

BAB II

DESKRIPSI PROSES

2.1 Spesifikasi Bahan Baku dan Produk

2.1.1 Spesifikasi Bahan Baku Utama

1. *Refined Glycerol*

Bahan baku utama pabrik epiklorohidrin berupa gliserol murni yang diperoleh dari hasil samping PT Wilmar Indonesia dengan spesifikasi sebagai berikut.

Tabel 2.1 Spesifikasi Bahan Baku Utama *Refined Glycerol*

SPESIFIKASI	STANDAR
Rumus Molekul	$C_3H_8O_3$ ($C_3H_5(OH)_3$)
Berat Molekul	92,09 g/mol
Bentuk	Cair
Warna	Tidak berwarna
Kemurnian	Min. 99,7%
Kadar air	Maks. 0,3%
Kadar Cl	Maks. 10 ppm
Kadar Pb	Maks. 5 ppm
Kadar SO_4^{2-}	Maks. 20 ppm
Kadar asam lemak dan ester	Maks. 1 mL dari 0,5 N NaOH

2. Asam Klorida

Bahan baku lainnya dalam proses hidroklorinasi gliserol dengan gliserol murni yaitu asam klorida yang diperoleh dari PT Pash Mitra Mandiri dengan spesifikasi sebagai berikut.

Tabel 2.2 Spesifikasi Bahan Baku Utama Asam Klorida

SPESIFIKASI	STANDAR
Rumus Molekul	HCl
Berat Molekul	36,46 g/mol
Bentuk	Cair
Warna	Tidak berwarna
pH	< 1 pada 20°C

SPEKIFIKASI	STANDAR
Titik Lebur	-30°C
Titik Didih	-85°C
Densitas	1,2 g/cm ³ pada 20°C
Viskositas	2,3 mm ² /s pada 20°C

3. Asam Heksanoat

Asam heksanoat berfungsi sebagai katalis pada proses hidroklorinasi gliserol. Diimpor dari PT Xiamen Ditai Chemicals Co., Ltd di China dengan spesifikasi sebagai berikut.

Tabel 2.3 Spesifikasi Bahan Baku Utama Asam Heksanoat

SPEKIFIKASI	STANDAR
Rumus Molekul	C ₆ H ₁₂ O ₂
Berat Molekul	116,16 g/mol
Bentuk	Cair
Warna	Tidak berwarna sampai kuning muda
Titik Lebur	-3°C
Titik Didih	202-203°C
Densitas	0,92 g/ml pada 20 °C
Viskositas	3,23 cP pada 20 °C

4. Natrium Hidroksida

Bahan ini digunakan sebagai campuran pada reaksi deklorinasi yang diperoleh dari PT Asahimas Chemical Indonesia dengan spesifikasi sebagai berikut.

Tabel 2.4 Spesifikasi Bahan Baku Utama Natrium Hidroksida

SPEKIFIKASI	STANDAR
Rumus Molekul	NaOH
Berat Molekul	40,00 g/mol
Bentuk	Padatan
Warna	Putih
pH	14 pada 100 g/l pada 20°C

SPESIFIKASI	STANDAR
Titik Lebur	318°C
Titik Didih	1.390°C
Densitas	2,13 g/cm ³ pada 20°C
Kelarutan dalam air	1.090 g/l pada 20°C

2.1.2 Spesifikasi Bahan Baku Tambahan

1. Air

Merupakan bahan baku pendukung sebagai pelarut NaOH dan asam heksanoat yang diperoleh dari PT Tirta Krakatau Industri dengan spesifikasi sebagai berikut.

Tabel 2.5 Spesifikasi Bahan Baku Tambahan Air

SPESIFIKASI	STANDAR
Rumus Molekul	H ₂ O
Berat Molekul	18,02 g/mol
Bentuk	Cair
Warna	Tidak berwarna
Ph	7
Titik Lebur	0,0°C
Titik Didih	100,0°C
Densitas	1,0 g/cm ³ pada 25°C

2. Steam

Steam digunakan untuk memenuhi kebutuhan pemanasan pada aliran dingin di alat penukar panas dan unit pemanas proses. Penggunaannya didasarkan pada kapasitas perpindahan kalor yang tinggi, mudah dikontrol, dan mampu memberikan pemanasan stabil. Steam yang digunakan berasal dari unit utilitas.

2.1.3 Spesifikasi Produk Utama

1. Epiklorohidrin

Produk utama berupa epiklorohidrin dengan kemurnian hingga 99,9% dengan spesifikasi sebagai berikut.

Tabel 2.6 Spesifikasi Produk Utama Epiklorohidrin

SPESIFIKASI	STANDAR
Rumus Molekul	C_3H_5ClO
Berat Molekul	92,52 g/mol
Bentuk	Cair
Warna	Tidak berwarna
Kemurnian	Min. 99,9%
Kandungan air	Maks. 0,01%
Densitas	1,17 g/cm ³ pada 20°C

2.1.4 Spesifikasi Produk Samping

a. Natrium Klorida

Merupakan salah satu produk samping yang terbentuk pada tahap dehidroklorinasi di Reactive Distillation Column (RD-01) dengan dengan spesifikasi sebagai berikut.

Tabel 2.7 Spesifikasi Produk Samping Natrium Klorida

SPESIFIKASI	STANDAR
Rumus Molekul	NaCl
Berat Molekul	58,44 g/mol
Bentuk	Padat
Warna	Tidak berwarna
pH	7
Titik Lebur	801°C
Titik Didih	1.413°C
Densitas	2,16 g/cm ³ pada 25°C
Kelarutan dalam air	317l pada 20°C

b. Air

Merupakan salah satu produk samping yang terbentuk pada tahap dehidroklorinasi di Reactive Distillation Column (RD-01) dengan dengan spesifikasi sebagai berikut.

Tabel 2.8 Spesifikasi Produk Samping Air

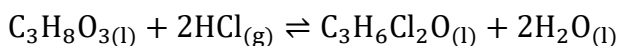
SPESIFIKASI	STANDAR
Rumus Molekul	H ₂ O
Berat Molekul	18,02 g/mol
Bentuk	Cair
Warna	Tidak berwarna
pH	7
Titik Lebur	0,0°C
Titik Didih	100,0°C
Densitas	1,0 g/cm ³ pada 25°C

2.2 Konsep Proses

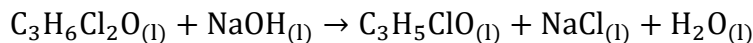
2.2.1 Dasar Reaksi

Epiklorohidrin diproduksi melalui proses hidroklorinasi dan dehidroklorinasi. Proses hidroklorinasi menggunakan HCl dan katalis asam heksanoat, menghasilkan DCH dan sebagian MCH. Sedangkan proses dehidroklorinasi menggunakan bahan berupa DCH hasil hidroklorinasi dan NaOH, menghasilkan ECH, NaCl, dan sebagian air. Kedua reaksi bersifat *reversible* dan eksotermis.

Reaksi pembentukan diklorohidrin

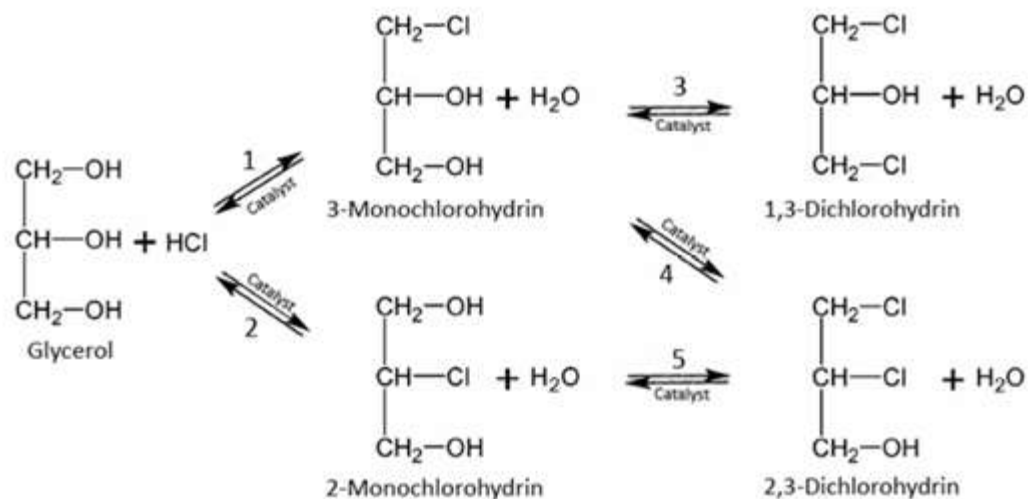


Reaksi pembentukan epiklorohidrin

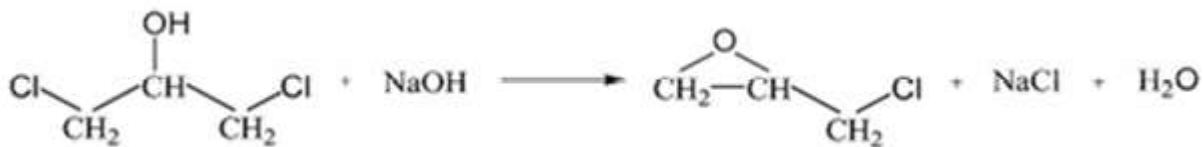


2.2.2 Mekanisme Reaksi

Mekanisme reaksi pembuatan epiklorohidrin dari gliserol melibatkan dua tahap utama. Pertama, reaksi hidroklorinasi gliserol menjadi diklorohidrin. Kedua, reaksi dehidroklorinasi diklorohidrin menjadi epiklorohidrin. Mekanisme reaksi tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.1 dan 2.2.



