

Pra-Desain Pabrik Metanol dari CO₂ Sebagai Produk Samping Produksi LNG

Ameylia Annisa Wardiantara, Muhammad Zaky Rahardyanto, Juwari, dan Renanto
Departemen Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: juwari@chem-eng.its.ac.id

Abstrak—Pada industri LNG gas buangan hasil produksi biasanya berupa Acid Gas, dimana gas ini mengandung CO₂ dan H₂S sebagai bahan yang harus di treatment. Pemanfaatan gas CO₂ dapat dijadikan sebagai bahan baku produksi metanol, dimana metanol merupakan suatu senyawa yang saat ini memiliki peran penting pada ekonomi global sebagai bahan baku yang banyak dibutuhkan di industri kimia. Pada tahun 2020, permintaan metanol global mencatatkan pertumbuhan yang positif yaitu mencapai 102,162 juta. Adapun di Indonesia, melalui Peraturan Menteri ESDM No. 12 tahun 2015 yang menetapkan intensifikasi pemanfaatan Bahan Bakar Nabati sebagai bahan bakar lain juga turut membuka peluang besar untuk industri metanol dalam pemenuhan bahan bakunya. Pabrik ini direncanakan beroperasi dengan kapasitas produksi sebesar 500.000 ton/tahun Methanol Grade AA dan berlokasi di Bontang, Kalimantan Timur. Pabrik metanol direncanakan didirikan diatas lahan seluas 50,21 ha dan mulai beroperasi pada tahun 2027 dengan umur pabrik selama 20 tahun. Adapun proses produksi metanol ini terbagi menjadi empat tahapan utama yaitu proses penghilangan gas pengotor H₂S dengan desulfurisasi menggunakan katalis ZnO, proses produksi hidrogen dengan elektrolisis PEM, proses sintesis metanol dengan jenis reaktor proses Lurgi, dan proses permunian produk metanol dengan separator dan kolom distilasi. Bahan baku utama yang diperlukan dari proses produksi metanol ini antara lain acid gas, air dan steam. Modal yang digunakan dalam pendirian pabrik diasumsikan berasal dari modal sendiri sebesar 60% dan modal yang didapat dari pinjaman bank sebesar 40% dengan masa konstruksi selama 2 tahun. Untuk memenuhi kapasitas produksi tahunan metanol dalam pabrik ini, diperlukan nilai OPEX (operating expenditures) sebesar Rp. 5.650.803.181.118, dengan nilai CAPEX (capital expenditures) sebesar Rp. 18.486.187.975.646. Berdasarkan analisis ekonomi yang dilakukan, didapatkan Internal Rate of Return (IRR) sebesar 21,47% dengan bunga bank sebesar 8%, waktu pengembalian modal atau Pay Out Time (POT) yang dibutuhkan dalam pendirian pabrik ini adalah selama 5 tahun, nilai BEP sebesar 40,21%, dan nilai NPV sebesar Rp. 345.786.206.517.809. Sehingga berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa Pabrik Metanol dari CO₂ sebagai Produk Samping Produksi LNG layak untuk didirikan.

Kata Kunci—Acid gas, Emisi CO₂, Lurgi, Metanol, Produk samping LNG.

I. PENDAHULUAN

PEMANASAN global secara ilmiah terkait erat dengan peningkatan gas rumah kaca, terutama karbon dioksida (CO₂) di atmosfer. Gas-gas ini menyerap radiasi inframerah dari bumi dan memperkuat efek rumah kaca alami yang memungkinkan planet kita untuk menopang kehidupan. Namun, peningkatan konsentrasi gas ini dapat mengakibatkan peningkatan suhu global dan perubahan iklim yang signifikan. Perubahan iklim global terkait dengan pemanasan global mempengaruhi banyak aspek kehidupan, termasuk kesehatan manusia, lingkungan alam, keamanan pangan dan ekonomi [1]. Diketahui bahwa konsentrasi CO₂

Tabel 1.
Laju Alir CO₂ dari beberapa Pabrik LNG di Indonesia

Perusahaan	Kapasitas Produksi (juta ton/tahun)	Laju Emisi CO ₂ (per ton produksi LNG)	Laju CO ₂ (ton/tahun)
PT Badak LNG	22,5	0,13	2.925.000
PT Donggi-Senoro LNG	2,04	0,156	318.240
BP Tangguh LNG	11,4	0,23	2.622.000

Tabel 2.
Data Ekspor dan Impor Metanol di Indonesia

Tahun	Impor (Ton)	Ekspor (Ton)
2015	438.828	845.767
2016	873.977	769.868
2017	700.052	670.017
2018	1.399.891	614.731
2019	1.547.302	585.389
2020	1.680.817	492.538
2021	1.959.948	280.283

Tabel 3.
Proyeksi Supply-Demand Metanol di Indonesia

Produksi (Ton)	Konsumsi (Ton)	Ekspor (Ton)	Impor (Ton)
930.000	5.800.000	158.362	3.876.471

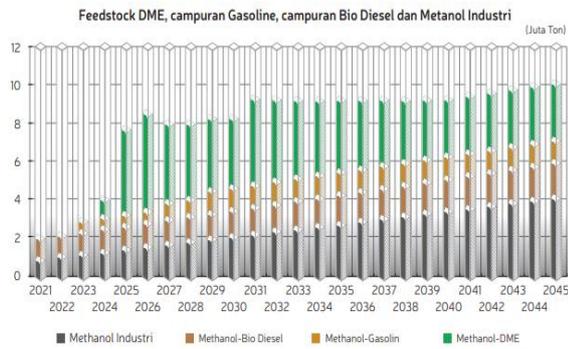
Tabel 4.
Spesifikasi Acid Gas Sebagai Bahan Baku Metanol

