

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sektor energi merupakan penyumbang emisi gas rumah kaca (GRK) terbesar di dunia, yaitu menyumbang 73% dari total emisi global, disusul oleh sektor pertanian (11,7%), industri (6,5%), dan limbah (3,4%) (World Resources Institute, 2024). Di Indonesia, kebutuhan energi diproyeksikan terus meningkat, dengan konsumsi energi tertinggi berada pada sektor industri (56%) dan transportasi (28%) (Badan Pusat Statistik, 2024). Untuk mengatasi tingginya kebutuhan energi sekaligus mendorong transisi menuju energi bersih rendah emisi, pemerintah Indonesia melalui Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menetapkan kebijakan pemanfaatan bahan bakar nabati (BBN) jenis biodiesel berbasis minyak sawit sebesar 40% (B40) sebagai campuran solar, dengan total alokasi 15,6 juta kiloliter (kl), yang terdiri atas 7,55 juta kl untuk Public Service Obligation (PSO) dan 8,07 juta kl untuk non-PSO.

Aceh memiliki potensi besar sebagai penyuplai biodiesel nasional dengan luas perkebunan kelapa sawit mencapai 565.135 hektar dan lebih dari 60 pabrik pengolahan crude palm oil (CPO), khususnya di kawasan Aceh Tamiang (Kementerian Pertanian, 2024). Namun, potensi tersebut belum dimanfaatkan secara optimal karena sebagian besar CPO masih diekspor dalam bentuk mentah tanpa proses hilirisasi lokal (Konstruksi Media, 2025). Ketergantungan pada ekspor CPO mentah menyebabkan hilangnya peluang peningkatan nilai tambah, penciptaan lapangan kerja, serta penguatan kemandirian energi daerah. Oleh karena itu, pengembangan industri biodiesel di Aceh menjadi langkah strategis untuk mendukung dekarbonisasi nasional sekaligus memperkuat ekonomi daerah melalui hilirisasi sawit yang berkelanjutan.

Di sisi lain, proses produksi biodiesel menghasilkan produk samping utama berupa gliserol kasar (*crude glycerol*) dengan proporsi sekitar 10% dari total produksi biodiesel. Meningkatnya produksi biodiesel nasional turut meningkatkan volume gliserol, yang sering kali memiliki nilai ekonomi rendah akibat keterbatasan pemurnian dan pasar. Apabila tidak dimanfaatkan secara optimal, kelebihan

pasokan gliserol dapat menurunkan nilai jualnya dan mengurangi efisiensi ekonomi industri biodiesel. Oleh karena itu, diperlukan inovasi pemanfaatan produk samping ini agar tercipta sistem industri yang lebih efisien, terintegrasi, dan bernilai tambah tinggi.

Menjawab tantangan tersebut, solusi yang ditawarkan adalah pemanfaatan gliserol sebagai bahan baku untuk sintesis gliserol karbonat melalui reaksi dengan CO₂. Gliserol karbonat merupakan senyawa ramah lingkungan bernilai tinggi yang memiliki potensi aplikasi luas, termasuk sebagai pelarut hijau, bahan baku polimer, aditif bahan bakar, serta kandidat pengganti elektrolit pada baterai lithium-ion yang mendukung pengembangan kendaraan listrik berkelanjutan. Strategi ini tidak hanya meningkatkan nilai ekonomi produk samping biodiesel, tetapi juga berkontribusi pada pemanfaatan CO₂ sebagai bahan baku kimia (carbon utilization) dalam mendukung ekonomi sirkular rendah karbon.

Dengan demikian, pengembangan hilirisasi biodiesel yang terintegrasi dengan pemanfaatan produk samping bernilai ekonomi rendah akan memberikan berbagai keuntungan, antara lain peningkatan efisiensi proses produksi, pengembangan produk dengan nilai tambah yang lebih tinggi, penguatan daya saing industri sawit daerah, serta kontribusi nyata terhadap transisi energi dan pembangunan ekonomi berkelanjutan di Aceh.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam pra-rancangan pabrik ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perancangan pabrik gliserol karbonat yang terintegrasi dengan unit produksi biodiesel berbasis CPO di Aceh?
2. Bagaimana pemilihan proses dan kondisi operasi yang optimal untuk sintesis gliserol karbonat dari gliserol sebagai produk samping biodiesel?
3. Bagaimana perancangan neraca massa dan neraca energi pada sistem pabrik terintegrasi biodiesel–gliserol karbonat?
4. Bagaimana analisis kelayakan teknis dan ekonomi dari pendirian pabrik gliserol karbonat terintegrasi di Aceh?

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dari pra-rancangan pabrik ini secara umum adalah menerapkan seluruh prinsip dasar teknik kimia ke dalam bentuk rancangan pabrik. Tujuan prarancangan pabrik ini secara khusus adalah sebagai berikut:

1. Merancang pabrik gliserol karbonat yang terintegrasi dengan unit produksi biodiesel berbasis CPO.
2. Menentukan kapasitas produksi, lokasi pabrik, serta spesifikasi bahan baku dan produk.
3. Menyusun dan menghitung neraca massa serta neraca energi pada sistem proses terintegrasi.
4. Menentukan jenis dan spesifikasi peralatan utama yang digunakan dalam proses produksi.
5. Menganalisis aspek teknis dan operasional pabrik yang dirancang.
6. Mengevaluasi kelayakan ekonomi dari pendirian pabrik gliserol karbonat terintegrasi.

1.4 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari pra-rancangan pabrik ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi akademik dalam penerapan prinsip-prinsip teknik kimia pada perancangan pabrik terintegrasi secara sistematis dan komprehensif.
2. Meningkatkan nilai tambah produk samping biodiesel melalui produksi gliserol karbonat yang memiliki nilai ekonomi lebih tinggi.
3. Mendukung pemanfaatan CO₂ sebagai bahan baku (carbon utilization) dalam proses sintesis gliserol karbonat sehingga berkontribusi terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca.
4. Mendorong pengembangan industri hilir kelapa sawit yang terintegrasi, efisien, dan berkelanjutan di Aceh.
5. Memberikan gambaran kelayakan teknis dan ekonomi sebagai referensi dalam pengembangan industri kimia berbasis sumber daya lokal yang

rendah emisi.

1.5 Batasan Masalah

Agar pembahasan dalam pra-rancangan pabrik ini lebih terarah, maka diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Perancangan difokuskan pada pabrik gliserol karbonat yang terintegrasi dengan unit produksi biodiesel berbasis CPO sebagai sumber gliserol.
2. Proses yang dikaji terbatas pada tahap produksi utama, meliputi persiapan bahan baku, reaksi, pemisahan, dan pemurnian produk.
3. Perancangan hanya mencakup perhitungan neraca massa dan neraca energi pada kondisi operasi yang telah ditentukan.
4. Spesifikasi dan perhitungan peralatan dilakukan untuk peralatan utama proses, tanpa membahas secara rinci desain mekanik dan konstruksi.
5. Analisis ekonomi dilakukan pada tingkat pra-studi kelayakan (preliminary economic evaluation) dengan menggunakan asumsi dan data pendukung yang relevan.
6. Aspek lingkungan dibatasi pada kajian konseptual terkait pemanfaatan CO₂ dan integrasi proses, tanpa analisis AMDAL secara mendalam

1.6 Penentuan Kapasitas Pabrik

Kapasitas pabrik merupakan faktor yang sangat penting dalam pendirian pabrik karena akan mempengaruhi perhitungan teknis dan ekonomi dalam pra-rancangan pabrik Gliserol Karbonat. Dalam menentukan kapasitas prarancangan pabrik Gliserol Karbonat perlu dipertimbangkan hal-hal sebagai berikut:

1.6.1 Ketersediaan Bahan Baku Produksi Gliserol Karbonat

Ketersediaan bahan baku merupakan salah satu faktor penting dalam menjamin keberlanjutan proses produksi gliserol karbonat. Bahan baku utama yang digunakan dalam proses ini adalah Crude Palm Oil (CPO), metanol dan CO₂.

Bahan baku CPO diperoleh dari PT Bumi Tamiang Sentosa yang berlokasi di Kabupaten Aceh Tamiang, Provinsi Aceh. Pemilihan lokasi sumber bahan baku di wilayah Aceh didasarkan pada pertimbangan bahwa hingga saat ini Provinsi Aceh belum memiliki industri pengolahan CPO, sehingga ketersediaan CPO

sebagian besar masih diarahkan untuk distribusi keluar daerah. Kondisi tersebut membuka peluang pemanfaatan CPO secara langsung di wilayah Aceh untuk meningkatkan nilai tambah melalui pembangunan industri hilir. Kabupaten Aceh Tamiang dipilih sebagai lokasi sumber bahan baku karena merupakan daerah dengan kapasitas produksi CPO terbesar di Provinsi Aceh, didukung oleh keberadaan beberapa pabrik kelapa sawit dengan kapasitas pengolahan tinggi. Di antara pabrik-pabrik tersebut, PT Bumi Tamiang Sentosa tercatat sebagai perusahaan dengan kapasitas produksi CPO terbesar di Aceh Tamiang, yaitu sekitar 356.400 ton per tahun, sehingga mampu menjamin kontinuitas dan kestabilan pasokan bahan baku CPO bagi pabrik.

Bahan baku metanol pada pabrik ini direncanakan diperoleh dari PT Kaltim Methanol Industri (KMI) yang berlokasi di Bontang, Kalimantan Timur. Perusahaan ini merupakan produsen metanol terbesar di Indonesia dengan kapasitas produksi mencapai sekitar 660.000 ton metanol per tahun. Metanol yang dipasok memiliki kemurnian 99,85% dalam fase cair, sehingga sesuai untuk digunakan sebagai bahan baku proses pada pabrik ini.

Bahan baku karbon dioksida (CO_2) pada pabrik ini direncanakan diperoleh dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Nagan Raya yang berlokasi di Kabupaten Nagan Raya, Provinsi Aceh. PLTU ini merupakan pembangkit listrik berbahan bakar batubara dengan kapasitas terbesar di Aceh, sehingga menghasilkan emisi CO_2 dalam jumlah signifikan sebagai hasil samping proses pembakaran bahan bakar fosil.

