

BAB II

DESKRIPSI PROSES

2.1 Spesifikasi Bahan Baku dan Produk

2.1.1 Spesifikasi Bahan Baku

A. Gliserol

Berdasarkan data dari PT Cisadane (2020), gliserol memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Rumus Molekul : $C_3H_8O_3$
- Berat Molekul : 92,094 gr/mol
- Bau : Khas
- Kemurnian : min 99,5% mol
- Impuritas : max 1%

B. Udara Proses

- Suhu : 30°C
- Tekanan : 1 atm
- Komposisi : N $\pm$ 79% mol
O₂ $\pm$ 21% mol
Partikulat padat $\pm$ 0,02% berat

2.1.2 Spesifikasi Bahan Penunjang

A. Katalis ZrO₂-Al₂O₃ (Zirkonia-Alumina)

Berdasarkan data dari American Elements (2015), ZrO₂-Al₂O₃ (Zirkonia-Alumina) memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Bentuk : Bola bulat (*spherical beads*)
- Berat Molekul : 108,34 gr/mol
- Ukuran : 0,5-2 mm
- Porositas : 0,7 cm³/g
- Bulk Density : 0,4-0,8 gr/cm³
- Sifat : Asam-basa yang seimbang & selektif

B. Katalis Tri-MoVWCuO

Berdasarkan data dari American Elements (2020), $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Zirkonia-Alumina) memiliki spesifikasi sebagai berikut

- Bentuk : Pellet
- Berat Molekul : 255,55 gr/mol
- Ukuran : 2-5 mm
- Porositas : $0,3 \text{ cm}^3/\text{g}$
- Bulk Density : $0,9\text{-}1,3 \text{ gr/cm}^3$

C. Solven Air

- Rumus Molekul : H_2O
- Berat Molekul : 118 gr/mol
- Bentuk : Cairan tidak berwarna
- Kemurnian : min. 99,99%

2.1.3 Spesifikasi Produk

A. Asam Akrilat

- Rumus Molekul : $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_2$
- Berat Molekul : 72,064 gr/mol
- Bentuk : cair tidak berwarna
- Bau : Khas
- Kemurnian : min 99,3 % mol
- Impuritas : asam asetat maks. 0,5% mol
air maks. 0,2% mol

2.1.4 Sifat Fisika dan Kimia Bahan Baku

A. Gliserol

Sifat Fisika Gliserol

- Rumus Kimia : $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$
- Berat Molekul : 92,094 gr/mol
- Wujud : Gas
- Titik Didih : 290°C
- Titik Beku : $17,8^\circ\text{C}$
- Densitas : $1,255 \text{ g/cm}^3$

Tekanan Kritis : 82,1 Bar

Viskositas : 945 cp

Sifat Kimia Gliserol

Berdasarkan (Kirk-Othmer, 1989a) sifat kimia gliserol yakni:

a. Dehidrasi

Reaksi dehidrasi (melepaskan air) pada suhu tinggi (280-320°C) dengan bantuan katalis asam akan menghasilkan akrolein

b. Esterifikasi

Gliserol dapat bereaksi dengan asam karboksilat (misalnya asam lemak) membentuk ester, terutama dalam industri pembuatan sabun, biodiesel, dan emulsi.

c. Oksidasi

Oksidasi menjadi berbagai senyawa tergantung kondisi dan katalis contohnya oksidasi ringan gliseraldehid oksidasi kuat menjadi asam oksalat

d. Maillard

Dalam sistem makanan, gliserol dapat ikut berperan dalam reaksi pencoklatan non-enzimatis (reaksi *Maillard*) jika ada kehadiran asam amino dan panas, meskipun perannya tidak dominan seperti gula reduksi.

B. Oksigen dari Udara

1. Sifat Fisika Udara

Sifat Fisika udara diasumsikan terdiri dari 79% mol N₂ dan 23% mol O

Tabel 2. 1 Sifat Fisika Udara

Parameter	N ₂	O
Wujud	Gas	Gas
Berat Molekul (kg/mol)	28,031	32,01
Specific Gravity	12,5	1,71
Titik Didih (°C)	-195,9	-1833
Titik Beku (°C)	-209,68	-214,8
Suhu Kritis (K)	126,2	154,6

Tekanan Kritis (bar)	3,3	50,5
Volume Kritis (m ³ /mol)	0,089	0,73
Densitas (kg/cm ²)	809	1149

2. Sifat Kimia Oksigen

Menurut (Perry & Green, 2008) Oksigen memiliki sifat kimia sebagai berikut:

- Oksigen bersifat sangat reaktif dan dapat bereaksi dengan hampir semua unsur, kecuali gas mulia seperti helium (He), neon (Ne), dan argon (Ar) yang inert secara kimia.
- Dalam pembentukan senyawa, oksigen cenderung melepaskan dua elektron valensinya untuk berikatan dengan unsur lain, membentuk ikatan kimia yang stabil.
- Beberapa logam, seperti logam alkali dan rubidium, dapat bereaksi spontan dengan oksigen pada suhu kamar karena energi aktivasi yang dibutuhkan sangat rendah.
- Pada suhu rendah dan dengan adanya katalis, oksigen dapat bereaksi dengan senyawa organik menghasilkan senyawa hidrokarbon yang mengandung oksigen (oxygenated hydrocarbons).
- Ketika bereaksi dengan bahan bakar seperti minyak bumi, batubara, atau gas alam, oksigen menghasilkan panas serta membentuk produk utama berupa karbon dioksida (CO₂), air (H₂O), dan gas sisa seperti nitrogen (N₂) dan oksigen (O₂) yang tidak bereaksi.

2.1.5 Sifat Fisika dan Kimia Produk

A. Asam Akrilat

1. Sifat Fisika Asam Akrilat

Berdasarkan Prasad & Kumar (1988), Sifat fisika dan kimia asam akrilat yakni:

Rumus Kimia	: C ₃ H ₄ O ₂
Berat Molekul	: 72 g/mol
Wujud	: Cair
Titik Didih	: 141°C (1 atm) 115°C (0,4 atm)
Titik Leleh	: 13,5°C
Densitas	: 1,045 g/cm ² (pada suhu 25°C)
Tekanan Kritis	: 5,06 MPa
Suhu Kritis	: 380°C
Viskositas Kinematis	: 1,1 cks (pada suhu 25°C)

2. Sifat Kimia Asam Akrilat

Asam akrilat memiliki karakteristik reaksi khas dari senyawa asam tak jenuh dan juga dari asam karboksilat. Tingginya reaktivitas senyawa ini disebabkan oleh adanya dua pusat tak jenuh (unsaturation) yang saling terkonjugasi, terutama pada atom karbon β yang dipolarisasi oleh gugus karbonil. Hal ini membuat atom tersebut bersifat elektrofilik dan memudahkan terjadinya reaksi penambahan oleh berbagai nukleofil maupun senyawa dengan hidrogen aktif ke gugus vinil.

Ikatan rangkap karbon-karbon dalam asam akrilat juga sangat reaktif dan dapat mengalami reaksi adisi radikal, reaksi Diels–Alder dengan senyawa diena, serta reaksi polimerisasi. Gugus karboksilnya dapat menjalani reaksi khas asam alifatik dan ester, seperti esterifikasi dan transesterifikasi. Kombinasi reaktivitas dari gugus vinil dan karboksil.

Asam akrilat sangat mudah mengalami polimerisasi. Proses ini dapat dikatalisis oleh panas, cahaya, atau senyawa peroksida, dan dikendalikan oleh adanya inhibitor seperti eter monometil dari hidrokuinon atau hidrokuinon itu sendiri. Penghambat polimerisasi ini hanya bekerja efektif jika terdapat oksigen.

2.1.6 Sifat Fisika dan Kimia Akrolein:

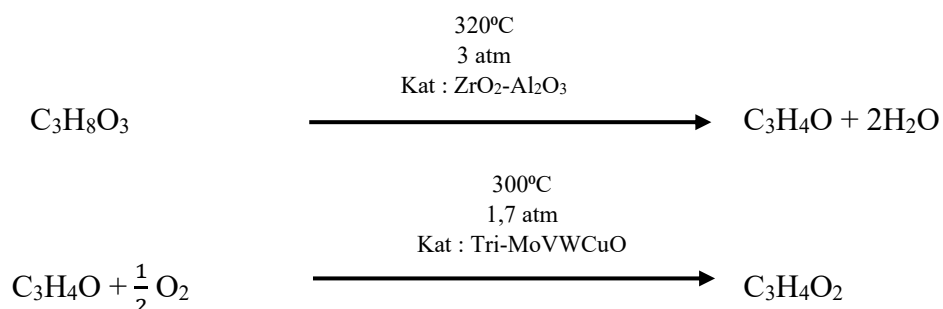
Rumus Molekul	: C_3H_4O
Massa Molekul	: ± 56.06 g/mol
Wujud	: Cairan tidak berwarna (kadang kekuningan)
Bau	: Menyengat, tajam seperti bau pembakaran lemak
Titik Didih	: $53\text{ }^{\circ}\text{C}$
Titik Leleh	: $-87\text{ }^{\circ}\text{C}$
Kelarutan	: Larut dalam air, etanol, eter

