

BAB II

DESKRIPSI PROSES

2.1. Spesifikasi Bahan Baku dan Produk

2.1.1. Spesifikasi Bahan Baku

2.1.1.1. Molase

Molase merupakan produk samping dari industri gula tebu yang kaya akan sukrosa dan digunakan sebagai bahan baku utama dalam proses fermentasi asam laktat. Molase berbentuk cairan kental berwarna coklat kehitaman dengan bau khas dan rasa manis. Spesifikasi molase yang digunakan dalam perancangan ini mengacu pada data yang dilaporkan oleh Kumar (2021), sebagaimana disajikan pada tabel berikut.

Nama Kimia	: Molase
Fase	: Cair (Kental)
Warna	: Coklat kehitaman
Densitas (30°C)	: 1,2878 kg/L
Komposisi Utama	: Air 25%, Sukrosa 40%, Glukosa 10%, Fruktosa 4%
Impuritas	: Abu (Total Mineral) 4,09%, Protein 0,50%, Asam amino 0,30%, Asam non-nitrogen 1,50%, Wax, sterols, phosphatides 0,10%, Organik lain (Vitamin) 10,47%
pH	: 5,0 - 6,0
Penyimpanan	: Tangki atmosferik silinder tegak
Suhu Penyimpanan	: 30°C
Tekanan Penyimpanan	: 1 atm
Sumber	: Pabrik Gula di Indonesia

Komposisi molase yang digunakan sebagai bahan baku disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Komposisi Molase (Kumar, 2021)

Komponen	Rumus Kimia	Berat Molekul (g/mol)	% Massa
Air	H ₂ O	18,015	25,00
Sukrosa	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	342,30	40,00
Glukosa	C ₆ H ₁₂ O ₆	180,16	10,00
Fruktosa	C ₆ H ₁₂ O ₆	180,16	4,00
Abu (Total Mineral)	-	-	8,13
Protein & Pengotor Lainnya	-	-	12,87
Total			100,00

Rincian komposisi abu dan pengotor organik dalam molase disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Komposisi Abu dan Pengotor dalam Molase (Kumar, 2021)

Kategori	Komponen	% Massa dalam Molase	Keterangan
Abu (Total Mineral)	Potassium	4,00	Total semua mineral (kation + anion + oksida)
	Calcium	0,80	Bagian dari Ash
	Magnesium	1,00	Bagian dari Ash
	Sodium	0,09	Bagian dari Ash
	Sulphates	2,24	Bagian dari Ash (sebagai anion)
Protein & Pengotor Organik	Protein	0,50	Senyawa organik (pengotor)
	Amino acids	0,30	Senyawa organik (pengotor)
	Non-nitrogenous acids	1,50	Asam organik (pengotor)
	Wax, sterols, phosphatides	0,10	Senyawa organik (pengotor)
	Organik lain	10,47	Vitamin (organik, pengotor)

2.1.1.2. Enzim Invertase

Enzim invertase (EC 3.2.1.26) digunakan sebagai biokatalis dalam reaktor *packed bed* (PBR) untuk menghidrolisis sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa. Enzim ini diimobilisasi pada matriks nilon-6 untuk meningkatkan stabilitas dan memungkinkan penggunaan secara kontinyu. Menurut Amaya-Delgado et al., 2006 spesifikasi enzim invertase adalah sebagai berikut:

Nama Enzim	: Invertase (β -fructofuranosidase)
Sumber	: <i>Saccharomyces cerevisiae</i>
Metode Imobilisasi	: Covalent bonding pada nilon-6 menggunakan glutaraldehida
Faktor Imobilisasi	: 0,93
pH Optimum	: 5,5
Suhu Optimum	: 60°C
Km	: 0,029 M
Ki	: 0,71 M

V _{max}	: 1,37 mmol menit ⁻¹ mg ⁻¹
Bentuk	: Padatan (diimobilisasi pada matriks)
Jenis Reaksi	: Hidrolisis
Kondisi Operasi	: 50°C, 1 atm
Stabilitas Termal	: Stabil pada suhu < 60°C

2.1.1.3. Kalsium Karbonat (CaCO₃)

Kalsium karbonat digunakan sebagai agen penetralisir pada proses fermentasi untuk menjaga pH tetap pada kisaran 6,0 dan membentuk kalsium laktat yang lebih stabil. Menurut Min et al., 2011 spesifikasi kalsium karbonat adalah sebagai berikut:

Rumus Kimia	: CaCO ₃
Berat Molekul	: 100,0869 g/mol
Fase	: Padatan (Serbuk halus)
Warna	: Putih
Kemurnian	: ≥ 99%
Densitas	: 2,71 g/cm ³
Titik Lebur	: 825°C (terurai)
Kelarutan dalam Air	: Tidak larut (0,0013 g/100 mL pada 25°C)
pH Larutan	: 9,0 - 9,5
Fungsi	: Agen penetralisir dan pembentuk kalsium laktat
Penyimpanan	: Silo
Bahaya	: Iritasi ringan pada mata dan kulit

2.1.1.4. Asam Sulfat (H₂SO₄)

Asam sulfat digunakan pada tahap asidifikasi untuk mengubah kalsium laktat menjadi asam laktat bebas dan membentuk endapan gipsum (CaSO₄·2H₂O). Menurut Min et al., 2011 spesifikasi asam sulfat adalah sebagai berikut:

Rumus Kimia	: H ₂ SO ₄
Berat Molekul	: 98,08 g/mol
Fase	: Cairan
Warna	: Tidak berwarna
Konsentrasi	: 98% (komersial)
Densitas (20°C)	: 1,84 g/cm ³
Titik Didih	: 337°C
Titik Lebur	: 10,31°C

Viskositas (25°C)	:	25,4 cP
Fungsi	:	Asidifikasi kalsium laktat
Rasio Stoikiometri	:	1 mol $\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2$: 1 mol H_2SO_4
Penyimpanan	:	Tangki stainless steel
Bahaya	:	Korosif, dapat menyebabkan luka bakar serius

2.1.1.5. Nutrisi Fermentasi (Media MRS Broth)

Media MRS (*de Man, Rogosa, and Sharpe*) Broth digunakan untuk menumbuhkan bakteri *Lactobacillus delbrueckii* pada tangki inokulum. Media ini mengandung berbagai nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan bakteri, termasuk sumber karbon, nitrogen, vitamin, dan mineral. Spesifikasi media MRS Broth disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Komposisi Media MRS Broth (Smitsa, 2007)

Komponen	Konsentrasi (g/L)	Berat Molekul (g/mol)	Fungsi
Glukosa (dextrose)	20	180,16	Sumber karbon utama untuk pertumbuhan bakteri
Proteseo peptone	10	-	Sumber nitrogen, asam amino, dan peptida
Beef extract	8	-	Sumber vitamin, mineral, dan nutrisi kompleks
Yeast extract	4	-	Sumber vitamin B dan faktor pertumbuhan
Dipotassium hydrogen phosphate (K_2HPO_4)	2	174,18	Buffer dan sumber mineral (kalium, fosfat)
Sodium acetate $3\text{H}_2\text{O}$	5	136,08	Buffer dan sumber mineral (natrium)
Triammonium citrate	2	243,22	Sumber nitrogen dan mineral (amonium, sitrat)
Magnesium sulphate ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	0,2	246,47	Sumber mineral (magnesium, sulfat)
Manganese sulphate ($\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	0,05	223,06	Sumber mineral dan kofaktor enzim (mangan)
Sorbitan mono-oleate (Tween 80)	1	428,60	Surfaktan untuk pertumbuhan sel

Komponen	Konsentrasi (g/L)	Berat Molekul (g/mol)	Fungsi
Air	Ad 1 L	18,015	Pelarut

2.1.1.6. Air (H₂O)

Air digunakan dalam berbagai keperluan, seperti pengenceran, air umpan boiler, air pendingin, dan sanitasi. Menurut Smitsa, 2007 spesifikasi air yang digunakan adalah sebagai berikut:

Rumus Kimia	:	H ₂ O
Berat Molekul	:	18,015 g/mol
Fase	:	Cair
Warna	:	Tidak berwarna
Densitas (25°C)	:	997 kg/m ³
pH	:	6,5 - 8,5

2.1.2. Spesifikasi Produk

2.1.2.1. Asam Laktat

Spesifikasi produk asam laktat yang dirancang mengacu pada standar produk komersial PURAC® HiPure 90 yang diproduksi oleh Purac.

Tabel 2. 4 Spesifikasi Produk Asam Laktat (PURAC® HiPure 90, 2019)

Parameter	Spesifikasi	Satuan
Identitas Produk		
Nama Produk	PURAC® HiPure 90	-
Nama Kimia	Asam Laktat, L-Lactic Acid	-
Rumus Kimia	C ₃ H ₆ O ₃	-
Berat Molekul	90,08	g/mol
CAS Number	79-33-4	-
Sinonim	2-Hydroxypropionic Acid, Milk Acid	-
Grade	USP (<i>United States Pharmacopeia</i>)	-
INCI	Lactic Acid	-
Sifat Fisik & Kimia		
Kadar (Assay)	89,5 - 90,5	% (w/w)
Bentuk	<i>Syrupy liquid</i> (Cairan kental)	-
Warna	<i>Clear, colorless</i> (Bening, tidak berwarna)	-

Densitas (20°C)	1,2	g/cm ³
pH (25°C)	< 1,2	-
Titik didih	120 - 130	°C
Dekomposisi termal	> 200	°C
Viskositas dinamis (25°C)	1.960	mPa·s
Kelarutan dalam air	<i>Completely miscible</i> (Tercampur sempurna)	-
<i>Auto Ignition Temperature</i>	> 400	°C
<i>Odor</i>	<i>Characteristic</i> (Karakteristik)	-
<i>Partition Coefficient (Pow)</i>	-0,62	-
<i>Surface Tension</i>	44 - 50	mN/m
Spesifikasi Kemurnian		
Sulfated ash	Maks. 0,01	%
Sulfate (SO ₄ ²⁻)	Maks. 10	ppm
Aplikasi		
Aplikasi	Bakery, Beverage, Dairy, Meat, Poultry & Seafood, Prepared Foods, Snacks & Seasonings	-
Fungsi dalam kosmetik	Anti-aging, exfoliation, cell renewal, moisturization	-
pH formula optimal	3,5 - 4,0	-
Sertifikasi	Kosher	-

2.1.2.2. Kalsium Laktat (Produk Intermediet)

Kalsium laktat terbentuk sebagai produk intermediet pada proses fermentasi setelah netralisasi dengan CaCO₃. Menurut Amaya-Delgado et al., 2006 spesifikasi kalsium laktat sebagai berikut.

Rumus Kimia	: Ca(C ₃ H ₅ O ₃) ₂
Berat Molekul	: 218,22 g/mol
Fase	: Larutan (dalam <i>broth</i> fermentasi)
Warna	: Jernih kekuningan
Kelarutan	: Larut dalam air
Fungsi	: Produk intermediet sebelum asidifikasi

2.1.2.3. Gypsum (Produk Samping)

Gypsum (CaSO₄·2H₂O) terbentuk sebagai produk samping pada proses asidifikasi dan

dipisahkan sebagai limbah padat.