1.6.2 Kapasitas Produksi Pabrik Gliserol Karbonat di Indonesia

Berdasarkan data yang diperoleh hingga tahun 2025, di Indonesia masih belum terdapat perusahaan yang memproduksi gliserol karbonat. Produk gliserol karbonat yang digunakan di dalam negeri umumnya masih diperoleh melalui impor, sehingga menunjukkan adanya peluang pengembangan industri gliserol karbonat di Indonesia. Kondisi ini menjadi dasar pertimbangan dalam perencanaan pendirian pabrik gliserol karbonat, terutama untuk memanfaatkan ketersediaan bahan baku lokal.

1. Kebutuhan Impor Gliserol Karbonat di Indonesia

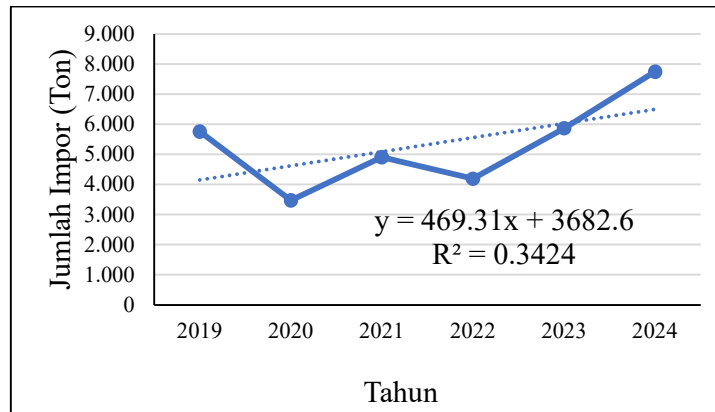
Analisis terhadap data impor gliserol karbonat di Indonesia dilakukan untuk melihat tingkat ketergantungan pasar terhadap pasokan luar negeri. Kajian ini menjadi dasar penting dalam menentukan kapasitas produksi pabrik yang akan dirancang, sehingga keberadaan Pabrik Gliserol Karbonat di Indonesia pada pra-rancangan ini diharapkan mampu memenuhi kebutuhan dalam negeri secara berkelanjutan serta mengurangi impor. Data kebutuhan impor gliserol karbonat Indonesia selama periode 2019 hingga 2024 disajikan pada tabel 1.1.

Tabel 1.1 Data Kebutuhan Impor Gliserol Karbonat di Indonesia

Tahun	Jumlah (Ton)
2019	5.760
2020	3.472
2021	4.909
2022	4.193
2023	5.866
2024	7.752

(Sumber: Comtrade, 2025)

Berdasarkan kajian metodologi regresi yang dijelaskan oleh Ozili (2023), model regresi linear dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang sangat rendah menunjukkan kemampuan yang lemah dalam merepresentasikan pola data dan kurang tepat digunakan untuk tujuan proyeksi. Data diatas menunjukkan fluktuasi dan pola tidak konsisten, sehingga regresi linear kurang tepat untuk memproyeksi data pada tahun 2028 (saat pabrik didirikan) hal ini dapat dilihat pada Gambar 1.1 dimana nilai persamaan regresi linear yang hampir mendekati 0. Oleh karena itu, digunakan metode pertumbuhan tahunan yang lebih sesuai dengan karakteristik data yang bervariasi.



Gambar 1.1 Grafik Kebutuhan Impor Indonesia

Dalam menerapkan metode pertumbuhan tahunan, langkah awal yang dilakukan adalah mencari nilai laju pertumbuhan rata-rata tahunan (r). Dari hasil perhitungan didapat nilai rata-rata pertumbuhannya yaitu $r = 0.06120885$. Berdasarkan persamaan geometrik, nilai impor gliserol karbonat di Indonesia pada tahun 2028 dapat ditentukan sebagai berikut :

$$P_t = P_0 (1 + r)^n$$

Dimana:

P_t = kapasitas akhir,

P_0 = kapasitas awal,

r = pertumbuhan rata rata,

n = proyeksi tahun ke- n .

Dari hasil perhitungan didapat nilai impor gliserol karbonat di Indonesia dari 2024-2028 yaitu pada Tabel 1.3

Tabel 1.2 Data Hasil Perhitungan Kebutuhan Gliserol Karbonat di Indonesia

Tahun	Jumlah (Ton)
2025	8.226
2026	8.730
2027	9.264
2028	9.831

Dapat dilihat pada Tabel 1.2 bahwa impor gliserol karbonat di Indonesia menunjukkan peningkatan dari tahun ke tahun. Berdasarkan perhitungan menggunakan metode pertumbuhan geometrik, kebutuhan impor gliserol karbonat pada tahun 2028 diperkirakan mencapai 9.831 ton. Maka dapat diketahui bahwa

pra-rancangan pabrik ini memiliki peluang untuk mencukupi Gliserol Karbonat di Indonesia pada tahun 2028 mencapai 9.831 Ton. Kondisi ini menunjukkan adanya peluang yang signifikan bagi pengembangan industri gliserol karbonat dalam negeri, sehingga pendirian pabrik gliserol karbonat di Indonesia pada pra-rancangan ini dapat memenuhi kebutuhan domestik, mengurangi ketergantungan terhadap impor, serta mendukung industri kimia nasional.

1.6.3 Kebutuhan Gliserol Karbonat di Dunia

Gliserol karbonat merupakan bahan kimia yang banyak digunakan pada industri polimer, elektrolit baterai, pelarut ramah lingkungan, serta aditif pada bahan bakar. Adapun Negara-negara yang memiliki kebutuhan Gliserol Karbonat dapat dilihat pada Tabel 1.3.

Tabel 1.3 Negara dengan Kebutuhan Glicerol Karbonat

No	Negara
1	Korea
2	Jerman
3	India
4	USA
5	Brazil
6	Prancis

(Sumber: Comtrade, 2025)

Untuk mengetahui berapa besar Gliserol Karbonat yang dibutuhkan oleh tiap negara yang terdapat pada pencarian data kebutuhan Impor Gliserol Karbonat di setiap Negara.

1. Kebutuhan Impor Gliserol Karbonat di Korea

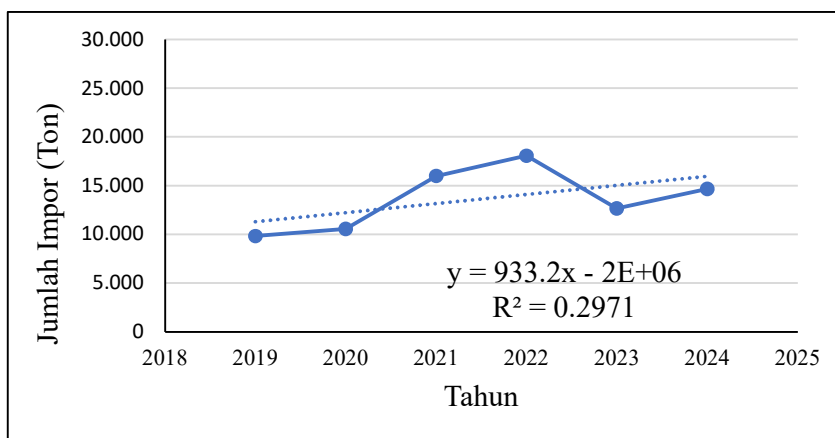
Analisis terhadap data impor Gliserol Karbonat di negara Korea dilakukan untuk meninjau seberapa besar peluang pasar yang bisa dimanfaatkan. Hal ini penting dalam menentukan kapasitas produksi pabrik yang akan dirancang, sehingga produk dari Indonesia pada pra-rancangan ini nantinya memiliki nilai ekspor yang tinggi. Data kebutuhan impor Korea selama periode 2019 hingga 2024 dapat dilihat pada table 1.4.

Tabel 1.4 Data Kebutuhan Impor Gliserol Karbonat di Korea

Tahun	Jumlah (Ton)
2019	9.836
2020	10.553
2021	16.004
2022	18.077
2023	12.671
2024	14.683

(Sumber: Comtrade, 2025)

Berdasarkan kajian metodologi regresi yang dijelaskan oleh Ozili (2023), model regresi linear dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang sangat rendah menunjukkan kemampuan yang lemah dalam merepresentasikan pola data dan kurang tepat digunakan untuk tujuan proyeksi. Data diatas menunjukkan fluktuasi dan pola tidak konsisten, sehingga regresi linear kurang tepat untuk memproyeksi data pada tahun 2028 (saat pabrik didirikan) hal ini dapat dilihat pada Gambar 1.2 dimana nilai persamaan regresi linear yang hampir mendekati 0. Oleh karena itu, digunakan metode pertumbuhan tahunan yang lebih sesuai dengan karakteristik data yang bervariasi.

**Gambar 1.2** Garfik Kebutuhan Impor Korea

Dalam menerapkan metode pertumbuhan tahunan, langkah awal yang dilakukan adalah mencari nilai laju pertumbuhan rata-rata tahunan (r). Dari hasil perhitungan didapat nilai rata-rata pertumbuhannya yaitu $r = 0.083426005$. Berdasarkan persamaan geometrik, nilai impor gliserol karbonat di Korea pada tahun 2028 dapat ditentukan sebagai berikut :

$$P_t = P_0 (1 + r)^n$$

Dimana:

P_t = kapasitas akhir,

P_0 = kapasitas awal,

r = pertumbuhan rata rata,

n = proyeksi tahun ke-n.

Dari hasil perhitungan didapat nilai impor gliserol karbonat di Korea dari 2024-2028 yaitu pada Tabel 1.5

Tabel 1.5 Data Hasil Perhitungan Kebutuhan Gliserol Karbonat di Korea

Tahun	Jumlah (Ton)
2025	15.908
2026	17.235
2027	18.673
2028	20.231

Dapat dilihat pada Tabel 1.6, impor Gliserol Karbonat di Korea terus meningkat tiap tahunnya. Menggunakan metode pertumbuhan geometrik, kebutuhan impor pada tahun 2028 diperkirakan mencapai 20.231 ton. Peluang ekspor kemudian dihitung berdasarkan selisih antara proyeksi tahun 2028 dengan data impor tahun terakhir untuk melihat potensi pasar yang tersedia.

Peluang ekspor = Kebutuhan Impor tahun 2028 - Kebutuhan data terakhir (2024)

Peluang ekspor = 20.231- 14.683

Peluang ekspor = 5.548 Ton

Maka dapat diketahui bahwa pra-rancangan pabrik ini memiliki peluang mengekspor Gliserol Karbonat pada tahun 2028 mencapai 5.548 Ton ke negara Korea.