2.2 Konsep Proses

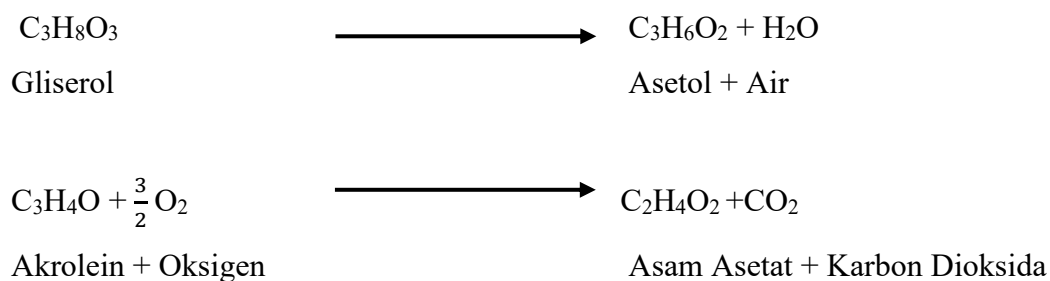
2.2.1 Dasar dan Fase Reaksi

Proses produksi asam akrilat dilakukan dalam fase gas dengan melibatkan katalis padat, sehingga diklasifikasikan sebagai reaksi katalitik heterogen. Rute sintesis asam akrilat dari gliserol berlangsung melalui dua tahap yakni dehidrasi dan oksidasi. Dehidrasi yakni proses penghilangan air pada gliserol dengan suhu tinggi dan katalis asam untuk memperoleh akrolein, reaksi ini bersifat endotermis. Kemudian akrolein akan di

reaksikan lebih lanjut yang disebut dengan reaksi oksidasi yakni penambahan udara untuk membentuk asam akrilat. Reaksi yang terjadi merupakan reaksi eksotermis, yang melepaskan sejumlah besar panas (Dubois et al., 2011).



Beberapa reaksi samping dapat terjadi. Beberapa reaksi samping yang diberikan di bawah ini



Oleh karena itu, pengaturan proses terdiri dari sistem dua reaktor dengan masing-masing reaktor membentuk reaksi yang berbeda, menggunakan katalis dan beroperasi pada kondisi untuk memaksimalkan produksi asam akrilat.

2.2.2 Penggunaan Katalis

Katalis zirkonia-alumina ($\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) digunakan dalam reaksi dehidrasi gliserol menjadi akrolein karena memiliki sifat asam dan stabilitas termal yang baik. Kombinasi ini mendukung pembentukan akrolein secara selektif dengan meminimalkan produk samping. Zirkonia yang bersifat asam kuat, sedangkan alumina meningkatkan luas permukaan dan dispersi katalis. Katalis ini digunakan untuk kondisi suhu tinggi yang dibutuhkan dalam proses dehidrasi. Pada reaksi dehidrasi ini menggunakan reaktor fluidized bed, sehingga digunakan katalis zirkonia-alumina yang berbentuk beads (bola kecil) karena lebih stabil ketika terfluidisasi (Dimian & Bildea, 2021).

Sementara itu, katalis Tri-MoVWCuO digunakan dalam reaksi oksidasi akrolein menjadi asam akrilat karena memiliki aktivitas redoks dan selektivitas tinggi. Komponen Mo dan V bertindak sebagai pusat aktif untuk aktivasi oksigen dan akrolein, sementara

W dan Cu meningkatkan kestabilan struktur dan umur katalis. Katalis ini mampu mengarahkan reaksi agar menghasilkan asam akrilat secara efisien. Hal ini penting untuk menghindari pembentukan CO₂ dan produk samping lain. (Kirk-Othmer, 1989a).

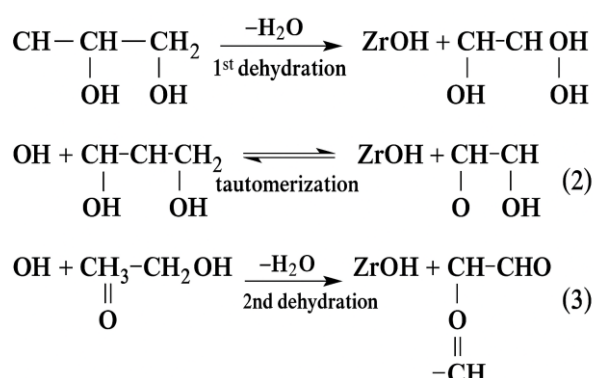
2.2.3 Mekanisme Reaksi

Proses pembentukan asam akrilat dari gliserol terdiri dari reaksi dehidrasi dan oksidasi yang dapat digambarkan dengan mekanisme berikut

Pertama, reaksi dehidrasi gliserol menjadi akrolein berlangsung melalui dua tahapan eliminasi molekul air dari gliserol (HO-CH₂-CH(OH)-CH₂OH), dengan bantuan katalis padat bersifat asam ZrO₂-Al₂O₃. Terdapat intermediat yang terbentuk selama reaksi adalah asetol (hydroxyacetone), yakni senyawa dengan gugus karbonil (C=O) dan alkohol primer (-CH₂OH).

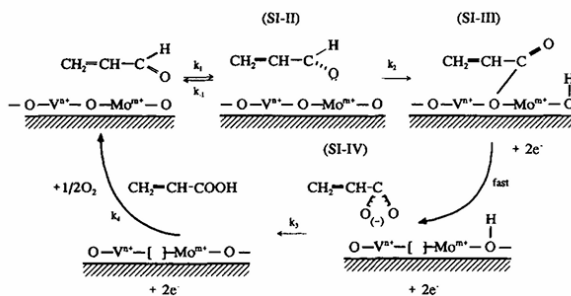
Pada tahap pertama, gliserol mengalami protonasi pada gugus hidroksil sekunder (C-2) oleh situs asam Lewis pada permukaan katalis ZrO₂-Al₂O₃. Protonasi ini meningkatkan kemampuan gugus -OH untuk meninggalkan gugus sebagai molekul air, membentuk karbokation di karbon tengah. Karbokation ini kemudian mengalami reorganisasi elektron, sehingga terbentuk gugus karbonil dan menghasilkan asetol (CH₃-CO-CH₂OH) sebagai intermediat (Wu et al., 2020).

Tahap selanjutnya, asetol mengalami protonasi pada gugus -OH primer. Eliminasi air kedua terjadi, membentuk karbokation primer yang kemudian distabilkan melalui pembentukan ikatan rangkap C=C dengan karbon α terhadap gugus karbonil. Hasil akhir dari proses ini adalah akrolein (CH₂=CH-CHO).



Gambar 2. 1 Mekanisme Reaksi (Sandid et al., 2023)

Sedangkan untuk oksidasi akrolein menjadi asam akrilat mekanisme reaksi yang terjadi yakni.



Gambar 2. 2 Kinetika Reaksi (Sandid et al., 2023)

Pertama, oksidasi selektif akrolein ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CHO}$) menjadi asam akrilat ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{COOH}$). Reaksi ini berlangsung dalam fase gas dengan bantuan oksigen (O_2) dan katalis TriMoVWCu , mengikuti mekanisme Mars–van Krevelen.

Akrolein diadsorpsi pada permukaan katalis, lalu atom oksigen dari katalis ditransfer ke gugus aldehida, membentuk gugus karboksilat. Proses ini melibatkan reduksi sementara situs logam (misalnya $\text{Mo}^{6+} \rightarrow \text{Mo}^{5+}$) yang kemudian diregenerasi oleh O_2 . Menghasilkan asam akrilat (Abubakar et al., 2023).

2.2.3 Tinjauan Termodinamika dan Kinetika

a. Tinjauan Termodinamika

Apabila ditinjau dari termodinamikanya, Pada pembuatan asam akrilat terdapat 2 tahapan reaksi yang terjadi yakni dehidrasi gliserol menjadi akrolein lalu tahapan oksidasi akrolein menjadi asam akrilat. Pada reaksi dehidrasi termasuk dalam reaksi endotermis dan searah (*irreversible*) sedangkan pada reaksi oksidasi termasuk dalam reaksi eksotermis dan searah (*irreversible*). Untuk mengetahui apakah reaksi tersebut eksotermis atau endotermis dan berlangsung searah atau bolak balik dapat diketahui dengan menghitung nilai entalpi (ΔH) dan harga konstanta kesetimbangan reaksi (K) pada suhu operasi. Berikut adalah penjabaran perhitungannya.

Data- data harga ΔH_{f298} dan ΔG° didapatkan dari buku Yaws, 1999. Masing masing komponen pada suhu 298 K tersaji pada tabel 2.2 (Yaws, 1999).

Tabel 2. 2 Data Entalpi Senyawa

Senyawa	A	B	C	ΔH_{f298} (kJ/mol)
$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	-559,438	$-9,22 \cdot 10^{-2}$	$4,50 \cdot 10^{-5}$	-590,923
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$	-	-	-	-356,3
O_2	29,526	$-8,90 \cdot 10^{-3}$	$3,81 \cdot 10^{-5}$	30,25

Senyawa	A	B	C	ΔH_{f298} (kJ/mol)
N ₂	29,342	$-3,54 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$	29,18
H ₂ O	-238,41	$-2,256 \cdot 10^{-2}$	$2,7656 \cdot 10^{-6}$	-241,81
C ₃ H ₄ O	-70,76	$-5,5936 \cdot 10^{-2}$	$3,8665 \cdot 10^{-5}$	-84,00
C ₂ H ₄ O ₂	$-4,18 \cdot 10^2$	$-5,82 \cdot 10^{-2}$	$3,35 \cdot 10^{-5}$	-432,30
C ₃ H ₄ O ₂	-325,038	$-4,41 \cdot 10^{-2}$	$2,09 \cdot 10^{-5}$	-336,313
CO ₂	-393,88	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$-2,11 \cdot 10^{-6}$	-393,497

Dari data, dapat dihitung nilai ΔH keseluruhan reaksi yang terjadi di reaktor pada kondisi standar (298 K) dan kondisi operasi pada reaktor 1 yaitu 320°C (593,15 K) dan reaktor 2 yaitu 300°C (573,15 K).

