

BAB II

DESKRIPSI PROSES

2.1 Spesifikasi Bahan

2.1.1 *Ethylene Dichloride*

Senyawa 1,2-dikloroetana atau umumnya disebut etilen diklorida (EDC), yang merupakan hidrokarbon terklorinasi. EDC merupakan bahan baku yang paling umum digunakan dalam produk VCM. Berikut merupakan sifat fisika dan kima etilen diklorida (EDC)

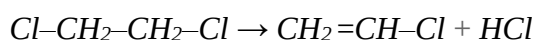
1. Sifat Fisika

Menurut Yaws (1999), sifat fisika *ethylene dichloride* adalah sebagai berikut.

Rumus kima	: $C_2H_4Cl_2$
Wujud	: Cair pada suhu 30°C dengan tekanan 1 atm
Kenampakan	: Jernih, tidak berwarna
Bau	: Seperti kloroform
Berat Molekul	: 98,96 gr/mol
Titik didih	: 237,49 K (-35,66 °C)
Titik beku	: 356,59 K (83,44 °C)
Titik kritis	: 53,70 bar
Volume kritis	: 220 cm ³ /mol
Densitas	: 0,4498 g/cm ³

2. Sifat Kimia

- *Ethylene dichloride* (EDC) bersifat stabil pada kondisi suhu kamar. Namun, pada temperatur di atas 200 °C, senyawa ini mengalami dekomposisi termal yang menghasilkan *vinyl chloride monomer* (VCM) disertai pembentukan hidrogen klorida (HCl), sebagaimana ditunjukkan oleh reaksi berikut:



- Pada suhu kamar, keberadaan uap air dan paparan sinar matahari dapat menyebabkan *ethylene dichloride* mengalami dekomposisi secara perlahan membentuk senyawa asam, yang ditandai dengan perubahan warna menjadi lebih gelap.

- *Ethylene dichloride* dapat bereaksi dengan klorin membentuk senyawa trichloroethane atau perchloroethane, tergantung pada kondisi reaksi yang diterapkan.
- Reaksi antara *ethylene dichloride* dengan alkohol di hadapan ZnO dapat menghasilkan senyawa ester.

2.2 Spesifikasi Produk

2.2.1 Vinyl Chloride Monomer

Vinyl Chloride Monomer (VCM) atau umumnya dikenal sebagai vinil klorida merupakan senyawa kimia monomer sebagai bentuk dasar dari suatu polimer. *Vinyl Chloride Monomer* (VCM) adalah molekul dari *Polyvinyl Chloride* (PVC). Berikut merupakan sifat fisika dan kimia etilen diklorida:

1. Sifat Fisika

Menurut Yaws (1999), sifat fisika *vinyl chloride monomer* adalah sebagai berikut.

Rumus kimia	: C_2H_3Cl
Wujud	: Gas pada suhu 30 °C
Kenampakan	: Tidak berwarna
Bau	: Manis
Berat moleku	: 62,5 gr/mol
Titik beku	: 1119,36 K (-153,8 °C)
Titik didih	: 259, 78 K (-13,37 °C)
Titik kritis	: 432 K (158,85 °C)
Tekanan kritis	: 56,70 bar
Volume kritis	: 179 cm ³ /mol
Densitas	: 0,3492 g/cm ³

2. Sifat Kimia

- *Vinyl Chloride Monomer* dapat terjadi polimerisasi dan kopolimerisasi
- *Vinyl Chloride Monomer* bersifat tidak korosif bila dalam kondisi kering pada suhu kamar dan tekanan atmosfer
- *Vinyl Chloride Monomer* dapat teroksidasi sempurna menjadi CO₂ dan HCl oleh *magnesium permanganate*
- Reaksi substitusi dengan atom klorin yang disertai paladium dapat membentuk *vinyl alocohaltes*, ester dan eter.

2.2.2 Asam Klorida

Asam klorida (HCl) atau biasanya dikenal sebagai asam klorida, merupakan senyawa kimia berupa cairan asam kuat yang bersifat sangat korosif. Adapun sifat fisika dan kimia asam klorida sebagai berikut.

1. Sifat Fisika

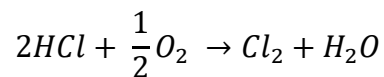
Menurut Yaws (1999), sifat fisika asam klorida adalah sebagai berikut

Rumus kimia	: HCl
Wujud	: Gas pada suhu 30°C
Kenampakan	: Tidak berwarna
Bau	: Menyengat
Berat molekul	: 36,46 gr/mol
Titik beku	: 158,97 K (-114,2°C)
Titik didih	: 118,15 K (-85°C)
Titik kritis	: 324,65 K (51,5°C)
Tekanan kritis	: 83,09 K (-190,06°C)
Volume kritis	: 81 cm ³ /mol
Densitas	: 0,45 gr/cm ³

2. Sifat Kimia

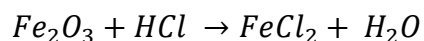
- Reaksi dengan oksidator (oksidasi)

Reaksi oksidasi menggunakan HCl dan O₂ yang bereaksi pada fase gas dengan melepaskan klorin dan air. Pada reaksi ini akan terjadi dengan bantuan katalis, dengan reaksi sebagai berikut:



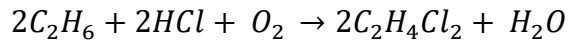
- Reaksi dengan oksida logam

Fe₂O₃ yang bereaksi dengan HCl yang membentuk FeCl₃ dan air merupakan salah satu contoh reaksi oksida logam dengan reaksi sebagai berikut:



- Reaksi oksiklorinasi

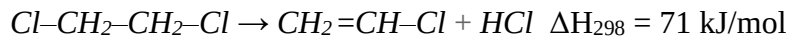
Pada reaksi oksiklorinasi menggunakan HCl sebagai sumber klorin. Berikut merupakan reaksi pembuatan ethylene dichloride dengan oksiklorinasi :



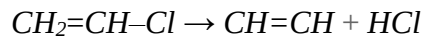
2.3 Konsep Proses

2.3.1 Dasar Reaksi

Dasar reaksi pembentukan *vinyl chloride monomer* adalah reaksi cracking yang disebut juga dengan pirolisis dari bahan baku *ethylene dichloride* yang terjadi pada fase gas (Dimian & Bildea, 2008). Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut.



Dengan reaksi samping yang terjadi adalah sebagai berikut.



2.3.2 Kondisi Operasi

Proses produksi *vinyl chloride monomer* (VCM) dari bahan baku *ethylene dichloride* berlangsung secara endotermis, yang berarti selama reaksi terjadi, sistem menyerap energi. Pembentukan VCM dilakukan pada suhu 480–550°C dan tekanan 1–25 atm. Penggunaan tekanan tinggi bertujuan untuk memperkecil ukuran *furnace*, meningkatkan perpindahan panas, serta mempermudah proses pemisahan pada tahap hilir akibat kenaikan titik didih.

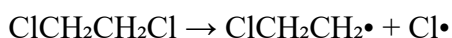
Konversi reaksi dipertahankan di bawah 65% pada suhu 525°C dan tekanan 3 MPa guna memperoleh perpindahan panas yang optimal sekaligus mengendalikan pembentukan produk samping. Reaksi berlangsung dalam *non-isothermal plug flow reactor* yang berada di dalam *furnace box* dengan sistem reaksi fase gas. Proses ini dilakukan tanpa penambahan katalis karena penggunaannya tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap konversi maupun *yield* reaksi. Selain itu, penambahan katalis dapat memperpanjang waktu reaksi serta menimbulkan biaya tambahan (Kirk-Othmer, 2001).

2.3.3 Mekanisme Reaksi

Mekanisme reaksi pembuatan *vinyl chloride monomer* dengan proses *thermal cracking* yaitu pemutusan ikatan molekul-molekul kecil dengan titik diih yang lebih rendah. Mekanisme pembentukan *vinyl chloride monomer* dengan proses *thermal cracking* yaitu sebagai berikut (Kirk-Othmer, 2001; Nyen & Haug-Warberg, 2015).

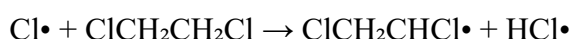
- Tahap Inisiasi

Pada tahap ini, pirolisis EDC menyebabkan terjadinya pemutusan ikatan karbon-klor pada molekul. Radikal Cl yang terbentuk kemudian memicu berlangsungnya reaksi propagasi. Reaksi yang terjadi adalah:

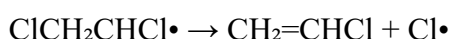


- Tahap Propagasi

Dalam tahap ini, proses utama yang berlangsung adalah abstraksi atom hidrogen oleh radikal Cl. Radikal Cl akan menarik atom hidrogen dari hidrokarbon terklorinasi sehingga terbentuk radikal hidrokarbon terklorinasi.

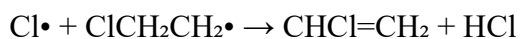


Selanjutnya, radikal hidrokarbon terklorinasi tersebut mengalami penguraian (dekomposisi radikal) yang menghasilkan VCM serta radikal Cl baru, yang merupakan kelanjutan dari mekanisme propagasi.



- Tahap Terminasi

Pada tahap ini, rantai reaksi terhenti dan konsentrasi total radikal menurun. Hal ini terjadi ketika atom H dipindahkan dari radikal sehingga terbentuk dua senyawa stabil, yaitu VCM dan HCl.



