

BAB II

DESKRIPSI PROSES

2.1 Spesifikasi Bahan Baku dan Produk

2.1.1 Spesifikasi Bahan Baku

a. Asam Asetat

Berdasarkan data dari PT Acidatama, 2025, spesifikasi asam asetat adalah sebagai berikut:

Rumus Molekul : CH_3COOH

Berat Molekul (g/mol) : 60,05

Fase (1 atm, 25–30°C) : Cair

Kenampakan : Tidak berwarna, cairan jernih

Densitas : $\pm 1,05 \text{ g/cm}^3$ (20 °C)

Viskositas : $\pm 1,2 \text{ cP}$ (20 °C)

Titik Lebur (1 atm) : $\geq 16,3 \text{ °C}$

Titik Didih : $\pm 118 \text{ °C}$ (1 atm)

Titik Beku (Freezing point) : $16,30 \text{ °C}$

Tekanan uap : $\pm 15,7 \text{ mmHg}$ (25 °C)

pH : $\pm 2,4 - 2,5$

Kelarutan dalam air : Larut sempurna (miscible)

Warna : 7 APHA

Spesifikasi Komposisi:

- Asam asetat (CH_3COOH) : 99,80 % wt
- Air : 401 ppm
- Asetaldehida : 144 ppm
- Asam format : 91 ppm

b. Isobutanol

Berdasarkan data dari PT. Oxo Nusantara, 2023, spesifikasi isobutanol adalah sebagai berikut:

Rumus Molekul : $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$

Berat Molekul (g/mol) : 74,12

Fase (1 atm, 25–35°C) : Cair

Kenampakan : Cairan jernih, tidak berwarna, netral

Densitas : $0,808 - 0,814 \text{ g/cm}^3$ (15°C)

Titik Didih : 114 – 120 °C

Warna : Maksimal 10 APHA

Rentang Distilasi : 114 – 120 °C

Kelarutan dalam air : Sedikit larut

Spesifikasi Komposisi:

- Isobutanol : Minimal 99,5 % wt
- Air : Maksimal 0,05 % wt
- Keasaman (sebagai asam asetat) : Maksimal 0,002 % wt
- Aldehida (sebagai 2-etilheksanal) : Maksimal 0,05 % wt
- n-Butanol : Maksimal 0,25 % wt

2.1.2 Spesifikasi Bahan Pembantu

a. Katalis Amberlyst-15

Berdasarkan data dari DuPont, 2023, spesifikasi Katalis Amberlyst-15 yang di distribusikan oleh PT Arianto Darmawan sebagai berikut:

Jenis : Katalis asam padat (*Strong acid cation exchange resin*)

Struktur Polimer : *Styrene-divinylbenzene*

Matriks : Makroporous

Fase (25-30°C, 1 atm) : Padat

Kenampakan : Butiran bulat, tidak tembus cahaya, berwarna abu-abu

Sifat Fisik :

- Luas permukaan (BET) : $\pm 53 \text{ m}^2/\text{g}$
- Volume pori total : $\pm 0,40 \text{ cc/g}$
- Diameter pori rata-rata : $\pm 300 \text{ \AA}$
- Densitas (shipping weight) : $\pm 610 \text{ g/l}$

Sifat Kimia:

- Gugus fungsi : Asam sulfonat ($-\text{SO}_3\text{H}$)
- Bentuk ion : H^+
- Konsentrasi situs asam : $\geq 4,70 \text{ eq/kg}$
- Kandungan volatil : $\leq 1,6\%$

Ukuran partikel :

- $< 300 \text{ }\mu\text{m}$: $\leq 0,5\%$
- $< 425 \text{ }\mu\text{m}$: $\leq 2,0\%$

Sifat lain :

- Pengembangan (swelling dalam fenol) : $\pm 38\%$

Kondisi Operasi :

- Suhu maksimum : 120°C (non-aqueous)
- LHSV : $0,5 - 5 \text{ jam}^{-1}$
- Pressure drop maksimum : $\pm 1 \text{ bar}$

2.1.3 Spesifikasi Produk

a. Isobutil Asetat

Berdasarkan data MSDS dari Chemos GmbH & Co. KG, 2019, spesifikasi isobutil asetat adalah sebagai berikut

Rumus Molekul : $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$

Berat Molekul (g/mol) : $\pm 116,16$

Fase (1 atm, $25 - 30^{\circ}\text{C}$) : Cair

Kenampakan : Cairan tidak berwarna, berbau khas (ester)

Densitas : $\pm 0,871 \text{ g/cm}^3$ (20°C)

Viskositas : $\pm 0,699 \text{ cP}$ (20°C)

Titik lebur (1 atm) : $< -90^{\circ}\text{C}$

Titik didih : $\pm 117^{\circ}\text{C}$ (1 atm)

Titik nyala (flash point) : $\pm 22^{\circ}\text{C}$

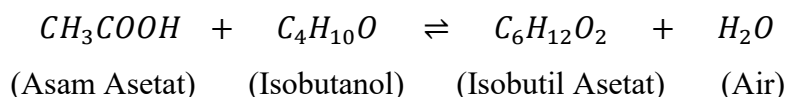
Tekanan uap : $\pm 21 \text{ hPa}$ (20°C)

Kelarutan dalam air : $\pm 5,6 \text{ g/L}$ (20°C) $\rightarrow$ sedikit larut

2.2 Konsep Proses

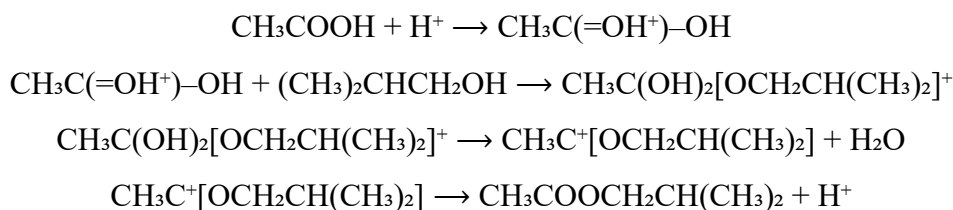
2.2.1 Dasar Reaksi

Proses produksi isobutil asetat dilakukan dengan menggunakan bahan baku asam asetat (CH_3COOH) dan isobutanol ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$) melalui mekanisme reaksi esterifikasi. Reaksi ini merupakan interaksi antara asam karboksilat dan alkohol yang berlangsung dengan bantuan katalis asam. Adapun persamaan reaksi stoikiometri pada pembentukan isobutil asetat adalah sebagai berikut:



2.2.2 Mekanisme Reaksi

Pembentukan isobutil asetat terjadi melalui reaksi esterifikasi Fischer antara asam asetat (CH_3COOH) dan isobutanol ($(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{OH}$) dengan bantuan katalis asam Amberlyst 15. Reaksi ini termasuk reaksi bolak-balik (reversibel), sehingga hasil produk yang terbentuk dipengaruhi oleh kondisi kesetimbangan reaksi. Mekanisme reaksi berlangsung melalui beberapa tahap. Tahap pertama adalah protonasi gugus karbonil pada asam asetat oleh ion H^+ dari katalis sehingga molekul menjadi lebih reaktif. Selanjutnya, atom oksigen dari isobutanol menyerang atom karbon karbonil dan membentuk senyawa antara (intermediat tetrahedral). Setelah itu terjadi pelepasan molekul air sebagai produk samping reaksi. Pada tahap terakhir, terjadi pelepasan proton kembali sehingga katalis dapat digunakan lagi dan terbentuk produk ester berupa isobutil asetat (Andrés dkk., 2020). Reaksi yang terjadi dapat dituliskan sebagai berikut:



Proses pembentukan isobutil asetat dilakukan secara kontinu di dalam kolom distilasi reaktif menggunakan katalis Amberlyst 15 yang ditempatkan pada structured packing. Kolom dilengkapi dengan zona reaktif dengan bagian bawah kolom berfungsi sebagai stripping section, sedangkan bagian atas merupakan enriching section non-reaktif. Air yang dihasilkan selama reaksi akan dipisahkan pada bagian atas kolom menggunakan kondensor dan dekanter. Pemisahan air ini membantu menggeser reaksi ke arah pembentukan produk sehingga konversi asam asetat sebagai reaktan pembatas mampu mencapai 99%. Produk isobutil asetat kemudian diperoleh pada bagian bawah kolom dengan kemurnian mencapai 99,8%.