Gambar 2.1 Mekanisme Reaksi Hidroklorinasi Gliserol (Almena & Martin, 2015)



Gambar 2.2 Mekanisme Reaksi Dehidroklorinasi Diklorohidrin (Almena & Martin, 2015)

2.2.3 Fase Reaksi

Reaksi hidroklorinasi berlangsung pada fase cair antara gliserol (dengan katalis asam heksanoat) dan gas HCl yang dibubblod menggunakan sparger. Reaksi dijalankan dalam SBSTR secara *semi-batch* dan bersifat eksoterm yang ditandai dengan nilai ΔH negatif. Reaksi dehidroklorinasi juga berlangsung pada fase cair di dalam *Reactive Distillation Column* dan bersifat eksoterm yang ditandai dengan nilai ΔH negatif.

2.2.4 Kondisi Operasi

Proses hidroklorinasi dilakukan didalam SBSTR dengan mengalirkan HCl anhidrat dalam bentuk gelembung dengan suhu sekitar 110°C dan tekanan 7,5 atm dengan waktu tinggal 3 jam. Reaktor dilengkapi dengan jaket pendingin untuk menjaga kondisi isothermal untuk mencegah kenaikan temperatur yang dapat menurunkan selektivitas pembentukan diklorohidrin.

Proses dehidroklorinasi dilakukan pada suhu 84°C dan tekanan vakum 0,5 atm. Kondisi tersebut mendukung proses *azeotropic distillation* antara epiklorohidrin dan air sehingga produk

epiklorohidrin yang terbentuk dapat segera diuapkan dan dipisahkan dari campuran reaksi. Pengeluaran produk secara kontinu ini sangat penting untuk mencegah reaksi lanjutan maupun degradasi epiklorohidrin akibat kontak terlalu lama dengan air dan basa kuat (NaCl).

2.2.5 Tinjauan Thermodinamika

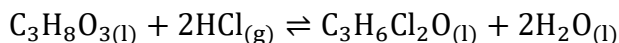
2.2.5.1 Panas Reaksi

Tinjauan terhadap panas reaksi (ΔH°_r) dilakukan untuk menentukan apakah reaksi yang terjadi dalam proses bersifat eksotermis atau endotermis. Penentuan ini dilakukan dengan menghitung selisih antara panas pembentukan standar, yaitu 25°C dan tekanan 1 atm (Yaws, 1999).

Tabel 2.9 Harga Panas Pembentukan (ΔH°_f) Tiap Komponen Reaksi Hidroklorinasi

Komponen	ΔH°_f (kJ/mol)
C ₃ H ₈ O ₃	-582,80
HCl	-92,30
C ₃ H ₆ Cl ₂ O	-129,70
H ₂ O	-241,80

Reaksi hidroklorinasi gliserol



$$\Delta H^\circ_{f\ 298K} = \Delta H^\circ_{f\ \text{produk}} - \Delta H^\circ_{f\ \text{reaktan}}$$

$$\Delta H^\circ_{f\ 298K} = (\Delta H^\circ_{f\ \text{C}_3\text{H}_6\text{Cl}_2\text{O}} + \Delta H^\circ_{f\ \text{H}_2\text{O}}) - (\Delta H^\circ_{f\ \text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3} + \Delta H^\circ_{f\ \text{HCl}})$$

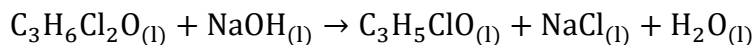
$$\Delta H^\circ_{f\ 298K} = ((-129,70) + (-241,80)) - ((-582,80) + (-92,30))$$

$$\Delta H^\circ_{f\ 298K} = -303,6\ \text{kJ/mol}$$

Tabel 2.10 Harga Panas Pembentukan (ΔH°_f) Tiap Komponen Reaksi Dihidroklorinasi

Komponen	ΔH°_f (kJ/mol)
C ₃ H ₆ Cl ₂ O	-129,70
NaOH	-425,60
C ₃ H ₅ ClO	-107,80
NaCl	-411,20
H ₂ O	-241,80

Reaksi dehidroklorinasi DCH



$$\Delta H^\circ_{f\ 298K} = \Delta H^\circ_{f\ \text{produk}} - \Delta H^\circ_{f\ \text{reaktan}}$$

$$\Delta H^\circ_{f\ 298K} = (\Delta H^\circ_{f\ \text{C}_3\text{H}_5\text{ClO}} + \Delta H^\circ_{f\ \text{NaCl}} + \Delta H^\circ_{f\ \text{H}_2\text{O}}) - (\Delta H^\circ_{f\ \text{C}_3\text{H}_6\text{Cl}_2\text{O}} + \Delta H^\circ_{f\ \text{NaOH}})$$

$$\Delta H^\circ_{f\ 298K} = ((-107,80) + (-411,20) + (-241,80)) - ((-129,70) + (-425,60))$$

$$\Delta H^\circ_{f\ 298K} = -205,5\ \text{kJ/mol}$$

Harga dari panas pada kedua reaksi bernilai negatif ($\Delta H^\circ_r < 0$) yang artinya pembentukan klorohidrin dan epiklorohidrin berlangsung secara eksotermis atau melepaskan panas untuk mempertahankan suhu reaksi.

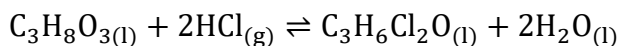
2.2.5.2 Energi Gibbs

Reaksi hidroklorinasi dan dehidroklorinasi pada pembuatan epiklorohidrin perlu dikaji untuk mengetahui apakah reaksi tersebut berlangsung secara spontan atau tidak. Penentuan sifat spontanitas reaksi dilakukan melalui perhitungan energi bebas Gibbs (Yaws, 1999) sebagai berikut.

Tabel 2.11 Harga Energi Gibbs (ΔG°_f) Masing-Masing Komponen Reaksi Hidroklorinasi

Komponen	ΔG°_f (kJ/mol)
$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	-448,49
HCl	-95,30
$\text{C}_3\text{H}_6\text{Cl}_2\text{O}$	-83,09
H_2O	-228,60

Reaksi hidroklorinasi gliserol



$$\Delta G^\circ_{298K} = \Delta G^\circ_{f\ \text{produk}} - \Delta G^\circ_{f\ \text{reaktan}}$$

$$\Delta G^\circ_{298K} = (\Delta G^\circ_{f\ \text{C}_3\text{H}_6\text{Cl}_2\text{O}} + \Delta G^\circ_{f\ \text{H}_2\text{O}}) - (\Delta G^\circ_{f\ \text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3} + \Delta G^\circ_{f\ \text{HCl}})$$

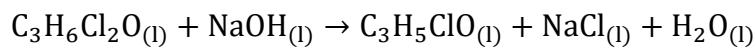
$$\Delta G^\circ_{298K} = ((-83,09) + (-228,60)) - ((-448,49) + (-95,30))$$

$$\Delta G^\circ_{298K} = +232,1\ \text{kJ/mol}$$

Tabel 2.12 Harga Energi Gibbs (ΔG°_f) Masing-Masing Komponen Reaksi Dihidroklorinasi

Komponen	ΔG°_f (kJ/mol)
$C_3H_6Cl_2O$	-83,09
NaOH	-379,50
C_3H_5ClO	-36,74
NaCl	-384,10
H_2O	-228,60

Reaksi dehidroklorinasi DCH



$$\Delta G^\circ_{298K} = \Delta G^\circ_f \text{ produk} - \Delta G^\circ_f \text{ reaktan}$$

$$\Delta G^\circ_{298K} = (\Delta G^\circ_f C_3H_5ClO + \Delta G^\circ_f NaCl + \Delta G^\circ_f H_2O) - (\Delta G^\circ_f C_3H_6Cl_2O + \Delta G^\circ_f NaOH)$$

$$\Delta G^\circ_{298K} = ((-36,74) + (-384,10) + (-228,60)) - ((-83,09) + (-379,50))$$

$$\Delta G^\circ_{298K} = -186,85 \text{ kJ/mol}$$

Berdasarkan perhitungan, didapatkan nilai energi bebas Gibbs proses hidroklorinasi bernilai +232,1 kJ/mol ($\Delta G^\circ_f > 0$) yang menandakan bahwa reaksi berjalan tidak spontan dan tidak menguntungkan, serta terdapat kecenderungan kesetimbangan berjalan ke arah reaktan. Sedangkan nilai energi bebas Gibbs proses dehidroklorinasi bernilai -186,85 kJ/mol ($\Delta G^\circ_f < 0$) yang menandakan bahwa reaksi berjalan secara spontan dan menguntungkan, serta terdapat kecenderungan kesetimbangan berjalan ke arah produk.

2.2.5.3 Kondisi Kesetimbangan Reaksi

Nilai konstanta kesetimbangan reaksi (K) menunjukkan kecenderungan arah berlangsungnya suatu reaksi kimia. Apabila nilai K kurang dari satu, maka reaksi akan cenderung bergerak ke arah reaktan. Sedangkan jika nilai K lebih dari satu, maka reaksi akan cenderung bergerak ke arah produk (Smith, et al., 1950).