Komposisi	Fraksi Mol
CH ₄	0,030
C ₂ H ₆	0,001
C ₃ H ₈	0,001
i-C ₅ H ₁₂	0,004
CO ₂	0,712
H ₂ S	0,252

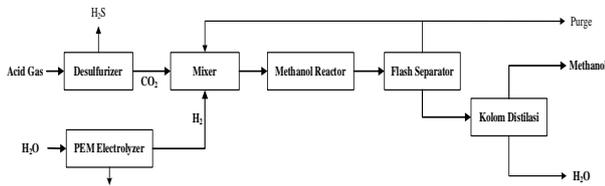
di atmosfer saat ini jauh lebih tinggi dari periode sebelum revolusi industri. Emisi gas karbon dioksida secara utama terjadi karena aktivitas manusia, seperti pembakaran bahan bakar fosil, dan industri. Salah satu industri yang memberikan kontribusi besar terhadap emisi karbon dioksida adalah pabrik LNG (Tabel 1).

LNG memiliki potensi menghasilkan emisi CO₂ yang signifikan selama tahap produksinya. Sehingga diperlukan upaya untuk pengurangan emisi CO₂ dengan mengutulisasi emisi CO₂ menjadi produk yang lebih bernilai, salah satunya yaitu metanol. Metanol merupakan suatu senyawa yang berperan penting pada ekonomi global sebagai bahan baku yang banyak dibutuhkan di industri kimia untuk diproses lebih lanjut menjadi produk kimia lainnya seperti formaldehida, asam asetat, biodiesel dan sebagainya (Gambar 1).

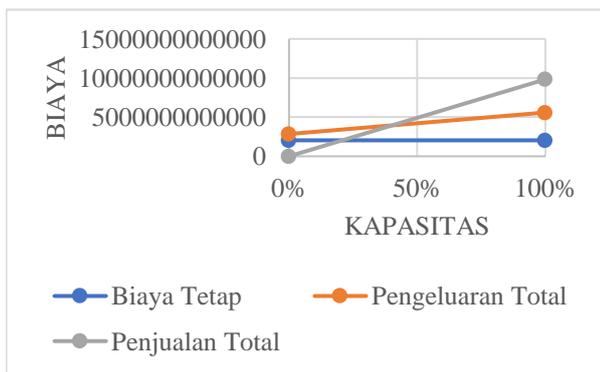
Permintaan pasar metanol relatif stabil dan dapat meningkat seiring dengan peningkatan produksi metanol



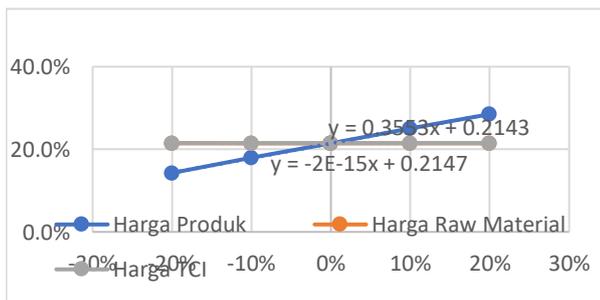
Gambar 1. Kebutuhan metanol di berbagai sektor industri.



Gambar 2. Blok diagram proses produksi metanol.



Gambar 3. Grafik break even point.



Gambar 4. Grafik sensitivitas IRR.

dengan pertumbuhan global (Tabel 2). Laporan MercktsandMarkets, tercatat bahwa permintaan pasar metanol global terus bertumbuh dengan CAGR (Compound Annually Growth Rate) sebesar 55% dari tahun 2023 sampai 2030. Pada tahun 2024, kebutuhan metanol di Asia Tenggara diperkirakan mencapai 4,3 juta ton [2]. Selain itu data impor metanol semakin meningkat seiring menurunnya ekspor metanol di Indonesia [3].

Hal ini juga tidak jauh berbeda dengan Indonesia. Saat ini, kebutuhan metanol meningkat seiring program pemerintah untuk pengembangan DME, campuran gasoline, campuran biodiesel dan metanol industri. Namun, produksi pure metanol di Indonesia hanya dipenuhi dari PT Kaltim Methanol Indonesia dengan kapasitas 660.000 ton/tahun. Berdasarkan data tersebut, diproyeksikan nilai supply-demand metanol di Indonesia pada tahun 2027 (Tabel 3).

Tabel 5. Spesifikasi Produk Methanol Grade AA

Komposisi	Unit	Spesifikasi	
		Standar	Hasil Perhitungan
Tekanan	bar	-	1
Suhu	°C	-	30
Fasa		Liquid	Liquid
Kemurnian	% wt	99,85 (Min)	99,94
Kandungan Air	% wt	0,1 (Max)	0,01

Tabel 6. Perbandingan Teknologi Proses H₂S Removal

Parameter	Adsorpsi	Absorpsi	Oksidasi	Membran
Tekanan	30-40 bar	1-3 bar	1-10 bar	1-3 bar
Suhu (°C)	300-350	25-60	90-1000	25-60
Jumlah H ₂ S	Sedang	Sedang	Tinggi	Rendah
H ₂ S removal	90-99%	90-99%	95-99%	90-99%
Selektivitas terhadap CO ₂	Tinggi	Rendah	Tinggi	Rendah
Jenis Katalis/ Pelarut	Fe ₂ O ₃ , ZnO	MEA, DEA	Fe ₂ O ₃ , MoO ₃	-
Regenerasi katalis	Steam	Stripper (kompleks)	-	-
Lifetime	3 tahun	5 tahun	3 tahun	-
Kebutuhan Katalis	Sedang	Rendah	Sedang	-
Harga Katalis/ Pelarut	Mahal	Mahal	Sedang	-