2.2.3 Fase Reaksi

Reaksi yang berlangsung antara asam asetat dan isobutanol untuk membentuk isobutil asetat terjadi atau direaksikan dalam fase cair di dalam distilasi reaktif. Reaksi ini memiliki sifat eksotermis ($\Delta H = \text{negatif}$).

2.2.4 Kondisi Operasi

Isobutil asetat yang dibuat dari isobutanol merupakan reaksi yang terjadi antar fasa cair yang berlangsung eksotermis. Reaksi berjalan di dalam destilasi reaktif dengan suhu operasi:

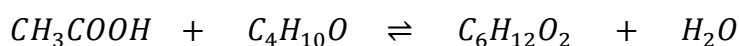
- Suhu : 100 °C
- Tekanan : 1 atm
- Mol : 1 mol asam asetat : 1,01 mol isobutanol

2.2.5 Tinjauan Secara Termodinamika

Pembuktian perlu dilakukan untuk menentukan sifat reaksi yang berjalan dalam pembentukan isobutil asetat itu secara eksotermis atau endotermis. Pembuktian dilakukan dengan menggunakan panas pembentukan standar (ΔH°_f). Ini ditentukan dari kondisi standar yaitu suhu 298,15 °K di tekanan 1 atm

2.2.5.1 Panas Reaksi (ΔH_r)

Panas reaksi berguna untuk mengetahui apakah reaksi pembentukan isobutil asetat berlangsung secara endotermis atau eksotermis. Berikut adalah perhitungan panas reaksi (ΔH_r) pada reaksi esterifikasi antara asam asetat dan juga isobutanol dalam pembentukan isobutil asetat. Data diambil dari (NIST, 2026). Nilai ΔH°_f ditampilkan pada Tabel 2.1.



Tabel 2.1 Nilai ΔH°_f Masing-masing Senyawa

Komponen	(ΔH°_f) (kJ/mol)
CH_3COOH	-484,5
$C_4H_{10}O$	-334,7
$C_6H_{12}O_2$	-541.8
H_2O	-285.83

$$\begin{aligned}
 \Delta H^\circ_{R_{298,15}} &= \Delta H^\circ_f \text{ produk} - \Delta H^\circ_f \text{ reaktan} \\
 &= [\Delta H^\circ_f C_6H_{12}O_2 + \Delta H^\circ_f H_2O] - [\Delta H^\circ_f CH_3COOH + \Delta H^\circ_f C_4H_9OH] \\
 &= [(-541,8) + (-285,83)] - [(-484,52) + (-334,7)] \\
 &= (-827,63) - (-819,22) \\
 &= -8,430 \frac{kJ}{mol}
 \end{aligned}$$

Karena $\Delta H^\circ_R = -8,430 \text{ kJ/mol}$ (negatif) maka reaksi bersifat **eksotermis**, artinya reaksi melepaskan panas ke lingkungan.

2.2.5.2 Energi Bebas Gibbs (ΔG°)

Sifat reaksi dapat diketahui secara termodinamika menggunakan persamaan *Van't Hoff* (Smith *et al.*, 1949).

Diketahui persamaan Van't Hoff:

$$\frac{d\left(\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right)}{dT} = \frac{-\Delta H^\circ}{RT^2} \quad (2.1)$$

Dengan hubungan energi bebas Gibbs standar terhadap konstanta kesetimbangan:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad (2.2)$$

Substitusi Persamaan (2.2) ke Persamaan (2.1):

$$\frac{d\left(\frac{-RT \ln K}{RT}\right)}{dT} = \frac{-\Delta H^\circ}{RT^2}$$

Karena RT ada di pembilang dan penyebut, maka dapat disederhanakan:

$$\frac{d(-\ln K)}{dT} = \frac{-\Delta H^\circ}{RT^2}$$

Tanda negatif pada kedua ruas dapat dihilangkan sehingga diperoleh:

$$\frac{d(\ln K)}{dT} = \frac{\Delta H^\circ}{RT^2} \quad (2.3)$$

Jika ΔH° dianggap konstan terhadap suhu, maka persamaan dapat diintegrasikan dari kondisi 1 ke kondisi 2:

$$\int_{K_1}^{K_2} d(\ln K) = \frac{\Delta H^\circ}{R} \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{T^2} dT$$

Integral ruas kiri:

$$\int_{K_1}^{K_2} d(\ln K) = \ln \frac{K_2}{K_1}$$

Integral ruas kanan:

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{T^2} dT = \int_{T_1}^{T_2} T^{-2} dT = \left[-\frac{1}{T} \right]_{T_1}^{T_2}$$

Sehingga:

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

Persamaan dapat dituliskan kembali menjadi:

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = -\frac{\Delta H^\circ}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (2.4)$$

Data Energi Gibbs masing-masing komponen menurut Yaws, 1999, ditampilkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Data Energi Gibbs

Komponen	($\Delta H^\circ G$) (kJ/mol)
CH ₃ COOH	-376,69
C ₄ H ₁₀ O	-155,01
C ₆ H ₁₂ O ₂	-322,2
H ₂ O	-228,6

$$= [\Delta G^\circ f \text{ C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2 + \Delta G^\circ f \text{ H}_2\text{O}] - [\Delta G^\circ f \text{ CH}_3\text{COOH} + \Delta G^\circ f \text{ C}_4\text{H}_{10}\text{O}]$$

$$= [(-322,2) + (-228,6)] - [(-376,69) + (-155,01)]$$

$$= (-550,8) - (-531,7)$$

$$= -\frac{19,1 \text{ kJ}}{\text{mol}}$$

$$= -19.100 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

Karena $\Delta G^\circ R = -19,1 \text{ kJ/mol}$ (negatif), maka pada kondisi standar reaksi bersifat spontan. K standar pada suhu 298,15°K

$$K = e^{-\Delta G^\circ / RT}$$

$$= e^{-\left(\frac{-19100}{8,314 \times 298,15}\right)}$$

$$= e^{7,706}$$

$$= 2220$$

K standar pada suhu operasi :

$$T : 373,15^\circ\text{K}$$

Maka

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = R - \Delta H^\circ (T_{21} - T_{11}) \ln \frac{K_2}{4,49 \times 10^{-4}} = 1131,8 \times (-6,74 \times 10^{-4})$$

$$\ln \frac{K_2}{4,49 \times 10^{-4}} = -0,7628$$

$$K_2 = 2220 \times e^{-0,7628}$$

$$K_2 = 2220 \times 0,4664$$

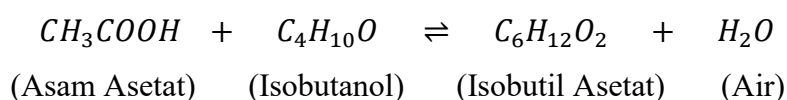
$$K_{operasi} = 1035$$

Dikarenakan nilai K lebih besar dari 1, ini menunjukkan bahwa reaksi esterifikasi antara asam asetat dan isobutanol pada kesetimbangan condong ke arah pembentukan produk, yaitu isobutil asetat dan air. Meskipun demikian, penambahan isobutanol berlebih tetap dilakukan sebagai praktik umum dalam reaksi esterifikasi untuk mendorong konversi asam asetat sebagai reaktan pembatas semaksimal mungkin, sesuai dengan prinsip Le Chatelier, bukan karena reaksi cenderung ke arah reaktan, melainkan untuk menggeser kesetimbangan lebih jauh ke arah produk dan meningkatkan konversi keseluruhan. Pada penelitian oleh (Martínez dkk., 2020) juga menyebutkan bahwa penggunaan *excess* isobutanol memang praktik yang umum untuk mendapatkan konversi tinggi. Penggunaan Amberlyst 15 juga berfungsi untuk mempercepat laju reaksi sehingga pembentukan ester akan berlangsung lebih cepat dan juga efisien. Jika tidak ditambahkan katalis, maka reaksi esterifikasi akan berjalan lambat. Amberlyst 15 ini dipilih karena termasuk katalis heterogen yang mana pada saat proses akan lebih mudah dipisahkan dari produk dan tidak terlalu korosif seperti katalis asam cair H_2SO_4 (Martínez dkk., 2020)