1. Entalpi Saat Kondisi Standard (298 K)

- Reaktor 1

Reaksi Utama :



$$\begin{aligned}
 \Delta H_{f298} &= \Delta H_{f \text{ produk}} - \Delta H_{f \text{ reaktan}} \\
 &= (\Delta H_f \text{C}_3\text{H}_4\text{O} + \Delta H_f 2\text{H}_2\text{O}) - (\Delta H_f \text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3) \\
 &= (-84,00 + (2 \cdot (-241,81))) - (-590,923) \text{ kJ/mol} \\
 &= 23,286 \text{ kJ/mol}
 \end{aligned}$$

Reaksi Samping :

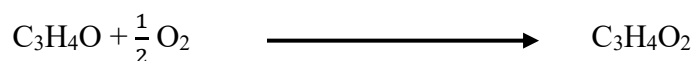


$$\begin{aligned}
 \Delta H_{f298} &= \Delta H_{f \text{ produk}} - \Delta H_{f \text{ reaktan}} \\
 &= (\Delta H_f \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2 + \Delta H_f \text{H}_2\text{O}) - (\Delta H_f \text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3) \\
 &= (-356,3 + (-241,80)) - (-590,923) \text{ kJ/mol} \\
 &= -7,194 \text{ kJ/mol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Maka } \Delta H \text{ Total} &= (23,286 - 7,194) \text{ kJ/mol} \\
 &= 16,091 \text{ kJ/mol (endotermis)}
 \end{aligned}$$

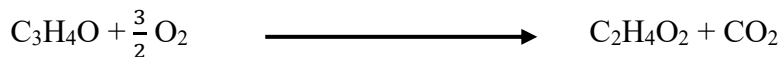
- Reaktor 2

Reaksi Utama :



$$\begin{aligned}
 \Delta H_{f298} &= \Delta H_{f \text{ produk}} - \Delta H_{f \text{ reaktan}} \\
 &= (\Delta H_f \text{ C}_3\text{H}_4\text{O}_2) - (\Delta H_f \text{ C}_3\text{H}_4\text{O} + \Delta H_f \text{ O}_2) \\
 &= (-336,313) - (-84,00 + \frac{1}{2} \cdot 0) \text{ kJ/mol} \\
 &= -252,313 \text{ kJ/mol}
 \end{aligned}$$

Reaksi Samping :



$$\begin{aligned}
 \Delta H_{f298} &= \Delta H_{f \text{ produk}} - \Delta H_{f \text{ reaktan}} \\
 &= (\Delta H_f \text{ C}_2\text{H}_4\text{O}_2 + \Delta H_f \text{ CO}_2) - (\Delta H_f \text{ C}_3\text{H}_4\text{O} + \Delta H_f \text{ O}_2) \\
 &= (-432,30) + (-393,497) - (-84,00 + \frac{3}{2} \cdot 0) \text{ kJ/mol} \\
 &= -741,797 \text{ kJ/mol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Maka } \Delta H \text{ Total} &= (-252,313 + (-741,797)) \text{ kJ/mol} \\
 &= -997,309 \text{ kJ/mol (eksotermis)}
 \end{aligned}$$

2. Entalpi Saat Kondisi Operasi

- Reaktor 1 (593,15 K)

Berikut merupakan data entalpi senyawa pada saat kondisi operasi yakni 593,15 K dihitung menggunakan rumus: $A+BT+CT^2$

Tabel 2. 3 Data Entalpi Senyawa

Senyawa	A	B	C	ΔH_r (593,15K) (kJ/mol)
C ₃ H ₈ O ₃	-559,438	-9,22.10 ⁻²	4,50.10 ⁻⁵	-598,284
C ₃ H ₆ O ₂	-	-	-	-325,000
O ₂	29,526	-8,90.10 ⁻³	3,81.10 ⁻⁵	37,652
N ₂	29,342	-3,54.10 ⁻³	1,01.10 ⁻⁵	30,796
H ₂ O	-238,41	-2,256.10 ⁻²	2,7656.10 ⁻⁶	-244,707
C ₃ H ₄ O	-70,76	-5,5936.10 ⁻²	3,8665.10 ⁻⁵	-90,335
C ₂ H ₄ O ₂	-4,18.10 ²	-5,82.10 ⁻²	3,35.10 ⁻⁵	-440,683
C ₃ H ₄ O ₂	-325,038	-4,41.10 ⁻²	2,09.10 ⁻⁵	-343,809
CO ₂	-393,88	1,91.10 ⁻³	-2,11.10 ⁻⁶	-393,488

- Reaksi Utama :



$$\begin{aligned}\Delta H_{f298} &= \Delta H_{f \text{ produk}} - \Delta H_{f \text{ reaktan}} \\ &= (\Delta H_{f \text{ C}_3\text{H}_4\text{O}} + \Delta H_{f 2\text{H}_2\text{O}}) - (\Delta H_{f \text{ C}_3\text{H}_8\text{O}_3}) \\ &= (-90,335 + (2 \cdot (-244,707))) - (-598,284) \text{ kJ/mol} \\ &= 18,535 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

Reaksi Samping :



$$\begin{aligned}\Delta H_{f298} &= \Delta H_{f \text{ produk}} - \Delta H_{f \text{ reaktan}} \\ &= (\Delta H_{f \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_2} + \Delta H_{f \text{ H}_2\text{O}}) - (\Delta H_{f \text{ C}_3\text{H}_8\text{O}_3}) \\ &= (-325 + (-244,707)) - (-598,284) \text{ kJ/mol} \\ &= 28,557 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Maka } \Delta H \text{ Total} &= 18,535 + 28,557 \text{ kJ/mol} \\ &= 47,113 \text{ kJ/mol (endotermis)}\end{aligned}$$

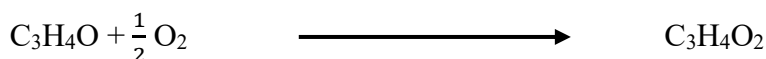
- Reaktor 2 (573,15 K)

Berikut merupakan data entalpi senyawa pada saat kondisi operasi yakni 573,15 K dihitung menggunakan rumus: $A+BT+CT^2$

Tabel 2. 4 Data Entalpi Senyawa

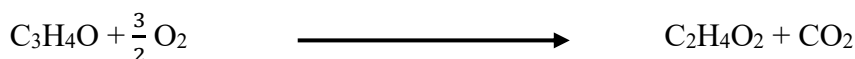
Senyawa	A	B	C	ΔH_r (573,15K) (kJ/mol)
$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	-559,438	$-9,22 \cdot 10^{-2}$	$4,50 \cdot 10^{-5}$	-597,490
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$	-	-	-	-323,000
O_2	-	-	-	0,000
N_2	29,342	$-3,54 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$	30,631
H_2O	-238,41	$-2,256 \cdot 10^{-2}$	$2,7656 \cdot 10^{-6}$	-244,526
$\text{C}_3\text{H}_4\text{O}$	-70,76	$-5,5936 \cdot 10^{-2}$	$3,8665 \cdot 10^{-5}$	-90,118
$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	$-4,18 \cdot 10^2$	$-5,82 \cdot 10^{-2}$	$3,35 \cdot 10^{-5}$	-440,298
$\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_2$	-325,038	$-4,41 \cdot 10^{-2}$	$2,09 \cdot 10^{-5}$	-343,416
CO_2	-393,88	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$-2,11 \cdot 10^{-6}$	-393,477

Reaksi Utama :



$$\begin{aligned}\Delta H_{f298} &= \Delta H_{f \text{ produk}} - \Delta H_{f \text{ reaktan}} \\ &= (\Delta H_{f \text{ C}_3\text{H}_4\text{O}_2}) - (\Delta H_{f \text{ C}_3\text{H}_4\text{O}} + \Delta H_{f \text{ O}_2}) \\ &= (-343,416) - (-90,118 + \frac{1}{2} \cdot 0) \text{ kJ/mol} \\ &= -252,313 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

Reaksi Samping :



$$\begin{aligned}\Delta H_{f298} &= \Delta H_{f \text{ produk}} - \Delta H_{f \text{ reaktan}} \\ &= (\Delta H_{f \text{ C}_2\text{H}_4\text{O}_2} + \Delta H_{f \text{ CO}_2}) - (\Delta H_{f \text{ C}_3\text{H}_4\text{O}} + \Delta H_{f \text{ O}_2}) \\ &= (-440,298) + (-393,76) - (-90,118 + \frac{3}{2} \cdot 0) \text{ kJ/mol} \\ &= -741,797 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Maka } \Delta H \text{ Total} &= (-252,313 - 996,954) \text{ kJ/mol} \\ &= -996,954 \text{ kJ/mol (eksotermis)}\end{aligned}$$

Hasil dari perhitungan diatas didapatkan bahwa pada reaksi pertama yakni reaksi dehidrasi gliserol menjadi akrolein diperoleh nilai entalpi positif. Hal ini berarti reaksi didalam reaktor bersifat endotermis atau memerlukan panas. Sehingga pada reaksi dibutuhkan bantuan pemanas seperti *steam* untuk membantu reaksi berjalan. Sedangkan pada reaksi kedua yakni reaksi oksidasi akrolein menjadi asam akrilat diperoleh nilai entalpi negatif. Hal ini menandakan reaksi dalam reaktor bersifat eksotermis atau melepaskan panas. Oleh karena itu, dibutuhkan pendingin seperti *cooling water*, ataupun zat pendingin lainnya pada reaktor untuk mempertahankan suhu operasi reaktor.

