kembali ke dalam tanah sehingga tidak menambah emisi di atmosfer (Isya et al., 2021).

Bahan baku yang digunakan adalah *flue* gas dari PT. Indocement Tunggal Prakarsa. *Flue* gas dihasilkan dari proses *suspension preheater* dimana dilakukan pemanasan awal dan proses kalsinasi awal sebelum masuk *rotary kiln*. *Suspension preheater* terdiri dari *cyclone* untuk memisahkan bahan baku dari gas pembawanya. *Suspension preheater* ditambahkan kalsiner untuk proses kalsinasi. Proses kalsinasi dilakukan pada suhu 900°C (Nur et al., 2015). Reaksi kalsinasi CaCO_3 dan MgCO_3 adalah sebagai berikut:



Preparasi *synthetic* gas yang digunakan adalah proses absorpsi kimia. Teknologi absorpsi *flue* gas merupakan absorpsi kimia menggunakan larutan

absorben yang merupakan salah satu metode yang paling efisien dan dapat diterapkan secara luas dalam teknologi *carbon capture* berbasis absorpsi. Untuk menangkap gas CO₂ dalam gas buang atau *flue gas*, digunakan larutan penyerap atau absorben melalui proses absorpsi. Larutan yang dipakai untuk menangkap gas CO₂ dari *flue gas* adalah larutan EEMPA (*N*-(2-ethoxyethyl)-3- morpholinopropan-1-amine). Berikut merupakan pertimbangan pemilihan larutan penyerap.

Penangkapan CO₂ dapat menggunakan pendekatan biologis dengan memanfaatkan dan merekayasa kemampuan pengikat CO₂ bawaan dari organisme fotoautotrofik seperti tumbuhan dan alga. Banyak penelitian yang memanfaatkan mikroalga untuk meregenerasi absorben, hal ini dikarenakan dari berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa mikroalga dapat menyerap CO₂ hingga 20% v/v. Mikroalga dapat dengan mudah mengonversi CO₂ menjadi bahan yang bermanfaat tergantung dari jenis yang digunakan. Namun perlu dilakukan identifikasi penelitian lebih lanjut untuk pemilihan mikroalga terbaik untuk absorpsi CO₂ sehingga dapat meminimalisir konsumsi energi dan pemanfaatan selanjutnya yang menguntungkan (Isya et al., 2021).

Tabel 1.10 Perbandingan Larutan Penyerap CO₂ *Flue Gas*

Larutan Penyerap	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
MEA (<i>Monoethanolamine</i>)	- Sudah banyak digunakan di industri - Efisiensi penyerapan CO₂ dari <i>flue gas</i> 73% - Kelarutan CO₂ dalam 6-30% MEA yaitu 0,325-0,862 mol CO₂/mol MEA pada 1,02 bar	- Kandungan air tinggi 70% wt - Konsumsi energi daur ulang yang tinggi - Mudah mengalami degradasi <i>oxidating</i> dan terpolimerisasi - Biaya instalasi pabrik sebesar 632 MMS\$	(Daiyan et al., 2020; Guo et al., 2022; Najafloo & Zarei, 2018)

	dan suhu 40°C	- Sulit regenerasi karena bereaksi secara irreversibel	
EEMPA (<i>N</i> -(2-ethoxyethyl)-3-morpholinopropan-1-amine).	- Kandungan air rendah 1,5 % wt - Efisiensi penyerapan CO₂ dari <i>flue</i> gas 90% - Energi lebih rendah 42% dari MEA dan 23% dari Cansolv - Biaya lebih murah 16-19% dari Cansolv - Proses lebih mudah dan cepat dengan absorber - Pelarut dasar yang berpotensi mereduksi biaya <i>carbon capture</i> - Biaya instalasi pabrik sebesar 416 MM\$ - Biaya CO₂ <i>Capture</i> sebesar 50,6\$/tonne CO₂	- Reaktivitas tinggi sehingga perlu diperhatikan untuk menghindari reaksi yang tidak diinginkan	(Heldebrant, 2021)

	- Regenerasi mudah - Kelarutan CO_2 dalam EEMPA yaitu 0,328 mol CO_2/mol EEMPA pada 1,02 bar dan suhu 40°C	
DEA (<i>Diethanolamine</i>)	- Lebih mudah diregenerasi - Absorpsi lebih cepat - Harga terjangkau - Kelarutan CO_2 dalam 40% DEA yaitu 0,696 mol CO_2/mol DEA pada 1,02 bar dan suhu 30°C	- Kurang reaktif (Isya et al., 2021; Ullah et al., 2022) - MEA - Konsumsi energi daur ulang yang tinggi - Sangat mudah mengalami oksidasi dan terpolimerisasi - Jarang digunakan - Kandungan air 25-35% wt
MDEA (<i>N-methyldiethanolamine</i>)	- Tahan terhadap korosi dan degradasi - Regenerasi mudah dibandingkan MEA dan DEA - Kelarutan CO_2 dalam 24% MDEA yaitu	- Kurang reaktif (Guo et al., 2022; Isya et al., 2021) - Jarang digunakan

	0,86 mol CO ₂ /mol MDEA pada 1 bar dan suhu 40°C		
AMP (2- amino-2-methyl-1- propanol)	- Kapasitas dan kecepatan absorpsi - Kelarutan CO₂ dalam 2M AMP suhu 40°C dan tekanan 1 bar yaitu 0,97 mol CO₂/mol <i>solvent</i> AMP	- Harga yang mahal dan belum ada teknologi yang siap untuk digunakan	(Isya et al., 2021; Kontos et al., 2022)
PZ (Piperazine)	- Waktu absorpsi yang relatif cepat - Kelarutan CO₂ dalam 20% PZ yaitu 1,33 mol CO₂/mol PZ pada 10,22 bar dan suhu 40°C, serta hanya 0,11 pada 2,60 bar pada suhu 40°C. Untuk 8M PZ suhu 40°C, tekanan 0,75 bar kelarutan CO₂ 0,73 mol CO₂/kg PZ	- Harga mahal - Dapat menyebabkan korosi dan toksisitas yang tinggi - Penyerapan CO₂ kurang efektif pada tekanan rendah dan harus pada konsentrasi PZ yang tinggi	(Freeman et al., 2009; Isya et al., 2021; Safdar et al., 2016)