2.2.6 Tinjauan Kinetika Reaksi

Untuk menentukan volume katalis dan dimensi seksi reaktif pada kolom distilasi reaktif pada produksi isobutil asetat, perhitungan kinetika reaksi dilakukan dengan mengacu pada model kinetika dan kesetimbangan kimia yang telah divalidasi secara eksperimental (Martínez dkk., 2020). Produksi isobutil asetat melalui reaksi esterifikasi antara asam asetat (ACAC) dan isobutanol (IbOH) dengan katalis heterogen Amberlyst-15. Model kinetika ini menggunakan persamaan laju reaksi reversibel orde dua berbasis fraksi mol, dengan memperhitungkan konsentrasi seluruh komponen (ACAC, IbOH, IbAC, dan air) secara eksplisit, baik untuk reaksi esterifikasi maupun reaksi balik (hidrolisis). Isobutanol digunakan sedikit berlebih (rasio ACAC:IbOH $\approx$ 0,9–0,98) untuk mendorong konversi asam asetat dan menghindari pembentukan azeotrop bertitik didih tinggi.

Reaksi esterifikasi yang ditinjau:



Laju reaksi dinyatakan dalam bentuk persamaan laju reaksi reversibel berbasis fraksi mol:

$$r = C_{cat} \cdot k \left(x_{ACAC} \cdot x_{IbOH} - \frac{x_{IbAC} \cdot x_{water}}{KEQ} \right) \quad (2.5)$$

dengan k dan K_{EQ} sebagai fungsi suhu:

$$k = 87,3161 \exp \left(\frac{-41506}{RT} \right) \quad (2.6)$$

$$\ln KEQ = -1981,1 \times \frac{1}{T} + 7,1927 \quad (2.7)$$

Keterangan:

x_i = fraksi mol komponen i pada fase cair

T = suhu operasi (K)

R = $8,314 \times 10^{-3}$ kJ/mol·K

C_{cat} = konsentrasi katalis per volume cairan reaktif = 780 kg_{cat}/m³_{liq} (sesuai liquid hold-up Katapak SP-11, Andres *et al.*, 2020).

Kondisi operasi dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Kondisi Operasi di Reaktif Distilasi

Parameter	Nilai	Satuan
T	381,2419 (108,09 °C)	K
x _{ACAC}	0,2475	mol
x _{IbOH}	0,2576	mol
x _{IbAC}	0,2474	mol
x _{water}	0,2474	mol
ξ (laju produksi IbAC)	5,4319	kmol/jam

a. Menghitung K_{EQ} pada T = 381,2419 K

$$\ln KEQ = -1981,1 \times (1/381,2419) + 7,1927 = -5,1964 + 7,1927 = 1,9963$$

$$KEQ = \exp(1,9963) = 7,3615$$

b. Menghitung k pada T = 381,2419 K

$$k = 87,3161 \times \exp(-41,506 / (8,314 \times 10^{-3} \times 381,2419))$$

$$k = 87,3161 \times \exp(-13,0948) = 87,3161 \times 2,0558 \times 10^{-6}$$

$$k = 1,7950 \times 10^{-4} \text{ kmol/kg}$$

- c. Menghitung Driving Force Reaksi
- $$= (0,2475 \times 0,2576) - (0,2474 \times 0,2474) / 7,3615$$
- $$= 0,06377 - 0,00832$$
- $$= 0,05545$$
- d. Menghitung Laju Reaksi (r)
- $$r = 780 \times 1,7950 \times 10^{-4} \times 0,05545$$
- $$r = 7,7641 \times 10^{-3} \text{ kmol/m}^3\text{liq} \cdot \text{s}$$
- e. Menghitung Volume Cairan Reaktif (V_{liq})
- $$\xi = 5,4319 \text{ kmol/jam} = 1,5088 \times 10^{-3} \text{ kmol/s}$$
- $$V_{liq} = \xi / r = 1,5088 \times 10^{-3} / 7,7641 \times 10^{-3}$$
- $$V_{liq} = 0,1943 \text{ m}^3_{liq}$$
- f. Menghitung Volume Kolom Seksi Reaktif (V_{col})
- Liquid hold-up Katapak SP-11 = 0,1 m³liq/m³col (Andres et al., 2020)
- $$V_{col} = V_{liq} / 0,1 = 0,1943 / 0,1$$
- $$V_{col} = 1,9434 \text{ m}^3_{col}$$
- g. Menghitung Massa Katalis (m_{kat})
- Verifikasi dua cara:
- $$m_{kat} = \rho_{cat} \times V_{col} = 78 \times 1,9434 = 151,58 \text{ kg}$$
- $$m_{kat} = C_{cat} \times V_{liq} = 780 \times 0,1943 = 151,58 \text{ kg}$$
- h. Penentuan Waktu Tinggal (*Residence Time*) Seksi Reaktif
- Waktu tinggal cairan pada seksi reaktif dihitung menggunakan konsep *space time* ($\tau = V/Q$) sebagaimana dijelaskan oleh Fogler, H.S. (2016) dalam *Elements of Chemical Reaction Engineering*.
- Diketahui data parameter :
- $$V_{liq} = 0,1943 \text{ m}^3$$
- $$L_w \text{ (laju alir massa liquid)} = 0,4377 \text{ kg/s}$$
- $$\rho_L \text{ (densitas liquid)} = 848,7372 \text{ kg/m}^3$$
- $$N_{reactive} = 14 \text{ stage}$$
- Menghitung laju alir volumetrik liquid (Q_{liq}):
- $$Q_{liq} = \frac{L_w}{\rho_L} = \frac{0,4377}{848,7372} = 5,1575 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$
- Menghitung waktu tinggal total seksi reaktif (τ_{total}):
- $$\tau_{total} = \frac{V_{liq}}{Q_{liq}} = \frac{0,1943}{5,1575 \times 10^{-4}} = 376,8019 \text{ s} = 6,2800 \text{ menit}$$

- Menghitung waktu tinggal per stage ($\tau_{\text{per stage}}$):

$$\tau_{\text{per stage}} = \frac{\tau_{\text{total}}}{N_{\text{reactive}}} = \frac{6,2800}{14} = 0,4486 \text{ menit/stage}$$

Nilai waktu tinggal per stage tersebut berada pada rentang waktu tinggal stage reaktif yang umum diamati pada kolom RD industri, yaitu sekitar 2–5 menit untuk regime *kinetically controlled* (Martínez dkk., 2020). Namun, pada kasus ini nilainya relatif lebih kecil, hal ini sejalan dengan penggunaan katalis heterogen pada *structured packing* (Katapak SP-11) yang dirancang untuk kontak fasa yang cepat dan efisien.

