

BAB II DESKRIPSI PROSES

2.1 Spesifikasi Bahan Baku dan Produk

2.1.1 Spesifikasi Bahan Baku

a. N-butanol

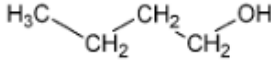
Berdasarkan data dari (PT Oxo Nusantara, 2023), spesifikasi N-butanol adalah sebagai berikut:

- Komposisi

Warna	: Tidak berwarna (max.10)
Bau	: Seperti alkohol
Kemurnian	: 99% (%berat)
- N-butanol	: Minimal 99 %
- Fusel oil	: Maksimal 0,1 %
- Aldehid	: Maksimal 0,1 %
- Asam asetat	: Makasimal 0,2 %
- Abu	: Maksimal 0,25 %
- Air	: Maksimal 0,35 %

(Safety Data Sheet N-butanol, 2026)

- Sifat Fisika

Rumus molekul	: C ₄ H ₉ OH
Rumus bangun	: 
Berat molekul	: 74,12 g/mol
Fasa	: Cair (25°C, 1 atm)
Densitas	: 0,8095 gr/cm ³ (20°C, 1 atm)
Kemurnian	: 99% berat min
Impuritas	: 1% berat maks (air)
Uji destilasi	: 114-120°C
Titik beku	: -79,9°C (25°C, 1 atm)
<i>Specific Gravity</i>	: 0,808-0,814 (20°C, 1 atm)
Kelarutan	: Larut dalam air, alkohol, <i>ether</i> .

(Perry, 1999)

- Sifat Kimia

- Terdehidrasi pada suhu 175-400°C menjadi butena dengan bantuan katalis, dengan reaksi: $C_4H_9OH \rightarrow C_4H_8 + H_2O$
- Reaksi oksidasi menghasilkan asam butirat, dengan reaksi:
 $C_4H_9OH + O_2 \rightarrow C_3H_7COOH + H_2O$

(Chemical Safety Data Sheet MSDS / SDS Butyl Acetate, 2026)

b. Asam Asetat

Berdasarkan data dari (PT Indo Acidatama, 2001), spesifikasi asam asetat adalah sebagai berikut

- Komposisi

Fasa	: Cair
Warna	: Tidak berwarna
Bau	: Pedih
- Sifat Fisika

Rumus Molekul	: $C_2H_4O_2$
Berat Molekul	: 60,05 gr/mol
pH	: 2,4
Titik didih	: 116-118°C (1 atm, 25°C)
Titik beku	: min 16,40°C
Titik nyala	: 39°C
Titik lebur	: 16,64°C
Viskositas, dinamis	: 1,05 mPa,s pada 25°C
Densitas	: 1,04 gr/cm ³ pada 25°C
Tekanan uap	: 20 mmHg (30°C)
Specific gravity	: 1,0499 g/cm ³ (20°C)
Kelarutan	: larut sempurna dalam air
Kemurnian	: 99%-99,8%
- Sifat Kimia
 - Reaksi dengan logam menghasilkan hidrogen dan merupakan agen oksidasi

(MSDS Asam Asetat, 2024)

2.1.2 Spesifikasi Bahan Pembantu

a. Amberlyst-15

Berdasarkan Rohm and Haas Company, dalam msds yang berjudul Amberlyst 15 wet Industrial Grade Strongly Acidic Catalyst for Catalysis and Separation Technologie, sifat fisika amberlyst-15 sebagai berikut:

- Komposisi
 - Wujud : padat
 - Bentuk : granular
 - Ion : H⁺
- Sifat Fisika
 - Rumus molekul : C₁₈H₁₈O₃S
 - Berat molekul : 314,4
 - ρ bulk : 610 kg/m³
 - Diameter partikel : 1,2 mm
 - Suhu operasi maksimum : 120°C (250°F)
 - Batas pressure drop : 1 bar (15psig) sepanjang bed
 - Konsentrasi : ≥ 4,7 eq/kg
 - Catalyst Volatiles : ≥ 1,0 %
 - Luas Permukaan : 53 m²/gr
 - Ukuran : 0,3 - 0,425 mm
 - Total Volume Pori : 0,4 cc/gr
 - Maksimal Suhu Operasi : 120°C (250°F)
 - Minimum Bed Depth : 600 mm (24 inches)
 - Laju Alir Operasi : 1 – 5 BV/h (LHSV)
 - Titik Didih : 516,7°C
 - Umur Katalis : 2 tahun

(Nikseresht et al., 2025)

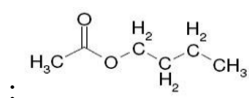
2.1.3 Spesifikasi Produk

a. N-butyl asetat

- Komposisi
 - Wujud : cair
 - Warna : tidak berwarna
 - Aroma : buah segar

- Sifat Fisika

Struktur bangun



Rumus molekul	: CH ₃ COOC ₄ H ₉
Berat molekul	: 116,16 kg/kmol
Titik didih	: 126,5°C (1 atm, 25°C)
Titik Beku	: -73,5°C
Tekanan uap	: 1,33 kPa (20°C)
Temperatur Kritis	: 579°K
<i>Specific Gravity</i>	: 0,882 (20°C, air=1)
<i>Solubility in water</i>	: 0,07g/L air (20°C)
Kemurnian	: 99% w
Impuritas	: N-butanol (1% w)

- Sifat Kimia

- Bereaksi dengan oksidasi kuat, asam kuat, amin, asam nitrit dan alkali.
- Menghasilkan karbon dioksida dan karbon monoksida bila dipanaskan atau terdekomposisi

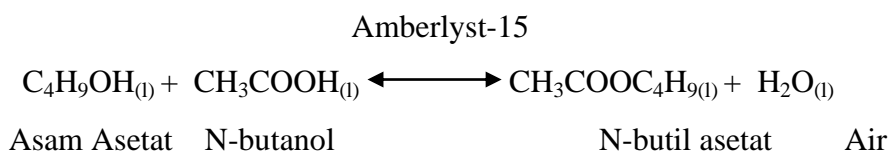
(Chemical Safety Data Sheet MSDS / SDS Butyl Acetate, 2026)

2.2 Konsep Proses

2.2.1 Dasar Reaksi

Proses pembuatan N-butyl asetat menggunakan bahan baku N-butanol dan asam asetat dengan katalis Amberlyst-15 yang didasarkan pada reaksi esterifikasi. Reaksi esterifikasi merupakan reaksi antara gugus hidroksil (-OH) dari alkohol dengan gugus karboksil (-COOH) dari asam karboksilat yang menghasilkan ester dan air sebagai produk sampingan.

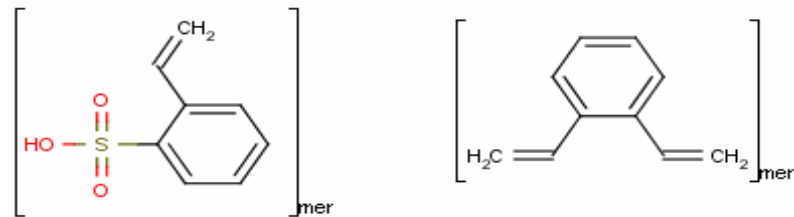
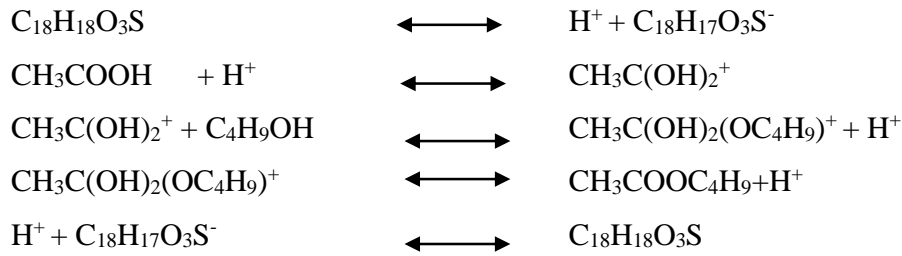
Reaksi yang berlangsung:



