

BAB II

DESKRIPSI PROSES

2.1. Spesifikasi Bahan Baku dan Produk

2.1.1. Spesifikasi Bahan Baku Utama

a) Aseton

Menurut *Safety Data Sheet* (Sigma Aldrich, 2023), spesifikasi aseton yaitu:

Rumus molekul	: C_3H_6O
Nama lain	: <i>propanone, dimethyl ketone</i>
Berat molekul	: 58,08 gram/mol
Bentuk	: Cair, tidak berwarna
Titik lebur	: $-94^{\circ}C$
Titik didih	: $56^{\circ}C$ (pada 1.013 hPa)
Temperature kritis	: 508,2 K ($235,05^{\circ}C$)
Tekanan kritis	: $4,71 \times 10^6$ Pa (46,484 atm)
Densitas	: $0,791 \text{ g/cm}^3$ (pada $25^{\circ}C$)
Kemurnian	: 99,9%

b) Hidrogen

Menurut *Safety Data Sheet* (Sigma Aldrich, 2023), spesifikasi hidrogen yaitu:

Rumus kimia	: H_2
Berat molekul	: 2,02 gram/mol
Bentuk	: Gas, tidak berwarna
Temperature kritis	: 33,19 K ($-239,96^{\circ}C$)
Tekanan kritis	: $1,3154 \times 10^6$ Pa (12,982 atm)
Titik lebur	: $-259,2^{\circ}C$
Titik didih	: $-252,8^{\circ}C$
Titik nyala	: $< -150^{\circ}C$
Densitas	: 0,09 gram/liter (pada $0^{\circ}C$)
Kemurnian	: 99,998% (N_2 0,001% dan O_2 0,001%)

c) Katalis Ni-Cu/SiO₂

Menurut data dari (Zhou & Wang, 2022), spesifikasi katalis Ni-Cu yaitu:

Fase	: Padat
------	---------

Bentuk	: Bola (<i>spherical</i>)
Komposisi	: 2% Ni, 5% Cu
Densitas	: 2,23 gr/cm ³
<i>Bulk density</i>	: 0,8 gr/cm ³
Diameter	: 3 mm
Porositas	: 0,641
Ukuran partikel	: 3 mm
Umur katalis	: 5 tahun

2.1.2. Spesifikasi Produk

a) Isopropanol

Menurut *Safety Data Sheet* (Sigma Aldrich, 2024), spesifikasi isopropanol yaitu:

Rumus kimia	: C ₃ H ₈ O
Nama lain	: <i>isopropyl alcohol, 2-propanol, dimethyl carbinol, dan sec-propyl alcohol</i>
Berat molekul	: 60,1 gram/mol
Bentuk	: Cair, tidak berwarna
Titik lebur	: -89,5°C
Titik didih	: 82,4°C (pada 1,013 hPa)
Titik nyala	: 12,0°C
Temperature kritis	: 235,2°C
Tekanan kritis	: 4,764 x 10 ⁶ Pa (47,017 atm)
Densitas	: 0,786 gram/cm ³ (pada 20°C)

2.2. Sifat Fisika dan Kimia

2.2.1. Sifat Fisika dan Kimia Bahan Baku

1. Aseton

Menurut *Safety Data Sheet* (Sigma Aldrich, 2023), sifat fisika dan kimia aseton yaitu sebagai berikut.

a) Sifat Fisika

- Berat molekul : 58,08 gram/mol
- Wujud : Liquid (cairan)
- Warna : Tidak berwarna
- Aroma : Menyengat

- Titik lebur : -94°C
- Titik didih : 56°C (pada 1.014 hPa)
- Titik nyala : -17°C
- Tekanan uap : 245,4 hPa (pada 20°C)
- Kelarutan : Larut dalam air
- *Specific gravity* : 0,792 (pada 20°C)

b) Sifat Kimia

- Bersifat stabil secara kimiawi saat dalam kondisi lingkungan (suhu ruang).
- Bersifat reaktif yaitu mudah meledak jika membentuk campuran dengan udara.
- Berisiko terjadi pembakaran atau pembentukan gas atau uap yang mudah terbakar dengan asam kromosulfat, klorida kromil, ethanolamine, fluorine, agen oksidator kuat, agen reduktor kuat, asam nitrat, oksida kromium (VI).
- Berisiko terjadi ledakan dengan oksihalida nonlogam, senyawa halogen, kloroform, asam nitrat, senyawa nitrosil, hidrogen peroksida, oksida halogen, senyawa nitro organik, senyawa peroksida.

2. Hidrogen

Menurut *Safety Data Sheet* (Sigma Aldrich, 2023), sifat fisika dan kimia hidrogen yaitu sebagai berikut.

a) Sifat Fisika

- Berat molekul : 2,02 gram/mol
- Wujud : Gas
- Warna : Tidak berwarna
- Titik lebur : $-259,2^{\circ}\text{C}$
- Titik didih : $-252,8^{\circ}\text{C}$
- Titik nyala : $< -150^{\circ}\text{C}$
- Kelarutan : 0,00196 gram/liter (pada 0°C)
- *Specific gravity* : 0,006948

b) Sifat Kimia

- Bersifat stabil secara kimiawi saat dalam kondisi lingkungan (suhu ruang).
- Berisiko terjadi ledakan dengan oksigen, klorin, asetilen, bromin, dioksida klorin, oksida halogen, fluorin, dioksan, senyawa halogen-halogen, agen oksidator kuat, ozon.
- Reaksi keras mungkin terjadi dengan oksida nonlogam, oksida logam, perklorat, garam logam berat, logam alkali, logam alkali tanah.

3. Katalis Ni-Cu/SiO₂

a) Sifat Fisika

Menurut data dari (Zhou & Wang, 2022), sifat fisika katalis Ni-Cu yaitu sebagai berikut.

- Fase : Padat
- Bentuk : Bola (*spherical*)
- Komposisi : 2% Ni, 5% Cu
- Densitas : 2,23 gr/cm³
- *Bulk density* : 0,8 gr/cm³
- Diameter : 3 mm
- Porositas : 0,641
- Ukuran partikel : 3 mm
- Umur katalis : 5 tahun

b) Sifat Kimia

Menurut data dari (Philippov et al., 2022), sifat kimia katalis Ni-Cu yaitu sebagai berikut.

- Ni memiliki kemampuan dalam mengaktifkan H₂, sedangkan Cu dapat meningkatkan selektivitas produk dan mengurangi reaksi samping.
- Campuran Ni-Cu menghasilkan struktur molekular yang mengurangi pembentukan kokas (endapan karbon padat), sehingga umur simpan katalis lebih panjang.
- *Alloy* Ni-Cu stabil terhadap oksidasi sehingga tahan lebih lama dalam kondisi operasi.