2. Kebutuhan Impor Gliserol Karbonat di Jerman

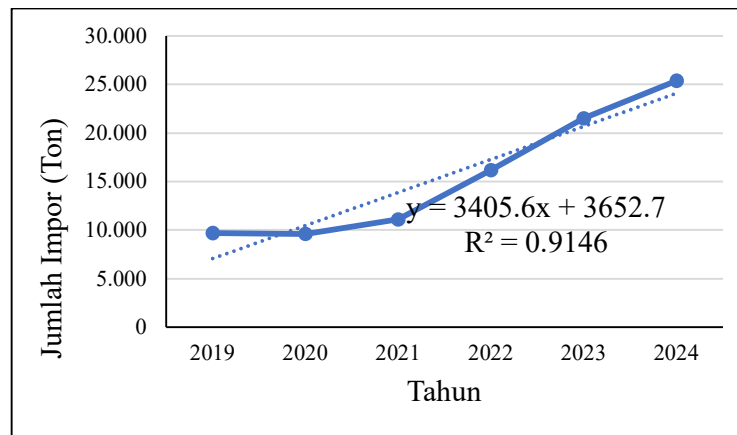
Kebutuhan impor Gliserol Karbonat pada negara Jerman dilakukan pengambilan data untuk mengetahui peluang berapa besar Gliserol Karbonat yang akan meningkatkan nilai ekspor Gliserol Karbonat di Indonesia pada Pra-rancangan pabrik dengan kapasitas yang akan ditetapkan. Adapun kebutuhan Gliserol Karbonat pada negara Jerman didapat pada tahun 2019-2024 dapat dilihat pada tabel 1.6.

Tabel 1.6 Data Kebutuhan Impor Gliserol Karbonat di Jerman

Tahun	Jumlah (Ton)
2019	9.688
2020	9.606
2021	11.092
2022	16.162
2023	21.518
2024	25.366

(Sumber: Comtrade, 2025)

Data diatas menunjukkan kebutuhan impor Gliserol Karbonat di negara Jerman dari tahun 2019-2024 terus mengalami peningkatan tiap tahun nya. Untuk mengetahui kenaikan kebutuhan Gliserol Karbonat impor negara Jerman pada tahun 2028, maka dilakukan ekstrapolasi dari data kebutuhan impor pada tahun 2019-2024, kenaikan data impor Gliserol Karbonat dapat dilihat pada persamaan grafik gambar 1.3.

**Gambar 1.3** Garfik Kebutuhan Impor Jerman

Berdasarkan Gambar 1.3 dapat dilihat bahwa persamaan yang diperoleh adalah $y = 3405.6x + 3652.7$. Kebutuhan impor Gliserol karbonat di Jerman tiap tahunnya mengalami kenaikan sesuai dengan persamaan garis lurus tersebut.

Dimana:

Y = Kebutuhan impor Gliserol karbonat pada tahun tertentu dalam ton

X = Tahun ke yang akan diperkirakan.

Hasil ekstrapolasi kebutuhan impor Gliserol karbonat di jerman dapat dilihat pada tabel 1.7.

Tabel 1.7 Data Hasil Perhitungan Kebutuhan Gliserol Karbonat di Jerman

Tahun	Jumlah (Ton)
2025	27.492
2026	30.898
2027	34.303
2028	37.709

Dapat dilihat pada Tabel 1.7, impor Gliserol Karbonat di Jerman terus meningkat tiap tahunnya. Menggunakan metode ekstrapolasi, kebutuhan impor pada tahun 2028 diperkirakan mencapai 37.709 ton. Peluang ekspor kemudian dihitung berdasarkan selisih antara proyeksi tahun 2028 dengan data impor tahun terakhir untuk melihat potensi pasar yang tersedia.

Peluang ekspor = Kebutuhan Impor tahun 2028 - Kebutuhan data terakhir (2024)

Peluang ekspor = 37.709 - 25.366

Peluang ekspor = 12.342 Ton

Maka dapat diketahui bahwa pra-rancangan pabrik ini memiliki peluang mengekspor Gliserol Karbonat pada tahun 2028 mencapai 12.342 Ton ke negara Jerman.

3. Kebutuhan Impor Gliserol Karbonat di India

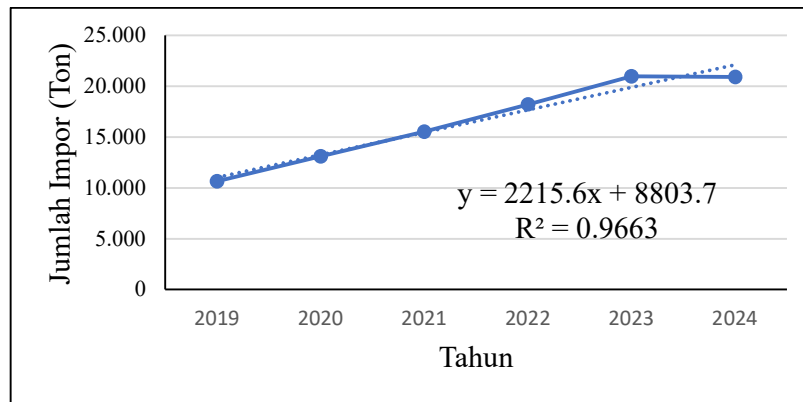
Analisis terhadap data impor Gliserol Karbonat di negara India dilakukan untuk meninjau seberapa besar peluang pasar yang bisa dimanfaatkan. Hal ini penting dalam menentukan kapasitas produksi pabrik yang akan dirancang, sehingga produk dari Indonesia pada pra-rancangan ini nantinya memiliki nilai ekspor yang tinggi. Data kebutuhan impor India selama periode 2019 hingga 2024 dapat dilihat pada Tabel 1.8.

Tabel 1.8 Data Kebutuhan Impor Gliserol Karbonat di India

Tahun	Jumlah (Ton)
2019	10.651
2020	13.102
2021	15.526
2022	18.202
2023	20.953
2024	20.914

(Sumber: Comtrade, 2025)

Data diatas menunjukkan kebutuhan impor Gliserol Karbonat di negara India dari tahun 2019-2024 terus mengalami peningkatan tiap tahun nya. Untuk mengetahui kenaikan kebutuhan Gliserol Karbonat impor negara India pada tahun 2028, maka dilakukan ekstrapolasi dari data kebutuhan impor pada tahun 2019-2024, kenaikan data impor Gliserol Karbonat dapat dilihat pada persamaan grafik gambar 1.4.



Gambar 1.4 Grfaik Kebutuhan Impor India

Berdasarkan Gambar 1.4 dapat dilihat bahwa persamaan yang diperoleh adalah $y = 3405.6x + 3652.7$. Kebutuhan impor Gliserol karbonat di India tiap tahunnya mengalami kenaikan sesuai dengan persamaan garis lurus tersebut. Dimana:

Y = Kebutuhan impor Gliserol karbonat pada tahun tertentu dalam ton

X = Tahun ke yang akan diperkirakan.

Hasil ekstrapolasi kebutuhan impor Gliserol karbonat di India dapat dilihat pada Tabel 1.9.

Tabel 1.9 Data Hasil Perhitungan Kebutuhan Gliserol Karbonat di India

Tahun	Jumlah (Ton)
2025	24.312
2026	26.528
2027	28.743
2028	30.959

Dapat dilihat pada Tabel 1.9, impor Gliserol Karbonat di India terus meningkat tiap tahunnya. Menggunakan metode ekstrapolasi, kebutuhan impor pada tahun 2028 diperkirakan mencapai 30.959 ton. Peluang ekspor kemudian

dihitung berdasarkan selisih antara proyeksi tahun 2028 dengan data impor tahun terakhir untuk melihat potensi pasar yang tersedia.

Peluang ekspor = Kebutuhan Impor tahun 2028 - Kebutuhan data terakhir (2024)

Peluang ekspor = 30.959 - 25.366

Peluang ekspor = 10.044,36 Ton

Maka dapat diketahui bahwa pra-rancangan pabrik ini memiliki peluang mengekspor Gliserol Karbonat pada tahun 2028 mencapai 10.044,36 Ton ke negara India.

4. Kebutuhan Impor Gliserol Karbonat di USA

Analisis terhadap data impor Gliserol Karbonat di negara USA dilakukan untuk meninjau seberapa besar peluang pasar yang bisa dimanfaatkan. Hal ini penting dalam menentukan kapasitas produksi pabrik yang akan dirancang, sehingga produk dari Indonesia pada pra-rancangan ini nantinya memiliki nilai ekspor yang tinggi. Data kebutuhan impor USA selama periode 2019 hingga 2024 dapat dilihat pada tabel berikut:

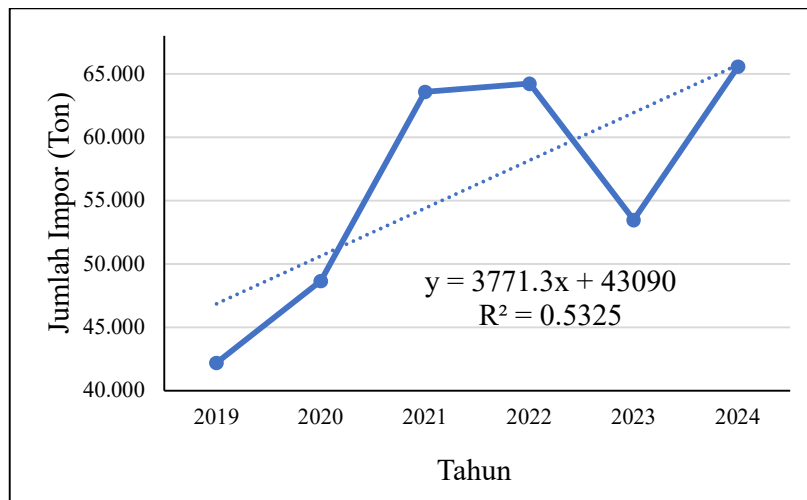
Tabel 1.10 Data Kebutuhan Impor Gliserol Karbonat di USA

Tahun	Jumlah (Ton)
2019	42.205
2020	48.653
2021	63.584
2022	64.239
2023	53.472
2024	65.582

(Sumber: Comtrade, 2025)

Berdasarkan kajian metodologi regresi yang dijelaskan oleh Ozili (2023), model regresi linear dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang sangat rendah menunjukkan kemampuan yang lemah dalam merepresentasikan pola data dan kurang tepat digunakan untuk tujuan proyeksi. Data diatas menunjukkan fluktuasi dan pola tidak konsisten, sehingga regresi linear kurang tepat untuk memproyeksi data pada tahun 2028 (saat pabrik didirikan) hal ini dapat dilihat pada Gambar 1.5 dimana nilai persamaan regresi linear yang hampir mendekati 0. Oleh karena itu, digunakan metode pertumbuhan tahunan yang lebih sesuai dengan karakteristik

data yang bervariasi.