Parameter	: Nilai
Rumus Kimia	: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Berat Molekul	: 172,17 g/mol
Fase	: Padatan (Endapan putih)
Warna	: Putih
Densitas	: 2,32 g/cm ³
Kelarutan dalam Air	: 2,4 g/L pada 25°C
Fungsi	: Produk samping (limbah)
Pemanfaatan	: Dapat digunakan sebagai bahan baku industri konstruksi

2.2. Konsep Proses

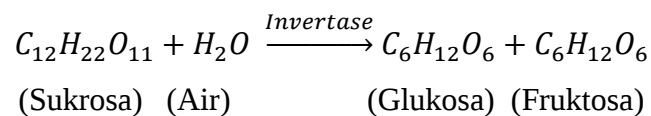
Proses pembuatan asam laktat menggunakan bahan baku molase berdasarkan reaksi hidrolisis dan fermentasi. Proses hidrolisis adalah reaksi pemecahan sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa dengan bantuan enzim invertase, sedangkan fermentasi adalah reaksi pengubahan glukosa menjadi asam laktat oleh bakteri *Lactobacillus delbrueckii*.

2.2.1. Dasar Reaksi

Tahapan reaksi utama dalam proses produksi asam laktat adalah sebagai berikut:

2.2.1.1. Reaksi Hidrolisis Sukrosa

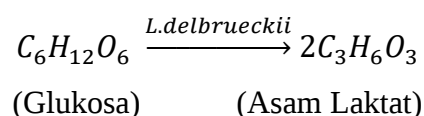
Sukrosa dihidrolisis menjadi glukosa dan fruktosa dengan bantuan enzim invertase. Reaksi ini berlangsung secara enzimatis dan bersifat eksotermis.



Berdasarkan penelitian Amaya-Delgado et al. (2006), enzim invertase yang diimobilisasi pada nilon-6 dapat mencapai konversi sukrosa sebesar 0,95 hingga 0,97 pada konsentrasi gula hingga 2,0 M dalam reaktor *fixed-bed* kontinyu. Faktor imobilisasi yang diperoleh sebesar 0,93 dengan konstanta Michaelis-Menten (Km) 0,029 M dan kecepatan maksimum (Vmax) 1,37 mmol menit⁻¹ mg⁻¹.

2.2.1.2. Reaksi Fermentasi Asam Laktat

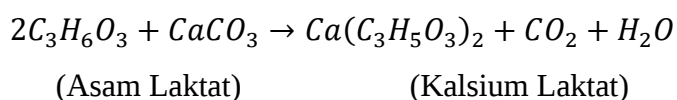
Glukosa dan fruktosa difermentasi secara anaerobik oleh *Lactobacillus delbrueckii* menjadi asam laktat melalui jalur glikolisis (Embden Meyerhof Parnas). Reaksi ini bersifat eksotermis.



Kotzamanidis et al. (2002) melaporkan bahwa fermentasi asam laktat menggunakan *Lactobacillus delbrueckii* NCIMB 8130 dengan media molase bit menghasilkan konsentrasi asam laktat maksimum sebesar 88,0 g/L pada kondisi optimum (sukrosa 89,93 g/L, yeast extract 45,71 g/L, CaCO₃ 59,95 g/L). Kondisi operasi optimum diperoleh pada pH 6,0 dan suhu 40°C.

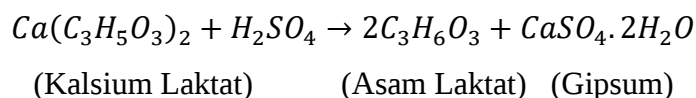
2.2.1.3. Reaksi Netralisasi

Asam laktat yang terbentuk selama fermentasi akan menurunkan pH dan menghambat pertumbuhan bakteri. Oleh karena itu, asam laktat dinetralkan dengan penambahan kalsium karbonat (CaCO₃) untuk membentuk kalsium laktat yang tidak bersifat toksik bagi bakteri dan menjaga pH tetap optimal (pH 6,0).



2.2.1.4. Reaksi Asidifikasi

Kalsium laktat yang terbentuk kemudian diasidifikasi dengan asam sulfat (H₂SO₄) untuk melepaskan kembali asam laktat dan membentuk endapan gipsum (CaSO₄·2H₂O) yang dapat dipisahkan.



Min et al. (2011) melaporkan bahwa rasio molar Ca(LA)₂ : H₂SO₄ optimum adalah 1:1 untuk pengendapan gipsum yang efisien. Pada kondisi pH > 3,86, kalsium sulfat dapat diendapkan dan dihilangkan secara efisien. Yield asam laktat keseluruhan yang diperoleh sebesar 92%.

2.2.2. Mekanisme Reaksi

Proses sintesis asam laktat dari molase berlangsung melalui beberapa tahap reaksi berurutan. Pada tahap pertama, sukrosa dalam molase dihidrolisis menjadi glukosa dan fruktosa dengan bantuan enzim invertase yang diimobilisasi pada matriks nilon-6. Enzim invertase memecah ikatan glikosidik α-1,2 pada sukrosa, menghasilkan glukosa dan fruktosa. Senyawa glukosa kemudian difermentasi oleh bakteri *Lactobacillus delbrueckii* menghasilkan asam laktat. Bakteri *L. delbrueckii* mengubah glukosa menjadi asam laktat melalui serangkaian reaksi enzimatik dalam jalur glikolisis (EMP pathway). Karena asam laktat yang terbentuk dapat menghambat pertumbuhan bakteri, maka dilakukan netralisasi *in-situ* dengan penambahan CaCO₃ membentuk kalsium laktat. Reaksi netralisasi ini memungkinkan akumulasi produk (kalsium laktat) dalam konsentrasi tinggi tanpa menghambat pertumbuhan

bakteri. Selanjutnya, kalsium laktat diasidifikasi dengan H_2SO_4 menghasilkan asam laktat bebas dan endapan gipsum.

2.2.3. Kondisi Operasi

Reaksi pembentukan asam laktat dari molase berlangsung melalui reaksi hidrolisis enzimatis dan fermentasi dengan kondisi operasi sebagai berikut:

Tabel 2. 5 Kondisi Operasi Reaksi Utama

Reaksi	Suhu (°C)	Tekanan (atm)	Waktu Reaksi	Keterangan
Hidrolisis Sukrosa	50	1	Kontinyu	Enzim Invertase, Konversi 97,8% (Amaya-Delgado et al., 2006)
Fermentasi Asam Laktat	40	1	24 jam	<i>Batch</i> , <i>L. delbrueckii</i> , pH 6,0 (Kotzamanidis et al., 2002)
Netralisasi	40	1	<i>In-situ</i>	CaCO_3 , pH 6,0
Asidifikasi	40	1	-	H_2SO_4 98%, pH > 3,86 (Min et al., 2011)

2.2.4. Tinjauan Termodinamika

Tinjauan termodinamika digunakan untuk menjelaskan karakteristik reaksi yang terjadi, khususnya terkait perubahan panas reaksi, apakah bersifat eksotermis atau endotermis. Jika nilai ΔH°_f bernilai negatif, maka reaksi melepaskan panas (eksotermis), sedangkan jika ΔH°_f bernilai positif, reaksi menyerap panas (endotermis).

2.2.4.1. Entalpi Reaksi Standar (ΔH°_{rxn}) Hidrolisis Sukrosa

Tabel 2. 6 Entalpi Pembentukan Standar (ΔH°_f) Komponen Hidrolisis Sukrosa pada 25°C
(Smith & Van Ness, 2018 App. C)

Komponen	ΔH°_f (kJ/mol)
Sukrosa ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$)	-2226,5
Glukosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)	-1273,9
Fruktosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)	-1273,9
Air (H_2O) cair	-285,8

Dalam mencari nilai entalpi reaksi (ΔH°_{rxn}) pada reaksi hidrolisis sukrosa menggunakan rumus:

$$\Delta H_{rxn} = \sum \Delta H_f, \text{produk} - \sum \Delta H_f, \text{reaktan}$$

Jadi bila dihitung adalah sebagai berikut:

$$\Delta H_{rxn} = (\Delta H_{glukosa} + \Delta H_{fruktosa}) - (\Delta H_{sukrosa} + \Delta H_{air})$$

$$= (-1273,9 + -1273,9) - (-2226,5 + -285,8) \text{ kJ/mol} = -35,5 \text{ kJ/mol}$$

Didapatkan hasil entalpi reaksi (ΔH°_{rxn}) pada reaksi hidrolisis sukrosa sebesar -35,5 kJ/mol. Karena hasilnya negatif, maka reaksi tersebut bersifat **eksotermis** (melepas panas).

2.2.4.2. Energi Bebas Gibbs Standar (ΔG°_{rxn}) dan Konstanta Keseimbangan Hidrolisis Sukrosa

Menurut Josiah Willard Gibbs (1873), energi Gibbs pembentukan standar suatu senyawa merupakan perubahan energi bebas yang terjadi ketika 1 mol senyawa tersebut terbentuk dari unsur-unsur penyusunnya dalam keadaan standar.

Tabel 2. 7 Nilai Energi Bebas Gibbs Pembentukan Standar (ΔG°_f) Komponen Hidrolisis Sukrosa pada 25°C (Smith & Van Ness, 2018, App. C)

Komponen	ΔG°_f (kJ/mol)
Sukrosa ($C_{12}H_{22}O_{11}$)	-1543,0
Glukosa ($C_6H_{12}O_6$)	-917,0
Fruktosa ($C_6H_{12}O_6$)	-916,0
Air (H_2O) cair	-237,1

Dalam mencari nilai energi bebas Gibbs reaksi pada proses hidrolisis sukrosa menggunakan rumus:

$$\Delta G_{rxn} = \sum \Delta G_f, \text{produk} - \sum \Delta G_f, \text{reaktan}$$

Jadi bila dihitung adalah sebagai berikut:

$$\Delta G_{rxn} = (\Delta G_{glukosa} + \Delta G_{fruktosa}) - (\Delta G_{sukrosa} + \Delta G_{air})$$

$$= (-917,0 + -916,0) - (-1543,0 + -237,1) = -52,9 \text{ kJ/mol}$$

Nilai energi bebas Gibbs reaksi hidrolisis sukrosa pada suhu 25°C diperoleh sebesar -52,9 kJ/mol. Nilai ΔG°_{rxn} yang negatif menunjukkan bahwa reaksi hidrolisis sukrosa berlangsung secara spontan secara termodinamika.