2.2.2. Sifat Fisika dan Kimia Produk

1. Isopropanol

Menurut *Safety Data Sheet* (Sigma Aldrich, 2024), sifat fisika dan kimia isopropanol yaitu sebagai berikut.

a) Sifat Fisika

- Berat molekul : 60,1 gram/mol
- Wujud : Cair
- Warna : Tidak berwarna
- Aroma : Seperti alkohol
- Titik beku : $-89,5^{\circ}\text{C}$
- Titik didih : $82,4^{\circ}\text{C}$ (pada 1,013 hPa)
- Titik nyala : 12°C
- Densitas : 0,786 gram/cm³ (pada 20°C)
- Viskositas : 2,2 mPa.s (=cP) pada 20°C
- Tekanan uap : 43 hPa (pada 20°C)
- *Specific gravity* : 0,7864
- Sifat : Mudah menguap dan mudah terbakar
- Kelarutan : Larut dalam air (pada 20°C)

b) Sifat Kimia

- Bersifat stabil secara kimiawi saat dalam kondisi lingkungan (suhu ruang).
- Bersifat reaktif yaitu mudah meledak jika membentuk campuran dengan udara dan memungkinkan terjadinya pembentukan peroksida.
- Berisiko terjadi ledakan dengan klorat, fosgen, senyawa nitro organik, hidrogen peroksida, perklorat, agen oksidator kuat, asam nitrat, dioksida nitrogen, oksigen.
- Berisiko terjadi pembakaran atau pembentukan gas atau uap yang mudah terbakar dengan logam alkali, logam alkali tanah, oksida kromium (VI).
- Terjadi reaksi eksotermik dengan aldehida, amine, asam sulfat berasap, besi, aluminium, klorin, asam kuat, senyawa halogen.

2.3. Konsep Proses

2.3.1. Dasar Reaksi

Pembentukan isopropanol terjadi akibat adanya reaksi antara aseton ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) dengan gas hidrogen (H_2). Proses pembentukan isopropanol ini disebut dengan proses hidrogenasi aseton, dengan reaksinya yaitu sebagai berikut.



Reaksi pembentukan isopropanol berlangsung pada kondisi operasi reaktor sebagai berikut.

- Temperatur = $180^\circ\text{C} = 453,15 \text{ K}$
- Tekanan = $7,89 \text{ atm}$
- Fase = Gas
- Sifat reaksi = *Irreversible* (searah)

2.3.2. Sifat Reaksi

Sifat reaksi hidrogenasi aseton pembentukan isopropanol adalah *irreversible* (searah). Nilai entalpi standar reaksi (ΔH_f°) pada suhu 25°C sebesar $-55,02 \text{ kJ/mol}$, dan setelah disesuaikan pada suhu operasi 180°C didapatkan nilai ΔH_f° diperoleh sebesar $-56,44 \text{ kJ/mol}$, yang menunjukkan bahwa reaksi ini bersifat eksotermis (melepaskan panas). Karena nilai ΔH_f° negatif, maka dapat disimpulkan bahwa energi dilepaskan selama reaksi berlangsung, sehingga suhu reaktor cenderung meningkat. Dengan demikian, diperlukan sistem pendinginan yang memadai untuk menjaga suhu reaktor agar tetap stabil selama proses berlangsung (Smith & Van ness, 1959).

2.3.3. Tinjauan Termodinamika

Tinjauan termodinamika dilakukan untuk mengetahui apakah suatu reaksi menyerap atau melepaskan panas. Dalam konteks reaksi pembentukan isopropanol, aspek termodinamikanya dapat dianalisis melalui nilai entalpi dan konstanta kesetimbangan reaksi tersebut (Yaws, 1999).

- Menghitung nilai entalpi reaksi (ΔH_r°) pada suhu 25°C atau $298,15 \text{ K}$

Diketahui data ΔH_f° pada suhu 25°C atau $298,15 \text{ K}$ yaitu:

$$\Delta H_f^\circ \text{ C}_3\text{H}_6\text{O} = -217,57 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_f^\circ \text{ H}_2 = 0 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_f^\circ \text{ C}_3\text{H}_8\text{O} = -272,59 \text{ kJ/mol}$$

$$\begin{aligned}
\Delta H^{\circ}_{r298} &= \sum \Delta H_{\text{produk}} - \sum \Delta H_{\text{reaktan}} \\
&= (\Delta H_f^{\circ} \text{C}_3\text{H}_8\text{O}) - (\Delta H_f^{\circ} \text{C}_3\text{H}_6\text{O} + \Delta H_f^{\circ} \text{H}_2) \\
&= (-272,59 \text{ kJ/mol}) - (-217,57 \text{ kJ/mol} + 0 \text{ kJ/mol}) \\
&= -55,02 \text{ kJ/mol}
\end{aligned}$$

- Menghitung nilai entalpi reaksi (ΔH_r°) pada suhu operasi 180°C atau 453,15 K

Diketahui data ΔH_f° pada suhu 180°C atau 453,15 K yaitu:

$$\Delta H_f^{\circ} \text{C}_3\text{H}_6\text{O} = -224,89 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_f^{\circ} \text{H}_2 = 0 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_f^{\circ} \text{C}_3\text{H}_8\text{O} = -281,33 \text{ kJ/mol}$$

$$\begin{aligned}
\Delta H_r^{\circ}_{453} &= \sum \Delta H_{\text{produk}} - \sum \Delta H_{\text{reaktan}} \\
&= (\Delta H_f^{\circ} \text{C}_3\text{H}_8\text{O}) - (\Delta H_f^{\circ} \text{C}_3\text{H}_6\text{O} + \Delta H_f^{\circ} \text{H}_2) \\
&= (-281,33 \text{ kJ/mol}) - (-224,89 \text{ kJ/mol} + 0 \text{ kJ/mol}) \\
&= -56,44 \text{ kJ/mol}
\end{aligned}$$

$\Delta H_r^{\circ}_{453}$ bernilai negatif sehingga reaksi pembentukan isopropanol bersifat eksotermis (melepaskan panas).

- Menghitung energi bebas *gibbs* (ΔG°) pada suhu 25°C atau 298,15 K

Diketahui data ΔG_f° pada suhu 25°C atau 298,15 K yaitu:

$$\Delta G_f^{\circ} \text{C}_3\text{H}_6\text{O} = -153,05 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G_f^{\circ} \text{H}_2 = 0 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G_f^{\circ} \text{C}_3\text{H}_8\text{O} = -173,59 \text{ kJ/mol}$$

$$\begin{aligned}
\Delta G^{\circ}_{r298} &= \sum \Delta G_{\text{produk}} - \sum \Delta G_{\text{reaktan}} \\
&= (\Delta G_f^{\circ} \text{C}_3\text{H}_8\text{O}) - (\Delta G_f^{\circ} \text{C}_3\text{H}_6\text{O} + \Delta G_f^{\circ} \text{H}_2) \\
&= (-173,59 \text{ kJ/mol}) - (-153,05 \text{ kJ/mol} + 0 \text{ kJ/mol}) \\
&= -20,54 \text{ kJ/mol}
\end{aligned}$$

- Menghitung energi bebas *gibbs* (ΔG°) pada suhu operasi 180°C atau 453,15 K

Diketahui data ΔG_f° pada suhu 180°C atau 453,15 K yaitu:

$$\Delta G_f^{\circ} \text{C}_3\text{H}_6\text{O} = -68,15 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G_f^{\circ} \text{H}_2 = 0 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G_f^{\circ} \text{C}_3\text{H}_8\text{O} = -119,45 \text{ kJ/mol}$$

$$\begin{aligned}
\Delta G^{\circ}_{r_{453}} &= \sum \Delta G_{\text{produk}} - \sum \Delta G_{\text{reaktan}} \\
&= (\Delta G^{\circ}_{f} \text{ C}_3\text{H}_8\text{O}) - (\Delta G^{\circ}_{f} \text{ C}_3\text{H}_6\text{O} + \Delta G^{\circ}_{f} \text{ H}_2) \\
&= (-119,45 \text{ kJ/mol}) - (-68,15 \text{ kJ/mol} + 0 \text{ kJ/mol}) \\
&= -51,30 \text{ kJ/mol}
\end{aligned}$$

$\Delta G^{\circ}_{r_{453}}$ bernilai negatif sehingga reaksi pembentukan isopropanol bersifat spontan atau dapat berlangsung karena mempunyai harga $\Delta G^{\circ} < 0$.

