

BAB II

DESKRIPSI PROSES

2.1 Spesifikasi Bahan Baku dan Produk

2.1.1 Spesifikasi Bahan Baku

1. Propilen

Rumus Molekul	: C_3H_6
Berat Molekul	: 42,081 g/gmol
Densitas (20°C)	: 1,81 gr/cm ³
Titik Beku	: -182,2°C
Titik Didih	: -47,7°C
Fasa (25°C dan 1 atm)	: Gas
Kemurnian	: 99,6%
Viskositas	: 0,0078 cP
Vapour Pressure (30°C)	: 12,9 atm
Vapour Density (air = 1,0)	: 1,46
Auto-Ignition Temperature	: 458°C

(Pertamina, 2026; Yaws, 1996)

2. Air

Rumus Molekul	: H_2O
Berat Molekul	: 18,016 g/gmol
Densitas (20°C)	: 0,998 gr/cm ³
Titik Beku	: 0°C
Titik Didih	: 100°C
Fasa (25°C dan 1 atm)	: Cair
Kemurnian	: 100%
Viskositas	: 0,8937 cP
Vapour Pressure	: 1,54 Torr (20°C)
Vapour Density (air = 1,0)	: 0,46
Auto-Ignition Temperature	: -

(MSDS, 2024)

3. Gliserol

Rumus Molekul	: $C_3H_8O_3$
---------------	---------------

Berat Molekul	: 92,094 g/mol
Densitas (25°C)	: 1,257 g/ml
Titik Beku	: 18,18°C
Titik Didih	: 290°C
Fasa (25°C dan 1 atm)	: Cair kental
Kemurnian	: 99,997%
Viskositas	: 757,1497 cP

(Yaws, 1999)

2.1.2 Spesifikasi Katalis

Nama	: HZSM-5
Fasa	: Padatan Granular
Warna	: Putih
Bulk Densitas	: 2,355 kg/L
Kelarutan	: Tidak larut dalam air
Luas Permukaan	: 340 m ² /g
Kandungan	: 51-57% kelembaban (H ⁺ form)

(Zibo Jiulong Chemical, 2026)

2.1.3 Spesifikasi Produk Utama

Nama	: Isopropil Alkohol/Isopropanol
Rumus Molekul	: C ₃ H ₈ O
Berat Molekul	: 60,10 g/gmol
Densitas (20°C)	: 0,8046 gr/cm ³
Titik Beku	: -89°C
Titik Didih	: 82°C
Fasa (25°C dan 1 atm)	: Cair
Kemurnian	: 99,77%
Auto-Ignition Temperature	: 399°C

(Yaws, 1999)

2.1.4 Spesifikasi Produk Samping

Nama	: Diisipropil eter
Rumus Molekul	: C ₆ H ₁₄ O
Berat Molekul	: 102,18 g/gmol

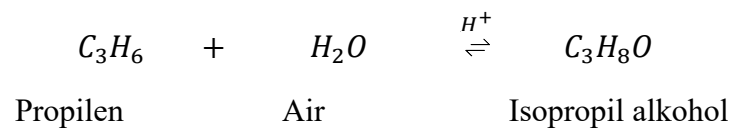
Densitas (20°C)	: 2,70 gr/cm ³
Titik Beku	: -85,5°C
Titik Didih	: 68,3°C
Fasa (25°C dan 1 atm)	: Cair
Sifat	: Mudah terbakar

(Yaws, 1996)

2.2 Konsep Proses

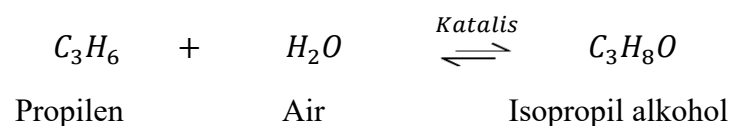
2.2.1 Dasar Reaksi

Proses hidrasi langsung fase gas-cair pembuatan isopropanol dilakukan dengan mereaksikan propilen pada fase gas dan air pada fase cair. Secara umum, dasar reaksi hidrasi langsung berlangsung menurut mekanisme sebagai berikut (Chua et al., 2017).

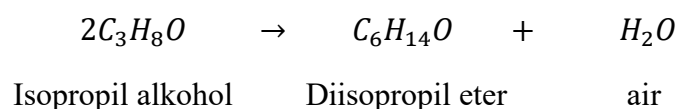


Proses reaksi tersebut berlangsung di dalam *Reactive Distillation Column* pada suhu 180°C dan tekanan 20 bar dengan menggunakan katalis HZSM-5 jenis *ion-exchanger resin* berbentuk padatan. Reaksi yang terjadi pada pembentukan isopropanol dari propilen dan air adalah sebagai berikut:

Reaksi utama:

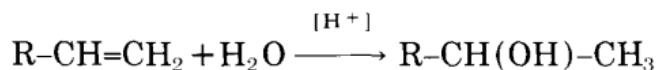


Reaksi samping:



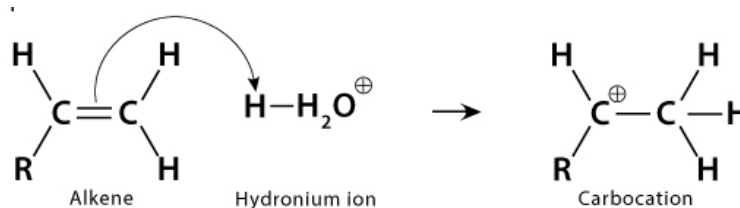
2.2.2 Mekanisme Reaksi

Mekanisme reaksi hidrasi propilen terdiri dari tiga langkah utama, yaitu pembentukan karbokation oleh ion H⁺, serangan molekul air, dan pelepasan kembali ion H⁺ hingga terbentuk isopropanol. Reaksi ini menghasilkan isopropanol sebagai produk utama karena pembentukan karbokation yang paling stabil terjadi pada karbon sekunder (Sonnemans, 1993).