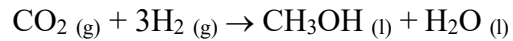
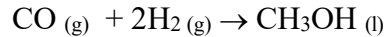
Membran berbasis <i>amine</i>	- Untuk pemisahan CO ₂	- Kecepatan absorpsi CO ₂ lebih rendah dari MEA - Harga lebih mahal	(Isya et al., 2021)
II-based membranes	- Dapat menurunkan viskositas dari ILs	- Harga lebih mahal	(Isya et al., 2021)
<i>Amine</i> + mikroalga (MEA + <i>Spirulina sp.</i>)	- Efisiensi fiksasi karbon 16% - Dapat mendorong lebih banyak pertumbuhan biomassa	- Konsentrasi protein rendah	(Isya et al., 2021)
DEA/K ₂ CO ₃ + <i>Spirulina sp.</i>	- Efisiensi fiksasi karbon 43,7% - Meningkatkan konsentrasi karbon anorganik terlarut - Kandungan protein tinggi dan meningkatkan konsentrasi karbohidrat	- Mekanisme proses absorben yang kurang jelas di dalam struktur seluler mikroalga	(Isya et al., 2021)
MEA/AMP/DEA/TEA + <i>Scenedesmus sp.</i>	- Efisiensi fiksasi karbon 40% - Peningkatan	- Penghambatan pertumbuhan sel karena terjadi	(Isya et al., 2021)

	kandungan karbon anorganik terlaut	pembentukan karbamat yang stabil
	- Laju peningkatan fiksasi CO ₂ tinggi	
Cansolv	- Efektivitas penyerapan CO ₂ sebesar 90%	- Kadar SO₂ (Serhan et al., 2019) masih tinggi yaitu 35 ppmv - Biaya instalasi pabrik sebesar 632 MM\$ - Biaya CO₂ Capture sebesar 58,3 \$/tonne CO₂

Untuk proses *synthetic* gas dari bahan baku *flue* gas PT. Indocement Tungal Prakarsa, Citeureup, Kabupaten Bogor, Jawa Barat didapatkan proses yang dipilih pada pra rancangan pabrik methanol ini adalah proses absorpsi dengan *carbon capture* (CC) berbasis kimia menggunakan larutan penyerap berupa EEMPA 1 *N*-(2-ethoxyethyl)-3- morpholinopropan-1-amine. Dipilih proses absorpsi karena prosesnya mudah menggunakan larutan penyerap yang memiliki efektivitas tinggi dan larutan absorben yang dipilih yaitu EEMPA karena dari segi karakteristik memiliki kandungan air rendah daripada MEA yaitu 1,5 % wt, efisiensi penyerapan CO₂ dari *flue* gas 90%, dari segi *techno-economic* lebih menguntungkan yaitu menggunakan energi lebih rendah dari larutan MEA dan Cansolv, biaya lebih murah sebesar 50,6\$/tonne dibandingkan pelarut lain sehingga dapat berpotensi mereduksi biaya *carbon capture*. Selain itu, proses juga lebih mudah dan cepat dengan absorber.

2. Sintesis Methanol

Reaksi pembentukan methanol :



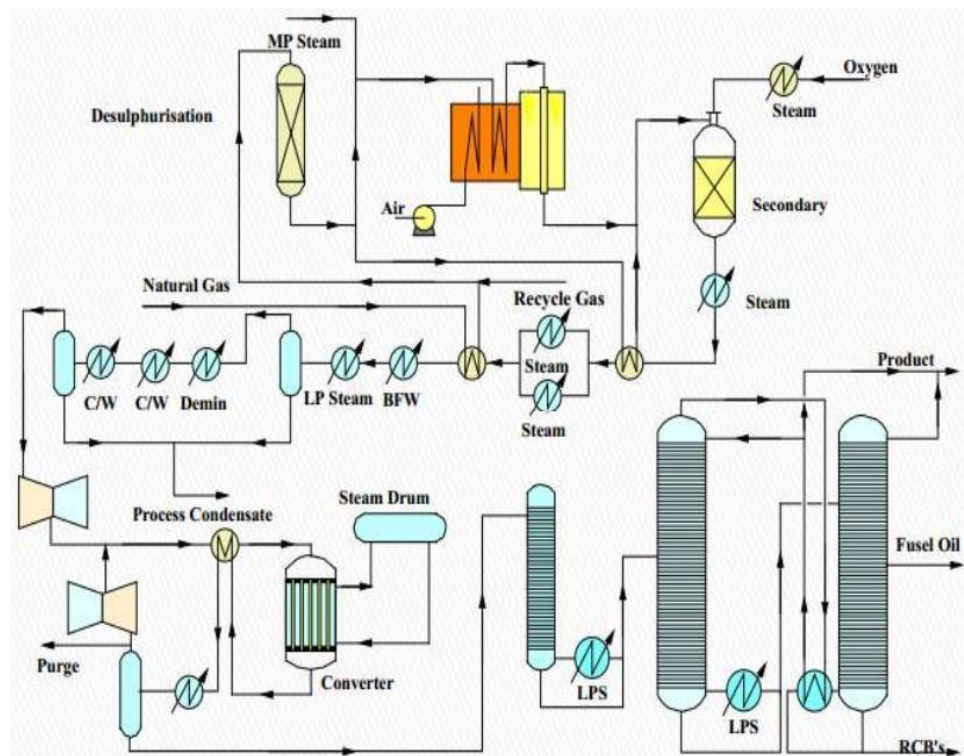
Reaksi di atas terjadi dengan katalis berbasis Cu. Karena masing-masing katalis memiliki aktivitas katalitik yang berbeda dalam kondisi tertentu, jenis katalis yang digunakan dalam proses sintesa metanol mempengaruhi kondisi operasi. Dalam industri ada berbagai teknologi proses yang digunakan untuk membuat methanol:

1. Proses Lurgi *Low-Pressure Methanol Synthesis Process*
2. Proses ICI (*Imperial Chemical Industries*)
3. Proses Kellogg Brown Root
4. Proses MGC (*Mitsubishi Gas Company*)
5. Proses *Integrated Capture and Conversion of CO₂ to Methanol (IC³M) Technology by Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)*.

Kelima proses tersebut melewati tahap proses yang sama. Jenis katalis, kondisi operasi, dan jenis reaktor untuk sintesis methanol yang membedakan mereka.