Tabel 7. Macam-Macam Proses Produksi Hidrogen

Bahan Baku	Proses	Presentase penggunaan	Cost H ₂
Gas alam/Gas Meran	Steam reforming	48%	6,26 (\$/GJ)
Batubara (CBM)	Autothermal reforming		
Minyak Bumi	Catalytic Partial Oxidation	30%	9,83 (\$/GJ)
	Non-Catalytic Partial Oxidation		
Batubara	Catalytic Reforming	18%	11,57 (\$/GJ)
Biomassa	Gasification	18%	8,69 (\$/GJ)
Air	Electrolysis	4%	20,6 (\$/GJ)
Alkohol	Steam Reforming	-	-

Pada tahun 2027, jumlah impor metanol diperkirakan sebesar 3.876.471 ton, sehingga dapat menjadi peluang pasar bagi metanol di Indonesia.

Kapasitas produksi pabrik ditentukan dengan mempertimbangkan beberapa aspek. Aspek pertama adalah kebijakan pemerintah melalui Peraturan Menteri ESDM No.12 tahun 2015 tentang pemanfaatan Bahan Bakar Nabati sebagai bahan bakar lain dengan metanol sebagai bahan bakunya. Melalui kebijakan ini metanol diperkirakan masih menjadi bahan baku yang akan mengalami peningkatan hingga 10 juta ton pada tahun 2050. Aspek kedua ialah rencana pemanfaatan acid gas dari produk samping industri LNG sebagai bahan baku pembuatan metanol. Aspek ketiga ialah ketersediaan bahan baku tersebut yaitu acid gas dan air. Bersamaan dengan rencana untuk memenuhi kebutuhan nasional, mengurangi impor dan emisi CO₂, sehingga ditentukan kapasitas pabrik metanol yang akan dibangun

Tabel 8.
Perbandingan Teknologi Produksi Elektrolisis Air

Parameter	Elektrolisis Alkali	Elektrolisis PEM
Proses	30% wt KOH atau 25% wt NaOH	Membran (<i>solid polymer</i>)
Cell Temperature	80-90°C	50-80°C
Typical Pressure	≤3,2 MPa	≤5 MPa
Current Density	2000-4000 A/m ²	10000-20000 A/m ²
Cold Start-up Time	1-2 jam	5-10 menit
Warm Start-up Time	1-5 menit	<10 detik
Nominal stack efficiency	63-71%	60-80%
Nominal stack efficiency	51-60%	46-60%
Kemurnian	≥99,8%	≥99,99%
Max. nominal power per stack (MW)	6	2
H ₂ production per stack (Nm ³ /h)	1400	400
Cell Area (m ²)	<3,6	<0,13
Aplikasi	Komersial	<i>Near-term</i>
Lifetime	10 tahun	3-4 tahun
Investment cost (USD/kW)	843,06-1580,75	1475,36-2213,04
Maintenance cost (% of investment cost per year)	2-3	3-5

Tabel 9.
Perbandingan Teknologi Proses Methanol Synthesis

Parameter	Lurgi	ICI	Kellog	MGC
Tekanan (bar)	50-100	50-100	50-150	50-80
Suhu (°C)	200-260	220-280	200-280	240-260
Tipe reaktor	Tubular Isotermal	Adiabatis	Adiabatis Radial	Isotermal
Aliran	Aksial	Aksial	Aksial	Aksial
Jumlah Reaktor	1-2	1	3-4	1
Lokasi Katalis	<i>Tube-side</i>	<i>Fixed Bed</i>	<i>Fixed Bed</i>	<i>Double pipe</i>
Pemasangan Katalis	Sulit	Mudah	Mudah	Sulit
Pendinginan	Air (<i>bagian shell</i>)	<i>Quench gas</i>	<i>Intermediate coolers</i>	Air (<i>bagian shell</i>)
Konversi	90-95%	90-95%	90-92%	90-95%
Jenis Katalis	Cu/ZnO/Al ₂ O ₃	Cu/ZnO/Al ₂ O ₃	Cu	Cu/ZnO/Al ₂ O ₃
Yield (kg/Lkat)	0,9-1	0,35-0,4	0,55-0,6	0,5-0,6
Lifetime	5 tahun	3 tahun	3 tahun	4 tahun
Selektivitas	Tinggi	Tinggi	Sedang	Sedang
Kebutuhan Katalis	Sedikit	Banyak	Sedang	Sedang
Harga Katalis	Sedang	Sedang	Mahal	Mahal

sebesar 500.000 ton/tahun yang beroperasi selama 330 hari kerja setiap tahunnya dengan bahan baku acid gas sebesar 138.762,63 kg/jam dan air sebesar 130.962,38 kg/jam Spesifikasi acid gas sebagai bahan baku utama pembuatan metanol adalah pada Tabel 4.

Sedangkan bahan baku lainnya yaitu air, memiliki komposisi murni 100% air. Air diperoleh dari unit utilitas, sehingga telah dilakukan treatment terlebih dahulu untuk menghilangkan kandungan ion-ion pengotor dari air tersebut. Bahan baku utama acid gas akan diproses menjadi metanol dengan memenuhi standar methanol grade AA yang memiliki spesifikasi pada Tabel 5.