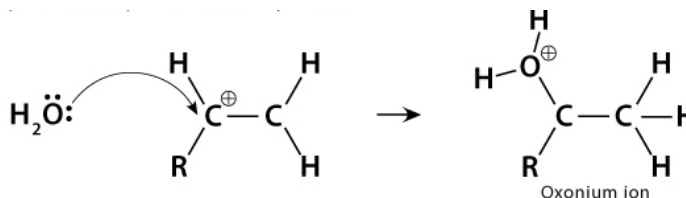
Gambar 2.0.1 Reaksi Pembentukan Isopropanol

Mekanisme reaksi hidrasi propilen menjadi isopropanol pada dasarnya adalah reaksi penambahan air ke ikatan rangkap propilen dengan bantuan ion H^+ . Reaksi dimulai ketika propilen bereaksi dengan ion hidrogen (H^+), sehingga ikatan rangkapnya terbuka dan terbentuk karbokation. Karbokation yang terbentuk berada pada karbon tengah karena posisinya paling stabil. Tahap ini sangat penting karena menentukan jalannya reaksi berikutnya. Rantai reaksi karbokasi terdapat pada gambar di bawah ini



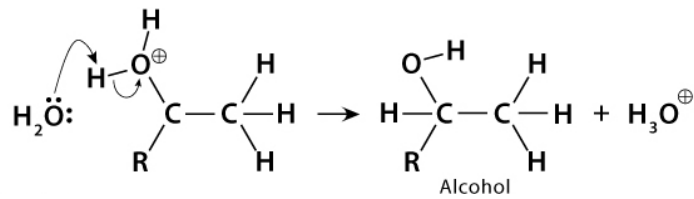
Gambar 2.2 Pembentukan Karbokation

Setelah karbokation terbentuk, molekul air akan menyerang karbon yang bermuatan positif tersebut. Atom oksigen dari air memiliki pasangan elektron bebas sehingga dapat berikatan dengan karbon dan membentuk senyawa antara. Pada tahap ini sudah mulai terbentuk struktur alkohol, tetapi masih dalam keadaan terprotonasi sehingga belum stabil. Rantai reaksi terdapat pada gambar di bawah



Gambar 2.3 Pembentukan Oxonium Ion

Tahap terakhir adalah pelepasan kembali ion H^+ dari senyawa antara tersebut sehingga terbentuk produk akhir berupa isopropanol. Ion H^+ yang dilepaskan tidak hilang, tetapi kembali ke sistem dan bisa digunakan lagi untuk membantu reaksi berikutnya. Oleh karena itu, ion H^+ berperan sebagai pemicu reaksi yang bekerja berulang selama proses hidrasi berlangsung. Rantai reaksi terdapat pada gambar di bawah



Gambar 2.4 Pembentukan Isopropanol

2.2.3 Sifat Reaksi

a. Tinjauan Termodinamika

Tinjauan secara termodinamika ditujukan untuk mengetahui sifat reaksi (endotermis/eksotermis) dan arah reaksi (*reversible/irreversible*). Penentuan panas reaksi berjalan secara eksotermis atau endotermis dapat dihitung dengan perhitungan panas pembentukan standar (ΔH_f°) pada $P = 1 \text{ atm}$ dan $T = 298,15 \text{ K}$. pada pembentukan isopropanol terjadi reaksi sebagai berikut:

Reaksi Utama:

Berdasarkan reaksi yang terjadi, harga ΔH_f° masing-masing komponen pada suhu $298,15 \text{ K}$ dapat dilihat pada tabel 1.12 berikut:

Tabel 2.1 Harga ΔH_f° Masing-masing Komponen (Yaws, 1999)

Komponen	ΔH_f° , kJ/mol
C_3H_6	20,42
$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	-272,59
$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	-318,82
H_2O	-240,56

$$\Delta H_f^\circ_{298,15 \text{ K}} = \sum \Delta H_f^\circ \text{ produk} - \sum \Delta H_f^\circ \text{ reaktan}$$

$$\Delta H_f^\circ_{298,15 \text{ K}} = (\Delta H_f^\circ \text{ C}_3\text{H}_8\text{O}) - (\Delta H_f^\circ \text{ C}_3\text{H}_6 + \Delta H_f^\circ \text{ H}_2\text{O})$$

$$= (272,79) - (20,42 + (-241,80))$$

$$= -52,45 \text{ kJ/mol}$$

Karena $\Delta H_f^\circ_{298,15}$ bernilai negatif, maka reaksi bersifat eksotermis yaitu mengeluarkan panas.

Reaksi Samping:

Berdasarkan reaksi samping diatas,

$$\begin{aligned}\Delta H_f^\circ_{298,15\text{ K}} &= \sum \Delta H_F^\circ \text{ produk} - \sum \Delta H_F^\circ \text{ reaktan} \\ \Delta H_f^\circ_{298,15\text{ K}} &= (\Delta H_F^\circ \text{ C}_6\text{H}_{14}\text{O} + \Delta H_F^\circ \text{ H}_2\text{O}) - (2 \times \Delta H_F^\circ \text{ C}_3\text{H}_8\text{O}) \\ &= (-318,82 + (-240,56)) - (2 \times (-272,59)) \\ &= -14,2 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

Karena $\Delta H_F^\circ_{298,15}$ bernilai negatif, maka reaksi bersifat eksotermis.

Penentuan panas reaksi berjalan secara *reversible* atau *irreversible* dapat dihitung dengan perhitungan Energi Gibbs (ΔG_f) pada $P = 1 \text{ atm}$ dan $T = 298,15 \text{ K}$. pada pembentukan isopropanol terjadi reaksi sebagai berikut:

Tabel 2.2 Harga ΔG_f° Masing-masing Komponen (Yaws, 1999)

Komponen	ΔG_f° , kJ/mol
C_3H_6	62,72
$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	-173,59
$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	-121,88
H_2O	-227,36

Dari persamaan 13.14 dan 13.15 pada Smith dkk., 2001:

$$\begin{aligned}\ln K_{298,15} &= \frac{-\Delta G_f}{RT} \\ \ln \frac{K_2}{K_1} &= \frac{-\Delta H_{298,15}}{R(T_2 - T_1)}\end{aligned}$$

Dengan:

K_1 : Kostanta kesetimbangan pada 298,15K

K_2 : Konstanta kesetimbangan pada suhu operasi

T_1 : Suhu standar (25°C)