1. Proses Lurgi (*Low-Pressure Methanol Synthesis Process*)

Metanol disintesis dalam proses ini dengan kondisi temperatur reaktor sebesar 250-260°C dan tekanan sebesar 50-80 bar. Pada proses ini, jenis reaktor bertipe *shell and tube* dengan katalis yang terisi pada bagian *tube*. Reaksi di dalam reaktor berjalan eksotermis, oleh karena itu panas hasil reaksi dipindah menggunakan air suhu rendah yang disirkulasikan pada bagian *shell* dan hal ini menghasilkan *steam* bertekanan tinggi yang dapat digunakan untuk kebutuhan proses lainnya. *Syn gas* kemudian dikompres hingga tekanan 50-80 bar sebelum masuk reaktor methanol. *Crude* methanol yang dihasilkan kemudian diproses pemurnian dalam kolom destilasi (Arthur, 2010). Diagram alir proses Lurgi *Low-Pressure Methanol Synthesis Process* ditunjukkan oleh gambar berikut:

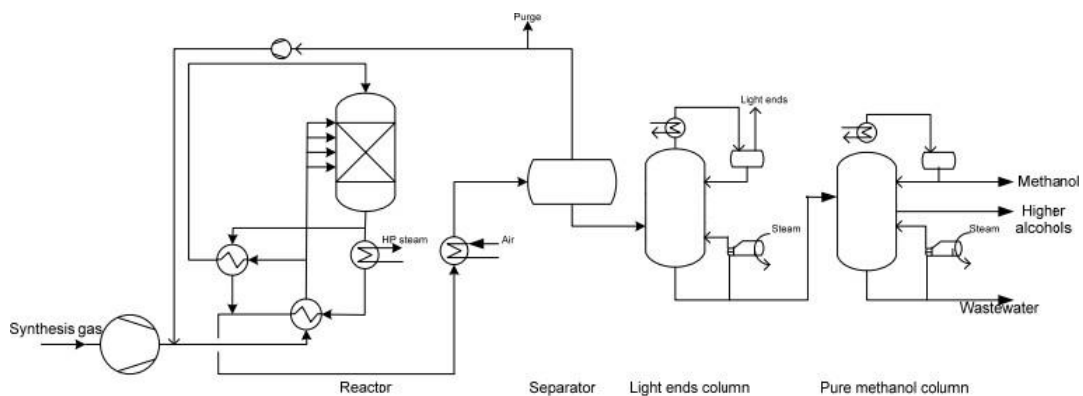


Gambar 1.10 Diagram Alir Proses Lurgi *Low-Pressure Methanol Synthesis Process* (Arthur, 2010)

2. Proses ICI (*Low Pressure Methanol Synthesis Process*)

ICI (*Imperial Chemical Industries*) memperkenalkan proses *low pressure methanol* (LPM) pertama pada tahun 1960-an. Perbedaan utama dalam proses-proses ini terutama terletak pada desain reaktor itu sendiri dan cara mengintegrasikan unit-unit untuk pengoperasian yang lebih ekonomis dan/atau menguntungkan.

Proses ini memanfaatkan penggunaan reaktor adiabatik dan bed berkatalis tunggal. Panas reaksi ditransfer melalui reaktan dingin yang memiliki ketinggian yang berbeda dari bed katalis (Arthur, 2010). Diagram alir ICI *low pressure methanol process* ditunjukkan pada gambar berikut:



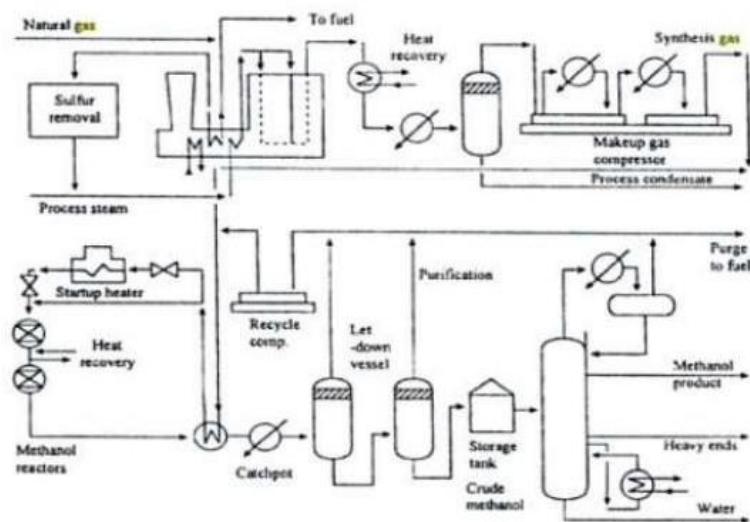
Gambar 1.11 Diagram Alir *ICI Low-Pressure Methanol Synthesis Process* (Arthur, 2010)

Syn gas yang telah dikompresi dan dicampur dengan *recycle gas* dipanaskan dengan memanfaatkan reaktor yang mengalir sebagai penukar panas. Setelah pemanasan, 40% dari aliran tersebut dialirkan ke reaktor dan sisanya digunakan sebagai *quench* gas untuk menghilangkan panas reaksi. Umpan kemudian dinaikkan tekanannya hingga 50,6 bar pada kompresor jenis sentrifugal, kemudian diumpankan ke dalam reaktor jenis *quench* pada suhu operasi 270°C. *Quench converter* berupa *single bed* yang mengandung katalis pendukung yang bersifat *inert*. Hasil reaksi berupa *crude* methanol yang mengandung air, dimetil eter, ester, besi karbonil, dan alkohol lain. Produk dari reaktor didinginkan dengan *feed* dan air untuk produksi *high pressure steam*. Pendinginan dilanjutkan dengan menggunakan air dingin dari *heat exchanger* sehingga methanol dan air akan terkondensasi.

Pemisahan gas dan *liquid* pada proses ini menggunakan *flash drum* pada tekanan dibawah atmosfer. Methanol dimurnikan dengan 2 kolom. Kolom pertama menghilangkan gas dan pengotor ringan, dan kolom kedua membedakan methanol dari komposisi alkohol berat lainnya. Dalam pengembangannya, karena dianggap kurang menguntungkan, ICI mengganti jenis reaktor yang digunakan dari *quench* reaktor menjadi *tube* berpendingin yang pada prinsipnya sama dengan yang digunakan oleh Lurgi (Arthur, 2010).

3. Proses Kellog Brown Root (*Medium Pressure Synthesis Methanol Process*)

Kellogg Co. (KBR) memperkenalkan reaksi sintesis yang sangat berbeda, tetapi pada dasarnya merupakan reaktor tipe adiabatik. Reaktor berbentuk bulat dan didalamnya berisi tumpukan katalis. Gas sintesis mengalir melalui beberapa *bed* reaktor yang tersusun aksial berseri. Kebalikan dari proses ICI, panas reaksi yang dihasilkan dikontrol dengan *intermediate coolers*. Proses ini menggunakan katalis tembaga dan beroperasi pada rentang suhu 200-280°C serta tekanan 100-150 bar. Suhu didalam bed katalis dikendalikan melalui penggunaan sebuah reaktor berpendingin (*quench type converter*) dengan menyerap panas reaksi dalam *intermediate stage boiler* (Arthur, 2010).

