

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia sebagai negara berkembang terus berupaya meningkatkan daya saing ekonominya di tengah dinamika perdagangan global yang semakin kompetitif. Menurut Badan Pusat Statistik (BPS), pertumbuhan ekonomi Indonesia pada tahun 2024 mencapai 5,03% secara tahunan, mencerminkan pemulihan ekonomi yang berkelanjutan pasca pandemi COVID-19. Salah satu sektor strategis yang mendorong pertumbuhan ekonomi tersebut adalah sektor industri pengolahan, termasuk di dalamnya industri kimia dasar yang berperan penting sebagai penopang utama berbagai sektor hilir.

Industri kimia diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu industri hulu dan industri hilir. Industri hulu bertanggung jawab mengolah bahan mentah menjadi bahan setengah jadi atau intermediate, yang kemudian digunakan oleh industri hilir untuk menghasilkan produk akhir siap pakai. Salah satu produk penting dari industri kimia hulu adalah monopropilen glikol (MPG).

Monopropilen glikol merupakan senyawa kimia turunan propilena yang banyak digunakan di berbagai industri. Di sektor industri manufaktur, MPG digunakan sebagai pelarut dalam pembuatan cat, tinta, pelapis, resin, dan *antifreeze*. Di sektor farmasi dan kosmetik, MPG berperan sebagai pelarut, humektan, dan agen pengemulsi. Sedangkan dalam sektor pangan, senyawa ini juga diaplikasikan dalam industri makanan sebagai zat tambahan yang telah diakui keamanannya oleh lembaga seperti FDA (Setyani, 2010). Perannya yang luas menjadikan MPG sebagai bahan kimia strategis dengan permintaan yang tinggi, baik di dalam negeri maupun pasar global.

1.2 Kapasitas Rancangan

Pembangunan pabrik monopropilen glikol direncanakan dimulai pada tahun 2025 dan ditargetkan dapat beroperasi penuh pada tahun 2030. Penentuan kapasitas produksi pabrik ini mempertimbangkan tiga aspek utama, yaitu:

- a. Proyeksi kebutuhan monopropilen glikol di pasar domestik
- b. Ketersediaan bahan baku yang berkelanjutan
- c. Teknologi proses yang digunakan dalam produksi

1.2.1 Kebutuhan Monopropilen Glikol di Indonesia

Kebutuhan monopropilen glikol di Indonesia terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Saat ini, kebutuhan dalam negeri untuk monopropilen glikol masih dipenuhi melalui impor dari berbagai negara, termasuk Kanada, Korea, Tiongkok, India, Italia, Jepang, dan negara-negara lainnya (Badan Statistik, 2024). Hal ini terjadi karena Indonesia belum memiliki pabrik monopropilen glikol yang mampu memenuhi kebutuhan domestik.

1.2.2 Aspek Bahan Baku

Propilen glikol diproduksi menggunakan propilen oksida dan air sebagai bahan baku utama. Namun, Indonesia belum memiliki fasilitas produksi propilen oksida, sehingga bahan baku tersebut masih perlu diimpor. Tabel 1.1 berikut ini menampilkan daftar pabrik propilen oksida dari berbagai negara.

Tabel 1. 1 Daftar Pabrik Penghasil Propilen Oksida di Berbagai Negara (Setiawan, 2022)

Pabrik	Lokasi	Kapasitas
BASF	Ludwigshafen, Germany	125.000
BASF/DOW	Antwerp, Belgium	300.000
Dow chem	Thailand	390.000
Dow Chemical	Stade, Germany	590.000
Sumitomo	Jepang	380.000
Lyondell Bayer	Maasvlakte, the Netherlands	305.000
Lyondell Basell	Botlek, the Netherlands	250.000
Nizhnekamskneftekhim	Nizhnekamsk, Russia	50.000
PCC Rokita	Brzeg Dolny, Poland	25.000
Repsol YPF	Puertollano, Spain	70.000
SKC Chemicals	Ulsan, South Korea	170.000

1.2.3 Perkiraan Kebutuhan Monopropilen Glikol

Kebutuhan monopropilen glikol di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring waktu. Pemenuhan kebutuhan dalam negeri untuk monopropilen glikol masih dipenuhi melalui impor dari berbagai negara, seperti Kanada, Korea, China, India, Italia, Jepang, dan sejumlah negara lainnya (Badan Statistik, 2024). Hal ini terjadi karena

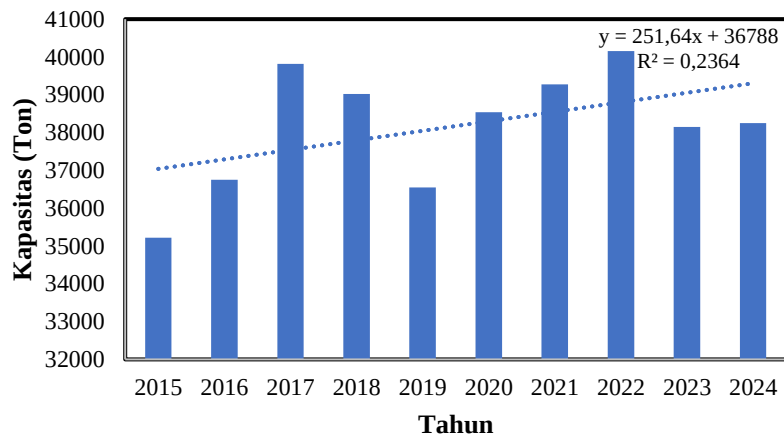
Indonesia belum memiliki pabrik monopropilen glikol yang mampu memenuhi kebutuhan domestik.

Menurut data dari Badan Pusat Statistik Indonesia, menunjukkan bahwa kebutuhan monopropilen glikol terus bertambah. Tabel berikut menampilkan jumlah impor dan ekspor monopropilen glikol di Indonesia dari tahun 2015 hingga 2024.

Tabel 1. 2 Data *Impor dan Ekspor* Monopropilen Glikol di Indonesia lainnya (Badan Statistik, 2024)

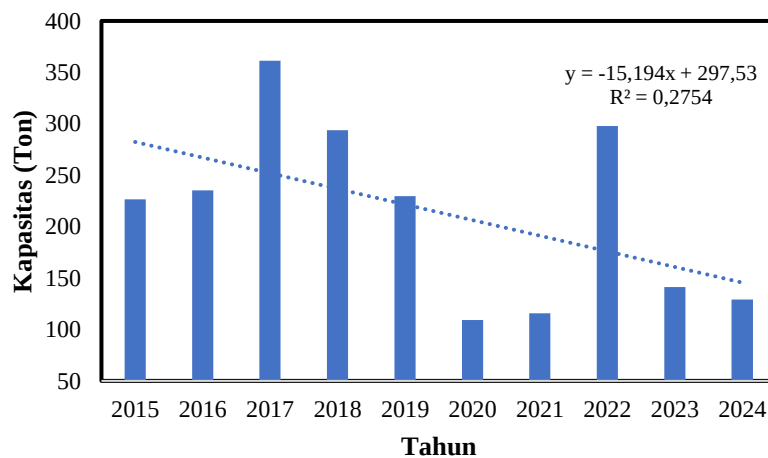
Tahun	Impor (Ton)	Ekspor (Ton)
2015	35.217,807	226,561
2016	36.748,374	235,191
2017	39.816,224	361,485
2018	39.023,767	293,743
2019	36.547,542	229,543
2020	38.536,024	109,187
2021	39.273,933	115,608
2022	40.151,939	297,915
2023	38.150,862	141,152
2024	38.249,460	129,209

Berdasarkan pada Tabel 1.2, diperoleh grafik yang menunjukkan tren peningkatan kebutuhan monopropilen glikol di Indonesia setiap tahun. Kenaikan ini mengikuti persamaan garis lurus $y = 251,64x + 36788$, di mana y merepresentasikan kebutuhan monopropilen glikol pada tahun tertentu, sedangkan x adalah tahun yang dihitung mulai dari 2015 hingga 2024.



Gambar 1. 1 Data Impor Monopropilen Glikol di Indonesia

Dapat dilihat dari Gambar 1.1, menunjukkan bahwa setiap tahun Indonesia mengimpor monopropilen glikol dalam jumlah besar untuk memenuhi kebutuhan pasar domestik. Tingginya volume impor ini disebabkan belum adanya pabrik dalam negeri yang dapat memproduksi monopropilen glikol sesuai kebutuhan.



Gambar 1. 2 Data Ekspor Monopropilen Glikol di Indonesia

Gambar 1.2 memperlihatkan bahwa volume ekspor monopropilen glikol dari Indonesia tergolong rendah. Hal ini terjadi karena Indonesia belum memiliki pabrik monopropilen glikol sendiri, sehingga sebagian besar kebutuhan dalam negeri masih harus dipenuhi melalui impor dari luar negeri. Dari hasil analisis data, diperoleh persamaan $y = -15,194x + 297,53$ dengan nilai koefisien korelasi R sebesar 0,2754.

Tabel 1. 3 Data Import Ekspor Monopropilen Glikol di Indonesia dan Pertumbuhannya

Tahun	Jumlah		% Prediksi	
	Impor (Ton)	Ekspor(Ton)	Impor	Ekspor
2015	35.217,807	226,561	0	0
2016	36.748,374	235,191	4,35%	3,81%
2017	39.816,224	361,485	8,35%	53,70%
2018	39.023,767	293,743	-1,99%	-18,74%
2019	36.547,542	229,543	-6,35%	-21,86%
2020	38.536,024	109,187	5,44%	-52,43%
2021	39.273,933	115,608	1,91%	5,88%
2022	40.151,939	297,915	2,24%	157,69%
2023	38.150,862	141,152	-4,98%	-52,62%
2024	38.249,46	129,209	0,26%	-8,46%
Total (%P)			9,22%	66,97%
i			1,02%	7,44%

Menggunakan perhitungan metode *discounted*, data impor dan ekspor dianalisis untuk mengetahui pertumbuhan rata-rata monopropilen glikol setiap tahun. Hasilnya menunjukkan bahwa kebutuhan impor tumbuh sebesar 9,22%, sedangkan ekspor meningkat hingga 66,97%. Rata-rata pertumbuhan impor per tahun mencapai 1,02%, sementara ekspor tumbuh rata-rata 7,44%. Berdasarkan data ini, perkiraan volume impor dan ekspor monopropilen glikol di Indonesia pada tahun 2030 dapat dihitung sebagai berikut:

$$M = P (1 + i)^n$$

Dimana:

M = Jumlah produk akhir tahun

P = Jumlah produk pada tahun 2024

i = Pertumbuhan rata-rata impor pertahun

n = Selisih tahun yang diperhitungkan (6 tahun)

Maka impor tahun 2030:

$$\begin{aligned} M5 &= 38.249,46(1 + 1,02)^6 \\ &= 35.956,70 \text{ Ton/tahun} \end{aligned}$$

Maka ekspor tahun 2030:

$$\begin{aligned} M4 &= 38.249,46(1+7,44)^6 \\ &= 81,24 \text{ Ton/tahun} \end{aligned}$$

Setelah memperoleh nilai M4 dan M5, langkah berikutnya adalah menghitung kapasitas pabrik yang akan didirikan. Perhitungan kapasitas pabrik monopropilen glikol sebagai berikut:

$$\begin{aligned} M1 + M2 + M3 &= M4 + M5 \\ M3 &= (M4 + M5) - (M1 + M2) \end{aligned}$$

Dimana:

- M1 = Impor
- M2 = Kapasitas pabrik lama
- M3 = Kapasitas pabrik baru
- M4 = Ekspor
- M5 = Konsumsi dalam negeri

Maka didapat nilai M3 pada tahun 2030:

$$\begin{aligned} M3 &= 81,24 + 35.956,70 \\ &= 36.037,04 \text{ Ton/tahun} \end{aligned}$$