T_2 : Suhu operasi

R : Tetapan gas ideal = 0,008314 kJ/mol.K

$\Delta G_f^\circ_{298,15\text{ K}}$: panas reaksi standar pada 298,15K

Reaksi Utama:

$$\begin{aligned}\Delta G_f^\circ_{298,15\text{ K}} &= \sum \Delta G_F^\circ \text{ produk} - \sum \Delta G_F^\circ \text{ reaktan} \\ \Delta G_f^\circ_{298,15\text{ K}} &= (\Delta G_F^\circ \text{ C}_3\text{H}_8\text{O}) - (\Delta G_F^\circ \text{ C}_3\text{H}_6 + \Delta G_F^\circ \text{ H}_2\text{O}) \\ &= (-173,59) - (62,72 + (-227,36))\end{aligned}$$

$$= -8,95 \text{ kJ/mol}$$

$$\ln K_{298,15} = \frac{-(-8,95 \text{ kJ/mol})}{0,008314 \text{ kJ/mol.K} \times 298,15 \text{ K}}$$

$$= 3,610$$

$$K_{298,15} = 36,9879$$

K standar pada suhu operasi

$$T = 421,15 \text{ K}$$

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = \frac{-\Delta H^\circ}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

$$K_{\text{operasi}} = 0,07660$$

Reaksi Samping:

$$\Delta G_F^\circ_{298,15 \text{ K}} = \sum \Delta G_F^\circ \text{ produk} - \sum \Delta G_F^\circ \text{ reaktan}$$

$$\Delta G_F^\circ_{298,15 \text{ K}} = (\Delta G_F^\circ \text{ C}_6\text{H}_{14}\text{O} + \Delta G_F^\circ \text{ H}_2\text{O}) - (2 \times (\Delta G_F^\circ \text{ C}_3\text{H}_8\text{O}))$$

$$= (-121,88 + (-227,36)) - (2 \times (-173,59))$$

$$= -2,06 \text{ kJ/mol}$$

$$\ln K_{298,15} = \frac{-(-2,06) \text{ kJ/mol}}{0,008314 \text{ kJ/mol.K} \times 298,15 \text{ K}}$$

$$= 0,83104$$

$$K_{298,15} = 2,2957$$

K standar pada suhu operasi

$$T = 421,15 \text{ K}$$

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = \frac{-\Delta H^\circ}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

$$K_{\text{operasi}} = 0,4308$$

Pada kedua reaksi, baik reaksi utama maupun reaksi samping, keduanya berjalan secara *reversible*, dengan nilai $K < 1$. Nilai ΔG bernilai negatif (-), menunjukkan bahwa reaksi terjadi secara spontan dan tidak memerlukan energi. Dikarenakan reaksi berlangsung secara *reversible*, implementasi metode distilasi reaktif dapat menjadi optimasi proses sehingga produk dapat dipisahkan secara langsung. Di samping itu, guna memastikan reaksi cenderung ke arah produk, konsentrasi air ditambahkan menjadi 2,05 kali lebih tinggi dari propilen. Sebagaimana prinsip Le Chatelier, penambahan konsentrasi zat reaktan mampu menggeser kesetimbangan cenderung ke arah produk.

b. Tinjauan Kinetika

Perhitungan tinjauan kinetika reaksi menggunakan model Langmuir-Hinshelwood (LH) oleh Sonnemans (1993) dengan persamaan laju reaksi sebagaimana berikut:

$$r = K_{LH} \frac{C_{C_3H_6} C_{H_2O}}{1 + K_{PR} C_{C_3H_6}}$$

Menghitung konsentrasi:

$$C_i = \frac{y_i P}{RT}$$

$$R = 8,314 \text{ J/mol}$$

$$T = 421,15 \text{ K}$$

$$P = 20 \text{ bar} = 2.000.000 \text{ Pa}$$

Tabel 2.3 Konsentrasi Umpan Distilasi Reaktif

Komponen	Y (fraksi)	C
C ₃ H ₆	0.33	187.2765
H ₂ O	0.67	383.9168

Menghitung konstanta laju reaksi K_{LH}

$$K_{LH} = 3,9906 \times 10^{13} \exp\left(-\frac{14613}{T}\right)$$

$$T = 421.15 \text{ K}$$

Maka

$$K_{LH} = 3,9906 \times 10^{13} \exp\left(-\frac{14613}{453.15}\right)$$

$$K_{LH} = 0,03404/\text{s}$$

Menghitung efek adsorpsi

$$1 + K_{PR} C_{C_3H_6}$$

$$K_{PR} = 0,0369 \text{ m}^3/\text{mol}$$

Maka

$$\begin{aligned} \text{Efek adsorpsi} &= 1 + 0,0369 \times 187,2765 \\ &= 7,9105 \end{aligned}$$

Menghitung laju reaksi (r)

$$r = K_{LH} \frac{C_{C_3H_6} C_{H_2O}}{1 + K_{PR} C_{C_3H_6}}$$

$$r = 1,2853 \frac{187,2765 \times 3853,9168}{7,9105}$$

$$r = 309,364 \text{ mol/m}^3/\text{s}$$

2.3 Langkah Proses

Proses pembuatan isopropanol dari propilen dan air melalui metode *reactive distillation*, secara garis besar terdiri atas 4 tahapan, yakni persiapan bahan baku, proses pembentukan atau reaksi produk, proses pemisahan dan pemurnian produk, serta proses pengemasan produk.

2.3.1 Tahap Penyiapan Bahan Baku

Tahap ini dilakukan untuk menyesuaikan kondisi bahan baku agar sesuai dengan kebutuhan operasi pada tahap reaksi di dalam *reactive distillation column*. Propilen bergrade polimer kemurnian 99,6% disimpan dalam fase cair pada tekanan 13,1 atm dan suhu 30°C di dalam tangki T-101. Sementara itu, air pada tekanan 1 atm dan suhu 30°C dialirkan dari unit utilitas. Pada proses produksi isopropanol dengan metode hidrasi langsung ini, air dibuat berlebih dibandingkan dengan propilen.