Gambar 1.5 Garfik Keutuhan Impor USA

Dalam menerapkan metode pertumbuhan tahunan, langkah awal yang dilakukan adalah mencari nilai laju pertumbuhan rata-rata tahunan (r). Dari hasil perhitungan didapat nilai rata-rata pertumbuhannya yaitu $r = 0.092153525$. Berdasarkan persamaan geometrik, nilai impor gliserol karbonat di USA pada tahun 2028 dapat ditentukan sebagai berikut :

$$P_t = P_0 (1 + r)^n$$

Dimana:

P_t = kapasitas akhir,

P_0 = kapasitas awal,

r = pertumbuhan rata rata,

n = proyeksi tahun ke-n.

Dari hasil perhitungan didapat nilai impor gliserol karbonat di USA dari 2024-2028 yaitupada Tabel 1.11.

Tabel 1.11 Data HASIL Perhitungan Kebutuhan Gliserol Karbonat di USA

Tahun	Jumlah (Ton)
2025	71,625
2026	78,226
2027	85,435
2028	93.308

Dapat dilihat pada Tabel 1.11, impor Gliserol Karbonat di USA terus meningkat tiap tahunnya. Menggunakan metode pertumbuhan geometrik, kebutuhan impor pada tahun 2028 diperkirakan mencapai 93.308 ton. Peluang ekspor kemudian dihitung berdasarkan selisih antara proyeksi tahun 2028 dengan data impor tahun terakhir untuk melihat potensi pasar yang tersedia.

Peluang ekspor = Kebutuhan Impor tahun 2028 - Kebutuhan data terakhir (2024)

Peluang ekspor = 93.308 - 65.582

Peluang ekspor = 27.726 Ton

Maka dapat diketahui bahwa pra-rancangan pabrik ini memiliki peluang mengekspor Gliserol Karbonat pada tahun 2028 mencapai 27.726 Ton ke negara USA.

5. Kebutuhan Impor Gliserol Karbonat di Brazil

Analisis terhadap data impor Gliserol Karbonat di negara Brazil dilakukan untuk meninjau seberapa besar peluang pasar yang bisa dimanfaatkan. Hal ini penting dalam menentukan kapasitas produksi pabrik yang akan dirancang, sehingga produk dari Indonesia pada pra-rancangan ini nantinya memiliki nilai ekspor yang tinggi. Data kebutuhan impor Brazil selama periode 2019 hingga 2024 dapat dilihat pada Tabel 1.12.

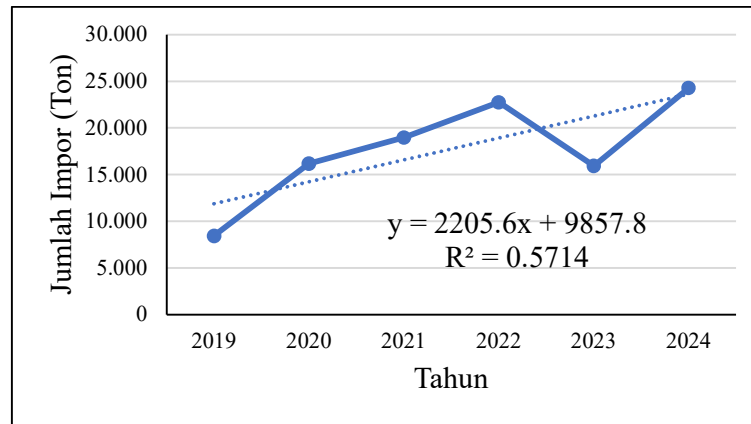
Tabel 1.12 Data Kebutuhan Impor Gliserol Karbonat di Barzil

Tahun	Jumlah (Ton)
2019	8.438
2020	16.164
2021	18.951
2022	22.720
2023	15.923
2024	24.268

(Sumber: Comtrade, 2025)

Berdasarkan kajian metodologi regresi yang dijelaskan oleh Ozili (2023), model regresi linear dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang sangat rendah menunjukkan kemampuan yang lemah dalam merepresentasikan pola data dan kurang tepat digunakan untuk tujuan proyeksi. Data diatas menunjukkan fluktuasi dan pola tidak konsisten, sehingga regresi linear kurang tepat untuk memproyeksi

data pada tahun 2028 (saat pabrik didirikan) hal ini dapat dilihat pada Gambar 1.6 dimana nilai persamaan regresi linear yang hampir mendekati 0. Oleh karena itu, digunakan metode pertumbuhan tahunan yang lebih sesuai dengan karakteristik data yang bervariasi.



Gambar 1.6 Garfik Kebutuhan Impor Brazil

Dalam menerapkan metode pertumbuhan tahunan, langkah awal yang dilakukan adalah mencari nilai laju pertumbuhan rata-rata tahunan (r). Dari hasil perhitungan didapat nilai rata-rata pertumbuhannya yaitu $r = 0.224905841$. Berdasarkan persamaan geometrik, nilai impor gliserol karbonat di Brazil pada tahun 2028 dapat ditentukan sebagai berikut :

$$P_t = P_0 (1 + r)^n$$

Dimana:

P_t = kapasitas akhir,

P_0 = kapasitas awal,

r = pertumbuhan rata rata,

n = proyeksi tahun ke- n .

Dari hasil perhitungan didapat nilai impor gliserol karbonat di Brazil dari 2024-2028 yaitupada Tabel 1.13.

Tabel 1.13 Data Hasil Perhitungan Kebutuhan Gliserol Karbonat di Brazil

Tahun	Jumlah (Ton)
2025	29.977
2026	37.029
2027	45.741
2028	56.502

Dapat dilihat pada Tabel 1.13, impor Gliserol Karbonat di Brazil terus meningkat tiap tahunnya. Menggunakan metode pertumbuhan geometrik, kebutuhan impor pada tahun 2028 diperkirakan mencapai 56.502 ton. Peluang ekspor kemudian dihitung berdasarkan selisih antara proyeksi tahun 2028 dengan data impor tahun terakhir untuk melihat potensi pasar yang tersedia.

Peluang ekspor = Kebutuhan Impor tahun 2028 - Kebutuhan data terakhir (2024)

Peluang ekspor = 56.502 – 24.268

Peluang ekspor = 32.234 Ton

Maka dapat diketahui bahwa pra-rancangan pabrik ini memiliki peluang mengekspor Gliserol Karbonat pada tahun 2028 mencapai 32.234 Ton ke negara Brazil.

6. Kebutuhan Impor Gliserol Karbonat di Prancis

Analisis terhadap data impor Gliserol Karbonat di negara Prancis dilakukan untuk meninjau seberapa besar peluang pasar yang bisa dimanfaatkan. Hal ini penting dalam menentukan kapasitas produksi pabrik yang akan dirancang, sehingga produk dari Indonesia pada pra-rancangan ini nantinya memiliki nilai ekspor yang tinggi. Data kebutuhan impor Prancis selama periode 2019 hingga 2024 dapat dilihat pada Tabel 1.14.

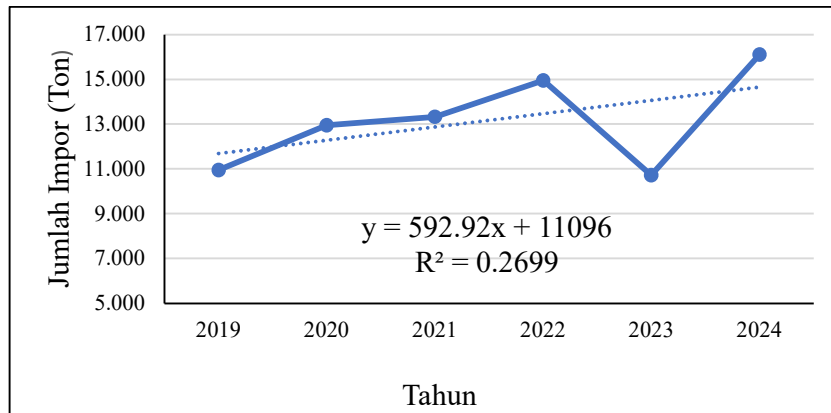
Tabel 1.14 Data Kebutuhan Impor Gliserol Karbonat di Prancis

Tahun	Jumlah (Ton)
2019	10,947
2020	12,959
2021	13,327
2022	14,952
2023	10,729
2024	16,111

(Sumber: Comtrade, 2025)

Berdasarkan kajian metodologi regresi yang dijelaskan oleh Ozili (2023), model regresi linear dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang sangat rendah menunjukkan kemampuan yang lemah dalam merepresentasikan pola data dan kurang tepat digunakan untuk tujuan proyeksi. Data diatas menunjukkan fluktuasi dan pola tidak konsisten, sehingga regresi linear kurang tepat untuk memproyeksi

data pada tahun 2028 (saat pabrik didirikan) hal ini dapat dilihat pada Gambar 1.7 dimana nilai persamaan regresi linear yang hampir mendekati 0. Oleh karena itu, digunakan metode pertumbuhan tahunan yang lebih sesuai dengan karakteristik data yang bervariasi.



Gambar 1.7 Grafik Kebutuhan Impor Prancis

Dalam menerapkan metode pertumbuhan tahunan, langkah awal yang dilakukan adalah mencari nilai laju pertumbuhan rata-rata tahunan (r). Dari hasil perhitungan didapat nilai rata-rata pertumbuhannya yaitu $r = 0.080343461$. Berdasarkan persamaan geometrik, nilai impor gliserol karbonat di Prancis pada tahun 2028 dapat ditentukan sebagai berikut :

$$P_t = P_0 (1 + r)^n$$

Dimana:

P_t = kapasitas akhir,

P_0 = kapasitas awal,

r = pertumbuhan rata rata,

n = proyeksi tahun ke-n.