2.2.2 Mekanisme Reaksi

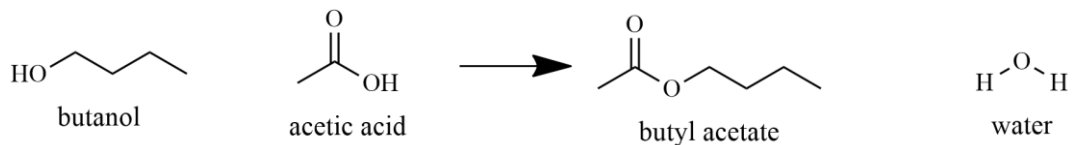
Reaksi esterifikasi antara asam asetat dan N-butanol berlangsung melalui mekanisme substitusi, di mana gugus alkoksil dari N-butanol menggantikan gugus hidroksil pada asam asetat dengan bantuan ion H⁺ dari katalis. Adapun struktur dapat

dilihat pada gambar 2.1. Mekanisme reaksi keseluruhan yang terjadi pada proses esterifikasi adalah:



Gambar 2. 1 Struktur Kimia Amberlyst-15

Reaksi berlangsung lambat, biasanya membutuhkan waktu berjam-jam untuk mencapai kesetimbangan. Menurut prinsip Le Chatelier, hasil dapat ditingkatkan dengan meningkatkan konsentrasi salah satu reaktan (Suryawanshi et al., 2014). Adapun struktur dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Reaksi Esterifikasi N-butil asetat

Reaksi pembuatan N-butil asetat berlangsung dalam fase cair menggunakan kolom *Reactive distillation* (*Reactive distillation* Column) pada tekanan 0,69 atm dengan suhu bawah 110°C dan atas 100°C. Sedangkan suhu reaksi pada reactive zone 105°C. Kondisi suhu dan tekanan operasi tersebut dipilih berdasarkan pertimbangan jika kurang dari suhu tersebut kemungkinan reaksi belum sempurna dan masih ada reaktan yang belum bereaksi (Bessling et al, 1999). Perbandingan reaktan asam asetat : N-butanol adalah 1:1,07 (Suryawanshi et al., 2016). Hal tersebut dilakukan dengan pertimbangan secara ekonomis bahwa harga N-butanol lebih murah dibanding asam asetat. Katalis Amberlyst-15 merupakan ion exchange resin digunakan dalam reaksi ini untuk menaikkan kecepatan reaksi esterifikasi tanpa merubah kesetimbangan reaksi. Katalis amberlyst-15 ini bersifat asam kuat, dengan muatan positif dapat bertambah sehingga asam akan mempercepat proses

esterifikasi, pemilihan katalis ini karena memiliki katalitik yang tinggi, bersifat non-toksik dan memberikan efektivitas yang tinggi karena memiliki pori yang lebar dan luas permukaan yang luas.

2.2.3 Fase Reaksi

Reaksi berlangsung dalam fasa cair menggunakan kolom *Reactive distillation* (*Reactive distillation* Column), reaksi ini bersifat eksotermis.

2.2.4 Kondisi Operasi

Pada pembuatan N-butyl asetat dari asam asetat dan N-butanol ini dijalankan pada suhu bawah 110 °C dan atas 100°C. Sedangkan suhu reaksi pada reactive zone 105°C dengan tekanan 0,69 atm, fasenya cair-cair dan reaksi secara *reversible* menggunakan katalis amberlyst-15. Perbandingan reaktan asam asetat : N-butanol adalah 1:1,07.

2.2.5 Tinjauan Secara Thermodinamika

Tinjauan secara thermodinamika ditujukan untuk mengetahui sifat reaksi (endotermis/eksotermis) dan arah reaksi (*reversible/irreversible*). Penentuan panas reaksi berjalan secara eksotermis dapat dihitung dengan perhitungan panas pembentukan standar (ΔH°_f) pada $P = 0,69$ atm dan $T_{reaksi} = 298$ °K.

1. Panas Reaksi Pembentukan Standar (ΔH_f)

Panas Reaksi Pembentukan Standar (ΔH_f) dapat digunakan untuk menentukan apakah reaksi endotermis atau eksotermis. Berikut perhitungan panas reaksi (ΔH_f) antara N-butanol dengan asam asetat:



(McKetta, 1976)

Tabel 2. 1 Harga (ΔH°_f) masing-masing komponen (Yaws, 1999)

Komponen	(ΔH°_f) (kJ/mol)
CH ₃ COOC ₄ H ₉	-485,60
H ₂ O	-241,80
CH ₃ COOH	-434,84
C ₄ H ₉ OH	-274,43

$$\begin{aligned} \Delta H_{f298,15} &= \Delta H^{\circ}_{f\text{produk}} - \Delta H^{\circ}_{f\text{reaktan}} \\ &= (\Delta H^{\circ}_f \text{ CH}_3\text{COOC}_4\text{H}_9 + \Delta H^{\circ}_f \text{ H}_2\text{O}) - (\Delta H^{\circ}_f \text{ CH}_3\text{COOH} + (\Delta H^{\circ}_f \text{ C}_4\text{H}_9\text{OH})) \\ &= [(-485,60) + (-241,80)] - [(-434,84) + (-274,43)] \text{ kJ/mol} \\ &= -18,13 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

Karena harga ΔH_{f298} negatif, maka reaksi bersifat eksotermis.

2. Energi Bebas Gibbs (ΔG°)

Tabel 2. 2 Harga (ΔG°_f) masing-masing komponen (Yaws, 1999)

Komponen	(ΔG°_f) (kJ/mol)
$\text{CH}_3\text{COOC}_4\text{H}_9$	-312,3
H_2O	-227,36
CH_3COOH	-376,69
$\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$	-150,67

$$\begin{aligned}\Delta G_{f298,15} &= \Delta G^\circ_{f\text{produk}} - \Delta G^\circ_{f\text{reaktan}} \\ &= (\Delta G^\circ_{f\text{CH}_3\text{COOC}_4\text{H}_9} + \Delta G^\circ_{f\text{H}_2\text{O}}) - (\Delta G^\circ_{f\text{CH}_3\text{COOH}} + (\Delta G^\circ_{f\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}})) \\ &= [(-312,3) + (-227,36)] - [(-376,69) + (-150,67)] \text{ kJ/mol} \\ &= -12,3 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

Didapat harga $\Delta G^\circ < 0$, Sehingga Reaksi dapat berlangsung spontan.

3. Konstanta kesetimbangan Reaksi

Berdasarkan buku *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics* (Smith, 1997), untuk mengetahui apakah reaksi berjalan searah atau bolak-balik, maka dapat diketahui dari harga konstanta kesetimbangan (K) menurut persamaan (13.14):

$$\frac{d \ln K}{dT} = \frac{\Delta H}{RT^2}$$

$$\Delta G_{298} = -RT \ln K$$

Maka,

$$\ln K_{298} = - \frac{\Delta G_{298}}{RT}$$

$$\ln K_{298} = - \frac{(-12.300 \text{ kJ/mol})}{8,314 \frac{\text{kJ}}{\text{mol.K}} \times 298,15 \text{ K}}$$

$$\ln K_{298} = 4,96$$

$$K_{298} = 142,59$$

Dari (Smith, 1997) Persamaan (13.15):

$$\ln K_{298} = - \frac{\Delta H_{298,15}}{R} \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)$$

Pada suhu 105 °C (378,15 K) besarnya konstanta kesetimbangan dapat dihitung sebagai berikut:

$$\ln K \left(\frac{K_{378}}{142,59} \right) = -\frac{-18.130}{8,314} \times \left(\frac{1}{378,15} - \frac{1}{298,15} \right) K$$

$$\ln \left(\frac{K_{378}}{142,59} \right) = -1,54$$

$$K_{378} = 30,56$$

Nilai Konstanta tersebut menandakan bahwa reaksi pembentukan N-butil asetat untuk mencapai kesetimbangan membutuhkan waktu yang lama. Lama waktu menuju kondisi setimbang tersebut salah satunya dikarenakan reaksi yang bersifat bolak-balik atau reversible (Levenspiel, 1999). Dengan nilai konstanta kesetimbangan yang sangat kecil, kemungkinan besar reaksi terjadi bolak-balik, artinya arah pembentukan butil asetat adalah bolak balik atau reversible.