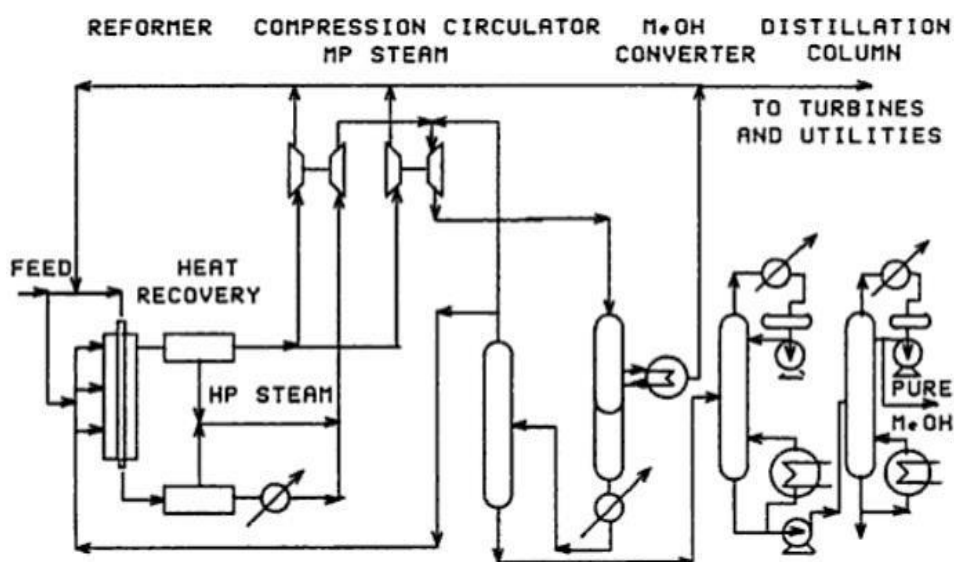


Gambar 1.12 Diagram Alir Proses Kellog Brown Root (KBR)
(Arthur, 2010)

4. Proses Mitsubishi Gas Company (*Low-Medium Pressure Synthesis Methanol Process*)

Pada proses sintesis metanol dengan teknologi MGC, sintesis methanol masih menggunakan katalis berbasis tembaga (Cu) dengan kondisi operasi reaktor pada kisaran suhu 240-260°C dan kisaran tekanan 50-80 bar. Pada awalnya perusahaan Jepang ini menggunakan tekanan 150 bar, namun kemudian dikembangkan untuk tekanan kurang dari 100 bar. Proses MGC menggunakan reaktor dengan *double-walled tubes* dimana pada bagian anulus diisi dengan katalis. Syn gas mengalir melalui pipa bagian dalam sedangkan pipa bagian luar dialiri oleh air pendingin. Proses MGC menggunakan

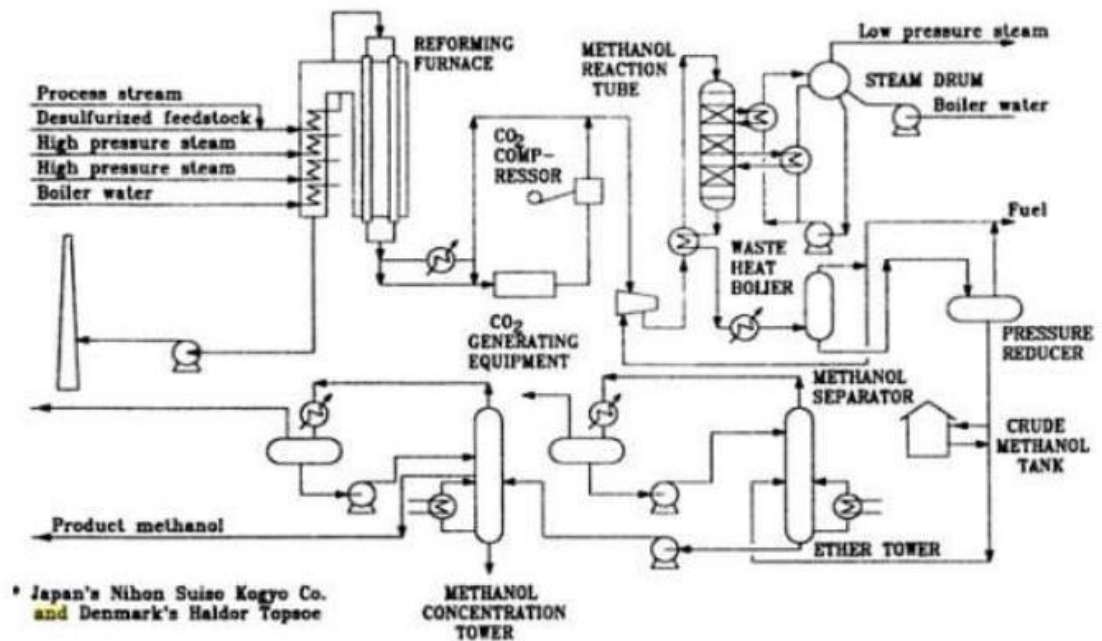
hidrokarbon sebagai umpan. Umpan dihilangkan kandungan sulfurnya sebelum masuk ke steam reformer yang beroperasi pada 500°C. Arus keluar dari *steam* reformer bersuhu 800-850°C dan mengandung karbon monoksida, karbon dioksida, dan hidrogen. Selanjutnya *syn* gas yang dihasilkan dinaikkan tekanannya dengan kompresor sentrifugal dan dicampur dengan arus *recycle* sebelum diumpankan ke dalam reaktor (Arthur, 2010).



Gambar 1.13 Diagram Proses Sintesis Methanol Tekanan Rendah/Sedang MGC (Arthur, 2010)

5. Proses Haldor Topsoe *Synthesis Methanol (Medium Pressure Synthesis Methanol Process)*

Proses Haldor Topsoe ini menggunakan tiga reaktor adiabatik radial yang disusun secara seri dan panas reaksi dihilangkan oleh *intermediate coolers*. Gas sintesis mengalir secara radial melalui lapisan katalis dan hal ini mengurangi penurunan tekanan. Proses pemurnian methanol sama dengan proses lainnya . Tekanan operasi proses diatas 150 bar dan suhu operasi 200-310°C. Produk pertama perlu didinginkan sebelum reaktor kedua, hasil pendinginan berupa uap (*steam*) bertekanan rendah. Katalis yang digunakan berupa Cu-Zn-Cr yang aktif pada 230-280°C dan 100-200 bar (Arthur, 2010). Diagram aliran proses ditunjukkan pada gambar di bawah ini;



Gambar 1.14 Diagram Proses Sintesis Methanol dengan Haldor Topsoe (Arthur, 2010)