2.3 Langkah Proses

2.3.1 Tahap Penyimpanan Bahan Baku

Bahan baku utama yang digunakan dalam proses produksi isobutil asetat ini adalah asam asetat dan isobutanol. Asam asetat dengan kemurnian 99,8% diperoleh dari PT Indo Acidatama Tbk yang berlokasi di Kebakkramat, Karanganyar, Jawa Tengah, dan disimpan pada tangki penyimpanan (T-101) dalam kondisi fase cair pada tekanan 1 atm dan temperatur 303,15 K. Isobutanol dengan kemurnian 99,5% diperoleh dari PT. Petro Oxo Nusantara yang berlokasi di Gresik, Jawa Timur, dan disimpan pada tangki penyimpanan (T-102) dalam kondisi fase cair pada tekanan 1 atm dan temperatur 303,15 K. Penyimpanan kedua bahan baku ini dilakukan dengan asumsi kebutuhan selama 330 hari operasi. Material tangki dipilih berdasarkan sifat korosivitas masing-masing bahan baku, yaitu pada tangki T-101 menggunakan SS 316L untuk mencegah korosi akibat sifat asam dan korosif dari asam asetat, sedangkan tangki T-102 menggunakan *carbon steel* ASTM A36 karena isobutanol bersifat relatif tidak korosif terhadap *carbon steel* sehingga tidak memerlukan material *stainless steel*.

2.3.2 Tahap Penyiapan Bahan Baku

Asam asetat dari tangki penyimpanan (T-101) dan isobutanol dari tangki penyimpanan (T-102) masing-masing dipompa menuju *pre-heater* sebelum diumpankan ke dalam kolom distilasi reaktif. Proses pemindahan asam asetat dilakukan menggunakan pompa (P-101) menuju *pre-heater* (HE-101), sedangkan isobutanol dipindahkan menggunakan pompa (P-102) menuju *pre-heater* (HE-102). Di dalam *pre-heater*, kedua bahan baku dipanaskan dari temperatur 303,15 K hingga mencapai temperatur 373,15 K. Pemanasan awal ini dilakukan dengan memanfaatkan utilitas *steam* bertekanan 1 atm dan temperatur 413,15 K. Tujuan pemanasan awal adalah untuk mengurangi beban termal pada kolom distilasi reaktif sekaligus memastikan umpan

telah berada pada kondisi suhu yang sesuai dengan kondisi operasi reaksi. Rasio umpan asam asetat terhadap isobutanol dirancang dengan perbandingan molar sebesar 1 : 1,01 untuk memastikan konversi asam asetat yang optimal sesuai prinsip *Le Chatelier*.

2.3.3 Tahap *Pretreatment* Katalis Amberlyst-15

Sebelum digunakan dalam kolom distilasi reaktif (RD-201), katalis Amberlyst-15 yang masih dalam kondisi baru terlebih dahulu melalui tahap *pretreatment* untuk meningkatkan yield reaksi esterifikasi. Tahap *pretreatment* dilakukan dengan merendam katalis Amberlyst-15 menggunakan etanol selama 1 jam dengan perbandingan katalis dan etanol sebesar 1:5 (v/v). Katalis yang telah direndam kemudian dipisahkan dari cairan etanol menggunakan penyaring, lalu etanol yang tersisa di dalam katalis diuapkan menggunakan oven pada suhu 90°C selama 16 jam hingga katalis benar-benar kering sebelum digunakan.

Perlakuan perendaman dengan etanol ini bertujuan untuk menghilangkan kandungan air yang terdapat di dalam pori-pori katalis padat karena keberadaan air dapat menghalangi terjadinya reaksi esterifikasi. Etanol yang masuk ke dalam pori-pori katalis saat perendaman dapat terikat pada resin dan membantu meningkatkan kontak antara reaktan dengan sisi aktif katalis, sehingga laju reaksi esterifikasi dapat meningkat dan yield produk yang dihasilkan menjadi lebih besar (Harmini & Hidayat, 2024). Hasil penelitian menunjukkan bahwa katalis Amberlyst-15 yang diberi *pretreatment* perendaman etanol menghasilkan yield ester yang lebih tinggi dibandingkan katalis tanpa *pretreatment*, sehingga tahap *pretreatment* ini penting dilakukan untuk memastikan katalis dalam kondisi optimal sebelum ditempatkan pada zona reaktif kolom distilasi reaktif (RD-201) dalam bentuk *structured packing*.

2.3.4 Tahap Reaksi Esterifikasi dan Distilasi pada Distilasi Reaktif

Pada distilasi reaktif (RD-201) terjadi tiga proses sekaligus yang berlangsung, yaitu proses reaksi, proses *stripping*, dan proses *enriching*. Kolom distilasi reaktif ini terdiri dari 58 *stage* total, yang meliputi 14 *stage* reaktif di bagian tengah kolom, 6 *stage stripping* di bagian bawah, dan 38 *stage enriching* di bagian atas. Katalis Amberlyst-15 ditempatkan pada zona reaktif dalam bentuk *structured packing* sehingga memungkinkan kontak langsung antara fasa cair reaktan dengan permukaan katalis secara merata. Umpan asam asetat dimasukkan pada *stage* ke-39 sedangkan isobutanol dimasukkan pada *stage* ke-52

Pembentukan isobutil asetat di dalam kolom distilasi reaktif didasari pada mekanisme reaksi esterifikasi Fischer. Reaksi berlangsung antara asam asetat

(CH₃COOH) dan isobutanol (C₄H₉OH) dengan bantuan katalis Amberlyst-15 yang menyediakan proton (H⁺) untuk mengaktifkan gugus karbonil asam asetat.

Mekanisme reaksi esterifikasi fischer secara umum berlangsung melalui beberapa tahap berikut:

a. Protonasi gugus karbonil

Pada tahap ini katalis asam (H⁺ dari Amberlyst-15) menyerang atom oksigen karbonil pada asam asetat sehingga gugus karbonil terprotonasi dan menjadi lebih elektrofilik (lebih reaktif terhadap serangan nukleofilik).

b. Serangan nukleofilik oleh isobutanol

Atom oksigen pada gugus hidroksil isobutanol yang berperan sebagai nukleofilik akan menyerang atom karbon karbonil yang telah teraktivasi sehingga membentuk intermediat tetrahedral (zat antara dengan empat gugus terikat pada satu atom karbon).

c. Transfer proton dan pelepasan air

Pada tahap ini terjadi perpindahan proton di dalam intermediat tetrahedral, diikuti dengan pelepasan satu molekul air sebagai produk samping.

d. Deprotonasi

Proton terakhir dilepaskan dari intermediat untuk menghasilkan produk akhir berupa ester (isobutil asetat) dan mengembalikan H⁺ ke bentuk semula sehingga dapat digunakan kembali pada siklus reaksi berikutnya.

Reaksi ini bersifat *reversible* (bolak-balik) dan eksotermis dengan panas reaksi sebesar $\Delta H = -8,430$ kJ/mol. Kolom beroperasi pada tekanan 1 atm dengan suhu umpan bahan baku sebesar 373,15 K. Profil suhu di dalam kolom bervariasi sepanjang ketinggian, di mana suhu semakin tinggi ke arah bawah kolom karena semakin mendekati reboiler. Konversi asam asetat sebagai reaktan pembatas dirancang mencapai 99%.

Pada bagian *stripping*, produk air yang dihasilkan dari reaksi esterifikasi harus segera dipisahkan untuk mencegah reaksi *reversible* bergeser ke arah reaktan, sesuai dengan prinsip *Le Chatelier*, yakni memaksa reaksi terus bergerak ke arah produk dengan menghilangkan produk itu sendiri guna menghasilkan kesetimbangan reaksi yang menguntungkan. Pada bagian *enriching*, uap yang naik ke bagian atas kolom mengandung campuran air dan isobutanol berlebih yang kemudian diakumulasi dan dikondensasikan.

2.3.5 Tahap Pemisahan Distilat pada Kondensor dan Dekanter

Uap yang keluar dari bagian atas kolom distilasi reaktif (RD-201) dialirkan menuju kondensor (CD-201) untuk dikondensasikan menjadi fasa cair. Kondensor beroperasi pada suhu 373 K dan tekanan 1 atm dengan memanfaatkan utilitas *cooling water* pada temperatur masuk 303,15 K dan temperatur keluar 318,15 K lalu menuju ke dalam dekanter (DC-301).