Dikarenakan pabrik yang akan didirikan belum pernah ada didalam negeri, maka peluang kapasitas dikali 1,5%

$$\begin{aligned} \text{Kapasitas Produksi} &= 1,5 \times \text{Peluang Kapasitas} \\ &= 1,5 \times 36.037,04 \text{ Ton/tahun} \\ &= 54.056,92 \text{ Ton/tahun} \rightarrow 55.000 \text{ Ton/tahun} \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas, prediksi impor pada tahun 2030 sebesar 36.037,04 Ton/tahun, prediksi ekspor sebesar 81,24 Ton/tahun dan kebutuhan monopropilen glikol di Indonesia pada tahun 2030 sebesar 55.000 Ton/tahun untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri dengan kelebihan produksinya diperuntukan untuk ekspor. Proyeksi kebutuhan monopropilen glikol di Indonesia sebagai berikut:

Tabel 1. 4 Proyeksi Kebutuhan Monopropilen Glikol di Indonesia

Tahun	Kebutuhan	Kebutuhan (Ton/tahun)	Pemenuhan Kebutuhan (%)
2030	36.037,04	55.000	66%
2031	41.293,09	55.000	75%
2032	41.730,02	55.000	76%
2033	42.172,45	55.000	77%
2034	42.620,51	55.000	77%
2035	43.074,34	55.000	78%
2036	43.534,09	55.000	79%
2037	43.999,90	55.000	80%
2038	44.471,95	55.000	81%
2039	44.950,41	55.000	82%

Berdasarkan data dari Tabel 1.4, diatas menunjukkan bahwa pada tahun 2030 – 2039 kebutuhan monopropilen glikol di Indonesia terus meningkat. Maka diharapkan pada tahun 2030 pabrik monopropilen glikol sudah mulai beroperasi dengan kapasitas 55.000 ton/tahun.

1.3 Penentuan Lokasi Pabrik

1.3.1 Faktor Penentuan Lokasi

Menurut Wijana (2018), terdapat beberapa aspek yang harus dipertimbangkan dalam pemilihan lokasi pendirian pabrik. Secara umum, aspek-aspek tersebut diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama, yaitu faktor primer dan faktor sekunder. Faktor-faktor penentuan lokasi pabrik secara primer dan sekunder sebagai berikut:

a. Faktor Primer

- **Lokasi Pasar**

Penentuan lokasi pabrik perlu dipertimbangkan berdasarkan kedekatannya dengan pasar atau konsumen akhir. Mengingat monopropilen glikol adalah zat cair yang mudah terbakar, distribusinya membutuhkan biaya tambahan untuk menjaga kualitas produk selama proses pengiriman.

- Sumber Bahan Baku

Penentuan lokasi sumber bahan baku menjadi salah satu pertimbangan penting dalam penentuan lokasi pabrik, baik dekat maupun jauh dari fasilitas produksi. Karena propilen oksida memiliki sifat yang sangat reaktif dan mudah menguap, idealnya pabrik monopropilen glikol dibangun di area yang dekat dengan konsumen untuk mengurangi risiko kerusakan produk saat distribusi.

- Fasilitas Transportasi

Ketersediaan dan efisiensi transportasi menjadi faktor penting dalam pemilihan lokasi pabrik. Jika pabrik berada jauh dari sumber bahan baku, maka perlu mempertimbangkan biaya pengiriman, ketersediaan bahan baku, dan jarak tempuh ke pasar konsumen.

b. Faktor Sekunder

- Fasilitas Utilitas

Pabrik memerlukan akses yang memadai terhadap fasilitas pendukung seperti listrik, air, dan jaringan telekomunikasi untuk memastikan kelancaran proses produksi. Karena produksi monopropilen glikol membutuhkan pasokan air dalam jumlah besar, lokasi pabrik sebaiknya berada dekat dengan sumber air, seperti sungai, laut, atau waduk. Selain itu, sumber air ini juga dapat dimanfaatkan untuk mendukung pasokan listrik melalui penggunaan generator.

- Ketersediaan Tenaga Kerja

Pabrik membutuhkan tenaga kerja yang terampil dan sesuai dengan bidang keahliannya. Sumber daya manusia ini bisa direkrut dari masyarakat sekitar atau dari wilayah lain, tergantung pada kebutuhan operasional. Kehadiran pabrik diharapkan tidak hanya mendukung kegiatan produksi tetapi juga membantu mengurangi tingkat pengangguran di Indonesia.

- Regulasi Pemerintah

Kebijakan pemerintah memiliki peran penting dalam pengembangan industri, termasuk penetapan kawasan industri sebagai lokasi pabrik. Pemerintah dapat memberikan kemudahan dalam bentuk perizinan dan insentif pajak, yang berpotensi menarik minat investor, baik domestik maupun asing.

- Infrastruktur Pendukung

Lokasi pabrik perlu dilengkapi dengan infrastruktur yang memadai, seperti

lahan yang cukup, sistem pengelolaan limbah yang efisien, serta fasilitas kesehatan dan keselamatan kerja. Hal ini penting untuk memastikan kelancaran operasional serta menjaga keberlanjutan produksi.

1.3.2 Metode Pemilihan Pabrik

a. Metode *Factor Rating*

- Mengidentifikasi dan menyusun faktor-faktor penting yang mempengaruhi pemilihan lokasi pabrik.
- Memberikan bobot pada setiap faktor sesuai tingkat kepentingannya dalam mendukung operasional pabrik, dengan total bobot mencapai 100%.
- Membandingkan lokasi alternatif dengan lokasi utama berdasarkan nilai bobot dari masing-masing faktor.
- Lokasi dengan nilai total tertinggi dianggap sebagai pilihan terbaik untuk pendirian pabrik.

b. Metode Analisis Ekonomi

Dalam penentuan lokasi, metode ini digunakan untuk mengevaluasi lokasi pabrik dengan membandingkan berbagai komponen biaya, seperti biaya tenaga kerja, harga lahan, dan biaya transportasi. Tujuan utamanya adalah memilih lokasi yang paling ekonomis untuk pendirian pabrik.

c. Metode Pusat Grafiti (*Centroid Method*)

Metode ini menggunakan analisis geografis untuk menentukan lokasi pabrik dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- Menentukan target pasar yang ingin dicapai dan tentukan jumlah permintaan dari setiap pasar.
- Menentukan lokasi geografis dari masing-masing pasar dengan koordinat yang sesuai.
- Memasukkan data kebutuhan dan koordinat pasar yang dituju ke dalam rumus sebagai berikut:

$$X = \frac{\sum \frac{X_i \cdot V_i}{V_i}}{\sum \frac{V_i}{V_i}}$$
$$Y = \frac{\sum \frac{Y_i \cdot V_i}{V_i}}{\sum \frac{V_i}{V_i}}$$

Dimana:

V_i : Kebutuhan Produk pada suatu Lokasi

X_i : Koordinat Lokasi pada Sumbu X

Y_i : Koordinat Lokasi pada Sumbu Y

d. Metode Analisa Transportasi

Metode analisis transportasi digunakan untuk merancang pola distribusi yang efisien dari lokasi pabrik ke pasar tujuan. Metode ini mempertimbangkan biaya pengiriman yang terkait dengan lokasi pasar. Meskipun metode ini relatif sederhana dan mudah diimplementasikan, tingkat keakuratannya terbatas karena hasilnya tidak selalu mencerminkan kondisi sebenarnya di lapangan.

1.3.3 Penentuan Lokasi Pendirian Pabrik Monopropilen Glikol

Pada penentuan lokasi pabrik monopropilen glikol, digunakan metode factor rating untuk menentukan lokasi pabrik yang sesuai dengan kebutuhan pabrik saat mulai beroperasi. Berikut hasil analisis pemilihan lokasi dapat dilihat pada Tabel 1.5.

Tabel 1. 5 Hasil Analisis Pemilihan Lokasi

Faktor	Bobot	Lokasi KIEC		Lokasi JIPE		Lokasi SSP	
		(Cilegon)		(Gresik)		(Subang)	
		Nilai	B x N	Nilai	B x N	Nilai	B x N
Bahan Baku	30	5	150	4	120	3	90
Lokasi Pasar	20	5	100	4	80	4	80
Tenaga Kerja	15	4	60	4	60	5	75
Transportasi	15	4	60	5	75	4	60
Perluasan	10	4	40	4	40	4	40
Limbah	10	4	40	3	30	4	40
Jumlah	100		450		405		385

Berdasarkan parameter penentuan lokasi pendirian pabrik di atas, lokasi utama pabrik akan dibangun di Krakatau Industrial Estate Cilegon (KIEC). Sebagai alternatif pertama pabrik dapat didirikan di Java Integrated Industrial and Port Estate (JIPE), sedangkan alternatif kedua berada di Subang Smartpolitan (SSP).

1.4 Tinjauan Proses

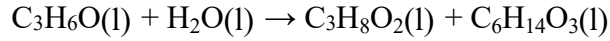
1.4.1 Macam-Macam Proses

Menurut Setyani (2010), terdapat lima metode yang dapat digunakan dalam proses pembuatan monopropilen glikol, yaitu:

a. Hidrasi Propilen Oksida tanpa katalis

Proses ini dimulai dengan mencampurkan propilen oksida dengan air dan disimpan dalam *feed tank* sebelum dipompa ke reaktor.

Reaksi:

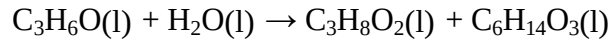


Reaksi berlangsung dalam fase cair pada suhu antara 120 hingga 190°C dan tekanan sebesar 2170 kPa, dengan menggunakan etanol sebagai pelarut untuk membantu proses reaksi. Produk utama yang dihasilkan dari reaksi ini adalah monopropilen glikol, disertai sedikit produk samping berupa dipropilen glikol serta air dari reaksi. Setelah reaksi selesai, air sisa dipisahkan menggunakan separator, sedangkan campuran yang mengandung monopropilen glikol dimurnikan melalui proses distilasi.

b. Hidrasi Propilen Oksida dengan Katalis Asam

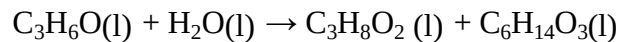
Pada metode ini, propilen oksida dicampurkan dengan air dan katalis asam seperti asam sulfat (H_2SO_4) atau asam asetat ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$). Campuran ini disimpan dalam tangki umpan dan dipompa ke dalam reaktor..

Reaksi:



Reaksi berlangsung dalam fase cair dengan rasio molar propilen oksida dan air sebesar 1:20. Suhu dijaga di bawah 52°C untuk mencegah penguapan propilen oksida (titik didihnya 34,23°C), sedangkan tekanan dijaga sebesar 1 atm untuk mempertahankan propilen oksida dalam fase cair. Proses ini lebih efektif dalam kondisi asam (pH rendah), yang mempercepat reaksi.

Reaksi:

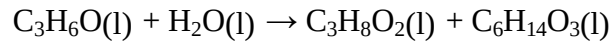


Produk utama dari reaksi ini adalah monopropilen glikol, dengan sedikit dipropilen glikol dan air sisa. Setelah reaksi selesai, air sisa dipisahkan menggunakan separator, dan campuran produk dimurnikan melalui distilasi. Sebelum proses distilasi, katalis asam harus dihilangkan untuk mencegah korosi pada peralatan distilasi.

c. Hidrasi Propilen Oksida dengan Katalis Basa

Proses hidrasi propilen oksida dengan katalis basa dilakukan dengan mencampurkan propilen oksida dan air, ditambah dengan katalis basa yang dilarutkan dalam air. Campuran ini disimpan dalam tangki umpan dan kemudian dialirkan ke reaktor.