6. Proses *Integrated Capture and Conversion of CO₂ to Methanol (IC³M) Technology*

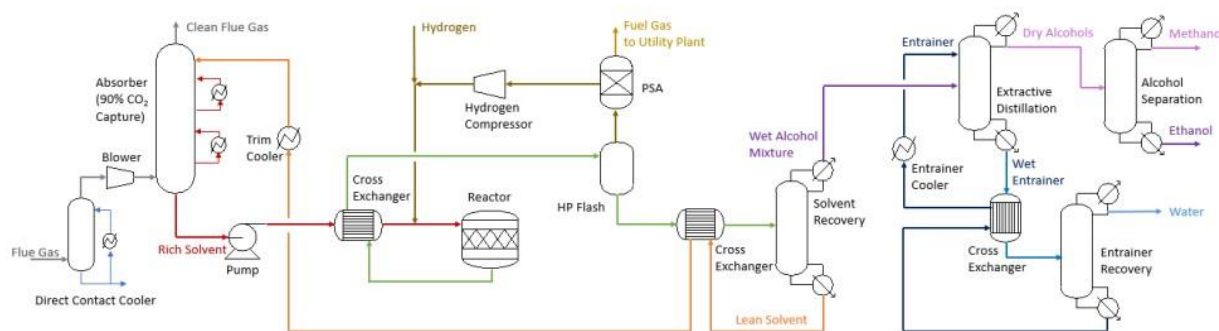
Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) memperkenalkan proses IC³M pertama pada tahun 2022. *Integrated Capture and Conversion of CO₂ to Methanol (IC³M) Technology* merupakan salah satu solusi mengurangi emisi gas rumah kaca dan penggunaan baha bakar fosil. Perbedaan utama dalam proses ini dengan proses yang telah ada terletak pada desain penyerapan CO₂ menggunakan *absorber* dengan *solvent* (*N*-(2-ethoxyethyl)-3- morpholinopropan-1-amine) (2-EEMPA) dan cara mengintegrasikan unit-unit untuk pengoperasian yang lebih ekonomis dan/atau menguntungkan. >90% dari CO₂ terserap oleh EEMPA (*N*-(2-ethoxyethyl)-3- morpholinopropan-1-amine) sebagai *Binding Organic Liquid* (BOL) di dalam kolom absorpsi. Kondisi operasi absorber pada 30°C pada tekanan kolom 1 bar.

Proses hidrogenasi CO₂ yang terikat pada EEMPA menghasilkan methanol terjadi di *continues fixed bed* reaktor yang beroperasi pada tekanan 25 bar dan suhu 125°C menggunakan katalis Cu/ZnO/Al₂O₃. Untuk meminimalkan kecepatan ke permukaan, reaktor dibagi menjadi lima bagian terpisah. H₂ diserap melalui sisi reaktor dan CO₂ yang terikat EEMPA dipompa ke bagian

bawah reaktor setelah meninggalkan bagian bawah kolom penyerapan. Untuk mempertahankan reaksi isothermal, terdapat satu pemanas *interstage* dikombinasikan dengan pompa yang digunakan untuk memanaskan cairan reaktor. Reaksi pembentukan methanol adalah bersifat eksotermis.

Berbagai komponen yang keluar dari outlet reaktor harus dipisahkan dan juga untuk membuang jumlah minimum EEMPA dan H_2 . Hidrogen dari cairan dipisahkan melalui *flash drum* satu tahap untuk mempertahankan tekanan tinggi dalam aliran, untuk mendapatkan aliran uap kembali ke tekanan operasi di reaktor hidrogenasi. Arus uap *flash column* yang mengandung H_2 di-*recycle* kembali ke reaktor hidrogenasi untuk kontribusi reaksi lanjut.

EEMPA dipisahkan untuk recycle melalui kolom destilasi. Setelah EEMPA dikeluarkan dari aliran, campuran methanol (CH_3OH) dan air (H_2O) yang hampir murni tetap ada. Kolom destilasi kedua diperlukan untuk memisahkan kedua komponen ini dan memastikan produksi metanol pada kemurnian 99,6% (Arora et al., 2021).



Gambar 1.15 Diagram Alir Proses *Integrated Capture and Conversion of CO₂ to Methanol (IC3M) Technology* (Kothandaraman et al., 2021)

Tabel 1.11 Perbandingan Proses Sintesis Methanol

		Lurgi	ICI	KBR	MGC	Topsoe	IC ³ M
Kondisi Operasi	Suhu (°C)	250-260	220-280	200-280	240-260	240-260	125-200
	Tekanan (bar)	50-80	50-100	100-150	50-150	150-200	25-50
Katalis	Jenis Katalis	Cu/ZnO/Al ₂ O ₃	Cu/ZnO/Al ₂ O ₃	Cu	Cu	Cu/Zn/Cr	Katalis Cu/ZnO/Al ₂ O ₃
	<i>Lifetime</i>	5	3	3	4	5	5
Reaktor	Karakteristik	<i>Shell and Tube</i> Isothermal	<i>Quench</i>	Adiabatik Radial	<i>Annular</i> <i>Gas/Liquid HE</i>	<i>Vertical Tubular</i>	<i>Continuos Fixed</i> <i>Bed</i>
	Jumlah	1	1	4	1	3	1
	Katalis Loading	Sulit	Mudah	Mudah	Sulit	Sulit	Mudah
	Pendingin	Air Pendingin <i>(On Shell)</i>	<i>Cold Quench</i>	<i>Intermediate</i> <i>Coolers</i>	Air Pendingin <i>(On Tube)</i>	<i>Intermediate</i> <i>Coolers</i>	<i>Water</i>
	Konversi	90-95%	90-95%	90-92%	90-95%	90-95%	99,60%
	Selektivitas	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi
	Bahan Baku	<i>Natural Gas</i>	<i>Natural Gas</i>	<i>Natural Gas</i>	<i>Natural Gas</i>	<i>Natural Gas</i>	<i>Flue Gas</i>
Proses	Tahap Proses	<i>Pre Reforming</i>	<i>Pre Reforming</i>	<i>Pre Reforming</i>	<i>Pre Reforming</i>	<i>Pre Reforming</i>	<i>Carbon Capture</i>
		– Sintesis	– Sintesis	– Sintesis	– Sintesis	– Sintesis	– Sintesis
		Methanol –	<i>Purification</i>	Methanol –	Methanol –	Methanol –	Methanol –