Berikut ini adalah data tiap senyawa yang digunakan dalam penentuan harga K (Yaws, 1999), sebagai berikut:

Tabel 2. 5 Data Energi Gibbs Senyawa saat Suhu 298 K

Senyawa	$\Delta G_{298} \text{ (kJ/mol)}$
$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	-448,49
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$	-291,36
O_2	0,00
N_2	0,00

Senyawa	ΔG_{298} (kJ/mol)
H ₂ O	-228,60
C ₃ H ₄ O	-56
C ₂ H ₄ O ₂	-382,90
C ₃ H ₄ O ₂	-271,00
CO ₂	-394,40

Dari persamaan Van't Hoff :

$$\frac{d \ln K}{dt} = \frac{-\Delta H}{RT}$$

Dimana :

K = Konstanta kesetimbangan

T = Suhu, °K

ΔH = Panas reaksi, kJ/mol

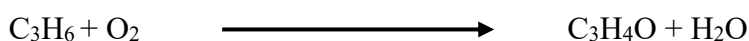
Terlihat bahwa jika suhu semakin tinggi maka tetapan kesetimbangan semakin besar. Berdasarkan data pada table 2.5, dapat dihitung nilai K keseluruhan reaksi pada reaktor, seperti berikut ini apabila ditinjau dari energi gibbs

Dihitung nilai K keseluruhan reaksi pada reaktor, seperti seperti berikut ini apabila ditinjau dari energi gibbs(ΔG) :

1. Nilai K saat kondisi Standar (298 K)

• Reaktor 1

Reaksi Utama :



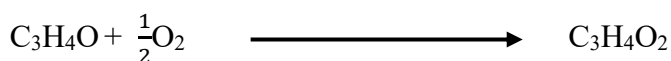
$$\begin{aligned} \Delta G_{f298} &= \Delta G_{f \text{ produk}} - \Delta G_{f \text{ reaktan}} \\ &= (\Delta G_{f C_3H_4O} + \Delta G_{f H_2O}) - (\Delta G_{f C_3H_6} + \Delta G_{f O_2}) \\ &= (-56 + (-228,6)) - (0 + 0) \text{ kJ/mol} \\ &= -284,6 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

Maka dapat dihitung, harga konstanta kesetimbangan pada reaktor 1 dengan suhu 298 K (K_0) adalah :

$$\begin{aligned} \ln(K_0) &= \frac{\Delta G_{298}}{-RT_0} = \frac{-284,6 \text{ kJ/mol} \times 1000 \frac{J}{kJ}}{-8,314 \frac{J}{mol.K} \times 298 K} \\ K_0 &= 2,203 \times 10^{11} \text{ (Irreversible)} \end{aligned}$$

• Reaktor 2

Reaksi Utama :



$$\begin{aligned}\Delta G_{f298} &= \Delta G_{f\text{ produk}} - \Delta G_{f\text{ reaktan}} \\ &= (\Delta G_{f\text{ C}_3\text{H}_4\text{O}_2}) - (\Delta G_{f\text{ C}_3\text{H}_4\text{O}} + \Delta G_{f\text{ O}_2}) \\ &= (-271) - (-56 + \frac{1}{2}(0)) \text{ kJ/mol} \\ &= -215 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

Maka dapat dihitung, harga konstanta kesetimbangan pada reaktor 2 dengan suhu 298 K (K_0) adalah :

$$\begin{aligned}\ln(K_0) &= \frac{\Delta G_{298}}{-RT_0} = \frac{-215 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \times 1000 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{-8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol.K}} \times 298 \text{ K}} \\ K_0 &= 4,86 \times 10^{37} \text{ (Irreversible)}\end{aligned}$$

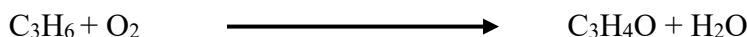
2. Nilai K Dalam Kondisi Operasi

Sedangkan untuk suhu operasi, harga K dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\ln \frac{K}{K_0} = \frac{-\Delta H_{298}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

• Reaktor 1 (593,15 K)

Reaksi Utama :



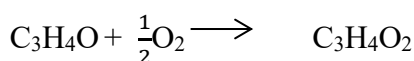
$$\ln \frac{K}{2,203 \times 10^{11}} = \frac{-(16,091 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \times 1000 \frac{\text{J}}{\text{mol}})}{8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol.K}}} \left(\frac{1}{593,15} - \frac{1}{298} \right)$$

$$K = 2,18 \times 10^{11}$$

Dari hasil perhitungan tersebut, didapatkan nilai K untuk semua reaksi yang terjadi sangat besar dan jauh dari angka 1. Hal ini menunjukkan bahwa semua reaksi yang berlangsung di reaktor secara searah atau *irreversible*.

• Reaktor 2 (573,15 K)

Reaksi Utama :



$$\ln \frac{K}{4,86 \times 10^{37}} = \frac{-(-994,11 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \times 1000 \frac{\text{J}}{\text{mol}})}{8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol.K}}} \left(\frac{1}{573,15} - \frac{1}{298} \right)$$

$$K = 1,94 \times 10^{128}$$

Kesimpulan dari hasil nilai K untuk semua reaksi baik dehidrasi maupun oksidasi semuanya bernilai diatas angka 1. Hal ini menunjukkan bahwa semua reaksi yang berlangsung direaktor secara searah atau *irreversible*.

b. Tinjauan Kinetika

Pada suatu reaksi kinetika dinyatakan dalam suatu persamaan Arrhenius yang memberikan nilai dasar dari hubungan antara energi aktivasi dan laju reaksi yakni dengan rumus berikut :

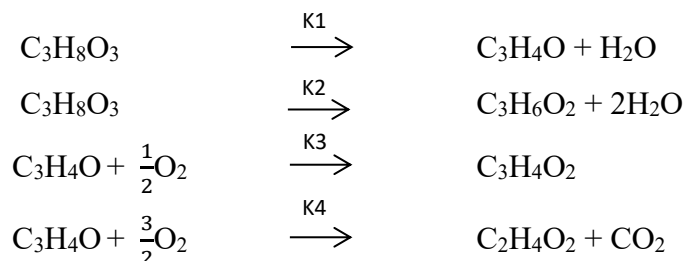
$$k = k_0 e^{\left(-\frac{E_a}{RT}\right)}$$

Keterangan :

T : Suhu (T)

R : Konstanta gas (1,987 kal/gmol.K)

Pada reaksi pembentukan asam akrilat dengan gliserol proses dehidrasi dan oksidasi sama sama reaksi katalitik menggunakan katalis $ZrO_2-Al_2O_3$ pada dehidrasi dan TriMoVWCu pada oksidasi. Selain produk utama, dihasilkan produk samping berupa $C_3H_6O_2$, $C_2H_4O_2$, CO_2 dan H_2O . Persamaan kecepatan reaksi untuk ke-empat reaksi dalam proses pembentukan asam akrilat, sebagai berikut:



Tabel 2. 6 Nilai k_0 dan E_a tiap reaksi

No.	K_0 (mol/kg s bar)	E_a (kJ/mol)
1	1,664	27,5
2	0,34	38,1
3	$2,32 \times 10^3$	72,5
4	$1,47 \times 10^7$	1,4

(Redlingshöfer et al., 2003)

2.2.4 Kondisi Operasi

Reaksi pembentukan asam akrilat dibagi menjadi 2 tahapan reaksi yakni reaksi dehidrasi gliserol menjadi akrolein kemudian dilanjutkan oksidasi akrolein menjadi asam akrilat. Pada reaksi dehidrasi gliserol menjadi akrolein merupakan reaksi endotermis pada kondisi tekanan 3 atm dan suhu operasi 320°C. Fase reaksinya yakni gas dan merupakan reaksi endotermis maka digunakan reaktor *fluidized bed*. Reaksi ini membutuhkan panas untuk bereaksi, reaktor *fluidized bed* memiliki efisiensi perpindahan panas yang tinggi dan distribusi suhu yang merata. Sistem pada reaktor ini yaitu, partikel katalis berada dalam keadaan terfluidisasi oleh aliran gas, menciptakan kondisi yang menyerupai fluida sehingga kontak akan sangat baik antara gas reaktan dan partikel katalis yakni zirkonia-alumina dan akan menghasilkan produk dengan selektivitas yang tinggi.

Kemudian reaksi lanjutan yakni oksidasi akrolein menjadi asam akrilat merupakan reaksi eksotermis pada kondisi tekanan 1,7 atm dan suhu 320°C. Fase reaksinya yakni fase gas. Maka digunakan reaktor berjenis multitubular *fixed bed* reaktor yang disirkulasikan larutan pendingin dari tube-tube yang ada yakni menggunakan pendingin molten salt. (Kirk-Othmer, 1989a).