Lokasi pabrik dalam perencanaan pembangunan pabrik baru merupakan faktor penting terutama pada tingkat keberhasilan usaha industri. Lokasi pabrik harus berada di tempat yang ideal, dimana biaya produksi dan distribusi diperoleh angka yang minimum, namun faktor lain seperti ruang perluasan dan kondisi kehidupan yang aman untuk operasi pabrik serta masyarakat sekitar juga penting. Beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan dalam memilih lokasi pabrik yaitu ketersediaan bahan baku, ketersediaan pasar, pasokan energi, iklim, fasilitas transportasi, ketersediaan air, ketersediaan tenaga kerja, legalitas suatu daerah dan lain-lain [4]. Berdasarkan parameter tersebut, didapatkan bahwa Kota Bontang, Kalimantan Timur merupakan lokasi paling strategis untuk dibangunnya pabrik Metanol dari CO₂ sebagai Produk Samping Produksi LNG.

II. SELEKSI DAN URAIAN PROSES

Hingga saat ini, proses produksi metanol yang umum digunakan adalah melalui proses sintesis tidak langsung dengan bahan baku gas alam. Namun, selain menggunakan bahan baku gas alam, produksi metanol dapat dilakukan dengan memanfaatkan Gas CO₂ hasil produksi Liquefied Natural Gas (LNG) dan gas H₂ dari elektrolisis air. Dengan demikian proses yang digunakan untuk membuat metanol adalah hidrogenasi CO₂. Secara garis besar, proses produksi metanol dari CO₂ dan H₂ terbagi menjadi empat tahapan utama yaitu proses penghilangan gas pengotor berupa H₂S (H₂S removal unit), proses produksi hidrogen (H₂ production unit), proses konversi CO₂ dan H₂ menjadi metanol (Methanol synthesis unit), dan proses purifikasi produk metanol (Methanol purification unit). Namun terdapat unit tambahan yang tidak melalui seleksi proses, yaitu unit pencampuran dan kompresi.

A. H₂S Removal Unit

Bahan baku Acid gas yang merupakan hasil produk samping produksi LNG masih mengandung banyak pengotor yang korosif berupa senyawa H₂S. Kadar konsentrasi H₂S yang tinggi dapat merusak katalis pada reaktor sintesis metanol, sehingga perlu dilakukan treatment terlebih dahulu. Kadar H₂S yang diperbolehkan dalam reaktor sintesis metanol adalah <0,1 ppm [5].

Beberapa teknologi produksi untuk menghilangkan kandungan H₂S antara lain adsorption (Desulfurisasi), Absorpsi dan Stripping, Oksidasi, dan Separasi membran. Dari beberapa proses tersebut, Teknologi proses desulfurisasi dan oksidasi memiliki potensi menjanjikan untuk menghilangkan kandungan H₂S tanpa mempengaruhi kandungan CO₂ yang dimiliki. Namun, kedua proses tersebut memiliki kelemahan dalam kebutuhan energi yang terbilang cukup besar dalam prosesnya (Tabel 6).

Teknologi produksi absorpsi dan membran memiliki kelemahan dalam selektivitas terhadap CO₂ yang rendah. Sehingga, saat menghilangkan kandungan H₂S, kandungan CO₂ juga akan ikut menurun. Namun, absorpsi memiliki biaya operasi rendah sedangkan membran tidak perlu menggunakan katalis atau solvent dalam prosesnya.

Dari beberapa pertimbangan tersebut maka dalam proses penghilangan gas pengotor H₂S pada pabrik metanol ini digunakan proses adsorption (Desulfurisasi). Proses ini dipilih karena desulfurisasi memiliki kemampuan penyerapan H₂S yang baik hingga >90% serta tidak mempengaruhi feed CO₂ sebagai bahan baku proses pembuatan metanol. Selain itu, jika dibandingkan dengan teknologi produksi oksidasi lebih ekonomis menggunakan proses desulfurisasi karena suhu yang dibutuhkan jauh lebih rendah. Proses desulfurisasi ini menggunakan katalis Oksida Seng (ZnO) dikarenakan memiliki reaksi yang efektif beroperasi pada suhu rendah, kapasitas penyerapan yang tinggi, serta regenerasi yang rendah.

B. H₂ Production Unit

Terdapat berbagai macam proses yang dapat digunakan untuk produksi hidrogen dari setiap bahan baku, termasuk reformasi, dekomposisi dan hidrolisis bahan bakar fosil. Proses pembentukan hidrogen dengan bahan baku senyawa hidrokarbon diawali dengan pembentukan syngas (H₂+CO) dengan proses reforming. Untuk meningkatkan perolehan gas H₂, CO kemudian direaksikan dengan steam menggunakan reaktor shift converter/water gas shifter menghasilkan gas CO₂ dan H₂ (Tabel 7).

Sekitar empat miliar ton hidrogen dibutuhkan setiap tahunnya dengan 95% produksi hidrogen berasal dari bahan bakar fosil, yang juga menghasilkan CO₂. Elektrolisis air menjadi salah satu alternatif dalam meningkatkan produksi hidrogen dan nol emisi CO₂. Hidrogen yang dihasilkan dalam proses elektrolisis air memiliki kemurnian tinggi, yaitu mencapai 99,9% [6].

Produksi metanol dari proses elektrokimia yang menggunakan elektrolisis air untuk menghasilkan H₂ masih jarang digunakan karena membutuhkan banyak energi listrik. Namun, hasil dari unit elektrolisis tidak menimbulkan emisi dan juga menghasilkan produk samping berupa gas O₂. Dengan demikian, penjualan dari gas O₂ dapat menutupi pengeluaran biaya listrik dari pabrik yang umumnya lebih banyak dipakai di unit elektrolisis. Selain itu, terdapat kelebihan dari digunakannya proses ini yaitu kondisi operasi relatif rendah, tetapi efisiensi tinggi apabila dibandingkan dengan proses lain. Sehingga, sesuai dengan tujuan pendirian pabrik ini yaitu mengurangi emisi CO₂, proses elektrolisis air tepat digunakan sebagai proses pembentukan gas hidrogen.