Perhitungan konstanta kesetimbangan reaksi hidroklorinasi menurut Smith et al. (1950) persamaan 13.11b sebagai berikut.

$$\ln K_{298K} = -\frac{\Delta G^\circ}{RT}$$

$$\ln K_{298K} = -\frac{232,1 \text{ J/mol}}{8,314 \text{ J/mol.K} \times 298 \text{ K}}$$

$$\ln K_{298K} = -0,095$$

$$K_{298K} = 0,91$$

Sedangkan perhitungan konstanta kesetimbangan reaksi dehidroklorinasi menurut Smith et al. (1950) persamaan 13.11b sebagai berikut.

$$\ln K_{298K} = -\frac{\Delta G^\circ}{RT}$$

$$\ln K_{298K} = -\frac{(-186,85 \text{ J/mol})}{8,314 \text{ J/mol.K} \times 298 \text{ K}}$$

$$\ln K_{298K} = 0,078$$

$$K_{298K} = 1,07$$

Nilai K dengan suhu 25°C (298°K) pada reaksi hidrokloridasi sebesar 0,91 yang menandakan bahwa laju reaksi bergerak ke arah kiri (reaktan). Supaya laju reaksi bergerak ke arah kanan (produk), maka perlu menggeser ke arah kanan dengan mengkondisikan reaktan secara berlebih serta menaikkan tekanan hingga 7,5 atm berdasarkan prinsip Le Chatelier. Sedangkan nilai K dengan suhu 25°C (298°K) pada reaksi dehidroklorinasi sebesar 1,07 yang menandakan reaksi bergerak ke arah kanan (produk).

2.2.6 Tinjauan Kinetika Reaksi

Analisis kinetika reaksi dilakukan untuk menentukan laju pembentukan produk serta parameter desain reaktor. Berdasarkan referensi dari Almena, A., & Martín, M. (2016), untuk menyesuaikan kondisi operasi pada tekanan tinggi dan katalis yang berbeda, perhitungan laju reaksi disesuaikan dengan *adjustable parameter* (θ_p).

$$K' = K_1 \times \theta_p$$

$$K' = 3,24 \times 10^{-4} \cdot (8,5 \times 10^{-4})^{-1}$$

$$K' = 0,381 \text{ L}^2/\text{mol}^2 \cdot \text{s}$$

Sehingga laju reaksi pada suhu 110°C (383°K) dan tekanan 7,5 atm menggunakan rumus sebagai berikut.

$$r_{DCH} = K' \times C_{cat} \times C_{HCl} \times C_{gly}$$

$$r_{DCH} = 0,381 \times 0,844 \times 0,10 \times 10,55$$

$$r_{DCH} = 0,339 \text{ L/mol.s}$$

Perhitungan laju reaksi pada proses dehidroklorinasi mengikuti persamaan Arrhenisu yang dimodifikasi berdasarkan persamaan (20) oleh Almena, A., & Martín, M. (2016), disesuaikan dengan kondisi operasi pada suhu 90°C (363°K) sebagai berikut.

$$r_{ECH} = A_i \cdot e^{(-Ea/RT)}$$

$$r_{ECH} = 8,97 \times 10^{20} \cdot e^{(-123200/(8,314)(363))}$$

$$r_{ECH} = 1,675 \text{ L/mol.s}$$

2.3 Langkah Proses

Proses produksi epiklorohidrin dari gliserol melibatkan serangkaian tahapan yang terintegrasi, meliputi persiapan bahan baku, reaksi hidroklorinasi, pemurnian produk melalui distilasi dan separasi, dehidroklorinasi dan separasi, serta penyimpanan produk akhir. Berikut merupakan uraian lengkap dari masing-masing tahapan proses tersebut.

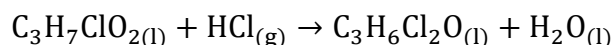
2.3.1 Persiapan Bahan Baku

Gliserol terlebih dahulu dipanaskan menggunakan *heat exchanger* (HE-01) hingga mencapai suhu 150°C, kemudian dicampur dengan asam heksanoat di dalam *static inline mixer* (SIM-01). Penambahan asam heksanoat pada tahap ini berfungsi sebagai katalis homogen yang meningkatkan laju reaksi hidroklorinasi gliserol. Mekanisme katalisis ini berlangsung melalui pembentukan gugus ester intermediat antara asam karboksilat dan gugus hidroksil gliserol, yang selanjutnya bereaksi lebih cepat dengan HCl dibandingkan reaksi langsung antara gliserol dan HCl tanpa katalis, sehingga meningkatkan konversi dan selektivitas pembentukan diklorohidrin. Setelah pencampuran, campuran didinginkan hingga suhu 100°C untuk menyesuaikan kondisi termal sebelum diumpankan ke dalam reaktor, sekaligus menghindari reaksi samping akibat suhu yang terlalu tinggi pada tahap awal reaksi.

Bahan baku HCl dipersiapkan dengan menaikkan tekanan secara bertahap hingga 7,5 atm menggunakan dua *stage* kompresor (COMP-01 dan COMP-02) yang dilengkapi *intercooler* (ICL-01 dan ICL-02) di antara tiap tahap kompresi. Sistem kompresi bertingkat dipilih untuk membatasi kenaikan suhu gas akibat kompresi sehingga risiko dekomposisi termal HCl dan pembebanan berlebih pada peralatan dapat dihindari. Sedangkan NaOH terlebih dahulu dilarutkan dengan air di dalam *storage tank* (ST-01) sebelum digunakan pada reaksi dehidroklorinasi di *reactive distillation column* (RD-01).

2.3.2 Hidroklorinasi Gliserol dan Separasi DCH

Campuran gliserol dan asam heksanoat yang telah dipersiapkan dimasukkan ke dalam reaktor berpengaduk bersama dengan gas HCl. Reaktor dioperasikan pada tekanan 7,5 atm dan suhu 110°C selama 3 jam sehingga sistem beroperasi secara *semi-batch*. Pemilihan tekanan operasi yang relatif tinggi dimaksudkan untuk meningkatkan kelarutan gas HCl dalam fase cair, sehingga kontak antara HCl dan gliserol menjadi lebih optimal dan laju reaksi meningkat. Adapun suhu 110°C dipilih sebagai kondisi optimum yang cukup tinggi untuk mempercepat laju reaksi hidroklorinasi tanpa memicu reaksi samping seperti polimerisasi gliserol atau dekomposisi diklorohidrin yang dapat menurunkan selektivitas produk. Gas HCl kemudian diumpankan ke dalam reaktor secara kontinu dengan sistem *gas purge*. Penggunaan *gas purge* dimaksudkan untuk menjaga kestabilan aliran dan tekanan umpan HCl secara terus-menerus, mencegah terjadinya aliran balik (*back-flow*) dari reaktor menuju jalur pemipaan gas, serta memastikan tidak ada akumulasi udara atau uap air yang dapat memicu reaksi samping maupun korosi pada peralatan. Reaksi hidroklorinasi berlangsung sebagai berikut.

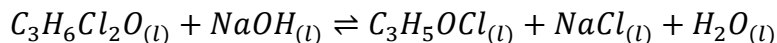


Setelah reaksi berlangsung, campuran hasil reaktor dipanaskan terlebih dahulu hingga suhu 40,3°C sebelum dipisahkan pada *packed distillation column* (D-01). Pada D-01, DCH dan air dipisahkan dari gliserol yang tidak bereaksi serta sebagian asam heksanoat, yang selanjutnya di *recycle* kembali menuju reaktor untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan bahan baku. Adapun HCl sisa yang tidak bereaksi akan menguap dan dikeluarkan melalui *vent*. Pengeluaran HCl sisa ini perlu dilakukan karena keberadaan HCl berlebih pada aliran DCH dapat mengganggu kesetimbangan stoikiometri NaOH pada tahap dehidroklorinasi selanjutnya, memicu korosi pada peralatan hilir yang tidak dirancang untuk kondisi asam kuat, serta menurunkan kemurnian produk epiklorohidrin yang dihasilkan.

2.3.3 Dehidroklorinasi dan Separasi ECH

DCH dan air hasil pemisahan D-01 dicampurkan dengan larutan NaOH di dalam SIM-02 hingga mencapai suhu akhir 27,3°C dan tekanan 1 atm. Pencampuran pendahuluan pada SIM-02 sebelum umpan memasuki RD-01 bertujuan untuk menghomogenkan reaktan serta menurunkan suhu campuran ke kondisi yang lebih terkendali, sehingga reaksi dehidroklorinasi pada kolom dapat berlangsung secara bertahap dan tidak terjadi lonjakan suhu lokal akibat reaksi eksotermis yang berlangsung tiba-tiba. Campuran selanjutnya diumpankan ke RD-01, tempat reaksi dan

pemisahan berlangsung secara simultan pada kondisi operasi suhu 83,7°C dan tekanan 0,5 atm. Pengoperasian pada tekanan vakum ini dipilih untuk menurunkan titik didih ECH sehingga produk dapat menguap dan segera terpisah dari fase cair begitu terbentuk. Kondisi ini juga membatasi waktu tinggal ECH pada suhu operasi, sehingga risiko reaksi hidrolisis lanjut ECH menjadi produk samping seperti glisidol dapat diminimalkan. Reaksi dehidroklorinasi yang terjadi sebagai berikut.



ECH yang terbentuk akan menguap menjadi produk atas bersama dengan air dan sedikit asam heksanoat yang terbawa. Sementara itu, NaCl, sisa NaOH yang tidak bereaksi, serta sisa gliserol keluar sebagai produk bawah yang selanjutnya dialirkan menuju unit pengolahan limbah. Produk atas RD-01 kemudian didinginkan pada *cooler* (COL-02) dari suhu 82,4°C menjadi 69,7°C sebelum dipisahkan lebih lanjut pada *packed distillation column* (D-02). Pada D-02, ECH dan asam heksanoat dipisahkan dari kandungan air guna menurunkan kadar air dalam produk. ECH bersama asam heksanoat keluar sebagai produk bawah, sedangkan air keluar sebagai produk atas yang selanjutnya dialirkan menuju unit utilitas untuk diolah kembali.