2.2.6 Tinjauan Kinetika Reaksi

Kinetika reaksi penting untuk dilakukan kajian karena menentukan suhu, tekanan maupun spesifikasi alat yang akan digunakan dalam proses produksi. Konstanta kecepatan reaksi (k) akan menunjukkan seberapa cepat suatu reaktan menjadi produk (Levenspiel, 1999). Secara umum untuk mengetahui pengaruh suhu dapat ditentukan dengan persamaan *Arrhenius*:

$$k = A \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}}$$

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa untuk memperbesar harga k dapat dilakukan dengan menaikkan temperatur. Ditinjau dari kinetika reaksi antara asam asetat dengan N-butanol termasuk reaksi orde 2.

Hubungan antara suhu dan konstanta kecepatan reaksi dapat dinyatakan dalam hukum Arrhenius.

$$k_1 = k_1^0 \exp\left(\frac{-E_1}{RT}\right)$$

$$k_2 = k_2^0 \exp\left(\frac{-E_2}{RT}\right)$$

dengan,

k : konstanta kecepatan reaksi (liter/mol.menit)

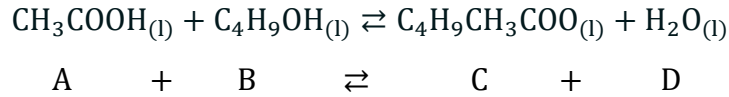
A : faktor tumbukan

Ea : energi aktivasi (kJ/mol)

R : tetapan gas ideal

T : temperatur absolut (K)

Reaksi yang terjadi:



Nilai k_1^0 dan k_2^0 untuk proses sintesis N-butil asetat dari N-butanol dan asam asetat dengan katalis amberlyst-15 masing-masing adalah $9,0953 \cdot 10^{-3}$ lit/mol.min dan $8,643 \cdot 10^{-3}$ lit/mol.min. Sedangkan nilai energi aktivasinya, E_1 dan E_2 berturut-turut adalah 45,59 KJ/mol dan 23,9 KJ/mol (Suryawanshi et.al, 2014)., dengan persamaan laju reaksi:

$$-r_A = \frac{A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \cdot \left(a_{alkohol} \cdot a_{asam} - \frac{a_{ester} \cdot a_{air}}{K_{eq}}\right)}{m_{kat} \cdot \left(1 + K_{alkohol} \cdot a_{alkohol} + K_{air} \cdot a_{air}\right)}$$

Parameter kinetika yang digunakan adalah pre-exponential factor $A = 2,46 \times 10^{10}$, energi aktivasi $E_a = 36.963,5$ J/mol, dengan konstanta adsorpsi yang bergantung suhu sebagai berikut:

Konstanta laju reaksi maju (k_1):

$$k_1 = 9,0953 \times 10^{(-3)} \text{Exp} \left(-\frac{45,59}{8,314} \left(\frac{1}{378,15} - \frac{1}{298,15} \right) \right)$$

$$k_1 = 0,00896407$$

$$k_2 = 8,643 \times 10^{(-3)} \text{Exp} \left(-\frac{23,9}{8,314} \left(\frac{1}{378,15} - \frac{1}{298,15} \right) \right)$$

$$k_2 = 0,00857755$$

Dari nilai tersebut dapat dilihat bahwa reaksi bersifat reversible tetapi cenderung ke arah kanan atau ke arah pembentukan n-butuil asetat karena nilai k_1 sedikit lebih besar dari k_2 . Dalam reaksi reversible untuk mempercepat terjadinya pembentukan produk, salah satu reaktan (n-butanol dan asam asetat) harus dalam keadaan berlebih. (Suryawanshi et.al, 2014).

2.3 Langkah proses

Produksi N-butil asetat dari N-butanol dan asam asetat umum dapat dibagi menjadi tiga tahap yakni:

2.3.1 Tahap Pengambilan Bahan Baku dari Tangki Penyimpanan

Bahan baku utama dalam produksi N-butil asetat terdiri dari asam asetat dan N-butanol dengan kemurnian masing-masing 99%. Kedua bahan baku disimpan secara terpisah dalam tangki penyimpanan asam asetat (T-101) dan tangki penyimpanan N-butanol (T-102). Feed dipompa dari tangki T-101 menggunakan pompa (P-101) dan dari tangki T-102 menggunakan pompa (P-102) dalam kondisi cair subcooled pada

suhu 30°C dan tekanan sekitar 1 atm. Rasio molar antara asam asetat dan N-butanol dijaga sebesar 1:1,07 melalui pengendalian rasio (ratio control) pada masing-masing jalur pompa. Rasio ini dipilih sebagai kondisi optimum berdasarkan jurnal Suryawanshi et al. (2016) pada kolom reactive distillation, di mana rasio N-butanol terhadap asam asetat yang lebih tinggi dari 1:1,07 justru meningkatkan pembentukan produk samping dibutyl ether (DBE) akibat reaksi dehidrasi N-butanol di atas permukaan katalis Amberlyst-15.

2.3.2 Tahap Pencampuran Feed di Mixer M-101

Kedua aliran bahan baku dari pompa (P-101) dan pompa (P-102) kemudian digabungkan dan dialirkan masuk ke dalam mixer (M-101). Di dalam mixer ini terjadi proses pencampuran homogen antara bahan baku pertama dan bahan baku kedua sesuai rasio yang telah diatur oleh masing-masing flow controller. Selain berfungsi sebagai alat pencampur, M-101 juga berperan sebagai surge vessel yang menstabilkan fluktuasi aliran sebelum campuran diteruskan ke tahap berikutnya. Terdapat instrumen kontrol level (LC) di bagian bawah M-101 untuk mengatur laju pengeluaran campuran secara stabil. Pada tahap ini, kondisi feed berupa cairan campuran homogen pada tekanan ± 1 atm dan suhu 30°C.

2.3.3 Tahap Preheating Feed di Heat Exchanger H-101

Campuran feed yang masih dingin pada suhu 30°C dialirkan masuk ke heater (H-101) untuk dipanaskan hingga mendekati suhu operasi kolom reactive distillation, yaitu sekitar 100–105°C. Pemanasan ini dilakukan pada kondisi tekanan yang masih dijaga ± 1 atm, sehingga selama proses pemanasan berlangsung feed tetap berada dalam fasa cair tunggal (single-phase liquid) dan tidak mengalami flash vaporization. Hal ini penting karena perpindahan panas pada fasa cair tunggal jauh lebih efisien dibandingkan kondisi dua fasa, dengan koefisien perpindahan panas yang tinggi dan distribusi panas yang merata di seluruh aliran. Apabila pemanasan dilakukan setelah penurunan tekanan, feed akan berada dalam kondisi dua fasa sehingga perpindahan panas menjadi tidak efisien dan tidak terkontrol. Sumber panas pada H-101 berasal dari steam bertekanan yang disuplai ke sisi shell heat exchanger. Kondisi feed setelah keluar dari H-101 berupa cairan panas yang sudah mendekati bubble point-nya pada tekanan 1 atm, dengan suhu ± 100 –105°C. Keluaran heater (H-101) selanjutnya dialirkan menggunakan pompa (P-103) menuju kolom destilasi reaktif (RD-201).