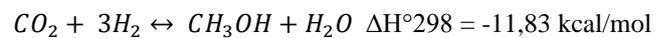
Terdapat beberapa teknologi produksi dalam pembentukan H₂ dengan elektrolisis air yang telah banyak digunakan pada

pabrik skala industri, yaitu elektrolisis Alkali (Alkaline water electrolysis) dan elektrolisis PEM (Polimer electrolyte membrane). Material dan kondisi pengoperasian yang berbeda digunakan dalam sistem ini. Namun, prinsip operasi yang digunakan sama berdasarkan suhu operasi elektrolisis (Tabel 8) [6].

Pada unit produksi hidrogen dipilih proses elektrolisis air PEM dengan pertimbangan yaitu efisien tinggi dengan konsumsi energi lebih rendah, kemurnian hidrogen lebih tinggi dan tidak memerlukan bahan kimia tambahan yang korosif (elektrolit), dan waktu respon lebih cepat sehingga lebih fleksibel [7].

C. Methanol Synthesis Unit

Secara umum, metanol dapat diproduksi dengan cara menghidrogenasi karbon monoksida (CO) ataupun karbon dioksida (CO₂) menggunakan katalis. Gas-gas ini dapat diperoleh dengan mereformasi gas alam atau bahan berbasis karbon lainnya. Sintesis metanol terjadi secara eksotermis menurut reaksi kimia berikut:



Dengan reaksi yang berlangsung eksotermis (pengurangan mol karena reaksi berlangsung ke kanan), maka sintesis metanol biasa beroperasi pada tekanan tinggi dan suhu rendah [8].

Saat ini terdapat dua jenis reaktor yang digunakan dalam sintesis metanol yaitu reaktor adiabatik dan isotermal. Penggunaan kedua reaktor tersebut berbeda sesuai dengan kondisi kerja. Sistem reaktor adiabatik umumnya terdiri dari serangkaian fixed bed reactor dengan penghilangan panas yang dioperasikan di hilir setiap reaktor. Reaktor jenis ini memiliki karakteristik yaitu biaya instalasi yang rendah dan kapasitas produksi yang tinggi. Namun, karena prosesnya adiabatik, suhu kesetimbangan yang tinggi mengakibatkan konversi yang sangat rendah untuk setiap siklus, sehingga diperlukan rasio recycle yang tinggi, pengenceran reagen yang tinggi dan volume katalis yang tinggi (Tabel 9).

Reaktor isotermal merupakan reaktor dengan pendinginan kontinu oleh air atau gas. Reaktor ini pada dasarnya merupakan penukar panas, dimana pendinginan dicapai dengan sirkulasi air pada tube bundle. Sifat isotermal dari sistem ini memungkinkan diperolehnya konversi yang tinggi dan jumlah katalis yang rendah. Namun, untuk mencapai laju reaksi yang optimal, suhu harus berkisar 200-260°C, dengan rasio recycle yang tinggi. Biaya pemasangan pun jauh lebih tinggi daripada sistem adiabatik. Beberapa licensor teknologi proses yang digunakan dalam sintesis metanol diantaranya adalah proses Lurgi, ICI (Imperial Chemical Industries), Kellogg M.W, dan MGC (Mitsubishi Gas Chemical Company).

Dari berbagai perbandingan teknologi proses tersebut, dipilih proses sintesis metanol menggunakan reaktor pada proses Lurgi (reaktor fixed bed multitube) dengan pertimbangan yaitu perpindahan panas yang baik karena adanya tube akan memperluas bidang perpindahan panas, selektivitas produk tinggi karena menggunakan katalis berupa senyawa seng dan aluminium, Fabrikasi reaktor lebih sederhana yaitu memiliki kemiripan dengan heat exchanger

dan kondisi operasi termasuk kategori rendah $P < 100$ atm dan $T < 300^\circ\text{C}$ sehingga harga material reaktor metanol akan relatif lebih murah.

D. Methanol Purification Unit

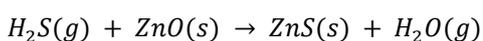
Metanol yang keluar dari sintesis mempunyai kemurnian 70% sehingga perlu dimurnikan lagi hingga minimal 99,85% menyesuaikan spesifikasi metanol yang diharapkan. Terdapat beberapa cara untuk memurnikan metanol salah satunya dengan menggunakan flash separator dan kolom distilasi. Umumnya purifikasi metanol dapat dilakukan dengan proses dengan flash separator lalu dilanjutkan dengan dengan kolom distilasi atau langsung menggunakan 2 tahap kolom distilasi. Flash separator memiliki biaya operasional yang lebih kecil daripada kolom distilasi.

Namun, kolom distilasi memiliki kapasitas yang jauh lebih besar daripada flash separator. Berdasarkan perbandingan tersebut proses purifikasi yang tepat adalah dengan menggunakan keduanya (flash separator dan kolom distilasi) dengan alasan perbedaan prinsip kerja dari keduanya, flash separator akan memisahkan metanol dari gas-gas terlarut seperti CH_4 dan CO_2 sedangkan kolom distilasi akan memisahkan metanol dengan air sehingga akan lebih efisien.

E. Uraian Proses

Proses produksi metanol secara keseluruhan ditampilkan pada diagram blok diatas. Proses produksi terbagi menjadi empat unit utama, yaitu unit H_2S removal dengan alat utama desulfurizer, unit produksi H_2 dengan alat utamanya elektrolisis, unit sintesis metanol dengan reaktor proses Lurgi sebagai alat utamanya dan unit purifikasi metanol dengan alat utama flash separator dan kolom distilasi. Namun, terdapat satu unit tambahan sebelum unit sintesis metanol, yaitu unit pencampuran dan kompresi. Produk yang dihasilkan adalah metanol dengan kualitas methanol Grade AA.