Di dalam dekanter (DC-301), campuran distilat yang terdiri dari air dan isobutanol mengalami pemisahan dua fasa (fasa aqueous dan fasa organik) secara gravitasi berdasarkan perbedaan densitas. Dekanter beroperasi pada suhu 373 °K dan tekanan 1 atm. Fasa organik yang kaya isobutanol akan berada di lapisan atas, sedangkan fasa air akan berada di lapisan bawah. Fasa organik dari dekanter sebagian dikembalikan ke dalam kolom distilasi reaktif sebagai aliran *reflux* untuk menjaga efisiensi pemisahan, sementara sebagian lainnya dikeluarkan sebagai distilat. Fasa air dari dekanter dikeluarkan sebagai produk samping berupa air dengan kemurnian tinggi dan diteruskan ke tangki penyimpanan air.

2.3.6 Tahap *Recycle* Isobutanol

Isobutanol yang digunakan dalam proses ini dirancang secara berlebih (*excess*) untuk memaksimalkan konversi asam asetat. Isobutanol berlebih yang tidak bereaksi akan terikut pada fasa organik di dekanter (DC-301) dan dikembalikan ke dalam kolom distilasi reaktif (RD-201) bersama aliran *reflux*. Dengan demikian, isobutanol berlebih dapat dimanfaatkan kembali sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan bahan baku dan mengurangi pemborosan.

2.3.7 Tahap Pendinginan dan Penyimpanan Produk

Produk isobutil asetat diperoleh dari aliran *bottom* kolom distilasi reaktif (RD-201) dengan kemurnian mencapai 99,8%. Aliran *bottom* yang keluar dari reboiler (RB-201) pada suhu 389 K dan tekanan 1 atm dialirkan menuju *Cooler* (CL-401) untuk diturunkan suhunya sebelum disimpan. Di dalam *Cooler*, produk didinginkan menggunakan *cooling water* dari suhu 389°K hingga mencapai suhu penyimpanan sebesar 303,15°K. Produk isobutil asetat yang telah didinginkan kemudian dialirkan dan disimpan di dalam tangki penyimpanan produk (T-403). Tangki penyimpanan produk beroperasi pada tekanan 1 atm dan temperature 303,15 K.

2.4 Regenerasi Katalis Amberlyst-15

Seiring waktu pengoperasian, aktivitas katalitik Amberlyst-15 dapat mengalami penurunan akibat terjadinya deaktivasi katalis. Deaktivasi katalis pada resin penukar ion, seperti Amberlyst-15 umumnya disebabkan oleh beberapa mekanisme, yaitu *fouling* atau *coking* akibat terdosisnya senyawa polimerik atau produk samping berbobot molekul tinggi yang menutupi sisi aktif katalis, *poisoning* akibat adsorpsi kuat senyawa pengotor pada sisi aktif, *leaching* akibat terlarutnya gugus asam sulfonat ($-\text{SO}_3\text{H}$) ke dalam campuran reaksi, serta degradasi termal yang dapat menyebabkan penggumpalan sisi aktif maupun kerusakan struktur pori katalis (BenchChem, 2025).

Apabila katalis telah menunjukkan tanda-tanda deaktivasi berupa penurunan yield atau laju reaksi pada kondisi operasi yang sama, maka dilakukan tahap regenerasi untuk mengembalikan aktivitas katalitiknya. Tahap regenerasi katalis Amberlyst-15 dilakukan melalui beberapa langkah berikut (BenchChem, 2025):

a. Pencucian dengan metanol

Pada tahap ini, katalis yang telah dideaktivasi terlebih dahulu dicuci menggunakan metanol untuk menghilangkan residu organik dan produk samping yang teradsorpsi pada permukaan katalis.

b. Perlakuan dengan asam sulfat (H_2SO_4)

Katalis yang telah dicuci, kemudian direndam dalam larutan H_2SO_4 encer (sekitar 1 M) sambil diaduk perlahan pada suhu ruang selama 2-4 jam. Tahap ini berfungsi untuk menggantikan kembali kation-kation yang telah menukar posisi gugus aktif H^+ pada resin, sekaligus membantu melarutkan sisa-sisa senyawa fouling yang masih menempel.

c. Pembilasan dengan akuades

Katalis dibilas berulang menggunakan akuades hingga air bilasan menunjukkan pH netral, untuk memastikan tidak ada sisa asam yang tertinggal pada katalis.

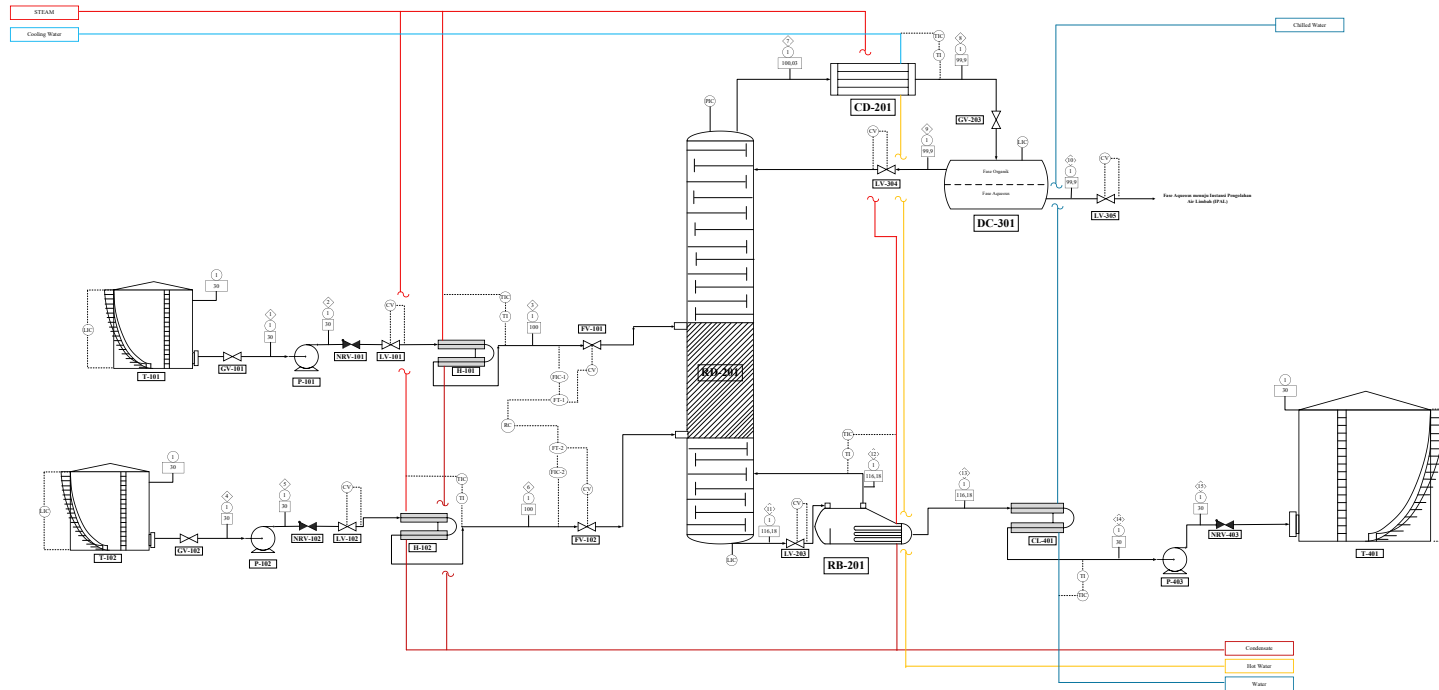
d. Pengeringan

Katalis yang telah dibilas kemudian dikeringkan, umumnya menggunakan oven vakum pada suhu sedang, hingga katalis Amberlyst-15 siap digunakan kembali pada siklus esterifikasi selanjutnya.

Perlu diperhatikan bahwa suhu pengeringan tidak boleh melebihi batas suhu maksimum yang direkomendasikan untuk resin, karena dapat menyebabkan degradasi termal yang justru memperparah kerusakan struktur katalis (BenchChem, 2025).