2.3.4 Tahap Penurunan Tekanan melalui FCV-101

Feed panas dari pompa (P-103) melewati katup kendali aliran (FCV-101) yang posisinya berada tepat sebelum masuk ke kolom RD-201. FCV-101 memiliki dua fungsi sekaligus dalam satu alat, yaitu menurunkan tekanan feed dari 1 atm menjadi 0,69 atm sesuai tekanan operasi vakum kolom RD-201, serta mengontrol laju alir feed yang masuk ke kolom secara presisi. Karena feed sudah dalam kondisi panas ($\pm 105^{\circ}\text{C}$) ketika melewati FCV-101, penurunan tekanan mendadak yang terjadi pada valve ini menyebabkan terjadinya flash vaporization secara terkontrol. Sebagian feed berubah menjadi fasa uap dan sebagian lainnya tetap dalam fasa cair, membentuk campuran uap-cair (two-phase) yang berada dalam kondisi kesetimbangan termodinamika pada tekanan 0,69 atm dan suhu $\pm 105^{\circ}\text{C}$ sesaat sebelum memasuki kolom reactive distillation.

2.3.5 Tahap Reaksi Pembentukan N-butyl Asetat

Campuran umpan dua fasa (uap-cair) yang telah mengalami flash vaporization di FCV-101 memasuki kolom reactive distillation (RD-201) pada bagian reactive section. Kolom reactive distillation terdiri dari tiga bagian utama: reactive section di bagian tengah kolom tempat reaksi esterifikasi berlangsung, serta enriching section di bagian atas dan stripping section di bagian bawah yang berfungsi untuk pemurnian produk. Umpan berkontak dengan katalis padat Amberlyst-15 yang tertanam pada packing keramik untuk bereaksi membentuk N-butyl asetat dan air.

Kolom (RD-201) dioperasikan pada tekanan vakum 0,69 atm. Kondisi vakum ini dibentuk dan dijaga menggunakan jet pump ejector (JT-201) yang ditempatkan pada aliran gas non-condensable di bagian atas kolom, berfungsi menarik udara dan gas-gas yang tidak terkondensasi keluar dari sistem hingga tekanan operasi yang diinginkan tercapai, sebelum dialirkan menuju instalasi pengolahan limbah (UPL). Operasi pada tekanan subatmosferik ini bertujuan untuk menurunkan titik didih komponen dalam sistem, sehingga suhu zona reaktif dapat dijaga tetap di bawah batas degradasi termal katalis Amberlyst-15. Suhu operasi kolom ditetapkan dengan suhu bottom 110°C , suhu reactive section 105°C , dan suhu top 100°C , di mana reaksi berlangsung secara eksotermis.

Fraksi berat berupa N-butyl asetat turun menuju bagian bawah kolom dan masuk ke reboiler parsial (RB-201) yang dipanaskan dengan superheated steam hingga suhu 110°C untuk memisahkan fraksi ringan yang masih terikut. N-butyl asetat dengan kemurnian 99% keluar melalui bagian bawah reboiler dan dipompa

menggunakan pompa (P-201) menuju cooler (CL-201) untuk didinginkan hingga suhu 45°C. Keluaran cooler (CL-201) selanjutnya dipompa menggunakan pompa (P-202) menuju tangki penyimpanan produk N-butil asetat (T-403). Fraksi ringan yang teruapkan di reboiler (RB-201) dikembalikan menuju kolom (RD-201).

Fraksi ringan berupa campuran azeotrop terner heterogen yang terdiri dari N-butanol, N-butil asetat, dan air keluar sebagai produk atas kolom dalam fase uap, karena azeotrop terner. Komposisi produk atas kolom terdiri dari N-butanol (12%), N-butil asetat (70%), dan air (18%). Uap azeotrop ini dialirkan menuju kondensor (C-201) untuk dikondensasikan hingga suhu 40°C (Handika et al., 1999).

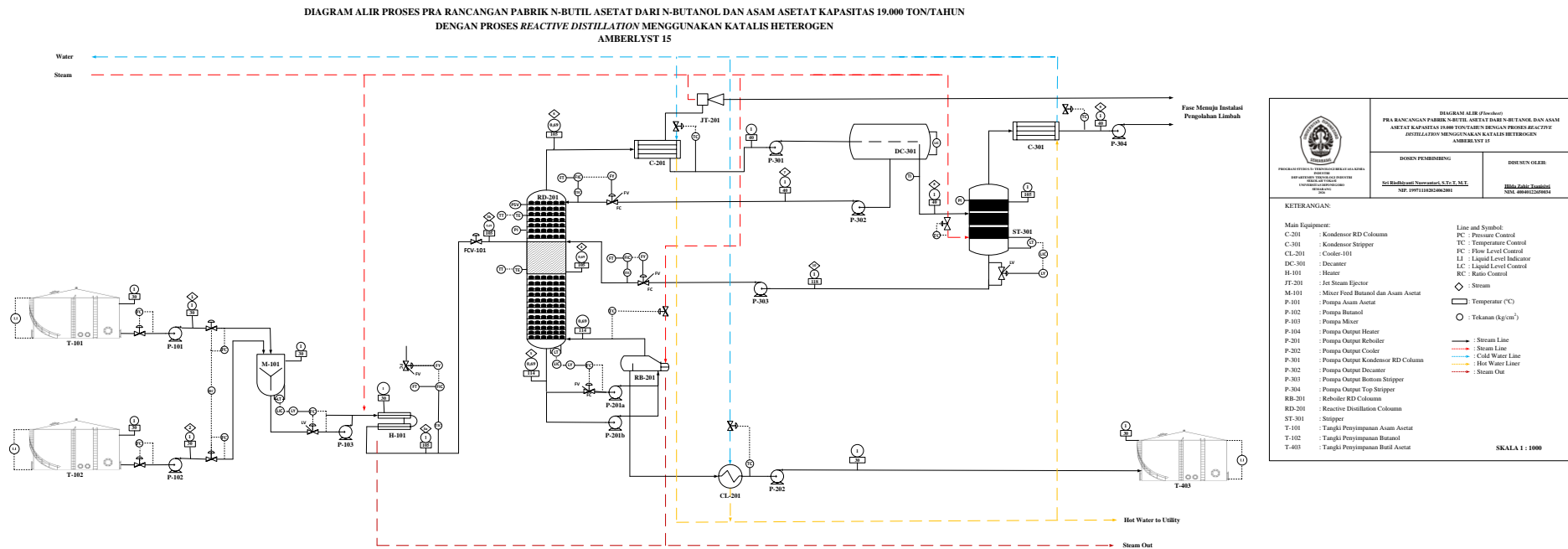
2.3.6 Tahap Pemisahan Fasa

Azeotrop terner N-butil asetat–N-butanol–air bersifat heterogen di bawah suhu 80°C, sehingga fasa air dan fasa organik dapat dipisahkan setelah campuran didinginkan hingga suhu yang cukup rendah. Campuran azeotrop yang telah terkondensasi pada suhu 40°C dari kondensor (C-201) dipompa menggunakan pompa (P-301) menuju dekanter (DC-301) dan mengalami pemisahan fasa berdasarkan perbedaan densitas.

Fasa atas merupakan fasa organik yang kaya N-butil asetat dan N-butanol yang tidak larut dalam air, sedangkan fasa bawah merupakan fasa air yang mengandung sedikit komponen organik terlarut. Fasa organik dari dekanter (DC-301) direfluks sepenuhnya kembali ke bagian atas kolom reactive distillation (RD-201) untuk meningkatkan recovery reaktan dan produk. Sementara itu, fasa air yang keluar dari bagian bawah dekanter dipompa menggunakan pompa (P-302) menuju kolom stripper (ST-301).