Dari hasil perhitungan didapat nilai impor gliserol karbonat di Prancis dari 2024-2028 yaitu pada Table 1.15.

Tabel 1.15 Data Hasil Perhitungan Kebutuhan Gliserol Karbonat di Prancis

Tahun	Jumlah (Ton)
2025	17.405
2026	18.804
2027	20.315
2028	21.947

Dapat dilihat pada Tabel 1.15, impor Gliserol Karbonat di Prancis terus meningkat tiap tahunnya. Menggunakan metode pertumbuhan geometrik, kebutuhan impor pada tahun 2028 diperkirakan mencapai 21.947 ton. Peluang ekspor kemudian dihitung berdasarkan selisih antara proyeksi tahun 2028 dengan data impor tahun terakhir untuk melihat potensi pasar yang tersedia.

Peluang ekspor = Kebutuhan Impor tahun 2028 - Kebutuhan data terakhir (2024)

Peluang ekspor = 21.947 – 16,111

Peluang ekspor = 5.836 Ton

Maka dapat diketahui bahwa pra-rancangan pabrik ini memiliki peluang mengekspor Gliserol Karbonat pada tahun 2028 mencapai 5.836 Ton ke negara Prancis.

Target pasar dari pra-rancangan pabrik ini mencakup pemenuhan kebutuhan gliserol karbonat di dalam negeri serta pasar luar negeri (ekspor). Saat ini, kebutuhan gliserol karbonat di pasar internasional masih dipenuhi oleh pabrik-pabrik produksi gliserol karbonat yang beroperasi di luar negeri. Untuk mendukung analisis pasar global, informasi mengenai kapasitas produksi dan lokasi pabrik gliserol karbonat di luar negeri dapat dilihat pada Tabel 1.16.

Tabel 1.16 Produksi Gliserol Karbonat di Luar Negri

No	Nama Pabrik	Kapasitas (Ton/Tahun)	Sumber
1	Anhui meisenbao technology co., LDT	100.000	http://www.meisenbaochem.com/
2	Huntsman Corporation	250.000	http://www.huntsman.com/
3	Hebei Guanlang Biotechnology Co., Ltd	100.000	https://crovellbio.en.made-in-china.com/

Berdasarkan analisis kebutuhan impor dari negara-negara tujuan ekspor serta kebutuhan dalam negeri, dilakukan estimasi alokasi distribusi produksi. Hasil perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 1.17.

Tabel 1.17 Perencanaan Distribusi Produksi Gliserol Karbonat

No	Negara	Peluang Distribusi	Jumlah Distribusi	%Distribusi
1	Korea	5.548	5.000	5%
2	Jerman	12.342	12.000	12%
3	India	10.044	10.000	10%
4	USA	27.726	26.000	26%
5	Brazil	32.234	32.000	32%
6	Prancis	5.836	5.000	5%
7	Indonesia	9.831	10.000	10%
	Jumlah		100.000	100%

Berdasarkan perhitungan kebutuhan gliserol karbonat di dalam negeri dan luar negeri yang ditunjukkan pada tabel di atas, serta dengan mempertimbangkan ketersediaan bahan baku dan kondisi pabrik gliserol karbonat yang sudah ada, maka kapasitas pra-rancangan pabrik ditetapkan sebesar 100.000 ton per tahun. Kapasitas ini direncanakan untuk memenuhi kebutuhan gliserol karbonat dalam negeri sekaligus melayani pasar ekspor. Saat ini, jumlah pabrik gliserol karbonat di dunia masih relatif sedikit, sehingga pemenuhan kebutuhan pasar luar negeri dalam pra-rancangan ini disesuaikan dengan peluang distribusi yang tersedia. Selain itu, penentuan kapasitas ini didasarkan pada kapasitas pabrik-pabrik yang sudah beroperasi maupun yang sedang dalam tahap pembangunan di berbagai negara, juga kebutuhan pasar akan produk Gliserol Karbonat yang semakin meningkat.

Selain menghasilkan gliserol karbonat sebagai produk utama, pabrik ini juga menghasilkan biodiesel sebagai produk utama dari proses transesterifikasi CPO. Analisa pasar biodiesel dilakukan secara kualitatif dengan mempertimbangkan bahwa pasar biodiesel nasional telah terbentuk dengan baik, khususnya melalui program mandatori pemanfaatan biodiesel di sektor energi. Biodiesel yang dihasilkan tidak digunakan sebagai dasar penentuan kapasitas pabrik, melainkan mengikuti jumlah biodiesel yang terbentuk seiring dengan kebutuhan gliserol dalam proses produksi gliserol karbonat. Seluruh biodiesel yang dihasilkan direncanakan untuk **dipasarkan kepada PT Pertamina (Persero)** sebagai badan usaha penyalur bahan bakar, sehingga keberadaan produk samping

ini diharapkan dapat terserap pasar secara berkelanjutan dan memberikan nilai tambah ekonomi tanpa mempengaruhi penetapan kapasitas pabrik utama.

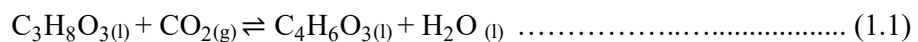
1.7 Pemilihan Proses

Dalam prarancangan pabrik gliserol karbonat ini, bahan baku utama yang digunakan adalah *Crude Palm Oil* (CPO). Gliserol yang dibutuhkan sebagai bahan baku sintesis gliserol karbonat diperoleh sebagai produk samping dari proses produksi biodiesel berbahan baku CPO. Oleh karena itu, perancangan pabrik mencakup dua unit proses utama, yaitu unit produksi biodiesel dan unit produksi gliserol karbonat yang terintegrasi dalam satu sistem produksi. Adapun pemilihan proses dalam prarancangan ini dibagi menjadi dua bagian sebagai berikut:

1.7.1 Pemilihan Proses Produksi Gliserol Karbonat

1.7.1.1 Direct Carbonation

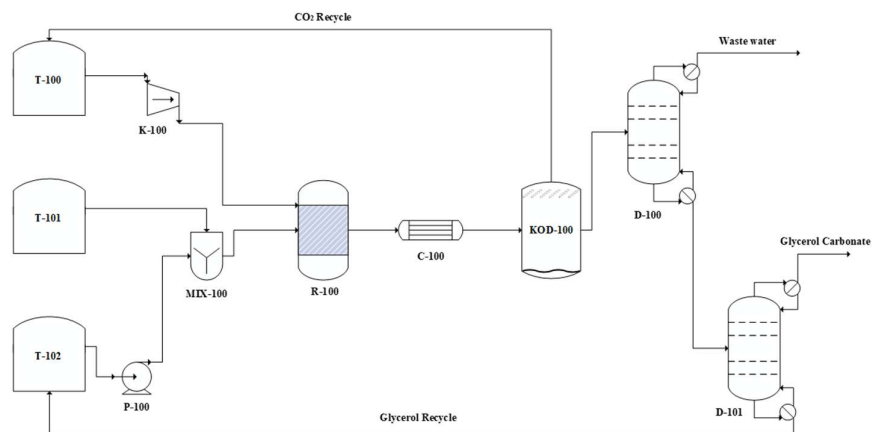
Metode produksi gliserol karbonat melalui rute karbonilasi langsung (*Direct Carbonation*) dilakukan dengan mereaksikan gliserol dan sumber karbonil, yang umumnya berupa karbon dioksida (CO₂) atau karbon monoksida (CO). Namun, penggunaan karbon monoksida (CO) pada skala industri menghadapi kendala biaya tinggi dan masalah keselamatan akibat sifat gas CO yang sangat beracun. Sehingga, saat ini menggunakan (CO₂) sebagai sumber karbonil yang lebih ramah lingkungan, meskipun secara termodinamika reaksi ini kurang menguntungkan dan umumnya menghasilkan konversi yang rendah. Untuk mengatasi batasan kesetimbangan kimia tersebut, proses ini memerlukan agen pengikat air (*dehydrating agent*) yaitu 2-cyanopyridine agar reaksi dapat bergeser ke arah produk (Inrirai dkk., 2024). Persamaan reaksi utama pembentukan gliserol karbonat dari gliserol dan karbon dioksida adalah sebagai berikut:



Proses produksi gliserol karbonat melalui reaksi *direct carbonation* antara gliserol dan karbon dioksida dilakukan dalam reaktor tekanan tinggi yang berisi katalis padat 10,5% Zn/CeO₂. Bahan baku gliserol yang sudah bersih dicampurkan terlebih dahulu dengan agen dehidrasi 2-cyanopyridine dengan rasio mol 1:3 (gliserol : 2-cyanopyridine), kemudian campuran tersebut dipompa ke dalam

reaktor. Karbon dioksida dikompresi hingga tekanan operasi dan diinjeksikan ke dalam reaktor sehingga terjadi kontak intensif antara fase gas dan cair. Reaksi dijalankan pada temperatur sekitar 120-170 °C dan tekanan 2-4 MPa. Pada kondisi ini, konversi gliserol dapat mencapai kisaran 90,4% dengan *yield* gliserol karbonat 89,5% dan selektivitas gliserol karbonat mencapai 99%. Efluen reaktor kemudian dialirkan ke separator tekanan tinggi untuk memisahkan CO₂ yang tidak bereaksi, yang selanjutnya didinginkan dan *directcycle* kembali ke reaktor (Schenk dkk, 2018).

Fase cair hasil pemisahan selanjutnya diproses melalui dua tahap distilasi vakum. Tahap pertama berfungsi sebagai pemisahan komponen ringan (*light ends*), yaitu campuran air dan 2-cyanopyridine, yang dikeluarkan sebagai distilat pada tekanan rendah untuk menurunkan suhu operasi dan mencegah degradasi termal produk. Aliran bagian bawah kolom mengandung gliserol karbonat dan gliserol kemudian dialirkan ke kolom distilasi vakum kedua. Pada tahap ini, gliserol karbonat dipisahkan sebagai fraksi distilat pada temperatur operasi sekitar 180–210 °C (vakum), sedangkan gliserol yang bertitik didih lebih tinggi tertinggal dan *directcycle* kembali ke reaktor. Dari kolom distilasi ini, produk gliserol karbonat yang diperoleh dapat mencapai kemurnian $\geq 98\%$ (Schenk dkk, 2018).. Diagram alir proses dapat dilihat pada gambar 1 .