Reaksi:



Reaksi berlangsung dalam fase cair dengan rasio molar propilen oksida dan air sebesar 20:1, suhu reaksi dijaga pada 70°C, dan tekanan 1 atm digunakan untuk mempertahankan propilen oksida dalam fase cair. Proses ini lebih efektif dalam kondisi basa dengan pH di atas 12, yang meningkatkan laju reaksi dengan tingkat konversi sekitar 70%.

Produk utama yang dihasilkan adalah monopropilen glikol, dengan sedikit dipropilen glikol dan air sisa reaksi. Setelah reaksi selesai, air sisa dipisahkan menggunakan separator, dan campuran produk dimurnikan melalui distilasi. Sebelum distilasi, katalis basa harus dihilangkan untuk mencegah kerusakan peralatan.

Meskipun, metode ini tidak umum digunakan dalam industri karena beberapa kendala, antara lain:

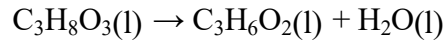
- Penggunaan basa kuat membutuhkan pengolahan yang kompleks
- Penghilangan katalis basa sebelum distilasi
- Menghasilkan glikol dengan konsentrasi tinggi
- Membentuk isomer diglikol yang tidak diinginkan

Oleh karena itu, meskipun baik katalis asam maupun basa dapat mempercepat reaksi dan meningkatkan selektivitas produk, metode hidrasi propilen oksida dengan katalis asam lebih banyak digunakan dalam industri karena lebih efisien dan membutuhkan lebih sedikit air.

d. Hidrogenolisis Gliserol

Proses ini melibatkan reaksi antara gliserol dan hidrogen menggunakan katalis heterogen yang terdiri dari campuran logam seperti tembaga (Cu), kromium (Cr), seng (Zn), dan zirkonium (Zr) dengan rasio 3:2:1:x, di mana nilai $x = 1-4$. Reaksi ini menghasilkan monopropilen glikol dengan tingkat selektivitas hingga 90% dan kemurnian 93%.

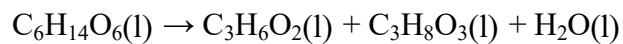
Reaksi:



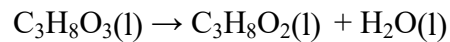
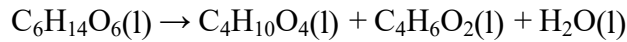
e. *Hydrocracking* Sorbitol

Proses *hydrocracking* Sorbitol yang dilakukan pada suhu 150–250°C dan tekanan 500–5000 psi dengan bantuan hidrogen dan katalis. Katalis yang digunakan merupakan kombinasi logam mulia dari golongan VIII, oksida logam, serta logam alkali tanah. Proses ini dapat dilakukan dalam sistem batch maupun kontinu, dengan waktu reaksi antara 0,5 hingga 10 jam.

Reaksi utama:



Reaksi samping:



Berdasarkan penjelasan tersebut, didapatkan perbandingan antara proses satu dengan pada Tabel 1.6 dibawah ini:

Tabel 1. 6 Perbandingan Proses Pembentukan Monopropilen Glikol

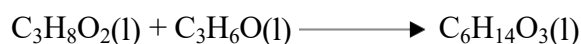
Kondisi Operasi	Hidrasi Propilen Oksida tanpa Katalis	Hidrasi Propilen Oksida Katalis Asam	Hidrasi Propilen Oksida Katalis Basa	Hidrogenolisis Gliserol	<i>Hydrocracking</i> Sorbitol
Fase reaksi	Cair-cair	Cair-cair	Cair-cair	Cair-cair	Cair-cair
Suhu (°C)	120 – 190	50 – 150	70	>90	57,6
Tekanan (atm)	21,42	1 – 13,61	1	54,44	217,75
Katalis	-	Asam (H ₂ SO ₄ , C ₂ H ₄ O ₂)	Basa (NaHCO ₃ , Mo)	Campuran Cu, Cr, Zn dan Zr	Logam mulia VIII dan oksida logam alkali
Reaktor	Agitated	CSTR	CSTR	Fixed bed	Fixed bed
Konversi (%)	90	92	70	> 90	57,6
Waktu reaksi (jam)	> 2	0,5	1 – 2	0,75 – 1,5	> 2

Kondisi Operasi	Hidrasi Propilen Oksida tanpa Katalis	Hidrasi Propilen Oksida Katalis Asam	Hidrasi Propilen Oksida Katalis Basa	Hidrogenolisis Gliserol	Hydrocracking Sorbitol
Kekurangan	- Butuh banyak air - T dan P tinggi - Reaksi lambat	- Katalis asam perlu dihilangkan - Suhu harus dijaga	- Katalis basa perlu dihilangkan - Konversi produk rendah.	- Katalis yang digunakan mahal. - T dan P tinggi - Biaya produksi mahal.	- Katalis yang digunakan mahal. - T dan P tinggi - Biaya produksi mahal. - Konversi rendah. - Waktu reaksi lama.
Kelebihan	- Limbah yang dihasilkan sedikit. - Biaya produksi rendah.	- Reaksi berlangsung cepat. - T dan P rendah. - Konversi tinggi.	- Reaksi berlangsung cepat. - T dan P rendah.	- Bahan baku (gliserol) mudah diperoleh. - Waktu reaksi berjalan cepat.	- Bahan baku (sorbitol) murah.

Dari perbandingan pada Tabel 1.6, masing-masing metode produksi propilen glikol memiliki kelebihan dan kekurangannya. Diantara berbagai alternatif, proses hidrasi propilen oksida dengan katalis asam dianggap paling efisien. Berjalan pada kondisi operasi yang relatif ringan, yakni pada suhu 50–150°C dan tekanan 1–13,61 atm, serta memberikan konversi tinggi hingga mencapai 92%.

1.4.2 Tinjauan Proses Monopropilen Glikol

Pada proses produksi propilen glikol dari propilen oksida, reaksi hidrasi berlangsung dalam fase cair dengan reaksi utama sebagai berikut:



Reaksi utama antara propilen oksida dan air menghasilkan monopropilen glikol. Namun, terdapat reaksi samping di mana satu mol propilen oksida bereaksi dengan satu mol monopropilen glikol menghasilkan dipropilen glikol. Reaksi samping ini dapat

diminimalkan dengan menjaga rasio propilen oksida terhadap air sebesar 1:20. Proses ini menghasilkan konversi sebesar 92%, dengan komposisi produk akhir berupa 90% monopropilen glikol dan 10% dipropilen glikol (Kirk & Othmer, 1993).

Reaksi berlangsung pada suhu 52°C dan tekanan 3 atm, untuk mengoptimalkan produksi monopropilen glikol serta menjaga propilen oksida tetap dalam fase cair (Setyani, 2010).

Monopropilen glikol merupakan senyawa kimia yang memiliki beragam aplikasi dalam industri. Senyawa ini dimanfaatkan sebagai agen pelunak, pelumas, serta pelarut bagi zat pewarna makanan dan bahan pewangi. Selain itu, monopropilen glikol juga digunakan sebagai humektan pada industri tembakau, inhibitor dalam proses fermentasi pangan, pelembap pada industri farmasi, serta sebagai pelarut dalam industri cat dan pelapis. (Kirk & Othmer, 1993).

1.4.3 Sifat Fisika dan Kimia

1.4.3.1 Sifat Fisika dan Kimia Bahan Baku

a. Propilen Oksida

Rumus molekul : C_3H_6O

- **Sifat Fisika**

Menurut ChemWhat (2023), sifat fisika propilen oksida sebagai berikut:

- Berat Molekul : 58.08
- Titik Leleh (1 atm) : -111,78°C
- Titik didih (1 atm) : 34,05°C
- Densitas (25°C) : 0,823 g/mL
- Viskositas (25°C) : 0,302 cP
- Vapor pressure (34,5°C) : 760 mmHg

- **Sifat Kimia**

Menurut Kirk & Othmer (1993), sifat kimia propilen oksida sebagai berikut:

- Propilen oksida bereaksi dengan air menghasilkan propilen glikol



- Propilen oksida bereaksi dengan propilen glikol menghasilkan dipropilen glikol



b. Air

Rumus molekul : H_2O

• **Sifat Fisika**

Menurut Jaka (2015), sifat fisika air sebagai berikut:

- Berat molekul : 18,015
- Titik Leleh (1 atm) : 0°C
- Titik didih (1 atm) : 100°C
- Densitas (25°C) : 1,027 g/mL
- Viskositas (25°C) : 0,302 cP
- Vapor pressure ($34,5^\circ\text{C}$) : 760 mmHg

• **Sifat Kimia**

Menurut Jaka (2015), sifat kimia air sebagai berikut:

- Rumus molekul air adalah H_2O
- Air bereaksi dengan karbon menghasilkan karbon monoksida dan hydrogen
$$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$$
- Air bereaksi dengan natrium menghasilkan natrium hidroksida dan hydrogen
$$\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH} + \text{H}_2$$
- Air bereaksi dengan asam klorida menghasilkan hydronium dan klorin
$$\text{HCl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{Cl}^-$$

1.4.3.2 Sifat Fisika dan Kimia Bahan Pendukung

a. Metil Format

Rumus molekul : HCOOCH_3

• **Sifat Fisika**

Menurut Yaws (1999), sifat fisika metil format sebagai berikut:

- Berat Molekul : 60,053
- Titik Leleh (1 atm) : $-98,85^\circ\text{C}$
- Titik didih (1 atm) : $31,9^\circ\text{C}$
- Densitas (25°C) : 0,967 g/mL
- Viskositas (25°C) : 0,33 cP
- Vapor pressure ($34,5^\circ\text{C}$) : 760 mmHg

- **Sifat Kimia**

Menurut Yaws (1999), sifat kimia metil format sebagai berikut:

- Larut dalam air, aseton, dan ester
- Termasuk asam lemah
- Metil format bereaksi dengan ammonia menghasilkan ammonium format
$$\text{HCOOCH}_3 + 2\text{NH}_3 \rightarrow \text{HCOONH}_4 + \text{CH}_3\text{NH}_2$$

b. Metanol

Rumus molekul : CH_3OH

- **Sifat Fisika**

Menurut Yaws (1999), sifat fisika metanol sebagai berikut:

- Berat Molekul : 32,042
- Titik Leleh (1 atm) : $-97,53^\circ\text{C}$
- Titik didih (1 atm) : $64,85^\circ\text{C}$
- Densitas (25°C) : 0,787 g/mL
- Viskositas (25°C) : 0,539 cP
- Vapor pressure ($34,5^\circ\text{C}$) : 760 mmHg

- **Sifat Kimia**

Menurut Yaws (1999), sifat kimia metanol sebagai berikut:

- Metanol bereaksi dengan asam asetat menghasilkan metil asetat dan air
$$\text{CH}_3\text{OH} + \text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$$
- Metanol bereaksi dengan asam sulfat menghasilkan metil sulfat dan air
$$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CH}_3\text{SO}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$$
- Metanol bereaksi dengan anilin menghasilkan dimetil anilin dan air
$$2\text{CH}_3\text{OH} + \text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_5\text{N}(\text{CH}_3)_2 + 2\text{H}_2\text{O}$$

1.4.3.3 Sifat Fisika dan Kimia Produk

a. Monopropilen Glikol

Rumus molekul : $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$

- **Sifat Fisika**

Menurut Kirk & Othmer (1993), sifat fisika monopropilen glikol sebagai berikut:

- Berat molekul : 76,095 kg/kmol
- Titik Leleh (1 atm) : $-59,85^\circ\text{C}$
- Titik didih (1 atm) : $187,75^\circ\text{C}$

- Densitas (25°C) : 1,033 g/mL
- Viskositas (25°C) : 47,962 cP
- Vapor pressure (34,5°C) : 760 mmHg

- **Sifat Kimia**

Menurut Kirk & Othmer (1993), sifat kimia monopropilen glikol sebagai berikut:

- Dipropilen glikol dapat terbentuk melalui reaksi antara monopropilen glikol dan propilen oksida.