Pada kolom stripper (ST-301), fasa air dari dekanter dipisahkan lebih lanjut dari komponen organik (N-butil asetat dan N-butanol) yang masih terlarut di dalamnya, pada suhu 105°C dan tekanan 1 atm. Fasa air yang keluar sebagai produk atas kolom stripper dan hampir tidak mengandung komponen organik dialirkan menuju kondensor (C-301), kemudian dipompa menggunakan pompa (P-304) menuju unit pengolahan limbah (UPL). Sementara itu, campuran N-butanol dan N-butil asetat yang keluar melalui bagian bawah kolom stripper (ST-301) dipompa menggunakan pompa (P-303) untuk direcycle kembali ke kolom reactive distillation (RD-201) sebagai refluks tambahan, guna mengoptimalkan recovery bahan baku dan meningkatkan efisiensi proses secara keseluruhan.

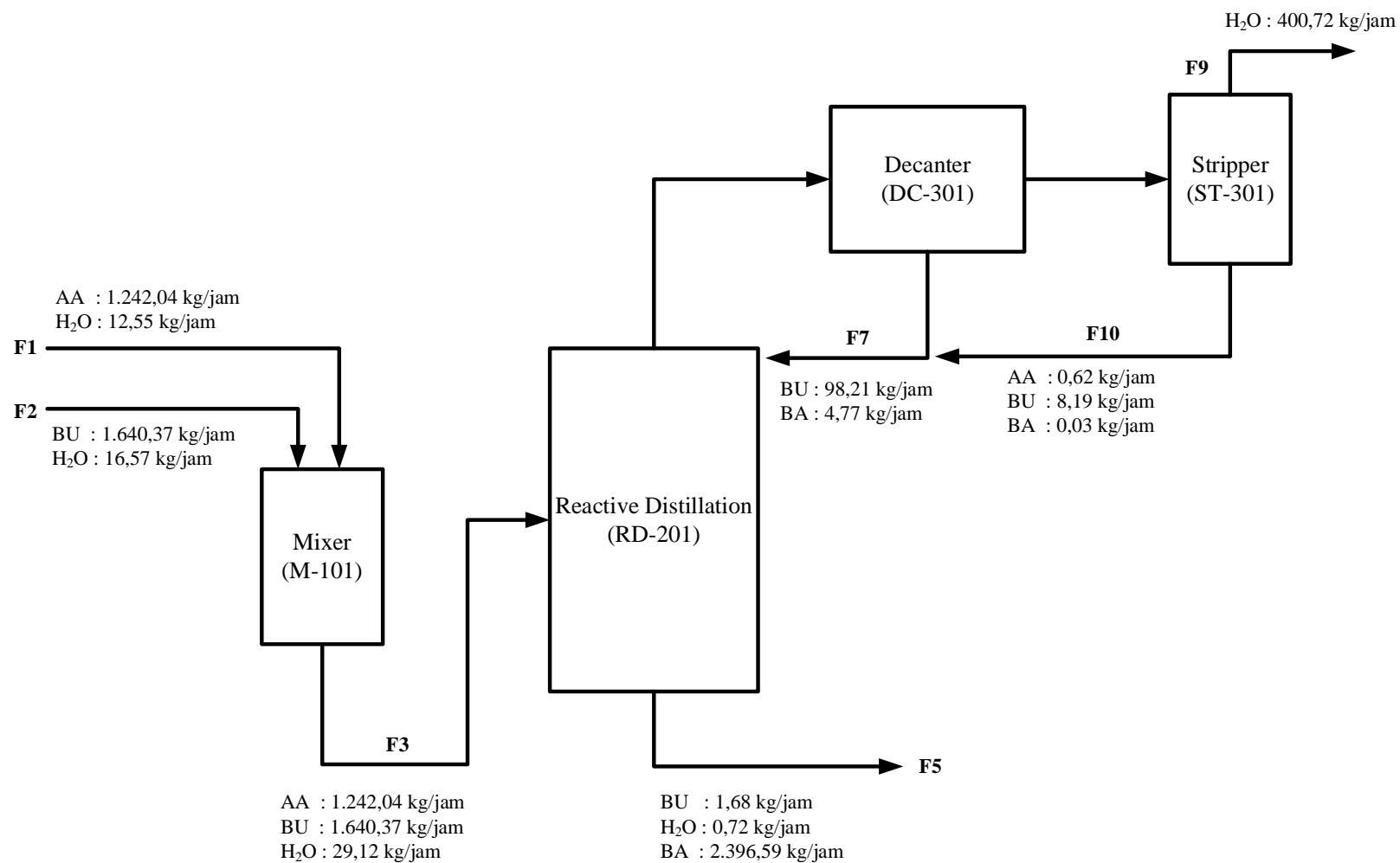
2.4 Process Flow Diagram (PFD)



Gambar 2. 3 Process Flow Diagram

2.5 Neraca Massa dan Neraca Panas

2.5.1 Neraca Massa



Gambar 2. 4 Diagram Blok Neraca Massa

2.5.1.1 Neraca Massa Mixer (M-101)

Tabel 2. 3 Neraca Massa Mixer (M-101)

Komponen	BM	Input				Output	
		F1		F2		F3	
		kmol/jam	kg/jam	kmol/jam	kg/jam	kmol/jam	kg/jam
Asam Asetat	60,05	20,68	1.242,04	0,00	0,00	20,68	1.242,04
Butanol	74,12	0,00	0,00	22,13	1.640,37	22,13	1.640,37
Air	18,01	0,70	12,55	0,92	16,57	1,62	29,12
Butil Asetat	116,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total		21,38	1.254,59	23,05	1.656,94	44,43	2.911,53
Overall		2.911,53 kg/jam				2.911,53 kg/jam	

2.5.1.2 Neraca Massa Reactive Section Kolom Reactive distillation (RD-201)

Tabel 2. 4 Neraca Massa Reactive Section Kolom Reactive distillation (RD-201)

Komponen	BM	Input		Output	
		F3		F4	
		kmol/jam	kg/jam	kmol/jam	kg/jam
Asam Asetat	60,05	20,68	1.242,04	0,01	0,62
Butanol	74,12	22,13	1.640,37	1,46	108,08
Air	18,01	1,62	29,12	22,29	401,44
Butil Asetat	116,16	0,00	0,00	20,67	2.401,39
Total		44,43	2.911,53	44,43	2.911,53
Overall		2.911,53 kg/jam		2.911,53 kg/jam	

2.5.1.3 Neraca Massa Distillation Section Kolom Reactive distillation (RD-201)

Tabel 2. 5 Neraca Massa Distillation Section Kolom Reactive distillation (RD-201)

Komponen	BM	Input					
		F4		F7		F10	
		kmol/jam	kg/jam	kmol/jam	kg/jam	kmol/jam	kg/jam
Asam asetat	60,05	0,01	0,62	0,00	0,00	0,01	0,62
Butanol	74,12	1,46	108,08	1,32	98,21	0,11	8,19
Air	18,01	22,29	401,44	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Butil Asetat	116,16	20,67	2.401,39	0,04	4,77	0,00	0,03

Komponen	BM	<i>Input</i>					
		F4		F7		F10	
		kmol/jam	kg/jam	kmol/jam	kg/jam	kmol/jam	kg/jam
Total		44,43	2.911,53	1,37	102,98	0,12	8,85
Overall		<i>Input = 2.882,42 kg/jam</i>			<i>Total Refluks = 111,82 kg/jam</i>		

Komponen	BM	<i>Output</i>			
		F5		F6	
		kmol/jam	kg/jam	kmol/jam	kg/jam
Asam asetat	60,05	0,00	0,00	0,01	0,62
Butanol	74,12	0,02	1,68	1,44	106,40
Air	18,01	0,04	0,72	22,25	400,72
n-Butil Asetat	116,16	20,63	2.396,59	0,04	4,80
Total		20,69	2.398,99	23,74	512,54
Overall		<i>Output = 2.911,53 kg/jam</i>			

2.5.1.4 Neraca Massa *Decanter* (DC-301)

Tabel 2. 6 Neraca Massa *Decanter* (DC-301)