- Menghitung harga konstanta keseimbangan pada suhu 25°C atau 298,15 K

$$\begin{aligned}
\ln K_{298} &= \frac{-\Delta G^{\circ}_{298}}{R.T} \\
\ln K_{298} &= \frac{20.540}{8,314 \times 298,15} \\
\ln K_{298} &= 8,2862 \\
K_{298} &= \exp (8,2862) \\
K_{298} &= 3,97 \times 10^3
\end{aligned}$$

- Menghitung harga konstanta keseimbangan pada suhu 180°C atau 453,15 K

$$\begin{aligned}
\ln K_{453} &= \frac{-\Delta G^{\circ}_{453}}{-R.T} \\
\ln K_{453} &= \frac{51.300}{8,314 \times 453,15} \\
\ln K_{453} &= 13,6165 \\
K_{453} &= \exp (13,6165) \\
K_{453} &= 8,2 \times 10^5
\end{aligned}$$

Didapatkan harga $K > 1$ yang menandakan bahwa reaksi berlangsung secara *irreversible* (searah) dan reaksi bergerak ke arah produk.

2.3.4. Tinjauan Kinetika

Reaksi dari isopropanol termasuk dalam reaksi orde dua, sehingga persamaan laju reaksinya dinyatakan sebagai berikut (Mon et al., 2012).

$$r_A = k \times C_A \times C_B$$

Keterangan:

r_A = kecepatan reaksi

C_A = konsentrasi aseton (kmol/m^3)

C_B = konsentrasi hidrogen (kmol/m^3)

2.3.5. Perbandingan Mol Reaktan

Pada proses pembentukan isopropanol, reaksi yang terjadi yaitu sebagai berikut.



Berdasarkan koefisien reaksi secara stoikiometri, perbandingan mol reaktan adalah 1 : 1,5 yang artinya 1 mol aseton bereaksi dengan 1,5 mol hidrogen. Aseton berperan sebagai pereaksi pembatas, sedangkan hidrogen digunakan dalam jumlah lebih banyak untuk menggeser kesetimbangan reaksi ke arah pembentukan produk (Faith et al., 1975).

2.4. Langkah Proses

Pada proses pembuatan isopropanol dari aseton dan gas hidrogen serta katalis Ni-Cu/SiO₂ dengan proses hidrogenasi, secara garis besar dilakukan dengan 4 tahapan yaitu persiapan bahan baku, proses pembentukan atau reaksi produk, proses pemisahan dan pemurnian produk, dan proses penyimpanan produk.

2.4.1. Tahap Persiapan Bahan Baku

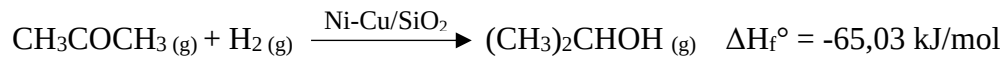
Persiapan bahan baku dilakukan untuk menyesuaikan kondisi bahan agar sesuai dengan kebutuhan operasi di dalam reaktor. Aseton disimpan dalam fase cair pada tekanan 1 atm dan suhu 30°C. Sementara itu, hidrogen sebagai bahan baku dialirkan dalam sistem perpipaan dalam bentuk gas pada suhu 30°C dan tekanan 7,89 atm. Untuk katalis Ni-Cu/SiO₂, penyimpanan dilakukan pada suhu ruangan di tempat berventilasi baik dan terhindar dari sinar matahari langsung.

Aseton dari Tangki Penyimpanan (T-101) dipompa menggunakan pompa (G-101) menuju Vaporizer (V-101) untuk diuapkan karena reaksi berlangsung dalam fase gas, kemudian bergabung dengan aliran aseton *recycle* di *mixing point* (MP-101). Uap aseton selanjutnya dinaikkan tekanannya menggunakan Kompresor (C-101) dari 1 atm menjadi 7,89 atm sebelum masuk ke Reaktor (R-101). Sedangkan gas hidrogen dialirkan melalui Tangki Penyimpanan Sementara (T-102) menuju *mixing point* (MP-102) untuk bergabung dengan aliran hidrogen *recycle*, kemudian gas dialirkan ke *Heater* (E-101) untuk dipanaskan hingga 180°C sebelum memasuki Reaktor (R-101).

2.4.2. Tahap Pembentukan Produk

Tahap pembentukan produk atau reaksi hidrogenasi aseton menjadi isopropanol terjadi dalam Reaktor (R-101). Jenis reaktor yang digunakan yaitu *Fixed Bed Multitube*. Kondisi operasi dalam Reaktor (R-101) yaitu pada suhu 180°C dan tekanan 7,89 atm dengan konversi reaksi sebesar 87,6%. Reaktor ini digunakan untuk mereaksikan aseton dan gas hidrogen dengan katalis Ni-Cu/SiO₂ yang berlangsung secara kontinyu, sehingga membentuk produk utama berupa

isopropanol. Reaksi yang dihasilkan bersifat eksotermis atau melepaskan panas, sehingga untuk menjaga kondisi operasi dalam reaktor dibutuhkan sistem pendinginan. Reaksi yang terjadi dalam reaktor yaitu:



2.4.3. Tahap Pemisahan dan Pemurnian Produk

Produk yang keluar dari Reaktor (R-101) belum dapat langsung disimpan sebagai produk akhir karena belum memenuhi spesifikasi yang ditetapkan. Oleh karena itu, diperlukan tahapan pemurnian untuk menghilangkan zat pengotor (impuritas) yang masih terkandung dalam aliran produk. Komposisi aliran keluaran reaktor mencakup campuran isopropanol, aseton, hidrogen, nitrogen, dan oksigen.

Langkah pertama dalam proses pemurnian yaitu produk keluaran dari Reaktor (R-101) kemudian dialirkan ke *Flash Drum* (FD-201) untuk dilakukan pemisahan antara zat yang dapat mengembun (*condensable gas*) dan zat yang tidak dapat mengembun (*non-condensable gas*). Isopropanol, aseton, dan gas hidrogen dalam fasa gas akan dialirkan ke Menara Distilasi 1 (DC-201), sedangkan isopropanol dan aseton dalam fasa liquid akan dialirkan ke Menara Distilasi 2 (DC-202). Produk atas (distilat) dari DC-201 berupa gas hidrogen dan aseton dikondensasi dalam Kondenser Parsial (CD-201) untuk memisahkan komponen yang tidak dapat mengembun berupa gas hidrogen yang akan dikembalikan ke sistem sebagai produk *recycle*. Sedangkan produk atas (distilat) dari DC-202 berupa aseton dikondensasi dalam Kondenser Parsial (CD-202) untuk memisahkan komponen yang tidak dapat mengembun yaitu berupa aseton dalam fasa gas yang kemudian akan dikembalikan ke sistem sebagai produk *recycle*.