- Monopropilen glikol berfungsi sebagai inisiator dalam katalis basa untuk membentuk senyawa mono (primer dan sekunder) dan dieter (polieter poliol)
- Kondensasi antara monopropilen glikol dan aldehid menghasilkan siklik asetonol atau 4 metil 1,3 dioksolan.

b. Dipropilen Glikol

- **Sifat Fisika**

Menurut Kirk & Othmer (1993), sifat fisika dipropilen glikol sebagai berikut:

- Berat molekul : 134,175 kg/kmol
- Titik Leleh (1 atm) : -40°C
- Titik didih (1 atm) : 231,95°C
- Densitas (25°C) : 1,018 g/mL
- Viskositas (25°C) : 65,896 cP
- Vapor pressure (34,5°C) : 760 mmHg

- **Sifat Kimia**

Menurut Kirk & Othmer (1993), sifat kimia dipropilen glikol sebagai berikut:

- Dipropilen glikol mudah bereaksi dengan asam dan oksidator, namun tidak bereaksi terhadap senyawa basa.

BAB II

DESKRIPSI PROSES

2.1 Spesifikasi Bahan Baku dan Produk

2.1.1 Spesifikasi Bahan Baku

2.1.1.1 Propilen Oksida

Menurut data Perry et al., 1999, spesifikasi bahan baku propilen oksida sebagai berikut:

Fase dan warna	: Cair tidak berwarna
Titik didih (1atm)	: 34,05°C
Kemurnian	: 99,9%
Impuritas	: 0,1% Air

2.1.1.2 Air

Menurut data dari Bratachem, 2016, adapun spesifikasi air sebagai berikut:

Fase	: Cair tidak berwarna
Titik didih (1atm)	: 100°C
Titik lebur (1atm)	: 0°C
Kemurnian	: 100°C

2.1.2 Spesifikasi Bahan Pendukung

2.1.2.1 Metanol

Ditinjau data dari Dongying City Longxing Chemical, 2018, spesifikasi metanol yang akan digunakan sebagai berikut:

Fase	: Cair
Titik didih (1atm)	: 64,85°C
Kemurnian	: 99,9%
Impuritas	: 0,1% Air

2.1.2.2 Metil Format

Ditinjau data dari Shandong Bairong New Material Technology, 2021, spesifikasi metil format sebagai berikut:

Fase	: Cair
Titik didih (1atm)	: 31,9°C
Kemurnian	: 98%

Impuritas : 2% Air

2.1.3 Spesifikasi Produk

2.1.3.1 Monopropilen Glikol

Menurut data dari Kirk & Othmer, 1993, spesifikasi monopropilen glikol sebagai berikut:

Fase : Cair
Titik didih (1atm) : 187,75°C
Kemurnian : 99,5%
Impuritas : 0,5% Air

2.1.3.2 Dipropilen Glikol

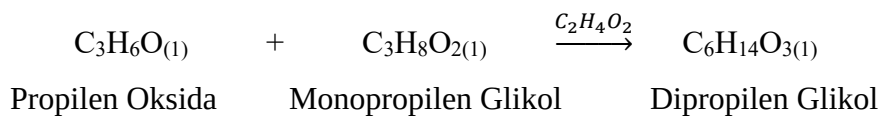
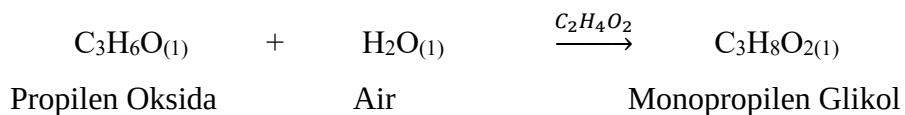
Menurut data dari Kirk & Othmer, 1993, spesifikasi dipropilen glikol sebagai berikut:

Fase : Cair
Titik didih (1atm) : 231,95°C
Kemurnian : 98,75%
Impuritas : 1,25% Monopropilen Glikol

2.2 Konsep Proses

2.2.1 Dasar Reaksi

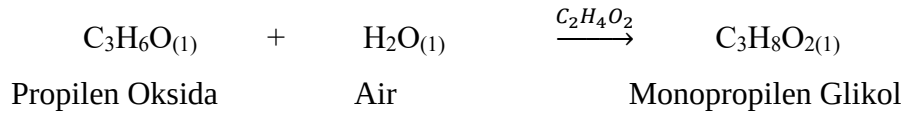
Reaksi kimia dalam proses pembentukan monopropilen glikol dituliskan sebagai berikut:



Proses produksi monopropilen glikol dilakukan dengan mereaksikan propilen oksida dengan air. Reaksi ini menghasilkan monopropilen glikol sebagai produk utama dan sedikit dipropilen glikol sebagai produk samping.

2.2.2 Mekanisme Reaksi

Menurut Kirk & Othmer, 1993, mekanisme reaksi pada pembentukan monopropilen glikol melibatkan reaksi hidrasi antara propilen oksida dan air adalah sebagai berikut:



Monopropilen oksida diketahui sangat reaktif terhadap senyawa yang memiliki ion hidrogen mudah lepas, seperti air, amonia, dan asam organik. Dalam reaksi hidrasi ini, molekul air bereaksi dengan propilen oksida, menyebabkan pemutusan ikatan H dalam H_2O , yang kemudian menghasilkan monopropilen glikol. Reaksi tersebut berlangsung dalam fase cair, bersifat *irreversibel*, dan melepaskan panas (reaksi eksotermis).

2.2.3 Fase Reaksi

Reaksi berlangsung dalam fase cair menggunakan reaktor *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR) dan bersifat eksotermis, ditandai dengan nilai perubahan entalpi reaksi ($\Delta H = \text{Negatif}$).

2.2.4 Kondisi Operasi

Reaksi pembentukan monopropilen glikol dari propilen oksida dan air merupakan reaksi yang berlangsung secara kontinu dalam sistem dua fase cair, dengan bantuan katalis metil format pada kondisi operasi sebagai berikut :

Suhu : 150°C
Tekanan : 13,6 atm
Mol : Propilen oksida dan air sebesar 1:3.

Pada parameter ini, reaksi berlangsung secara kontinu dalam sistem dua fase cair, dengan bantuan katalis metil format. Menurut *US Patent No. 2.623.909* 1952, reaksi bersifat irreversibel dan mengarah ke pembentukan produk utama dengan konversi mencapai sekitar 92%.

2.2.5 Tinjauan Termodinamika

Menurut Smith et al 2005, menyatakan bahwa nilai konstanta kesetimbangan (K) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad (2.1)$$

Dengan:

ΔG° : tenaga Gibbs standar (kJ/mol)

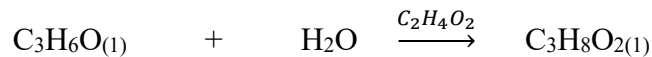
R : tetapan gas ideal

K : konstanta kesetimbangan

Tabel 2. 1 Nilai Entalpi dan Energi Gibbs Komponen (Yaws, 1999)

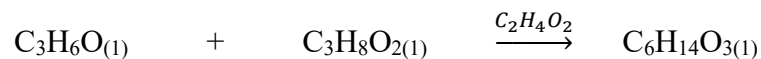
Komponen	ΔG_f° (kJ/mol)	ΔH_f (kJ/mol)
C ₃ H ₆ O	-25,77	-92,86
H ₂ O	-228,6	-241,80
C ₃ H ₈ O ₂	-304,48	-421,60
C ₆ H ₁₄ O ₃	-406	-628,23

(i) Reaksi Utama



$$\begin{aligned}
 \Delta G_f^\circ \text{ 298 k} &= \Sigma \Delta G_f^\circ \text{ produk} - \Sigma \Delta G_f^\circ \text{ reaktan} \\
 &= (\Delta G_f^\circ \text{ C}_3\text{H}_8\text{O}_2) - (\Delta G_f^\circ \text{ C}_3\text{H}_6\text{O} + \Delta G_f^\circ \text{ H}_2\text{O}) \\
 &= -304,48 - (-25,77 + (-228,6)) \\
 &= -50,11 \text{ kJ/mol} \\
 \Delta H \text{ Reaksi} &= \Sigma \Delta H \text{ produk} - \Sigma \Delta H \text{ reaktan} \\
 &= (\Delta H_f \text{ C}_3\text{H}_8\text{O}_2) - (\Sigma \Delta H_f \text{ C}_3\text{H}_6\text{O} + \Sigma \Delta H_f \text{ H}_2\text{O}) \\
 &= -421,60 - (-92,86 + (-241,80)) \\
 &= -86,936 \text{ kJ/mol}
 \end{aligned}$$

(ii) Reaksi Samping



$$\begin{aligned}
 \Delta G_f^\circ \text{ 298 k} &= \Sigma \Delta G_f^\circ \text{ produk} - \Sigma \Delta G_f^\circ \text{ reaktan} \\
 &= (\Delta G_f^\circ \text{ C}_6\text{H}_{14}\text{O}_3) - (\Delta G_f^\circ \text{ C}_3\text{H}_6\text{O} + \Delta G_f^\circ \text{ C}_3\text{H}_8\text{O}_2) \\
 &= -406 - (-25,77 + (-304,48))
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -75,75 \text{ kJ/mol} \\
\Delta H \text{ Reaksi} &= \Sigma \Delta H \text{ produk} - \Sigma \Delta H \text{ reaktan} \\
&= (\Delta H_f \text{ C}_6\text{H}_{14}\text{O}_3) - (\Sigma \Delta H_f \text{ C}_3\text{H}_6\text{O} + \Sigma \Delta H_f \text{ C}_3\text{H}_8\text{O}_2) \\
&= -628,23 - (-92,86 + (-421,60)) \\
&= -113,772 \text{ kJ/mol}
\end{aligned}$$

$$\ln K_{298} = \frac{-\Delta G_f^\circ}{RT} \quad (2.2)$$

$$\text{Nilai } K_{298} \text{ Reaksi Utama} = 6,02 \times 10^8$$

$$\text{Nilai } K_{298} \text{ Reaksi Samping} = 1,87 \times 10^{13}$$

Oleh karena itu nilai K pada suhu operasi dapat dihitung menggunakan persamaan kesetimbangan di bawah ini:

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = \left(\frac{-\Delta H_r^\circ}{RT} \right) \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (2.3)$$

Dengan:

$$T_1 = 298 \text{ K}$$

$$T_2 = 423 \text{ K}$$

$$K_1 = \text{Konstanta kesetimbangan reaksi pada saat } T_1$$

$$K_2 = \text{Konstanta kesetimbangan reaksi pada saat } T_2$$

Perhitungan dari persamaan dan data di atas, diperoleh nilai K_2 pada suhu 423 K untuk reaksi utama maupun samping sebagai berikut :

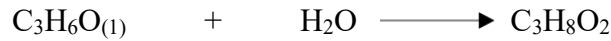
$$K_{298} \text{ 423 K Reaksi Utama} = 1,91 \times 10^4$$

$$K_{298} \text{ 423 K Reaksi Samping} = 2,42 \times 10^7$$

Berdasarkan data hasil analisis termodinamika, baik reaksi utama maupun reaksi samping diketahui berlangsung secara searah (*irreversible*), yang ditunjukkan oleh besarnya nilai konstanta kesetimbangannya. Reaksi-reaksi ini juga bersifat eksotermis, sebagaimana tercermin dari nilai entalpi reaksi yang negatif. Selain itu, keduanya bersifat spontan, terlihat dari nilai energi Gibbs yang negatif.

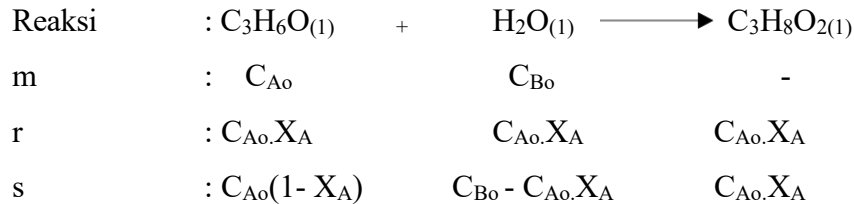
Perhitungan berikut menunjukkan konversi kesetimbangan pada suhu operasi 150°C.