Propilen dari tangki penyimpanan (T-101) dipompa menggunakan pompa (P-102) menuju bagian bawah *stage* reaksi pada kolom distilasi reaktif (DC-201). Adapun air akan dipompa menggunakan pompa (P-101) masuk ke bagian atas *stage* reaksi pada kolom distilasi reaktif (DC-201). Guna memaksimalkan proses, baik propilen maupun air akan dinaikkan tekanannya hingga mencapai 19,74 atm sebagaimana kondisi operasi dari kolom distilasi reaktif (DC-101)

2.3.2 Tahap Reaksi

Proses terjadinya reaksi pembentukan isopropil alkohol dilakukan di dalam kolom distilasi reaktif (CD-201). Distilasi jenis ini bekerja dengan menggabungkan proses reaksi kimia dan proses distilasi dalam satu unit proses. Kondisi operasi dalam kolom distilasi ini adalah bersuhu 78°C pada kolom bagian atas dan 199°C pada kolom bagian bawah serta bertekanan 19,74 atm. Kolom distilasi ini memiliki 21 *stage* yang terbagi menjadi 3 bagian, yakni seksi *rectifying pada* bagian atas, seksi reaksi pada bagian tengah, dan seksi *stripping pada* bagian bawah kolom. Proses reaksi pembentukan isopropanol dari propilen dan air terjadi pada *stage* reaksi dengan suhu 148,66°C untuk memastikan kinetika reaksi berjalan optimal dimana *stage* reaksi berada di tengah reaktor. Propilen masuk dari bagian bawah *stage* reaksi dan air masuk dari bagian atas dengan rasio antara propilen dan air

adalah 1:2,05 yang dimana reaksi ini menghasilkan konversi isopropanol sebesar 98%

Pada kolom distilasi reaktif ini digunakan katalis heterogen HZSM-5 yang diletakkan di dalam *packing* kolom pada *stage* reaksi. Katalis HZSM-5 merupakan sebuah resin asam sulfonat makropori yang umum digunakan untuk reaksi hidrasi olefin pada suhu tinggi dengan menjaga stabilitas termal, nilai ekonomi serta mengurangi limbah. Pada proses sintesis isopropanol ini, propilen menjadi komponen yang lebih ringan dari air. Maka dari itu, pada kolom distilasi ini juga terdapat kondensor (CD-201) dibagian atas kolom distilasi untuk mengembalikan propilen yang tidak bereaksi kedalam kolom. Kondensat yang digunakan pada proses kondensasi ini adalah *cooling water*. Gas yang tidak berhasil terkondensasi akan dibuang melalui *vent gas*. Disamping itu, untuk mendukung proses pemisahan berdasarkan titik didih digunakan *reboiler* (RB-201) untuk menyediakan uap yang berfungsi sebagai *stripping agent*. Produk dari kolom distilasi ini keluar dari bagian bawah berfase cair dengan suhu 202°C mengandung 48% isopropanol dan 52% air. Larutan ini bersifat azeotropik. Maka dari itu, dilakukan proses pemisahan untuk larutan berjenis ini di dalam kolom distilasi ekstraktif (DC-301). Namun sebelum memasuki DC-301 larutan akan mengalami penyesuaian tekanan yang dimana akan melalui *pressure relief valve* hingga tekanannya mendekati 1 atm.

2.3.3 Tahap Pemisahan dan pemurnian

Isopropil alkohol dan air hasil dari proses reaksi di dalam kolom distilasi reaktif (DC-201) bersifat azeotrop. Kondisi ini menyebabkan pemisahan antara kedua komponen tidak bisa menggunakan distilasi biasa. Maka dari itu, pada tahap ini dilakukan proses pemisahan dengan menggunakan kolom distilasi yang mampu memisahkan keduanya dengan efektif, yakni melalui kolom distilasi ekstraktif (DC-301) dengan kondisi operasi kolom bagian atas sebesar 82,35°C, kolom bagian bawah sebesar 110,25°C, serta tekanan 1 atm. Larutan azeotropik isopropanol dan air masuk dari bagian tengah kolom dengan suhu 98,8°C. Sebelum memasuki kolom dilakukan penyesuaian tekanan menggunakan *pressure relief valve* hingga tekanannya mendekati atmosferik. Keluaran bawah disitilasi reaktif (DC-201) yang bersuhu 202°C harus didinginkan terlebih dahulu menggunakan *cooler* (E-201) hingga suhunya menjadi 95,39°C. Pemisahan ini membutuhkan pelarut nonvolatil atau dengan titik didih tinggi, yakni gliserol. Gliserol dengan suhu 30°C diberikan ke stage ke-dua dari kolom pertama secara terus-menerus.

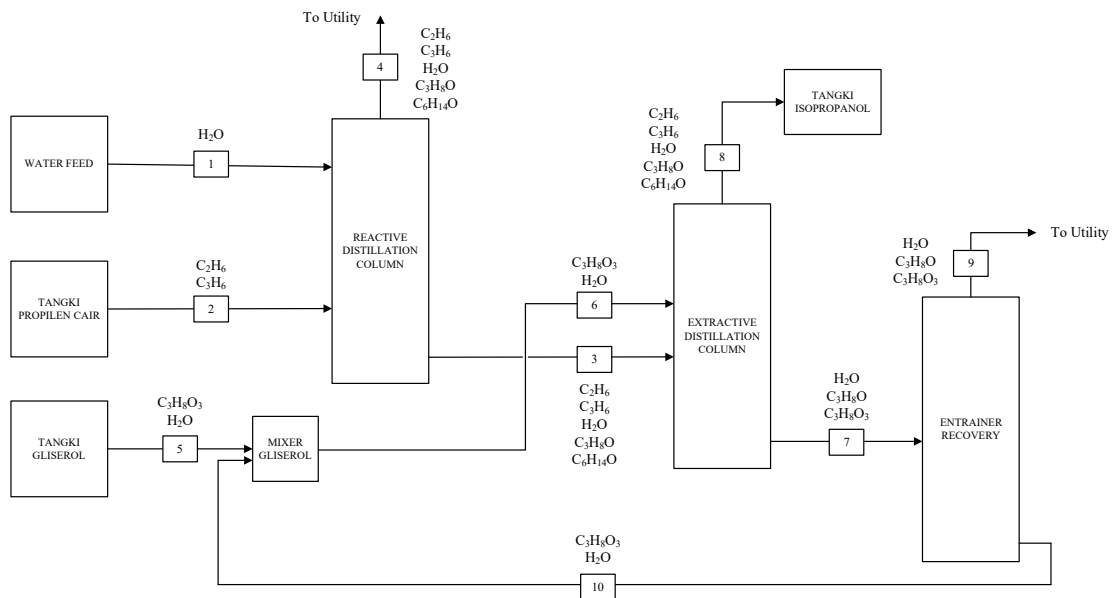
Melalui proses distilasi ini, isopropil alkohol dengan kemurnian 99,7% sesuai standar ASTM dihasilkan dari bagian atas kolom sedangkan bagian bawah kolom merupakan campuran gliserol dan air yang kemudian akan di-*recovery* kembali di proses selanjutnya melalui kolom distilasi *solvent recovery* (DC-302).