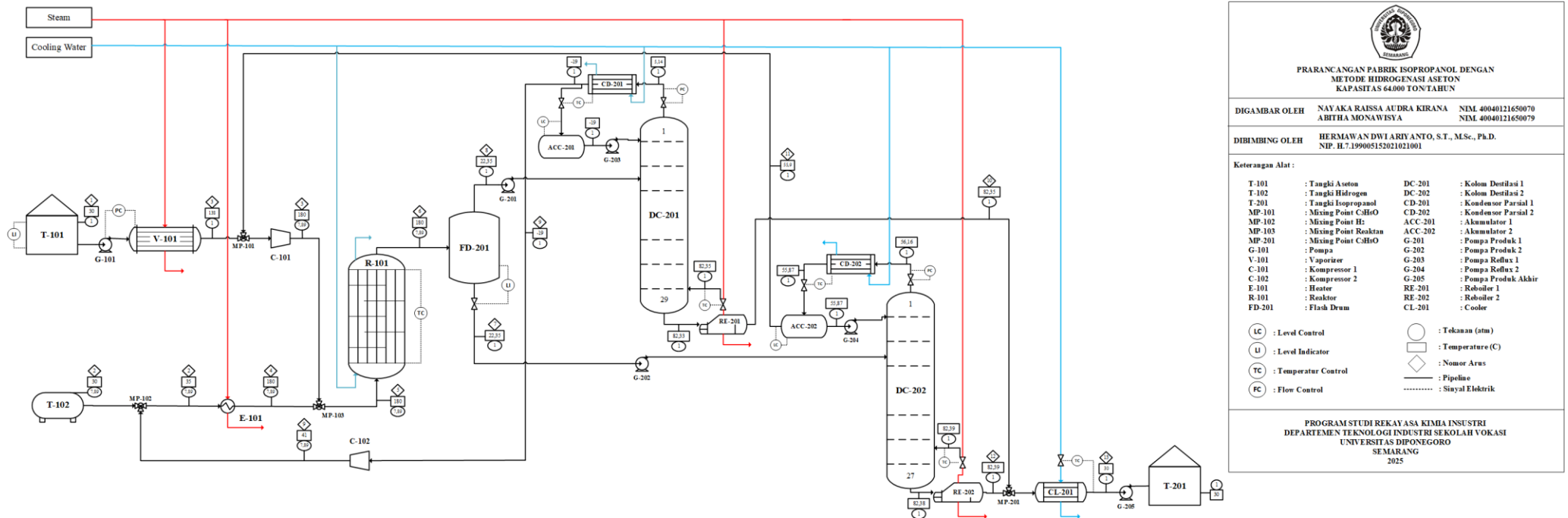
Produk bawah (*bottom*) dari DC-201 dan DC-202 berupa isopropanol kemudian dialirkan dan menuju *mixing point* (MP-201) sebelum akhirnya dialirkan menuju *Cooler* (CL-201) untuk didinginkan terlebih dahulu sebelum dipompa ke tangki penyimpanan produk (T-201).

2.4.4. Tahap Penyimpanan Produk

Produk berupa isopropanol dengan kemurnian 99,9% yang telah didinginkan di *Cooler* (CL-201), kemudian akan dialirkan dengan Pompa (G-203) melalui pipa menuju ke tangki penyimpanan produk (T-201). Produk isopropanol akan disimpan dengan kondisi operasi yaitu suhu 30°C dan tekanan 1 atm.

2.5. Diagram Alir Proses

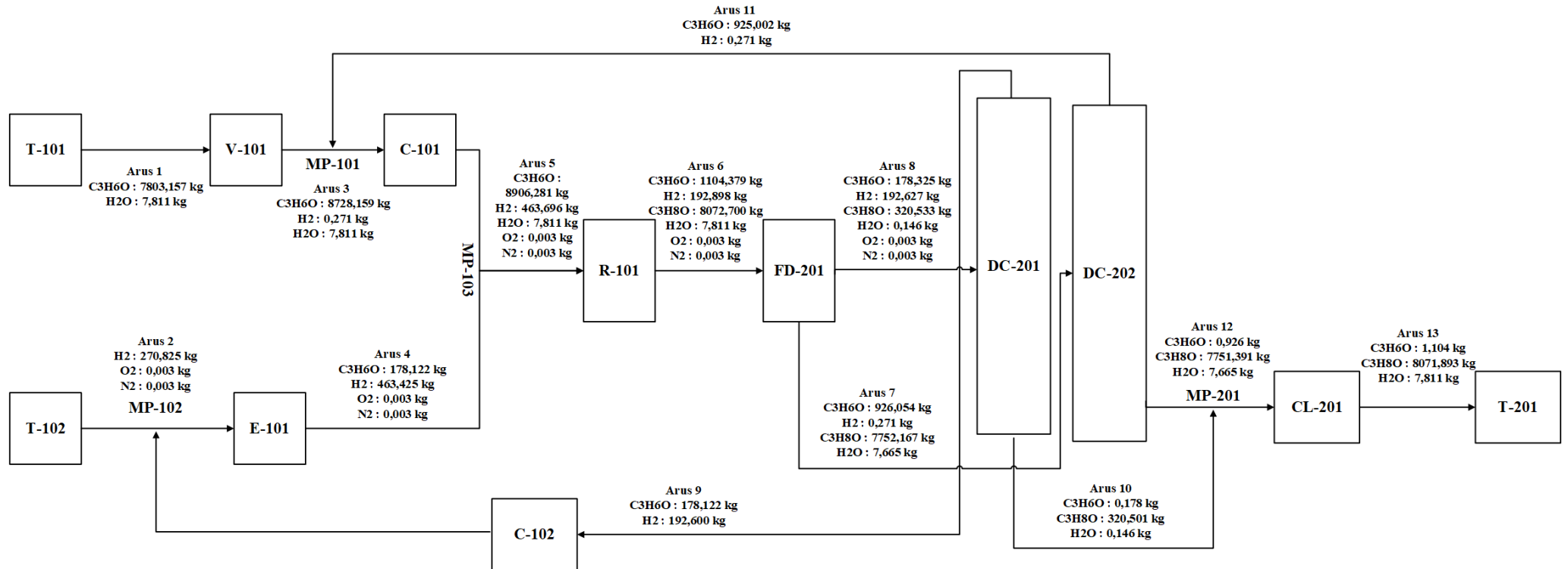
PROCESS ENGINEERING FLOW DIAGRAM PRARANCANGAN PABRIK ISOPROPANOL DENGAN METODE HIDROGENASI ASETON KAPASITAS 64.000 TON/TAHUN



Gambar 2. 1 Diagram Alir (Flowsheet) Prarancangan Pabrik Isopropanol dengan Metode Hidrogenasi Aseton
Kapasitas 64.000 Ton/Tahun

2.6. Neraca Massa Energi

2.6.1. Diagram Alir Neraca Massa



Gambar 2. 2 Diagram Alir Neraca Massa

Keterangan Gambar:

- T-101 = Tangki Penyimpanan Aseton
- T-102 = Tangki Penyimpanan Hidrogen
- MP-101 = *Mixing Point* Aseton
- MP-102 = *Mixing Point* Hidrogen
- MP-103 = *Mixing Point* ke Reaktor
- V-101 = *Vaporizer*
- E-101 = *Heater*
- C-101 = *Compressor* Aseton
- C-102 = *Compressor* Hidrogen
- R-101 = Reaktor
- FD-201 = Flash Drum
- DC-201 = Menara Distilasi 1
- DC-202 = Menara Distilasi 2
- MP-201 = *Mixing Point* Produk
- CL-201 = *Cooler*
- T-201 = Tangki Penyimpanan Isopropanol