Reaksi:



$$K = \frac{C_{\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2}}{[C_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}}][\text{H}_2\text{O}]}$$

Stoikiometri :



$$K = \frac{C_{A0} \cdot X_A}{(C_{A0}(1 - X_A))(C_{B0} - C_{A0} \cdot X_A)}$$

$$K = \frac{X}{(1 - X) \left(\frac{C_{B0}}{C_{A0}} - X \right)}$$

Dengan:

$$K = 1,91 \times 10^4$$

$$\frac{C_{B0}}{C_{A0}} = 9,82$$

$$K = \frac{X}{(1 - X) \left(\frac{C_{B0}}{C_{A0}} - X \right)}$$

$$1,91 \times 10^4 = \frac{X}{(1 - X)(9,82 - X)}$$

$$1,91 \times 10^4 X^2 - 20,67 \times 10^4 X + 18,76 \times 10^4 = 0$$

$$X_1 = 9,82 \text{ (tidak memenuhi)}$$

$$X_2 = 1 \text{ (memenuhi)}$$

Konversi kesetimbangan untuk reaksi ini mencapai 100%, yang berarti reaksi berlangsung sepenuhnya ke arah produk (*irreversible*). Meski begitu, menurut data dari US Patent No. 2.623.909 1952, nilai konversi aktual yang digunakan dalam perhitungan sebesar 92%.

2.2.6 Tinjauan Kinetika Reaksi

Menurut *US Patent No. 2.623.909 1952*, kinetika reaksi hidrasi propilen oksida dapat ditentukan berdasarkan data yang tercantum dalam paten tersebut. Berikut adalah beberapa data yang dijelaskan dalam paten tersebut:

Berat percobaan:

- Propilen Oksida = 100 gram
- Air = 300 gram
- Metil Format = 5 gram

Kondisi operasi percobaan:

- Pressure = 13,6 bar
- Temperature = 150°C
- Residence time = 1 jam

Selektivitas produk:

- Monopropilen glikol = 88,5%
- Dipropilen glikol = 11,5%

Dari data tersebut, dapat ditentukan nilai beberapa variabel, antara lain:

- Laju alir mol propilen oksida = 142,384 kmol/jam
- Laju alir volume campuran = 40.644,673 L/jam
- C_{A0} (propilen oksida mula-mula) = 3.503 kmol/m³

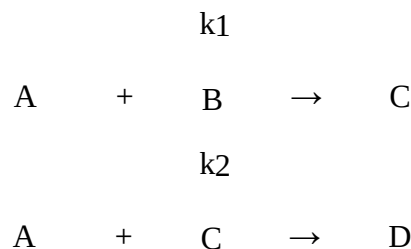
Konstanta kecepatan reaksi dapat ditentukan dengan menganggap reaksi ini sebagai sistem seri-paralel berorde satu terhadap kedua reaktan, yaitu propilen oksida dan air.

Berikut mekanisme reaksi yang berlangsung dalam proses hidrasi propilen oksida:

Reaksi:



Persamaan reaksi:



Mekanisme reaksi hidrasi propilen oksida mengikuti persamaan kimia berikut:

$$-r_A = k_1 \cdot C_A + k_2 \cdot C_A^2 \quad (2.4)$$

Penentuan nilai konstanta laju reaksi:

$$\frac{-dC_A}{dt} = k_1 \cdot C_A + k_2 \cdot C_A^2$$

$$DU = \frac{rD}{rC} = \frac{cD}{cC}$$

$$\frac{88,5\%}{11,5\%} = \frac{k_1.C_A}{k_2.C_A^2}$$

$$7,6957 = \frac{k_1}{k_2.C_A}$$

$$k_1 = 7,6957 k_2.C_A \quad (2.5)$$

Diperoleh persamaan untuk konstanta kecepatan reaksi primer (k_1). Berdasarkan data residence time 1 jam pada *US Patent* No. 2.623.909 dengan konversi mencapai 92%, dilakukan substitusi Persamaan II.2 ke dalam formulasi residence time menghasilkan:

$$t = \frac{C_{Ao}.X_A}{k_1.C_{Ao}(1-X_A) + k_2.C_{Ao}^2(1-X_A)^2}$$

$$1 = \frac{C_{Ao}.X_A}{7,6957 k_2.C_A + k_2.C_{Ao}^2(1-X_A)^2}$$

Dengan:

$$C_A = C_{Ao}(1-X_A)$$

$$C_A = 2,85 \text{ kmol/m}^3 \times (1 - 92\%)$$

$$C_A = 0,23 \text{ kmol/m}^3$$

Hasil perhitungan menghasilkan nilai konstanta laju reaksi (k) sebesar:

$$k_1 = 0,81 \text{ /jam}$$

$$= 48,85 \text{ /menit}$$

$$k_2 = 0,46 \text{ m}^3/\text{mol.jam}$$

2.3 Langkah Proses

Proses produksi monopropilen glikol dari propilen oksida dan air melalui reaksi hidrasi terdiri atas tiga tahapan utama, yaitu:

- Tahap persiapan bahan baku,
- Tahap reaksi pembentukan monopropilen glikol, dan
- Tahap pemisahan serta pemurnian produk.

2.3.1 Tahap Penyiapan Bahan Baku

Pada tahap ini, propilen oksida dan air dipersiapkan sebelum memasuki reaktor. Propilen oksida cair dengan kemurnian 99,95% disimpan dalam tangki pada suhu 35°C. Dari tangki penyimpanan (TK-01), propilen oksida dicampur dengan air dari tangki (TK-02), serta aliran recycle yang berasal dari Flash Drum (FD-01) dan Menara Distilasi (MD-01). Campuran tersebut kemudian dipompa hingga mencapai tekanan 13,6 atm sebelum

diarahkan ke reaktor yang beroperasi pada suhu 150°C. Di dalam reaktor, campuran propilen oksida, air, dan recycle akan berinteraksi dengan katalis metil format dan pelarut metanol. Perlu diperhatikan bahwa penambahan katalis dan metanol hanya dilakukan saat tahap awal proses (*startup*).

2.3.2 Tahap Pembentukan Monopropilen Glikol

Reaksi antara propilen oksida, air, metil format, dan metanol berlangsung dalam sebuah reaktor berpengaduk. Rasio molar propilen oksida terhadap air dijaga sebesar 1 banding 3. Dari reaksi ini, diperoleh hasil utama monopropilen glikol sebesar 88,5% dan produk samping berupa dipropilen glikol sebesar 11,5%. Reaktor yang digunakan merupakan jenis CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*) yang dioperasikan secara isothermal pada suhu 150°C dan tekanan 13,6 atm. Mengingat reaksi ini bersifat eksotermis, maka suhu dalam reaktor dikendalikan dengan sistem pendingin berupa jaket yang dialiri air dengan suhu masuk 35°C. Aliran keluaran dari reaktor terdiri dari campuran hasil reaksi dan sisa bahan pereaksi, yaitu monopropilen glikol, dipropilen glikol, metil format, metanol, serta propilen oksida dan air yang belum bereaksi.

2.3.3 Tahap Pemurnian

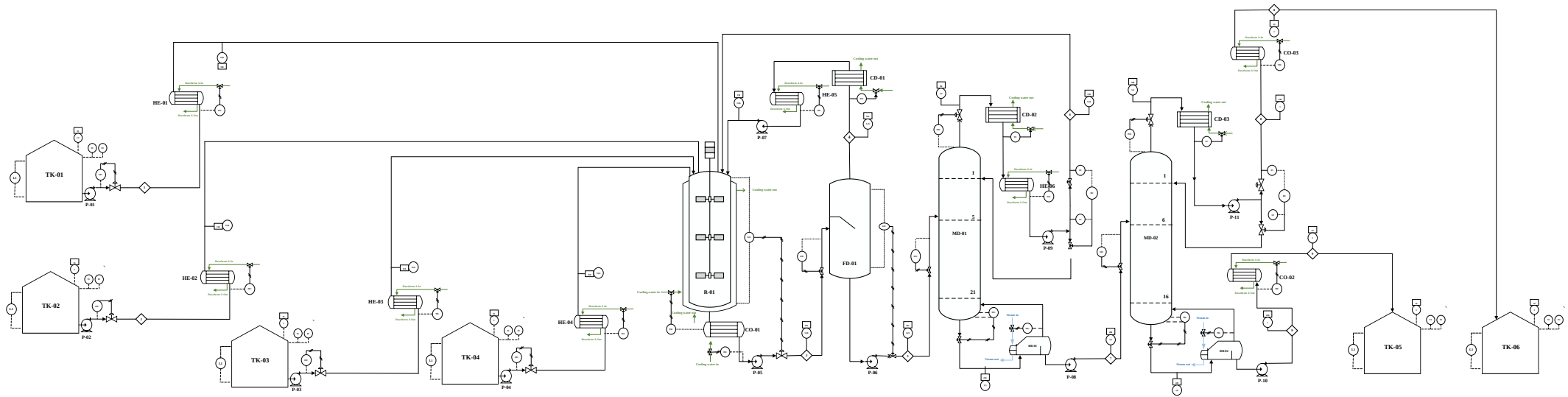
Tahap ini bertujuan untuk memurnikan monopropilen glikol dengan memisahkannya dari dipropilen glikol serta sisa reaktan lainnya, sehingga diperoleh produk monopropilen glikol yang murni. Proses pemisahan dan pemurnian dilakukan melalui beberapa unit sebagai berikut:

- Aliran keluaran dari reaktor pertama-tama diarahkan ke Flash Drum (FD-01), yang beroperasi pada suhu 101°C dan tekanan 1,25 atm. Alat ini berfungsi memisahkan komponen ringan seperti propilen oksida yang tersisa, metanol, dan air dari campuran. Komponen yang teruapkan (hasil atas) dikembalikan ke reaktor sebagai aliran recycle, sementara komponen yang tidak menguap (hasil bawah) dialirkan ke Menara Distilasi pertama (MD-01) untuk tahap pemurnian selanjutnya.
- Di Menara Distilasi (MD-01), terjadi pemisahan antara air dan monopropilen glikol. Air yang terpisah sebagai hasil atas kemudian digunakan kembali ke dalam reaktor, sedangkan hasil bawahnya berupa campuran yang sebagian besar mengandung monopropilen glikol. Campuran ini selanjutnya diarahkan ke Menara Distilasi kedua (MD-02) untuk dilakukan pemisahan akhir.

- Menara Distilasi kedua (MD-02) memisahkan monopropilen glikol sebagai produk utama dan dipropilen glikol sebagai produk samping. Hasil atas menara ini adalah monopropilen glikol dengan kemurnian 99,5% berat, yang kemudian disimpan dalam tangki produk (TK-06) pada suhu 35°C dan tekanan 1 atm. Sedangkan hasil bawah berupa dipropilen glikol dengan kemurnian 98,75% berat disalurkan ke tangki penyimpanan (TK-05) dengan kondisi penyimpanan yang sama.