2.3 Langkah Proses

2.3.1 Tahap Proses

Pembuatan asam akrilat dari gliserol dengan proses dehidrasi-oksidasi secara umum dibagi menjadi 4 tahapan proses, yakni

- a. Tahap Persiapan Bahan baku
- b. Tahap Dehidrasi Gliserol
- c. Tahap Oksidasi Akrolein
- d. Tahap Pemisahan

2.3.2 Langkah Proses

1. Tahap Persiapan Bahan Baku

Bahan baku yang digunakan sebagai umpan (*feed*) reaktor 1 (R-01) adalah gliserol 99,5% dan untuk reaktor 2 (R-02) ditambahkan udara.

- a. Bahan baku gliserol

Gliserol dialirkan melalui sistem pipa dari PT. Cisadane Raya Chemical dengan kondisi cair tekanan 1 atm dan suhu 40°C. Cairan gliserol 99,5% dari tangki penyimpanan bahan baku gliserol (T-01) dipompakan (P-01) hingga tekanan 3 atm dan dialirkan

menuju ke *furnace* (F-01) untuk dipanaskan hingga berubah fase dari cair ke gas bersuhu 320°C. Pada *furnace* (F-01) digunakan *natural gas* (gas alam) dan udara sebagai bahan bakar. Bahan baku gliserol kemudian memasuki reaktor 1 (R-01) untuk dikonversi menjadi akrolein.

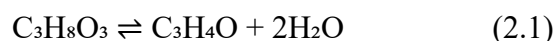
b. Bahan Baku Udara

Udara bebas yang digunakan sebagai bahan baku dalam produksi asam akrilat yakni berada pada kondisi kering, bersuhu ruang, dan berada pada tekanan 1 atm absolut. Udara ini terlebih dahulu dikompresi menggunakan kompresor (K-01) hingga tekanannya mencapai 1,7 atm. Setelah itu, udara dipanaskan menggunakan *furnace* (F-01) sampai suhu 300 °C agar sesuai dengan kondisi operasi yang dibutuhkan di Reaktor 2.

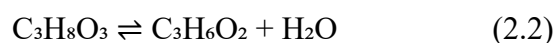
2. Reaksi Dehidrasi Gliserol

Uap gliserol bersuhu 320°C dan tekanan 3 atm yang keluar dari *furnace* (F-01) kemudian dialirkan ke reaktor *Fluidized bed* (R-01). Proses dehidrasi gliserol merupakan tahap awal dalam konversi gliserol menjadi akrolein. Reaksi ini berlangsung dalam fase gas dan bersifat endotermis, sehingga memerlukan suhu tinggi dan pemanas eksternal. Pemanas yang digunakan adalah dowtherm A yang dialirkan didalam *heating component*. Gliserol ($C_3H_8O_3$) akan mengalami pelepasan molekul air (H_2O) untuk menghasilkan akrolein (C_3H_4O) sebagai produk utama dan asetol ($C_3H_6O_2$) sebagai produk samping. Reaksi dapat dilihat pada (2.1) dan (2.2)

- Reaksi utama:



- Reaksi samping:



Reaksi ini dilakukan di dalam reaktor *Fluidized bed* (FBR) yang berisi katalis padat $ZrO_2-Al_2O_3$, yaitu campuran zirkonium dioksida dan aluminium oksida. Katalis ini memiliki sifat amfoter dan permukaan aktif yang luas, sehingga dapat meningkatkan laju reaksi sekaligus menjaga selektivitas terhadap pembentukan akrolein.

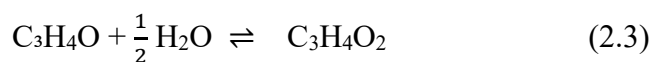
Produk gas yang keluar dari reaktor dehidrasi gliserol (R-01) terdiri dari campuran akrolein, aseton, air, dan sisa gliserol dalam fasa gas dengan suhu tinggi 320°C dan tekanan 3 atm. Aliran gas panas ini pertama-tama dialirkan ke unit *condensor* (CD-01), yang berfungsi untuk menurunkan suhu aliran hingga 250°C dan mengembunkan sebagian besar komponen yang mudah terkondensasi, seperti air, gliserol, aseton, dan sebagian akrolein. Proses kondensasi ini penting untuk memudahkan pemisahan fasa pada tahap berikutnya. Setelah melalui CD-01, campuran fasa gas dan cair masuk ke dalam *separator* (SP-01). Di dalam separator ini terjadi pemisahan fasa secara gravitasi. Fasa gas yang terdiri dari akrolein keluar dari bagian atas SP-01 dan dialirkan ke *Heat Exchanger* (H-01) dan akan diproses lebih lanjut. Sementara itu, fasa cair yang mengandung air, gliserol sisa, dan sedikit akrolein di dasar SP-01, kemudian dipompa oleh P-02 menuju Unit Pengolahan Limbah (UPL).

3. Reaksi Oksidasi Akrolein

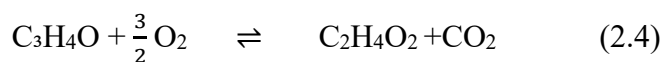
Selanjutnya, hasil dari keluaran *Heat exchanger* (HE-01) akan diumpungkan menuju ke proses reaksi selanjutnya yakni oksidasi akrolein menjadi produk asam akrilat serta produk samping lainnya. Reaksi berlangsung dalam fase gas dengan suhu 300°C dan tekanan 1,7 atm pada reaktor 2 (R-02). Reaksi berlangsung dalam reaktor jenis *multitubular fixed bed reactor*.

Reaktor berjalan secara *iso-thermal non-adiabatic*, sehingga suhu keluaran pada reaktor 1 (R-01) sebesar 300°C dengan produk utama asam akrilat dan produk samping berupa CO₂ dan asam asetat.

- Reaksi utama:



- Reaksi samping:



Reaksi pembentukan asam akrilat bersifat eksotermis sehingga disertai dengan pelepasan panas. Oleh karenanya, dilakukan pendinginan reaktor dengan *thermal fluid* yaitu *molten salt* (53%w KNO₃, 40%w NaNO₂, 7%w NaNO₃) melalui bagian shell pada reaktor. Sedangkan, bagian tube dialiran umpan (*feed*) gas sebagai tempat berlangsungnya reaksi dengan bantuan katalis untuk membentuk produk. Katalis yang

digunakan adalah katalis multikomponen berbasis logam oksida, yakni TriMoVCu yang terdiri dari molibdenum oksida (MoO_3), vanadium oksida (V_2O_5), dan tembaga oksida (CuO).

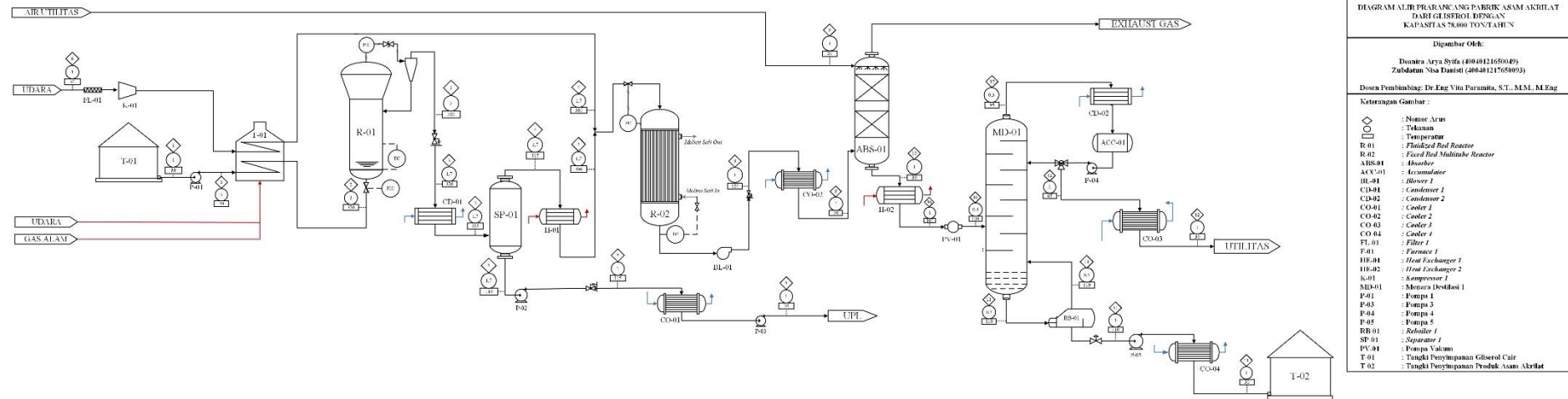
4. Tahap Pemisahan

Produk hasil dari reaktor (R-02) yang berfase gas kemudian dialirkan kedalam *cooler* 2 (CO-02) untuk diturunkan suhunya hingga 50°C sebelumnya tekanan diturunkan dari 1,7 atm ke 1 atm dengan bantuan *expansion valve* untuk persiapan masuk kedalam kondisi operasi *absorber* (ABS-01). Pada tahapan ini, produk akan dipisahkan dari gas – gas CO_2 , N_2 , O_2 . sekaligus mengubah fase produk menjadi fase cair dengan bantuan solvent berupa air. Hasil bawah dari *absorber* (ABS-0) berupa produk asam akrilat dan produk samping asam asetat serta air yang keluar pada kondisi 30°C dengan tekanan 1 atm, sedangkan gas buangan (*exhaust gas*) keluar pada bagian *absorber*.