Keterangan Arus:

- Arus 1 = Umpan aseton (C_3H_6O)
- Arus 2 = Campuran umpan hidrogen dan hidrogen *recycle*
- Arus 3 = Umpan aseton dan aseton *recycle* ke reaktor
- Arus 4 = Umpan hidrogen hidrogen dan hidrogen *recycle* ke reaktor
- Arus 5 = Umpan *mixing point* ke reaktor
- Arus 6 = Umpan ke flash drum
- Arus 7 = Umpan ke distilasi 2 (fasa cair)
- Arus 8 = Umpan ke distilasi 1 (fasa gas)
- Arus 9 = Hasil atas distilasi 1 (*recycle* H_2)
- Arus 10 = Hasil bawah distilasi 1
- Arus 11 = Hasil atas distilasi 2 (*recycle* C_3H_6O)
- Arus 12 = Hasil bawah distilasi 2
- Arus 13 = Produk isopropanol (C_3H_8O)

1. Neraca Massa Mixing Point Aseton (MP-101)

Tabel 2. 1 Neraca Massa Mixing Point Aseton (MP-101)

Komponen	Arus Masuk (kg/jam)		Arus Keluar (kg/jam)
	Arus 1	Arus 11	Arus 3
C ₃ H ₆ O	7803,157	925,002	8728,159
H ₂	0	0,271	0,271
H ₂ O	7,811	0	7,811
O ₂	0	0	0
N ₂	0	0	0
Subtotal	7810,968	925,273	8736,241
Total	8736,241		8736,241

2. Neraca Massa Mixing Point Hidrogen (MP-102)

Tabel 2. 2 Neraca Massa Mixing Point Hidrogen (MP-102)

Komponen	Arus Masuk (kg/jam)		Arus Keluar (kg/jam)
	Arus 2	Arus 9	Arus 4
C ₃ H ₆ O	0	178,122	178,122
H ₂	270,825	192,600	463,425
H ₂ O	0	0	0
O ₂	0,003	0	0,003
N ₂	0,003	0	0,003
Subtotal	270,831	370,722	641,553
Total	641,553		641,553

3. Neraca Massa Mixing Point ke Reaktor (MP-103)

Tabel 2. 3 Neraca Massa Mixing Point ke Reaktor (MP-103)

Komponen	Arus Masuk (kg/jam)		Arus Keluar (kg/jam)
	Arus 3	Arus 4	Arus 5
C ₃ H ₆ O	8728,159	178,122	8906,281
H ₂	0,271	463,425	463,696
H ₂ O	7,811	0	7,811
O ₂	0	0,003	0,003
N ₂	0	0,003	0,003
Subtotal	8736,241	641,553	9377,794
Total	9377,794		9377,794

4. Neraca Massa Reaktor (R-101)

Tabel 2. 4 Neraca Massa Reaktor (R-101)

Komponen	Arus Masuk (kg/jam)	Arus Keluar (kg/jam)
	Arus 5	Arus 6
C ₃ H ₆ O	8906,281	1104,379
H ₂	463,696	192,898
C ₃ H ₈ O	0	8072,700
H ₂ O	7,811	7,811
O ₂	0,003	0,003
N ₂	0,003	0,003
Subtotal	9377,794	9377,794
Total	9377,794	9377,794

5. Neraca Massa Flash Drum (FD-101)

Tabel 2. 5 Neraca Massa Flash Drum (FD-201)

Komponen	Arus Masuk (kg/jam)	Arus Keluar (kg/jam)	
	Arus 6	Arus 7 (cair)	Arus 8 (gas)
C ₃ H ₆ O	1104,379	926,054	178,325
H ₂	192,898	0,271	192,627
C ₃ H ₈ O	8072,700	7752,167	320,533
H ₂ O	7,811	7,665	0,146
O ₂	0,003	0	0,003
N ₂	0,003	0	0,003
Subtotal	9377,794	8686,157	691,637
Total	9377,794	9377,794	

6. Neraca Massa Menara Distilasi 1 (DC-201)

Tabel 2. 6 Neraca Massa Menara Distilasi 1 (DC-201)

Komponen	Arus Masuk (kg/jam)	Arus Keluar (kg/jam)	
	Arus 8	Arus 9	Arus 10
C ₃ H ₆ O	178,325	178,146	0,178
H ₂	192,627	192,627	0
C ₃ H ₈ O	320,533	0,032	320,501
H ₂ O	0,146	0	0,146
O ₂	0,003	0,003	0
N ₂	0,003	0,003	0
Subtotal	691,637	370,810	320,826
Total	691,637	691,637	

7. Neraca Massa Menara Distilasi 2 (DC-202)

Tabel 2. 7 Neraca Massa Menara Distilasi 2 (DC-202)

Komponen	Arus Masuk (kg/jam)	Arus Keluar (kg/jam)	
	Arus 7	Arus 11	Arus 12
C ₃ H ₆ O	926,054	925,128	0,926
H ₂	0,271	0,271	0
C ₃ H ₈ O	7752,167	0,775	7751,391
H ₂ O	7,665	0	7,665
O ₂	0	0	0
N ₂	0	0	0
Subtotal	8686,157	926,174	7759,982
Total	8686,157	8686,157	

8. Neraca Massa Mixing Point Produk (MP-201)

Tabel 2. 8 Neraca Massa Mixing Point Produk (MP-201)

Komponen	Arus Masuk (kg/jam)		Arus Keluar (kg/jam)
	Arus 10	Arus 12	Arus 13
C ₃ H ₆ O	0,178	0,926	1,104
H ₂	0	0	0
C ₃ H ₈ O	320,501	7751,391	8071,893
H ₂ O	0,146	7,665	7,811
O ₂	0	0	0
N ₂	0	0	0
Subtotal	320,826	7759,982	8080,808
Total	8080,808		8080,808