Gambar 1.8 Flowsheet Dasar Produksi Gliserol Karbonat Menggunakan Proses *Direct Carbonation* (Schenk dkk, 2018).

Analisis ekonomi awal dilakukan untuk mengetahui potensi keuntungan kotor (*Gross Profit Margin*) dari proses produksi Gliserol Karbonat melalui proses

Direct Carbonation. Perhitungan ini didasarkan pada stoikiometri reaksi ideal untuk memproduksi produk Gliserol Karbonat dengan asumsi konversi sempurna pada perhitungan neraca massa teoritis. Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 1.18

Tabel 1.18 Analisa Ekonomi Awal Proses Direct Carbonation

Komponen	BM (g/mol)	Kebutuhan (kg)	Harga (Rp/kg)	Harga Total
Bahan Baku				
Gliserol	92	$(1 \text{ mol} \times 92 \text{ g})/1000 = 0,092$	7.563	Rp 695,796
CO ₂	44	$(1 \text{ mol} \times 44 \text{ g})/1000 = 0,044$	630	Rp 27,72
Total Biaya Bahan Baku				Rp. 723,516
Produk				
Gliserol Karbonat	118	$(1 \text{ mol} \times 118 \text{ g})/1000 = 0,118$	84.800	10.006,4
Air	18	$(1 \text{ mol} \times 18 \text{ g})/1000 = 0,018$	0	0
Total Nilai Produk				Rp. 10.006,4
Analisa Ekonomi Awal	$(\text{Harga Produk}) - (\text{Harga Total Bahan Baku})$ $= (\text{Rp } 10.006,4) - (\text{Rp } 723,516)$ $= \text{Rp } 9.282,884$			

Sumber: (ChemAnalyst, 2025; Kompas, 2025; GlobeNewswire, 2025).

Berdasarkan hasil Analisa ekonomi awal pada tabel 1.12 maka persentase margin keuntungan secara kasar (*gross profit*) diperoleh berikut:

$$\begin{aligned} \% \text{ Keuntungan} &= \frac{\text{Keuntungan} - \text{Harga Bahan Baku}}{\text{Keuntungan}} \times 100\% \\ &= \frac{\text{Rp } 9.282,884 - (\text{Rp } 723,516)}{\text{Rp } 9.282,884} \times 100\% \\ &= 92,20\% \end{aligned}$$

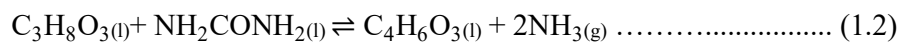
Maka persentase margin keuntungan produksi gliserol karbonat yang didapat dari proses *direct carbonation* yaitu sebesar 92,20%.

1.7.1.2 Gliserolisis Urea

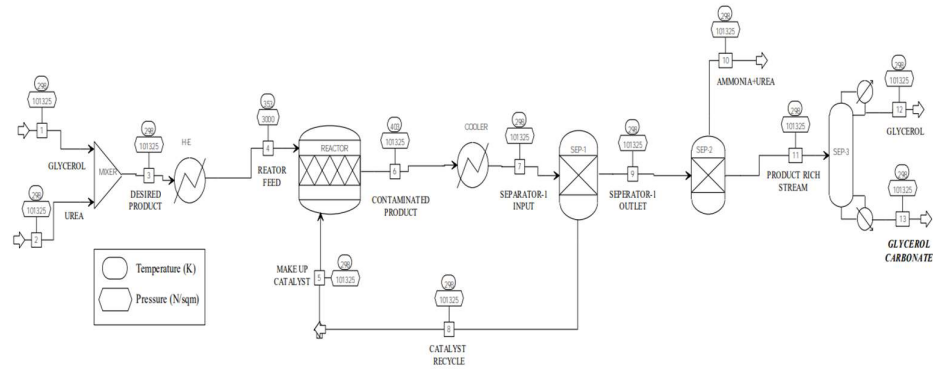
Metode gliserolisis urea merupakan salah satu rute produksi gliserol karbonat yang paling menjanjikan secara komersial karena menggunakan bahan baku urea yang murah dan melimpah. Proses ini melibatkan reaksi antara gliserol dengan urea menghasilkan gliserol karbonat dan amonia (NH₃) sebagai produk

samping. Keunggulan utama metode ini adalah kondisinya yang dapat berlangsung pada tekanan atmosferik, sehingga biaya investasi peralatan (reaktor) lebih rendah dibandingkan dengan rute karbonilasi langsung.

Reaksi gliserolisis urea merupakan reaksi kesetimbangan yang dapat dipercepat dengan penggunaan katalis asam padat atau basa, serta dengan menarik amonia keluar dari sistem reaksi untuk menggeser kesetimbangan ke arah pembentukan produk. Persamaan reaksi utama pembentukan gliserol karbonat melalui gliserolisis urea adalah sebagai berikut:



Proses produksi gliserol karbonat melalui rute gliserolisis urea dilakukan dengan mereaksikan gliserol dan urea menggunakan bantuan katalis seperti ZnO, MgO, atau katalis berbasis logam transisi untuk mencapai efisiensi reaksi yang tinggi dengan konversi gliserol di atas 90%. Secara teknis, urea dipilih sebagai bahan baku karena perannya sebagai sumber karbonil yang jauh lebih aman untuk ditangani dibandingkan dengan gas phosgene yang sangat beracun. Reaksi ini umumnya dioperasikan pada rentang suhu 140–150°C di bawah kondisi vakum dengan tekanan rendah sekitar 0,02 – 0,1 atm, yang bertujuan untuk memfasilitasi pengeluaran gas amonia secara kontinu dari sistem guna menggeser kesetimbangan ke arah pembentukan produk. Selain menghasilkan produk utama, gas amonia yang terbentuk sebagai produk samping dapat ditangkap kembali melalui proses *recovery* untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku industri pupuk atau proses kimia lainnya, sehingga meningkatkan nilai ekonomi dari keseluruhan proses (Jitjamnong dkk, 2023). Diagram alir proses dapat dilihat pada gambar 1.2



Gambar 1.9 Flowsheet Dasar Produksi Gliserol Karbonat Menggunakan Proses Gliserolisis Urea (Jitjammong dkk, 2023)

Analisis ekonomi awal dilakukan untuk mengetahui potensi keuntungan kotor (*Gross Profit Margin*) dari proses produksi Gliserol Karbonat melalui proses gliserolisis urea. Perhitungan ini didasarkan pada stoikiometri reaksi ideal untuk memproduksi produk Gliserol Karbonat dengan asumsi konversi sempurna pada perhitungan neraca massa teoritis. Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 1.19

Tabel 1.19 Analisa Ekonomi Awal Proses Gliserolisis Urea

Komponen	BM (g/mol)	Kebutuhan (kg)	Harga (Rp/kg)	Harga Total
Bahan Baku				
Gliserol	92	$(1 \text{ mol} \times 92 \text{ g})/1000 = 0,092$	7.563	Rp 695,796
Urea	60	$(1 \text{ mol} \times 60 \text{ g})/1000 = 0,06$	7.440	Rp 446,4
Total Biaya Bahan Baku				Rp. 1.142,19
Produk				
Gliserol Karbonat	118	$(1 \text{ mol} \times 118 \text{ g})/1000 = 0,118$	84.800	Rp 10.006,4
Amonia	17	$(2 \text{ mol} \times 17 \text{ g})/1000 = 0,034$	5.730	Rp 194,82
Total Nilai Produk				Rp. 10.201,22
Analisa Ekonomi Awal	$(\text{Harga Produk}) - (\text{Harga Total Bahan Baku})$ $= (\text{Rp. 10.201,22}) - (\text{Rp. 1.142,19})$ $= \text{Rp 9.059,03}$			

Sumber: (ChemAnalyst, 2025; Tradewheel.com, 2025; GlobeNewswire, 2025; S&P Global Commodity Insights, 2025).

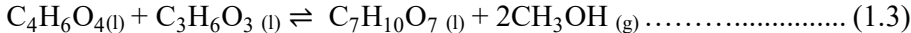
Berdasarkan hasil Analisa ekonomi awal pada tabel 1.12 maka persentase margin keuntungan secara kasar (*gross profit*) diperoleh berikut:

$$\begin{aligned}
\% \text{ Keuntungan} &= \frac{\text{Keuntungan} - \text{Harga Bahan Baku}}{\text{Keuntungan}} \times 100\% \\
&= \frac{\text{Rp } 9.059,03 - (\text{Rp } 1.142,19)}{\text{Rp } 9.059,03} \times 100\% \\
&= 87,39\%
\end{aligned}$$

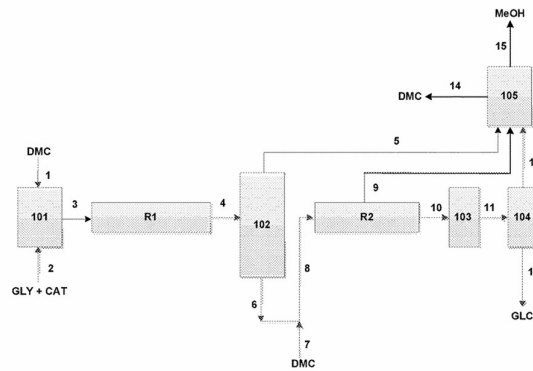
Maka persentase margin keuntungan produksi gliserol karbonat yang didapat dari proses gliserolisis urea yaitu sebesar 87,39%.

1.7.1.3 Transesterifikasi DMC

Proses produksi *glycerol carbonate* (GLC) melalui reaksi transesterifikasi antara aliran reaktan gliserol dengan *dimethyl carbonate* (DMC) dalam fasa cair. Produksi ini diawali di reaksi pertama dengan bantuan katalis transesterifikasi homogen, seperti natrium metoksida (NaOMe), yang dicampurkan ke dalam gliserol sebelum diumpankan ke reaktor. Pada tahap awal ini, reaktan biasanya bersifat bifasik karena gliserol dan DMC tidak saling campur, namun campuran akan berubah menjadi monofasik seiring terbentuknya produk samping alkohol yang membantu kelarutan, sehingga meningkatkan laju reaksi. Reaksi pada tahap pertama ini dioperasikan pada suhu antara 40°C hingga 160°C dengan tekanan autogenik sekitar 1 hingga 10 bar untuk mencapai konversi gliserol sebesar 90-98% dengan reaksi sebagai berikut (Coleman dkk, 2018).