Acid gas dari proses acid gas removal pabrik LNG bertekanan 4 bar dan bersuhu 100°C dialirkan menuju kompresor 3 stage (G-112) untuk dinaikkan tekanannya hingga 30 bar menyesuaikan tekanan desulfurizer (D-110). Selanjutnya, dimasukkan kedalam intercooler (E-113) karena suhu hasil kompresi melebihi suhu reaktor yang diinginkan, yaitu sebesar 300°C . Senyawa pengotor H_2S harus dikurangi sampai 0,1 ppmv agar tidak mencemari katalis Cu-Zn pada unit sintesa metanol. Desulfurizer (D-110) menggunakan absorben ZnO untuk menyerap gas H_2S yang terkandung didalam campuran gas tersebut. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut.

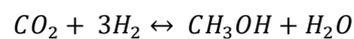


Pada proses ini gas H_2S dapat bereaksi secara sempurna dengan ZnO (konversi reaksi 100%). Selanjutnya, campuran gas yang telah bersih, dialirkan menuju heat exchanger (E-213) untuk dilakukan penurunan suhu hingga 200°C sebelum dicampurkan pada (M-310). Sedangkan, Air dari utilitas memiliki tekanan 1 bar dan suhu 25°C , dinaikkan tekanannya menggunakan pompa (L-211) hingga 10 bar. Selanjutnya air dialirkan menuju heat exchanger (E-213) untuk dinaikkan suhunya menjadi 80°C menyesuaikan kondisi operasi electrolyzer (R-210). Setelah itu, air dialirkan menuju electrolyzer (R-210) dimana proses elektrolisis menghasilkan

gas H_2 dan gas O_2 . Dimana gas O_2 akan dialirkan ke pabrik yang membutuhkan sedangkan gas H_2 dialirkan menuju mixer (M-310) untuk proses pencampuran dengan gas campuran dari proses desulfurisasi dan aliran recycle.

Campuran ketiga stream ini akan melewati beberapa proses kompresi hingga tekanan 100 bar dengan kompresor 3 tahap. Selanjutnya aliran ini didinginkan dengan heat exchanger (E-316) hingga suhu 200°C kemudian masuk ke dalam reaktor sintesis metanol.

Reaktor yang digunakan berupa reaktor isothermal dengan model double pipe. gas dialirkan pada bagian tube sehingga melewati bed katalis tersebut. Untuk mempertahankan suhu agar sesuai dengan suhu reaksi yaitu 200°C , maka pada bagian shell dialirkan boiler feed water sekaligus untuk produksi steam. Reaktor ini menggunakan katalis berbasis tembaga ($\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$) yang dimuat diantara inner pipe. Berikut merupakan reaksi yang terjadi pada reaktor metanol:



Selanjutnya hasil reaksi kemudian diturunkan tekanannya menjadi 1 bar dan didinginkan temperaturnya menjadi 10°C . Dalam keadaan ini sebagian besar metanol telah terkondensasikan. Selanjutnya aliran ini dialirkan menuju proses pemurnian produk metanol menggunakan flash separator dan kolom distilasi.

Crude methanol yang terbentuk masuk kedalam Raw Product Separator (F-420). Raw Product Separator (F-420) digunakan untuk memisahkan gas-gas terlarut seperti (CO_2 , H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , $i\text{-C}_5\text{H}_{12}$) yang terkandung di dalam metanol yang berupa liquid, dengan cara flashing pada tekanan rendah yaitu 1 bar, dimana kelarutan gas dalam liquid akan turun apabila tekanan diturunkan.

Komponen outlet Raw Product Separator (F-420) yang masih berupa gas sebagian di-recycle kembali ke dalam Mixer (M-310) dan sebagian di-purge untuk menghilangkan inert dengan rasionya terhadap aliran recycle adalah 1:9. Sedangkan, komponen outlet yang berupa liquid kemudian akan dinaikkan tekanan dan suhunya menyesuaikan kondisi operasi distillation column (D-510), yaitu 60°C dan 2 bar

Setelah menyesuaikan kondisi operasi kolom, metanol ini kemudian dimurnikan menggunakan distillation column (D-510). Kolom distilasi menggunakan tekanan kondensor (E-511) yaitu 1 bar dan tekanan reboiler (E-514) yaitu 2 bar. Distilasi digunakan untuk memisahkan produk metanol sebagai produk atas, sedangkan air keluar sebagai produk bawah kolom.

Hasil atas pada distillation column (D-510) akan dialirkan menuju distillation column condensor (E-511) lalu dipisahkan antara produk dan reflux melalui distillation column reflux drum (F-512). Metanol yang masih mengandung air akan dikembalikan lagi ke distillation column (D-510) melalui reflux pump (L-513).

Metanol yang dihasilkan masih belum memiliki spesifikasi fraksi berat 99,85% (dry basis) yang keluar sebagai top product, sehingga perlu melewati methanol separator (F-515) untuk dipisahkan dengan kandungan gas CO_2 yang masih larut. Kemudian dialirkan ke cooler (E-516) untuk diturunkan suhunya hingga 30°C sebelum dialirkan menuju methanol storage (F-517), dimana saat ini metanol telah memiliki spesifikasi sesuai standar (Gambar 2).

III. NERACA MASSA DAN NERACA ENERGI

A. Neraca Massa

Feed yang digunakan pada pabrik metanol ini adalah acid gas sejumlah 138.763,63 kg/jam dengan kebutuhan air sebesar 130.962,38kg/jam. Berdasarkan perhitungan dengan kapasitas feed tersebut, didapatkan produk Methanol Grade AA sebesar 537.882 ton/tahun.