Komponen	BM	<i>Input</i>				<i>Ouput</i>			
		F6		F7		F8			
		kmol/jam	kg/jam	kmol/jam	kg/jam	kmol/jam	kg/jam	kmol/jam	kg/jam
Asam asetat	60,05	0,01	0,62	0,00	0,00	0,01	0,62		
Butanol	74,12	1,44	106,40	1,32	98,21	0,11	8,19		
Air	18,01	22,25	400,72	0,00	0,00	22,25	400,72		
n-Butil Asetat	116,16	0,04	4,80	0,04	4,77	0,00	0,03		
Total		23,74	512,54	1,37	102,98	22,37	409,57		
Overall		512,54 kg/jam				512,54 kg/jam			

2.5.1.5 Neraca Massa *Stripper* (ST-301)

Tabel 2. 7 Neraca Massa *Stripper* (ST-301)

Komponen	<i>Input</i>			<i>Ouput</i>			
	BM	F8	F9	F9		F10	
		kmol/jam	kg/jam	kmol/jam	kg/jam	kmol/jam	kg/jam
Asam asetat	60,05	0,01	0,62	0,00	0,00	0,01	0,62
Butanol	74,12	0,11	8,19	0,00	0,00	0,11	8,19
Air	18,01	22,25	400,72	22,25	400,72	0,00	0,00
n-Butil Asetat	116,16	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,03
Total		22,37	409,57	22,25	400,72	0,12	8,85
Overall		409,57 kg/jam		409,57 kg/jam			

2.5.1.6 Neraca Massa *Overall*

Tabel 2. 8 Neraca Massa *Overall*

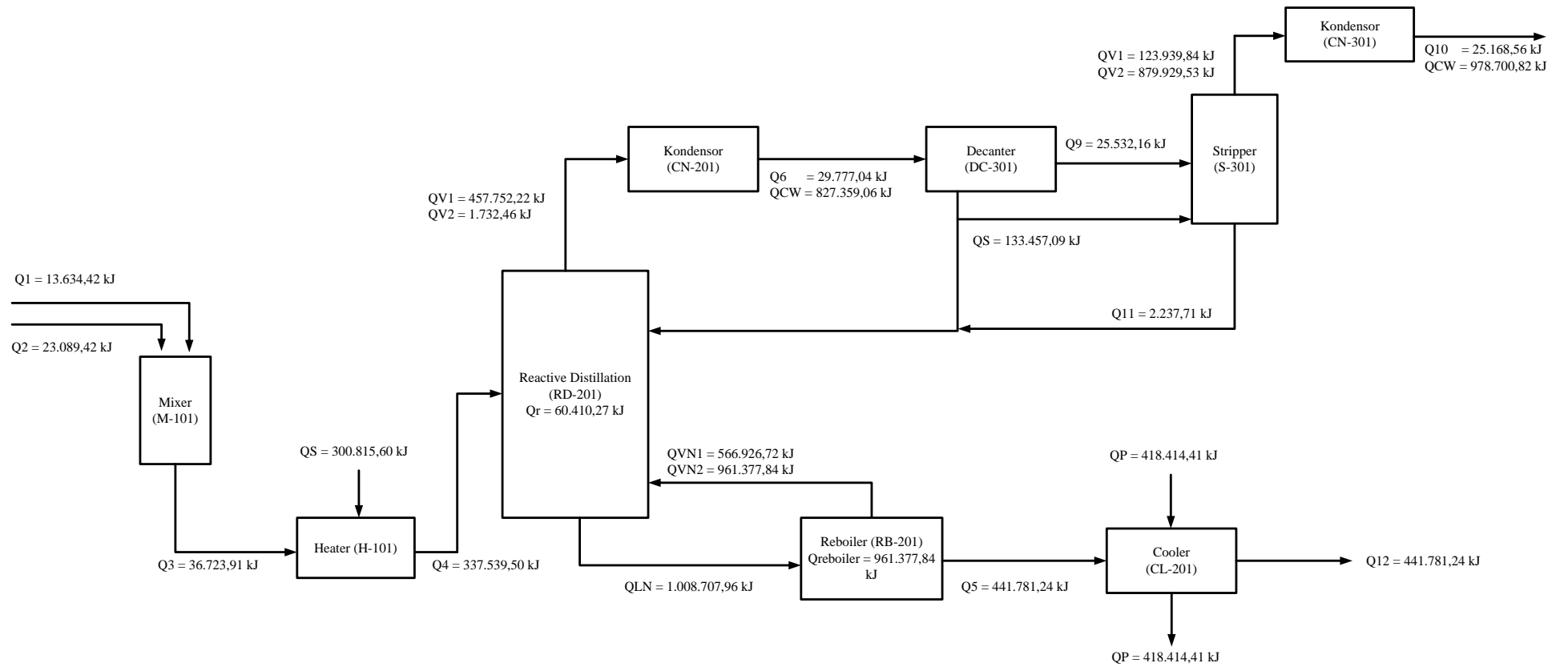
No	Komponen	Nama Arus	<i>Input</i>	<i>Output</i>
1.	Mixer (M-101)			
	Asam asetat	F1	1.242,04	
	Butanol	F2	1.640,37	
	Air	F1,F2	29,12	
	n-Butil Asetat	-	0,00	
2.	Reactive distillation (RD-201)			
	Produk Bawah	F5		
	(<i>Stripping</i>):			
	Asam asetat			0,00
	Butanol			1,68
	Air			0,72
	n-Butil Asetat			2.396,59
4.	Decanter (DC-301)			
	Produk keluaran atas	F7		
	(Refluks <i>Top</i> (RD-201))			102,98
5.	Stripper (ST-301)			
	Produk atas	F9		400,72

No	Komponen	Nama Arus	Input	Output
	Produk bawah (Refluks (RD-201))	F10		8,85
	Total		2.911,53	2.911,53

$$\text{Efisiensi Produksi} = \frac{\text{Massa Produk yang dihasilkan}}{\text{Massa Umpan Bahan Baku}} \times 100\%$$

$$\text{Efisiensi Produksi} = 96,16 \%$$

2.5.2 Neraca Panas



Gambar 2. 5 Diagram Blok Neraca Panas

2.5.2.1 Neraca Panas Mixer (M-101)

Tabel 2. 9 Neraca Panas Mixer (M-101)

Komponen	Input		Output
	Q1 (kJ)	Q2 (kJ)	Q3 (kJ)
Asam Asetat	13.371,41	0,00	13.371,41
Butanol	0,00	22.742,14	22.742,14
Air	263,00	347,35	610,35
n-Butil Asetat	0,00	0,00	0,00
Total	36.723,91		36.723,91

2.5.2.2 Neraca Panas di Heater (H-101)

Tabel 2. 10 Neraca Panas di Heater (H-101)

Komponen	Input		Output
	Q3 (kJ)	QS (kJ)	Q4 (kJ)
Asam Asetat	13.371,41	0,00	123.126,13
Butanol	22.742,14	0,00	208.939,98
Air	610,35	0,00	5.473,40
n-Butil Asetat	0,00	0,00	0,00
<i>Saturated steam</i>	0,00	300.815,60	0,00
Total	337.539,50		337.539,50

2.5.2.3 Neraca Panas Total Reactive distillation (RD-201)

Tabel 2. 11 Neraca Panas Total Reactive distillation

Komponen	Input			Output	
	Q4	Qreaksi	Qreboiler	Qpendingin (-QC)	Q5 Q6
Asam asetat	123.126,13				0 20,18
Butanol	208.939,98				436,37 4.447,29
Air	5.473,40				269,21 25.168,56
n-Butil Asetat	0				441.075,67 141,02
Panas Reaksi Reboiler		60.410,27	961.377,84		

Komponen	Input			Output			
	Q4	Qreaksi	Qreboiler	Qpendingin	(-QC)	Q5	Q6
Kondensor					827.359,06		
Pendingin				60.410,27			
Total	1.359.327,61			1.359.327,61			

2.5.2.4 Neraca Panas Cooler (CL-201)

Tabel 2. 12 Neraca Panas Cooler (CL-201)