2.3.4 Tujuan Termodinamika

Tinjauan termodinamika dilakukan untuk mengetahui arah suatu reaksi dalam proses produksi, apakah berlangsung secara bolak-balik (*reversible*) atau hanya satu arah (*irreversible*). Selain itu, analisis ini juga digunakan untuk menentukan apakah reaksi bersifat endotermis atau eksotermis. Penentuan karakteristik reaksi tersebut dibuktikan melalui perhitungan panas pembentukan standar (ΔH_f°) dari reaktan dan produk yang dihasilkan. Reaksi yang terjadi di dalam reaktor *furnace* adalah sebagai berikut:



Nilai panas pembentukan standar (ΔH_f°) masing-masing komponen dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Nilai Panas Pembentukan Standar (Yaws, 1999)

Komponen	Formula	Harga (ΔH_f°) standar (kJ/mol.K)
----------	---------	--

<i>Ethylene Dichloride</i>	$C_2H_4Cl_2$	-129,70
<i>Vinyl Chloride Monomer</i>	C_2H_3Cl	28,45
<i>Hydrogen Chloride</i>	HCl	-92,3

Berikut merupakan perhitungan pembentukan standar ΔH_f° .

$$\Delta H_f^\circ_{298} = \Delta H_f^\circ_{298} (\text{produk}) - \Delta H_f^\circ_{298} (\text{reaktan})$$

$$\Delta H_f^\circ_{298} = (28,45 + (-92,30))\text{kJ/mol} - (-129,7)\text{kJ/mol}$$

$$\Delta H_f^\circ_{298} = 65,85 \text{ kJ/mol}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai ΔH_f° sebesar 65,85 kJ/mol yang bernilai positif, sehingga reaksi pembentukan *vinyl chloride monomer* berlangsung secara endotermis. Penentuan apakah reaksi tersebut bersifat spontan atau tidak dapat dilakukan dengan menghitung perubahan energi bebas Gibbs. Nilai ini dihitung menggunakan data energi bebas standar masing-masing komponen yang tercantum pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai Energi Bebas Gibbs (Yaws, 1999)

Komponen	Formula	Harga ΔG°_f standar (kJ/mol)
<i>Ethylene Dichloride</i>	$C_2H_4Cl_2$	-73,85
<i>Vinyl Chloride Monomer</i>	C_2H_3Cl	42,93
<i>Hydrogen Chloride</i>	HCl	-95,3

Dari hasil perhitungan diperoleh ΔG° sebesar 21,48 kJ/mol dengan nilai positif, yang menunjukkan bahwa reaksi tidak berlangsung secara spontan karena terjadi pada temperatur tinggi sehingga memerlukan energi eksternal guna mencapai reaksi tersebut. Sebaliknya, pada proses pembentukan *vinyl chloride monomer* (VCM) berlangsung secara spontan dikarenakan nilai ΔG yang digunakan negatif. Nilai konstanta kesetimbangan pada suhu 25°C (298 K) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$K_{298} = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ_{298}}{R \times T}\right)$$

$$K_{298} = \exp\left(-\frac{21.480 \text{ J/mol}}{8,314 \text{ J/mol} \times 298\text{K}}\right)$$

$$K_{298} = 1,72 \times 10^{-4}$$

Reaksi dijalankan pada suhu 530°C (803 K), sehingga harga K (konstanta kesetimbangan) pada suhu 530°C (803 K) dapat dihitung sebagai berikut:

$$\ln \frac{K_{803}}{K_{298}} = \left[\left(\frac{-\Delta H_{298}}{R} \right) \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{298}} \right) \right]$$

$$\ln \frac{K_{803}}{1,72 \times 10^{-4}} = \left[\left(\frac{-65.850 \text{ J/mol}}{8,314 \text{ J/mol.K}} \right) \times \left(\frac{1}{803} - \frac{1}{298} \right) \right]$$

$$\ln \frac{K_{803}}{1,72 \times 10^{-4}} = [(-7.920,375) \times (0,002)]$$

$$\ln \frac{K_{803}}{1,72 \times 10^{-4}} = 16,715$$

$$K_{803} = 1,0000483$$

Nilai konstanta kesetimbangan yang diperoleh lebih dari 1, hal ini menunjukkan bahwa reaksi bersifat *irreversible*.

2.3.5 Tinjauan Kinetika

Tinjauan kinetika reaksi dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan temperatur terhadap laju reaksi. Analisis kinetika pada proses pembentukan *vinyl chloride monomer* (VCM) melalui metode pirolisis dapat dijelaskan menggunakan persamaan Arrhenius sebagai berikut:

$$k = A. \exp \left(\frac{-E_a}{RT} \right)$$

Keterangan:

k = Laju reaksi (m/s)

A = Faktor frekuensi tumbukan (s⁻¹)

E_a = Energi aktivasi (cal/mol)

R = Konstanta gas ideal (1,987 cal/mol)

T = Temperatur (K)

Peningkatan temperatur akan menyebabkan kenaikan nilai konstanta laju reaksi, sehingga laju reaksi juga meningkat. Menurut Dimian & Bidea (2008) konstanta kecepatan reaksi perengkahan *ethylene dichloride* (EDC) menjadi *vinyl chloride monomer* (VCM) dengan hasil samping HCl sebagai berikut:

$$k = 0,36 \times 10^{14} \text{ s}^{-1} \times \exp \left(- \frac{58.000 \text{ cal/mol}}{1,987 \text{ cal/mol} \times T} \right)$$

2.4 Langkah Proses

Proses pembuatan *vinyl chloride monomer* menggunakan proses *Thermal Cracking* atau EDC Pirolisis berdasarkan Patent US6391160 dan Diminian & Bildea (2008) terdapat beberapa bagian, diantaranya:

1. Unit Persiapan Bahan Baku

2. Unit Pembentukan Produk
3. Unit Pemisahan dan Pemurnian Produk

2.4.1 Unit Persiapan Bahan Baku

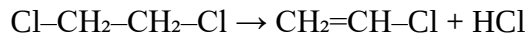
Bahan baku EDC yang dipasok dari PT Asahimas Chemical dan PT Sulfinndo Adiusaha terlebih dahulu dalam tangki penyimpanan EDC (TK-101) pada kondisi operasi suhu 30°C dan tekanan atmosfer. Tangki ini berfungsi menjaga kontinuitas suplai bahan baku menuju unit proses sekaligus menghindari fluktuasi aliran yang dapat mengganggu kestabilan operasi pabrik.

EDC dari tangki penyimpanan kemudian dialirkan menggunakan pompa sentrifugal (P-101) menuju titik pencampuran dengan aliran *recycle* EDC. Aliran *recycle* berasal dari produk bawah menara distilasi (T-303) yang masih mengandung EDC murni hasil pemisahan. Kedua aliran dicampurkan pada *mixer* (MX-101) hingga diperoleh campuran yang homogen sebelum memasuki tahap pemanasan. Campuran EDC selanjutnya dipompa menggunakan P-102 menuju *vaporizer* (V-101). Di dalam *vaporizer*, EDC yang semula berada pada fase cair diuapkan hingga seluruhnya berubah menjadi fase gas. Proses penguapan dilakukan dengan memanfaatkan energi panas yang tersedia pada sistem sehingga suhu aliran meningkat hingga mencapai sekitar 150°C. EDC fase gas kemudian dikompresi menggunakan kompresor (C-101) sehingga tekanannya meningkat hingga sekitar 11 atm. Kenaikan tekanan ini diperlukan agar kondisi operasi sesuai dengan kebutuhan reaksi *thermal cracking* di dalam *furnace reactor*. Setelah mencapai tekanan operasi yang diinginkan, aliran EDC gas diumpankan menuju unit pembentukan produk.

2.4.2 Unit Pembentukan Produk

Pembentukan VCM dalam *furnace* (R-201). *Furnace* yang digunakan dalam proses ini juga umum disebut sebagai *tubular furnace* karena terdapat reaktor berbentuk *tubular coil* atau dapat disebut sebagai *plug flow reactor* (PFR). Reaksi konversi EDC menjadi VCM merupakan reaksi endotermis yang berlangsung dalam fase gas. reaksi ini terjadi dalam *plug flow reactor* pada rentang suhu 480-530°C dan tekanan operasi 10-18 atm. Derajat konversi reaksi juga dijaga sekitar 55%. Pengendalian kondisi operasi dilakukan secara ketat untuk meminimalisir pembentukan *coke* pada *furnace*, sehingga dapat mencegah terjadinya *fouling* pada pipa reaktor. Selain menghasilkan VCM sebagai produk utama, reaksi ini juga

menghasilkan produk samping berupa HCl. Reaksi yang berlangsung dapat dinyatakan sebagai berikut:



Produk keluar reaktor berupa campuran gas yang terdiri atas VCM, HCl, dan EDC yang belum bereaksi. Campuran ini pertama kali dialirkan menuju *Heat Exchanger* E-201 untuk menurunkan suhu dari sekitar 530°C menjadi ±300°C. Setelah itu, aliran memasuki *Quench Tower* (T-201) untuk dilakukan pendinginan cepat (*rapid quenching*). Pendinginan dilakukan menggunakan sebagian aliran recycle EDC cair yang berasal dari produk bawah flash separator. Pada unit ini suhu campuran diturunkan dari sekitar 300°C menjadi ±130°C pada tekanan sekitar 9 atm. Proses quenching memiliki peran penting dalam menghentikan reaksi lanjutan yang tidak diinginkan, mencegah dekomposisi VCM, serta mengurangi pembentukan coke yang dapat menyebabkan fouling pada peralatan proses berikutnya.

Campuran hasil quenching kemudian dialirkan menuju pendingin lanjutan dan kondensor parsial (C-201) sehingga suhu turun hingga sekitar 40°C pada tekanan ±5 atm. Pada kondisi ini sebagian besar EDC dan VCM mengalami kondensasi menjadi fase cair, sedangkan HCl tetap dominan berada pada fase gas. Campuran dua fase tersebut selanjutnya dialirkan menuju unit pemisahan dan pemurnian produk.

2.4.3 Unit Pemisahan dan Pemurnian Produk

Campuran keluaran kondensor parsial (C-201) dialirkan menuju *Flash Separator* (V-301). Di dalam flash separator terjadi pemisahan berdasarkan perbedaan volatilitas komponen pada kondisi operasi sekitar 10°C dan 7 atm. Produk atas *flash separator* berupa gas yang kaya akan HCl, sedangkan produk bawah berupa campuran cair EDC dan VCM. Pemisahan awal ini bertujuan mengurangi beban pemisahan pada unit hilir sekaligus memungkinkan penanganan HCl secara terpisah. Gas HCl dari bagian atas flash separator kemudian dialirkan menuju Menara Absorpsi HCl (T-301). Pada unit ini HCl diabsorpsi menggunakan process water sehingga terbentuk larutan asam klorida (HCl aqueous). Proses absorpsi berlangsung secara counter-current sehingga efisiensi penyerapan HCl dapat ditingkatkan.