Proses pemisahan isopropanol dan air ini dioptimalkan sebaik mungkin, salah satunya melalui pemanfaatan kembali gliserol sebagai *solvent* pemisah. Pemanfaatan kembali gliserol diawali dengan proses pemisahan gliserol dan air didalam *solvent recovery* berprinsip distilasi (DC-302). Kolom distilasi ini bekerja dengan kondisi operasi kolom bagian atas sebesar 146,1 °C, kolom bagian bawah sebesar 233,61°C dan tekanan 0,2 atm. Hasil atas dari kolom distilasi ini adalah uap air yang kemudian akan dilakukan proses kondensasi oleh kondenser (C-302) sebelum kemudian diolah oleh unit utilitas. Sedangkan bagian bawah kolom distilasi adalah gliserol dengan konsentrasi 99,97% yang kemudian didinginkan oleh *cooler* (E-303) hingga bersuhu 50°C sebelum akan di campur kembali dengan *make-up* gliserol pada *mixer* (M-101) dan masuk kembali sebagai *solvent* pada kolom distilasi ekstraktif (DC-301).

2.3.4 Tahap Pengemasan Produk

Produk berupa isopropanol dengan kemurnian 99,7% yang keluar dari kondensor distilasi ekstraktif (CD-301) didinginkan kembali oleh *cooler* (E-401). Kemudian produk dialirkan dengan pompa (P-401) melalui pipa menuju ke tangki penyimpanan produk (T-401). Produk isopropanol akan disimpan dengan kondisi 30°C dan tekanan atmosferik.

2.4 Diagram Alir



Gambar 2.5 Diagram Alir Proses Produksi Isopropanol

2.5 Neraca Massa dan Neraca Panas

Diketahui Kapasitas isopropanol = 18500 ton/tahun

$$= 2335 \text{ kg/jam}$$

Tabel 2.4 Berat Molekul Bahan dan Produk

Berat Molekul	Jumlah	Satuan
C_3H_6	42	kg/kmol
H_2O	18	kg/kmol
C_3H_8	44	kg/kmol
C_3H_8O	60	kg/kmol
$C_6H_{14}O$	102	kg/kmol

Kebutuhan bahan baku

propilen	=	39,689	kmol
komposisi propilen	=	99.6	%
propilen+etana	=	39,848	kmol
komposisi etana	=	0.4	%
etana	=	0.1594	kmol

Maka:

$$\text{Propilen} = 1666,94 \text{ kg}$$

$$\text{Etana} = 4,78 \text{ kg}$$

Mixture = 1671,721 kg

Rasio (kmol) Propilen : Air = 1 : 2.05

Air = 81,36 kmol = 1464,525 kg

2.5.1 Neraca Massa

1. Neraca Massa Distilasi Reaktif (DC-201)

Tabel 2.5 Neraca Massa Distilasi Reaktif (DC-201)

Komponen	BM	Input				Output			
		F1		F2		F3		F4	
		Kmol/ jam	Kg/ jam	Kmol/ jam	Kg/ jam	Kmol/ jam	Kg/ jam	Kmol/ jam	Kg/ jam
Propilen	42	0,0	0,0	39,7	1.666,9	0,0	0,0	0,7	30,6
Isopropanol	60	0,0	0,0	0,0	0,0	38,9	2.333,8	0,0	1,1
Air	18	81,4	1.464,5	0,0	0,0	42,4	763,6	0,0	0,0
DIPE	102	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0	0,0
Etana	44	0,0	0,0	0,2	7,0	0,0	0,0	0,2	7,0
Subtotal		81,4	1.464,5	39,8	1.674,0	81,3	3.099,8	0,9	38,7
Total (kg)		3.138,48				3.138,48			

2. Neraca Massa Distilasi Ekstraktif (DC-102)

Tabel 2.6 Neraca Massa Distilasi Ekstraktif (DC-301)

Komponen	BM	Input				Output	
		F4		F7		F8	
		Kmol/ jam	Kg/ jam	Kmol/ jam	Kg/ jam	Kmol/ jam	Kg/ jam
Propilen	42	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Isopropanol	60	38,9	2.333,8	38,8	2.330,4	0,1	3,4
Air	18	42,4	763,6	0,2	3,1	42,3	760,6
DIPE	102	0,0	2,4	0,0	2,4	0,0	0,0
Etana	30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
solvent	92	18,6	1.713,3	0,0	0,0	18,6	1.713,3
Total		4.813,1		39,0	2.335,9	60,9	2.477,2
		4.813,1					

3. Neraca Massa Entrainer Recovery (DC-302)

Tabel 2.7 Neraca Massa Entrainer Recovery (DC-302)

Komponen	BM	Input				Output	
		F8		F9		F10	
		Kmol/ jam	Kg/ jam	Kmol/ jam	Kg/ jam	Kmol/ jam	Kg/ jam
Isopropanol	60	0,1	3,4	0,1	3,4	0,0	0,0

Komponen	BM	Input		Output			
		F8		F9		F10	
		Kmol/ jam	Kg/ jam	Kmol/ jam	Kg/ jam	Kmol/ jam	Kg/ jam
Air	18	42,3	760,6	42,2	760,5	0,0	0,1
Gliserol	92	18,6	1.713,3	0,9	85,7	17,7	1.627,6
Total			2.477,2	43,2	849,5	17,7	1.627,7
					2.477,2		

4. Neraca Massa *Mixer* (M-101)Tabel 2.8 Neraca Massa *Mixer* (M-101)

Komponen	BM	Input				Output	
		F5		F10		F6	
		Kmol/ jam	Kg/ jam	Kmol/ jam	Kg/ jam	Kmol/ jam	Kg/ jam
Gliserol	92	0,9	85,7	0,0	0,0	0,9	85,7
Recycle Gliserol	92	0,0	0,0	17,7	1.627,6	17,7	1.627,6
Total		85,7	85,7	17,7	1.627,6	18,6	1.713,3
			1.713,9			1.713,9	