Setelah menjadi fase cair, produk kemudian akan dipanaskan kembali oleh *heat exchanger* 2 (HE-02) untuk menjadikan campuran berada pada kondisi cair jenuh sebelum memasuki kolom menara destilasi (MD-01). Destilasi yang digunakan berjenis destilasi vakum yakni berada dibawah tekanan atmosfer. Digunakan pompa vakum sebelum masuk ke menara destilasi (MD-01). Pada tahap pemisahan oleh MD-01, produk dimurnikan dari H_2O dan asam asetat sebagai produk sampingnya dengan kemurnian produk asam akrilat sebesar 99,3% (0,2% air, dan 0,5% asam asetat).

2.4 Diagram Alir

PRARANCANG PABRIK ASAM AKRILAT DARI GLISEROL DENGAN METODE DEHIDRASI OKSIDASI
KAPASITAS 78.000 TON/TAHUN



Gambar 2. 3 Diagram Alir Proses Produksi

2.5 Neraca Massa dan Panas

2.5.1 Rangkuman Neraca Massa

1. Neraca Massa *Furnace* (F-01)

Tabel 2.7 Neraca Massa *Furnace* (F-01)

Kom- ponen	Masuk				Keluar			
	F ₁ (kg/jam)		F ₂ (kg/jam)		F ₃ (kg/jam)		F ₄ (kg/jam)	
	Mol	Flow	Mol	Flow	Mol	Flow	Mol	Flow
	Rate	rate	rate	rate	Rate	rate	Rate	Rate
C ₃ H ₈ O ₃	167,25	15402,92	0,000	0,000	167,25	15402,92	0,000	0,000
C ₃ H ₆ O ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
O ₂	0,000	0,000	240,67	7701,46	0,000	0,000	240,67	7701,46
N ₂	0,000	0,000	905,39	25360,13	0,000	0,000	905,39	25360,13
H ₂ O	4,29	77,40	0,000	0,000	4,29	77,40	0,000	0,000
C ₃ H ₄ O	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
C ₂ H ₄ O ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
C ₃ H ₄ O ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CO ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total	15480,32		33061,59		15480,32		33061,59	
	48541,916				48541,916			

2. Neraca Massa Reaktor *Fluidized bed* (R-01)

Tabel 2. 8 Neraca Massa Reaktor *Fluidized bed* (R-01)

Komponen	Masuk	Keluar		
	F ₃ (kg/jam)		F ₅ (kg/jam)	
	Mol rate	Flowrate	Mol rate	Flowrate
C ₃ H ₈ O ₃	167,254	15402,921	0,710	65,462
C ₃ H ₆ O ₂	0,000	0,000	25,088	1858,526
O ₂	0,000	0,000	0,000	0,000
N ₂	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	4,296	77,401	312,294	5626,363
C ₃ H ₄ O	0,000	0,000	141,455	7929,970
C ₂ H ₄ O ₂	0,000	0,000	0,000	0,00
Total	15480,323		15480,323	
	15480,323			

3. Neraca Massa Separator 1 (SP-01)

Tabel 2.9 Neraca Massa Separator 1 (SP-01)

Komponen	Masuk		Keluar			
	F ₅ (kg/jam)		F ₆ (kg/jam)		F ₇ (kg/jam)	
	Mol Rate	Flowrate	Mol Rate	Flowrate	Mol Rate	Flow Rate
C ₃ H ₈ O ₃	0,710	65,462	0,000	0,000	0,711	65,462
C ₃ H ₆ O ₂	25,088	1858,526	0,000	0,000	25,088	1858,526
O ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
N ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	312,294	5626,363	16,865	303,824	295,450	5322,540
C ₃ H ₄ O	141,455	7929,970	141,455	7929,971	0,000	0,000
C ₂ H ₄ O ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
C ₃ H ₄ O ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CO ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total	15480,323		8233,795		7246,529	
	15480,323				15480,323	

4. Neraca Massa Reaktor Fixed bed Multitube (R-02)

Tabel 2.10 Neraca Massa Fixed bed multitube (R-02)

Komponen	Masuk		Keluar			
	F ₄ (kg/jam)		F ₆ (kg/jam)		F ₈ (kg/jam)	
	Mol Rate	Flow Rate	Mol Rate	Flow Rate	Mol Rate	Flow Rate
C ₃ H ₈ O ₃	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
C ₃ H ₆ O ₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
O ₂	240,6748	7701,460943	0,0000	0,0000	166,6097	5331,4186
N ₂	905,3956	25360,1312	0,0000	0,0000	905,3956	25360,1312
H ₂ O	0,0000	0,0000	16,8650	303,8236	16,865	303,8909
C ₃ H ₄ O	0,0000	0,0000	141,4551	7929,9709	0,9635	54,0110
C ₂ H ₄ O ₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	3,82	229,36
C ₃ H ₄ O ₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	136,67	9848,48
CO ₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	3,8193	168,0868
Total	33061,5921		8233,7945		41295,3866	
			41295,3866		41295,3866	

5. Neraca Massa di Sekitar *Absorber* (AB-01)

Tabel 2.11 Neraca Massa di Sekitar *Absorber* (ABS-01)

Komponen	Masuk				Keluar			
	F ₈ (kg/jam)		F ₉ (kg/jam)		F ₁₀ (kg/jam)		F ₁₁ (kg/jam)	
	Molrate	Flowrate	Molrate	Flowrate	Molrate	Flowrate	Molrate	Flowrate
C ₃ H ₈ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C ₃ H ₆ O ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O ₂	166,61	5331,42	0,00	0,00	166,61	5331,42	0,00	0,00
N ₂	905,40	25360,13	0,00	0,00	905,40	25360,13	0,00	0,00
H ₂ O	16,87	303,89	3231,92	58223,04	0,00	0,00	3248,79	58526,94
C ₃ H ₄ O	0,96	54,01	0,00	0,00	0,96	54,01	0,00	0,00
C ₂ H ₄ O ₂	3,82	229,36	0,00	0,00	0,00	0,00	3,82	229,36
C ₃ H ₄ O ₂	136,67	9848,48	0,00	0,00	0,00	0,00	136,67	9848,48
CO ₂	3,82	168,09	0,00	0,00	3,82	168,09	0,00	0,00
Total	41295,39		58223,04		30913,65		68604,78	
	99518,43				99518,43			

6. Neraca Massa Menara Destilasi (D-01)

Tabel 2.12 Neraca Massa Menara Destilasi (MD-01)

Komponen	Masuk				Keluar	
	F ₁₁ (kg/jam)		F ₁₂ (kg/jam)		F ₁₃ (kg/jam)	
	Mol Rate	Flowrate	Mol Rate	Flowrate	Mol Rate	Flowrate
C ₃ H ₈ O ₃	0,0000	0,0000	0,0000	0,0	0,0000	0,0000
C ₃ H ₆ O ₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0	0,0000	0,0000
O ₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0	0,0000	0,0000
N ₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0	0,0000	0,0000

Komponen	Masuk		Keluar			
	F ₁₁ (kg/jam)		F ₁₂ (kg/jam)		F ₁₃ (kg/jam)	
	Mol Rate	Flowrate	Mol Rate	Flowrate	Mol Rate	Flowrate
H ₂ O	3248,7891	58526,9357	1,0548	19,0025	3247,7343	58507,9331
C ₃ H ₄ O	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
C ₂ H ₄ O ₂	3,8193	229,3632	0,7911	47,5063	3,0282	181,8568
C ₃ H ₄ O ₂	136,6723	9848,4848	130,9309	9434,7602	5,7415	413,7246
CO ₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Total	68604,7837		9501,2691		59103,5146	
	68604,7837		68604,7837			

7. Neraca Massa Total

Tabel 2.13 Neraca Massa Total

Komponen	Input (kg)	Output (kg)
Furnance		
C ₃ H ₈ O ₃	15.402,9219	
O ₂	7.701,4609	
N ₂	25.360,1312	
H ₂ O	77,4016	
Separator		
C ₃ H ₈ O ₃		65,4624
C ₃ H ₆ O ₂		1.858,5264
H ₂ O		5.322,5402
Absorber		
H ₂ O	58.223,0447	
O ₂		5.331,4186
N ₂		25.360,1312
C ₃ H ₄ O		54,0110
CO ₂		168,0868
Distilasi		
F11 (Produk)		
H ₂ O		19,0025
C ₂ H ₄ O ₂		47,5063
C ₃ H ₄ O ₂		9.434,7602
F12		
H ₂ O		58.507,9331
C ₂ H ₄ O ₂		181,8568

Komponen	Input (kg)	Output (kg)
C ₃ H ₄ O ₂		413,7246
Jumlah	106.764,9603	106.764,9603
Selisih	0,0000	

Rangkuman Neraca Panas

1. Neraca Energi di Sekitar Kompresor (C-01)

Tabel 2.14 Neraca Energi di Sekitar Kompresor

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H ₁	176522,513	
H ₂		1647696,707
W _s	1471174,194	
H Total	1647696,707	1647696,707

2. Neraca Energi *Furnace* (F-01)

Tabel 2.15 Neraca Energi *Furnace* (F-01)