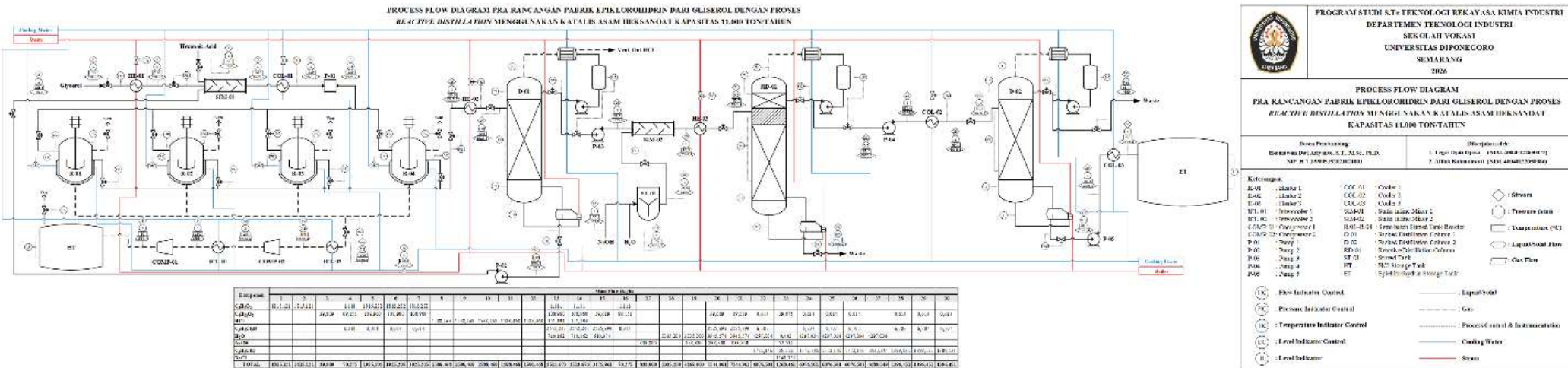
ECH yang terbentuk akan menguap menjadi produk atas (*top product*) bersama dengan air dan sedikit asam heksanoat yang terbawa. Sementara itu, NaCl, sisa NaOH yang tidak bereaksi, serta sisa gliserol keluar sebagai produk bawah (*bottom product*) yang selanjutnya dialirkan menuju unit pengolahan limbah. Produk atas RD-01 kemudian didinginkan pada *cooler* (COL-02) dari suhu 82,4°C menjadi 69,7°C sebelum dipisahkan lebih lanjut pada *packed distillation column* (D-02). Pada D-02, ECH dan asam heksanoat dipisahkan dari kandungan air guna menurunkan kadar air dalam produk. ECH bersama asam heksanoat keluar sebagai produk bawah, sedangkan air keluar sebagai produk atas yang selanjutnya dialirkan menuju unit utilitas untuk diolah kembali.

Penyimpanan Produk

Produk bawah dari D-02 selanjutnya didinginkan dari suhu 81,5°C hingga 30°C sebelum disimpan dalam tangki penyimpanan (ET). Pendinginan ini dilakukan untuk menjaga stabilitas produk serta keamanan penyimpanan pada suhu ruang. Tangki penyimpanan dilengkapi dengan sistem pengendalian proses berupa *level indicator control* (LIC) yang berfungsi memantau ketinggian cairan di dalam tangki secara kontinu, sehingga volume produk dapat terpantau dan risiko *overflow* maupun kekurangan volume operasi dapat dicegah.

2.4 Diagram Alir

Proses produksi epiklorohidrin secara lengkap ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Process Flow Diagram Pabrik Epiklorohidrin

2.5 Neraca Massa dan Neraca Panas

Diketahui:

$$\begin{aligned}\text{Kapasitas produksi epiklorohidrin} &= 11.000 \text{ ton/tahun} \\ &= 1396,45 \text{ kg/jam}\end{aligned}$$

Tabel 2.13 Data Berat Molekul

Berat Molekul	Jumlah	Satuan
Gliserol	92,09	gram/mol
Asam Heksanoat	116,16	gram/mol
HCl	36,46	gram/mol
Diklorohidrin	128,98	gram/mol
H ₂ O	18,015	gram/mol
NaOH	40	gram/mol
Epiklorohidrin	92,53	gram/mol
NaCl	58,44	gram/mol

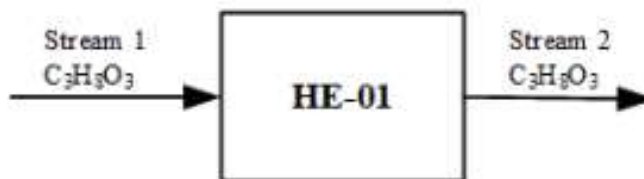
Tabel 2.14 Komposisi Target Produk

Komposisi	Jumlah (Kg/jam)	Jumlah (Kmol/jam)
Asam Heksanoat	0,614	0,005
Diklorohidrin	6,707	0,052
Epiklorohidrin	1389,131	15,013
TOTAL	1396,451	15,07

2.5.1 Neraca Massa

1. Heater - 01 (HE-01)

Berikut merupakan *block diagram* neraca massa dari Heater-01 dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Block Diagram* Neraca Massa Heater - 01

Fungsi: Memanaskan gliserol

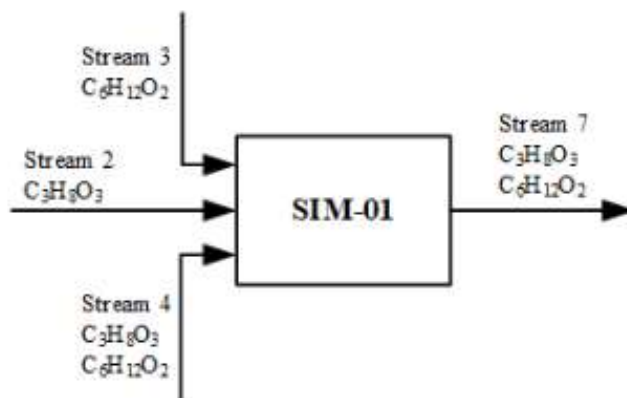
Berikut merupakan neraca massa dari Heater-01 dapat dilihat pada Tabel 2.15.

Tabel 2.15 Neraca Massa Heater – 01

Komponen	Input	Output
	Massa (kg/jam)	Massa (kg/jam)
C3H8O3	1815,12	1815,12
TOTAL	1815,12	1815,12

2. Static Inline Mixer – 01 (SIM-01)

Berikut merupakan *block diagram* neraca massa dari SIM-01 dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 *Block Diagram* Neraca Massa Static Inline Mixer – 01

Fungsi: Mencampurkan gliserol dengan katalis & aliran recycle dari bottom product D-01.

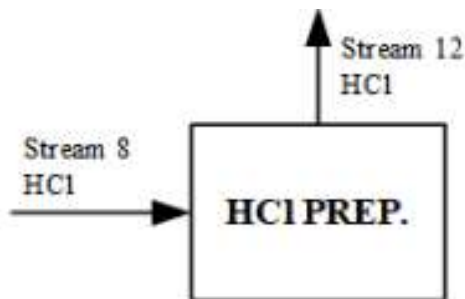
Berikut merupakan neraca massa dari SIM-01 dapat dilihat pada Tabel 2.16.

Tabel 2.16 Neraca Massa Static Inline Mixer – 01

Komponen	Input	Output
	Massa (kg/jam)	Massa (kg/jam)
C3H8O3	1815,121	1816,232
C3H8O3 recycle	1,111	
C6H12O2	39,809	108,960
C6H12O2 recycle	69,151	
C3H6Cl2O recyle	0,014	0,014
TOTAL	1925,205	1925,205

3. HCl Preparation

Berikut merupakan *block diagram* neraca massa dari HCl Preparation dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Block Diagram Neraca Massa HCl Preparation

Fungsi: Unit persiapan gas HCl sebagai reaktan tambahan dalam R-01

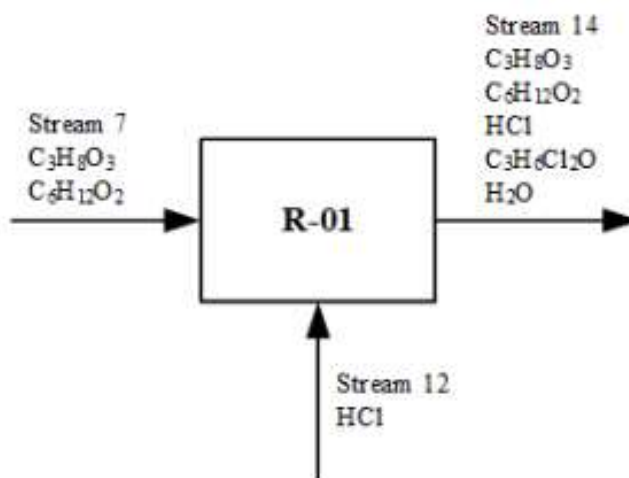
Berikut merupakan neraca massa dari HCl Preparation dapat dilihat pada Tabel 2.17.