9. Neraca Massa Overall

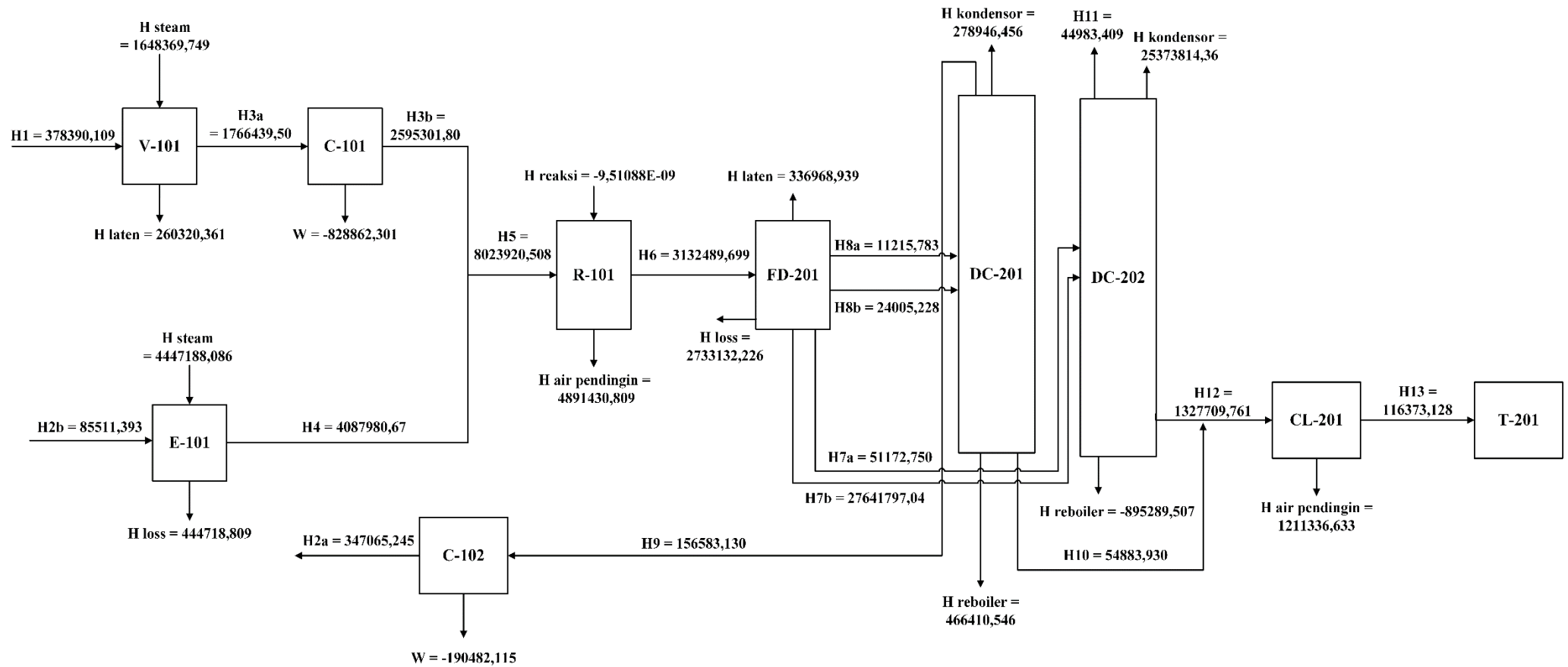
Tabel 2. 9 Neraca Massa Overall

Komponen	Input	Output
Arus 1	7810,968	-
Arus 2	270,831	-
Arus 3	8736,241	8736,241
Arus 4	641,553	641,553
Arus 5	9377,794	9377,794
Arus 6	9377,794	9377,794

Arus 7	8686,157	8686,157
Arus 8	691,637	691,637
Arus 9	370,722	370,811
Arus 10	320,825	320,825
Arus 11	925,273	926,174
Arus 12	7759,982	7759,982
Arus 13	-	8080,808
Total	54969,78	54969,78

$$\begin{aligned}
 \text{Efisiensi Produksi} &= \frac{\text{Produk}}{\text{Bahan baku}} \times 100\% \\
 &= 87,81\%
 \end{aligned}$$

2.6.2. Diagram Alir Neraca Panas



Gambar 2. 3 Diagram Alir Neraca Panas

Keterangan Gambar:

- V-101 = *Vaporizer*
- E-101 = *Heater*
- C-101 = *Compressor Aseton*
- C-102 = *Compressor Hidrogen*
- R-101 = *Reaktor*
- FD-201 = *Flash Drum*
- DC-201 = *Menara Distilasi 1*
- DC-202 = *Menara Distilasi 2*
- MP-201 = *Mixing Point Produk*
- CL-201 = *Cooler*
- T-201 = *Tangki Penyimpanan Isopropanol*

Keterangan Arus:

- H1 = panas masuk C_3H_6O
- H2a = panas keluar H_2 *recycle*
- H2b = panas masuk H_2 *recycle* dari *mixing point* (MP-102)
- H3a = panas yang dibawa V-101 masuk ke C-101
- H3b = panas keluar C_3H_6O menuju *mixing point* R-101
- H4 = panas keluar H_2 menuju *mixing point* ke reaktor (MP-103)
- H5 = panas masuk reaktan menuju R-101
- H6 = panas keluar produk yang dibawa R-101 masuk ke FD-201
- H7a = panas keluar produk fasa cair yang dibawa FD-201 masuk ke DC-202
- H7b = panas masuk produk yang dibawa FD-201 dengan panas laten ke DC-202
- H8a = panas keluar produk fasa gas yang dibawa FD-201 masuk ke DC-201
- H8b = panas masuk produk yang dibawa FD-201 dengan panas laten ke DC-201
- H9 = panas keluar distilat (H_2 *recycle*) menuju C-102
- H10 = panas keluar bottom menuju *mixing point* produk
- H11 = panas keluar distilat (C_3H_6O *recycle*) menuju MP-101
- H12 = panas keluar produk DC-202 menuju *mixing point* produk lalu ke CL-201
- H13 = panas keluar dari produk (C_3H_8O) setelah melewati CL-201

1. Neraca Panas Vaporizer (V-101)

Tabel 2. 10 Neraca Panas Vaporizer (V-101)

Panas	H input (kJ)	H Output (kJ)
H1	378390,109	-
H laten	-	260320,3613
H3	-	1766439,497
H steam	1648369,749	-
Total	2026759,859	2026759,859

2. Neraca Panas Kompresor Aseton (C-101)

Tabel 2. 11 Neraca Panas Kompresor Aseton (C-101)

Panas	H input (kJ)	H Output (kJ)
H3a	1766439,497	-
H3b	-	2595301,798
W	-	-828862,3007
Total	1766439,497	1766439,497

3. Neraca Panas Kompresor Hidrogen (C-102)

Tabel 2. 12 Neraca Panas Kompresor Hidrogen (C-102)

Panas	H input (kJ)	H Output (kJ)
H9	156583,130	-
H2a	-	347065,245
W	-	-190482,1148
Total	156583,130	156583,130

4. Neraca Panas Heater (E-101)

Tabel 2. 13 Neraca Panas Heater (E-101)

Panas	H input (kJ)	H Output (kJ)
H2b	85511,393	-
H steam	4447188,086	-
H4	-	4087980,670
H loss	-	444718,809
Total	4532699,48	4532699,48

5. Neraca Panas Reaktor (R-101)

Tabel 2. 14 Neraca Panas Reaktor (R-101)

Panas	H input (kJ)	H Output (kJ)
H5	8023920,508	-
H reaksi	9,51088E-09	-
H6	-	3132489,699
H air pendingin	-	4891430,809
Total	8023920,51	8023920,51

6. Neraca Panas Flash Drum (FD-201)

Tabel 2. 15 Neraca Panas Flash Drum (FD-201)

Panas	H input (kJ)	H Output (kJ)
H6	3132489,699	-
H7a	-	51172,750
H8a	-	11215,78346
H laten	-	336968,9391
H loss	-	2733132,226
Total	3132489,699	3132489,699

7. Neraca Panas Menara Distilasi 1 (DC-201)

Tabel 2. 16 Neraca Panas Menara Distilasi 1 (DC-201)

Panas	H input (kJ)	H Output (kJ)
H8b	24005,228	-
H reboiler	466410,546	-
H9 (distilat)	-	156585,387
H10 (bottom)	-	54883,930
H kondensor	-	278946,456
Total	490415,774	490415,774

8. Neraca Panas Menara Distilasi 2 (DC-202)

Tabel 2. 17 Neraca Panas Menara Distilasi 2 (DC-202)

Panas	H input (kJ)	H Output (kJ)
H7	27641797,04	-
H reboiler	-895289,507	-
H11 (distilat)	-	44983,409
H12 (bottom)	-	1327709,761
H kondensor	-	25373814,36
Total	26746507,53	26746507,53