2.4 Diagram Alir (*Flowsheet*)

PERANCANGAN PABRIK MONOPROPILEN GLIKOL DARI PROPILLEN OKSIDA DAN AIR MELALUI REAKSI HIDRASI KATALITIK DENGAN KATALIS METIL FORMAT KAPASITAS 55.000 TON/TAHUN

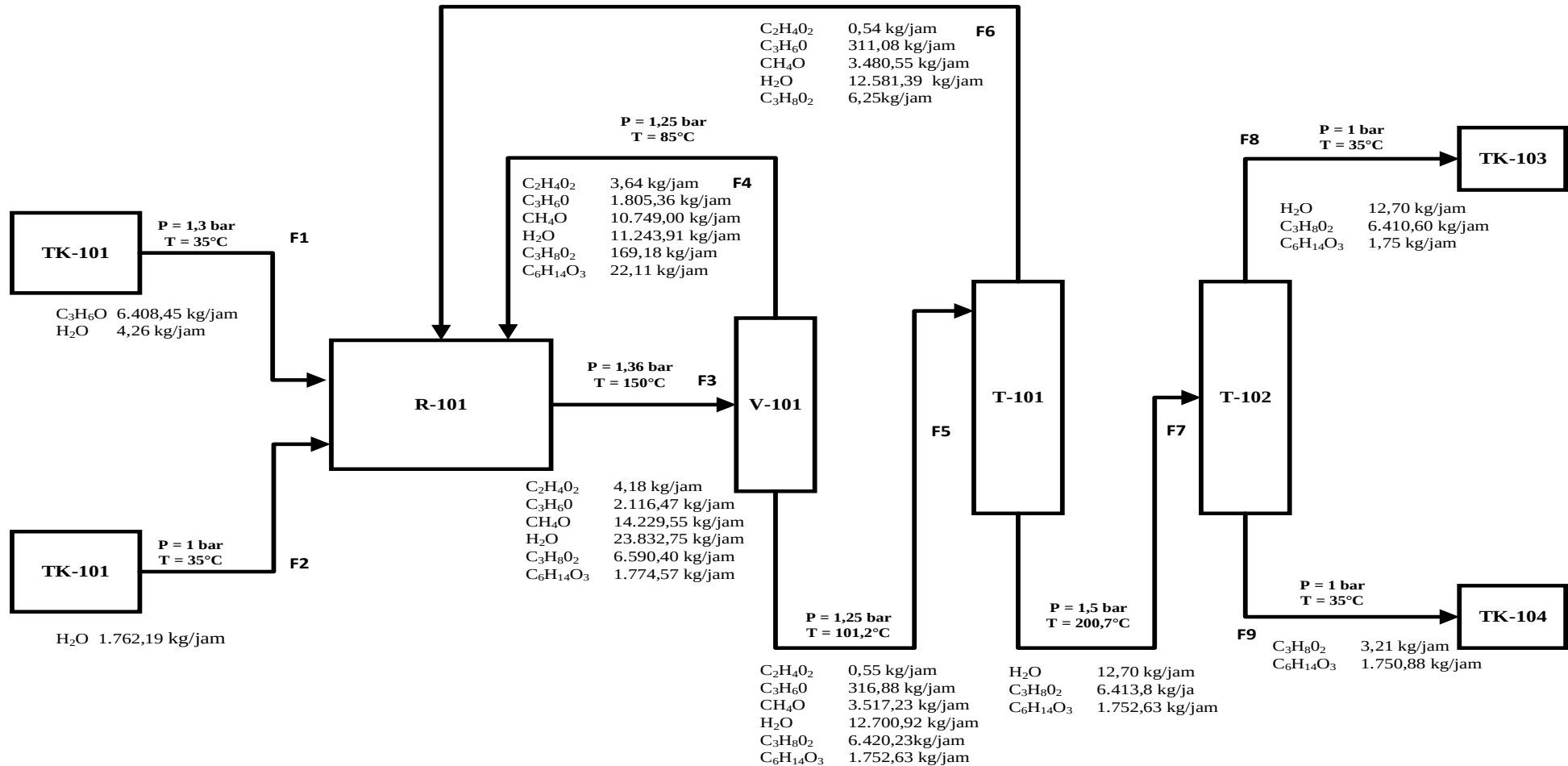


Gambar 2. 1 *Flowsheet* Pabrik Monopropilen Glikol

2.5 Neraca Massa dan Panas

2.5.1 Neraca Massa

Basis : 120 Kmol/Jam



Gambar 2. 2 Diagram Blok Neraca Massa

Neraca Massa dan Kapasitas Produksi Tahunan :

- Target produksi MPG = 55.000 ton per tahun
- Hari operasi dalam satu tahun = 330 hari
- Jam operasi per hari = 24 jam
- Kapasitas Produksi
$$= \frac{55.000 \text{ ton} \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{ton}}}{330 \text{ hari} \times 24 \frac{\text{jam}}{\text{hari}}}$$

= 6.944,44 kg/jam
- Rasio molar propilen oksida : air = 1 : 1
- Konversi reaksi propilen oksida = 92%

Kemurnian dan Impuritas Produk :

- Kemurnian MPG: 99,95%
- Impuritas MPG berupa air: 0,05%

Spesifikasi Produk Samping (DPG) :

- Kemurnian DPG: 98,75%
- Kandungan MPG dalam DPG: 1,25%

2.5.1.1 Neraca Massa Reaktor-01

Tabel 2. 2 Neraca Massa Reaktor-01

Komponen	Input				Output
	Arus 1	Arus 2	Arus 4	Arus 6	Arus 3
	(Kg/Jam)	(Kg/Jam)	(Kg/Jam)	(Kg/Jam)	(Kg/Jam)
Metil Format			3,64	0,54	4,18
Propilen Oksida	6.408,45		1.805,36	311,08	2.116,47
Metanol			10.749,00	3.480,55	14.229,55
Air	4,26	1.762,19	11.243,91	12.581,39	23.832,75
MPG			169,18	6,25	6.590,40
DPG			22,11	0,00	1.774,57
Total		48.547,91			48.547,91

2.5.1.2 Neraca Massa *Flashdrum*-01

Tabel 2. 3 Neraca Massa *Flashdrum*-01

Komponen	Input	Output	
	Arus 3 (Kg/Jam)	Arus 4 (Kg/Jam)	Arus 5 (Kg/Jam)
Metil Format	4,18	3,63	0,55
Propilen Oksida	2.116,47	1.799,58	316,88
Metanol	14.229,55	10.712,32	3.517,23
Air	23.832,75	11.131,83	12.700,92
MPG	6.590,40	170,17	6.420,23
DPG	1.774,57	21,94	1.752,63
Total	48.547,91	48.547,91	

2.5.1.2 Neraca Massa Menara Distilasi-01

Tabel 2. 4 Neraca Massa Menara Distilasi-01

Komponen	Input	Output	
	Arus 5 (Kg/Jam)	Arus 6 (Kg/Jam)	Arus 7 (Kg/Jam)
Metil Format	0,55	0,55	
Propilen Oksida	316,88	316,88	
Metanol	3.517,23	3.517,23	
Air	12.700,92	12.688,22	12,70
MPG	6.420,23	6,42	6.413,81
DPG	1.752,63		1.752,63
Total	24.708,44	24.708,44	

2.5.1.3 Neraca Massa Menara Distilasi-02

Tabel 2. 5 Neraca Massa Menara Distilasi-01

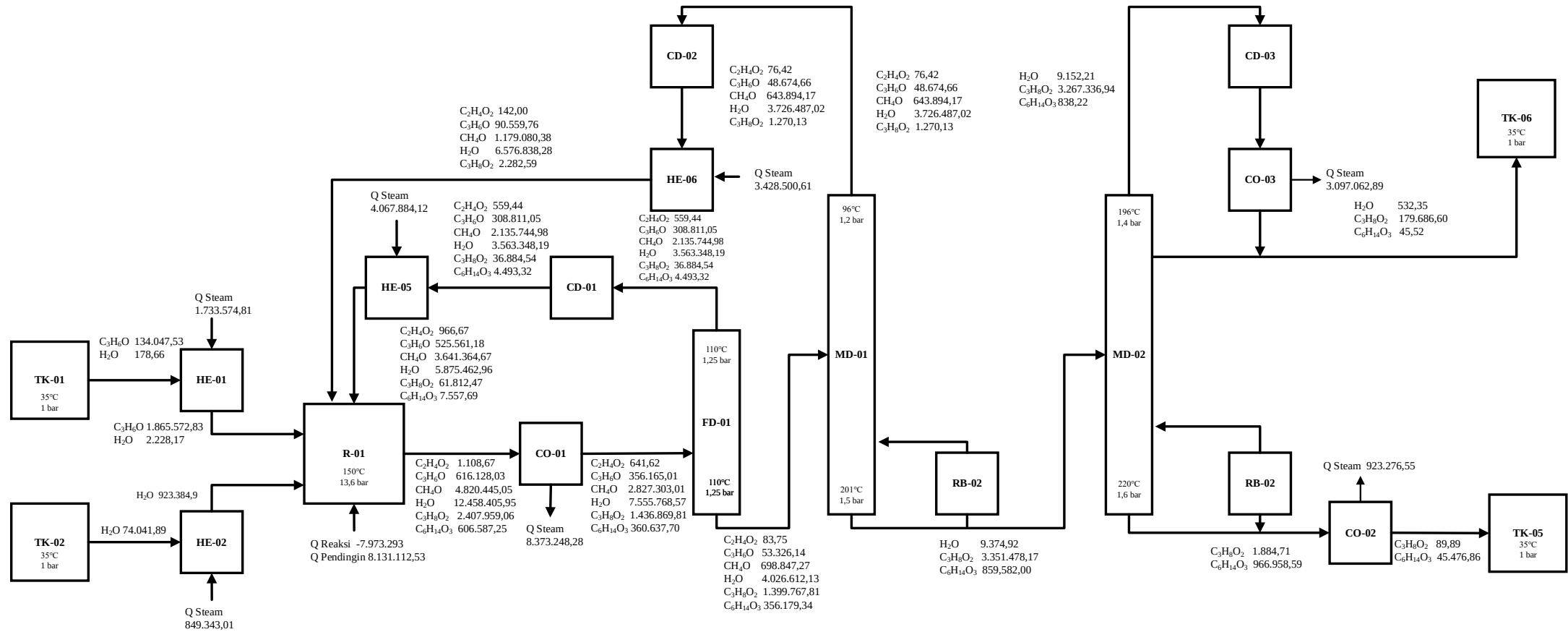
Komponen	Input		Output	
	Arus 7	Arus 8	Arus 9	
	(Kg/Jam)	(Kg/Jam)	(Kg/Jam)	
Air	12,70	12,70	0,00	
MPG	6.413,81	6.410,60	3,21	
DPG	1.752,63	1,75	1.750,88	
Total	8.179,14		8.179,14	

2.5.1.4 Neraca Massa Overall

Tabel 2. 6 Neraca Massa *Overall*

Komponen	Input		Output	
	Arus 1	Arus 2	Arus 8	Arus 9
Metil Format				
Propilen Oksida	6.408,45			
Metanol				
Air	4,26	1.766,42	12,70	0,00
MPG			6.410,60	3,21
DPG			1,75	1.750,88
Total	6.412,72	1.766,42	6.425,05	1.754,08
	8.179,14		8.179,14	

2.5.2 Neraca Panas



Gambar 2.3 Diagram Blok Neraca Panas

2.5.2.1 Neraca Panas Heat Exchanger-01

Tabel 2. 7 Neraca Panas *Heat Exchanger 01*

Komponen	Q Input (Kj/jam)	Q Output (Kj/jam)
PO	134.047,53	1.865.572,83
Air	178,66	2.228,17
Q steam in	1.733.574,81	0,00
Total	1.867.801,00	1.867.801,00

2.5.2.2 Neraca Panas Heat Exchanger-02

Tabel 2. 8 Neraca Panas *Heat Exchanger 02*

Komponen	Q Input (Kj/jam)	Q Output (Kj/jam)
PO	0,00	0,00
Air	74.041,89	923.384,90
Q steam in	849.343,01	0,00
Total	923.384,90	923.384,90