Kemudian hitung konstanta keseimbangan dengan melalui cara berikut:

$$\text{Pada } T = 298,15 \text{ K}$$

$$-\ln K = \frac{\Delta G^{\circ}}{RT}$$

$$-\ln K = -\frac{52,9}{0,008314 \times 298,15}$$

$$-\ln K = -21,34$$

$$K = 1,5 \times 10^9$$

Berdasarkan perhitungan energi bebas Gibbs pada suhu 298,15 K, diperoleh nilai konstanta kesetimbangan reaksi hidrolisis sukrosa sebesar $1,5 \times 10^9$. Nilai ini mengindikasikan bahwa reaksi hidrolisis sukrosa berlangsung sangat dominan ke arah pembentukan produk (glukosa dan fruktosa) dan secara praktis berlangsung ireversibel.

2.2.4.3. Entalpi Reaksi Standar ($\Delta H^\circ_{\text{rxn}}$) Fermentasi Asam Laktat

Tabel 2. 8 Entalpi Pembentukan Standar (ΔH°_f) Komponen Fermentasi Asam Laktat pada 25°C (Smith & Van Ness, 2018, App. C; CRC Handbook, 2019)

Komponen	ΔH°_f (kJ/mol)
Glukosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)	-1273,9
Asam Laktat ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$)	-694,0

Dalam mencari nilai entalpi reaksi ($\Delta H^\circ_{\text{rxn}}$) pada reaksi fermentasi asam laktat menggunakan rumus:

$$\Delta H_{\text{rxn}} = \sum \Delta H_f, \text{produk} - \sum \Delta H_f, \text{reaktan}$$

Jadi jika dihitung adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{rxn}} &= (2 \times \Delta H_{\text{asamlaktat}}) - (\Delta H_{\text{glukosa}}) \\ &= (2 \times -694,0) - (-1273,9) \text{ kJ/mol} = -114,1 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

Didapatkan hasil entalpi reaksi ($\Delta H^\circ_{\text{rxn}}$) pada reaksi fermentasi asam laktat sebesar -114,1 kJ/mol glukosa. Karena hasilnya negatif, maka reaksi tersebut bersifat eksotermis (melepas panas).

2.2.4.4. Energi Bebas Gibbs Standar ($\Delta G^\circ_{\text{rxn}}$) dan Konstanta Kesetimbangan Fermentasi Asam Laktat

Tabel 2. 9 Nilai Energi Bebas Gibbs Pembentukan Standar (ΔG°_f) Komponen Fermentasi Asam Laktat pada 25°C (Smith & Van Ness, 2018, App. C; CRC Handbook, 2019)

Komponen	ΔG°_f (kJ/mol)
Glukosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)	-917,0
Asam Laktat ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$)	-524,0

Dalam mencari nilai energi bebas Gibbs reaksi pada proses fermentasi asam laktat menggunakan rumus:

$$\Delta G_{\text{rxn}} = \sum \Delta G_f, \text{produk} - \sum \Delta G_f, \text{reaktan}$$

Jadi bila dihitung adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \Delta G_{\text{rxn}} &= (2 \times \Delta G_{\text{asamlaktat}}) - (\Delta G_{\text{glukosa}}) \\ &= (2 \times -524,0) - (-917,0) = -131,0 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

Nilai energi bebas Gibbs reaksi fermentasi asam laktat pada suhu 25°C diperoleh sebesar -131,0 kJ/mol. Nilai $\Delta G^\circ_{\text{rxn}}$ yang negatif menunjukkan bahwa reaksi fermentasi asam

laktat berlangsung secara spontan secara termodinamika.

Kemudian, dapat dihitung konstanta kesetimbangan pada suhu operasi fermentasi (40°C = 313,15 K) dengan menggunakan persamaan Van't Hoff:

$$\ln\left(\frac{K_2}{K_1}\right) = -\Delta H_R \left(\left(\frac{1}{T_2} \right) - \left(\frac{1}{T_1} \right) \right)$$

$$\text{Pada } T_1 = 298,15 \text{ K}$$

$$-\ln K_1 = \left(\frac{\Delta G}{RT_1} \right)$$

$$-\ln K_1 = \frac{-131,0}{0,008314 \times 298,15}$$

$$-\ln K_1 = -52,86$$

$$K_1 = 9,3 \times 10^{22}$$

$$\text{Pada } T_2 = 313,15 \text{ K (40°C)}$$

$$\ln\left(\frac{K_2}{9,3 \times 10^{22}}\right) = \left(- - \frac{114,1}{0,008314} \right) \left(\frac{1}{313,15} \right) - \left(\frac{1}{298,15} \right)$$

$$\ln\left(\frac{K_2}{9,3 \times 10^{22}}\right) = 13724,3 \times (-0,0001607)$$

$$\ln\left(\frac{K_2}{9,3 \times 10^{22}}\right) = -2,205$$

$$\frac{K_2}{9,3 \times 10^{22}} = 0,1103$$

$$K_2 = 1,03 \times 10^{22}$$

Berdasarkan perhitungan energi bebas Gibbs pada suhu 313,15 K (40°C), diperoleh nilai konstanta kesetimbangan reaksi fermentasi asam laktat sebesar $1,03 \times 10^{22}$. Nilai ini mengindikasikan bahwa reaksi fermentasi asam laktat berlangsung sangat dominan ke arah pembentukan produk (asam laktat) dan secara praktis berlangsung ireversibel.

2.2.4.5. Nilai Termodinamika

Tabel 2. 10 Nilai Termodinamika Reaksi Utama

Reaksi	$\Delta H^\circ_{\text{rxn}}$ (kJ/mol)	$\Delta G^\circ_{\text{rxn}}$ (kJ/mol)	K (25°C)	Sifat
Hidrolisis Sukrosa	-35,5	-52,9	$1,5 \times 10^9$	Eksotermis, Spontan
Fermentasi Asam Laktat	-114,1	-131,0	$9,3 \times 10^{22}$	Eksotermis, Spontan

2.2.5. Tinjauan Kinetika

Secara umum, derajat kelangsungan reaksi ditentukan oleh konstanta kecepatan reaksi (k), orde reaksi, dan konsentrasi reaktan. Tinjauan kinetika diperlukan untuk menentukan waktu reaksi, ukuran reaktor, dan kondisi operasi optimum.

2.2.5.1. Kinetika Reaksi Hidrolisis Sukrosa

Reaksi hidrolisis sukrosa dengan enzim invertase mengikuti kinetika reaksi orde-2 (bimolekular) yang dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$(-r_A) = \frac{(V_{max} \times C_A)}{\left(K_m + C_A + \frac{C_A^2}{K_i}\right)}$$

Berdasarkan penelitian Amaya-Delgado et al. (2006) untuk enzim invertase yang diimobilisasi pada nilon-6, diperoleh parameter kinetika sebagai berikut:

Tabel 2. 11 Parameter Kinetika Hidrolisis Sukrosa dengan Enzim Invertase (Amaya-Delgado et al.,2006)

Parameter	Nilai	Satuan
Laju Alir (FA0)	15,7	mol/menit
Konsentrasi Sukrosa	1,2	M
CA	2,66	mol/L
Vmax	1,06	mol/menit
Ki	0,69	M
Km	0,029	M
Suhu operasi (T)	323,15	K (50°C)

Persamaan desain reaktor *packed bed* (PBR) isothermal pada suhu 50°C:

$$\frac{W}{F_{A0}} = \int_0^x \frac{dX}{-r_A}$$

Menggunakan persamaan tersebut, untuk mencapai konversi sukrosa 97,8% pada suhu 50°C, diperlukan waktu tinggal (*residence time*) tertentu yang menjadi dasar perancangan volume reaktor dan jumlah katalis yang dibutuhkan. Menurut Amaya-Delgado et al. (2006) sistem *fixed-bed* dengan enzim invertase terimobilisasi menunjukkan produktivitas yang sangat baik hingga konsentrasi gula 1,2 M, dengan faktor konversi 0,95 hingga 0,97 tergantung pada konsentrasi sukrosa umpan.

2.2.5.2. Kinetika Fermentasi Asam Laktat

Fermentasi asam laktat oleh *Lactobacillus delbrueckii* mengikuti model kinetika Monod yang memperhitungkan pertumbuhan biomassa, konsumsi substrat, dan pembentukan produk (Monod, 1949; Luedeking & Piret, 1959).

Model kinetika Monod untuk pertumbuhan biomassa:

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{max} \cdot \left(\frac{S}{K_S + S} \right) \cdot X$$

Laju konsumsi substrat:

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{1}{Y_{x/s}} \cdot \left(\frac{dX}{dt}\right)$$

Laju pembentukan produk (Luedeking-Piret):

$$\frac{dP}{dt} = Y_{p/s} \cdot \left(-\frac{dS}{dt}\right)$$

Dimana:

- X= konsentrasi biomassa (g/L)
- S = konsentrasi substrat (g/L)
- P = konsentrasi produk (g/L)
- μ_{max} = laju pertumbuhan spesifik maksimum (jam^{-1})
- K_s = konstanta saturasi Monod (g/L)
- $Y_{x/s}$ = yield biomassa terhadap substrat (g/g)
- $Y_{p/s}$ = yield produk terhadap substrat (g/g)

Berdasarkan Kotzamanidis et al. (2002) untuk fermentasi asam laktat menggunakan *Lactobacillus delbrueckii* NCIMB 8130 dengan media molase bit, diperoleh parameter kinetika sebagai berikut:

Tabel 2. 12 Parameter Kinetika Fermentasi Asam Laktat oleh *Lactobacillus delbrueckii* Kotzamanidis et al. (2002)

Parameter	Nilai	Satuan
μ_{max} (laju pertumbuhan spesifik maksimum)	0,083	jam^{-1}
K_s (konstanta saturasi Monod)	4,64	g/L
$Y_{p/s}$ (yield produk dari substrat)	0,967	g/g
$Y_{x/s}$ (yield biomassa dari substrat)	0,033	g/g

Untuk menyelesaikan persamaan diferensial simultan tersebut, digunakan metode Runge-Kutta Orde 4 (RK4). Metode RK4 adalah metode numerik untuk menyelesaikan persamaan diferensial biasa dengan akurasi tinggi, di mana nilai baru dihitung berdasarkan rata-rata tertimbang dari empat perkiraan kemiringan (k_1, k_2, k_3, k_4) pada setiap langkah waktu (Chapra & Canale, 2010). Langkah waktu (Δt) yang digunakan adalah 1 jam. Kondisi awal fermentasi:

Tabel 2. 13 Kondisi Awal Fermentasi Asam Laktat

Parameter	Nilai	Satuan
-----------	-------	--------

S_0 (konsentrasi substrat awal)	92,73	g/L
X_0 (konsentrasi biomassa awal)	1	g/L
P_0 (konsentrasi produk awal)	0	g/L
Waktu fermentasi (t)	24	jam

Berdasarkan hasil perhitungan RK4, diperoleh profil konsentrasi biomassa, substrat, dan produk terhadap waktu fermentasi sebagai berikut:

Tabel 2. 14 Profil Fermentasi Asam Laktat (Hasil Perhitungan RK4)

Waktu (jam)	Biomassa, X (g/L)	Substrat, S (g/L)	Produk, P (g/L)
0	1,00	92,73	0
4	1,30	81,87	10,43
8	1,69	67,88	23,87
12	2,19	50,02	41,03
16	2,80	27,89	62,33
20	3,46	4,69	84,95
23	3,70	0,04	90,43

Dari hasil perhitungan RK4 pada Tabel 2.14, dapat disimpulkan:

- Konversi glukosa pada jam ke-24, konsentrasi glukosa tersisa hanya 0,04 g/L dari 92,73 g/L awal, sehingga konversi glukosa mencapai 99,96%.
- Konsentrasi produk pada jam ke-23, konsentrasi asam laktat yang terbentuk mencapai 90,43 g/L, sesuai dengan target teoritis ($0,967 \times 92,73 \approx 89,67$ g/L). Kotzamanidis et al. (2002) melaporkan konsentrasi asam laktat maksimum sebesar 88,0 g/L pada kondisi optimum.
- Waktu fermentasi berdasarkan profil tersebut, fermentasi dapat dihentikan pada jam ke-24 karena hampir seluruh glukosa telah terkonversi dan konsentrasi produk tidak meningkat signifikan setelah jam tersebut.