Komponen	Masuk (kJ)	Keluar (kJ)
Bahan Masuk	441.781,24	0,00
Bahan Keluar	0,00	94.311,25
Beban Pendingin	0,00	347.469,99
Total	441.781,24	441.781,24

2.5.2.5 Neraca Panas Total Kondensor (CN-201)

Tabel 2. 13 Neraca Panas Total Kondensor (CN-201)

Masuk		Keluar	
Qv1 (KJ)	Qv2 (KJ)	Q6 (KJ)	(-Qc) (KJ)
850.933,29	6.202,81	29.777,04	827.359,06
857.136,10		857.136,10	

2.5.2.6 Neraca Panas Decanter (DC-301)

Tabel 2. 14 Neraca Panas Decanter (DC-301)

Masuk	Keluar	
Q6 (KJ)	Q8 (KJ)	(Q9) (KJ)
40751,12886	4630,022001	36121,10686
40751,12886	40751,12886	

2.5.2.7 Neraca Panas Stripper (ST-301)

Tabel 2. 15 Neraca Panas Stripper (ST-301)

Komponen	Masuk		Keluar	
	Q9	QS	Q10	Q11
Asam asetat	20,18	0,00	0,00	0,00

Komponen	Masuk		Keluar	
	Q9	QS	Q10	Q11
Butanol	342,44	0,00	0,00	2.231,22
Air	25.168,56	0,00	156.751,55	0,00
n-Butil Asetat	0,99	0,00	0,00	6,48
steam	0,00	133.457,09	0,00	0,00
Total	158.989,25		158.989,25	

2.5.2.8 Neraca Panas Total Kondensor (CN-301)

Tabel 2. 16 Neraca Panas Total Kondensor (CN-301)

Masuk		Keluar	
Qv1 (KJ)	Qv2 (KJ)	Q10 (KJ)	(-Qc) (KJ)
123.939,84	879.929,53	25.168,56	978.700,82
1.003.869,37		1.003.869,37	

2.5.2.9 Neraca Panas Overall

Tabel 2. 17 Neraca Panas Overall

Komponen	Input (Kj)	Output (Kj)
1 Mixer		
Q1	13.634,42	
Q2	23.089,49	
2 Heater		
QS	300.815,60	
3 Reactive distillation		
Q reaksi	60.410,27	
Qreboiler	961.377,84	
Qpendingin		60.410,27
-QC		827.359,06
4 Cooler		
Qpendingin		347.469,99
Q12		94.311,25
5 Kondensor (CN-201)		
QV1	850.933,29	

Komponen	Input (Kj)	Output (Kj)
QV2	6.202,81	
-QC		827.359,06
6 Decanter (DC-301)		
Q8		4.244,88
7 Stripper (ST-301)		
Q _{steam}	133.457,09	
Q11		2.237,71
8 Kondensor (CN-301)		
QV1	123.939,84	
QV2	879.929,53	
Q10		25.168,56
-QC		978.700,82
Q _{loss}		186.528,59
TOTAL	3.353.790,18	3.353.790,18

$$\%Kehilangan\ Panas\ Overall = \frac{Total\ Kehilangan\ Panas\ Proses}{Total\ Panas\ Overal} \times 100\%$$

$$\%Kehilangan\ Panas\ Overall = \frac{186.528,59}{3.353.790,18} \times 100\%$$

$$\%Kehilangan\ Panas\ Overall = 5,56\%$$

$$Efisiensi\ Panas = 100\% - \%Kehilangan\ Panas\ Overall$$

$$Efisiensi\ Panas = 94,44\%$$

2.6 Tata Letak Pabrik dan Pemetaan

2.6.1 Lay Out Pabrik

Lay out pabrik didefinisikan sebagai pengaturan seluruh fasilitas pendukung proses produksi secara optimal, meliputi area kerja, unit perakitan, serta tempat penyimpanan bahan baku dan produk jadi. Perancangan tata letak bertujuan untuk memanfaatkan lahan secara efisien dengan tetap mengutamakan aspek keselamatan, keamanan, dan kenyamanan bagi seluruh pekerja.

Selain area utama yang tergambar dalam Process Flow Diagram (PFD), fasilitas pendukung seperti ruang perkantoran, bengkel, poliklinik, kantin, dan pos jaga

keamanan perlu ditempatkan pada lokasi yang strategis agar tidak mengganggu jalur distribusi barang maupun sistem pengamanan internal. Pada perancangan pabrik ini, tata letak dari pabrik dapat dilihat pada gambar 2.3. Dalam buku Coulson (1996) volume 6 untuk mencapai kondisi yang optimal, maka hal-hal yang harus diperhatikan dalam menentukan tata letak pabrik ini adalah

1. Status proyek: Pabrik yang dirancang merupakan pabrik baru (*grassroot*), sehingga penentuan tata letak memiliki fleksibilitas tinggi dan tidak terikat pada struktur bangunan yang telah ada sebelumnya.
2. Pengembangan di masa mendatang: Desain area telah menyediakan ruang untuk kemungkinan perluasan kapasitas produksi pada waktu mendatang.
3. Pengendali risiko kebakaran dan ledakan: Zona operasional diatur sedemikian rupa agar terpisah dari sumber api, benda bersuhu tinggi, bahan mudah meledak, serta paparan gas beracun guna meminimalkan potensi kecelakaan.
4. Efisiensi aliran logistic: Distribusi bahan baku, kelancaran proses produksi, dan pengangkutan produk jadi dirancang agar berlangsung tanpa hambatan.
5. Kemudahan instalasi dan pemeliharaan: Penempatan unit proses mempertimbangkan distribusi pipa utilitas (gas, udara, uap, dan Listrik) serta akses yang mudah bagi pekerja dalam menjalankan operasi dan perawatan rutin.

Secara garis besar lay out dibagi menjadi beberapa bagian utama, yaitu (Vilbrand, 1959):

1. Daerah administrasi/perkantoran, laboratorium dan ruang control.
 - Area administrasi berfungsi sebagai pusat kegiatan manajerial yang mengelola operasional pabrik secara menyeluruh
 - Laboratorium dan ruang kontrol berperan sebagai pusat kendali proses serta pengawasan terhadap kuantitas dan kualitas bahan baku maupun produk jadi.
2. Daerah proses