Produk yang diperoleh selanjutnya dialirkan ke unit pemisahan untuk membuang sebagian produk samping alkohol melalui proses distilasi atau *flash*. Pemisahan ini dilakukan pada suhu rendah, untuk menghindari polimerisasi produk GLC yang tidak diinginkan. Karena sebagian DMC dapat hilang sebagai campuran azeotrop bersama metanol, aliran DMC tambahan sering kali dimasukkan kembali ke dalam sistem untuk menjaga rasio stoikiometri yang tepat sebelum memasuki tahap berikutnya. Diagram alir proses ditampilkan pada gambar 3 (Coleman dkk, 2018).



Gambar 1.10 Flowsheet Dasar Produksi Gliserol Karbonat Menggunakan Proses Transesterifikasi DMC (Coleman dkk, 2018).

Analisis ekonomi awal dilakukan untuk mengetahui potensi keuntungan kotor (*Gross Profit Margin*) dari proses produksi Gliserol Karbonat melalui proses Transesterifikasi DMC. Perhitungan ini didasarkan pada stoikiometri reaksi ideal untuk memproduksi produk Gliserol Karbonat dengan asumsi konversi sempurna pada perhitungan neraca massa teoritis. Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 1.20.

Tabel 1.20 Analisa ekonomi Awal Proses Transesterifikasi DMC

Komponen	BM (g/mol)	Kebutuhan (kg)	Harga (Rp/kg)	Harga Total
Bahan Baku				
Gliserol	92	$(1 \text{ mol} \times 92 \text{ g})/1000 = 0,092$	7.563	Rp 695,796
Dimetil Karbonat	90,08	$(1 \text{ mol} \times 90,08 \text{ g})/1000 = 0,09008$	10.485	Rp 944,48
Total Biaya Bahan Baku				Rp 1.640,284
Produk				
Gliserol Karbonat	118	$(1 \text{ mol} \times 118 \text{ g})/1000 = 0,118$	84.800	Rp 10.006,4
Metanol	32,04	$(2 \text{ mol} \times 32,04 \text{ g})/1000 = 0,064$	5.760	Rp 369,1008
Total Nilai Produk				Rp. 10.375,5
Analisa Ekonomi Awal	$(\text{Harga Produk}) - (\text{Harga Total Bahan Baku})$ $= (\text{Rp. } 10.375,5) - (\text{Rp. } 1.640,284)$ $= \text{Rp } 8.735,21$			

Sumber : (ChemAnalyst, 2025; Tradewheel.com, 2025; GlobeNewswire, 2025; S&P Global Commodity Insights, 2025).

Berdasarkan hasil Analisa ekonomi awal pada tabel 1.20 maka persentase margin keuntungan secara kasar (*gross profit*) diperoleh berikut:

$$\begin{aligned} \% \text{ Keuntungan} &= \frac{\text{Keuntungan} - \text{Harga Bahan Baku}}{\text{Keuntungan}} \times 100\% \\ &= \frac{\text{Rp}8.735,21 - (\text{Rp} 1.640,284)}{\text{Rp} 8.735,21} \times 100\% \\ &= 81,22\% \end{aligned}$$

Maka persentase margin keuntungan produksi gliserol karbonat yang didapat dari proses Transesterifikasi DMC yaitu sebesar 81,22%.

1.7.1.4 Perbandingan Proses Gliserol Karbonat

Proses pembuatan gliserol karbonat secara umum terbagi menjadi tiga, yaitu proses *Direct Carbonation*, Gliserolisis Urea, dan Transesterifikasi DMC. Dalam perancangan pabrik gliserol karbonat ini proses yang dipilih adalah metode Transesterifikasi DMC dengan katalis natrium metoksida (NaOMe). Alasan utama memilih metode ini karena merupakan proses pembuatan gliserol karbonat yang ekonomis dengan kondisi operasi tidak terlalu tinggi dan memiliki konversi yang besar serta tidak memerlukan proses yang Panjang. Adapun kelebihan dan kekurangan dari masing-masing proses dapat dilihat pada tabel 1.21 sebagai berikut:

Tabel 1.21 Perbandingan Proses Produksi Gliserol Karbonat

No	Faktor Pembeding	Proses Pembuatan		
		<i>Direct Carbonation</i>	Gliserolisis Urea	Transesterifikasi DMC
1	Bahan Baku	Gliserol, CO ₂	Gliserol, urea	Gliserol, DMC
2	Kondisi Operasi	120-170°C dan 98,69 - 148 atm	140–150°C dan 0,02 – 0,1 atm	40- 160°C dan 1 - 10 atm
3	Katalis	10,5% Zn/CeO ₂	ZnO / MgO	Natrium Metoksida
4	Pelarut	2-cyanopyridine	-	-
5	Jenis Reaksi	Endotermis	Endotermis	Endotermis
6	Jenis Reaktor	Bubble column reactor	<i>Batch Vacuum Stirred Tank Reactor</i>	<i>Plug Flow Reactor (PFR) /Continuously Stirred Tank Reactor (CSTR)</i>

Lanjutan...

7	Konversi Gliserol	90,4 %	>90%	98%
8	Produk Samping	Air	Amonia	Metanol
9	% Margin Keuntungan Awal	92,20%	87,39%	81,22%

Berdasarkan tabel perbandingan proses diatas maka dalam perancangan pabrik gliserol karbonat dipilih proses direct Carbonation Dengan pertimbangan sebagai berikut:

1. Proses ini memanfaatkan karbon dioksida (CO₂) secara langsung sebagai bahan baku reaksi, sehingga mendukung konsep pemanfaatan emisi karbon (*carbon utilization*) dan berkontribusi terhadap pengurangan gas rumah kaca di atmosfer.
2. Penggunaan CO₂ sebagai reaktan memberikan nilai tambah lingkungan karena gas yang semula merupakan limbah industri dapat dikonversi menjadi produk kimia bernilai ekonomi tinggi, sehingga sejalan dengan prinsip industri hijau dan ekonomi sirkular.
3. Produk samping yang dihasilkan berupa air yang bersifat tidak berbahaya dan tidak memerlukan penanganan khusus, sehingga lebih aman dibandingkan proses lain yang menghasilkan amonia atau metanol sebagai produk samping.
4. Berdasarkan analisis ekonomi awal, proses *Direct Carbonation* memberikan nilai tambah dan persentase margin keuntungan awal tertinggi dibandingkan proses lainnya, sehingga lebih prospektif dari sisi ekonomi pada tahap penyaringan awal.
5. Bahan baku yang digunakan relatif sederhana, yaitu gliserol dan CO₂, sehingga memungkinkan integrasi dengan industri biodiesel sebagai sumber gliserol serta industri penghasil emisi CO₂ sebagai sumber karbon dioksida.

6. Penggunaan katalis padat pada proses ini memudahkan pemisahan dan pengolahan lanjutan, sehingga berpotensi mengurangi kompleksitas proses pemurnian produk.

1.7.2 Pemilihan Proses Produksi Biodiesel

Teknologi produksi biodiesel di dunia saat ini telah berkembang pesat dan diaplikasikan secara luas dalam skala industri. Beberapa teknologi yang paling banyak digunakan antara lain Lurgi, Desmet Ballestra, dan Axens (Proses Esterfip-H). Masing-masing teknologi memiliki karakteristik yang berbeda, sehingga dilakukan perbandingan untuk menentukan teknologi yang paling sesuai dengan kebutuhan perancangan pabrik ini. Pada Tabel berikut disajikan perbandingan dari ketiga teknologi tersebut.

Tabel 1.22 Perbandingan Proses Produksi Biodiesel

Parameter	Lurgi	Desmet Ballestra	Axens (Esterfip-H)
Proses	Transesterifikasi homogen, multi-stage	Transesterifikasi homogen kontinyu	Transesterifikasi heterogen (fixed-bed)
Katalis	NaOH / Sodium methoxide (homogen)	NaOH / Sodium methoxide (homogen)	Zinc oxide / zinc aluminate (heterogen)
Kondisi Operasi	$\pm 60^{\circ}\text{C}$, tekanan atmosfer	$55\text{--}65^{\circ}\text{C}$, tekanan atmosfer	$170\text{--}210^{\circ}\text{C}$, ± 62 bar
Tipe Reaktor	Multi-stage stirred reactor	CSTR	Fixed-bed reactor
Konversi Reaksi	99,98%	98%	98,3%
Yield Biodiesel	$>96,5\%$	$\sim 98\%$	$\geq 96,5\%$
Kompleksitas Peralatan	Sedang	Sedang	Tinggi

Sumber : (Desmet Ballestra, 2019; JJ-Lurgi Engineering, n.d.; Wörgetter et al., 2007; Mittelbach & Remschmidt, 2006).

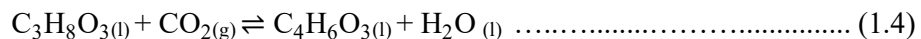
Berdasarkan Tabel 1.14, teknologi yang dipilih untuk produksi biodiesel dan gliserol dari CPO adalah teknologi Lurgi, dengan pertimbangan sebagai berikut:

1. Konversi reaksi tertinggi >99,98%, yang menunjukkan tingkat perubahan trigliserida menjadi metil ester lebih optimal sehingga kehilangan bahan baku lebih kecil.
2. Yield biodiesel lebih tinggi (~98%), sehingga jumlah produk yang dihasilkan lebih besar untuk jumlah bahan baku yang sama, yang berdampak pada peningkatan efisiensi ekonomi proses.
3. Beroperasi pada suhu 60 °C dan tekanan atmosferik, sehingga kebutuhan energi lebih rendah dan tidak memerlukan peralatan bertekanan tinggi seperti pada proses Axens (± 62 bar), yang berarti biaya investasi dan operasional lebih ekonomis.
4. Kompleksitas peralatan tergolong sedang, sehingga perancangan dan pengoperasian lebih sederhana dibandingkan teknologi dengan kompleksitas tinggi, namun tetap mampu menghasilkan konversi dan yield yang tinggi.

1.8 Tinjauan Termodinamika

Tinjauan termodinamika berfungsi untuk penentuan sifat reaksi berjalan secara eksotermis atau endotermis. Secara termodinamika, reaksi *direct carbonation* menjadi Gliserol Karbonat ditentukan oleh perubahan entalpi, energi Gibbs, dan konstanta kesetimbangan yang mempengaruhi spontanitas dan kesetimbangan reaksi.