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H ₂	1647696,707	
H ₃	99436,76708	
H ₄		7435454,279
H ₅		10058144,76
H Total	1747133,474	1747133,474

3. Neraca Energi *Fluidized bed* Reaktor (R-01)

Tabel 2.16 Neraca Energi Fluidzed Bed Reaktor (R-01)

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H ₄	7435454,279	
H ₆		7671897,0329
H Reaksi	45089235,6048	

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H Pemanas	45325677,5677	
H Total	52761132,6377	52761132,6377

4. Neraca Energi *Condensor* 1 (CD-01)

Tabel 2.17 Neraca Energi *Condensor* (CD-01)

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H ₆	7671897,0329	
H ₇		2082061,3935
H Pendingin		5589835,6394
H Total	7671897,0329	7671897,0329

5. Neraca Energi *Separator* (SP-01)

Tabel 2.18 Neraca Energi *Separator* (SP-01)

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H ₇	2082061,3935	
H ₈	961192,5136	
H ₉		1120868,8783
H Total	2082061,39	2082061,39

6. Neraca Energi *Cooler* (CO-01)

Tabel 2.19 Neraca Energi *Cooler* (CO-01)

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H ₉	1120868,8783	
H ₁₀		296098,1158
H Pendingin		824770,7625
H Total	1120868,8783	1120868,8783

7. Neraca Energi *Heat exchanger* (H-01)

Tabel 2.20 Neraca Energi *Heat exchanger* (H-01)

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H ₈	961192,5136	
H ₁₁		3506103,9352
H Pemanas	2544911,4216	
H Total	3506103,9352	3506103,9352

8. Neraca Energi *Fixed bed Multitube Reaktor* (R-02)

Tabel 2.21 Neraca Energi di Sekitar Reaktor (R-02)

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H ₅	9351836,2426	
H ₁₁	3506103,935	
H ₁₂		12846798,1201
H Reaksi	40653959,7535	
H Pendingin		40665101,8112
H Total	53511899,9314	53511899,9314

9. Neraca Energi *Blower* (BLW-01)

Tabel 2.22 Neraca Energi *Blower* (BLW-01)

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H ₁₂	12846798,1201	
H ₁₃		12992237,5394
H <i>Blower</i>	145439,4193	
H Total	12992237,5394	12992237,5394

10. Neraca Energi *Cooler* (CO-02)

Tabel 2.23 Neraca Energi *Cooler* (CO-02)

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H ₁₃	12992237,5394	
H ₁₄		1083981,5905
H Pendingin		11908255,9489
H Total	12992237,5394	12992237,5394

11. Neraca Energi *Absorber* (ABS-01)

Tabel 2.24 Neraca Energi *Absorber* (ABS-01)

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H ₁₄	1083981,590	
H ₁₅	1219957,534	
H ₁₆		1343035,456
H ₁₇		960903,668
H Total	2303939,125	2303939,125

12. Neraca Energi *Heat exchanger* (H-01)

Tabel 2.25 Neraca Energi *Heat exchanger* (H-01)

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H ₁₆	1343035,456	
H ₁₈		19961353,2264
H Pemanas	18618317,7705	
H Total	19961353,2264	19961353,2264

13. Neraca Energi Menara Distilasi (D-01)

Tabel 2.26 Neraca Energi di Sekitar Menara Destilasi (MD-01)

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H _F	19961353,2264	
H _R		1887663,7490

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H _D		17191356,2925
H _{kondensor}		97378201,9795
H _{Reboiler}	96495868,7946	
H Total	116457222,0210	116457222,0210

14. Neraca Energi di Sekitar *Cooler* (CO-03)

Tabel 2.27 Neraca Energi di Sekitar *Cooler* (CO-03)

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H ₁₉	1752830,624	
H ₂₁		74101,27912
H Pendingin		1678729,345
H Total	1779660,6414	1779660,6414

15. Neraca Energi di Sekitar *Cooler* (CO-04)

Tabel 2.28 Neraca Energi di Sekitar *Cooler* (CO-04)

Komponen	H Masuk (kJ/Jam)	H Keluar (kJ/Jam)
H ₂₀	17191356,29	
H ₂₂		1232171,047
H Pendingin		15959185,25
H Total	17191356,29	17191356,29

16. Neraca Energi Overall

Tabel 2.29 Neraca Energi Overall

Komponen	Q (kkal)	
	Input	Output
Kompresor		
H1	176.522,5127	
Ws	1.471.174,1944	
Furnace		
Qpemanas	15.746.465,5630	
H3	99.436,7671	

Komponen	Q (kkal)	
	Input	Output
Reaktor I		
Qreaksi		45.089.235,6048
Q pemanas	45.325.677,5677	
Condensor 1		
Qpendingin		5.589.835,6394
Cooler-01		
Qpendingin		824.770,7625
H10		296.098,1158
Heat exchanger 1		
Hpemanas	2.544.911,4216	
Reaktor-02		
Qreaksi	40.653.959,7535	
Qpendingin		40.665.101,8112
Blower-01		
Blower	145.439,4193	
Cooler-02		
Qpendingin		11.908.255,9489
Absorber-01		
H15	1.219.957,5341	
H17		960.903,6683
Heat exchanger 2		
Hpemanas	18.618.317,7705	
Menara Destilasi-01		
Reboiler	96.495.868,7946	
Condensor		97.378.201,9795
Cooler 3		
Qpendingin		1.678.729,3448
H21		74.101,2791
Cooler 4		
Qpendingin		15.959.185,2454
H22		1.232.171,0471
Qloss		841140,8515
Total	222.497.731,2984	222.497.731,2984
Selisih	0,0000	

2.5 Tata Letak Pabrik dan Pemetaan

2.6.1 Tata Letak Pabrik

Perencanaan tata letak pabrik dilakukan dengan tujuan untuk mengatur seluruh komponen dalam lingkungan perusahaan dan fasilitas produksi, seperti area proses dan utilitas, ruang penyimpanan, kantor, area ekspansi pabrik, serta bangunan dan ruang pendukung lainnya.

Tata letak pabrik perlu dirancang secara optimal agar kegiatan operasional berjalan lebih efisien dan penggunaan lahan menjadi lebih maksimal. Selain itu, dalam merancang tata letak, penting untuk mempertimbangkan faktor keamanan, keselamatan, dan keberadaan ruang terbuka. Hal ini akan mendukung terciptanya lingkungan kerja yang nyaman dan aman.

Berikut merupakan komponen yang perlu diperhatikan dalam perancangan tata letak pabrik yakni :

1. Mengantisipasi bahaya yang mungkin terjadi sewaktu-waktu

Dalam merancang tata letak pabrik, perlu dilakukan antisipasi terhadap potensi bahaya yang bisa terjadi selama proses produksi, seperti kebakaran, ledakan, asap, api, atau gas beracun. Oleh karena itu, unit pemadam kebakaran sebaiknya ditempatkan di sekitar area pabrik. Selain itu, penting untuk memperhatikan jarak antara area produksi dengan area perkantoran dan bangunan penunjang lainnya. Peralatan atau unit yang memiliki risiko meledak juga harus ditempatkan secara khusus.

2. Area untuk pengembangan pabrik

Saat merancang tata letak pabrik, perlu dipertimbangkan ketersediaan lahan untuk keperluan pengembangan di masa depan. Area ini disiapkan untuk kemungkinan penambahan peralatan proses, peningkatan kapasitas produksi, atau pengembangan produk turunan lainnya.

3. Luas lahan dan harga jual tanah

Harga lahan menjadi salah satu faktor pembatas dalam penyediaan area pabrik. Penggunaan ruang harus disesuaikan dengan lahan yang tersedia. Oleh sebab itu, efisiensi penggunaan lahan sangat diperlukan dengan tetap memperhatikan ruang gerak operasional dalam pabrik. Tujuannya adalah untuk menekan besarnya dana investasi dalam pembelian lahan.

4. Instalasi dan utilitas pabrik

Perancangan tata letak instrumen, pipa, dan unit utilitas harus dibuat secara teratur dan efisien agar proses produksi dapat berjalan lancar serta memudahkan kegiatan pemeliharaan (maintenance).

Tata letak pabrik dibagi menjadi beberapa daerah utama yakni diantaranya:

1. Daerah administrasi, perkantoran, poliklinik, perpustakaan, dan ruang kontrol

Merupakan pusat kegiatan administrasi serta operasional kantor pabrik. Poliklinik berfungsi sebagai tempat penyedia layanan kesehatan dan penanganan pertama jika terjadi kecelakaan kerja. Perpustakaan digunakan sebagai pusat informasi dan pengetahuan mengenai pabrik. Sedangkan ruang kontrol berperan sebagai pusat kendali untuk memantau jalannya proses produksi.

2. Daerah proses

Merupakan area utama di mana seluruh peralatan proses ditempatkan dan aktivitas produksi dilakukan.

3. Daerah pergudangan, bengkel, dan garasi

Meliputi gudang penyimpanan peralatan, bengkel untuk perawatan dan perbaikan, garasi kendaraan operasional, gudang produk jadi, serta lokasi penempatan tangki-tangki bahan baku.

4. Daerah utilitas, pengolahan limbah, pemadam kebakaran, dan laboratorium

Unit utilitas menyediakan berbagai kebutuhan pendukung proses produksi, seperti penyediaan air, *steam*, listrik, serta instalasi pengolahan limbah. *Fire station* disiapkan sebagai upaya pencegahan dan penanganan bahaya kebakaran. Laboratorium berfungsi sebagai pusat penelitian dan pengendalian mutu terhadap bahan baku maupun produk akhir.