2.5.2. Neraca Panas

1. Neraca panas sekitar Distilasi Reaktif (DC-201)

Tabel 2.9 Neraca Panas Distilasi Reaktif (DC-201)

Komponen	Qmasuk (kJ/jam)	Qkeluar (kJ/jam)
Q2	23.176,67	
Q1	30.713,25	
Q5		14.258,96
Q3		1.968.813,05
ΔH_{rx}	282.297,57	
Qr	2.065.306,84	
Qc		310.642,49
Qloss		107.779,83
Total	2.401.494,33	2.401.494,33

2. Neraca panas *Cooler Input* ED (E-201)Tabel 2.10 Neraca Panas *Cooler Input* ED (E-201)

Komponen	Qmasuk (kJ/jam)	Qkeluar (kJ/jam)
Q3	1.483.860,96	0
Q4	0	719.897,92
Qpendingin	0	763.963,04

Total	1.483.860,96	1.483.860,96
--------------	--------------	--------------

3. Neraca panas disekitar Distilasi Ekstraktif (DC-301)

Tabel 2.11 Neraca Panas Distilasi Ekstraktif (DC-301)

Komponen	Qmasuk (kJ/jam)	Qkeluar (kJ/jam)
Q4	1.068.976,14	0
Q8	0	398.430,09
Q6	0	695.726,98
Qr	5.612.292,60	
Qc	0	3.449.159,38
Qloss	0	2.137.952,28
Total	6.681.268,74	6.681.268,74

4. Neraca panas *Cooler Input* ER (E-302)**Tabel 2.12** Neraca Panas *Cooler Input* ER (E-302)

Komponen	Qmasuk (kJ/jam)	Qkeluar (kJ/jam)
Q6	695.726,98	0
Q7	0	352.345,23
Qpendingin	0	343.381,76
Total	695.726,98	695.726,98

5. Neraca panas *Cooler* Isopropanol (E-401)**Tabel 2.13** Neraca Panas *Cooler* Isopropanol (E-401)

Komponen	Qmasuk (kJ/jam)	Qkeluar (kJ/jam)
Q8	398.430,09	0
Q9	0	33.664,94
Qpendingin	0	364.765,15
Total	398.430,09	398.430,09

6. Neraca panas di sekitar *Entrainer Recovery* (DC-301)**Tabel 2.14** Neraca panas *Entrainer Recovery* (DC-301)

Komponen	Qmasuk (kJ/jam)	Qkeluar (kJ/jam)
Q7	352.345,23	0
Q10	0	114.184,89
Q12	0	1.022.418,89
Qr	3.356.028,21	
Qc	0	1.867.079,21
Qloss		704.690,45
Total	3.708.373,43	3.708.373,43

7. Neraca panas *Cooler* Gliserol (E-303)**Tabel 2.15** Neraca panas *Cooler* Gliserol (E-303)

Komponen	Qmasuk (kJ/jam)	Qkeluar (kJ/jam)
Q12	1.022.418,89	0
Q13	0	116.297,15
Qpendingin	0	906.121,74
Total	1.022.418,89	1.022.418,89

8. Neraca panas *Cooler Wastewater* (E-304)**Tabel 2.16** Neraca Panas *Cooler* (E-304)

Komponen	Qmasuk (kJ/jam)	Qkeluar (kJ/jam)
Q10	114.184,89	0
Q11	0	16.815,94
Qpendingin	0	97.368,95
Total	114.184,89	114.184,89

9. Neraca panas *Heater* Umpan Gliserol (E-301)**Tabel 2.17** Neraca Panas *Heater* Umpan Gliserol (E-301)

Komponen	Qmasuk (kJ/jam)	Qkeluar (kJ/jam)
Q14	1.216,74	-
Q15	-	6.120,48
Qpemanas	4.903,74	-
Total	6.120,48	6.120,48

10. Neraca panas *Heater Solvent* (E-305)**Tabel 2.18** Neraca Panas *Heater* Solvent (E-305)

Komponen	Qmasuk (kJ/jam)	Qkeluar (kJ/jam)
Q16	122.409,67	-
Q17	-	349.078,22
Qpemanas	226.668,54	-
Total	349.078,22	349.078,22

2.6 Tata Letak Pabrik dan Pemetaan

2.6.1 Tata Letak Pabrik

Tata letak pabrik merupakan susunan penempatan dari berbagai bagian dalam pabrik, termasuk area kerja karyawan, tempat penyimpanan bahan baku, serta produk yang saling terintegrasi. Perancangan tata letak ini perlu dilakukan secara

optimal agar pemanfaatan area pabrik menjadi efisien, proses produksi dan distribusi berjalan dengan baik, serta aspek keamanan, keselamatan, dan kenyamanan bagi tenaga kerja dapat terjaga.

Perancangan tata letak perlu mempertimbangkan posisi peralatan produksi agar alur proses berjalan lancar serta memenuhi aspek keamanan, keselamatan, dan kenyamanan bagi tenaga kerja. Di luar unit proses utama, fasilitas pendukung seperti gedung perkantoran, bengkel, laboratorium, klinik, kantin, dan pos keamanan perlu ditempatkan pada lokasi strategis yang tidak mengganggu alur distribusi barang maupun pengawasan proses produksi. Secara umum tujuan dan manfaat dari adanya perancangan tata letak fasilitas adalah sebagai berikut :

1. Penggunaan ruang lebih efektif

Penggunaan ruang akan efektif bila mesin-mesin maupun fasilitas yang ada pada pabrik dapat disusun atau diatur sedemikian rupa sehingga jarak antarmesin atau fasilitas dapat seminimal mungkin tanpa mengurangi keleluasan gerak para pekerja. Dengan adanya jarak minimal, akan menghemat area yang digunakan, yang mengakibatkan penghematan biaya juga. Hal ini dikarenakan setiap meter persegi luas lantai akan memberi beban biaya.

2. Menjaga perputaran barang setengah jadi menjadi lebih baik

Perancangan tata letak yang baik akan menjaga perputaran barang setengah jadi agar lebih baik. Proses produksi dapat dikatakan lancar jika bahan melewati proses dengan waktu sesingkat mungkin.