B. Neraca Energi

Pada pabrik metanol ini dibutuhkan utilitas berupa steam, air pendingin, dan listrik. Steam digunakan sebagai pemanas pada reboiler kolom distilasi dengan energi yang dibutuhkan sebesar 4.505 kg/jam. Air pendingin digunakan sebagai pendingin pada unit penukar panas, desulfurizer, dan methanol reactor dengan energi total sebesar 2.362.204.115 kJ/jam. Listrik digunakan untuk menyuplai daya untuk unir elektrolisis dan kompresor serta pompa dengan daya yang dibutuhkan sebesar 704,68 MW.

IV. ANALISA EKONOMI

Analisa Ekonomi dilakukan untuk mempertimbangkan suatu lokasi yang akan didirikan. Berikut ini merupakan analisis ekonomi pada Pra-Desain Pabrik Metanol dari CO₂ sebagai Produk Samping Produksi LNG dan penilaian investasi dengan juga mempertimbangkan aspek sosial dan lingkungan.

A. Asumsi-Asumsi

Analisa ekonomi dilakukan dengan menggunakan metode discounted cash flow, yaitu cashflow yang nilainya diproyeksikan dengan nilai cashflow saat ini. Asumsi yang digunakan pada Analisa ini adalah sebagai berikut:

- a. Kapasitas produksi pabrik: 500.000 ton/tahun
- b. Modal Investasi yang digunakan adalah modal sendiri (equity) sebesar 60% dan modal dari pinjaman bank (loan) sebesar 40%
- c. Laju inflasi yang diasumsikan terjadi di Indonesia adalah sebesar 5,13% (Bank Indonesia) dengan bunga bank sebesar 8%/tahun (Bank BRI)
- d. Masa umur pabrik yaitu 20 tahun dengan depresiasi 10%
- e. Basis perhitungan ekonomi : 1 tahun
- f. Pajak pendapatan pasal 17 Ayat 2a UU PPh No. 17, Tahun 20120 sebesar 30% untuk pendapatan lebih dari Rp. 500.000.000,00
- g. Nilai tukar rupiah (1 USD) : Rp. 14.888,95 (11 Juni 2023, 18.04 WIB)
- h. Pengadaan peralatan dilakukan pada tahun 2024, Konstruksi dilakukan pada tahun 2025 dengan lama konstruksi 2 tahun, tahun pertama menggunakan 60% modal sendiri (equity) dan 40% sisa modal pinjaman bank (loan), tahun kedua menggunakan sisa modal sendiri (equity) dan sisa modal pinjaman bank (loan)
- i. Sehingga, tahap mulai operasi pada tahun 2027
- j. Kapasitas produksi mulai tahun pertama sebesar 100%
- k. Pajak pendapatan yang digunakan sebesar 30%
- l. Metode pembayaran: a. ada masa awal konstruksi (tahun pertama (-2)) dilakukan pembayaran sebesar 50% dari pinjaman bank (loan) untuk keperluan pembelian tanah dan uang muka. b. Pada akhir tahun kedua konstruksi

(tahun kedua (-1)) dibayarkan dengan sisa modal pinjaman bank (loan).

B. CAPEX dan OPEX

Capital Expenditures (CAPEX) merupakan biaya yang dibutuhkan oleh perusahaan untuk digunakan dalam pembangunan awal pabrik, sedangkan Operating Expenses (OPEX) adalah pengeluaran yang dilakukan oleh perusahaan untuk menjalankan operasional perusahaan pada interval waktu tertentu.

1) Capital Expenditures (CAPEX)

Pada perhitungan ini, CAPEX memiliki nilai yang sama dengan Fixed Capital Investment (FCI) yang didapatkan dengan perhitungan aset-aset utama yang dimiliki oleh perusahaan. Besar CAPEX pabrik metanol dari CO₂ ini adalah sebesar Rp. 18.486.187.975.646.

2) Operating Expenses (OPEX)

Pada perhitungan OPEX nilainya sama dengan nilai dari Total Production Cost yang meliputi Direct Production Cost, Fixed Cost, Plant Overhead Cost, General Expenses, dan Manufacturing Cost. Nilai OPEX pabrik metanol dari CO₂ ini adalah Rp. 5.650.803.181.118

C. Faktor Kelayakan Pendirian

Kelayakan pendirian pabrik metanol yang akan dibangun ditinjau dari beberapa faktor yaitu Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Pay Out Time (POT), Break Even Point (BEP), dan sensitivitas terhadap IRR

1) Net Present Value (NPV)

Net Present Value (NPV) merupakan selisih antar nilai keuangan kas masuk dan yang keluar selama dalam kurun waktu tertentu. Digunakan Weighted Average Cost of Capital (WACC) untuk menentukan nilai proyeksi cash flow pada masa sekarang. Berdasarkan perhitungan, didapatkan nilai NPV sebesar Rp. 345.786.206.517.809 dengan nilai WACC sebesar 12,36%. NPV yang bernilai positif menandakan bahwa pabrik ini layak untuk didirikan.

2) Internal Rate of Return (IRR)

Internal rate of return (IRR) berdasarkan metode free cash flow adalah suatu tingkat bunga tertentu di mana seluruh penerimaan akan tepat menutup seluruh jumlah pengeluaran modal. Pada perhitungan yang dilakukan, didapatkan nilai i (discounted factor) sebesar 21,47%, dimana hasil tersebut lebih besar dari bunga bank sebesar 8%. Hal ini mengindikasikan bahwa pabrik layak untuk didirikan

3) Pay Out Time (POT)

Pay out time (POT) merupakan analisis yang digunakan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan modal suatu pabrik, dimana perhitungan ini dilakukan dengan menghitung akumulasi modal dengan evaluasi secara cash flow. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, didapatkan waktu pengembalian modal yang dibutuhkan dalam pendirian pabrik ini, yaitu 5 tahun. Waktu pengembalian tersebut masih kurang dari setengah umur pabrik, sehingga pabrik layak untuk didirikan.