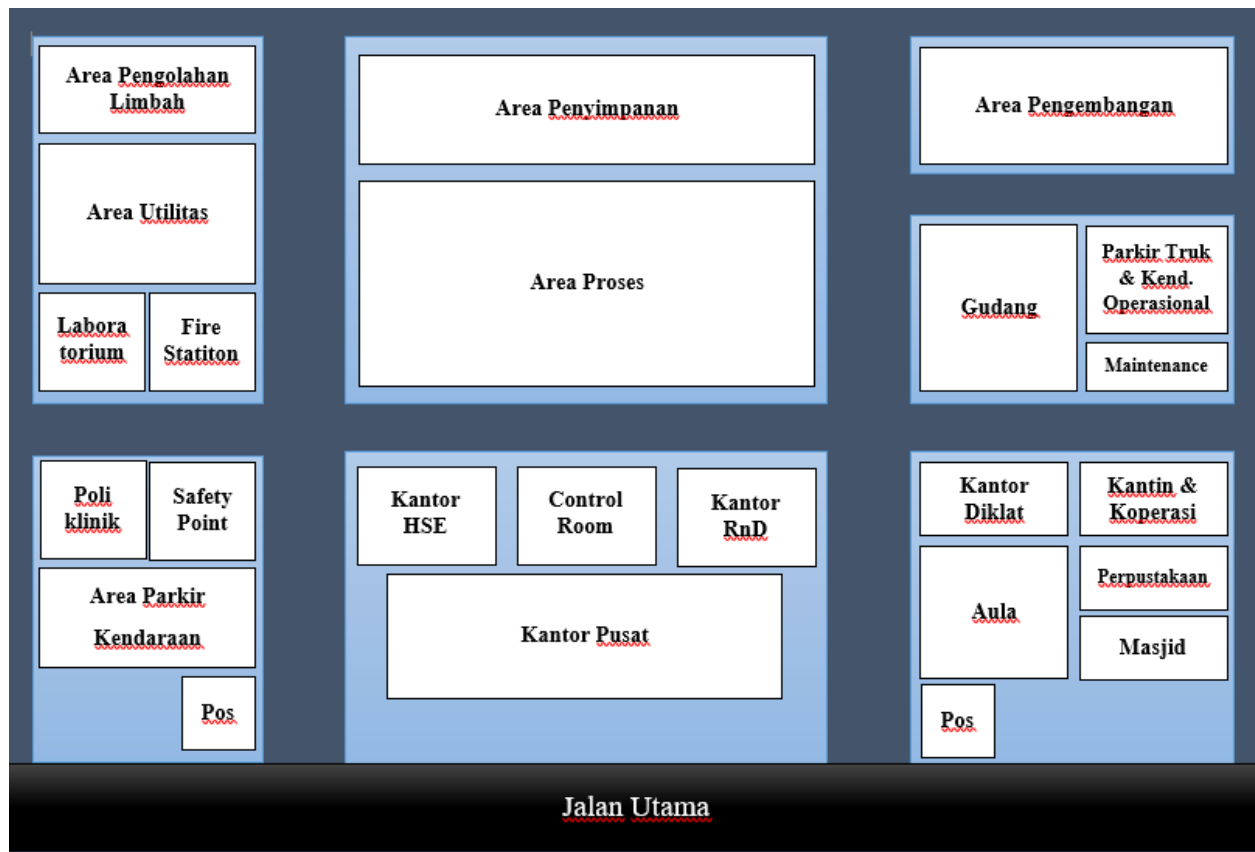
Untuk pabrik asam akrilat ini, daftar bangunan beserta luasnya dapat dilihat dari Tabel 2.28 berikut ini :

Tabel 2.30 Rincian Luas Bangunan Pabrik

Area	Luas (m ³)
Kantor Pusat	800
Aula	500
Poli Klinik	400
Control Room	400

Area	Luas (m³)
Kantor RnD	400
Kantor Diklat	400
Kantor HSE	400
Kantin & Koperasi	250
Perpustakaan	200
Masjid	300
Laboratorium	400
Fire Station	100
Gudang	250
Maintaince	100
Pos Keamanan	50
Area Utilitas	1.500
Arca Proses	5.000
Area Pengolahan Limbah	1.200
Area Penyimpanan	1.200
Area Pengembangan	900
Safety Point	100
Area Parkir Kendaraan Operasional	300
Area Parkir Kendaraan Umum	400
Taman	500
Jalan	2.000
Total	17.250

Pada pra rancangan pabrik asam akrilat ini, tata letak ruang pabrik dapat dilihat pada gambar :



Gambar 2.4 Tata Letak Pabrik

Tata Letak Peralatan proses

Tata letak peralatan proses merupakan letak alat-alat proses produksi tata letak alat proses harus didesain sedemikian rupa bertujuan:

- Kelancaran proses produksi dapat terjamin
- Penggunaan luas lahan menjadi efektif
- Biaya Material Handling menjadi rendah
- Mengurangi pengeluaran biaya untuk Capital investment

Dalam menentukan tata letak peralatan proses pada pabrik asam akrilat ada beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu:

- 1) Aliran bahan baku dan produk

Jalur pemipaan dari bahan baku hingga produk harus didesain dengan tepat sehingga dapat memudahkan tercapainya keamanan dan kelancaran proses serta memberikan keuntungan ekonomis.

- 2) Sistem penerangan

Pencahayaan seluruh pabrik harus memadai terutama untuk proses yang tingkat memiliki daya dan resiko tinggi.

3) Lalu lintas manusia dan barang

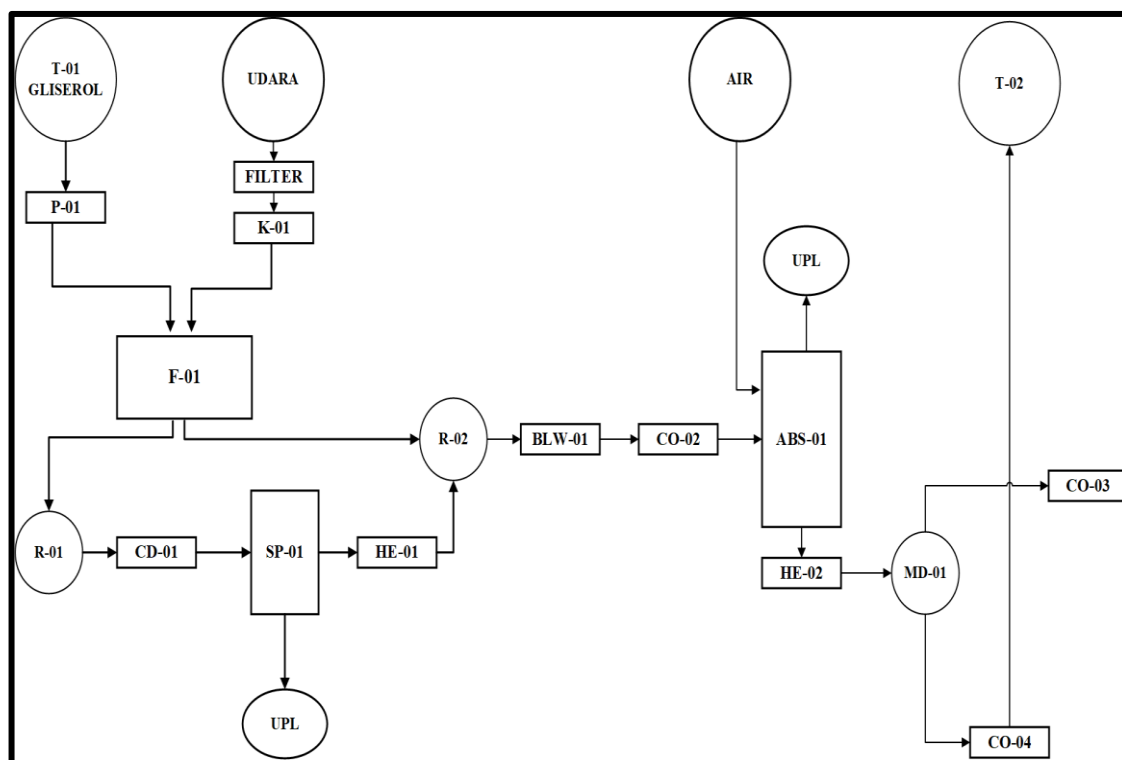
Dalam desain tata letak peralatan proses perlu diperhatikan untuk lalu lintas bekerja sehingga dapat meningkatkan efisiensi pekerjaan dan waktu serta meningkatkan keamanan pekerja.

4) Pertimbangan ekonomi

Dalam desain tata letak alat-alat proses perlu dioptimalkan sehingga dapat memberikan keuntungan produksi

5) Jarak antar alat proses

Penataan alat proses dengan jarak yang lebih jauh untuk alat proses terutama peralatan proses dengan kondisi tekanan dan temperatur tinggi terhadap peralatan lainnya harus diperhatikan. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan tingkat keamanan dan pencegahan terhadap timbulnya bahaya saat proses produksi. Tata letak peralatan proses produksi asam akrilat dapat dilihat pada Gambar 2.3 sebagai berikut :



Gambar 2.5 Tata Letak peralatan proses