Disajikan pada tabel 2.15 yakni hasil fermentasi sebagai berikut.

Tabel 2. 15 Hasil Fermentasi Asam Laktat

Parameter	Nilai	Satuan
Waktu fermentasi	24	jam
Konversi glukosa	99,96	%
Yield produk ($Y_{p/s}$ aktual)	0,975	g/g
Konsentrasi produk akhir (P)	90,43	g/L

Produktivitas volumetrik	3,77	g/L.jam
--------------------------	------	---------

2.3. Langkah Proses

Terdapat 4 tahapan utama dalam proses pembuatan asam laktat dari molase melalui proses ini yaitu persiapan bahan baku, hidrolisis, fermentasi, dan pemurnian produk. Berikut merupakan penjelasannya:

2.3.1. Tahap Persiapan Bahan Baku

Tahap persiapan bahan baku bertujuan untuk memastikan bahwa bahan yang masuk ke reaktor hidrolisis berada dalam kondisi yang sesuai sehingga reaksi dapat berlangsung secara optimal. Bahan baku utama proses ini adalah molase yang didapat dari pabrik gula di Indonesia. Molase disimpan pada tangki penyimpanan (T-101) pada suhu 30°C dan tekanan atmosfer.

Pretreatment dilakukan dengan mengencerkan molase menggunakan air hingga mencapai konsentrasi sukrosa 1,2 M. Pengenceran ini bertujuan untuk menurunkan viskositas molase dan mencapai kondisi optimum untuk proses hidrolisis enzimatis. Berdasarkan penelitian Amaya-Delgado et al. (2006), sistem *fixed-bed* dengan enzim invertase terimobilisasi menunjukkan produktivitas yang sangat baik pada konsentrasi gula 1,2 M. Proses pengenceran dilakukan dalam tangki pengenceran I (T-102) pada suhu 50°C dengan pengadukan.

2.3.2. Tahap Hidrolisis

Tahap hidrolisis merupakan tahap pemecahan sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa. Reaksi yang terjadi adalah reaksi hidrolisis antara sukrosa dan air dengan bantuan enzim invertase yang diimobilisasi pada nilon-6. Reaksi dilakukan di dalam reaktor *packed bed* (PBR) R-101 yang dioperasikan secara kontinu, pada suhu 50°C dan tekanan 1 atm. Amaya-Delgado et al. (2006) menyatakan bahwa enzim invertase yang diimobilisasi pada nilon-6 memiliki stabilitas termal yang meningkat 25% pada suhu 50°C dibandingkan enzim bebas, dan sistem *fixed-bed* mampu mencapai faktor konversi 0,95 hingga 0,97.

Hasil hidrolisis yang mengandung glukosa, fruktosa, dan pengotor lainnya kemudian diencerkan kembali hingga konsentrasi gula total mencapai 10% dalam tangki pengenceran II (T-103) pada suhu 40°C. Pengenceran ini bertujuan mencapai kondisi optimum fermentasi, yaitu konsentrasi gula awal sekitar 100 g/L sesuai dengan penelitian Kotzamanidis et al. (2002) yang memperoleh konsentrasi asam laktat maksimum pada konsentrasi sukrosa 89,93 g/L.

2.3.3. Tahap Fermentasi

Tahap fermentasi merupakan inti dari proses produksi asam laktat. *Starter Lactobacillus*

delbrueckii NCIMB 8130 ditumbuhkan dalam tangki inokulum menggunakan media MRS broth pada suhu 37°C. Inokulum yang dihasilkan memiliki volume 10% dari volume fermentasi, dengan komposisi glukosa 20 g/L dan biomassa 1 g/L.

Larutan gula 10% dari T-103, inokulum, dan nutrisi tambahan (yeast extract 5% w/v, CaCO₃ 5,42% w/v) dimasukkan ke dalam reaktor fermentasi (R-102). Menurut Kotzamanidis et al. (2002) konsentrasi asam laktat maksimum (88,0 g/L) diperoleh pada kondisi optimum dengan konsentrasi sukrosa 89,93 g/L, yeast extract 45,71 g/L, dan CaCO₃ 59,95 g/L.. Fermentasi dilakukan secara *batch* pada suhu 40°C, tekanan 1 atm, dan pH 6,0. pH dijaga dengan penambahan CaCO₃ (327,19 kg/jam) yang juga berfungsi sebagai agen penetralisir untuk membentuk kalsium laktat. Proses fermentasi berlangsung selama 24 jam dengan pengadukan. Selama fermentasi, glukosa dikonversi menjadi asam laktat. CO₂ yang terbentuk dilepaskan dari reaktor. Berdasarkan hasil perhitungan RK4, konversi glukosa mencapai 99,96% pada jam ke-23 dengan konsentrasi produk akhir 90,43 g/L.

Untuk mendorong reaksi ke arah pembentukan produk dan menjaga pH optimum, CaCO₃ ditambahkan secara kontinu selama fermentasi. Penambahan CaCO₃ ini bertujuan untuk menetralkan asam laktat yang terbentuk sesuai dengan prinsip Le Chatelier.

2.3.4. Tahap Pemurnian

Setelah melewati proses fermentasi, produk masih mengandung impuritas berupa biomassa, sisa gula, garam, protein, dan kalsium laktat. Oleh karena itu, diperlukan tahap pemurnian produk untuk memperoleh asam laktat dengan kualitas yang sesuai.

Tahap awal pemurnian yaitu dengan memisahkan produk hasil fermentasi dengan biomassa dan padatan menggunakan unit mikrofiltrasi (MF-101). Mikrofiltrasi menggunakan membran dengan ukuran pori 0,1-1 µm untuk memisahkan sel bakteri (biomassa) dan padatan lainnya dari fase cair. Biomassa tertahan sebagai retentat dan dikeluarkan sebagai limbah. Filtrat yang jernih mengandung kalsium laktat terlarut, sisa gula, garam, dan pengotor lainnya.

Setelah itu, filtrat dari MF-101 diasidifikasi dengan asam sulfat (H₂SO₄) 98% dalam tangki asidifikasi (T-105) pada suhu 40°C dan pH > 3,86.. Berdasarkan penelitian Min et al. (2011), rasio molar Ca(LA)₂ : H₂SO₄ optimum adalah 1:1 untuk pengendapan gipsum yang efisien. Reaksi asidifikasi mengubah kalsium laktat menjadi asam laktat dan membentuk endapan gipsum. Suspensi dari tangki asidifikasi kemudian dialirkan ke unit filtrasi (F-101) untuk memisahkan endapan gipsum dari larutan asam laktat. *Wet cake* gipsum dikeluarkan sebagai limbah padat, sedangkan filtrat asam laktat kasar dilanjutkan ke tahap pemurnian.

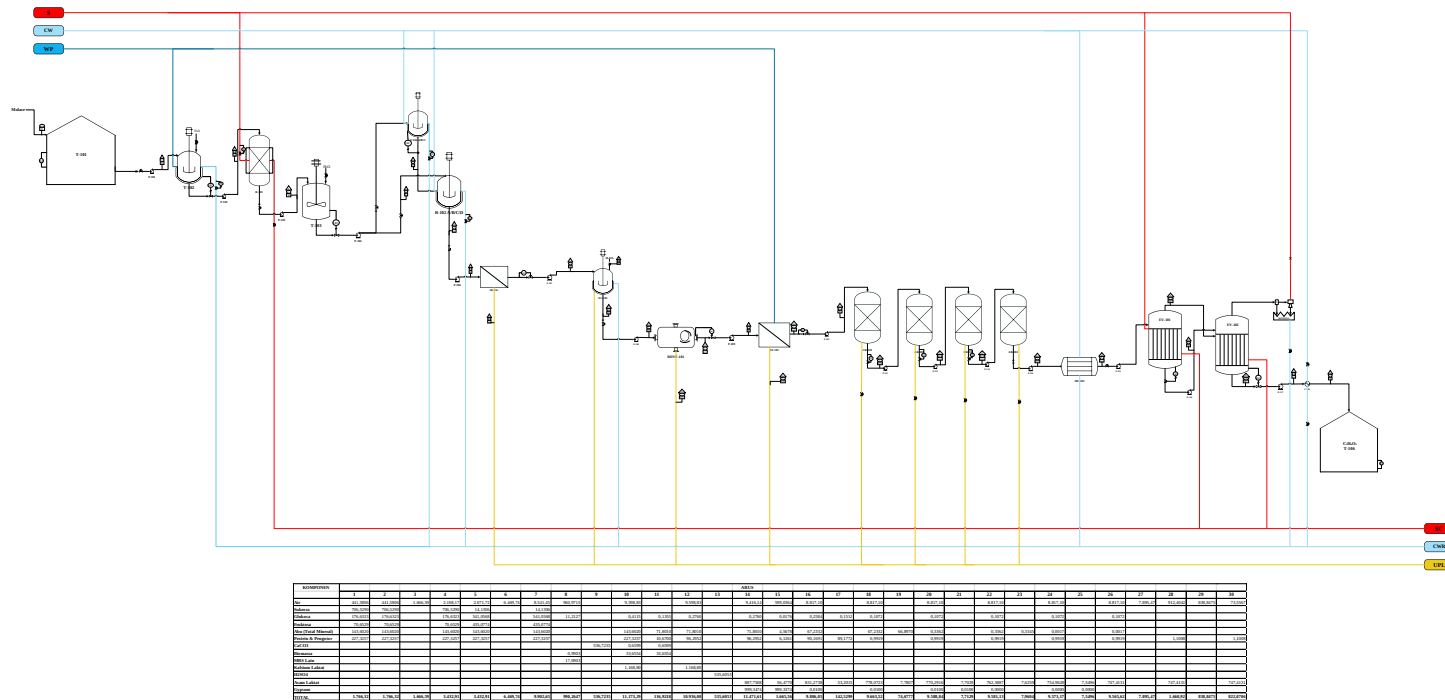
Proses pemurnian dilanjutkan dengan serangkaian proses menggunakan membran dan

resin penukar ion. Filtrat dari F-101 dilewatkan melalui membran ultrafiltrasi (UF-101) untuk menghilangkan sisa protein dan molekul organik besar lainnya. Selanjutnya, effluent UF dialirkan ke kolom resin penukar kation (Lewatit S2568H) untuk menghilangkan ion-ion positif seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , dan K^+ . Effluent dari kolom kation dialirkan ke kolom resin penukar anion (Lewatit S3428/S5221) untuk menghilangkan ion-ion negatif seperti SO_4^{2-} , Cl^- , dan anion organik. Proses double-pass dilakukan untuk memurnikan lebih lanjut dan mencapai kemurnian asam laktat yang sangat tinggi kemudian limbah pemurnian dikeluarkan.