4) Break Even Point (BEP)

Perhitungan Break Even Point dilakukan untuk mengetahui kapasitas produksi pabrik dimana biaya produksi

total sama dengan hasil penjualan. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, didapatkan nilai BEP sebesar 40,21% atau jumlah produksi sebesar 216.282 ton/tahun (Gambar 3).

5) *Sensitivitas terhadap IRR*

Sensitivitas terhadap IRR digunakan untuk menganalisis perubahan-perubahan yang terjadi, misalnya perubahan harga bahan baku, harga produk, dan biaya pendirian pabrik (Gambar 4). Berdasarkan grafik tersebut, dapat disimpulkan bahwa perubahan biaya penjualan, bahan baku, dan pendirian pabrik berpengaruh terhadap kenaikan dan penurunan IRR. Hasil tersebut menunjukkan nilai slope yang semakin besar menunjukkan tingkat sensitivity yang semakin tinggi, sehingga variabel yang paling sensitif terhadap perubahan harga adalah harga jual produk.

V. KESIMPULAN

Terdapat beberapa tinjauan yang dapat dilakukan untuk mempertimbangkan kelayakan suatu pabrik yang akan didirikan. Pertama, tinjauan secara teknis dilakukan dengan melihat spesifikasi metanol yang dihasilkan telah memenuhi spesifikasi standar grade AA, sehingga metanol dapat dijual sesuai standar harga pasaran metanol grade AA yang memiliki kemurnian lebih dari 99,85%wt. Kedua, tinjauan secara ekonomis dilakukan dengan melihat kelayakan pabrik secara ekonomis. Berdasarkan analisa yang dilakukan pabrik metanol dari CO₂ mampu memproduksi metanol dengan kapasitas 537.882 ton/tahun, dan memerlukan biaya Capital Expenditures (CAPEX) yang digunakan dalam pembangunan pabrik dan berguna dalam jangka panjang sebesar Rp. 18.486.187.975.646. Selain itu, diperlukan biaya Operating Expenses (OPEX) yang mengeluarkan pengeluaran untuk operasional perusahaan, didapatkan nilai sebesar Rp. 5.650.803.181.118. Proporsional pendanaan didapatkan dengan 60% modal sendiri dan 40% dari modal pinjaman dengan kurun waktu pinjaman selama 10 tahun. Harga penjualan metanol sebesar USD 550/ton. Estimasi umur pabrik ditentukan selama 20 tahun, dapat diketahui Interval Rate of Return (IRR) sebesar 21,47%, Pay Out Time (POT) selama 5 tahun dan Break Even Point (BEP) sebesar 40,21% pada suku bunga bank sebesar 8% dan laju inflasi sebesar 5,13%. Ketiga, tinjauan secara lingkungan dan keselamatan.

Jika ditinjau secara lingkungan, dalam proses pembuatan metanol menggunakan bahan baku berupa acid gas yang merupakan hasil buangan proses acid gas removal dari pabrik LNG, sehingga dapat mengurangi emisi CO₂ dimana hal ini dapat menjadi alternatif sistem carbon trading dalam sistem untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Limbah yang dihasilkan dari pabrik ini dapat dimanfaatkan kembali sebagai pendingin maupun pemanas. Jika ditinjau secara keselamatan, Dalam proses produksi metanol menggunakan bahan baku berupa gas dan liquid. Pada gas perlu dipahami kembali safety dari keseluruhan gas yang digunakan, diakrenakan apabila terjadi suatu kebocoran atau suhu operasi mengalami kenaikan akan dapat terjadi ledakan dalam berjalannya proses produksi. Tingkat risiko yang ditimbulkan oleh bahan-bahan penyusun bisa dibilang tinggi, sehingga perlu untuk segera dilakukan penanganan lebih lanjut oleh tim keamanan atau tim laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Masson-Delmotte, Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in *The Context of Strengthening The Global Response to The Threat of Climate Change*, Sus, 1st ed. United States of America: Cambridge University Press, 2022.
- [2] S. Chakraborty *et al.*, "Photocatalytic conversion of CO₂ to methanol using membrane-integrated green approach: A review on capture, conversion and purification," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 4, p. 103935, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jece.2020.103935.
- [3] BPS, "Data Ekspor dan Impor Metanol oleh Indonesia." Badan Pusat Statistik, Jakarta, 2021.
- [4] M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, R. E. West, and others, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 1st ed., vol. 4. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [5] Y. Ma, Q. Ge, W. Li, and H. Xu, "Study on the sulfur tolerance of catalysts for syngas to methanol," *Catal. Commun.*, vol. 10, no. 1, pp. 6–10, 2008, doi: 10.1016/j.catcom.2008.07.045.
- [6] J. Chi and H. Yu, "Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production," *Chinese J. Catal.*, vol. 39, no. 3, pp. 390–394, 2018, doi: 10.1016/S1872-2067(17)62949-8.
- [7] Y. Guo, G. Li, J. Zhou, and Y. Liu, "Comparison between hydrogen production by alkaline water electrolysis and hydrogen production by PEM electrolysis," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 371, no. 4, p. 42022, Dec. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/371/4/042022.
- [8] D. Amaliah, L. Qadariah, and M. Mahfud, "The production of surfactant anionic Methyl Ester Sulfonate (MES) from Virgin Coconut Oil (VCO) with ultrasound-assisted," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1845, no. 1, p. 12005, Mar. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1845/1/012005.