Tabel 2.17 Neraca Massa HCl Preparation

Komponen	Input	Output
	Massa (kg/jam)	Massa (kg/jam)
HCl	1588,468	1588,468
TOTAL	1588,468	1588,468

4. Semi-Batch Stirred Tank Reactor (R-01)

Berikut merupakan *block diagram* neraca massa dari R-01 dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Block Diagram Neraca Massa Semi-Batch Stirred Tank Reactor

Fungsi: Reaksi hidroklorinasi pembentukan diklorohidrin

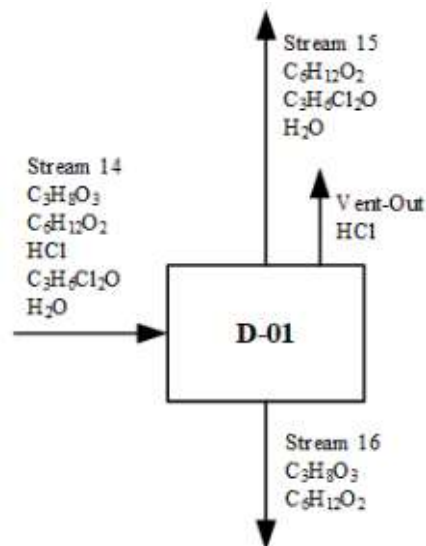
Berikut merupakan neraca massa dari R-01 dapat dilihat pada Tabel 2.18

Tabel 2.18 Neraca Massa Semi-Batch Stirred Tank Reactor

Komponen	Input kg/jam	Output kg/jam
C ₃ H ₈ O ₃	1816,232	1,111
C ₆ H ₁₂ O ₂	108,960	108,960
HCl	1588,468	151,194
C ₃ H ₆ Cl ₂ O	0,014	2542,247
H ₂ O		710,162
TOTAL	3513,673	3513,673

5. Packed Distillation Column – 01 (D-01)

Berikut merupakan *block diagram* neraca massa dari D-01 dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Block Diagram Neraca Massa Packed Distillation Column – 01

Fungsi: Memisahkan diklorohidrin dari sebagian katalis dan sisa gliserol, serta membuang HCl

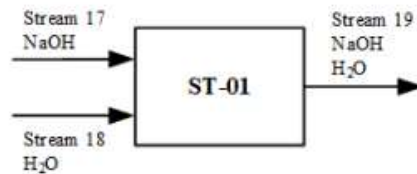
Berikut merupakan neraca massa dari D-01 dapat dilihat pada Tabel 2.19.

Tabel 2.19 Neraca Massa Packed Distillation Column – 01

Komponen	Input	Top Product Output	Bottom Product Output	Vent-Output
	Massa (kg/jam)	Massa (kg/jam)	Massa (kg/jam)	Massa (kg/jam)
C3H8O3	1,111		1,1107744	0,001
C6H12O2	108,960	39,689	69,1507534	0,120
HCl	151,194			151,194
C3H6Cl2O	2542,247	2525,899	0,0135735	16,334
H2O	710,162	610,374		99,788
TOTAL	3513,673	3175,961	70,275	267,437
				3513,673

6. Stirrer Tank (ST-01)

Berikut merupakan *block diagram* neraca massa dari ST-01 dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Block Diagram Neraca Massa Stirrer Tank

Fungsi: Melarutkan NaOH sebelum masuk proses reaksi

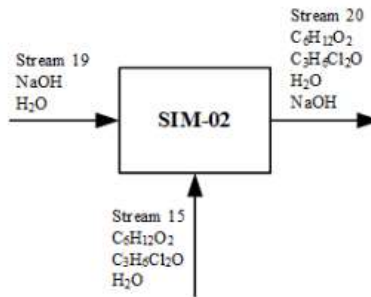
Berikut merupakan neraca massa dari ST-01 dapat dilihat pada Tabel 2.20.

Tabel 2.20 Neraca Massa Stirrer Tank

Komponen	Input	Output
	Massa (kg/jam)	Massa (kg/jam)
NaOH	833,800	833,800
H ₂ O	3335,200	3335,200
TOTAL	4169,000	4169,000

7. Static Inline Mixer – 02 (SIM-02)

Berikut merupakan *block diagram* neraca massa dari SIM-02 dapat dilihat pada Gambar 2.10.

**Gambar 2.10** Block Diagram Neraca Massa Static Inline Mixer – 02

Fungsi: Mencampurkan diklorohidrin dengan larutan NaOH

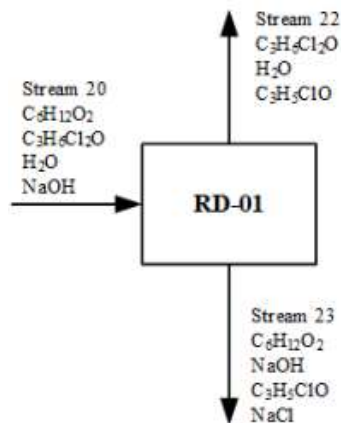
Berikut merupakan neraca massa dari SIM-02 dapat dilihat pada Tabel 2.21

Tabel 2.21 Neraca Massa Static Inline Mixer – 02

Komponen	Input	Output
	Massa (kg/jam)	Massa (kg/jam)
C ₆ H ₁₂ O ₂	39,689	39,689
C ₃ H ₆ Cl ₂ O	2525,899	2525,899
H ₂ O	3945,574	3945,574
NaOH	833,8	833,8
TOTAL	7344,96	7344,96

8. Reactive Distillation (RD-01)

Berikut merupakan *block diagram* neraca massa dari RD-01 dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 *Block Diagram* Neraca Massa Reactive Distillation

Fungsi: Reaksi dehidroklorinasi (pembentukan epiklorohidrin) dan pemisahan dengan H₂O

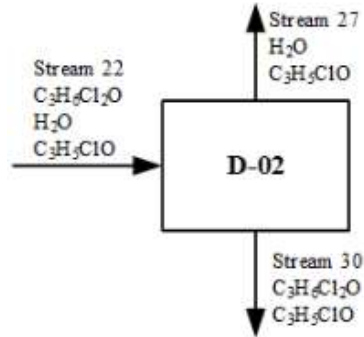
Berikut merupakan neraca massa dari RD-01 dapat dilihat pada Gambar x.x.

Tabel 2.22 Neraca Massa Reactive Distillation

Komponen	Input	Top Product Output	Bottom Product Output
	Massa (kg/jam)	Massa (kg/jam)	Massa (kg/jam)
C ₆ H ₁₂ O ₂	39,689	0,614	39,075
C ₃ H ₆ Cl ₂ O	2525,899	6,707	
H ₂ O	3945,574	4297,034	0,402
NaOH	833,800		52,534
C ₃ H ₅ ClO		1772,146	35,118
NaCl			1141,332
TOTAL	7344,961	6076,501	1268,461
			7344,961

9. Packed Distillation Column – 02 (D-02)

Berikut merupakan *block diagram* neraca massa dari D-02 dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Block Diagram Neraca Massa Packed Distillation Column – 02

Fungsi: Memisahkan produk utama dari air yang berlebih.

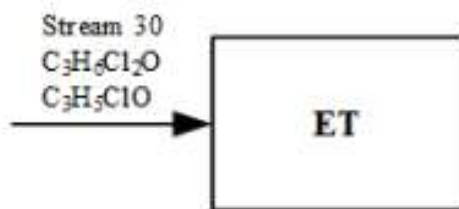
Berikut merupakan neraca massa dari D-02 dapat dilihat pada Tabel 2.23.

Tabel 2.23 Neraca Massa Packed Distillation Column – 02

Komponen	Input	Top Product Output	Bottom Product Output
	Massa (kg/jam)	Massa (kg/jam)	Massa (kg/jam)
C6H12O2	0,614		0,614
C3H6Cl2O	6,707		6,707
H2O	4297,0343	4297,034	
C3H5ClO	1772,146	383,015	1389,131
TOTAL	6076,501	4680,049	1396,452
			6076,501

10. Epichlorohydrin Tank Storage (ET)

Berikut merupakan *block diagram* neraca massa dari ET dapat dilihat pada Gambar x.x.



Gambar 2.13 *Block Diagram* Neraca Massa Epichlorohydrin Tank Storage

Fungsi: Menyimpan produk akhir epiklorohidrin sebelum dipasarkan.

Berikut merupakan neraca massa dari ET dapat dilihat pada Gambar x.x.

Tabel 2.24 Neraca Massa Epichlorohydrin Tank Storage

Komponen	Input	Output
	Massa (kg/jam)	Massa (kg/jam)
C6H12O2	0,614	0,614
C3H6Cl2O	6,707	6,707
C3H5ClO	1389,131	1389,131
TOTAL	1396,451	1396,451

11. Neraca Massa Overall

Berikut merupakan neraca massa *overall* dapat dilihat pada Tabel 2.25

Tabel 2.25 Neraca Massa *Overall*

Kode Alat	Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
HE-01	C3H8O3	1815,121	
SIM-02	C6H12O2	39,809	
Reaktor	HCl	1588,468	
D-01 VENT	C3H8O3		0,001
	C6H12O2		0,120
	HCl		151,194
	C3H6Cl2O		16,334
	H2O		99,788
ST-01	NaOH	833,8	
	H2O	3335,2	
RD-01 BOT	C3H8O3		0,001
	C6H12O2		39,075
	H2O		0,402
	NaOH		52,534
	C3H5ClO		35,118
	NaCl		1141,332
D-02 TOP	H2O		4297,034
	C3H5ClO		383,015
COL-04	C6H12O2		0,614
	C3H6Cl2O		6,707
	C3H5ClO		1389,131
TOTAL		7612,398	7612,398
			0,000

$$Efisiensi\ produksi = \frac{produk}{bahan\ baku} \times 100\%$$

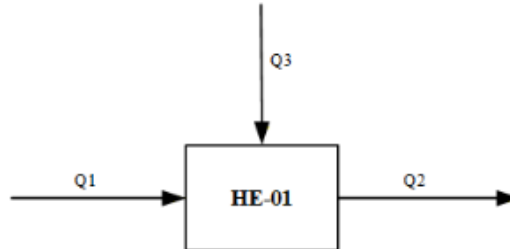
$$Efisiensi\ produksi = \frac{7496,156}{7612,398} \times 100\%$$

$$Efisiensi\ produksi = 98,47\%$$

2.5.2 Neraca Panas

1. Heater - 01 (HE-01)

Berikut merupakan *block diagram* neraca panas dari Heater-01 dapat dilihat pada Gambar 2.14



Gambar 2.14 *Block Diagram* Neraca Heater-01

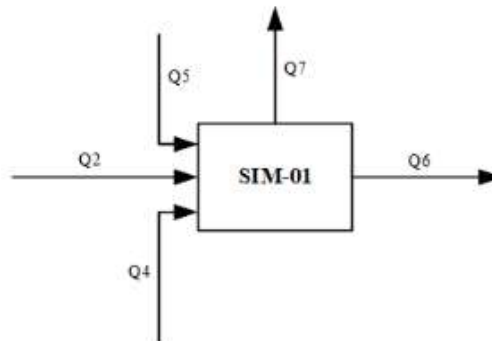
Berikut merupakan neraca panas dari Heater-01 dapat dilihat pada Tabel 2.26.