2.5.2.3 Neraca Panas Reaktor-01

Tabel 2. 9 Neraca Panas Reaktor-01

Komponen	Q Input (kJ/Jam)				Entalpi Pembentukan	Q Output (kJ/Jam)
	Arus 1	Arus 2	Arus 4	Arus 6		Arus 3
Katalis			966,67	142,00		1.108,67
PO	1.865.572,83		525.561,18	90.559,76		616.128,03
Metanol			3.641.364,67	1.179.080,38		4.820.445,05
Air	2.228,17	921.172,19	5.877.675,67	6.576.838,28		12.458.405,95
MPG			61.812,47	2.282,59		2.407.959,06
DPG			7.557,69	0,00		606.587,25
Delta Hrx 25					-7.973.293,07	
Q Pendingin					8.131.112,53	
	1.867.801,00	921.172,19	10.114.938,35	7.848.903,01	157.819,46	20.910.634,01
Total					20.910.634,01	20.910.634,01

2.5.2.4 Neraca Panas *Cooler-01*

Tabel 2. 10 Neraca Panas *Cooler-01*

Komponen	Q Input (kJ/Jam)	Q Output (kJ/Jam)
Katalis	1.108,67	641,62
PO	616.128,03	356.165,01
Metanol	4.820.445,05	2.827.303,01
Air	12.458.405,95	7.555.768,57
MPG	2.407.959,06	1.436.869,81
DPG	606.587,25	360.637,70
Q Pendingin		8.373.248,28
TOTAL	20.910.634,01	20.910.634,01

2.5.2.5 Neraca Panas *Flash Drum-01*

Tabel 2. 11 Neraca Panas *Flash Drum-01*

Komponen	Q Input (kJ/Jam)	Q Output (kJ/Jam)
Q Feed	12.537.385,73	
Q Uap		50.021.848,66
Q Liquid		6.534.816,44
Q Loss	44.019.279,37	
Total	56.556.665,10	56.556.665,10

2.5.2.6 Neraca Panas *Condensor-01*

Tabel 2. 12 Neraca Panas *Condensor-01*

Komponen	Q Input (Kj/jam)	Q Output (Kj/jam)
Q Feed	50.021.848,66	
Q Keluar Condenser		6.044.841,52
Q Qondenser		43.977.007,14
Total	50.021.848,66	50.021.848,66

2.5.2.7 Neraca Panas *Heat Exchanger-05*

Tabel 2. 13 Neraca Panas *Exchanger-05*

Komponen	Q Input (kJ/Jam)	Q Output (kJ/Jam)
Katalis	559,44	966,67
PO	303.811,05	525.561,18
Metanol	2.135.744,98	3.641.364,67
Air	3.563.348,19	5.875.462,96
MPG	36.884,54	61.812,47
DPG	4.493,32	7.557,69
Qsteam in	4.067.884,12	
Total	10.112.725,65	10.112.725,65

2.5.2.8 Neraca Panas Menara Distilasi-01

Tabel 2. 14 Neraca Panas *Menara Distilasi-01*

Komponen	Q Input (kJ/Jam)			Q Output (kJ/Jam)	
	Arus 5	QR	Arus 6	Arus 7	QC
Katalis	83,75		76,42	0,00	
PO	53.326,14		48.674,66	0,00	
Metanol	698.847,27		643.894,17	0,00	
Air	4.026.612,13		3.726.487,02	9.430,73	
MPG	1.399.767,81		1.270,13	3.372.159,56	
DPG	356.179,34		0,00	864.938,97	
Q reboiler		6.552.517,60			
Q condensor					4.420.402,40
Total	6.534.816,44	6.552.517,60	4.420.402,40	4.246.529,25	4.420.402,40
			13.087.334,04		13.087.334,04

2.5.2.9 Neraca Panas *Heat Exchanger-06*

Tabel 2. 15 Neraca Panas *Exchanger-06*

Komponen	Input (kJ/Jam)	Output (kJ/Jam)
Katalis	76,42	142,00
PO	48.674,66	90.559,76
Metanol	643.894,17	1.179.080,38
Air	3.726.487,02	6.576.838,28
MPG	1.270,13	2.282,59
DPG	0,00	0,00
Qsteam in	3.428.500,61	
Total	7.848.903,01	7.848.903,01

2.5.2.10 Neraca Panas Menara Distilasi-02

Tabel 2. 16 Neraca Panas Menara Distilasi-02

Komponen	Q Input (kJ/Jam)		Q Output (kJ/Jam)		
	Arus 5	QC	Arus 6	Arus 7	QR
Katalis	0,00		0,00	0,00	
PO	0,00		0,00	0,00	
Metanol	0,00		0,00	0,00	
Air	9.374,92		9.374,92	0,00	
MPG	3.351.478,17		3.349.802,43	1.686,08	
DPG	859.582,00		859,58	864.074,03	
Q reboiler					4.226.091,78
Q condensor		4.231.453,74			
Total	4.220.435,09	4.231.453,74	3.360.036,94	865.760,11	4.226.091,78
	8.451.888,83			8.451.888,83	

2.5.2.11 Neraca Panas Cooler-02

Tabel 2. 17 Neraca Panas Cooler-02

Komponen	Q Input (kJ/Jam)	Q Output (kJ/Jam)
Katalis	0,00	0,00
PO	0,00	0,00
Metanol	0,00	0,00
Air	0,00	0,00
MPG	1.884,71	89,89
DPG	966.958,59	45.476,86
Qsteam in		923.276,55
Total	968.843,30	968.843,30

2.5.2.12 Neraca Panas Cooler-03

Tabel 2. 18 Neraca Panas Cooler-03

Komponen	Input (kJ/Jam)	Output (kJ/Jam)
Katalis	0,00	0,00
PO	0,00	0,00
Metanol	0,00	0,00
Air	9.152,22	532,36
MPG	3.267.336,94	179.686,60
DPG	838,22	45,52
Qsteam in		3.097.062,89
Total	3.277.327,37	3.277.327,37

2.5.2.13 Neraca Panas Overall

Tabel 2. 19 Neraca Panas Overall

Neraca Panas Overall		
Komponen	Input (KJ/jam)	Output (KJ/jam)
<i>Heat Exchanger-01</i>		
PO	134.047,53	1.865.572,83
Air	178,66	2.228,17
Q Steam in	1.733.574,81	
<i>Heat Exchanger-02</i>		
Air	74.041,89	923.384,90
Q Steam in	849.343,01	
<i>Reaktor-01</i>		
Katalis	1.108,68	1.108,67
PO	2.481.693,77	616.128,03
Metanol	4.820.445,05	4.820.445,05
Air	13.377.914,30	12.458.405,95
MPG	64.095,06	2.407.959,06
DPG	7.557,69	606.587,25
Delta Hrx 25	-7.973.293,07	
Q Pendingin	8.131.112,53	
<i>Cooler-02</i>		
Katalis	1.108,67	641,62
PO	616.128,03	356.165,01
Metanol	4.820.445,05	2.827.303,01
Air	12.458.405,95	7.555.768,57
MPG	2.407.959,06	1.436.869,81
DPG	606.587,25	360.637,70
Q Pendingin		8.373.248,28
<i>Flash Drum-01</i>		
Q Feed	12.537.385,73	
Q Uap		50.021.848,66
Q Liquid		6.534.816,44
Q Loss	44.019.279,37	
<i>Condensor-01</i>		
Q Feed	50.021.848,66	
Q Keluar Condenser		6.044.841,52
Q Qondenser		43.977.007,14

Heat Exchanger-03		
Katalis	559,44	966,67
PO	303.811,05	525.561,18
Metanol	2.135.744,98	3.641.364,67
Air	3.563.348,19	5.875.462,96
MPG	36.884,54	61.812,47
DPG	4.493,32	7.557,69
Qsteam in	4.067.884,12	
Menara Distilasi-01		
Katalis	83,75	76,42
PO	53.326,14	48.674,66
Metanol	698.847,27	643.894,17
Air	4.026.612,13	3.735.917,74
MPG	1.399.767,81	3.373.429,69
DPG	356.179,34	864.938,97
Q reboiler	6.552.517,60	
Q condensor		4.420.402,40
Heat Exchanger-04		
Katalis	76,42	142,00
PO	48.674,66	90.559,76
Metanol	643.894,17	1.179.080,38
Air	3.726.487,02	6.576.838,28
MPG	1.270,13	2.282,59
DPG		
Qsteam in	3.428.500,61	
Menara Distilasi-02		
Katalis		
PO		
Metanol		
Air	9.374,92	9.374,92
MPG	3.351.478,17	3.351.488,51
DPG	859.582,00	864.933,61
Q reboiler		4.226.091,78
Q condensor	4.231.453,74	
Cooler-02		
Katalis		
PO		
Metanol		
Air		
MPG	1.884,71	89,89
DPG	966.958,59	45.476,86

Qsteam in		923.276,55
<i>Cooler-03</i>		
Katalis		
PO		
Metanol		
Air	9.152,22	532,36
MPG	3.267.336,94	179.686,60
DPG	838,22	45,52
Qsteam in		3.097.062,89
Total	194.937.989,86	194.937.989,86

2.6 Letak Pabrik dan Pemetaan

2.6.2 *Lay Out* Pabrik

Lay out pabrik merupakan penataan strategis berbagai fasilitas dalam kawasan pabrik guna mencapai efisiensi operasional, menjamin keselamatan kerja, serta memperlancar jalannya proses produksi. Penentuan layout yang tepat sangat penting agar aktivitas di lapangan dapat berjalan dengan optimal. Pada Gambar 2.5 menyajikan ilustrasi dari tata letak pabrik.

Berdasarkan Vilbrandt dan Dryden, 1959, terdapat beberapa aspek yang perlu diperhatikan dalam merancang tata letak pabrik secara optimal meliputi:

- a. Pabrik monopropilen glikol ini dirancang sebagai unit baru, bukan perluasan dari fasilitas yang sudah ada sebelumnya, sehingga penyusunan layout dapat dilakukan tanpa keterbatasan dari struktur bangunan lama.
- b. Penyusunan tata letak turut mempertimbangkan kemungkinan ekspansi area pabrik di masa mendatang sebagai bagian dari strategi pengembangan jangka panjang.
- c. Aspek keselamatan sangat diperhatikan, terutama dalam mengantisipasi risiko kebakaran dan ledakan. Oleh karena itu, peralatan dan instalasi diposisikan menjauh dari sumber panas, bahan mudah terbakar atau meledak, serta area yang berpotensi mengandung gas beracun atau asap berbahaya.
- d. Rancangan konstruksi dibuat dengan sistem terbuka (outdoor) untuk menekan biaya pembangunan. Hal ini dimungkinkan karena kondisi iklim Indonesia yang cenderung mendukung penerapan sistem terbuka.
- e. Mengingat harga tanah yang tinggi, pemanfaatan lahan dilakukan secara efisien melalui pengaturan ruang yang optimal agar semua fungsi pabrik dapat terakomodasi dengan baik.