9. Neraca Panas Cooler (CL-201)

Tabel 2. 18 Neraca Panas Cooler (CL-201)

Panas	H input (kJ)	H Output (kJ)
H12	1327709,761	-
H13	-	116373,128
H air pendingin	-	1211336,633
Total	1327709,761	1327709,761

10. Neraca Panas Overall

Tabel 2. 19 Neraca Panas Overall

Komponen	Input	Output
V-101		
H1	378390,109	-
H steam	1648369,749	-
H laten	-	260320,361
H3	-	1766439,497
C-101		
H3a	1766439,497	-
H3b	-	2595301,798
W	-	-828862,3007
C-102		
H9	156583,130	-
H2a	-	347065,245
W	-	-190482,115
E-101		
H2b	85511,393	-
H steam	4447188,086	-
H4	-	4087980,67
H loss	-	444718,809
R-101		
H5	8023920,508	-
H reaksi	9,51088E-09	-
H6	-	3132489,699
H air pendingin	-	4891430,809
FD-201		
H6	3132489,699	-
H7a	-	51172,750
H8a	-	11215,783
H laten	-	336968,939
H loss	-	2733132,226
DC-201		
H8b	24005,228	-

H reboiler	466410,546	-
H9 (distilat)	-	156585,387
H10 (bottom)	-	54883,930
H kondensor	-	278946,456
DC-202		
H7b	27641797,04	-
H reboiler	-895289,507	-
H11 (distilat)	-	44983,409
H12 (bottom)	-	1327709,761
H kondensor	-	25373814,36
CL-201		
H12	1327709,761	-
H13	-	116373,128
H air pendingin	-	1211336,633
TOTAL	48203525,24	48203525,24

$$\text{Panas Hilang} = \frac{\text{total panas hilang}}{\text{total panas}} \times 100\%$$

$$= 6,59\%$$

$$\text{Efisiensi Panas} = 100\% - \text{Panas Hilang}$$

$$= 93,41\%$$

2.7. Tata Letak Pabrik dan Peralatan Proses

2.7.1. Tata Letak Pabrik

Tata letak pabrik merupakan susunan penempatan dari berbagai bagian dalam pabrik, termasuk area kerja karyawan, tempat penyimpanan bahan baku, serta produk yang saling terintegrasi. Perancangan tata letak ini perlu dilakukan secara optimal agar pemanfaatan area pabrik menjadi efisien, proses produksi dan distribusi berjalan dengan baik, serta aspek keamanan, keselamatan, dan kenyamanan bagi tenaga kerja dapat terjaga.

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

Dalam merancang tata letak pabrik, terdapat sejumlah faktor penting yang perlu diperhatikan, antara lain:

1. Penempatan peralatan produksi harus disusun secara teratur dan mengikuti urutan proses kerja, sehingga alur kerja menjadi lebih efisien dan ekonomis.
2. Tata letak peralatan dirancang secara sistematis dengan ruang yang memadai agar proses pengoperasian, pengawasan, perawatan, serta penambahan peralatan baru dapat dilakukan dengan mudah.
3. Lokasi pabrik sebaiknya memungkinkan untuk dilakukan ekspansi di masa mendatang.
4. Sistem distribusi utilitas perlu dirancang secara efisien dan hemat biaya.
5. Pengelolaan limbah pabrik harus dilakukan dengan baik agar tidak mencemari lingkungan atau menimbulkan polusi.
6. Perhatian terhadap aspek keselamatan dan keamanan kerja bagi seluruh karyawan harus menjadi prioritas.
7. Unsur estetika juga perlu disesuaikan dengan kondisi dan letak lingkungan pabrik.

Berdasarkan berbagai pertimbangan teknis dan operasional, tata letak pabrik isopropanol dirancang sebagai berikut:

1. Area Proses

Merupakan pusat kegiatan produksi utama, yang dirancang untuk memudahkan aliran bahan baku dari area penyimpanan dan pengiriman produk ke gudang produk. Penempatan area ini juga mempertimbangkan kemudahan pengawasan dan perawatan alat, serta dilengkapi dengan ruang kontrol untuk pemantauan proses secara keseluruhan.

2. Area Penyimpanan

Berfungsi untuk menyimpan bahan baku dan produk akhir, yang ditempatkan agar mudah dijangkau oleh alat transportasi internal.

3. Area Pemeliharaan dan Perbaikan

Terdiri dari bengkel dan gudang teknik, area ini ditempatkan terpisah dari area proses untuk menghindari potensi gangguan terhadap operasional produksi akibat aktivitas perbaikan.

4. Area Laboratorium

Digunakan untuk pengujian kualitas bahan baku dan produk akhir, serta mendukung kegiatan penelitian dan pengembangan. Letaknya dekat dengan area proses untuk kemudahan akses.

5. Area Utilitas

Menyediakan kebutuhan pendukung proses seperti pasokan air, listrik, dan bahan bakar.

6. Area Perkantoran

Merupakan pusat aktivitas administrasi, baik untuk kegiatan internal maupun eksternal pabrik, termasuk ruang serba guna.

7. Area Fasilitas Umum

Meliputi fasilitas seperti kantin, mushola, klinik, perumahan karyawan, sarana olahraga, dan area parkir. Lokasinya dirancang strategis agar mobilitas karyawan antarfasilitas lebih efisien.

8. Area Perluasan

Disiapkan sebagai cadangan lahan untuk pengembangan pabrik di masa mendatang seiring peningkatan kapasitas produksi.