		<i>Purification</i> Unit	Unit	<i>Purification</i>	<i>Purification</i>	<i>Purification</i>	<i>Purification</i>
				Unit	Unit	Unit	Unit
Aspek Ekonomi	Kebutuhan	Sedikit					
	Katalis		Banyak	Sedang	Sedang	Banyak	Banyak
	Harga Katalis	Sedang	Sedang	Sedang	Sedang	Sedang	Sedang
Kelebihan		Efisiensi thermal yang baik, selektivitas tinggi, suhu stabil	Sudah banyak digunakan	Kecepatan dan kapasitas produksi tinggi	Suhu yang dibutuhkan ideal, katalis yang dibutuhkan sedikit	Kecepatan dan kapasitas produksi tinggi	Kemurnian tinggi, suhu dan tekanan rendah, efisiensi energi
Kekurangan		Kapasitas produksi yang tidak terlalu besar	Efisiensi thermal rendah, rentan kerusakan katalis	Kondisi operasi tinggi, selektivitas rendah	Proses rumit, biaya reaktor mahal	Kondisi operasi tinggi, selektivitas rendah	Perawatan yang cukup kompleks dan sulit

Pada proses sintesis methanol diperlukan sebuah katalis sebagai katalisator. Katalisator berfungsi untuk mengurangi energi aktivasi pada suatu reaksi sehingga laju reaksi kimia dapat berlangsung lebih cepat tanpa mengalami perubahan atau dikonsumsi oleh reaksi itu sendiri. Katalis secara umum dibagi menjadi katalis homogen dan heterogen (Firdaus & Sofyan, 2018):

a. Katalis Homogen

Katalis yang berada dalam fase yang sama dengan reaktan dan produk dalam reaksi kimia. Katalis ini dapat terlarut secara homogen dengan zat dalam fase cair atau gas. Katalis homogen biasanya digunakan dalam reaksi cair atau gas karena katalis tersebut dapat menyebar merata di dalam fase yang sama. Contoh katalis homogen yaitu: HNO_3 , HCl untuk proses hidrolisis, asam sulfat (H_2SO_4) dalam reaksi esterifikasi. Keunggulan katalis homogen yaitu tidak mudah teracuni. Kelemahannya yaitu sulit dipisahkan dari campuran dan mudah terurai pada suhu tinggi.

b. Katalis Heterogen

Katalis heterogen adalah katalis dalam fase yang berbeda dengan reaktan dan produk dalam reaksi kimia. Katalis ini berupa padatan dalam reaktor dan tidak tercampur secara homogen dengan reaktan. Katalis heterogen berinteraksi dengan reaktan di permukaan katalis kemudian produk dilepaskan dari permukaan. Contoh katalis heterogen: Platina (Pt), $\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$ dalam reaksi hidrogenasi, nikel (Ni) dalam reaksi *reforming* katalitik, dan zeolit untuk hidrolisis. Kelebihan katalis heterogen yaitu dapat dipisahkan dari campuran reaksi hanya dengan proses penyaringan sehingga mudah diregenerasi. Kekurangannya yaitu permukaan katalis telah jenuh oleh molekul reaktan, maka reaksi tidak dapat dilanjutkan. Kejenuhan katalis dapat diatasi dengan melakukan regenerasi (Firdaus & Sofyan, 2018).

Tabel 1.12 Perbandingan Katalis Sintesis Methanol

No.	Katalis	Kelebihan	Kekurangan	Sumber
1.	$\text{ZnO/Cr}_2\text{O}_3$	- Bekerja pada suhu 300-400°C dengan tekanan 30 MPa. - Stabilitas katalis baik.	- Kondisi operasi dengan suhu dan tekanan tinggi. - Biaya operasi lebih besar.	(Liu & Hagelin-weaver, 2023)

		- Aktivitas katalis lemah. - Kemurnian methanol rendah. - Jumlah kromium yang besar menyebabkan polusi.	
2.	Cu/ZnO/Al ₂ O ₃	- Ukuran lebih besar. - Harga katalis methanol lebih murah. - Banyak dipakai di Industri untuk sintesis methanol. - Secara <i>techno-economic</i> lebih baik dengan biaya rendah, hemat energi, hemat waktu, dan aktivitas tinggi (240 gram CH₃OH/kg cat.hr). - Efektifitas pada suhu 200-270°C dan tekanan 20-50 bar - Cara regenerasi katalis yang mudah. - Umur katalis panjang. - Konversi tinggi mencapai 99,6-99,8%	- Reaktivitas dan selektivitas terbatas oleh ukuran partikel dan sifat permukaan yang berbeda. - Dapat menimbulkan reaksi samping seperti alkilasi. (Mirhosseini et al., 2017 dan Etim et al., 2020)
3.	(Cu/ZnO/Al ₂ O ₃ /V ₂ O ₅)	- Katalis berbahan dasar tembaga, suhu reaksi yang sama,	- Dapat menimbulkan reaksi samping (Mirhosseini et al., 2017)

tekanan reaksi seperti alkilasi.
ditingkatkan menjadi
100–200 bar.

Pada saat ini sejalan dengan konservasi energi, proses pembuatan methanol pada tekanan sedang dan tekanan rendah banyak digunakan. Proses yang digunakan untuk pabrik methanol saat ini adalah proses dengan tekanan rendah. Terdapat beberapa proses dalam sintesis methanol dengan menggunakan tekanan rendah yang saat ini telah dikomersialkan yaitu proses Lurgi yang telah banyak digunakan dalam industri. PT Kaltim Methanol Industri menggunakan proses Lurgi dalam produksi methanol. Proses sintesis methanol dengan bahan baku proses gas sintesa dibagi menjadi tiga yaitu:

- a. Proses bertekanan tinggi (250-300 bar)
- b. Proses bertekanan sedang (100-250 bar)
- c. Proses bertekanan rendah (50-100 bar)

Proses sintesis methanol dengan tekanan rendah memiliki beberapa keuntungan yaitu:

1. Konsumsi energi rendah.
2. Biaya investasi dan biaya produksi lebih murah.
3. Meningkatkan selektivitas terhadap hasil produk methanol dan mengurangi produk samping CH_4 dan H_2O .

Pengolahan sintesis methanol dari *flue* gas dan hidrogen dapat dilakukan dengan 6 macam proses yang dibandingkan yaitu Lurgi, ICI, Kellog, MGC, Haldor Topsoe, dan IC^3M . Berdasarkan aspek pada tabel 1.10, dipilih teknologi IC^3M karena memiliki kelebihan atau nilai paling tinggi. Pemilihan teknologi IC^3M ini karena:

1. Menggunakan bahan baku berupa *flue* gas yang harganya lebih terjangkau dibandingkan *natural* gas. Memanfaatkan limbah buang *flue* gas menjadi *green* methanol untuk mengurangi emisi CO_2 di lingkungan.
2. Penggunaan absorber untuk menangkap CO_2 dari *flue* gas sehingga tidak memerlukan unit *reforming* dapat menghemat bahan bakar atau konsumsi energi. Menggunakan larutan penyerap atau absorben berupa EEMPA (*N*-(2-ethoxyethyl)-3- morpholinopropan-1-amine) dengan keefektifan penyerapan sebanyak 90%.
3. Kondisi operasi tidak terlalu ekstrim yaitu dengan tekanan. Dengan kondisi operasi proses yang tidak terlalu ekstrim, tebal alat yang dipakai cukup wajar, sehingga

harga material reaktor relatif murah. Selain itu, semakin rendah kondisi operasi yang digunakan, maka semakin rendah juga kemungkinan timbulnya *hazard*.