Berdasarkan klasifikasi dari Vilbrandt dan Dryden, 1959, tata letak pabrik dibagi menjadi beberapa zona utama, antara lain:

- a. Zona administrasi, laboratorium, dan ruang control

Area ini mencakup fasilitas administrasi sebagai pusat pengelolaan operasional pabrik secara keseluruhan, laboratorium untuk pengujian kualitas produk, serta ruang kontrol yang berfungsi memantau dan mengendalikan proses produksi.

b. Zona proses produksi

Merupakan area inti di mana alat-alat utama dan unit proses kimia ditempatkan, serta tempat berlangsungnya reaksi produksi monopropilen glikol.

c. Zona penyimpanan bahan baku dan produk

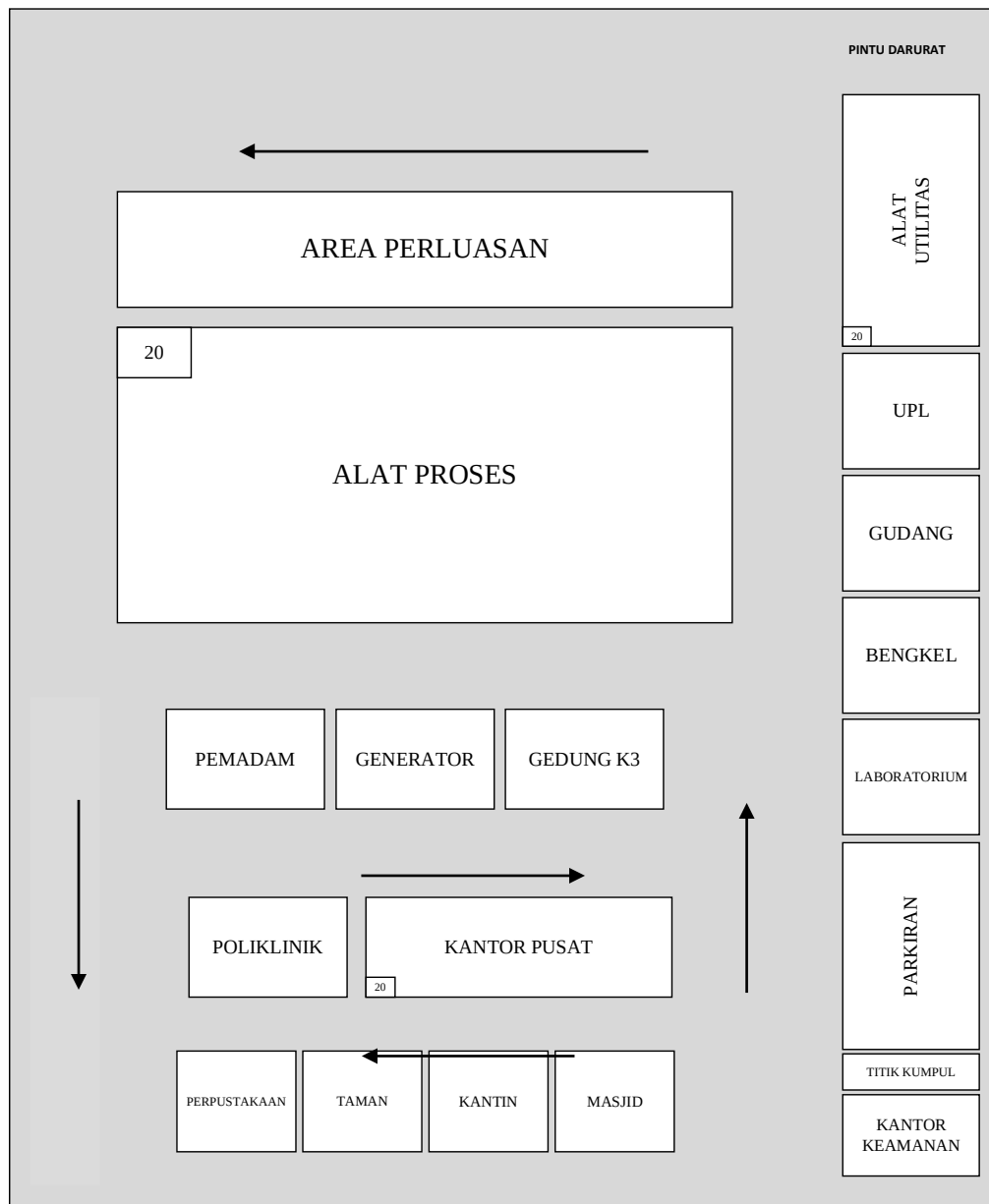
Digunakan untuk menyimpan bahan baku sebelum diproses dan produk akhir sebelum didistribusikan. Tangki penyimpanan umumnya berada di area ini.

d. Zona gudang, bengkel, dan garasi

Area ini digunakan untuk menyimpan perlengkapan dan material pendukung, serta menjadi tempat perawatan, perbaikan alat, dan kendaraan operasional.

e. Zona utilitas

Zona pusat penyediaan bahan penunjang proses seperti air proses, uap, udara tekan, dan energi listrik, yang sangat penting untuk menjaga kelangsungan operasional pabrik.



Gambar 2. 4 *Lay Out* Pabrik Monopropilen Glikol

Keterangan:

- | | | |
|------------------|--------------------|--------------------|
| 1. Alat Proses | 8. Titik Kumpul | 15. Kantor Pusat |
| 2. Alat Utilitas | 9. Kantor Keamanan | 16. Pemadam |
| 3. UPL | 10. Perpustakaan | 17. Generator |
| 4. Gudang | 11. Taman | 18. Gedung K3 |
| 5. Bengkel | 12. Kantin | 19. Area Perluasan |
| 6. Laboratorium | 13. Masjid | 20. <i>Hydrant</i> |
| 7. Parkiran | 14. Poliklinik | |

2.6.2 Lay Out Peralatan Proses

Tata letak peralatan pabrik ditunjukkan pada Gambar 2.6. mengacu dari Vilbrandt dan Dryden (1959), terdapat sejumlah aspek penting yang perlu diperhatikan dalam merancang susunan peralatan proses pada pabrik monopropilen glikol, antara lain:

1. Pengaturan aliran bahan baku dan produk

Penempatan peralatan harus memungkinkan pergerakan bahan baku dan produk yang efisien untuk mengoptimalkan biaya operasional serta menunjang kelancaran dan keamanan jalannya proses produksi.

2. Sirkulasi udara

Sistem aliran udara di sekitar area proses perlu dirancang agar ventilasi berjalan dengan baik. Tujuannya adalah untuk mencegah penumpukan uap atau zat kimia berbahaya yang dapat membahayakan keselamatan kerja.

3. Pencahayaan

Seluruh area pabrik harus memiliki pencahayaan yang cukup. Area dengan risiko tinggi atau proses yang kritis memerlukan penerangan tambahan agar kegiatan dapat dilakukan dengan aman.

4. Mobilitas pekerja

Tata letak sebaiknya memudahkan akses pekerja ke seluruh unit proses, agar tindakan perbaikan dapat dilakukan segera bila terjadi gangguan operasional. Selain itu, faktor keselamatan dan kenyamanan pekerja selama menjalankan tugas juga harus menjadi prioritas utama.

5. Aspek biaya operasional

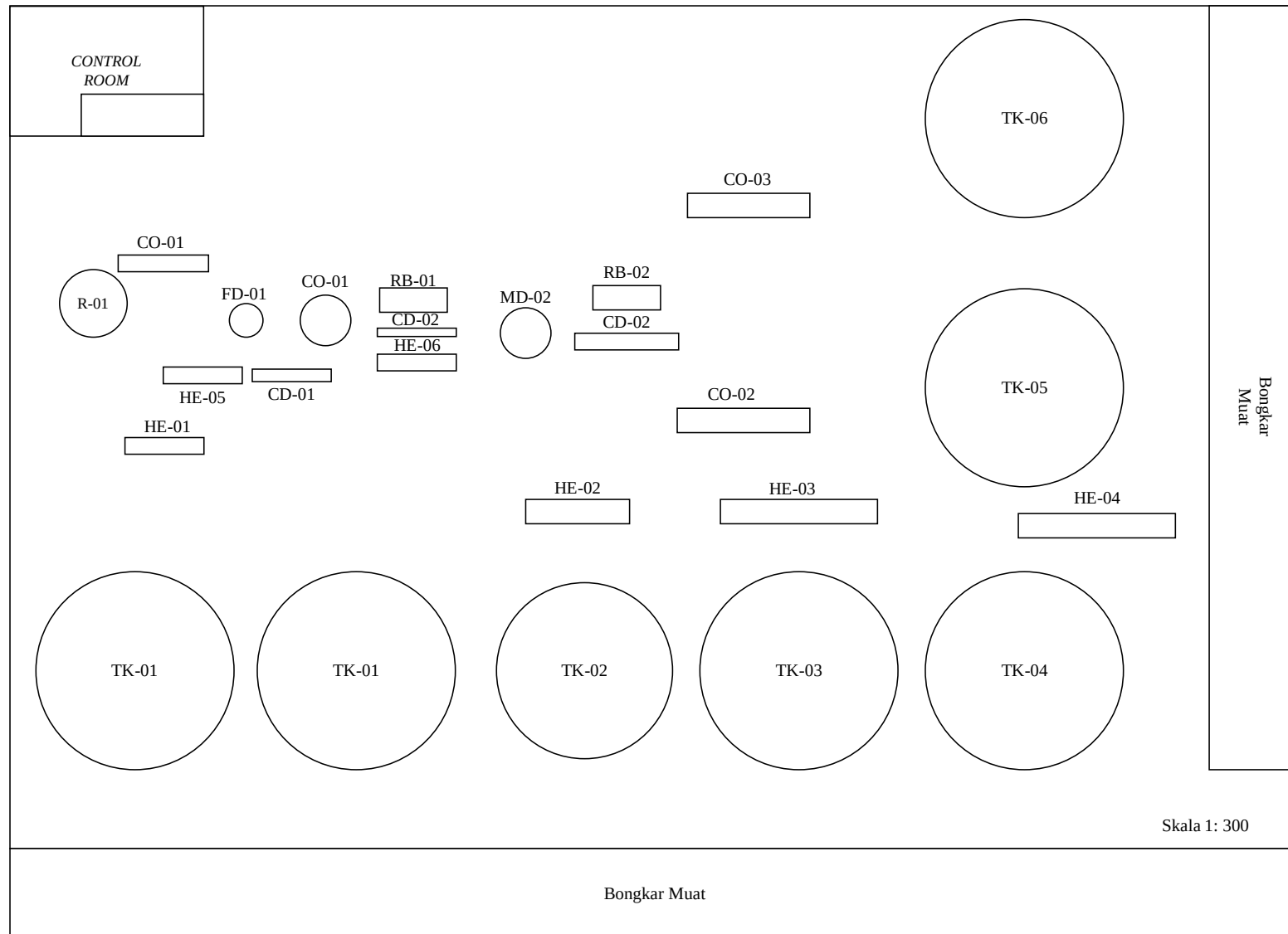
Penempatan peralatan perlu diatur agar biaya operasional bisa ditekan semaksimal mungkin, tanpa mengorbankan kelancaran dan keselamatan proses produksi.

6. Jarak antar peralatan

Peralatan yang beroperasi pada tekanan dan suhu tinggi sebaiknya ditempatkan berjauhan dari unit proses lainnya. Hal ini bertujuan untuk membatasi dampak jika terjadi kebakaran atau ledakan, sehingga potensi kerusakan dapat diminimalkan.

Dengan perencanaan tata letak peralatan yang tepat, diharapkan:

- Proses produksi dapat berjalan dengan lancar
- Penggunaan area lahan menjadi lebih efisien
- Biaya penanganan material (*material handling*) dapat ditekan



Gambar 2.5 *Lay Out Alat Proses*

Tabel 2. 20 Keterangan *Lay Out* Proses

Kode Alat	Nama Alat
TK-01	Tangki PO
TK-02	Tangki Air
TK-03	Tangki Metil Format
TK-04	Tangki Metanol
TK-05	Tangki DPG
TK-06	Tangki MPG
HE-01	<i>Heat Exchanger I</i>
HE-02	<i>Heat Exchanger II</i>
HE-03	<i>Heat Exchanger III</i>
HE-04	<i>Heat Exchanger IV</i>
HE-05	<i>Heat Exchanger V</i>
HE-06	<i>Heat Exchanger VI</i>
R-01	Reaktor
FD-01	<i>Flashdrum</i>
MD-01	Menara Distilasi I
MD-02	Menara Distilasi II
CO-01	<i>Cooler I</i>
CO-02	<i>Cooler II</i>
CO-03	<i>Cooler III</i>
CD-01	Kondensor I
CD-02	Kondensor II
CD-03	Kondensor III
RB-01	<i>Reboiler I</i>
RB-02	<i>Reboiler II</i>