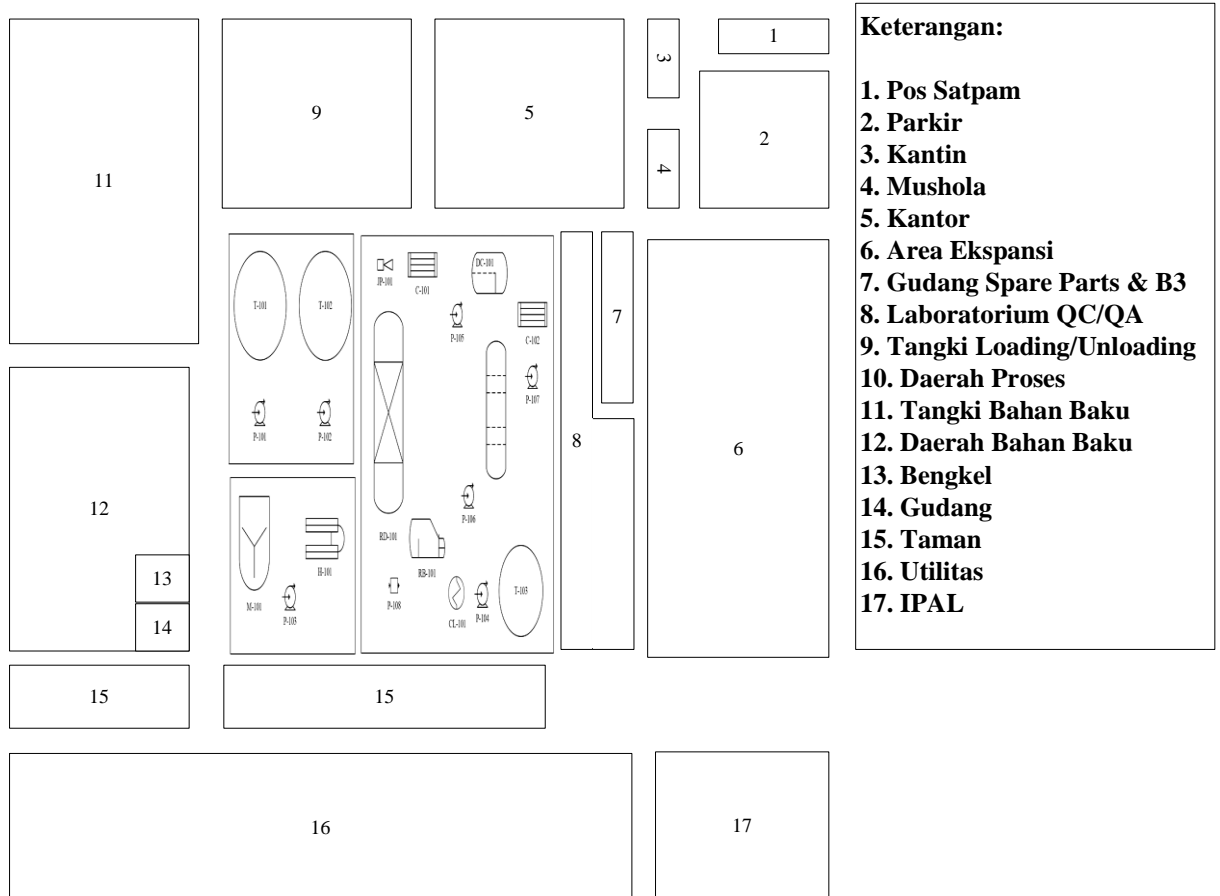
Zona ini merupakan area inti tempat peralatan produksi ditempatkan. Selain itu, zona ini juga mencakup gudang penyimpanan serta fasilitas pendukung seperti bengkel dan garasi untuk keperluan perawatan peralatan proses.
3. Daerah utilitas

Area yang dikhususkan untuk penyediaan sumber daya pendukung proses produksi, meliputi instalasi pengolahan air, pembangkit uap (steam),

media pendingin, dan distribusi tenaga listrik.

Tabel 2. 18 Perincian Luas Tanah Pabrik

No	Bangunan	Ukuran	Luas (m ²)
A. KEAMANAN & AKSES			
1.	Pos Keamanan	2 x 5 x 5	50
2.	Taman	10 x 50	500
3.	Tempat Parkir	20 x 10	200
B. ADMINISTRASI & FASILITAS UMUM			
4.	Kantor	30 x 30	900
5.	Musholla	15 x 10	150
6.	Kantin	10 x 20	200
7.	Koperasi karyawan	10 x 10	100
8.	Poliklinik	5 x 10	50
9.	Perpustakaan	10 x 10	100
C. TEKNIS & OPERASIONAL			
10.	<i>Control room</i>	10 x 5	50
11.	Laboratorium	10 x 5	50
12.	Bengkel	10 x 10	100
13.	K3 & <i>Fire Safety</i>	10 x 10	100
14.	Gudang spare part & B3	10 x 20	200
D. ZONA PROSES UTAMA			
15.	Area proses utama	200 x 100	20.000
16.	Tangki bahan baku	100 x 70	7.000
17.	Tangki produk	100 x 50	5.000
E. UTILITAS & LINGKUNGAN			
18.	Unit Utilitas	10 x 60	600
19.	IPAL	10 x 20	200
F. PENGEMBANGAN & SIRKULASI			
20.	Area ekspansi	40 x 50	2.000
21.	Jalan internal & sirkulasi	(sisa lahan)	3.500
Jumlah			41.050



Gambar 2. 6 Lay Out Pabrik N-butil asetat

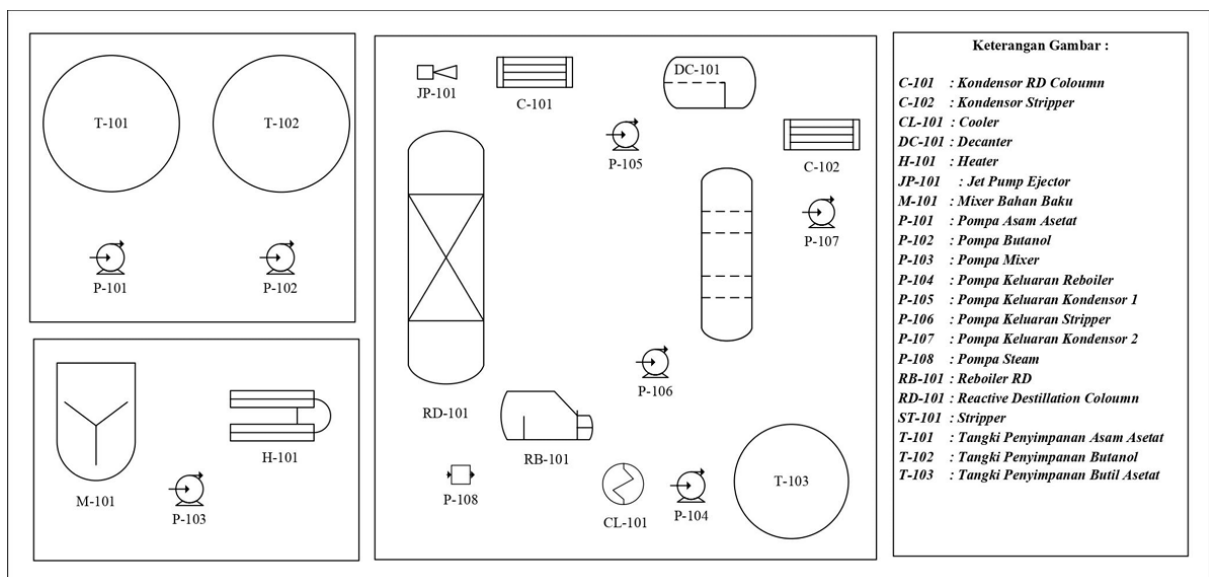
2.6.2 Lay Out Peralatan Proses

Lay Out peralatan proses adalah pengaturan posisi seluruh perangkat yang digunakan dalam lini produksi. Detail pengaturan peralatan dalam perancangan pabrik ini dapat dilihat pada Gambar 2.3. Penentuan posisi perangkat tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan poin-poin krusial berikut:

1. Sirkulasi Udara: Memastikan aliran udara di sekitar area proses berjalan lancar guna mencegah terjadinya stagnasi udara. Hal ini sangat penting untuk menghindari akumulasi bahan kimia berbahaya yang dapat mengancam kesehatan dan keselamatan pekerja.
2. Pencahayaan yang Memadai: Menyediakan intensitas cahaya yang cukup di seluruh area pabrik. Pada zona-zona dengan risiko bahaya tinggi, diperlukan sistem penerangan tambahan untuk mendukung pengawasan operasional.
3. Aksesibilitas dan Mobilitas: Perancangan tata letak harus memfasilitasi pergerakan pekerja agar dapat menjangkau seluruh peralatan dengan cepat dan

mudah. Kemudahan akses ini bertujuan agar penanganan gangguan alat dapat dilakukan segera tanpa mengabaikan aspek keamanan operator.

4. Efisiensi Ekonomi: Penempatan alat diatur sedemikian rupa untuk menekan biaya operasional tanpa mengurangi kelancaran serta keamanan produksi secara keseluruhan.
5. Pengaturan Jarak Aman: Peralatan yang beroperasi pada suhu dan tekanan ekstrem harus dipisahkan dari perangkat lainnya. Pengaturan jarak ini berfungsi sebagai langkah mitigasi untuk meminimalkan dampak kerusakan jika terjadi kebakaran atau ledakan.



Gambar 2. 7 Lay Out Peralatan Proses