4. Pada proses sintesis methanol menggunakan katalis $\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$ yang mempunyai konversi hingga 99,6%. Reaksi pembentukan methanol dari CO_2 dan hidrogen bersifat *reversible*, oleh karena itu perlu dijaga suhu dan tekanannya supaya tidak terurai kembali.
5. Selektivitas methanol yang tinggi pada suhu rendah dan tekanan rendah dengan suhu 125-200°C tekanan 25-50 bar.
6. Kondisi operasi sintesis methanol bersifat isothermal non adiabatik karena terjadi tanpa adanya perubahan suhu selama proses reaksi berlangsung, suhu sistem diatur dan dijaga pada nilai yang sama ketika seluruh reaksi berlangsung dan terdapat pertukaran panas dengan lingkungan ketika mendinginkan methanol menggunakan air pendingin.

Uraian sintesis methanol dengan proses *Integrated Capture and Conversion of CO₂ to Methanol (IC³M)*

1. Proses *Integrated Capture and Conversion of CO₂ to Methanol (IC³M)*

Pada proses IC³M bahan baku yang digunakan adalah CO_2 dari *flue gas* yang diambil melalui proses absorpsi menggunakan *absorben solution* dan bahan baku hidrogen yang kemudian masuk ke reaktor untuk proses sintesis methanol. Proses sintesis methanol IC³M melalui beberapa tahap yaitu (Arora et al., 2021):

1) *Feed Flue Gas*

Flue gas yang telah di-*treatment* melalui proses desulfurisasi memiliki suhu 57°C dan tekanan 1 atm. *Flue gas* didinginkan menggunakan air pendingin dari suhu 57°C hingga 33°C dan kemudian ke 16°C menggunakan air dingin. Tujuan dari proses pendinginan ini adalah untuk mengurangi jumlah air yang masuk karena menyebabkan rendahnya efektivitas penangkapan CO_2 . Pada PT Indocement Tungal Prakarsa melakukan pengelolaan berupa memanfaatkan alat *flue gas desulfurization* untuk menurunkan kadar SO_2 pada pembangkit listrik bersumber batu bara.

2) Absorpsi CO_2 dari *Flue Gas* Menggunakan EEMPA

Kolom absorber dapat dibutuhkan untuk berhasil menyerap 90% dari CO_2 yang masuk ke larutan EEMPA. EEMPA (*N-(2-ethoxyethyl)-3-morpholinopropan-1-amine*) sebagai *Binding Organic Liquid (BOL)* di dalam kolom absorpsi. Kondisi

operasi absorber ditemukan paling efisien pada 30°C pada tekanan kolom 1 bar. Sifat reaksi pengikatan CO₂ menggunakan EEMPA adalah eksotermis karena melepaskan panas dan suhu larutan meningkat selama proses absorpsi. Setiap pendingin *interstage* digabungkan dengan pompa untuk memberikan kekuatan pendorong untuk resirkulasi ke dalam kolom. Gas buang yang dihasilkan di dalam absorber dihilangkan dari bagian atas kolom. Reaksi ikatan EEMPA dengan CO₂ yaitu:

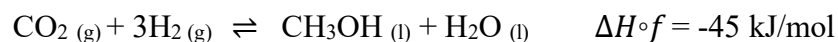


Untuk memisahkan kandungan EEMPA dari gas CO₂ sebelum masuk ke proses sintesis methanol di dalam reaktor, maka dilakukan pemisahan dengan menggunakan stripper. Reaksi pelepasan CO₂ dari larutan absorbent menggunakan *steam*.



3) Sintesis Methanol

Hidrogenasi CO₂ yang terikat pada EEMPA menghasilkan methanol terjadi di *continuos fixed bed multitube* reaktor yang beroperasi pada tekanan 25 bar dan suhu 125°C menggunakan katalis Cu/ZnO/Al₂O₃. H₂ dan CO₂ bercampur melewati pipa *static mixer* setelah meninggalkan kolom penyerapan. Untuk mempertahankan reaksi isothermal, terdapat satu pemanas *interstage* dikombinasikan dengan pompa yang digunakan untuk memanaskan cairan reaktor. Reaksi pembentukan methanol adalah bersifat eksotermis yaitu:



4) Pemurnian Larutan EEMPA dan Pemisahan Methanol

Tujuan utama dari proses pemurnian ini adalah untuk mencapai produk methanol dengan kemurnian 99,6%. Berbagai komponen yang keluar dari *outlet* reaktor harus dipisahkan dan juga untuk membuang air dan H₂. Hidrogen dari cairan dipisahkan melalui distilasi. Arus uap yang mengandung H₂ di-*recycle* kembali ke reaktor hidrogenasi untuk kontribusi reaksi lanjut.

EEMPA dipisahkan dari CO₂ melalui kolom *stripper* dan masuk ke *flash* kolom untuk memisahkan cairan EEMPA dan gas CO₂. Gas CO₂ masuk melalui *top* reaktor yang

sebelumnya sudah bercampur dengan hidrogen dalam pipa *static mixer*. *Makeup* EEMPA akan kembali menuju absorber untuk penyerapan selanjutnya. Untuk pemisahan methanol dari senyawa lain yaitu campuran methanol (CH_3OH), air (H_2O), dan hidrogen keluar dari reaktor. Kolom destilasi diperlukan untuk memisahkan komponen ini dan memastikan produksi metanol pada kemurnian 99,6%.

5) *Recycle* Hidrogen

Hidrogen yang belum bereaksi berada dalam aliran untuk di-*recycle* kembali ke hydrogenator. Methanol yang keluar dari *bottom* reaktor akan masuk proses destilasi atau pemisahan sebanyak 2 kali. Pada destilasi 1 dan destilasi 2 digunakan untuk memisahkan kandungan hidrogen dan air. Hidrogen *recycle* dari hasil pemisahan melalui kolom distilasi 1 dan distilasi 2 dikompresi dengan *compressor recycle gas* disatukan dengan jalur bahan baku hidrogen untuk selanjutnya masuk kembali ke dalam reaktor sebagai umpan dan air dibuang.