Larutan asam laktat murni hasil resin masih memiliki konsentrasi rendah. Untuk mencapai konsentrasi sesuai spesifikasi produk, larutan dipekatkan menggunakan evaporator vakum dua tahap, larutan dipekatkan secara bertahap melalui 2 efek dan tekanan vakum. Panas disuplai oleh steam jenuh 120°C . Pada efek II (EV-102), larutan intermediate dipekatkan sesuai spesifikasi produk pada suhu sesuai kondisi operasi dan tekanan vakum. Uap air yang dihasilkan dari Efek I digunakan sebagai media pemanas pada Efek II (*heat integration*), sehingga menghemat konsumsi steam. Evaporasi vakum dilakukan pada suhu di bawah 120°C untuk mencegah degradasi termal asam laktat yang dapat terjadi pada suhu tinggi. Air yang menguap dikondensasikan dan dibuang. Asam laktat yang sudah sesuai spesifikasi produk hasil disimpan dalam tangki produk.

2.4. Diagram Alir Proses

DIAGRAM ALIR (*Flowsheet*)
PRA-RANCANGAN PABRIK ASAM LAKTAT DENGAN OPTIMASI PROSES FERMENTASI MELALUI INTEGRASI ENZIM
INVERTASE KAPASITAS 6600 TON/TAHUN



	PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA KIMIA INDUSTRI DEPARTEMEN TEKNOLOGI INDUSTRI SEKOLAH VOKASI UNIVERSITAS DIPONEGORO SEMARANG 2020
PIRA-RANCANGAN PABRIK ASAM LAKTAT DENGAN OPTIMASI PROSES FERMENTASI MELALUI INTEGRASI ENZIM ULTRAFILTRASI KAPASITAS 6600 TON/TAHUN	
DI GAMBAR OLEH :	Teguh Riyanta S.T., M.T.
Dosen Pembimbing :	40040122650004 40040122650005
1. Nisa Nur Kalyana	2. Rama Rizky Septiani
Kode	Nama Alat
AC-101	Acidifier-Crystallizer
AB-101, 102	Resin Anion
C-101	Cooler
CB-101, 102	Resin Kation
CV-101	Check Valve
EV-101 A/B	Evaporator (Efek 1 & II)
HE-102	Heat Exchanger
MF-101	Micellization
P-105, 108	Pompa Dosing
P-101, 102, 103, 104, 106, 107, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117	Pompa Sentrifugal
R-101	Reaktor Hidrolisis
R-102	Reaktor Fermentasi
RDV-101	Rotary Deep Vacuum Filter
T-101	Tangki Penyimpanan Molase
T-102, 103	Tangki Pengenceran
T-104	Tangki Isolasi
T-106	Tangki Penyimpanan Produk
UF-101	Ultrafiltrasi
	Steam
	Cooling Water
	Water Process
	Steam Condensat
	Cooling Water Return
	Slur Pumping Limbah
	NOMOR ARIS
	TEKANAN (atm)
	TEMPERATUR (°C)
ALIRAN PRODUK	
ALIRAN UDARA	

Gambar 2. 1 Diagram Alir Proses Pembuatan Asam Laktat dari Molase

Tabel 2. 16 Aliran Setiap Unit

Aliran	Deskripsi	Laju Massa Total (kg/jam)	Komponen Utama (kg/jam)
F1	Molase Masuk T-101	4.796,02	Sukrosa (1.918,45), Air (1.199,03), Glukosa (479,61)
F2	Air Tambahan T-102	1.319,90	Air (1.319,90)
F3	Keluar T-102 (Masuk R-101)	6.115,92	Sukrosa (1.918,45), Air (2.518,93), Glukosa (479,61)
F4	Keluar R-101	6.635,11	Glukosa (1.654,84), Fruktosa (1.454,15), Air (2.476,85)
F5	Air Tambahan T-103	3.053,02	Air (3.053,02)
F6	Keluar T-103 (Masuk Fermentasi)	9.688,13	Glukosa (1.654,84), Fruktosa (1.454,15), Air (5.529,87)
F7	Inokulum	127,81	Air (112,69), Glukosa (12,50), Biomassa (0,13)
F8	Nutrisi & CaCO ₃	629,10	CaCO ₃ (327,19), Yeast Extract (301,91)
F9	Keluar R-102 (<i>Broth</i>)	9.296,79	Kalsium Laktat (6.757,51), Air (2.088,36), Biomassa (155,38)
F10	Retentat MF-101	1.569,30	Biomassa (155,38), Air (1.109,59), Kalsium Laktat (145,78)
F11	Filtrat MF-101 (Masuk T-105)	7.743,82	Kalsium Laktat (6.611,73), Air (978,77), Sisa Gula (21,77)
F12	H ₂ SO ₄ 98%	1.383,63	H ₂ SO ₄ (1.355,99), Air (27,64)
F13	Suspensi T-105 (Masuk F-101)	9.269,77	Asam Laktat (5.215,27), Air (1.401,65), Gypsum (2.342,92)
F14	Wet Cake Gypsum	3.357,52	Gypsum (2.342,92), Air (1.014,61)
F15	Filtrat F-101 (Masuk REF-101)	5.755,64	Asam Laktat (5.215,27), Air (387,04), Pengotor (153,32)
F16	Limbah Pemurnian	688,71	Air (140,27), Protein (127,65), Abu (3,43), Gula (21,77)
F17	Asam Laktat Murni Encer	5.435,47	Asam Laktat (5.215,27), Air (219,13), Pengotor (1,50)
F18	Kondensat Air	2.015,28	Air (2.015,28)
F19	Produk Akhir Asam Laktat 90%	5.813,47	Asam Laktat (5.230,77), Air (581,20)

2.5. Neraca Massa

Neraca massa dihitung berdasarkan basis kapasitas produksi 6.600 ton/tahun atau 833,33 kg/jam asam laktat murni. Faktor pengali skala (*scale-up*) dari basis 1000 kg/jam.

2.5.1. Neraca Massa Tangki Penyimpanan Molase (T-101)

Tabel 2. 17 Neraca Massa T-101

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
Air	1.199,03	1.199,03
Sukrosa	1.918,45	1.918,45
Glukosa	479,61	479,61
Fruktosa	191,84	191,84
Abu (Total Mineral)	196,15	196,15
Protein & Pengotor Lainnya	810,94	810,94
Total	4.796,02	4.796,02

2.5.2. Neraca Massa Tangki Pengenceran I (T-102)

Tabel 2. 18 Neraca Massa T-102

Komponen	Dari T-101 (kg/jam)	Air Tambahan (kg/jam)	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
Air	1.199,03	1.319,90	2.518,93	2.518,93
Sukrosa	1.918,45	-	1.918,45	1.918,45
Glukosa	479,61	-	479,61	479,61
Fruktosa	191,84	-	191,84	191,84
Abu	196,15	-	196,15	196,15
Protein & Pengotor	810,94	-	810,94	810,94
Total	4.796,02	1.319,90	6.115,92	6.115,92

2.5.3. Neraca Massa Reaktor Hidrolisis (R-101)

Tabel 2. 19 Neraca Massa R-101

Komponen	Input (kg/jam)	Bereaksi (kg/jam)	Terbentuk (kg/jam)	Output (kg/jam)
Air	2.518,93	42,08	-	2.476,85
Sukrosa	1.918,45	1.876,27	-	42,18

Komponen	Input (kg/jam)	Bereaksi (kg/jam)	Terbentuk (kg/jam)	Output (kg/jam)
Glukosa	479,61	-	1.175,23	1.654,84
Fruktosa	191,84	-	1.262,31	1.454,15
Abu	196,15	-	-	196,15
Protein & Pengotor	810,94	-	-	810,94
Total	6.115,92	1.918,35	2.437,54	6.635,11

2.5.4. Neraca Massa Tangki Pengenceran II (T-103)

Tabel 2. 20 Neraca Massa T-103

Komponen	Dari (kg/jam)	R-101 (kg/jam)	Air (kg/jam)	Tambahan (kg/jam)	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
Air	2.476,85		3.053,02		5.529,87	5.529,87
Glukosa	1.654,84		-		1.654,84	1.654,84
Fruktosa	1.454,15		-		1.454,15	1.454,15
Sukrosa	42,18		-		42,18	42,18
Abu	196,15		-		196,15	196,15
Protein & Pengotor	810,94		-		810,94	810,94
Total	6.635,11		3.053,02		9.688,13	9.688,13

2.5.5. Neraca Massa Reaktor Fermentasi (R-102)

Tabel 2. 21 Neraca Massa R-102

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
Media T-103	9.168,94	9.168,94
Inokulum	127,81	127,81
Yeast Extract	301,91	301,91
CaCO ₃	327,19	16,33
Air	5.529,87	2.088,36
Glukosa	1.654,84	32,44
Fruktosa	1.454,15	1.454,15

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
Sukrosa	42,18	42,18
Abu	196,15	4,90
Protein & Pengotor	810,94	258,20
Kalsium Laktat	-	6.757,51
CO ₂	-	620,93
Biomassa	127,81	155,38
Total	9.296,79	9.296,79

2.5.6. Neraca Massa Mikrofiltrasi (MF-101)

Tabel 2. 22 Neraca Massa MF-101

Komponen	Input (kg/jam)	Filtrat (kg/jam)	Retentat (kg/jam)
Air	2.088,36	978,77	1.109,59
Kalsium Laktat	6.757,51	6.611,73	145,78
Glukosa	32,44	21,77	10,67
Biomassa	155,38	-	155,38
CaCO ₃ sisa	16,33	-	16,33
Abu	4,90	2,45	2,45
Protein & Pengotor	258,20	129,10	129,10
Total	9.313,12	7.743,82	1.569,30

2.5.7. Neraca Massa Asidifikasi (T-105)

Tabel 2. 23 Neraca Massa T-105

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
Filtrat MF-101	7.886,14	-
H ₂ SO ₄ 98%	1.383,63	-
Air	978,77	1.401,65
Kalsium Laktat	6.611,73	-
H ₂ SO ₄	1.355,99	-
Asam Laktat	-	5.215,27
Gypsum	-	2.342,92
Glukosa	21,77	21,77

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
Abu	2,45	2,45
Protein & Pengotor	129,10	129,10
Total	9.269,77	9.269,77