3. Menjaga fleksibilitas susunan mesin dan peralatan. Suatu pabrik akan melakukan perbaikan atau penambahan fasilitas atau bahkan bangunan baru dalam jangka waktu tertentu. Untuk itu, perancangan tata letak harus dapat menjamin atau dapat mempertahankan fleksibilitas dari susunan-susunan mesin dan fasilitas pabrik dari kemungkinan perluasan tersebut.

4. Meminimumkan material handling

Masalah penanganan bahan tentu tidak dapat dipisahkan dari perancangan tata letak. Adanya proses produksi tidak bisa menghindari adanya perpindahan bahan yang memberikan biaya yang tidak sedikit, apalagi bila pergerakan bahan ini tidak efektif, semisal suatu proses operasi yang satu dengan yang lain yang berurutan jaraknya relatif jauh. Hal ini tentunya akan membutuhkan waktu tambahan, sehingga total waktu operasi

suatu produk akan bertambah, yang sejalan juga dengan biaya dalam perpindahan material.

5. Memperlancar proses produksi

Manufaktur akan lebih muda bila dilakukan perancangan tata letak. Dengan adanya beberapa metode, proses produksi akan berjalan sesuai dengan aliran proses yang telah dirancang.

6. Memberikan kemudahan, keamanan, dan kenyamanan bagi pekerja

Untuk menambah kemudahan, keamanan serta kenyamanan bagi para pekerja, maka hal yang perlu diperhatikan dalam perancangan tata letak adalah bagaimana mengatur lingkungan kerja seperti pencahayaan, sirkulasi udara, temperatur, pembuangan limbah, dan sebagainya. Penempatan alat-alat operasi harus dilakukan dengan mempertimbangkan kesehatan dan keselamatan para pekerja.

Hal-hal yang harus diperhatikan dalam perencanaan tata letak pabrik yaitu luas daerah yang tersedia, faktor keamanan untuk mencegah kemungkinan terbakar, instalasi dan utilitas, kemungkinan perluasan pabrik untuk meningkatkan kelancaran operasi, dan transportasi. Secara umum, tata letak pabrik dibagi menjadi beberapa daerah, yaitu :

- Zona Hijau (administrasi/perkantoran, laboratorium, ruang kontrol, dan daerah umum)

Daerah Administrasi atau Perkantoran merupakan pusat kegiatan administrasi dari pabrik. Laboratorium dan ruang kontrol berperan sebagai pusat pengendalian kualitas, kuantitas, dan proses dari suatu bahan yang ingin di produksi. Daerah umum merupakan daerah kegiatan non pabrik, seperti mushola, tempat parkir, kantin, taman, dan lain-lain.

- Zona merah (Daerah proses, utilitas, dan bengkel)

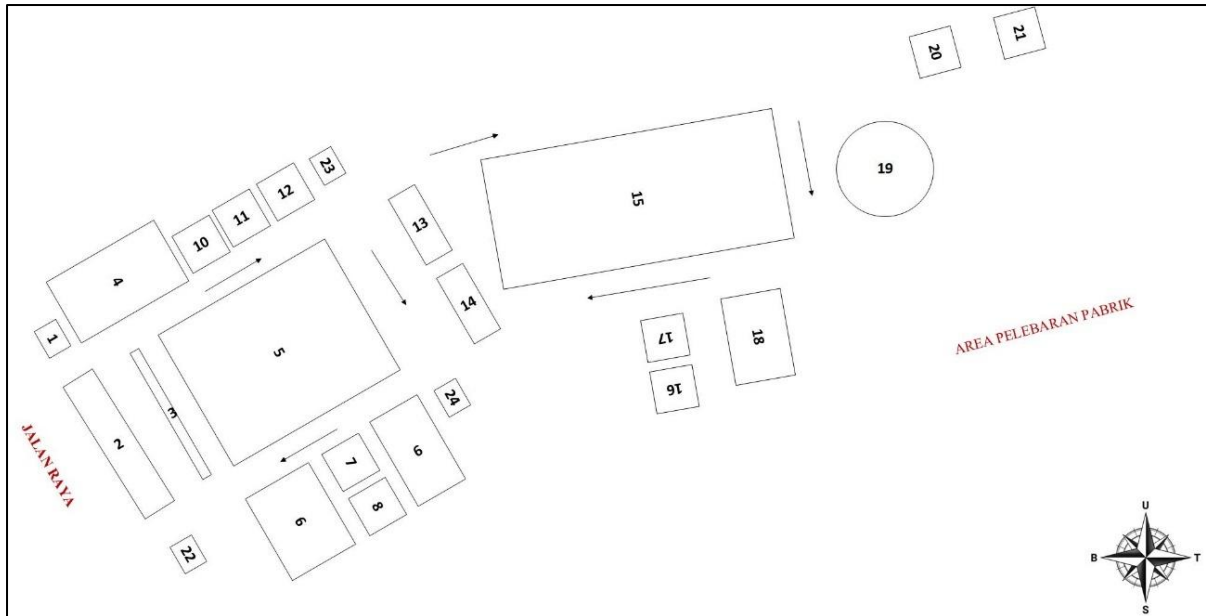
Daerah proses merupakan daerah dimana alat-alat proses dan reaksi utama berlangsung, daerah ini dapat dikategorikan sebagai daerah dengan resiko yang sangat tinggi sehingga perlu mendapat perhatian khusus untuk penempatannya. Utilitas merupakan daerah dimana kegiatan penyediaan air, udara tekan, dan listrik dipusatkan.