Tabel 2.26 Neraca Panas Heater-01

Komponen	Q masuk	Q keluar
Q1 C3H8O3 in	2729,932	
Q2 C3H8O3 out		86028,430
Q3 pemanas	83298,498	
TOTAL	86028,430	86028,430

2. Static Inline Mixer – 01 (SIM-01)

Berikut merupakan *block diagram* neraca panas dari SIM-01 dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 *Block Diagram* Neraca SIM-01

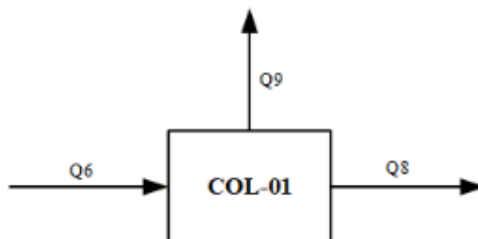
Berikut merupakan neraca panas dari SIM-01 dapat dilihat pada Tabel 2.27.

Tabel 2.27 Neraca Panas SIM-01

Komponen	Q masuk	Q keluar
Q2 C3H8O3 out	86028,430	
Q4 Recycle	3093,558	
Q5 C6H12O2 fresh	67,464	
Q6 Mix 1		89428,528
Q7 lepas		-239,077
TOTAL	89189,451	89189,451

3. Cooler – 01 (COL-01)

Berikut merupakan *block diagram* neraca panas dari Cooler-01 dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 *Block Diagram* Neraca Cooler-01

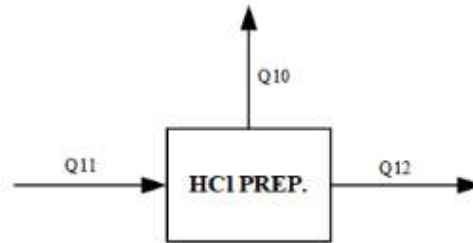
Berikut merupakan neraca panas dari Cooler-01 dapat dilihat pada Tabel 2.28.

Tabel 2.28 Neraca Panas Cooler-01

Komponen	Q masuk	Q keluar
Q6 Mix 1	89428,52846	
Q8 Mix 1		58569,347
Q9 Pendingin		30859,182
TOTAL	89428,528	89428,528

4. HCl Preparation

Berikut merupakan *block diagram* neraca panas dari HCl Preparation dapat dilihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 *Block Diagram* Neraca HCl Preparation

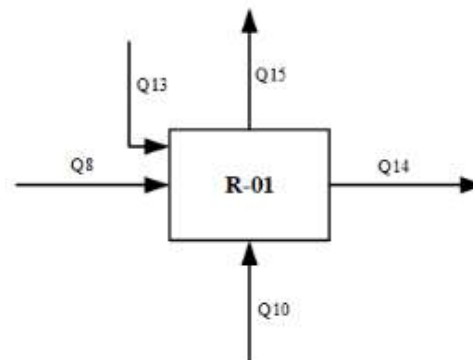
Berikut merupakan neraca panas dari HCl Preparation dapat dilihat pada Tabel 2.29.

Tabel 2.29 Neraca Panas HCl Preparation

Komponen	Q masuk	Q keluar
Q10 HCl gas		101435,369
Q11 Compressor	375266,932	
Q12 Pendingin		273831,563
TOTAL	375266,932	375266,932

5. Semi-Batch Stirred Tank Reactor (R-01)

Berikut merupakan *block diagram* neraca panas dari R-01 dapat dilihat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 *Block Diagram* Neraca R-01

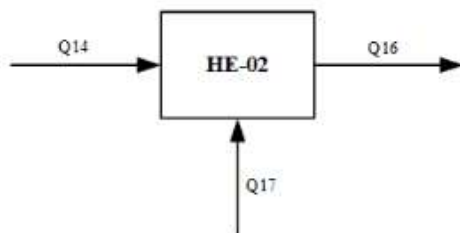
Berikut merupakan neraca panas dari R-01 dapat dilihat pada Tabel 2.30.

Tabel 2.30 Neraca Panas R-01

Komponen	Q masuk	Q keluar
Q8 Mix 1	58569,347	
Q10 HCl Gas	375266,932	
Q13 Reaksi	476329,859	
Q14 Produk R-01		111798,909
Q15 Pendingin		798367,229
TOTAL	910166,138	910166,138

6. Heater – 02 (HE-02)

Berikut merupakan *block diagram* neraca panas dari Heater-02 dapat dilihat pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Block Diagram Neraca Heater-02

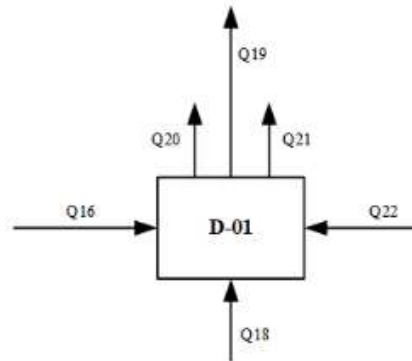
Berikut merupakan neraca panas dari Heater-02 dapat dilihat pada Tabel 2.31.

Tabel 2.31 Neraca Panas Heater-02

Komponen	Q masuk	Q keluar
Q14 Produk R-01	14192,073	
Q16 Produk HE-1		20043,779
Q17 Pemanas	5851,706	
TOTAL	20043,779	20043,779

7. Packed Distillation Column – 01 (D-01)

Berikut merupakan *block diagram* neraca panas dari D-01 dapat dilihat pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20 *Block Diagram* Neraca D-01

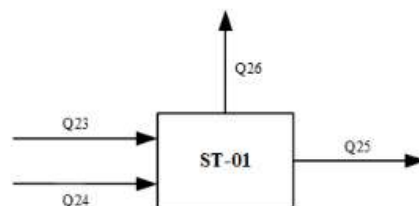
Berikut merupakan neraca panas dari D-01 dapat dilihat pada Tabel 2.32

Tabel 2.32 Neraca Panas D-01

Komponen	Q input	Q output
Q16 Produk HE-1	20043,77878	
Q18 Bottom Prod.		16080,694
Q19 Top Prod.		158656,404
Q20 Kondensor		178717,230
Q21 Vent		16908,267
Q22 Reboiler	350318,817	
TOTAL	370362,5957	370362,5957

8. Stirrer Tank (ST-01)

Berikut merupakan *block diagram* neraca panas dari ST-01 dapat dilihat pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21 *Block Diagram* Neraca ST-01

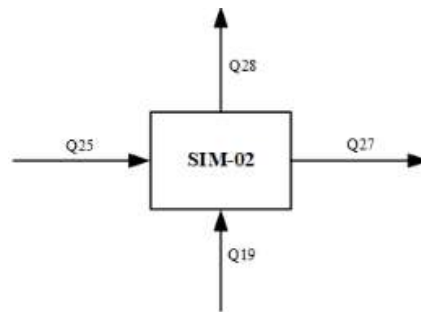
Berikut merupakan neraca panas dari ST-01 dapat dilihat pada Tabel 2.33.

Tabel 2.33 Neraca Panas ST-01

Komponen	Q masuk	Q keluar
Q23 NaOH	2168,442	
Q24 H ₂ O	16680,115	
Q25 NaOH + H ₂ O		3245,192
Q26 Lepas		15603,366
TOTAL	18848,557	18848,557

9. Static Inline Mixer – 02 (SIM-02)

Berikut merupakan *block diagram* neraca panas dari SIM-02 dapat dilihat pada Gambar 2.22.



Gambar 2.22 Block Diagram Neraca SIM-02

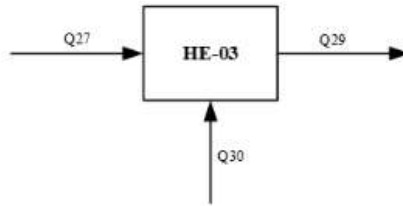
Berikut merupakan neraca panas dari SIM-02 dapat dilihat pada Tabel 2.34

Tabel 2.34 Neraca Panas SIM-02

Komponen	Q masuk	Q keluar
Q19 Top Prod.	158656,4043	
Q25 NaOH + H ₂ O	3245,191928	
Q27 Produk SIM-2		72648,564
Q28 lepas		89253,033
TOTAL	161901,596	161901,596

10. Heater – 03 (HE-03)

Berikut merupakan *block diagram* neraca panas dari Heater-03 dapat dilihat pada Gambar 2.23.



Gambar 2.23 *Block Diagram* Neraca Heater-03

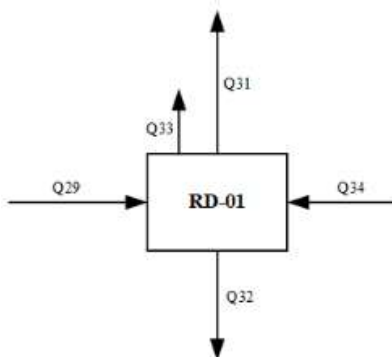
Berikut merupakan neraca panas dari Heater-03 dapat dilihat pada Tabel 2.35

Tabel 2.35 Neraca Panas Heater-03

Komponen	Q masuk	Q keluar
Q27 Produk SIM-2	72648,56375	
Q29 Produk HE-3		287911,643
Q30 Pemanas	215263,079	
TOTAL	287911,643	287911,643

11. Reactive Distillation (RD-01)

Berikut merupakan *block diagram* neraca panas dari RD-01 dapat dilihat pada Gambar 2.24.



