

BAB II

DESKRIPSI PROSES

2.1. Spesifikasi Bahan Baku dan Produk

2.1.1. Spesifikasi Bahan Baku

2.1.1.1. Molase

Menurut Jamir et al. (2021), molase adalah limbah cair akhir (concluding effluent) yang diperoleh dari proses pembuatan gula melalui metode evaporasi, sentrifugasi, dan kristalisasi berulang dari jus tebu. Secara umum, molases dapat didefinisikan sebagai bahan pakan cair yang mengandung lebih dari 43% gula . Spesifikasi molase adalah sebagai berikut.

A. Sifat Fisika

Warna	: Cokelat tua hingga hitam pekat
Tekstur	: Cairan kental, berat, dan gelap (viscous liquid)
Rasa	: Manis
Bentuk	: Cairan (liquid)
Kadar padatan kering	: 80–85%
Brix	: $\pm 85^{\circ}$ Brix
Kadar Gula Minimum	: >43%
pH	: 5,0 – 6,0

B. Sifat Kimia

Gula fermentasi total	: 45–55%
Sukrosa	: 29–40%
Glukosa	: 4–14%
Fruktosa	: 10–25%
Air	: 17–25%
Abu (mineral total)	: 7–15%
Protein	: 0.5–4.5%
Senyawa non-gula	: 2–3%
Kalium (K)	: 4–50.83%
Kalsium (Ca)	: 0.8–15%
Magnesium (Mg)	: 1–14%
Natrium (Na)	: 0.09–9%

Sulfat (SO ₄)	: 2.24–9.91%
Asam amino	: 0.3–1.5%
Asam non-nitrogen	: 1.5–8%
Lilin, sterol, fosfatida	: 0.1–1%
Biotin	: 0.1–2 ppm (0.36 mg/kg)
Riboflavin	: 1–6 ppm (1.8 mg/kg)

Komposisi abu dan pengotor organik dalam molase pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Komposisi Abu dan Pengotor dalam Molase (Jamir et al., 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

Menurut Amaya-Delgado et al., (2006), invertase (*Saccharomyces cerevisiae*, EC 3.2.1.26) adalah enzim yang mengkatalisis hidrolisis sukrosa. Hasil hidrolisis ini menghasilkan gula invert yang digunakan sebagai sirup kaya fruktosa, terutama untuk industri minuman. Spesifikasi enzim intervertase sebagai berikut.

A. Identitas Enzim

Nama enzim	: Invertase
Nama sistematis	: β -D-fructofuranosidase
Nomor EC	: E.C. 3.2.1.26
Reaksi yang dikatalisis	: Hidrolisis sukrosa (sucrose hydrolysis)
Sumber enzim	: <i>Saccharomyces cerevisiae</i> (komersial ekstraseluler)
Sumber komersial	: Fluka, USA

B. Sifat Fisika

Parameter	Enzim Bebas	Enzim Terimobilisasi
pH optimum	: 5.5	5.5
Suhu optimum	: 65°C	60°C
Rentang pH aktivitas maksimum	: 5.0–7.0	5.0–7.0
pH immobilisasi optimum	: -	5.0
Energi aktivasi (Arrhenius plot)	: 20.3 kJ mol ⁻¹	18.7 kJ mol ⁻¹

C. Sifat Kimia

Parameter	Enzim Bebas	Enzim Terimobilisasi
K _m	: 0.024 M	0.029 M
V _{max}	: 1.06 mmol min ⁻¹ mg ⁻¹	1.37 mmol min ⁻¹ mg ⁻¹
K _i	: 0.69 M	0.71 M

2.1.1.3. Kalsium Karbonat (CaCO₃)

Menurut Wahyuningsih et al. (2023), kalsium karbonat (CaCO₃) adalah senyawa kimia yang berwarna putih dengan kadar 50% dan umumnya sering dijumpai pada batu kapur (limestone), kalsit, marmer, dan batu gamping. Selain itu, CaCO₃ juga banyak dijumpai pada stalaktit dan stalagmit yang terdapat di daerah pegunungan.