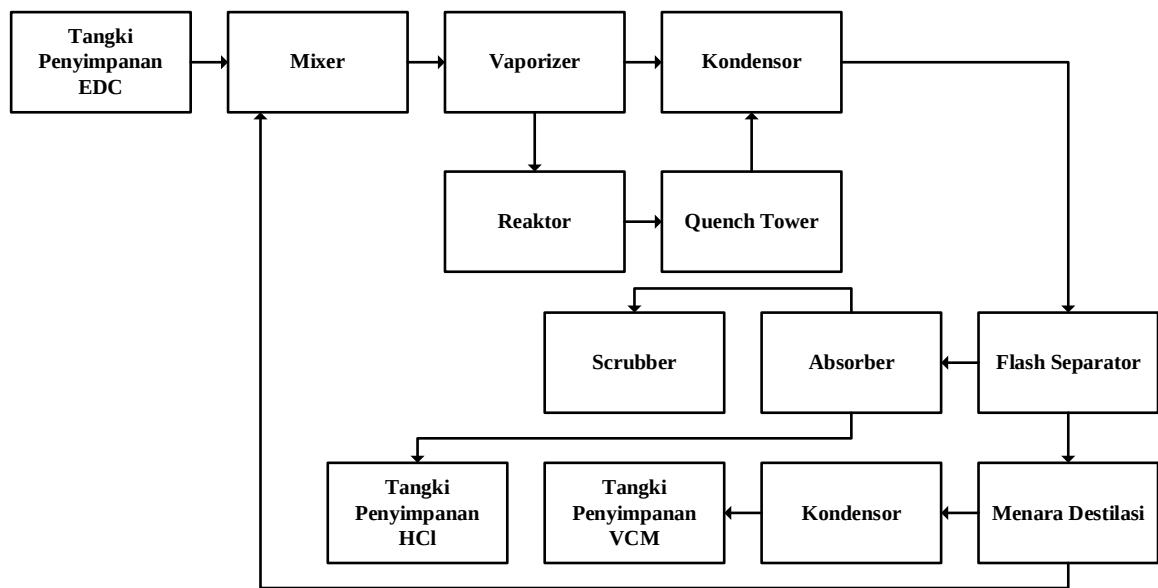
Larutan HCl yang dihasilkan pada bagian bawah absorber kemudian dialirkan menuju Tangki Penyimpanan HCl (TK-401) sebagai produk samping

bernilai jual. Sementara itu, gas yang masih mengandung jejak HCl dari bagian atas absorber dialirkan menuju *Scrubber* (T-302) untuk menghilangkan sisa kandungan HCl sebelum dibuang ke lingkungan. Pada *scrubber*, gas kontak dengan media pencuci sehingga konsentrasi HCl dapat diturunkan hingga memenuhi baku mutu emisi yang berlaku. Gas hasil scrubber selanjutnya dialirkan menuju cerobong (ST-201) untuk dilepaskan ke atmosfer secara aman. Produk bawah flash separator yang terdiri atas campuran EDC dan VCM cair selanjutnya dipompa menggunakan P-301 menuju *Heat Exchanger* E-301 untuk penyesuaian kondisi operasi sebelum memasuki menara distilasi. Sebelum memasuki menara distilasi, sebagian aliran cair dari flash separator dipisahkan menggunakan tee valve. Sekitar 20% aliran digunakan sebagai recycle pendingin menuju *Quench Tower* (T-201), sedangkan sisanya dialirkan menuju unit distilasi untuk proses pemurnian produk.

Campuran EDC dan VCM kemudian dipisahkan di dalam Menara Distilasi (T-303) berdasarkan perbedaan titik didihnya. Menara ini beroperasi pada tekanan sekitar 5 atm dengan sistem reboiler dan reflux untuk memperoleh kemurnian produk yang tinggi. Produk atas menara berupa VCM dalam fase uap. Uap VCM tersebut dialirkan menuju Kondensor Total (C-301) sehingga seluruh VCM terkondensasi menjadi fase cair. VCM cair kemudian ditampung dalam *reflux drum* (V-302). Sebagian VCM cair dikembalikan ke menara sebagai refluks untuk menjaga efisiensi pemisahan dan kemurnian produk, sedangkan sisanya dialirkan menuju Tangki Penyimpanan VCM (TK-402) sebagai produk utama pabrik.

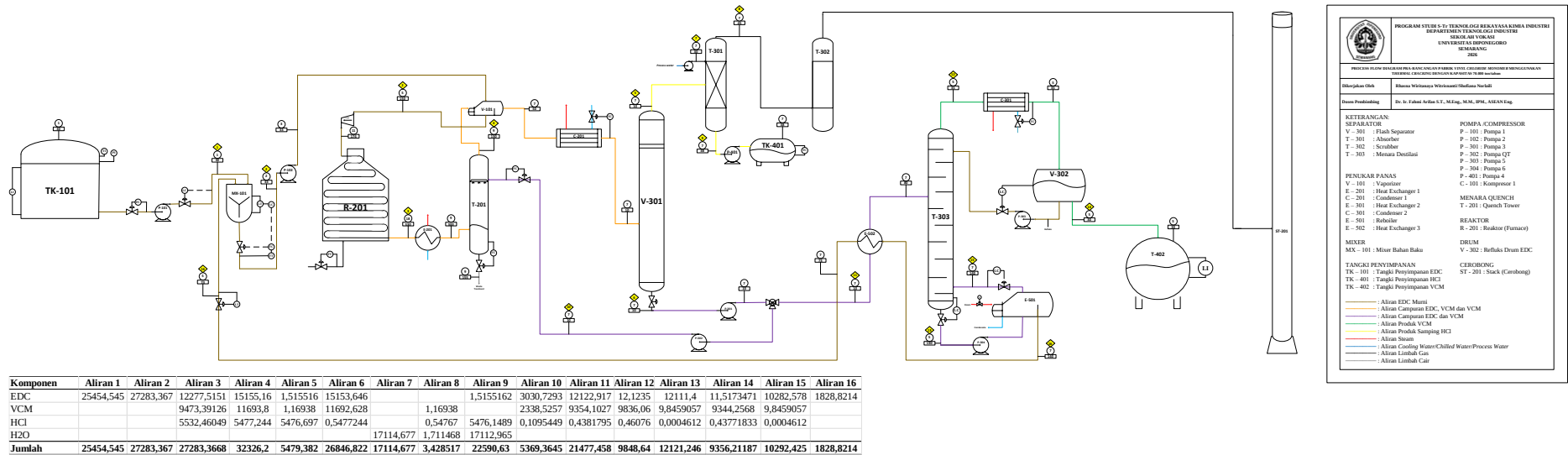
Produk bawah menara distilasi berupa EDC dengan kemurnian tinggi. Aliran ini dipompa menggunakan P-304 menuju *Reboiler* (E-501) untuk menyediakan kebutuhan panas menara distilasi. Setelah keluar dari *reboiler*, EDC dialirkan menuju *Heat Exchanger* E-502 untuk menurunkan suhu sebelum dikembalikan ke sistem recycle. EDC hasil recycle selanjutnya dicampurkan kembali dengan umpan segar pada *Mixer* MX-101, sehingga EDC yang belum bereaksi dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan baku dan meningkatkan efisiensi keseluruhan proses.

2.5 Diagram Blok



Gambar 2.1 Diagram Blok Proses Produksi *Vinyl Chloride Monomer*

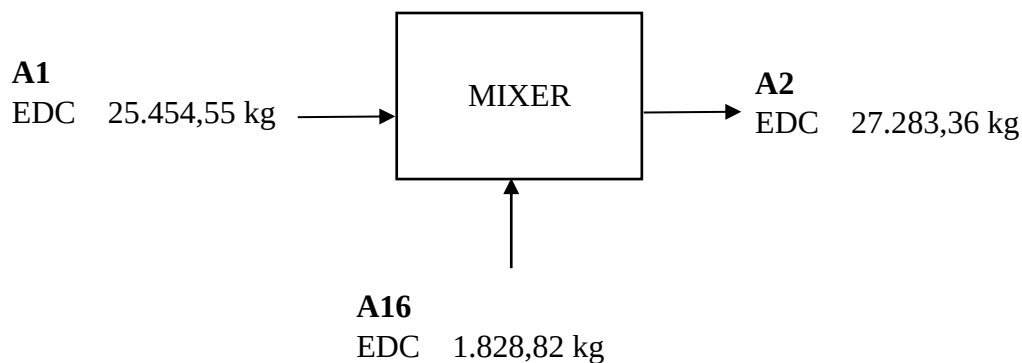
**PROCESS FLOW DIAGRAM PRA- RANCANGAN PABRIK
VINYL CHLORIDE MONOMER MENGGUNAKAN THERMAL
CRACKING DENGAN KAPASITAS 70.000 TON/TAHUN**



2.6 Neraca Massa dan Neraca Panas

2.6.1 Neraca Massa

2.6.1.1 Neraca Massa Mixer



Keterangan:

A1 = Aliran umpan EDC murni

A2 = Aliran keluaran EDC campuran

A16 = Aliran umpan EDC *recycle*

Massa masuk = Massa keluar

$A1 + A16 = A2$

Tabel 2.3 Neraca masa Pada Mixer

Komponen	Input		Output
	A1	A16	A2
EDC	25.454,5454	1.828,8213	27.283,3668
VCM			
HCl			
H ₂ O			
Jumlah	25.454,5454	1.828,8213	27.283,36668
TOTAL	27.283,3668		27.283,3668