1. Pada keadaan setimbang



Tabel 1.23 Harga $\Delta\text{H}^\circ\text{f}$ dan $\Delta\text{G}^\circ\text{f}$ Masing-masing Komponen

Komponen	$\Delta\text{H}^\circ\text{f}$ (Kj/mol)	$\Delta\text{G}^\circ\text{f}$ (Kj/mol)
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ (Gliserol)	-669,6	-475,9
CO_2 (Karbon dioksida)	-393,5	-394,4
$\text{C}_7\text{H}_{10}\text{O}_7$ (Gliserol Karbonat)	-585,3	-440,2
H_2O (Air)	-285,8	-237,1

Sumber : (Yaws, 1999)

Panas reaksi standar (ΔH° 298 K)

$$\Delta H^\circ \text{ reaksi} = \Delta H^\circ \text{ produk} - \Delta H^\circ \text{ reaktan}$$

$$\Delta H^\circ \text{ reaksi} = (\Delta H^\circ \text{ C}_4\text{H}_6\text{O}_3 + (\Delta H^\circ \text{ H}_2\text{O}) - (\Delta H^\circ \text{ C}_3\text{H}_8\text{O}_3 + \Delta H^\circ \text{ CO}_2)$$

$$\Delta H^\circ \text{ reaksi} = [(-585,3) + (-285,8)] - [(-669,6) + (-393,5)]$$

$$\Delta H^\circ \text{ reaksi} = +192,0 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H^\circ \text{ reaksi} = +192.000 \text{ J/mol}$$

Reaksi yang terjadi merupakan reaksi endotermis karena nilai ΔH° reaksi bernilai positif (+192,0 kJ/mol). Nilai entalpi yang positif menunjukkan bahwa sistem menyerap panas dari lingkungan agar reaksi dapat berlangsung. Dengan demikian, pada kondisi standar reaksi memerlukan suplai energi dalam bentuk panas.

Untuk mengetahui kecenderungan reaksi berlangsung secara spontan atau tidak pada kondisi standar, perlu dilakukan analisis berdasarkan energi bebas Gibbs standar (ΔG°). Besarnya ΔG° akan menentukan apakah reaksi berlangsung spontan ke arah produk atau lebih cenderung berada pada sisi reaktan. Hubungan antara ΔG° dan konstanta kesetimbangan (K) dinyatakan melalui persamaan.:

$$\ln K = -\frac{\Delta G}{RT}$$

Dimana :

$$\Delta G^\circ = \text{Energi bebas gibbs}$$

$$R = \text{Konstanta gas}$$

$$T = \text{Suhu}$$

$$K = \text{Konstanta kesetimbangan}$$

Energi gibbs standar (ΔG_f° 298 K)

$$\Delta G^\circ \text{ reaksi} = \Delta G^\circ \text{ produk} - \Delta G^\circ \text{ reaktan}$$

$$\Delta G^\circ \text{ reaksi} = (-440,2) + (-237,1)] - [(-475,9) + (-394,4)]$$

$$\Delta G^\circ \text{ reaksi} = (-677,3) - (-870,3)$$

$$\Delta G^\circ \text{ reaksi} = +193,0 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G^\circ \text{ reaksi} = +193.000 \text{ J/mol}$$

$$\ln K = \frac{+193.000}{8,314 \times 298}$$

$$\begin{aligned}\ln K &= \frac{+193.000}{2.478,819} \\ \ln K &= -77,88 \\ K &= e^{-77,88} \\ K &\approx 1,02 \times 10^{-34}\end{aligned}$$

Nilai K yang diperoleh sangat kecil ($K \ll 1$) yang menunjukkan bahwa pada kondisi standar, kesetimbangan sangat jauh di sebelah kiri (reaktan). Produk hampir tidak terbentuk secara spontan.

1.9 Pemilihan Lokasi

Penentuan lokasi pabrik merupakan salah satu aspek penting dalam perancangan pabrik karena sangat memengaruhi kemajuan dan keberlangsungan industri, baik pada masa sekarang maupun di masa yang akan datang. Lokasi pabrik berpengaruh langsung terhadap kelancaran proses produksi, distribusi produk, efisiensi biaya operasional, serta daya saing industri secara keseluruhan. Oleh karena itu, pemilihan lokasi pabrik harus direncanakan secara matang dengan mempertimbangkan berbagai faktor teknis, ekonomis, dan sosial.

Pemilihan lokasi yang tepat akan memberikan keuntungan jangka panjang bagi industri, seperti kemudahan dalam memperoleh bahan baku, akses pasar yang luas, ketersediaan infrastruktur pendukung, serta penerimaan masyarakat sekitar. Sebaliknya, kesalahan dalam menentukan lokasi pabrik dapat menyebabkan meningkatnya biaya produksi dan distribusi yang pada akhirnya dapat menghambat perkembangan industri.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, pabrik Gliserol Karbonat direncanakan berlokasi di **Jalan Meulaboh – Tapaktuan, Desa Suak Puntong, Kecamatan Kuala Pesisir, Kabupaten Nagan Raya, Aceh, Indonesia**. Dasar pertimbangan dalam pemilihan lokasi pabrik ini adalah:

1. Ketersediaan Bahan Baku

Pemilihan lokasi pabrik di Nagan Raya, Aceh, Indonesia didasarkan pada kedekatan dengan sumber bahan baku utama, yaitu CO_2 yang dibeli dari PLTU Nagan raya dan CPO yang di beli dari PT Bumi Tamiang Sentosa. Oleh karena itu, pemilihan lokasi di Kecamatan Kuala Pesisir, Kabupaten

Nagan Raya, Aceh, Indonesia dinilai sangat tepat karena statusnya sebagai kawasan industri dan pelabuhan yang berkembang pesat. Keunggulan geografis ini mempermudah proses pengadaan bahan baku melalui jalur domestik maupun impor, serta memberikan efisiensi tinggi dari segi biaya transportasi dan waktu pengiriman.

2. Letak dari Pasar dan Kondisi Pemasaran

Pemilihan lokasi pabrik di Kecamatan Kuala Pesisir, Kabupaten Nagan Raya, Aceh, Indonesia, juga didasarkan pada kedekatannya dengan pasar domestik maupun internasional. Akses terhadap pelabuhan laut memudahkan distribusi produk ke berbagai wilayah di Indonesia serta ekspor ke pasar global. Selain itu, meningkatnya kebutuhan bahan kimia turunan seperti gliserol karbonat di sektor industri menjadikan kondisi pemasaran produk ini cukup prospektif dan berkelanjutan.

3. Kebutuhan air, tenaga listrik dan bahan bakar

Penyediaan utilitas seperti air, listrik, dan bahan bakar merupakan faktor penting dalam operasional pabrik Gliserol Karbonat. Lokasi pabrik di Kawasan industri/energi, memiliki akses yang cukup terhadap sumber air dan jaringan listrik industri. Ketersediaan utilitas ini mendukung kelancaran proses produksi serta meningkatkan efisiensi operasional pabrik.

4. Tenaga Kerja

Nagan Raya, memiliki ketersediaan tenaga kerja lokal yang cukup, baik tenaga kerja terampil maupun tidak terampil. Hal ini memberikan keuntungan bagi pabrik karena dapat memanfaatkan tenaga kerja setempat sehingga mengurangi biaya operasional, seperti biaya transportasi dan akomodasi. Selain itu, pendirian pabrik juga membuka peluang peningkatan kualitas sumber daya manusia melalui program pelatihan dan pengembangan keterampilan di bidang industri kimia.

5. Fasilitas Transportasi

Sarana transportasi di Nagan Raya sudah tergolong baik dan terus berkembang. Keberadaan pelabuhan laut, jalan raya, serta akses menuju kawasan industri mendukung kelancaran distribusi bahan baku dan produk

jadi. Transportasi laut menjadi keunggulan utama karena mampu menekan biaya pengiriman dalam jumlah besar, sedangkan transportasi darat mendukung distribusi ke wilayah sekitar secara cepat dan efisien.

6. Harga Tanah dan Bangunan

Harga tanah dan bangunan di kawasan industri Nagan Raya relatif lebih terjangkau dibandingkan dengan kawasan industri di kota-kota besar lainnya. Selain itu, lahan yang tersedia masih cukup luas sehingga memungkinkan pendirian pabrik serta pengembangan fasilitas industri di masa mendatang.

7. Kemungkinan Perluasan dan Ekspansi

Lokasi pabrik yang berada di kawasan industri memungkinkan dilakukannya perluasan area pabrik di masa depan. Ketersediaan lahan yang cukup luas menjadi nilai tambah dalam perencanaan jangka panjang pengembangan kapasitas produksi Gliserol Karbonat.

8. Masyarakat di Sekitar Pabrik

Masyarakat di sekitar lokasi pabrik memiliki karakteristik yang mendukung pengembangan industri, terutama dari segi ketersediaan tenaga kerja dan stabilitas sosial. Dengan pendekatan yang baik serta pelaksanaan program tanggung jawab sosial perusahaan (CSR), pendirian pabrik diharapkan dapat memberikan dampak positif terhadap peningkatan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat sekitar.

9. Perizinan

Proses perizinan pembangunan pabrik di Kabupaten Nagan Raya dilakukan melalui sistem *Online Single Submission* berbasis risiko, yang mencakup penerbitan Nomor Induk Berusaha, kesesuaian tata ruang, persetujuan lingkungan (AMDAL), serta izin konstruksi dan operasional. Meskipun wilayah ini tidak berstatus Kawasan Ekonomi Khusus, kemudahan sistem OSS serta dukungan sumber daya dan infrastruktur menjadikan proses perizinan relatif feasible untuk pengembangan industri.

Berdasarkan pertimbangan faktor primer dan sekunder tersebut, maka Jalan Meulaboh – Tapaktuan, Desa Suak Puntong, Kecamatan Kuala Pesisir, Kabupaten

Nagan Raya, Aceh, Indonesia dipilih sebagai lokasi pendirian pabrik Gliserol Karbonat. Lokasi ini dinilai strategis, ekonomis, serta mendukung keberlanjutan operasional pabrik dalam jangka panjang.



Gambar 1.11 Denah Lokasi Pabrik