A. Identitas Senyawa

Nama senyawa	: Kalsium karbonat
Rumus kimia	: CaCO ₃
Warna	: Putih
Kadar CaCO ₃ dalam batu PT SA	: 99,01%
Sumber utama	: Batu gamping (limestone), kalsit, marmer
Mineral penyusun	: Calspar (kalsit), aragonit
Mineral campuran	: Dolomit (CaCO ₃ ·MgCO ₃), lempung, pasir

B. Sifat Fisika

Warna	: Putih
Bentuk	: Padatan (serbuk/powder)
Ukuran produk	: 800 mesh dan 1.200 mesh
Kemasan produk 800 mesh	: 25 kg, 50 kg, 1 ton (jumbo bag)
Kemasan produk 1.200 mesh	: 40 kg
Kadar air batu (run of mine)	: 5–7%
Kadar air batu (stockpile)	: 2,5%

Kadar air batu (hammer mill) : 2,5%

Kadar air serbuk kalsium karbonat : 0,3%

C. Sifat Kimia

Rumus kimia : CaCO_3

Kandungan CaCO_3 : 99,01%

Kandungan CaO : 55,43%

Kandungan MgO : 0,24%

Kandungan MgCO_3 : 0,49%

Kandungan SiO_2 : 0,13%

Kandungan Fe_2O_3 : 0,01%

Kandungan Al_2O_3 : 0,03%

Kadar Fe_2O_3 maksimal : < 0,1%

2.1.1.4. Asam Sulfat (H_2SO_4)

Berdasarkan data PT Petrokimia Gresik, asam sulfat (H_2SO_4) adalah asam mineral (anorganik) yang kuat yang larut dalam air pada semua perbandingan. Asam sulfat merupakan salah satu produk utama industri kimia dengan kegunaan utama meliputi pemrosesan bijih mineral, sintesis kimia, pemrosesan air limbah, dan pengilangan minyak. Spesifikasi asam sulfat adalah sebagai berikut.

A. Identitas Senyawa

Nama senyawa : Asam Sulfat

Rumus kimia : H_2SO_4

Jenis : Asam mineral (anorganik) kuat

Kelarutan : Larut dalam air pada semua perbandingan

B. Sifat Fisika

Fase : Cair (liquid)

Temperatur produk : 45°C

Densitas (Density) : 1,820 – 1,825 g/L

C. Sifat Kimia

Konsentrasi H_2SO_4 : 98,5% (minimum)

Kandungan Besi (Fe) : 50 ppm (maksimum)

SO_2 (exit stack) : 0,2% (maksimum)

2.1.1.5. Nutrisi Fermentasi (Media MRS Broth)

Menurut Smitsa (2007), *Lactobacillus M.R.S. broth* adalah media non-selektif yang digunakan untuk kultivasi dan enumerasi cepat dari bakteri asam laktat. Media ini pertama kali dijelaskan oleh de Man, Rogosa dan Sharpe pada tahun 1960. Spesifikasi media MRS Broth sebagai berikut.

A. Identitas Media

Nama media	: <i>Lactobacillus M.R.S. Broth</i>
Jenis media	: Non-selektif
Fungsi	: Kultivasi dan enumerasi <i>Lactobacillus spp.</i>
Penemu	: de Man, Rogosa dan Sharpe (1960)

B. Sifat Fisika

Bentuk bubuk	: Kuning homogen
Warna larutan	: Amber gelap dengan sedikit kekeruhan
pH akhir	: $6,2 \pm 0,2$ pada 25°C
Suhu sterilisasi	: 121°C
Tekanan sterilisasi	: 15 lbs
Waktu sterilisasi	: 15 menit

C. Sifat Kimia

Proteose peptone	: 10,0
Beef extract	: 8,0 – 10,0
Yeast extract	: 4,0
Glucose (dextrose)	: 20,0
Tween 80 (Polysorbate 80)	: 1 mL
Dipotassium hydrogen phosphate	: 2,0
Sodium acetate $3\text{H}_2\text{O}$	: 5,0
Triammonium citrate	: 2,0
Magnesium sulphate $7\text{H}_2\text{O}$	: 0,2
Manganese sulphate $4\text{H}_2\text{O}$	: 0,05

2.1.1.6. Yeast Extract

Berdasarkan Kotzamanidis et al. (2002), yeast extract merupakan komponen medium dalam fermentasi asam laktat karena berfungsi sebagai faktor pertumbuhan utama bagi bakteri *Lactobacillus delbrueckii*. Yeast extract menyediakan vitamin, asam amino, mineral dan berbagai faktor pertumbuhan lainnya dalam jumlah kritis yang esensial untuk biosintesis asam laktat, serta mendukung pertumbuhan mikroorganisme dan produksi metabolit secara optimal.