2.6.1.2 Neraca Massa Furnace



Keterangan:

A2 = Aliran umpan EDC campuran dari *mixer*

A3 = Aliran keluaran dari *furnace*

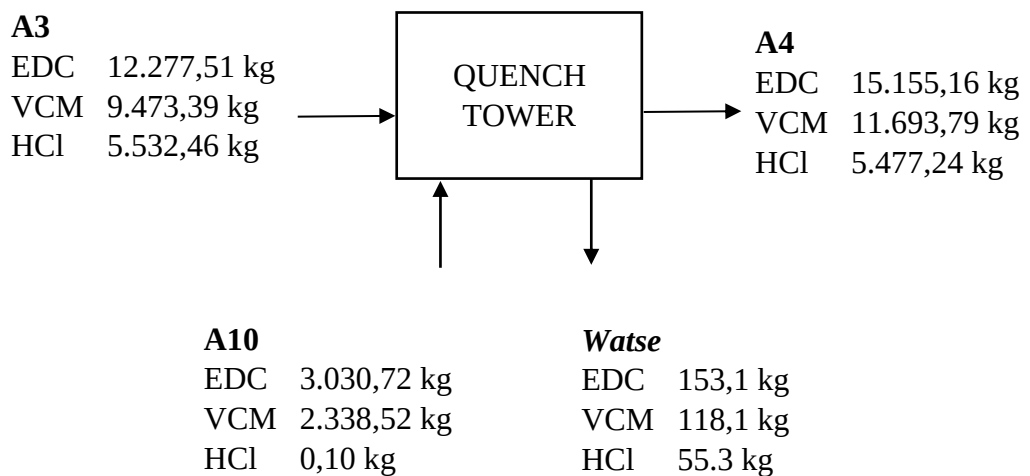
Massa masuk = Massa keluar

A2 = A3

Tabel 2.4 Neraca masa Pada Furnace

Komponen	Input	Output
	A2	A3
EDC	27.283,3668	12.277,5150
VCM	0	9.473,3912
HCl	0	5.532,4605
H ₂ O	0	0
Jumlah	27.283,3668	27.283,3668
TOTAL	27.283,3668	27.283,3668

2.6.1.3 Neraca Massa Quench Tower



Keterangan:

A3 = Aliran umpan dari *furnace* reaktor

A4 = Aliran keluaran dari *Quench Tower*

A10 = Aliran keluaran dari sebagian *bottom product flash separator*

Waste = Aliran kaluaran dari quech tower menuju *waste treatment unit*

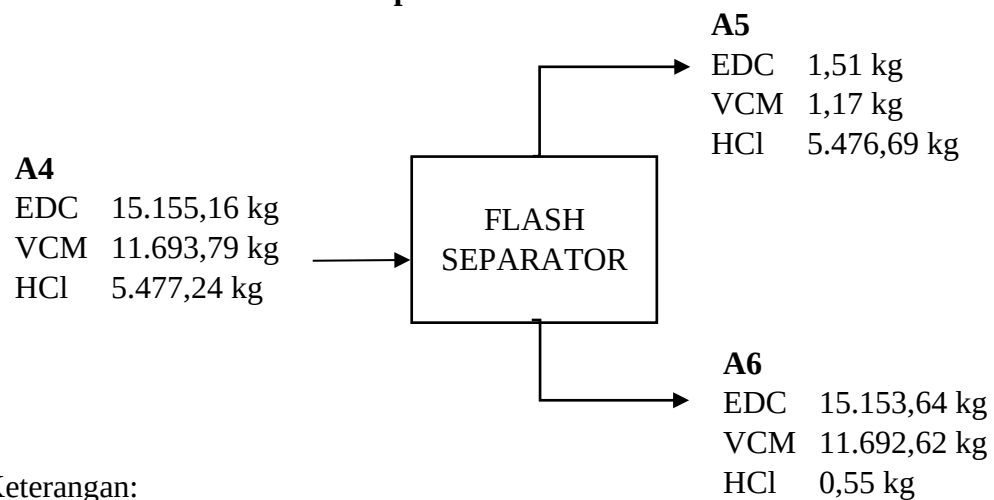
Massa masuk = Massa keluar

$$A3 + A10 = A4 + \text{Waste}$$

Tabel 2.5 Neraca masa Pada Furnace

Komponen	Input		Output	
	A3	A10	A4	Waste
EDC	12.277,51507	3.030,729277	15.155,1619	153,1
VCM	9.473,391256	2.338,525677	11.693,79776	118,1
HCl	5.532,460494	0,109544887	5.477,244338	55,3
H ₂ O	0	0	0	0
Jumlah	27.283,36682	5.369,364499	32.326,204	326,5
TOTAL	32.652,73132		32.652,73132	

2.6.1.4 Neraca Massa Flash Separator



Keterangan:

A4 = Aliran umpan campuran (EDC_(liq), VCM_(liq), dan HCl_(g))

A5 = Aliran keluaran gas HCl

A6 = Aliran keluaran campuran VCM dan EDC

Massa Masuk = Massa Keluar

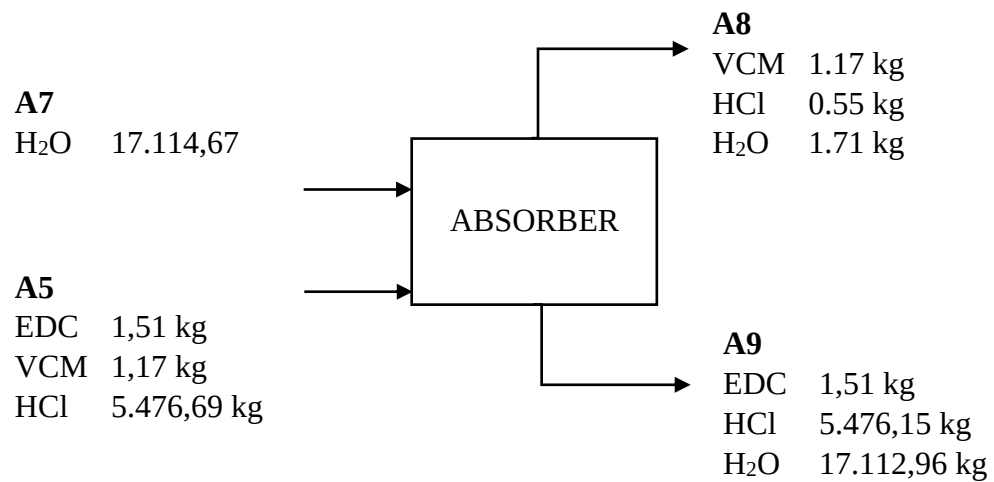
$$A4 = A5 + A6$$

Tabel 2.6 Neraca masa Pada Flash Separator

Komponen	Input		Output
	A4	A5	A6
EDC	15.155,1619	1,51551619	15.153,64639
VCM	11.693,79776	1,169379776	11.692,62838
HCl	5.477,244338	5.476,696614	0,547724434
H ₂ O	0	0	0

Jumlah	32.326,204	5.479,38151	26.846,82249
TOTAL	32.326,204		32.326,204

2.6.1.5 Neraca Massa Absorber



Keterangan:

A5 = Aliran keluaran gas HCl dari *flash separator*

A7 = Aliran *process water*

A8 = Aliran product atas *absorber*

A9 = Aliran keluaran *absorber* (HCl terabsorpsi)

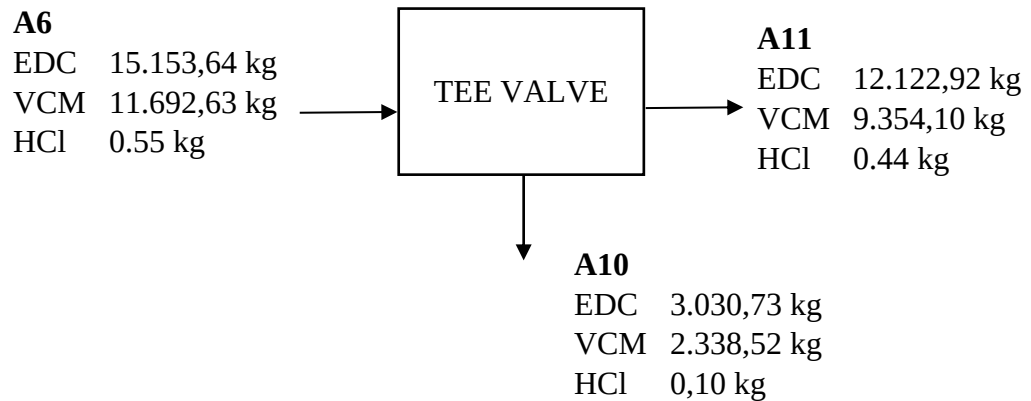
Massa masuk = Massa keluar

$$A5 + A7 = A8 + A9$$

Tabel 2.7 Neraca masa Pada Absorber

Komponen	Input		Output	
	A5	A7	A8	A9
EDC	1,51551619			1,5155162
VCM	1,169379776		1,169379776	
HCl	5.476,696614		0,547669661	5.476,1489
H ₂ O		17.114,67692	1,711467692	17.112,965
Jumlah	5.479,38151	17.114,67692	3,42851713	22.590,63
TOTAL	22.594,05843		22.594,05843	

2.6.1.6 Neraca Massa Tee Valve



Keterangan:

A6 = Aliran umpan campuran VCM dan EDC

A10 = Aliran keluaran menuju *Quench tower*

A11 = Aliran keluaran menuju menara distilasi

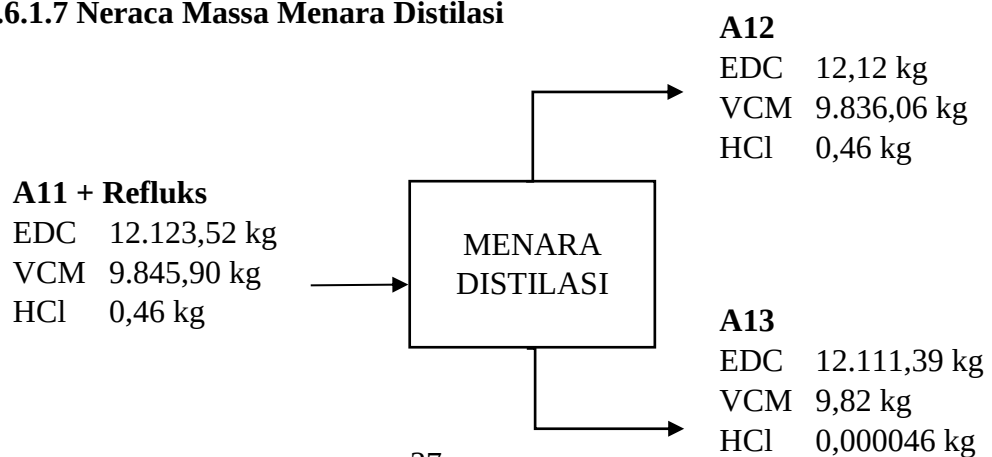
Massa masuk = Massa keluar

$$A6 = A10 + A11$$

Tabel 2.8 Neraca masa Pada Tee valve

Komponen	Input	Output	
	A6	A10	A11
EDC	15.153,64639	3.030,729277	12.122,91711
VCM	11.692,62838	2.338,525677	9.354,102707
HCl	0,547724434	0,109544887	0,438179547
H ₂ O	0	0	0
Jumlah	26.846,82249	5.369,364499	21.477,458
TOTAL	26.846,82249	26.846,82249	

2.6.1.7 Neraca Massa Menara Distilasi



Keterangan:

A11 = Aliran umpan campuran VCM dan EDC

A12 = Aliran keluaran VCM

A13 = Aliran keluaran EDC

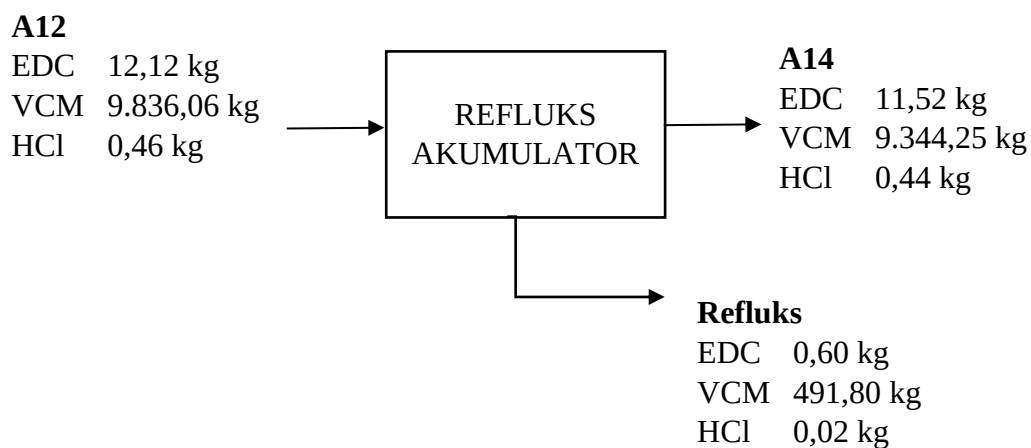
Massa masuk = Massa keluar

A11 = A12 + A13

Tabel 2.9 Neraca masa Pada Menara Distilasi

Komponen	Input		Output	
	A11 + Refluks	A12	A13	
EDC	12.123,52328	12,12352328	12.111,39976	
VCM	9.845,905697	9.836,059791	9,845905697	
HCl	0,461217354	0,460756137	0,000461217	
H ₂ O	0	0	0	
Jumlah	21.969,8902	9.848,644071	12.121,24613	
TOTAL	21.969,8902		21.969,8902	

2.6.1.8 Neraca Massa Refluks Akumulator



Keterangan:

A12 = Aliran umpan VCM

A14 = Aliran keluaran VCM menuju tangki penyimpanan

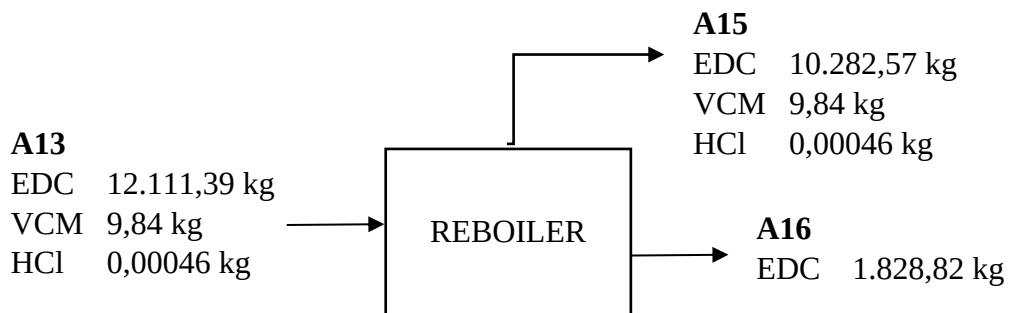
Refluks = Aliran keluaran VCM menuju menara distilasi

Massa masuk = Massa keluar

A12 = A14 + Refluks

Tabel 2.10 Neraca massa Pada Refluks Akumulator

Komponen	Input	Output	
	A12	A14	Refluks
EDC	12,12352328	11,51734712	0,606176164
VCM	9.836,059791	9.344,256802	491,8029896
HCl	0,460756137	0,43771833	0,023037807
H ₂ O	0	0	0
Jumlah	9.848,644071	9.356,211867	492,4322035
TOTAL	9.848,644071	9.848,644071	

2.6.1.9 Neraca Massa Reboiler

Keterangan:

A13 = Aliran umpan EDC

A15 = Aliran keluaran EDC kembali ke menara distilasi

A16 = Aliran keluaran EDC *recycle* menuju *mixer*

Massa masuk = Massa keluar

 $A13 = A15 + A16$ **Tabel 2.11** Neraca massa Pada Reboiler

Komponen	Input	Output	
	A13	A15	A16
EDC	12.111,39976	10.282,5784	1.828,821364
VCM	9,845905697	9,845905697	0
HCl	0,000461217	0,000461217	0
H ₂ O	0		0
Jumlah	12.121,24613	10.292,42476	1.828,821364
TOTAL	12.121,24613	12.121,24613	

Neraca Massa Overall

Tabel 2.12 Neraca Massa Overall

Komp.	Input			Output			
	A1	A7	A8	A9	A14	Waste	A15
	kg/jam						
EDC	25.454,54		0	1,51552	11,517	153,082	10.282,5
VCM			1,169		9.344,3	118,119	9,84590
HCl			0,547	5.476,1	0,4377	55,3257	0,00046
H ₂ O		17.114,67	1,711	17.113			0
Total	25.454,54	17.114,67	3,428517	22.590,6	9.356,2	326,527	10.292,4
	44.398,04374			44.398,04374			

Perhitungan Efisiensi Produksi:

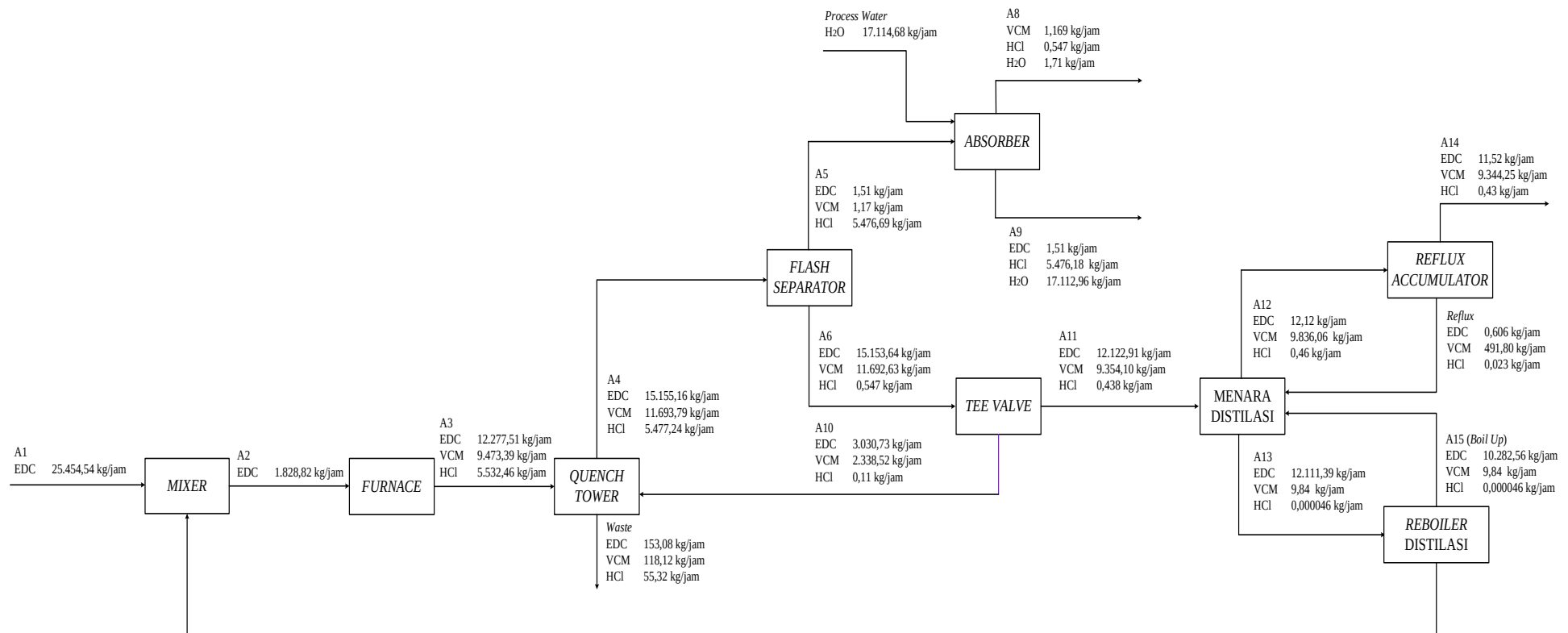
$$Efisiensi\ Produksi = \frac{Jumlah\ Produk}{Jumlah\ Bahan} \times 100\%$$

$$Efisiensi\ Produksi = \frac{25.102,98}{25.454,54} \times 100\%$$

$$Efisiensi\ Produksi = 98.62 \%$$

$$Kemurnian\ Produk\ VCM = \frac{9.344,26}{9.356,21} \times 100\%$$

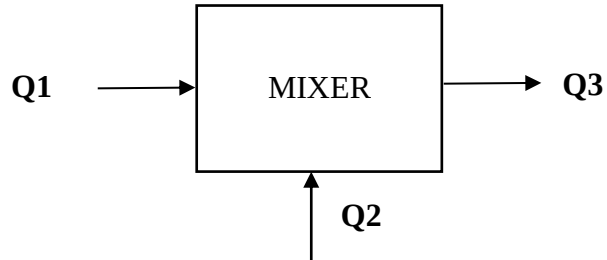
$$Kemurnian\ Produk\ VCM = 99,87 \%$$



Gambar 2.3 Diagram Alir Massa Produksi VCM

2.6.2 Neraca Panas

2.6.2.1 Neraca Panas Mixer



Keterangan:

Q1 = Panas umpan *mixer* (EDC)

Q2 = Panas umpan EDC *recycle*

Q3 = Panas keluar *mixer* (EDC)

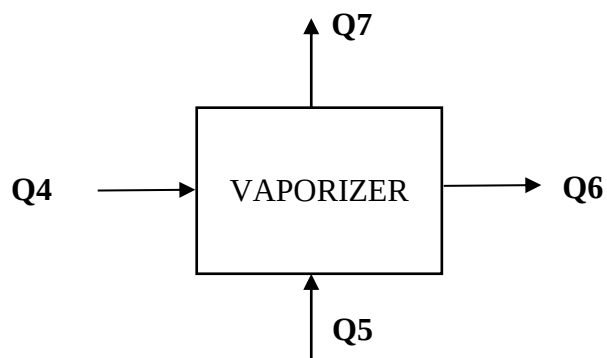
Panas Masuk = Panas Keluar

$$Q1 + Q2 = Q3$$

Tabel 2.13 Neraca Panas Pada Mixer

Komponen	Input		Output
	Q1	Q2	Q3
	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam
EDC	7.748,100	1.048,880	8.796,98
VCM			
HCl			
Jumlah	7.748,100	1.048,880	8.796,98
Total	8.796,981		8.796,98

2.6.2.2 Neraca Panas Vaporizer



Keterangan:

Q4 = Panas umpan *vaporizer* (EDC)

Q5 = Panas umpan produk atas *quench tower*

Q6 = Panas keluar *vaporaizer* (EDC)

Q7 = Panas keluar *vaporizer*

Panas Masuk = Panas Keluar

$Q4 + Q5 = Q6 + Q7$

Tabel 2.14 Neraca Panas Pada Vaporizer

Komp.	Input			Output		
	Q4 (kJ/jam)	Q5 (kJ/jam)	Q serap (kJ/jam)	Q6 (kJ/jam)	Q7 (kJ/jam)	Q vap (kJ/jam)
EDC	8.898,6	8.038,8	8.167.116,2	15.279,9	6.258,2	8.168.765,2
VCM		5.951,8			2.457,2	
HCl		4.371,2			1.616,3	
Jumlah	8.898,6	18.361,9	8.167.116,2	15,279.9	10331.7	8.168.765,2
Total		8.194.376,83			8.194.376,83	

2.6.2.3 Neraca Panas Kompresor



Keterangan:

Q8 = Panas umpan Kompresor

Q9 = Panas keluar Kompresor

Panas Masuk = Panas keluar

$Q8 = Q9$

Tabel 2.15 Neraca Panas Pada Kompresor

	input		output	
	W1	W2	Q intercooler	ΔH
Komp.	(kJ/jam)	(kJ/jam)	(kJ/jam)	(kJ/jam)
EDC	796.273,704	395.501,44	664.439,89	527.335,25
VCM				
HCl				
Jumlah	796.273,704	395.501,44	664.439,89	527.335,25
TOTAL	1.191.775,14		1.191.775,14	

2.6.2.4 Neraca Panas Furnace

Keterangan:

Q10 = Panas umpan *furnace*Q11 = Panas keluar *furnace*

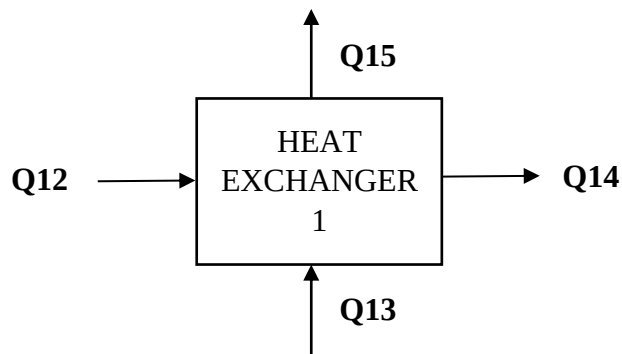
Panas Masuk = Panas Keluar

Q10 = Q11

Tabel 2.16 Neraca Panas Pada Furnace

Komp.	Input			Output		
	Q bahan			Q gas	Q loss	
	Hin	bakar	Q reaksi	Hout	buang	total
	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam
EDC	16241.4			14198.7		
VCM				11297.9		
HCl				4456.2		
Q		19587.62	10033.47		984.67	14925.1
Jumlah	16241.4	19587.62	10033.47	29952.8	984.666	14925.1
TOTAL		45862.55			45862.55	

2.6.2.5 Neraca Panas *Heat Exchanger 1*



Keterangan:

Q12 = Panas Umpan *Heat Exchanger*

Q13 = Panas input demin water

Q14 = Panas output *steam*

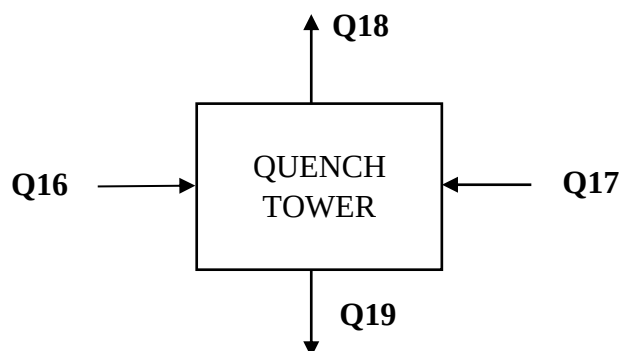
Q15 = Panas Output *Heat Exchanger 1*

Panas Masuk = Panas Keluar

Tabel 2.17 Neraca Panas Pada Heat Exchanger 1

Komp.	Input		Output		
	Q12	Q13 (Demin)	Q14	Q15	
				Demin out	Pendingin
	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam	
EDC	14198.7		9651.51		
VCM	11297.7		7950.34		
HCl	4456.24		4406.85		
H2O		168354.7		53840.74	
Q					122458.07
Jumlah	29952.8	168354.7	22008.7	53840.74	122458.0678
Total	198307.50		198307.50		

2.6.2.6 Neraca Panas *Quech Tower*



Keterangan:

Q16 = Panas umpan *quench tower*

Q17 = Panas umpan *bottom flash separator*

Q18 = Panas keluar *quench tower*

Q19 = Panas keluar menuju *waste water system*

Panas Masuk = Panas Keluar

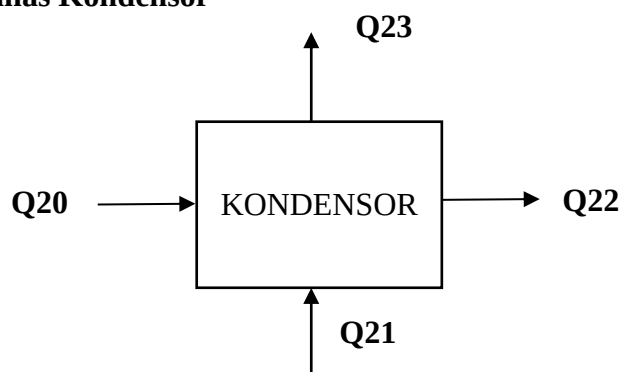
Tabel 2.18 Neraca Panas input Pada Quench Tower

Komp.	Input		
	Q16 (kJ/jam)	Q17 (kJ/jam)	Q heat (kJ/jam)
EDC	9.651,51	1.207,31	
VCM	7.950,34	724,70	
HCl	4.406,85	0,09	
Q			165.089,3
Jumlah	22.008,69	1.932,10	165.089,3
TOTAL	189.030,11		

Tabel 2.19 Neraca Panas Output Pada Quench Tower

Komp.	Output			
	Q18 (kJ/jam)	Q19 (waste)	Q Pendinginan	Q Loss
EDC	8038.83	147.26		8251.56
VCM	5951.89	128.73		6639.85
HCl	4371.22	93.50		4406.76
Q	0.00	0.00	151000.48	
Jumlah	18361.95	369.50	151000.48	19298.17
TOTAL	189030.11			

2.6.2.7 Neraca Panas Kondensor



Keterangan:

Q20 = Panas umpan kondensor

Q21 = Panas umpan *cooling water*

Q22 = Panas keluar kondensor

Q23 = Panas keluar *cooling water*

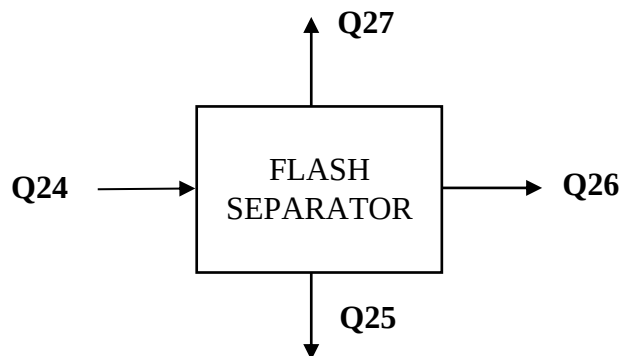
Panas Masuk = Panas Keluar

$$Q20 + Q21 = Q22 + Q23$$

Tabel 2. 20 Neraca Panas Pada Kondensor

Komp.	Input			Output	
	Q20	Q21 (CW)	Q22	Q Pendinginan	Q Loss
	kJ/Jam	kJ/Jam	kJ/Jam	kJ/jam	kJ/Jam
EDC	6258.24		5734.02		
VCM	2457.21		9249.24		
HCl	1616.25		10811.80		
Q		7620.92		-36761.68	28919.23
Jumlah	10331.69	7620.92	25795.06	-36761.68	28919.23
TOTAL	17952.61			17952.61	

2.6.2.8 Neraca Panas Flash Separator



Keterangan:

Q24 = Panas keluaran kondensor

Q25 = Panas keluar *Flash separator*

Q26 = Panas hilang *Flash separator*

Q27 = Panas gas keluar *Flash separator*

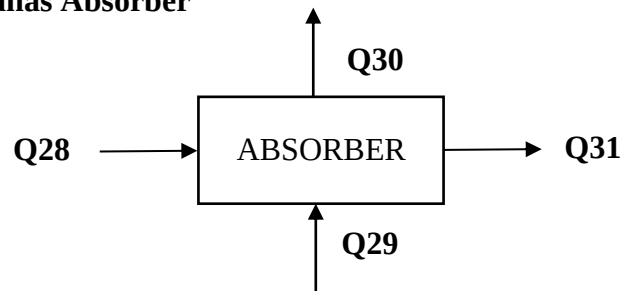
Panas Masuk = Panas Keluar

$$Q_{24} = Q_{25} + Q_{26} + Q_{27}$$

Tabel 2. 21 Neraca Panas Pada Flash Separator

Komponen	Input		Output	
	Q24	Q25	Q27	Q loss (Q26)
	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam
EDC	5734.02	5733.44	0.60	
VCM	9249.24	9248.32	0.36	
HCl	10811.80	1.08	4385.16	
Q				6426.09
Jumlah	25795.06	14982.84	4386.13	6426.087731
TOTAL	25795.06		25795.06	

2.6.2.9 Neraca Panas Absorber



Keterangan:

Q28 = Panas gas keluar dari *flash separator*

Q29 = Panas umpan *process water*

Q30 = Panas gas keluar dari *absorber*

Q31 = Panas larutan HCl

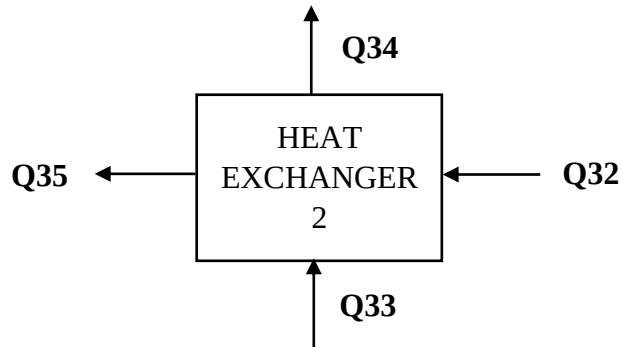
Panas Masuk = Panas Keluar

Tabel 2.22 Neraca Panas Pada Kondensor

Komp.	Input			Output		
	Q28	Q29	ΔH Pel	Q30	Q31	Q serap
	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam
EDC	0,60				0,55	
VCM	0,36			0,38		
HCl	4.385,1			0,44	10.848,5	
H ₂ O		6.858.276,5		3,21	86.990,1	

Q	11.230.120					
Jumlah	4.386,1	6.858.276,5	11.230.120	4,03	97.839,2	17994939,6
Total	18.092.782,80			18.092.782,80		

2.6.2.10 Neraca Panas Heat Exchanger 2



Keterangan:

Q32 = Panas umpan *heat exchanger 2*

Q33 = Panas umpan *Ethylene Dichloride recycle*

Q34 = Panas keluar *heat exchanger 2*

Q35 = Panas keluar *EDC recycle*

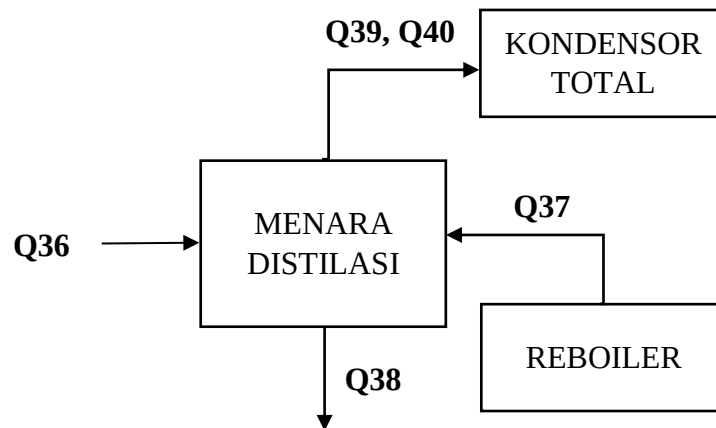
Panas Masuk = Panas Keluar

$$Q32 + Q33 = Q34 + Q35$$

Tabel 2.23 Neraca Panas Pada Heat Exchanger 2

Komp.	Input			Output		
	Q					
	Q32	Q33	pemanasan	Q34	Q35	Qloss
	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam
EDC	1.084,52	4.586,76		7.675,21	1.084,52	
VCM		7.398,65		8.693,57		
HCl		0,86		0,81		
H2O						
Q			22.103,63			17.720,3
Jumlah	1.084,52	11.986,27	22.103,63	16.369,59	1084,52	17.720,3
TOTAL		35.174,42			35.174,42	

2.6.2.11 Neraca Panas Menara Distilasi



Keterangan:

Q36 = Panas gas keluar dari *flash separator*

Q37 = Panas umpan *process water*

Q38 = Panas keluar produk bawah

Q39 = Panas hilang

Q40 = Panas keluaran kondensor produk atas

Panas Masuk = Panas Keluar

$$Q36 + Q37 = Q38 + Q39 + Q40$$

Tabel 2. 24 Neraca Panas Pada Menara Distilasi

Komp.	Input			Output		
	Q36	Q37	Q38	Q39	Q40	QLoss
	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam	kJ/jam
EDC	7.675,60		10.548,62	4,15	2,58	
VCM	9.150,65		10,31	7.575,05	2.111,07	
HCl	0,85			0,92	0,03	
Q		34.966,13				31.540,5
Jumlah	16.827,1	34.966,13	10558,9	7.580,1	2.113,68	31.540,5
Total	51.793,22			51.793,22		

Neraca Panas Overall

Tabel 2.25 Neraca Panas Overall

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Static Mixer		
Q1 (Panas umpan EDC)	8,796.981	-
Q3 (Panas keluar mixer)	-	8,796.981
Vaporizer		
Q penguapan (Q steam)	8,167,116.257	-
Q pemanas (Q4+Q5)	27,260.571	-
Q Pendinginan (Q6+Q7+Qlaten)	-	8,194,376.829
Kompresor		
Q Kompresi (W1+W2)	1,191,775.142	-
Q Intercooler	-	1,191,775.142
Furnace		
Q Bahan Bakar	45,862.547	-
Q gas buang	-	984.667
Qloss	-	44,877.880
Heat Exchanger 1		
Q Steam	198,307.503	-
Q Pemanasan	-	198,307.503
Quench Tower		
Q Pemanasan	189,030.11	-
Q Pendinginan	-	189,030.107
Condensor Parsial		
Q Cooling Water	17,952.612	-
Q Kondensasi	-	17,952.612
Flash separator		
Q EDC	25795.06	-
Q VCM	-	25,795.059
Absorber		
Q Demin Water	18,092,782.803	-
Q Pendinginan	-	18,092,782.803

<i>Heat Exchanger</i>		
Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Q Panas diserap	35,174.424	-
Q Pemanasan (Q34+Q35)	-	35,174.424
<i>Menara Distilasi 2</i>		
Q Feed	16,827.09	-
Q Reboiler	34,966.13171	-
Q Bottom	-	10,558.927
Q Destilat	-	7,580.113
Q Kondensor	-	2,113.684516
Q Loss	-	31,540.50
Jumlah	28,051,647.228	28,051,647.228

Perhitungan Efisiensi Energi:

Total Q loss semua alat = 118.829,39 kJ/jam

Energi Berguna = Q input – Q loss total

Energi Berguna = 28,051,647.228 kJ/jam - 118.829,39 kJ/jam

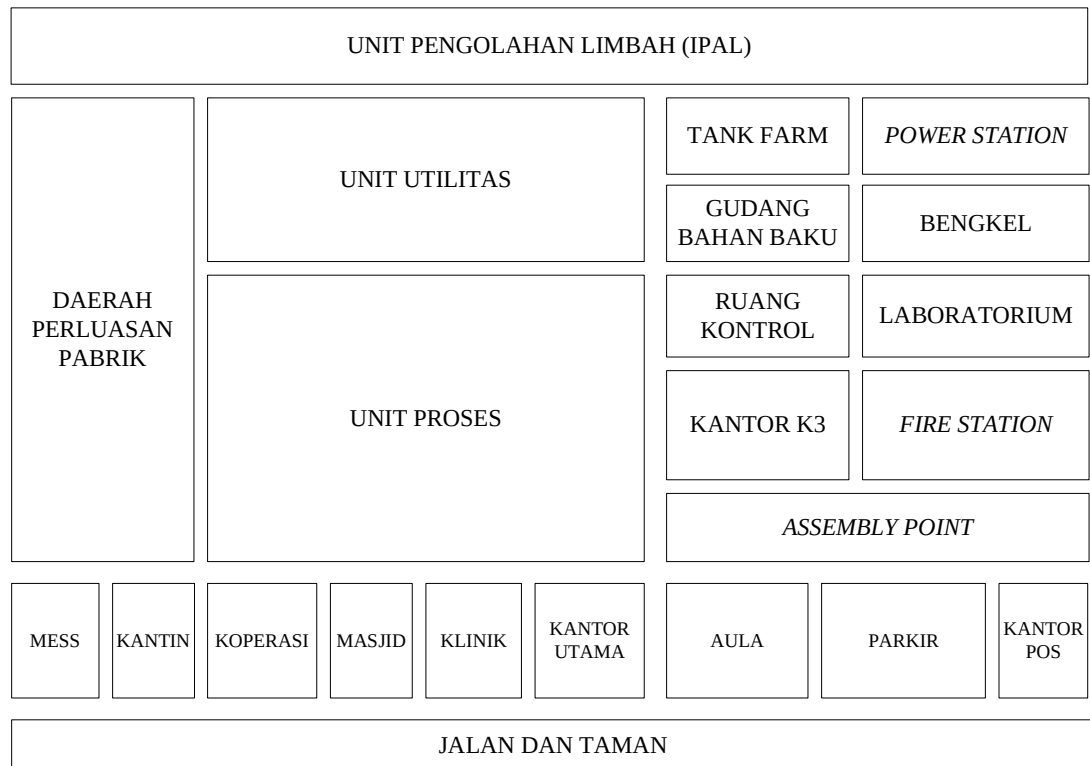
Efisiensi Energi = $\frac{Q \text{ berguna}}{Q_{input}} \times 100\%$

Efisiensi Energi = $\frac{27.932.817,840 \text{ kJ/jam}}{28.051.647,228 \text{ kJ/jam}} \times 100\%$

Efisiensi Energi = 99,57%

2.7 Tata Letak dan Pemetaan

2.7.1 Layout Pabrik



Gambar 2.4 Tata Letak Pabrik *Vinyl Chloride Monomer*

Tata letak pabrik merupakan aspek krusial yang perlu diperhatikan dalam dunia industri. Perancangan tata letak pabrik yang terencana dengan baik mampu meningkatkan efektivitas dan efisiensi operasional, baik dalam hal produksi maupun dalam faktor pendukung lain yang berkaitan dengan keberjalanan pabrik. perencanaan dan penerapan tata letak pabrik bertujuan untuk mengorganisir area kerja serta seluruh fasilitas produksi secara optimal dan ekonomis, sehingga kegiatan operasional berjalan lancar dan mampu mendorong peningkatan etos kerja para operator. Selain itu, terdapat berbagai keuntungan lain dari penerapan tata letak pabrik yang baik, diantaranya sebagai berikut.

- Memperbaiki etos serta kepuasan kerja
- Meningkatkan output produksi
- Mengurangi waktu proses dalam transportasi bahan
- Menghemat penggunaan area (produksi, gudang, service, dan lain sebagainya)
- Menghindari ketidakteraturan dalam pabrik

- Mengoptimalkan pemanfaatan peralatan, sumber daya manusia, serta sarana produksi agar digunakan secara lebih efektif dan efisien

Perencanaan tata letak pabrik perlu dilakukan secara cermat guna mendukung kelancaran proses distribusi bahan, sehingga dapat berlangsung lebih cepat, tertata, dan efisien. Berikut ini disajikan uraian mengenai pemanfaatan luas area lahan yang digunakan.

Tabel 2.26 Rincian Penggunaan Luas Tanah Bangunan *Indoor dan Outdoor*

No	Bangunan	Luas (m ²)
1	Pos keamanan	25
2	Gedung kantor utama	2.500
3	Kantor K3	300
4	Mess	600
5	Poliklinik	100
6	Kantin	150
7	Koperasi	60
8	Laboratorium	600
9	Gudang Bahan baku	500
10	Bengkel	300
11	Masjid	500
12	Aula	1.200
13	Ruang kontrol	400
14	Pemadam kebakaran (<i>Fire Station</i>)	200
15	Unit Proses	9.000
16	Unit utilitas	2.000
17	Tank farm	2.500
18	IPAL	800
19	Parkir area	1.000
20	Jalan dan taman	4.000
21	Perluasan area	2.000
22	<i>Power station</i>	500
23	Titik kumpul (<i>Assembly Point</i>)	700
Jumlah		22.500
TOTAL		29.935

2.7.2 Layout Peralatan Proses

Dalam penentuan tata letak peralatan proses pada pabrik terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan antara lain, yaitu:

1. Aliran bahan baku dan produk

Perancangan aliran bahan baku yang tepat dapat memberikan keuntungan secara ekonomis, serta dapat menunjang kelancaran proses produksi.

2. Aliran udara

Aliran udara pada area proses perlu diperhatikan sirkulasi dan arah hembusan anginnya. Hal tersebut bertujuan untuk menghindari terjadinya stagnasi udara pada suatu tempat yang berupa penumpukan atau akumulasi bahan kimia berbahaya yang dapat membahayakan keselamatan pekerja dan orang-orang disekitar pabrik.

3. Pencahayaan

Pencahayaan seluruh pabrik harus memadai dan area produksi yang berbahaya perlu diberi penerangan lebih.

4. Lalu lintas manusia

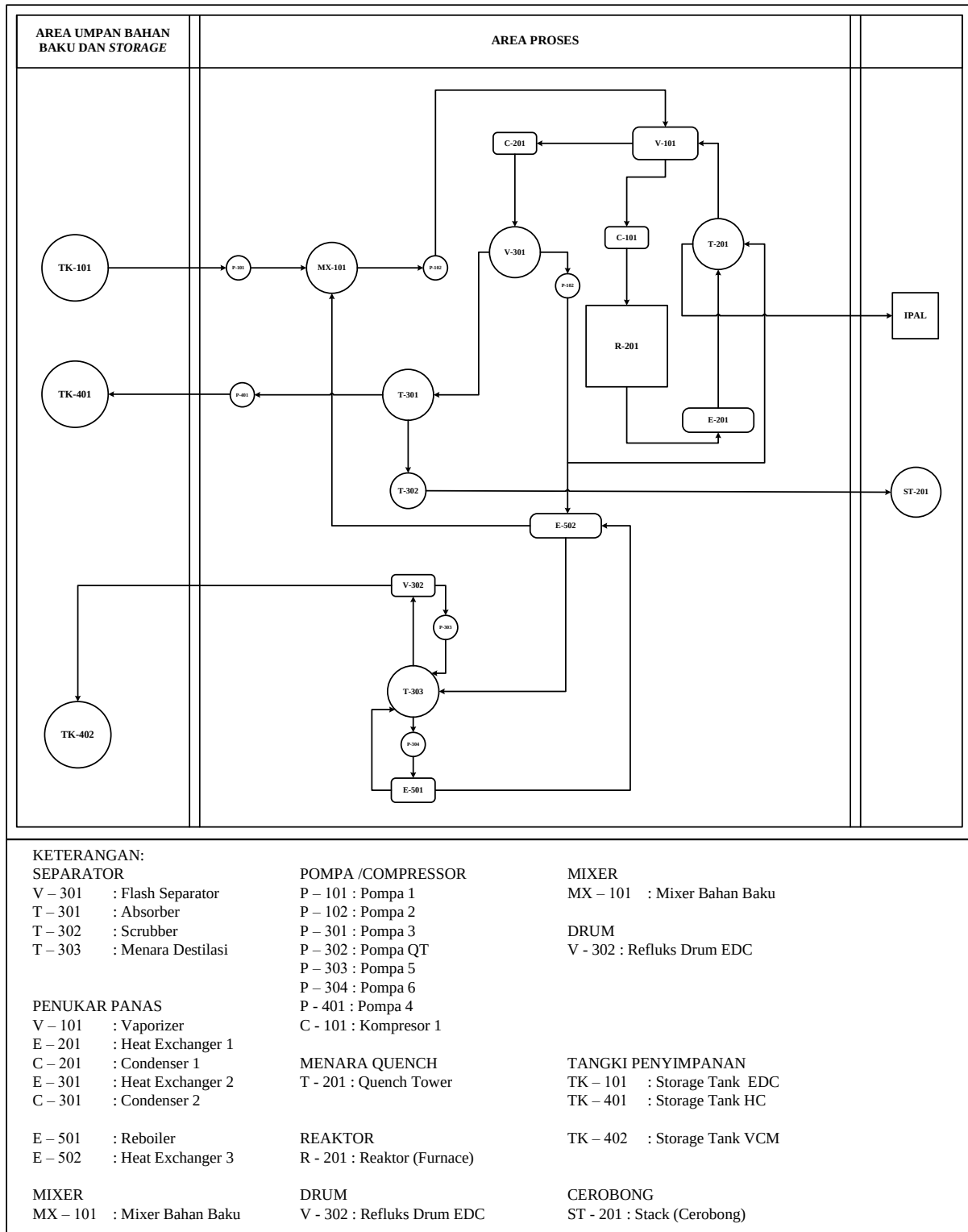
Pergerakan lalu lintas manusia perlu diperhatikan agar pekerja mampu mencapai seluruh alat proses dengan mudah dan cepat termasuk dapat terjadi gangguan pada alat proses.

5. Jarak antar alat proses

Jarak antara alat proses perlu diperhatikan karena alat proses yang memiliki suhu dan tekanan operasi tinggi, sebaiknya dipisahkan dari alat proses lainnya, hal ini bertujuan jika apabila terjadi ledakan atau kebakaran pada alat tersebut, tidak akan berdampak pada alat-alat lain

6. Pertimbangan ekonomi

Pertimbangan biaya operasi dalam memilih tata letak alat perlu diperhatikan agar dapat menjamin kelancaran serta keamanan produksi sehingga dapat menguntungkan perusahaan dari segi ekonomi.



Gambar 2.5 Layout Peralatan Proses