6) *Recycle* EEMPA (*N*-(2-ethoxyethyl)-3- morpholinopropan-1-amine)

Larutan EEMPA sebagai *absorben solution* atau *Binding Organic Liquid* (BOL) perlu di-*recycle* karena terjadi degradasi *overtime* EEMPA untuk penghematan biaya. EEMPA dipisahkan dari CO_2 melalui kolom *stripper* dan *flash*. *Makeup* EEMPA akan kembali menuju absorber untuk penyerapan selanjutnya.

Reaktor kimia dirancang untuk mereaksikan bahan-bahan, sebagai tempat untuk mengonversi bahan baku menjadi produk dengan efisiensi tinggi pada produk output yang diinginkan, menghasilkan *yield* tinggi dengan biaya yang efektif. Reaktor kimia dipilih melalui beberapa aspek kimia seperti bahan baku yang digunakan, proses sintesis, kondisi operasi, dan jumlah produksi. Reaktor *fixed bed multitube* dipilih karena menggunakan katalis padat heterogen selain (*trickle bed* dan *moving bed* reaktor). Katalis yang tersuspensi dapat menggunakan reaktor *fluidized bed* atau *slurry* reaktor. Dari berbagai proses di atas, dipilih proses sintesis methanol menggunakan reaktor *continuos fix bed multitube* reaktor dengan pertimbangan sebagai berikut:

1. Selektivitas Produk Tinggi

Proses yang dipakai pada pembuatan methanol ini menggunakan katalis $\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$. Katalis tersebut memiliki luas permukaan lebih besar sehingga reaksi kimia berlangsung lebih cepat dan peningkatan kinerja katalitik dengan selektivitas 100% pada suhu dan tekanan rendah sesuai dengan kondisi operasi proses yang

digunakan untuk penghematan energi dan biaya produksi. Penggunaan katalis tersebut memiliki selektifitas tinggi terhadap sintesis methanol.

2. Perpindahan Panas Baik

Penggunaan reaktor *continuos fixed bed multitube* reaktor dan katalis $\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$ akan memperluas bidang kontak antara reaktan melewati banyak *tube* (*multitube*). Semakin luas permukaan bidang perpindahan panas, semakin cepat kecepatan perpindahan panasnya. Dengan adanya *tube* berfungsi untuk mengalirkan reaktan dari satu bagian ke bagian lainnya, kontak dengan katalis, dan efisiensi perpindahan panas. Reaksi sintesis methanol merupakan reaksi melepas panas atau eksotermis sehingga perpindahan panas yang cepat diperlukan untuk mengontrol suhu reaksi sintesis methanol dengan baik.

3. Fabrikasi Reaktor Lebih Sederhana

- Reaktor yang digunakan untuk proses kontinyu yaitu *fixed bed multitube* reaktor yang merupakan alat yang umum digunakan di pabrik kimia. Proses dipilih kontinyu karena jika *batch* tidak ada penambahan atau pengeluaran ketika proses berlangsung, reaktan dimasukan di awal proses dan produk dikeluarkan di akhir, jenis ini cocok pada industri kecil. Proses kontinyu dipilih dimana reaktan diumpankan dan produk atau produk samping dikeluarkan ketika proses berlangsung secara berkelanjutan. Proses ini cocok untuk industri skala besar.
- Pada *fixed bed multitube* reaktor menggunakan katalis padat heterogen di dalam tabung reaktor, hal ini menciptakan kontak baik antara *feed* di reaktor dengan permukaan katalis sehingga dapat lebih efisien dan dapat memaksimalkan konversi. Kontrol suhu lebih baik selama reaksi berlangsung dan stabilitas operasi baik. Desain reaktor yang kokoh dan tetap sehingga dapat mengurangi kemungkinan terjadinya perubahan kondisi operasi di reaktor selama proses berlangsung.
- Kekurangan pada reaktor *fixed bed multitube* ini adalah regenerasi katalis yang sulit dilakukan sehingga diperlukan desain katalis yang tahan lama seperti katalis $\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$ yang digantis setiap lima tahun sekali dan perlu menjaga optimasi kondisi operasi methanol. Kondisi operasi yang tidak terlalu ekstrim akan mempertahankan umur katalis.

Selain itu dapat terjadi maldistribusi katalis dan terjadi gesekan antar katalis sehingga menyebabkan *hot spot* (area katalis tertentu yang memiliki suhu tinggi) yang dapat menyebabkan kerusakan bentuk dan meningkatkan deaktivasi katalis

sehingga diperlukan kontrol aliran fluida seperti *radial flow*. Reaktor jenis *fixed bed multitube radial flow* akan memperluas laju permukaan per volume katalis yang tinggi sehingga akan menurunkan *pressure drop*. Jika laju alir rendah maka lebih sulit terdistribusi merata, dapat menyebabkan terjadinya maldistribusi aliran yang lebih besar dan katalis tidak efisien. Oleh karena itu reaktor *fixed bed multitube* dengan aliran *radial flow* dapat didesain dengan bentuk *cylindrical tube* atau tubular karena reaksi sintesis yang terjadi juga adalah fase gas homogen (Hill et al., 1937).

4. Kondisi Operasi Rendah menghemat Energi dan Biaya

Kondisi operasi proses pada sintesis *green* methanol termasuk kategori rendah dan tidak terlalu ekstrim ($P < 100 \text{ atm}$, $T < 300^\circ\text{C}$) dibandingkan proses lainnya seperti ICI . Kondisi ini berpengaruh pada spesifikasi alat yang dipakai sangat wajar sehingga harga untuk material peralatan terutama reaktor relatif murah. Kondisi operasi yang semakin rendah juga memiliki risiko bahaya proses (*hazard*) akan semakin rendah. Bentuk *fixed bed* reaktor sederhana sehingga membutuhkan biaya konstruksi, operasi, dan perawatan rendah dibandingkan *moving bed* atau *fluidized bed* reaktor.

1.5 Kegunaan Produk Methanol

Methanol merupakan bahan kimia dasar yang berperan sebagai senyawa intermediate yang menjadi bahan utama berbagai industri antara lain *formaldehyde*, *methylamine*, tekstil, farmasi, *polyester*, *polyvinyl*, kertas, cat, resin sintetis, plastik, asam asetat, farmasi, dan biodiesel. Methanol juga diproyeksikan sebagai bahan bakar alternatif masa depan karena memiliki *Research Octan Number* yang tinggi yaitu 108 RON lebih tinggi dari pertamax yang hanya 92 dengan pembakaran yang lebih sempurna dan sedikit melepas gas karbon monoksida sebagai hasil samping. Methanol dapat dikonversi menjadi etilen atau propilen pada proses *Methyl-to Olefins* (MTO) yang dapat menghasilkan *hydrocarbon fuels*, selain itu menjadi produk *methyl butil eter* (MTBE), dan *methyl methacrylate* (MMA).