A. Identitas

Nama	: Yeast extract
Produsen	: Scharlau
Kode produk	: 7-079
Fungsi dalam medium	: Sumber nutrisi utama
Peran biologis	: Faktor pertumbuhan utama <i>Lactobacillus delbrueckii</i>

B. Sifat Fisika

Bentuk	: Serbuk / bubuk (powder)
Warna	: Tidak disebutkan secara spesifik
Kelarutan	: Larut dalam air
Konsentrasi optimum medium	: 5% (w/v) atau 45,71 g/L
Rentang konsentrasi efektif	: 1–5% (w/v)
Konsentrasi toksik	: >5% (w/v)

C. Sifat Kimia

Vitamin B kompleks	: Terkandung dalam jumlah kritis
Asam amino	: Sumber nitrogen esensial
Mineral dan trace <i>elements</i>	: Mendukung aktivitas enzim
Faktor pertumbuhan lainnya	: Esensial untuk biosintesis asam laktat

2.1.1.7. *Lactobacillus delbrueckii*

Menurut Yeh, Bajpai, & Iannotti (1991), *Lactobacillus delbrueckii* adalah bakteri asam laktat homofermentatif yang digunakan dalam produksi asam laktat dari glukosa. Bakteri ini mengalami inhibisi oleh produk (product inhibition) di mana asam laktat yang tidak terdisosiasi (undissociated lactic acid) merupakan agen inhibitor utama yang menghambat pertumbuhan sel dan pembentukan produk. Selain itu, konsentrasi ion hidrogen (pH) juga memiliki pengaruh kuat terhadap kinetika pertumbuhan dan metabolisme bakteri ini.

A. Identitas Bakteri

Nama spesies	: <i>Lactobacillus delbrueckii</i>
Genus	: Lactobacillus
Jenis metabolisme	: Homofermentatif
Produk utama	: Asam laktat
Substrat	: Glukosa
Medium pertumbuhan	: Yeast extract

B. Sifat Fisika

Suhu optimum	: 37°C
pH yang dikontrol dalam penelitian	: 4,5 ; 5,4 ; dan 6,0
pH optimum untuk pertumbuhan	: ~5,4 ($\mu_{\max}$ tertinggi)
pH optimum untuk produksi asam laktat	: ~6,0 ($v_{\max}$ tertinggi)
Konversi sel (UOD ke g DW/L)	: 0,5 g DW/(L·UOD)

C. Sifat Kimia

Parameter	: Spesifikasi / Nilai
Substrat	: Glukosa
Produk utama	: Asam laktat ($C_3H_6O_3$)
Produk samping	: Tidak ada dalam jumlah signifikan
Reaksi disosiasi asam laktat	: $C_3H_6O_3 \rightleftharpoons C_3H_5O_3^- + H^+$
pK asam laktat (37°C)	: 3,86
Bentuk inhibitor	: Asam laktat tidak terdisosiasi (undissociated)
Konsentrasi minimum inhibitor (Pu,min)	: 0,12 g/L
Jenis inhibisi	: Non-kompetitif terhadap pertumbuhan dan pembentukan produk

2.1.1.8. Air (H_2O)

Menurut Addzikri & Rosariawari (2023), air baku adalah air yang menjadi bahan baku utama air olahan untuk kegunaan tertentu, yang didapatkan dari sumber air permukaan, cekungan air tanah, dan/atau air hujan yang memenuhi baku mutu tertentu. Sungai, danau, dan waduk adalah sumber air baku karena kapasitasnya yang besar dan kontinuitasnya yang terjaga. Air baku harus melalui proses pengolahan yang baik dan sesuai dengan persyaratan baku mutu yang ditetapkan. Pada pabrik asam laktat, air baku digunakan untuk berbagai keperluan seperti pencampuran medium fermentasi, pendinginan (*cooling water*), pembersihan peralatan, dan *Steam generation*. Kualitas air baku sangat menentukan keberhasilan proses fermentasi karena dapat mempengaruhi pertumbuhan mikroorganisme (*Lactobacillus delbrueckii*) dan produk yang dihasilkan. Spesifikasi air yang digunakan adalah sebagai berikut:

A. Identitas Sumber Air Baku

Sumber air baku	: Air permukaan (Sungai Brantas)
-----------------	----------------------------------

Peruntukan	: Air baku untuk proses produksi asam laktat
Kegunaan dalam pabrik	: Pencampuran medium, pendinginan, dan <i>Steam</i>
Regulasi acuan	: Permenkes No. 492 Tahun 2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum

B. Sifat Fisika

Kekeruhan (Turbidity)	: ≤ 5 NTU (setelah pengolahan)
Suhu (<i>Temperature</i>)	: $\pm 28^{\circ}\text{C}$
Daya Hantar Listrik (DHL)	: $20 - 1500 \mu\text{S/cm}$
Total Dissolved Solid (TDS)	: $\leq 500 \text{ mg/L}$

C. Sifat Kimia

pH (Potential Hydrogen)	: 6,5 – 8,5
Sisa Chlor	: Sesuai ketentuan desinfeksi

2.1.2. Spesifikasi Produk

2.1.2.1. Asam Laktat

Menurut Corbion (2020–2021), PURAC® HiPure 90 adalah asam L-laktat alami yang diproduksi melalui fermentasi dari gula. Asam laktat ini memiliki karakteristik asam yang ringan dan digunakan dalam berbagai aplikasi di industri farmasi, kosmetik, dan kimia. Fungsi utamanya meliputi pengaturan pH, pengikatan logam (metal sequestration), sebagai intermediate kiral, dan sebagai konstituen alami tubuh dalam produk kosmetik dan farmasi. Spesifikasi produk asam laktat yakni sebagai berikut.

A. Identitas Produk

Nama produk	: PURAC® HiPure 90
Nama kimia	: Asam L-laktat (Lactic acid)
Rumus molekul	: $\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$
Berat molekul	: 90 g/mol
Nama IUPAC	: 2-hydroxypropionic acid
CAS number	: 79-33-4 (umum), 50-21-5
EEC Additive number	: E270
GRAS status	: 21CFR184.1061
Status ECOCERT	: Natural origin 100%

B. Sifat Fisika

Bentuk	: Cairan sirup (syrupy liquid)
--------	--------------------------------

Warna	: Maksimal 20 Alpha (fresh and after heating)
Rasa	: Rasa asam laktat yang ringan dan khas
Bau	: Lulus uji (passes test)
Densitas relatif (20°C)	: 1,20 – 1,22 g/mL
Kadar (Assay)	: 89,5 – 90,5% (w/w)

C. Sifat Kimia

Kemurnian stereokimia	: Minimal 95% (S-enantiomer)
Identifikasi	: Positif untuk laktat (passes test)

1. Batas Maksimum Impurities

Sulfated ash / residue on ignition	: 0,01%
Calcium (Ca)	: 10 ppm
Chlorides (Cl)	: 10 ppm
Sulfate (SO ₄)	: 10 ppm
Heavy metals	: 5 ppm
Iron (Fe)	: 5 ppm
Lead (Pb)	: 0,5 ppm
Mercury (Hg)	: 1 mg/kg (berdasarkan larutan 80%)
Cyanide (CN)	: 5 mg/kg (berdasarkan dry substance)
Citric, oxalic, phosphoric, tartaric acid	: Lulus uji USP
Reducing sugars	: Lulus uji USP
Sugars and other reducing substances	: Lulus uji USP
Readily carbonizable substances	: Lulus uji USP
Volatile fatty acids	: Lulus uji USP
Methanol	: 50 ppm
Ether insolubles	: Lulus uji EP

2.1.2.2. Gypsum (Produk Samping)

Gypsum (CaSO₄·2H₂O) terbentuk sebagai produk samping pada proses asidifikasi dan dipisahkan sebagai limbah padat.

Rumus Kimia	: CaSO ₄ ·2H ₂ 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

Menurut Mizrahi et al. (2006), gipsum (gypsum) atau kalsium sulfat (calcium sulfate) adalah produk sampingan (by-product) yang terbentuk dari proses asidulasi (acidulation) larutan yang mengandung kalsium laktat dengan asam sulfat (H₂SO₄). Gipsum memiliki kelarutan sangat rendah dalam air sehingga mudah dipisahkan dari larutan dengan filtrasi.

A. Identitas Senyawa

Nama kimia	: Kalsium sulfat / Gypsum
Nama lain	: Calcium sulfate
Rumus kimia	: CaSO ₄ ·2H ₂ O (kalsium sulfat dihidrat)
Jenis	: Produk sampingan (by-product) dari asidulasi asam laktat
Sumber pembentukan	: Reaksi kalsium laktat dengan asam sulfat

B. Sifat Fisika

Bentuk	: Padatan kristal
Kelarutan dalam air	: Sangat rendah
Metode pemisahan	: Filtrasi
Kandungan padatan	: 60% solids gypsum cake

C. Sifat Kimia

Reaksi pembentukan	: Ca-laktat + H ₂ SO ₄ → Asam Laktat + CaSO ₄ ·2H ₂ O (gipsum)
Stoikiometri asam sulfat	: Rasio H ₂ SO ₄ : kalsium laktat = 0,90 – 1,20 (0,95 – 1,05)
Proses	: Kalsium laktat + asam sulfat 98% → presipitasi gipsum
Tahap selanjutnya	: Gipsum disaring, filtrat (mengandung asam laktat) diproses

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 enzimatik dan bersifat eksotermis.