2.5 Diagram Alir (Flowsheet)

PRA RANCANGAN PABRIK ISOBUTIL ASETAT DARI ASAM ASETAT DAN ISOBUTANOL DENGAN PROSES DISTILASI REAKTIF MENGGUNAKAN KATALIS AMBERLYST-15 KAPASITAS 5.000 TON/TAHUN



 PROGRAM STUDI S.T. TEKNOLOGI REKAYASA KIMIA INDUSTRI DEPARTEMEN TEKNOLOGI INDUSTRI SEKOLAH VOKASI UNIVERSITAS DIPONEGORO SEMARANG 2025	
PRA RANCANGAN PABRIK ISOBUTIL ASETAT DARI ASAM ASETAT DAN ISOBUTANOL DENGAN PROSES DISTILASI REAKTIF MENGGUNAKAN KATALIS AMBERLYST-15 KAPASITAS 5.000 TON/TAHUN	
Digambar Oleh	Mohamad Rayid Bahaudin (40040122650001) Nisa Eka Rahmania (40040122650009)
Dosen Pemimbing	Hermawan Dwi Arhyanto, S.T., M.Sc., Ph.D. NIP. H.7199203122018072001
MAIN EQUIPMENT: - CD-201 : KONDENSOR RD COLUMN - CL-401 : COOLER ISOBUTYL ASETAT - DC-301 : REAKTOR - EV-101 : FLOW CONTROL VALVE FEED ASAM ASETAT - EV-102 : FLOW CONTROL VALVE FEED ISOBUTANOL - HE-101 : PREHEATER ASAM ASETAT - HE-102 : PREHEATER ISOBUTANOL - LV-101 : LEVEL CONTROL VALVE TANGKI ASAM ASETAT - LV-102 : LEVEL CONTROL VALVE TANGKI ISOBUTANOL - LV-201 : LEVEL CONTROL VALVE TANGKI REAKTOR - LV-301 : LEVEL CONTROL VALVE TANGKI DEKANTER - LV-401 : CHECK VALVE ASAM ASETAT - LV-402 : CHECK VALVE ISOBUTANOL - LV-403 : CHECK VALVE ISOBUTYL ASETAT - P-101 : POMPA ASAM ASETAT - P-102 : POMPA ISOBUTANOL - P-401 : POMPA OUTPUT COOLER - RB-201 : REAKTOR RD COLUMN - RB-202 : MENARA DISTILASI REAKTIF - T-101 : TANGKI ASAM ASETAT - T-102 : TANGKI ISOBUTANOL - T-103 : TANGKI ISOBUTYL ASETAT	
LINE AND SYMBOL: - PT : FLOW TRANSMITTER - PI : FLOW INDICATOR CONTROL - LI : LEVEL INDICATOR CONTROL - PC : PRESSURE INDICATOR CONTROL - IC : RATIO CONTROL - TI : TEMPERATURE INDICATOR - UL : TEMPERATURE INDICATOR CONTROL ◇ : STREAM ○ : TEKANAN (ATM) □ : TEMPERATURE (°C) — : STREAM LINE — : STEAM LINE — : CHILLED WATER LINE — : COOLING WATER LINE — : HOT WATER LINE — : CONDENSATE LINE	

2.6 Neraca Massa dan Neraca Panas

2.6.1 Neraca Massa

1. *Pre-heater*

Gambar alur neraca massa *pre-heater* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Alur Neraca Massa *Pre-heater*

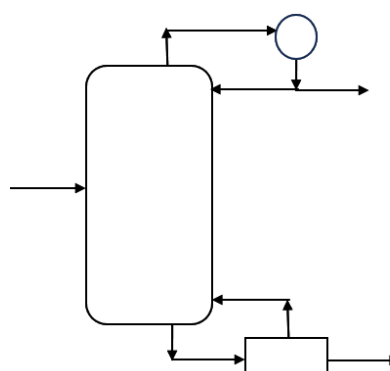
Hasil perhitungan neraca massa dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Neraca Massa *Pre-heater*

INPUT		OUTPUT	
Komponen	massa (kg/jam)	komponen	massa (kg/jam)
CH ₃ COOH	325,9766596	CH ₃ COOH	325,9766596
C ₄ H ₁₀ O	410,2427349	C ₄ H ₁₀ O	410,2427349
C ₆ H ₁₂ O ₂		C ₆ H ₁₂ O ₂	
H ₂ O		H ₂ O	
Total	736,219395	Total	736,219395

2. Distilasi Reaktif

Gambar alur neraca massa distilasi reaktif dapat dilihat di Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Alur Neraca Massa Distilasi Reaktif

Hasil perhitungan neraca massa distilasi reaktif dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Hasil Neraca Massa Distilasi Reaktif

INPUT		OUTPUT	
Komponen	massa (kg/jam)	komponen	massa (kg/jam)
CH ₃ COOH	325,9766596	CH ₃ COOH	0,065195331
C ₄ H ₁₀ O	410,2427349	C ₄ H ₁₀ O	8,285262274
C ₆ H ₁₂ O ₂		C ₆ H ₁₂ O ₂	630,0954976
H ₂ O		H ₂ O	97,77343929
Total	736,219395	Total	736,219395

3. Cooler

Gambar alur neraca massa *Cooler* dapat dilihat pada Gambar 2.3.

Gambar 2.3 Alur Neraca Massa *Cooler*

Hasil perhitungan neraca massa *cooler* dapat dilihat di Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Hasil Perhitungan Neraca Massa *Cooler*

INPUT		OUTPUT	
Komponen	massa (kg/jam)	komponen	massa (kg/jam)
C ₄ H ₁₀ O	0,631313131	C ₄ H ₁₀ O	0,631313131
CH ₃ COOH	0,063131313	CH ₃ COOH	0,063131313
C ₆ H ₁₂ O ₂	630,0505051	C ₆ H ₁₂ O ₂	630,0505051
H ₂ O	0,568181818	H ₂ O	0,568181818
TOTAL	631,313131		631,313131

2.6.2 Neraca Panas

1. Pre-heater

Gambar alur neraca panas *pre-heater* dapat dilihat di Gambar 2.4.

Gambar 2.4 Alur Neraca Panas *Pre-heater*

Fungsi : Untuk *Pre-heating* asam asetat dan isobutanol

Suhu masuk : 303,15 °K

Suhu keluar : 373,15 °K

Hasil perhitungan neraca panas *pre-heater* ditampilkan pada Tabel 2.7.

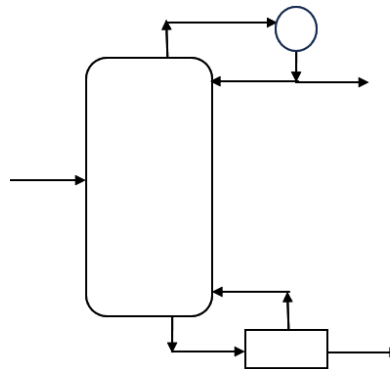
Tabel 2.7 Hasil Perhitungan Neraca Panas *Pre-heater*

Komponen	Qin (kJ)	Qout (kJ)
CH ₃ COOH	3505,277006	54682,35918
Steam	51177,08217	0
total	54682,35918	54682,35918

Komponen	Qin (kJ)	Qout (kJ)
C ₄ H ₁₀ O	4537,935404	70694,07242
Steam	66156,13702	0
total	70694,07242	70694,07242

2. Distilasi Reaktif

Gambar alur neraca panas distilasi reaktif dapat dilihat di Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Alur Neraca Panas Distilasi Reaktif

Fungsi : Tempat terjadi reaksi dan pemisahan

T in : 373,15 °K

T out bottom : 389 °K

T out distilat : 373,14 °K

Hasil perhitungan neraca panas dapat dilihat di Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Hasil Perhitungan Neraca Panas Distilasi Reaktif

Panas Masuk	Nilai (kJ)	Panas Keluar	Nilai (kJ)
Panas Umpan	131143,157	Distilat	31799,59302
Beban Reboiler	166665,5866	Bottom	122158,6134
		Kondensor	143850,5371
Total	297808,7435		297808,7435