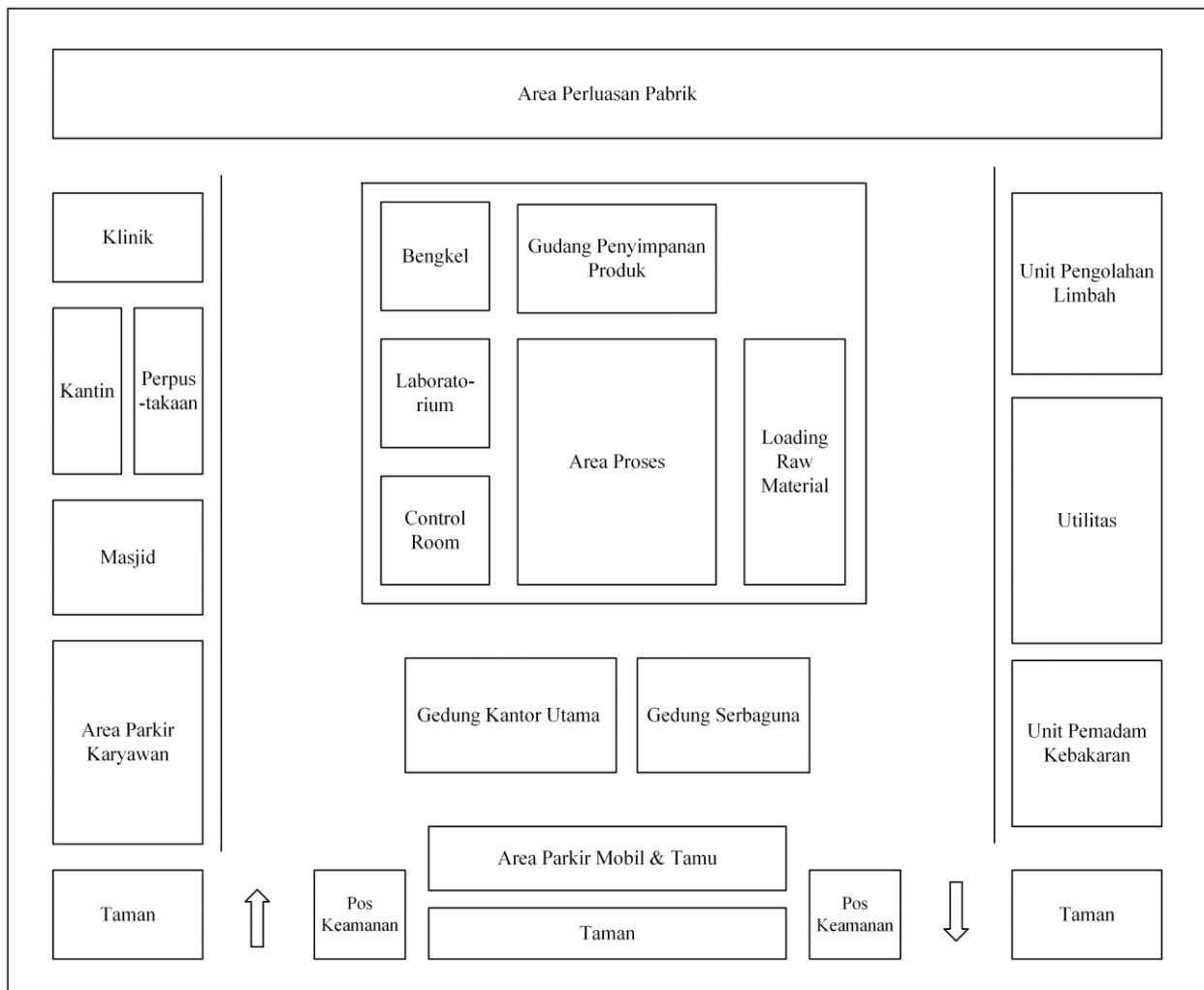
9. Pos Keamanan

Ditempatkan di pintu masuk dan keluar sebagai upaya pengendalian dan penjagaan keamanan seluruh area pabrik.

Tabel 2. 20 Perincian Luas Area Pabrik Isopropanol

No.	Bangunan Indoor	Luas (m ²)
1.	Pos Keamanan	30
2.	Gedung Kantor Utama	400
3.	Kantin dan perpustakaan	200
4.	Laboratorium	195
5.	Unit Pemadam Kebakaran	150
6.	Gudang Penyimpanan Produk	4.480
7.	Loading raw material	500
8.	Bengkel	150
9.	Control Room	200
10.	Masjid	300
11.	Gedung Serbaguna	600
12.	Klinik	150
13.	Unit Pengolahan Limbah	300
14.	Utilitas	700
15.	Area Proses	5.000
16.	Pos Keamanan	30
17.	Tempat Parkir	1.300
18.	Jalan & Taman	1.100
19.	Area Perluasan Pabrik	2.100
TOTAL		17.855

Adapun tata letak pabrik isopropanol dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. 4 Tata Letak Pabrik Isopropanol

2.7.2. Tata Letak Peralatan Proses

Perancangan tata letak peralatan proses dan fasilitas produksi dalam pabrik memegang peran penting untuk menjamin efisiensi operasional, keselamatan kerja, serta kelancaran aliran proses produksi. Tata letak ini perlu dirancang dengan memperhatikan sejumlah aspek utama. Adapun beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan dalam penataan tata letak peralatan proses adalah sebagai berikut:

1. Efisiensi Ekonomi

Dengan menempatkan peralatan secara strategis akan dapat meminimalkan jarak transportasi bahan antar unit, sehingga mengurangi biaya operasional.

2. Kemudahan Operasional

Penempatan alat-alat harus memungkinkan operator bergerak dengan leluasa dan aman selama proses berlangsung. Ruang yang cukup di sekitar alat juga harus tersedia agar memudahkan akses dan pengawasan.

3. Aspek Pemeliharaan

Penataan peralatan juga harus memfasilitasi kegiatan pemeliharaan, baik untuk perbaikan maupun pembersihan. Akses yang mudah akan memperpanjang umur peralatan serta menjaga agar alat tetap berfungsi optimal selama operasional berlangsung.

4. Faktor Keselamatan Kerja

Peralatan yang beroperasi pada tekanan atau suhu tinggi harus diisolasi secara tepat untuk mengurangi risiko kecelakaan, seperti kebocoran, ledakan, atau kebakaran. Selain itu, sistem evakuasi darurat juga perlu disiapkan, seperti penyediaan dua jalur keluar (utama dan darurat).

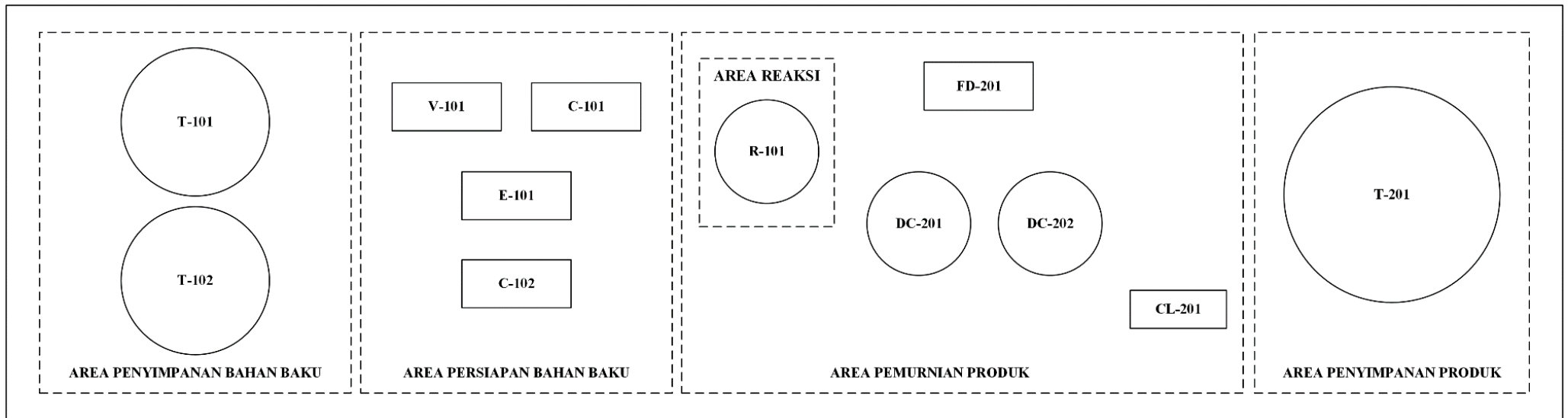
5. Alur Bahan Baku dan Produk

Alur ini harus dirancang sedemikian rupa agar efisien dan tidak mengganggu lalu lintas di area pabrik. Pengaturan elevasi dan jarak antar pipa atau peralatan juga diperhatikan untuk meminimalisir risiko dan mempermudah distribusi.

6. Sirkulasi Udara dan Pencahayaan

Aliran udara dan penerangan di area proses harus cukup baik, terutama di lokasi yang berisiko tinggi, untuk menjamin kenyamanan dan keselamatan kerja.

Adapun tata letak peralatan proses pada pabrik isopropanol dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. 5 Tata Letak Peralatan Proses