2.2.1.2.Reaksi Fermentasi Asam Laktat

(Glukosa) (Asam Laktat)

2.2.1.3.Reaksi Netralisasi

(Asam Laktat) (Kalsium Laktat)

(Kalsium Laktat) (Asam Laktat) (Gypsum)

Min et al. (2011) melaporkan bahwa rasio molar $\text{Ca}(\text{LA})_2 : \text{H}_2\text{SO}_4$ optimum adalah 1:1 untuk pengendapan gipsum yang efisien. Pada kondisi $\text{pH} > 3,86$, 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 CaCO_3 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 enzimatik dan fermentasi dengan kondisi operasi sebagai berikut:

Tabel 2. 2 Kondisi Operasi Reaksi Utama

Reaksi	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Tekanan (atm)	Waktu Reaksi
Hidrolisis Sukrosa	50	1	Kontinyu
Fermentasi Asam Laktat	40	1	24 jam
Netralisasi	40	1	In-situ
Asidifikasi	40	1	-

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 ($\Delta H^\circ_{\text{rxn}}$) Hidrolisis Sukrosa

Tabel 2. 3 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 ($\Delta H^\circ_{\text{rxn}}$) pada reaksi hidrolisis sukrosa menggunakan rumus:

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

Jadi bila dihitung adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{rxn}} &= (\Delta H_{\text{glukosa}} + \Delta H_{\text{fruktosa}}) - (\Delta H_{\text{sukrosa}} + \Delta H_{\text{air}}) \\ &= (-1273,9 + -1273,9) - (-2226,5 + -285,8) \text{ kJ/mol} = -35,5 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

Didapatkan hasil entalpi reaksi ($\Delta H^\circ_{\text{rxn}}$) 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 ($\Delta G^\circ_{\text{rxn}}$) 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. 4 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 ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$)	-1543,0
Glukosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)	-917,0
Fruktosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)	-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:

$$\begin{aligned} \Delta G_{rxn} &= (\Delta G_{glukosa} + \Delta G_{fruktosa}) - (\Delta G_{sukrosa} + \Delta G_{air}) \\ &= (-917,0 + -916,0) - (-1543,0 + -237,1) = -52,9 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

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 kesetimbangan dengan melalui cara berikut:

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

$$\begin{aligned} -\ln K &= \frac{\Delta G^{\circ}}{RT} \\ -\ln K &= -\frac{52,9}{0,008314 \times 298,15} \end{aligned}$$

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

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

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 (ΔH°_{rxn}) Fermentasi Asam Laktat

Tabel 2. 5 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 ($C_6H_{12}O_6$)	-1273,9
Asam Laktat ($C_3H_6O_3$)	-694,0

Dalam mencari nilai entalpi reaksi (ΔH°_{rxn}) pada reaksi fermentasi asam laktat menggunakan rumus:

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

Jadi jika dihitung adalah sebagai berikut:

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

Didapatkan hasil entalpi reaksi (ΔH°_{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 (ΔG°_{rxn}) dan Konstanta Keseimbangan Fermentasi Asam Laktat

Tabel 2. 6 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 (C ₆ H ₁₂ O ₆)	-917,0
Asam Laktat (C ₃ H ₆ O ₃)	-524,0

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

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

Jadi bila dihitung adalah sebagai berikut:

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

Nilai energi bebas Gibbs reaksi fermentasi asam laktat pada suhu 25°C diperoleh sebesar -131,0 kJ/mol. Nilai ΔG°_{rxn} yang negatif menunjukkan bahwa reaksi fermentasi asam laktat berlangsung secara spontan secara termodinamika.

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

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

Pada T₁ = 298,15 K

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Berdasarkan perhitungan energi bebas Gibbs pada suhu $313,15 \text{ K (40}^\circ\text{C)}$, 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. 7 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:

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

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

Tabel 2. 8 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. 9 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. 10 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. 11 Profil Fermentasi Asam Laktat

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.