2.5.8. Neraca Massa Filtrasi Gypsum (F-101)

Tabel 2. 24 Neraca Massa F-101

Komponen	Input (kg/jam)	Filtrat (kg/jam)	Wet Cake (kg/jam)
Air	1.401,65	387,04	1.014,61
Asam Laktat	5.215,27	5.215,27	-
Glukosa	21,77	21,77	-
Abu	2,45	2,45	-
Protein & Pengotor	129,10	129,10	-
Gypsum	2.342,92	0,01	2.342,91
Total	9.113,16	5.755,64	3.357,52

2.5.9. Neraca Massa Unit Pemurnian (REF-101)

Tabel 2. 25 Neraca Massa REF-101

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
Filtrat F-101	5.755,64	-
Asam Laktat	5.215,27	5.215,27
Air	387,04	219,13
Glukosa	21,77	0,02
Abu	2,45	0,01
Protein & Pengotor	129,10	1,47
Gypsum	0,01	0,01
Limbah (Retentat + Resin)	-	688,71
Total	5.755,64	6.124,62

2.5.10. Neraca Massa Evaporasi Vakum (EV-101 & EV-102)

Tabel 2. 26 Neraca Massa EV - 101 & EV 102

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
Larutan Asam Laktat Encer	5.435,47	-
Asam Laktat	5.215,27	5.230,77
Air	219,13	581,20
Pengotor	1,50	1,50

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
Uap Air Terkondensasi	-	2.015,28
Produk Akhir (90%)	-	5.813,47

2.6. Neraca Panas

Neraca panas dihitung untuk setiap unit proses untuk menentukan kebutuhan atau pelepasan energi (Q). Perhitungan didasarkan pada persamaan neraca energi *steady-state*:

$$Q = H_{out} - H_{in} + Q_{rxn}$$

Dengan $H = m \times C_p \times \Delta T$, di mana $\Delta T = T_{operasi} - T_{referensi}$ ($T_{referensi} = 25^\circ\text{C}$). Persamaan ini mengacu pada Smith & Van Ness (2018) Eq. 2.29, p. 48 untuk sistem terbuka *steady-state*. Data kapasitas panas (C_p) diperoleh dari Yaws (1999) dan Perry's Handbook, sedangkan data panas reaksi (ΔH_{rxn}) dihitung menggunakan Hukum Kirchhoff (Smith & Van Ness, 2018, Eq. 5.20, p. 162).

2.6.1. Neraca Panas Tangki Penyimpanan Molase (T-101)

Tabel 2. 27 Neraca Panas T-101

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	Cp (kJ/kg.K)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	H _{in} (kJ/jam)	H _{out} (kJ/jam)
Air	1.199,03	1.199,03	4,182	5	25.070	25.070
Sukrosa	1.918,45	1.918,45	1,619	5	15.532	15.532
Glukosa	479,61	479,61	1,619	5	3.882	3.882
Fruktosa	191,84	191,84	1,619	5	1.553	1.553
Abu	196,15	196,15	1,326	5	1.301	1.301
Protein & Pengotor	810,94	810,94	2,270	5	9.205	9.205
Total	4.796,02	4.796,02	-	-	56.543	56.543

$$Q = H_{out} - H_{in} = 56.543 - 56.543 = 0 \text{ kJ/jam}$$

2.6.2. Neraca Panas Tangki Pengenceran I (T-102)

Tabel 2. 28 Neraca Panas T-102

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	Cp (kJ/kg.K)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	H _{in} (kJ/jam)	H _{out} (kJ/jam)
Air	1.199,03	2.518,93	4,182	5 / 25	25.070	263.400
Sukrosa	1.918,45	1.918,45	1,619	5 / 25	15.532	77.660
Glukosa	479,61	479,61	1,619	5 / 25	3.882	19.410

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	Cp (kJ/kg.K)	ΔT (°C)	H _{in} (kJ/jam)	H _{out} (kJ/jam)
Fruktosa	191,84	191,84	1,619	5 / 25	1.553	7.765
Abu	196,15	196,15	1,326	5 / 25	1.301	6.503
Protein & Pengotor	810,94	810,94	2,270	5 / 25	9.205	46.023
Air Tambahan	-	1.319,90	4,182	25	-	138.000
Total	4.796,02	6.115,92	-	-	56.543	558.761

ΔT untuk input = 5°C (30 – 25), ΔT untuk output = 25°C (50 – 25)

$$Q = H_{out} - H_{in} = 558.761 - 56.543 = 502.218 \text{ kJ/jam}$$

2.6.3. Neraca Panas Reaktor Hidrolisis (R-101)

Tabel 2. 29 Neraca Panas R-101

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	Cp (kJ/kg.K)	ΔT (°C)	H _{in} (kJ/jam)	H _{out} (kJ/jam)
Air	2.518,93	2.476,85	4,183	25	263.400	259.000
Sukrosa	1.918,45	42,18	1,681	25	80.550	1.772
Glukosa	479,61	1.654,84	1,681	25	20.150	69.510
Fruktosa	191,84	1.454,15	1,681	25	8.060	61.105
Abu	196,15	196,15	1,320	25	6.473	6.473
Protein & Pengotor	810,94	810,94	2,283	25	46.285	46.285
Total	6.115,92	6.635,11	-	-	424.918	444.145

Panas reaksi (Q_{rxn}):

$$Mol \text{ sukrosa bereaksi} = 5,48 \text{ kmol/jam}$$

$$\Delta H_{rxn}(50^\circ C) = -35,7 \text{ kJ/mol}$$

$$Q_{rxn} = 5,48 \times (-35,7) \times 1000 = -195.636 \text{ kJ/jam}$$

Tabel 2. 30 Neraca Panas R-101 (Balance)

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Entalpi Masuk (H _{in})	424.918	-
Panas Reaksi (Q_{rxn})	-195.636	-

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Entalpi Keluar (H_{out})	-	444.145
Beban Pendingin (Q_c)	-214.863	-
Total	229.255	229.255

$$Q_c = H_{out} - H_{in} - Q_{rxn} = 444.145 - 424.918 - (-195.636) = 214.863 \text{ kJ/jam}$$

2.6.4. Neraca Panas Tangki Pengenceran II (T-103)

Tabel 2. 31 Neraca Panas T-103

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	Cp (kJ/kg.K)	ΔT (°C)	H_{in} (kJ/jam)	H_{out} (kJ/jam)
Air	2.476,85	5.529,87	4,182	25 / 15	259.000	346.870
Glukosa	1.654,84	1.654,84	1,619	25 / 15	66.980	40.228
Fruktosa	1.454,15	1.454,15	1,619	25 / 15	58.855	35.344
Sukrosa	42,18	42,18	1,619	25 / 15	1.707	1.025
Abu	196,15	196,15	1,323	25 / 15	6.489	3.893
Protein & Pengotor	810,94	810,94	2,276	25 / 15	46.146	27.672
Air Tambahan	-	3.053,02	4,182	15	-	191.590
Total	6.635,11	9.688,13	-	-	439.177	646.622

$$\Delta T \text{ untuk input} = 25^\circ\text{C} (50 - 25), \Delta T \text{ untuk output} = 15^\circ\text{C} (40 - 25)$$

$$Q = H_{out} - H_{in} = 646.622 - 439.177 = 207.445 \text{ kJ/jam}$$

2.6.5. Neraca Panas Reaktor Fermentasi (R-102)

Tabel 2. 32 Neraca Panas R-102 (per-batch)

Komponen	Input (kg/batch)	Output (kg/batch)	Cp (kJ/kg.K)	ΔT (°C)	H_{in} (kJ/batch)	H_{out} (kJ/batch)
Air	5.529,87	2.088,36	4,182	15	346.870	130.970
Glukosa	1.654,84	32,44	1,619	15	40.228	789
Fruktosa	1.454,15	1.454,15	1,619	15	35.344	35.344

Komponen	Input (kg/batch)	Output (kg/batch)	Cp (kJ/kg.K)	ΔT (°C)	H _{in} (kJ/batch)	H _{out} (kJ/batch)
Sukrosa	42,18	42,18	1,619	15	1.025	1.025
Abu	196,15	4,90	1,323	15	3.893	97
Protein & Pengotor	810,94	258,20	2,276	15	27.672	8.815
Kalsium Laktat	-	6.757,51	1,380	15	-	139.876
Biomassa	127,81	155,38	3,850	15	7.386	8.974
Yeast Extract	301,91	301,91	3,850	15	17.448	17.448
CaCO ₃	327,19	16,33	0,820	15	4.025	201
Total	9.296,79	9.296,79	-	-	483.891	343.539

Panas reaksi (Q_{rxn}):

Mol glukosa bereaksi = 9,18 kmol/batch

$\Delta H_{rxn}(40^\circ C) = -114,1 \text{ kJ/mol}$

$Q_{rxn} = 9,18 \times (-114,1) \times 1000 = -1.047.438 \text{ kJ/batch}$

Tabel 2. 33 Neraca Panas R-102 (Balance)

Komponen	Input (kJ/batch)	Output (kJ/batch)
Entalpi Masuk (H _{in})	483.891	-
Panas Reaksi (Q _{rxn})	-1.047.438	-
Entalpi Keluar (H _{out})	-	343.539
Beban Pendingin (Q _c)	-907.086	-
Total	-563.547	-563.547

$Q_c = H_{out} - H_{in} - Q_{rxn} = 343.539 - 483.891 - (-1.047.438) = 907.086 \text{ kJ/batch}$

2.6.6. Neraca Panas Mikrofiltrasi (MF-101)

Tabel 2. 34 Neraca Panas MF-101

Komponen	Input (kg/jam)	Output Filtrat (kg/jam)	Output Retentat (kg/jam)	Cp (kJ/kg.K)	ΔT (°C)	H _{in} (kJ/jam)	H _{out} (kJ/jam)
Air	2.088,36	978,77	1.109,59	4,182	15	130.970	130.970
Kalsium Laktat	6.757,51	6.611,73	145,78	1,380	15	139.876	139.876
Glukosa	32,44	21,77	10,67	1,619	15	789	789
Biomassa	155,38	-	155,38	3,850	15	8.974	8.974
CaCO ₃	16,33	-	16,33	0,820	15	201	201
Abu	4,90	2,45	2,45	1,323	15	97	97
Protein &	258,20	129,10	129,10	2,276	15	8.815	8.815