3. *Cooler*

Gambar alur neraca panas dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Alur Neraca Panas *Cooler*

Fungsi : Mendinginkan produk

T in : 389 °K

T out : 303,15 °K

Hasil perhitungan neraca panas *cooler* dapat dilihat pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Hasil Perhitungan Neraca Panas *Cooler*

Komponen	Qin (kJ)	Qout (kJ)
C ₄ H ₁₀ O	133,6536294	6,983324665
CH ₃ COOH	12,99476948	0,678860691
C ₆ H ₁₂ O ₂	121795,1189	6332,182076
H ₂ O	216,846029	11,91560548
<i>Chilled water</i>		0 118494,8362
Total	122158,6134	122158,6134

2.7 Tata Letak Pabrik dan Pemetaan

2.7.1 Lay Out Pabrik

Langkah selanjutnya dalam Prarancangan pabrik setelah *flow* diagram terbentuk, akan didesain pemipaan struktural dan listrik. Sebelum itu, *Lay Out* pabrik dan peralatan akan dirancang terlebih dahulu. Perencanaan yang dilakukan dalam *lay out* pabrik akan dilakukan perencanaan *storage area*, proses area, dan *handling area*. Beberapa pertimbangan yang harus diperhatikan di dalam perencanaan *lay out* pabrik yaitu:

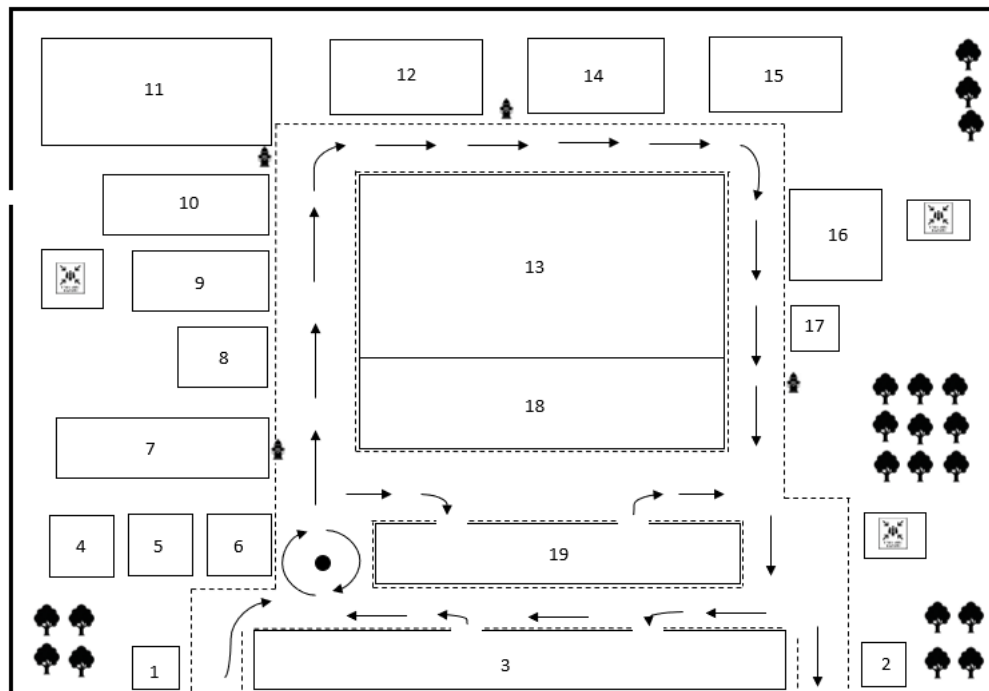
1. Lahan yang tersedia
2. Mutu dan juga jenis produk yang akan dihasilkan
3. Peluang dalam perluasan dan pengembangan pabrik di masa yang akan datang
4. Sistem distribusi bahan baku, produk jadi, air, listrik, dan utilitas lainnya
5. Kondisi lingkungan iklim, serta keadaan sosial masyarakat
6. Tingkat keamanan terhadap risiko kebakaran, ledakan, gas beracun, dan desain bangunan
7. Pengaturan pemanfaatan ruang lantai dan penentuan elevasi bangunan

Beberapa aspek yang perlu untuk diperhatikan di dalam pengaturan tata letak pabrik yang akan dirancang antara lain yaitu:

1. Pos keamanan yang ditempatkan di dekat pintu masuk dan keluar agar pengawasan terhadap orang, kendaraan, serta aktivitas logistik di area pabrik dapat dilakukan dengan lebih efektif. Selain itu, pos tersebut juga berfungsi sebagai pusat keamanan utama pabrik
2. Area utilitas diletakkan berdekatan dengan area proses utama supaya distribusi bahan utilitas menuju peralatan proses menjadi lebih singkat dan mudah.
3. Bengkel ditempatkan dekat dengan area utilitas dan proses utama guna mempermudah kegiatan pengawasan, pemeliharaan, serta perbaikan peralatan.
4. Ruang generator ditempatkan di bagian belakang pabrik untuk mengurangi dampak kebisingan terhadap lingkungan kerja.
5. Musala disediakan di lingkungan pabrik karena sebagian besar masyarakat sekitar dan karyawan beragama Islam.
6. Tersedianya taman yang luas serta toilet yang tersebar di beberapa titik area pabrik bertujuan meningkatkan kenyamanan bagi karyawan maupun pengunjung.

7. Area parkir yang memadai disiapkan untuk kebutuhan kendaraan karyawan, tamu, serta truk distribusi produk.
8. Jalan di area pabrik dirancang satu arah dengan jalur terpisah antara kendaraan pribadi dan truk agar pengawasan lalu lintas lebih mudah dilakukan.
9. Sistem pencahayaan dan ventilasi ruangan dibuat memadai untuk mendukung kelancaran proses produksi.
10. Area perluasan yang dipersiapkan sebagai antisipasi terhadap rencana pengembangan dan ekspansi pabrik di masa yang akan datang
11. Area parkir truk dirancang memanjang dan berada di dekat lokasi pemuatan produk sehingga proses pengisian barang menjadi lebih efisien dari segi waktu dan tempat.

Gambar layout pabrik isobutil asetat dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Layout Area Pabrik Isobutil Asetat

Keterangan tempat pada setiap nomor dalam Gambar 2.7 dapat dilihat pada Tabel 2.10

Tabel 2.10 Keterangan Kode

No.	Keterangan
1	Pos keamanan
2	Pos keamanan

3	Parkir truk
4	Mushola
5	Kantin
6	Poliklinik
7	Perkantoran
8	Bengkel maintenance
9	Penyimpanan Katalis
10	Pengolahan Limbah (WWTP)
11	Area utilitas
12	Area tangki penyimpanan asam asetat
13	Area proses
14	Area tangki penyimpanan isobutanol
15	Area tangki penyimpanan isobutil asetat
16	Control room dan laboratorium
17	Ruangan Cadangan P3K/APAR
18	Area pengembangan proses
19	Area parkir karyawan

Luas bangunan yang didirikan di setiap area dapat dilihat pada tabel 2.11.

Tabel 2.11 Perincian Luas Bangunan Pabrik

No.	Keterangan	Luas (m ²)
1	Pos keamanan	12
2	Pos keamanan	12
3	Parkir truk	270

4	Mushola	60
5	Kantin	80
6	Poliklinik	36
7	Perkantoran	200
8	Bengkel maintenance	80
9	Penyimpanan Katalis	36
10	Pengolahan Limbah (WWTP)	100
11	Area utilitas	150
12	Area tangki penyimpanan asam asetat	110
13	Area proses	160
14	Area tangki penyimpanan isobutanol	170
15	Area tangki penyimpanan isobutil asetat	170
16	Control room dan laboratorium	80
17	Ruangan Cadangan P3K/APAR	12
18	Area pengembangan proses	400
19	Area parkir karyawan	150
	Total	2.288

Luas bangunan diperkirakan = 2.288 m²

Harga bangunan diperkirakan = Rp 4.000.000/m²

Total biaya bangunan :

$$\begin{aligned}
 &= 2.288 \times \text{Rp } 4.000.000 \\
 &= \text{Rp } 9.152.000.000 : \text{Rp } 17.950,00 \\
 &= \text{US \$ } 509.860,72
 \end{aligned}$$

Perincian luas tanah yang diperlukan untuk pabrik isobutil asetat dapat dilihat di Tabel 2.12.