Gambar 2.24 *Block Diagram* Neraca RD-01

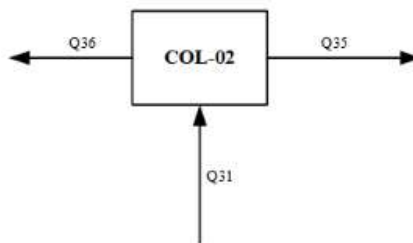
Berikut merupakan neraca panas dari RD-01 dapat dilihat pada Tabel 2.36.

Tabel 2.36 Neraca Panas RD-01

Komponen	Q masuk	Q Keluar
Q29 Produk HE-3	287911,643	
Q31 Top Prod.		280715,385
Q32 Bot Prod.		109090,245
Q33 Kondensor		5080,688
Q34 Reboiler	106974,674	
TOTAL	394886,317	394886,317

12. Cooler – 02 (COL-02)

Berikut merupakan *block diagram* neraca panas dari Cooler-02 dapat dilihat pada Gambar 2.25.



Gambar 2.25 Block Diagram Neraca Cooler-02

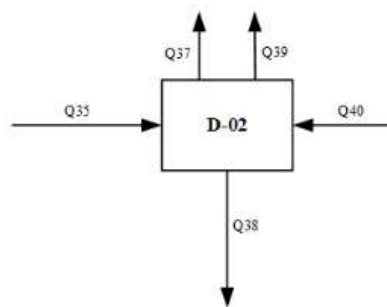
Berikut merupakan neraca panas dari Cooler-02 dapat dilihat pada Tabel 2.37.

Tabel 2.37 Neraca Panas Cooler-02

Komponen	Q masuk	Q keluar
Q31 Top Prod.	280715,3847	
Q35 Produk COL-2		214427,473
Q36 Pendingin		66287,912
TOTAL	280715,385	280715,385

13. Packed Distillation Column – 02 (D-02)

Berikut merupakan *block diagram* neraca panas dari D-02 dapat dilihat pada Gambar 2.26.



Gambar 2.26 *Block Diagram* Neraca D-02

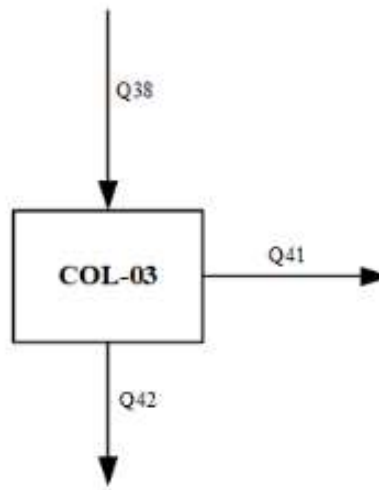
Berikut merupakan neraca panas dari D-02 dapat dilihat pada Tabel 2.38.

Tabel 2.38 Neraca Panas D-02

Komponen	Q masuk	Q Keluar
Q35 Produk COL-2	214427,4728	
Q37 Top Prod.		38907,035
Q38 Bot Prod.		172817,343
Q39 Kondensor		1238532,849
Q40 Reboiler	1235829,754	
TOTAL	1450257,227	1450257,227

14. Cooler – 03 (COL-03)

Berikut merupakan *block diagram* neraca panas dari Cooler-03 dapat dilihat pada Gambar 2.27.



Gambar 2.27 *Block Diagram* Neraca Cooler-03

Berikut merupakan neraca panas dari Cooler-03 dapat dilihat pada Tabel 2.39.

Tabel 2.39 Neraca Panas Cooler-03

Komponen	Q masuk	Q keluar
Q38 Bot Prod.	172817,343	
Q41 Produk COL-3		2405,539
Q42 Pendingin		170411,804
TOTAL	172817,343	172817,343

15. Neraca Panas *Overall*

Berikut merupakan neraca panas *overall* dapat dilihat pada Tabel 2.40.

Tabel 2.40 Neraca Panas *Overall*

Kode Alat	Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
HE-01	Q1 C3H8O3 in	2729,932	
	Q2 C3H8O3 out		86028,430
	Q3 pemanas	83298,498	
SIM-01	Q2 C3H8O3 out	86028,430	
	Q4 Recycle	3093,558	
	Q5 C6H12O2 fresh	67,464	
	Q6 Mix 1		89428,528
	Q7 lepas		-239,077
COL-01	Q6 Mix 1	89428,528	
	Q8 Mix 1		58569,347
	Q9 Pendingin		30859,182
HCl PREP	Q10 HCl gas		101435,369
	Q11 Compressor	375266,932	
	Q12 Pendingin		273831,563
R-01	Q8 Mix 1	58569,347	
	Q10 HCl Gas	375266,932	
	Q13 Reaksi	476329,859	
	Q14 Produk R-01		111798,909
	Q15 Pendingin		798367,229
HE-02	Q14 Produk R-01	14192,073	
	Q16 Produk HE-1		20043,779
	Q17 Pemanas	5851,706	
D-01	Q16 Produk HE-1	20043,779	
	Q18 Bottom Prod.		16080,694
	Q19 Top Prod.		158656,404
	Q20 Kondensor		178717,230
	Q21 Vent		16908,267
	Q22 Reboiler	350318,817	

Kode Alat	Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
ST-01	Q23 NaOH	2168,442	
	Q24 H ₂ O	16680,115	
	Q25 NaOH + H ₂ O		3245,192
	Q26 Lepas		15603,366
SIM-02	Q19 Top Prod.	158656,404	
	Q25 NaOH + H ₂ O	3245,192	
	Q27 Produk SIM-2		72648,564
	Q28 lepas		89253,033
HE-03	Q27 Produk SIM-2	72648,564	
	Q29 Produk HE-3		287911,643
	Q30 Pemanas	215263,079	
RD-01	Q29 Produk HE-3	287911,643	
	Q31 Top Prod.		280715,385
	Q32 Bot Prod.		109090,245
	Q33 Kondensor		5080,688
	Q34 Reboiler	106974,674	
COL-02	Q31 Top Prod.	280715,385	
	Q35 Produk COL-2		214427,473
	Q36 Pendingin		66287,912
D-02	Q35 Produk COL-2	214427,473	
	Q37 Top Prod.		38907,035
	Q38 Bot Prod.		172817,343
	Q39 Kondensor		1238532,849
	Q40 Reboiler	1235829,754	
COL-03	Q38 Bot Prod.	172817,343	
	Q41 Produk COL-3		2405,539
	Q42 Pendingin		170411,804
TOTAL		4707823,922	4707823,922
			0,000

$$\text{Heat Loss} = \frac{(Q \text{ Input} - Q \text{ loss})}{Q \text{ Input}} \times 100\%$$

$$\text{Heat Loss} = \frac{(4.707.823,922 - 104.617,321)}{4.707.823,922} \times 100\%$$

$$\text{Heat Loss} = 97,78\%$$

2.6 Tata Letak Pabrik dan Pemetaan

2.6.1 Layout Pabrik

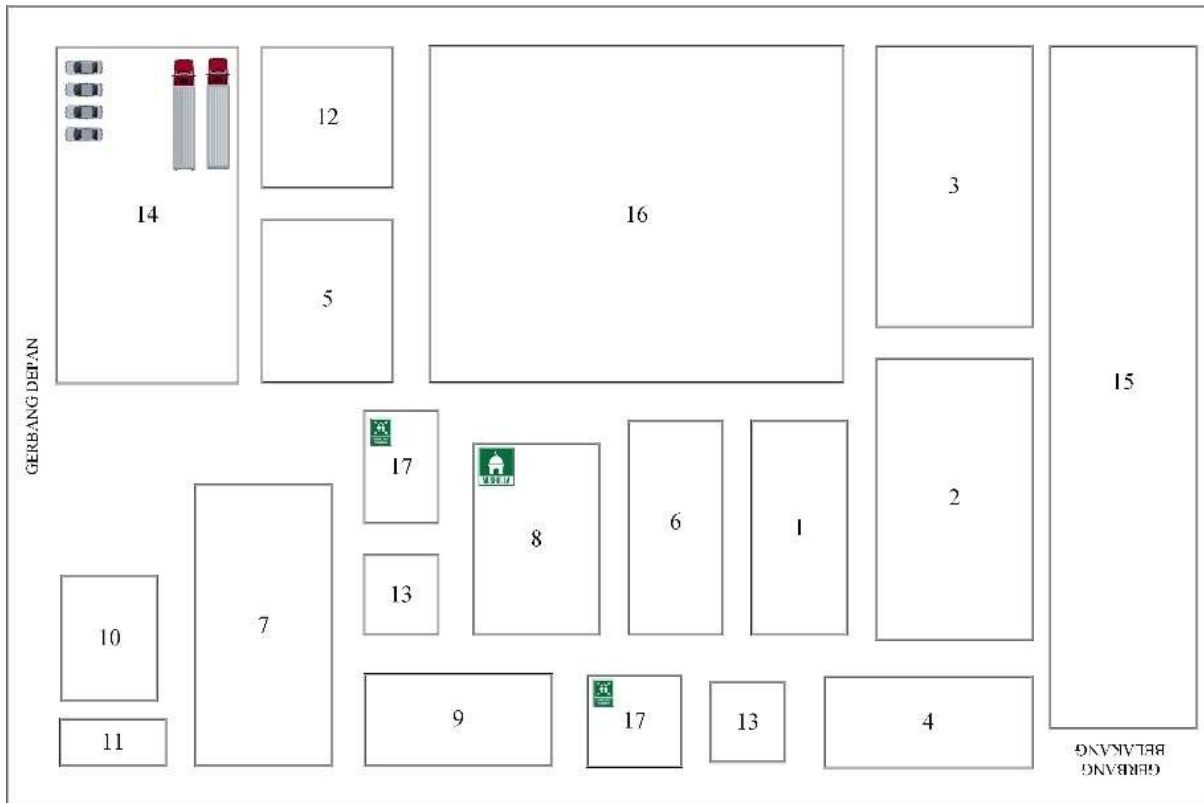
Setelah *Process Flow Diagram* (PFD) selesai, langkah berikutnya yaitu merencanakan tata letak pabrik dan peralatan sebelum dilakukan desain perpipaan, struktur, maupun sistem kelistrikan. Perencanaan tata letak ini bertujuan untuk mengatur posisi fasilitas secara efisien, yang mencakup area penyimpanan (*storage area*), area proses (*process area*), dan area penanganan material (*handling area*). Berikut beberapa pertimbangan yang perlu dilakukan pada *layout* pabrik.