Perincian luas tanah bangunan pabrik dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 2.19 Luas Tanah Pabrik Isopropanol

No	Bangunan	Luas (m²)
1	Pos Satpam 1	37.5
2	Taman	1500
3	Titik Kumpul	400
4	Parkiran	2000
5	Kantor	1500
6	Aula	600
7	Masjid	500
8	Perpustakaan	300
9	Mes Karyawan	1750
10	Koperasi	250
11	Poliklinik	300
12	K3 & Fire Safety	450
13	Ruang Kontrol	600
14	Laboratorium	450
15	Area Porses	11000
16	Bengkel	900
17	Unit Penyediaan Energi	2500
18	Lapangan Parkir Kendaraan Berat	3000
19	Tangki Bahan Baku dan Produk	2750
20	Utilitas	3000
21	Pengolahan Limbah	2250
22	Pos Satpam 2	37.5
23	Pos Satpam 3	37.5
24	Pos Satpam 4	37.5
Total		36.150

Tata letak pabrik isopropanol dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.6 Tata Letak Pabrik

Keterangan :

- | | |
|----------------------|----------------------------|
| 1. Pos Satpam 1 | 15. Area Proses |
| 2. Taman | 16. Unit Penyediaan Energi |
| 3. Titik Kumpul | 17. Lapangan Parkir |
| 4. Parkiran | Kendaraan Berat |
| 5. Kantor | 18. Tangki Bahan Baku dan |
| 6. Aula | Produk |
| 7. Masjid | 19. Utilitas |
| 8. Perpustakaan | 20. Pengolahan Limbah |
| 9. Mes Karyawan | 21. Penyimpanan Limbah |
| 10. Koperasi | Sementara |
| 11. K3 & Fire Safety | 22. Pos Satpam 2 |
| 12. Ruang Kontrol | 23. Pos Satpam 3 |
| 13. Laboratorium | 24. Pos Satpam 4 |
| 14. Bengkel | |

Pemanfaatan lahan pabrik direncanakan dengan mempertimbangkan kebutuhan operasional, keselamatan, serta kemungkinan pengembangan di masa mendatang. Dari total luas lahan sebesar 75.000 m², area yang digunakan untuk bangunan dan fasilitas utama pabrik adalah sebesar 36.150 m² atau sekitar 48,2% dari total lahan.

Area ini meliputi area proses, utilitas, tangki penyimpanan, serta bangunan penunjang operasional pabrik.

Sisa lahan sebesar 3.615 m² atau sekitar 10% dimanfaatkan untuk jalan internal, ruang terbuka, buffer zone keselamatan, serta area pendukung lainnya. Penyediaan ruang ini penting untuk menjamin kelancaran mobilitas kendaraan industri, menjaga jarak aman antarunit proses, serta mendukung aspek keselamatan dan lingkungan di area pabrik.

Sebagian lahan lainnya dialokasikan sebagai area pengembangan pabrik seluas 35.235 m² atau sekitar 46,9% dari total lahan. Area ini disediakan untuk mengantisipasi ekspansi kapasitas produksi, penambahan unit proses, maupun pembangunan fasilitas baru di masa mendatang tanpa mengganggu tata letak fasilitas utama yang telah ada.

2.6.2 Tata letak Peralatan Proses

Tata letak alat proses merupakan penyusunan letak peralatan proses pabrik sehingga lebih efisien. Dalam perancangan tata letak peralatan proses terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Aliran Bahan Baku dan Produk

Penyusunan alur aliran bahan baku dan produk yang tepat dapat mempengaruhi kelancaran dan keamanan proses produksi serta mempengaruhi keuntungan ekonomis pabrik. Evaluasi pipa juga harus diperhatikan, untuk pipa yang berada diatas tanah perlu dipasang pada ketinggian 3 meter atau lebih, sedangkan pipa pada permukaan tanah dirancang sedemikian rupa agar lalu lintas pekerja tidak terganggu.

2. Aliran Udara

Aliran udara di dalam dan di sekitar area proses perlu diperhatikan. Hal ini bertujuan untuk menghindari terjadinya stagnasi udara pada suatu tempat yang dapat mengakibatkan akumulasi bahan kimia yang berbahaya, disamping itu perlu diperhatikan juga arah hembusan angin.

3. Cahaya

Penerangan pada seluruh pabrik harus memadai, selain itu perlu diberikan penerangan tambahan pada tempat-tempat proses yang berbahaya atau beresiko tinggi.

4. Lalu Lintas Manusia

Dalam perancangan tata letak peralatan, perlu diperhatikan lalu lintas pekerja sehingga dapat meningkatkan efisiensi pekerjaan dan waktu serta meningkatkan keamanan pekerja. Selain itu perlu diperhatikan agar seluruh peralatan proses dapat dicapai dengan mudah oleh para pekerja sehingga apabila terjadi gangguan ataupun kerusakan akan mudah diperbaiki.

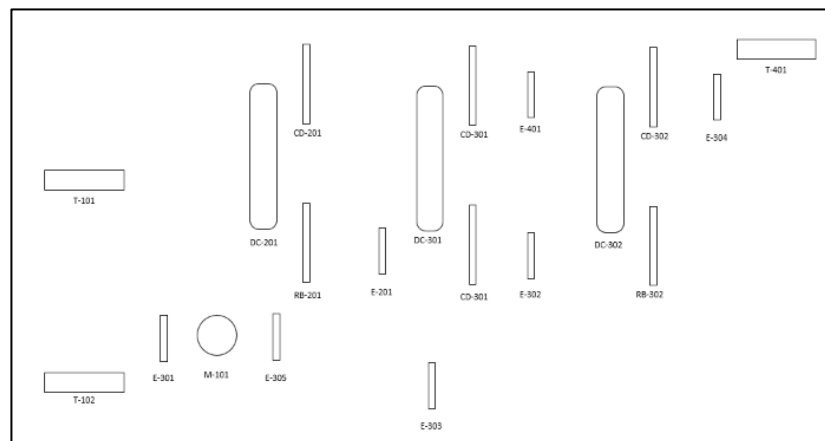
5. Tata Letak Alat Proses

Dalam menempatkan alat-alat proses pada pabrik, diusahakan agar dapat menekan biaya operasi dan menjamin kelancaran serta keamanan produksi pabrik sehingga dapat menguntungkan dari segi ekonomi.

6. Jarak Antar Alat Proses

Penyusunan letak alat proses harus diperhatikan sehingga jarak antara alat satu dengan yang lainnya memiliki ruang yang cukup. Untuk alat proses dengan operasi tekanan dan suhu yang tinggi, sebaiknya dipisahkan dari alat proses yang lainnya, sehingga apabila terjadi ledakan atau kebakaran pada alat tersebut tidak membahayakan alat-alat proses lainnya.

Tata letak peralatan pabrik isopropanol akan dirancang seperti pada gambar berikut ini



Gambar 2.7 Tata Letak Peralatan Pabrik

Keterangan gambar :

E : *Heat Exchanger*

CD : *Condensor*

H : *Heater*

M : *Mixer*

CD : Menara Destilasi

R : *Reboiler*

T : *Tangki*