Tabel 2.12 Perincian Luas Tanah

No.	Keterangan	Luas (m ²)
1	Pos keamanan	18
2	Pos keamanan	18
3	Parkir truk	270
4	Mushola	78
5	Kantn	104
6	Poliklinik	47
7	Perkantoran	280
8	Bengkel maintenance	104
9	Penyimpanan Katalis	47
10	Pengolahan Limbah (WWTP)	130
11	Area utilitas	195
12	Area tangki penyimpanan asam asetat	110
13	Area proses	160
14	Area tangki penyimpanan isobutanol	170
15	Area tangki penyimpanan isobutil asetat	170
16	Control room dan laboratorium	104
17	Ruangan Cadangan P3K/APAR	14
18	Area pengembangan proses	400
19	Area Parkir Karyawan	150
20	Titik kumpul (3 x 30 m ²)	90

21	Taman dan ruang terbuka hijau	800
22	Jalan dan jalur sirkulasi (15% dari luas terbangun)	610
Total		4.069

Luas tanah diperkirakan = 4.069 m²

Harga rata-rata tanah diperkirakan = Rp 3.000.000/m²

Total biaya tanah :

$$\begin{aligned}
 &= 4.069 \times \text{Rp } 3.000.000 \\
 &= \text{Rp } 12.207.000.000 : \text{Rp } 17.950,00 \\
 &= \text{US\$ } 680.055,71
 \end{aligned}$$

2.7.2 Lay Out Peralatan Proses

Dalam perancangan tata letak peralatan proses pada pabrik isobutil asetat, terdapat beberapa aspek penting yang perlu diperhatikan agar proses produksi dapat berjalan secara aman, efektif, dan ekonomis. Beberapa pertimbangan tersebut meliputi:

1. Jalur aliran bahan

Sistem aliran bahan baku dan produk dirancang dengan jalur perpipaan yang efisien untuk memperlancar proses produksi dan mengurangi kehilangan energi selama distribusi fluida. Penempatan tangki bahan baku dibuat berdekatan dengan area proses sehingga perpindahan bahan menuju unit proses menjadi lebih mudah. Selain itu, perpipaan diatur sedemikian rupa agar tidak mengganggu aktivitas pekerja maupun kendaraan operasional di area pabrik.

2. Sirkulasi udara

Pengaturan sirkulasi udara di area proses perlu diperhatikan guna mencegah terjadinya penumpukan uap bahan kimia yang dapat membahayakan keselamatan kerja. Oleh sebab itu, tata letak peralatan dirancang dengan ventilasi yang memadai serta mempertimbangkan arah angin di lingkungan pabrik agar aliran udara tetap lancar.

3. Sistem pencahayaan

Pencahayaan pada area proses harus memenuhi kebutuhan operasional, terutama pada peralatan utama yang memerlukan pengawasan intensif. Penerangan yang baik akan membantu operator dalam menjalankan proses, melakukan pemeriksaan peralatan, serta mendukung kegiatan perawatan.

4. Mobilitas pekerja

Tata letak peralatan dirancang agar pekerja dapat berpindah dan menjangkau setiap unit proses dengan mudah dan aman. Jalur akses di sekitar area proses dibuat cukup luas sehingga aktivitas operasional maupun pemeliharaan tidak terhambat.

5. Penempatan peralatan

Peralatan proses disusun sesuai urutan tahapan produksi untuk mempermudah aliran proses dan mengurangi panjang perpipaan. Unit seperti *pre-heater*, kolom distilasi reaktif, reboiler, kondensor, dekanter, *cooler*, dan tangki produk ditempatkan berdasarkan hubungan proses masing-masing agar operasi pabrik menjadi lebih efisien.

6. Jarak antarperalatan

Pengaturan jarak antarperalatan dilakukan dengan mempertimbangkan aspek keselamatan dan kemudahan operasi. Peralatan yang beroperasi pada kondisi suhu maupun tekanan tinggi ditempatkan dengan jarak tertentu guna mengurangi risiko penyebaran bahaya apabila terjadi kebocoran, ledakan, atau kebakaran.

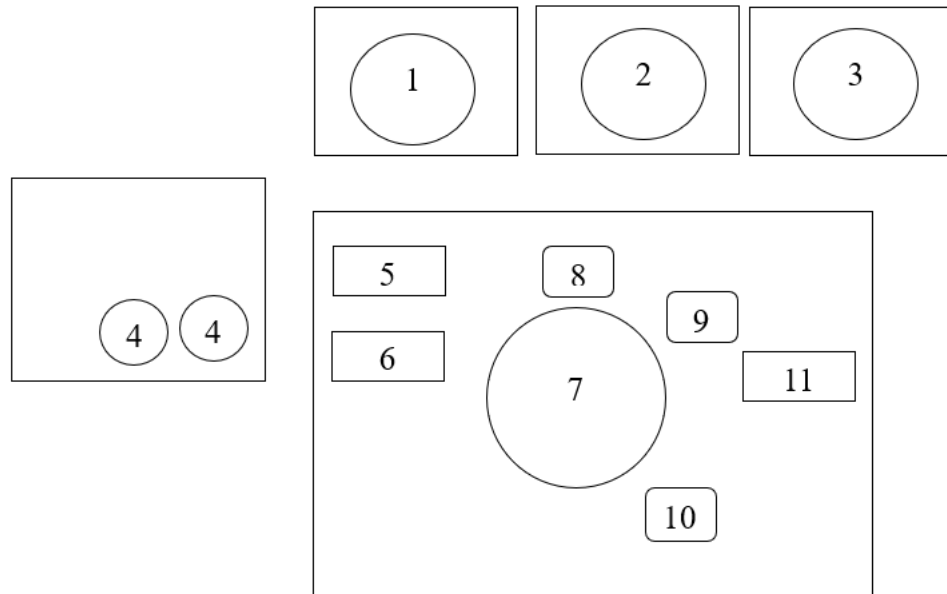
7. Kemudahan pemeliharaan

Area di sekitar peralatan proses disediakan ruang yang cukup untuk kegiatan inspeksi, pembersihan, serta perbaikan alat. Dengan demikian, aktivitas pemeliharaan dapat dilakukan dengan lebih mudah tanpa mengganggu jalannya proses produksi.

8. Keselamatan kerja

Perancangan tata letak juga mempertimbangkan sistem keselamatan di area pabrik. Jalur evakuasi, titik hydrant, dan area titik kumpul disediakan untuk mendukung prosedur tanggap darurat. Selain itu, area penyimpanan bahan kimia dipisahkan dari fasilitas umum dan area perkantoran guna meminimalkan risiko kecelakaan kerja.

Layout peralatan proses pada pabrik isobutil asetat dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 *Lay Out* Peralatan Proses

Keterangan nama alat pada *Lay Out* proses dapat dilihat pada Tabel 2.13.

Tabel 2.13 Keterangan Kode *Lay Out* Proses

No.	Kode Alat	Nama Alat
1	T-101	Tangki Penyimpanan Asam Asetat
2	T-102	Tangki Penyimpanan Isobutanol
3	T-403	Tangki Penyimpanan Isobutil Asetat
4	-	Tangki Air Proses
5	HE-101	<i>Pre-heater</i> Asam Asetat
6	HE-102	<i>Pre-heater</i> Isobutanol
7	RD-201	Menara Distilasi Reaktif
8	CD-201	Kondenser
9	DC-301	Dekanter
10	RB-201	Reboiler
11	CL-401	<i>Cooler</i>