1. Tanah yang tersedia
2. Tipe dan kualitas produk
3. Kemungkinan pengembangan pabrik di masa mendatang
4. Distribusi bahan baku, bahan jadi, air, listrik dan lain-lain
5. Keadaan lingkungan, cuaca dan sosial
6. Keamanan terhadap bahaya kebakaran, peledakan, gas beracun dan bentuk bangunan
7. Pengaturan terhadap penggunaan lantai ruangan dan elevasi

Beberapa hal yang harus diperlukan pada proses pengaturan tata letak pabrik sebagai berikut.

1. Pos keamanan ditempatkan di dekat gerbang utama untuk memudahkan pengawasan terhadap keluar-masuk personel, kendaraan, bahan baku, serta distribusi produk sehingga keamanan kawasan pabrik dapat terjaga.
2. Area proses ditempatkan di bagian tengah kawasan pabrik agar memiliki akses yang mudah terhadap gudang bahan baku, utilitas, laboratorium, dan fasilitas penunjang lainnya sehingga aliran proses menjadi lebih efisien.
3. Gudang dan area *packing* diletakkan berdekatan dengan area proses dan jalur distribusi untuk memperpendek jarak perpindahan produk serta mempercepat kegiatan penyimpanan, pengemasan, dan pengiriman.

4. Area utilitas dan instalasi pengolahan limbah (IPAL) ditempatkan di dekat area proses agar distribusi utilitas, seperti air, *steam*, dan listrik, menjadi lebih efisien serta memudahkan penanganan limbah proses.
5. *Power plant* ditempatkan terpisah dari bangunan administrasi dan berada di sekitar area utilitas untuk meningkatkan keandalan penyediaan energi sekaligus mengurangi dampak kebisingan terhadap lingkungan kerja.
6. *Control room* ditempatkan berdekatan dengan area proses, tetapi tetap berada pada lokasi yang aman, sehingga operator dapat melakukan pemantauan dan pengendalian proses secara efektif tanpa terpapar langsung terhadap potensi bahaya proses.
7. Laboratorium ditempatkan dekat area proses untuk mempermudah pengambilan sampel bahan baku, produk antara, maupun produk akhir sehingga pengendalian mutu dapat dilakukan dengan lebih cepat.
8. Kantor dan gedung serbaguna diletakkan di bagian depan kawasan pabrik agar mudah diakses oleh tamu maupun karyawan administrasi tanpa mengganggu aktivitas produksi.
9. Area parkir dirancang terpisah antara kendaraan operasional, kendaraan karyawan, dan truk distribusi guna meningkatkan kelancaran lalu lintas internal serta mengurangi potensi kecelakaan di dalam kawasan pabrik.
10. *Assembly point* ditempatkan pada area terbuka yang mudah dijangkau dari seluruh fasilitas produksi serta berada jauh dari sumber potensi bahaya sehingga dapat digunakan sebagai titik evakuasi ketika terjadi keadaan darurat.



Gambar 2.28 *Layout Pabrik*

Tabel 2.41 Keterangan Tata Letak dan Luas Bangunan Pabrik

Kode	Bangunan	Jumlah	Luas (m ²)
1	Control Room	1	84,684
2	Unit Utilitas	1	169,367
3	Unit Pengolahan Limbah	1	169,367
4	Power Plant	1	84,684
5	Health, Safety, & Environment	1	84,684
6	Laboratorium	1	84,684
7	Kantor & Gedung Serbaguna	1	484,000
8	Mushola	1	50,000

Kode	Bangunan	Jumlah	Luas (m ²)
9	Kantin	1	184,000
10	Pos Security	1	22,865
11	Poliklinik	1	22,865
12	Gudang & Packing	1	484,000
13	Taman industri	1	141,700
14	Parkiran	1	354,250
15	Area Perluasan	1	1341,068
16	Area Proses	1	846,837

Luas tanah diperkirakan = 4693,737 m²

= 4700 m²

Harga perkiraan tanah = Rp3.500.000/m²

Total biaya tanah = luas tanah x $\frac{\text{harga tanah}}{\text{kurs USD}}$

= \$915.873,28

2.6.2 Layout Peralatan Proses

Dalam perancangan tata letak peralatan proses, terdapat beberapa aspek penting yang harus dipertimbangkan untuk menjamin kelancaran operasi, keselamatan kerja, serta efisiensi produksi. Aspek-aspek tersebut meliputi:

1. Aliran Bahan Baku Dan Produk

Tata letak peralatan harus dirancang sedemikian rupa sehingga perpindahan bahan baku, produk antara, maupun produk akhir berlangsung secara efisien. Pengaturan jalur perpipaan perlu mempertimbangkan aspek keselamatan dan kemudahan operasional, di mana pipa yang melintasi area tertentu sebaiknya dipasang pada elevasi yang memadai, sedangkan pipa yang berada di permukaan tanah harus diatur agar tidak menghambat mobilitas pekerja maupun kendaraan operasional.

2. Sirkulasi Udara

Sistem tata letak perlu memperhatikan kelancaran aliran udara di area proses untuk mencegah terjadinya penumpukan gas, uap, atau bahan kimia berbahaya akibat

stagnasi udara. Selain itu, arah angin dominan juga perlu dipertimbangkan dalam penempatan fasilitas agar risiko penyebaran zat berbahaya dapat diminimalkan.

3. Pencahayaan

Seluruh area pabrik harus memperoleh pencahayaan yang memadai, terutama pada lokasi proses yang memiliki tingkat risiko tinggi. Sistem penerangan yang baik akan meningkatkan keselamatan kerja, mempermudah pengawasan, serta mendukung kelancaran kegiatan operasional.

4. Aksesibilitas Pekerja

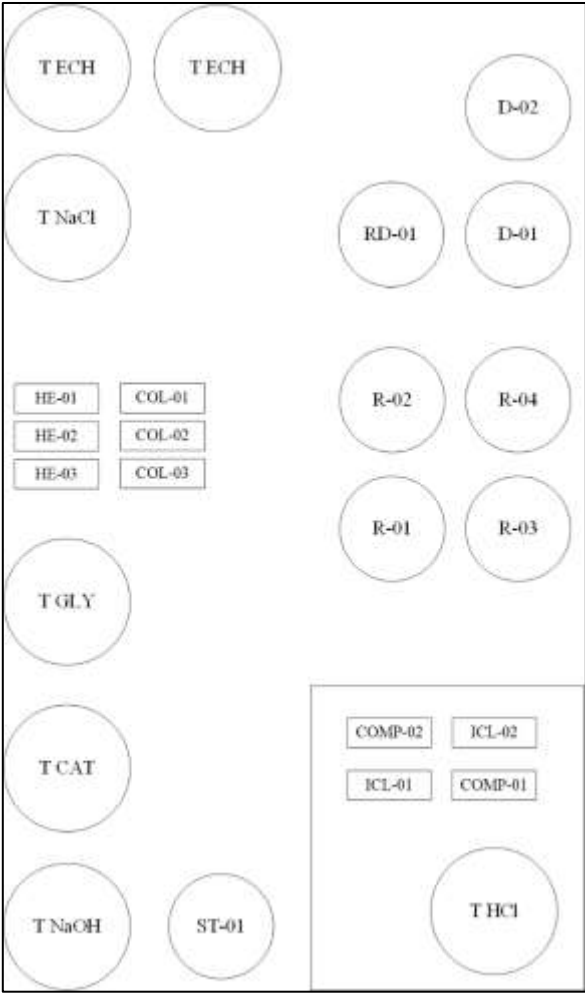
Penempatan peralatan harus memberikan ruang yang cukup bagi operator untuk melakukan pengoperasian, inspeksi, pemeliharaan, maupun perbaikan peralatan secara mudah, cepat, dan aman.

5. Penempatan Peralatan Proses

Susunan peralatan proses dirancang agar aliran proses menjadi efisien, kebutuhan perpipaian dapat diminimalkan, serta biaya investasi dan biaya operasi dapat ditekan tanpa mengurangi aspek keselamatan maupun keandalan proses produksi.

6. Jarak Antarperalatan Proses

Peralatan yang beroperasi pada tekanan dan temperatur tinggi atau memiliki potensi bahaya yang besar sebaiknya ditempatkan dengan jarak yang memadai atau dipisahkan dari peralatan lainnya. Pengaturan ini bertujuan untuk mengurangi risiko penyebaran dampak apabila terjadi kebakaran, ledakan, atau keadaan darurat lainnya.



Gambar 2.29 Layout Proses