Komponen	Input (kg/jam)	Output Filtrat (kg/jam)	Output Retentat (kg/jam)	Cp (kJ/kg.K)	ΔT (°C)	H _{in} (kJ/jam)	H _{out} (kJ/jam)
Pengotor							
Total	9.313,12	7.743,82	1.569,30	-	-	289.722	289.722

$$Q = H_{out} - H_{in} = 289.722 - 289.722 = 0 \text{ kJ/jam}$$

2.6.7. Neraca Panas Asidifikasi (T-105)

Tabel 2. 35 Neraca Panas T-105

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	Cp (kJ/kg.K)	ΔT (°C)	H _{in} (kJ/jam)	H _{out} (kJ/jam)
Air	978,77	1.401,65	4,182	15	61.460	88.001
Asam Laktat	-	5.215,27	1,455	15	-	113.980
Kalsium	6.611,73	-	1,380	15	136.480	-
Laktat						
H ₂ SO ₄	1.355,99	-	1,400	15	28.476	-
Gypsum	-	2.342,92	1,090	15	-	38.157
Glukosa	21,77	21,77	1,619	15	529	529
Abu	2,45	2,45	1,323	15	49	49
Protein &	129,10	129,10	2,276	15	4.408	4.408
Pengotor						
Total	9.099,81	9.113,16	-	-	231.402	245.124

Panas reaksi (Q_{rxn}):

$$Mol \text{ CaLac bereaksi} = 30,32 \text{ kmol/jam}$$

$$\Delta H_{rxn} = -1.120 \text{ kJ/mol}$$

$$Q_{rxn} = 30,32 \times (-1.120) \times 1000 = -33.958.400 \text{ kJ/jam}$$

Tabel 2. 36 Neraca Panas T-105 (Balance)

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Entalpi Masuk (H _{in})	231.402	-
Panas Reaksi (Q _{rxn})	-33.958.400	-
Entalpi Keluar (H _{out})	-	245.124
Beban Pendingin (Q _c)	-33.972.122	-
Total	-33.726.998	-33.726.998

$$Q_c = H_{out} - H_{in} - Q_{rxn} = 245.124 - 231.402 - (-33.958.400) = 33.972.122 \text{ kJ/jam}$$

2.6.8. Neraca Panas Filtrasi Gypsum (F-101)

Tabel 2. 37 Neraca Panas F-101

Komponen	Input (kg/jam)	Output Filtrat (kg/jam)	Output Wet Cake (kg/jam)	Cp (kJ/kg.K)	ΔT (°C)	H _{in} (kJ/jam)	H _{out} (kJ/jam)
Air	1.401,65	387,04	1.014,61	4,182	15	88.001	88.001
Asam Laktat	5.215,27	5.215,27	-	1,455	15	113.980	113.980
Glukosa	21,77	21,77	-	1,619	15	529	529
Abu	2,45	2,45	-	1,323	15	49	49
Protein & Pengotor	129,10	129,10	-	2,276	15	4.408	4.408
Gypsum	2.342,92	0,01	2.342,91	1,090	15	38.157	38.157
Total	9.113,16	5.755,64	3.357,52	-	-	245.124	245.124

$$Q = H_{out} - H_{in} = 245.124 - 245.124 = 0 \text{ kJ/jam}$$

2.6.9. Neraca Panas Unit Pemurnian (REF-101)

Tabel 2. 38 Neraca Panas UF-101

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	Cp (kJ/kg.K)	ΔT (°C)	H _{in} (kJ/jam)	H _{out} (kJ/jam)
Air	387,04	219,13	4,182	10	16.192	9.165
Asam Laktat	5.215,27	5.215,27	1,455	10	75.882	75.882
Glukosa	21,77	0,02	1,619	10	353	0,3
Abu	2,45	0,01	1,323	10	32	0,1
Protein & Pengotor	129,10	1,47	2,276	10	2.939	33
Gypsum	0,01	0,01	1,090	10	0,1	0,1
Total	5.755,64	5.435,47	-	-	95.398	85.080

$$\Delta T = 10^\circ C (40 - 30)$$

Tabel 2. 39 Neraca Panas Resin Kation-Anion

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	Cp (kJ/kg.K)	ΔT (°C)	H _{in} (kJ/jam)	H _{out} (kJ/jam)
Air	219,13	219,13	4,182	5	4.583	4.583
Asam Laktat	5.215,27	5.215,27	1,455	5	37.941	37.941
Pengotor	1,50	1,50	2,276	5	17	17

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	Cp (kJ/kg.K)	ΔT (°C)	H _{in} (kJ/jam)	H _{out} (kJ/jam)
Total	5.435,90	5.435,90	-	-	42.541	42.541

Panas adsorpsi resin:

Kation: $-10 \text{ kJ/equiv} \times 1.990 \text{ equiv} = -19.900 \text{ kJ/jam}$

Anion: $-10 \text{ kJ/equiv} \times 2.310 \text{ equiv} = -23.100 \text{ kJ/jam}$

$Q_{ads \text{ total}} = -43.000 \text{ kJ/jam}$

Tabel 2. 40 Neraca Panas REF-101 (Balance)

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Entalpi Masuk (H _{in})	95.398	-
Panas Adsorpsi (Q _{ads})	-43.000	-
Entalpi Keluar (H _{out})	-	85.080
Beban Pendingin (Q _c)	-32.682	-
Total	52.398	52.398

2.6.10. Neraca Panas Evaporator Vakum (EV-101 & EV-102)

Tabel 2. 41 Neraca Panas EV-101 (Efek I)

Parameter	Nilai
Umpan masuk (F)	5.435,47 kg/jam
Suhu umpan (T _F)	30°C
Suhu operasi (T ₁)	115,5°C
Cp umpan	4,18 kJ/kg.K
L ₁ (keluar, 45% LA)	1.805,47 kg/jam
V ₁ (uap air)	3.630 kg/jam
λ(T ₁)	2.211,94 kJ/kg

Perhitungan:

$Q_{1, \text{sensibel}} = F \times Cp \times (T_1 - T_F)$

$Q_{1, \text{sensibel}} = 5.435,47 \times 4,18 \times (115,5 - 30) = 1.944.504 \text{ kJ/jam}$

$Q_{1, \text{laten}} = V_1 \times \lambda(T_1) = 3.630 \times 2.211,94 = 8.029.342 \text{ kJ/jam}$

$Q_{1, \text{total}} = 1.944.504 + 8.029.342 = 9.973.846 \text{ kJ/jam}$

Tabel 2. 42 Neraca Panas EV-101 (Balance)

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Entalpi Uman (H_F)	1.944.504	-
Panas dari Steam (Q_{steam})	8.413.478	-
Entalpi L_1 (H_{L1})	-	684.104
Entalpi V_1 (H_{V1})	-	9.673.878
Total	10.357.982	10.357.982

Tabel 2. 43 Neraca Panas EV-102 (Efek II)

Parameter	Nilai
Uman masuk (L_1)	1.805,47 kg/jam
Suhu umpan (T_1)	115,5°C
Suhu operasi (T_2)	104,8°C
$C_p L_1$	2,56 kJ/kg.K
L_2 (produk, 90% LA)	855,47 kg/jam
V_2 (uap air)	950 kg/jam
$\lambda(T_2)$	2.242,76 kJ/kg

Perhitungan:

$$Q_{\text{flash}} = L_1 \times C_p \times (T_1 - T_2) = 1.805,47 \times 2,56 \times (115,5 - 104,8) = 49.447 \text{ kJ/jam}$$

$$Q_{2, \text{laten}} = V_2 \times \lambda(T_2) = 950 \times 2.242,76 = 2.130.622 \text{ kJ/jam}$$

$$Q_{2, \text{net}} = 2.130.622 - 49.447 = 2.081.175 \text{ kJ/jam}$$

Tabel 2. 44 Neraca Panas EV-102 (Balance)

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Entalpi L_1 (H_{L1})	684.104	-
Panas dari V_1 (Q_{V1})	922.005	-
Entalpi L_2 (H_{L2})	-	476.850
Entalpi V_2 (H_{V2})	-	1.129.259
Total	1.606.109	1.606.109

Tabel 2. 45 Neraca Panas Evaporator *Double Effect*

Parameter	Efek I (EV-101)	Efek II (EV-102)	Total
Beban Panas (Q)	8.413.478 kJ/jam	922.005 kJ/jam	9.335.483 kJ/jam

Parameter	Efek I (EV-101)	Efek II (EV-102)	Total
Sumber Panas	Steam 120°C	Uap dari Efek I	Steam (Efek I)
Kebutuhan Steam	4.522 kg/jam	-	4.522 kg/jam
Air Diuapkan	3.630 kg/jam	950 kg/jam	4.580 kg/jam
Steam Economy	-	-	1,57 kg/kg

2.7. Tata Letak Pabrik dan Pemetaan

2.7.1. Lay Out Pabrik

Setelah penyusunan diagram alir proses selesai, tahapan berikutnya sebelum perancangan sistem perpipaan, struktur bangunan, dan kelistrikan adalah penyusunan tata letak (layout) pabrik beserta fasilitas penunjangnya. Penyusunan layout pabrik mencakup pengaturan area penyimpanan, area proses, dan area penunjang lain sehingga aliran bahan baku, produk, serta pekerja dapat berlangsung secara efisien dan aman. Beberapa aspek yang menjadi pertimbangan dalam menyusun layout Pabrik Asam Laktat dari Molase dengan kapasitas 6.600 ton/tahun ini, antara lain:

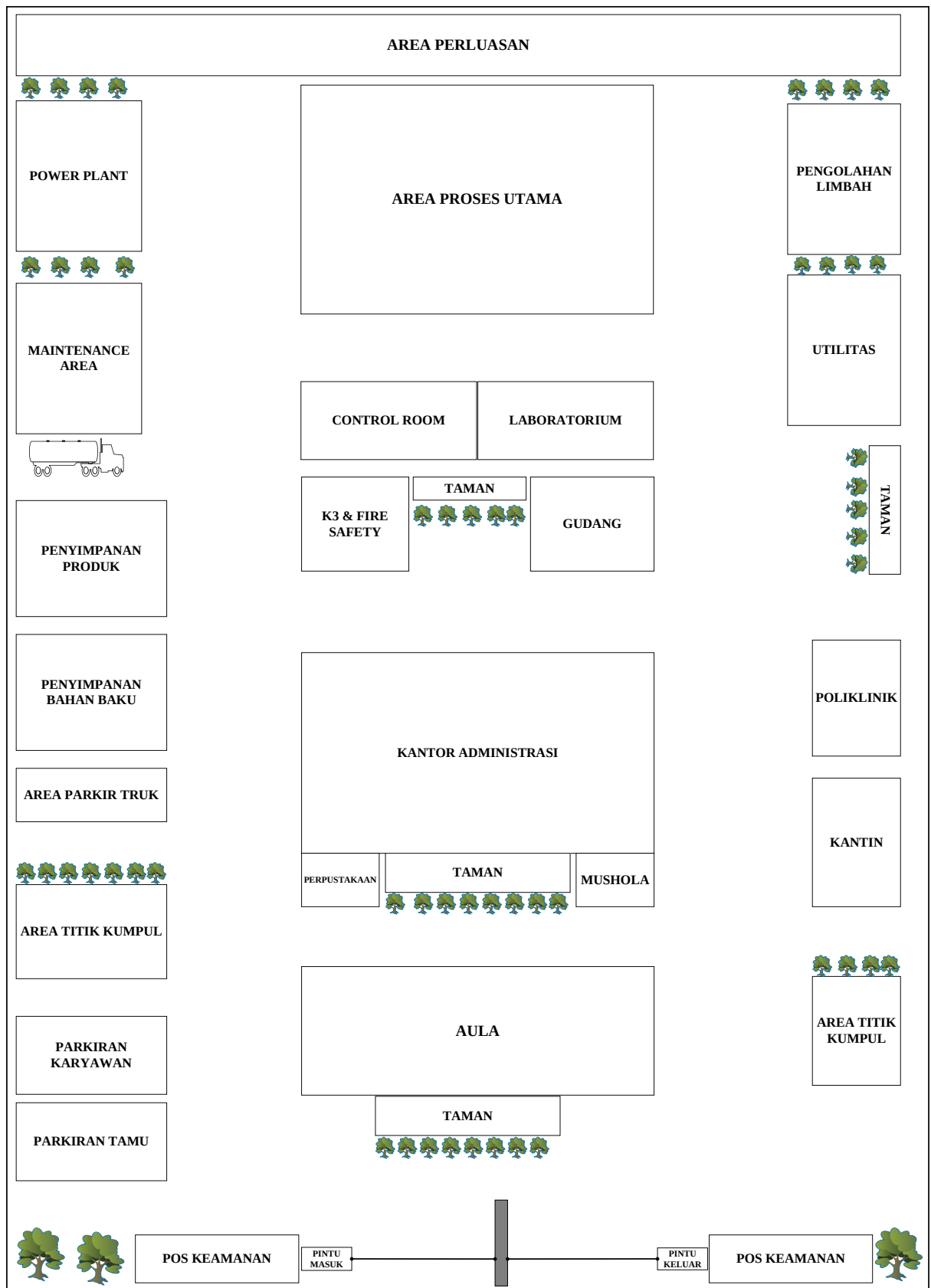
1. Ketersediaan dan luas lahan yang dimiliki.
2. Jenis dan mutu produk yang dihasilkan, yaitu asam laktat food grade/teknis.
3. Potensi pengembangan pabrik di masa mendatang.
4. Sistem distribusi bahan baku (molase), produk jadi, air, listrik, dan utilitas lainnya.
5. Kondisi lingkungan sekitar, cuaca, serta aspek sosial masyarakat.
6. Faktor keselamatan terhadap risiko kebakaran, ledakan, gas berbahaya, dan desain bangunan.
7. Pengaturan tata letak lantai serta perbedaan elevasi ruang.

Selain aspek-aspek di atas, terdapat beberapa ketentuan khusus yang diterapkan dalam pengaturan tata letak pabrik ini, yaitu:

1. Pos keamanan ditempatkan di dekat pintu masuk dan pintu keluar untuk memudahkan pengawasan lalu lintas orang, kendaraan, dan distribusi produk.
2. Area utilitas dan power plant diletakkan berdekatan dengan area proses utama agar distribusi steam, air, dan listrik ke peralatan proses lebih efisien.
3. Maintenance area ditempatkan berdekatan dengan area utilitas dan proses utama untuk

mempermudah kegiatan pengawasan, perawatan, dan perbaikan peralatan.

4. Unit pengolahan limbah (UPL) diletakkan di sisi belakang pabrik, berdekatan dengan area proses dan utilitas, agar penanganan limbah cair maupun padat lebih terpusat.
5. Mushola disediakan di dalam kawasan pabrik untuk menunjang kebutuhan ibadah karyawan.
6. Area taman disediakan secara memadai dan tersebar di beberapa titik untuk meningkatkan kenyamanan serta kualitas udara di lingkungan pabrik.
7. Area parkir disediakan terpisah untuk kendaraan karyawan, tamu, dan truk pengangkut bahan baku/produk.
8. Area titik kumpul disediakan di dua sisi pabrik sebagai lokasi evakuasi darurat.
9. Area perluasan pabrik disediakan sebagai cadangan lahan untuk pengembangan kapasitas produksi di masa mendatang.



Gambar 2. 2 Lay Out Pabrik

Tabel 2. 46 Keterangan Luas Tata Letak Pabrik

Nama Bangunan / Area	Luas Tanah (m²)	Luas Bangunan (m²)
Pos Keamanan	40	40
Gedung Kantor Utama	1.000	1.000
Kantin	200	200
Laboratorium	400	400
Unit Pemadam Kebakaran	500	500
Gudang	1.100	1.100
Kantor K3	500	500
Kantor Maintenance	500	500
Bengkel	500	600
Control Room	600	600
Masjid	400	400
Gedung Serbaguna	400	300
Klinik	300	300
Unit Pengolahan Limbah	700	200
Water Treatment	500	-
Unit Pembangkit Listrik	500	-
Utilitas	1.000	-
Area Proses	10.000	-
Parkiran	1.200	-
Jalan, Taman	1.500	-
Area Perluasan Pabrik	3.500	-
Lapangan	700	-
Total	26.040	6.640

2.7.2. Lay Out Peralatan Proses

Layout proses merupakan pengaturan letak peralatan produksi berdasarkan fungsi dan urutan kerjanya dalam alur proses (Suprpti, 2009). Dalam menentukan layout peralatan proses pada Pabrik Asam Laktat dari Molase ini, terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan, antara lain:

1. Aliran Bahan Baku dan Produk

Pengaliran bahan baku dan produk yang tepat memberikan keuntungan ekonomis serta menunjang kelancaran dan keamanan produksi. Pipa yang berada di atas permukaan tanah perlu dipasang pada ketinggian minimal 3 meter, sedangkan pemipaan pada permukaan tanah diatur agar tidak mengganggu lalu lintas pekerja.

2. Aliran Udara

Sirkulasi udara di dalam dan sekitar area proses perlu diperhatikan agar tidak terjadi stagnansi udara yang dapat menyebabkan akumulasi bahan kimia berbahaya bagi keselamatan pekerja.

3. Pencahayaan

Penerangan pada area pabrik, khususnya pada titik-titik proses berisiko tinggi seperti reaktor hidrolisis dan fermentasi, perlu diberikan penerangan tambahan.

4. Lalu lintas pekerja

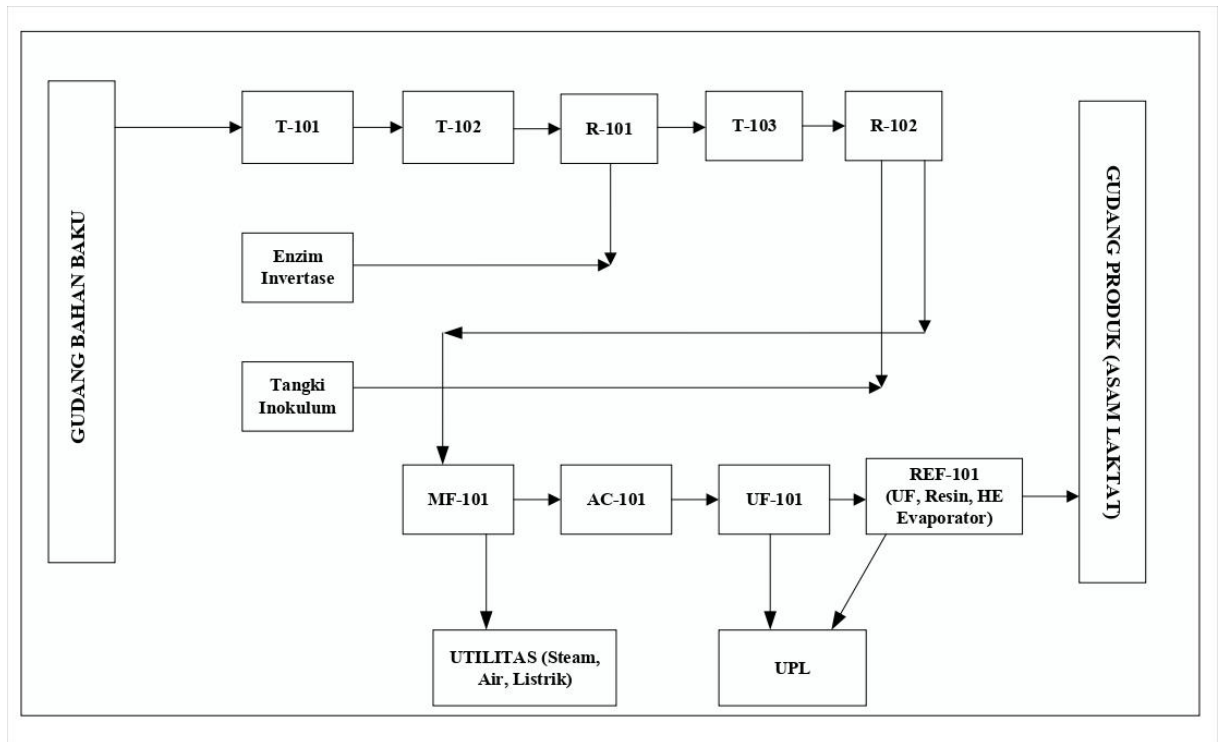
Perancangan layout peralatan perlu memastikan pekerja dapat menjangkau seluruh unit proses dengan cepat dan mudah untuk keperluan operasional maupun keadaan darurat.

5. Penempatan alat proses

Peralatan proses disusun mengikuti urutan alur produksi (T-101 hingga REF-101) agar biaya operasi dapat ditekan serta kelancaran dan keamanan produksi tetap terjamin.

6. Jarak antar peralatan

Reaktor fermentasi (R-102) dan reaktor hidrolisis (R-101), yang beroperasi pada kondisi suhu dan tekanan tertentu, ditempatkan dengan jarak aman terhadap peralatan lain agar potensi bahaya tidak merembet ke unit proses lainnya.



Gambar 2. 3 Lay Out Proses

Tabel 2. 47 Kode Peralatan pada Lay Out Proses

Kode	Nama Peralatan	Fungsi
T-101	Tangki Pencampur Bahan Baku	Mencampur dan melarutkan bahan baku dari gudang hingga konsentrasi umpan yang diinginkan
T-102	Tangki Pemanas Awal	Memanaskan larutan umpan sampai suhu operasi hidrolisis
R-101	Reaktor Hidrolisis	Menghidrolisis sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa dengan bantuan enzim invertase
T-103	Tangki Pendingin	Menurunkan suhu hidrolisat sampai kondisi optimum pertumbuhan mikroba
R-102	Fermentor	Mengubah gula menjadi asam laktat melalui fermentasi dengan inokulum dari tangki inokulum
MF-101	Mikrofiltrasi	Memisahkan sel mikroba dan padatan tersuspensi dari cairan fermentasi
AC-101	Kolom Karbon Aktif	Menghilangkan warna dan pengotor organik terlarut

Kode	Nama Peralatan	Fungsi
UF-101	Ultrafiltrasi	Memisahkan protein dan makromolekul sisa
REF-101	Unit Pemurnian (UF, resin penukar ion, heat exchanger, evaporator)	Memurnikan dan memekatkan asam laktat sampai spesifikasi produk
UPL	Unit Pengolahan Limbah	Mengolah limbah cair sebelum dibuang ke lingkungan