Tabel 1. 13 Hasil Fermentasi Asam Laktat Metode Runge Kutta Orde 4

Parameter	Nilai	Satuan
Waktu fermentasi	24	jam
Konversi glukosa	99,96	%

Parameter	Nilai	Satuan
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 bertujuan 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* dapat 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, CaCO_3 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 CaCO_3 59,95 g/L.. Fermentasi dilakukan secara batch pada suhu 40°C, tekanan 1 atm, dan pH 6,0. pH dijaga dengan penambahan CaCO_3 (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. CO_2 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, CaCO_3 ditambahkan secara kontinu selama fermentasi. Penambahan CaCO_3 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 (H_2SO_4) 98% dalam tangki asidifikasi (T-105) pada suhu 40°C dan pH > 3,86. Berdasarkan penelitian Min et al. (2011), rasio molar $\text{Ca}(\text{LA})_2 : \text{H}_2\text{SO}_4$ 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.

IDENTITY	JURY																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
ak	46.193	46.196	166.65	2.46	2.47	5.643	4.6142	30.976	2.9703			12.653	6.616	59.664	100.1			100.6	100.6		100.16				15.216		15.210	59.664	100.002	100.655	73.967
Sidraa	58.125	58.126		58.125			111.76																								
Chenae	5.635	5.635		5.635		9.435		0.127		6.435	0.035	1.731	1.731	0.035	1.436	1.127	1.436		10.7			10.7				0.032		0.032			
Jadine	33.629	33.629		33.629		25.629		25.629																							
Alfreda (Sister)	23.600	23.600		23.600		16.600		16.600		16.600	71.300	71.300	71.300	1.973	2.232		2.232	6.600	1.972			1.972	1.973			0.001		0.001			
Debra & Eugene	23.125	23.125		23.125		23.125		23.125			23.125	0.670	0.282	0.282	1.681	56.461	64.72	1.681		1.681		1.681				6.686		6.686		1.000	1.000
QAD									56.725	0.670	0.670																				
Thomas								1.681		1.681		1.681																			
MS Lila								12.650																							
Talitha (Lila)										1.670		1.670																			
MS Eve												56.633																			
Carol (Lila)													65.763	9.473	6.258	23.65	70.625	3.67	71.626	2.72		32.635	7.26		70.625	5.26	66.6		55.600		
Quinn												56.27	56.27	1.000		1.000			2.000	2.000	1.000				0.000		0.000				
TOTAL	156.12	156.12	166.65	1.6216	1.6216	6.695	0.8029	36.564	56.125	11.625	16.620	16.620	59.620	11.670	1.625	10.660	182.680	6.616	54.67	15.636	2.720	15.636	2.720	15.636	5.662	59.664	16.632	10.635	62.635		

Tabel 2. 12 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 (Broth)	9.296,79	Kalsium Laktat (6.757,51), Air (2.088,36), Biomassa (155,38)
F10	<i>Retentat</i> 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	<i>Wet cake</i> 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	5.435,47	Asam Laktat (5.215,27), Air

Aliran	Deskripsi	Laju Massa Total (kg/jam)	Komponen Utama (kg/jam)
	Encer		(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 dan Neraca Panas

2.5.1. 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.

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

Tabel 2. 13 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

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

Tabel 2. 14 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

Komponen	Dari T-101 (kg/jam)	Air Tambahan (kg/jam)	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
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

2.5.1.3. Neraca Massa Reaktor Hidrolisis (R-101)

Tabel 2. 15 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
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

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

Tabel 2. 16 Neraca Massa T-103

Komponen	Dari R-101 (kg/jam)	Air 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

2.5.1.5. Neraca Massa Reaktor Fermentasi (R-102)

Tabel 2. 17 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
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

2.5.1.6. Neraca Massa Mikrofiltrasi (MF-101)

Tabel 2. 18 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

2.5.1.7.Neraca Massa Asidifikasi (T-105)

Tabel 2. 19 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
Abu	2,45	2,45
Protein & Pengotor	129,10	129,10
Total	9.269,77	9.269,77

2.5.1.8.Neraca Massa Filtrasi Gypsum (F-101)

Tabel 2. 20 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

2.5.1.9.Neraca Massa Unit Pemurnian (REF-101)

Tabel 2. 21 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

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
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 (<i>Retentat</i> + Resin)	-	688,71
Total	5.755,64	6.124,62

2.5.1.10. Neraca Massa Evaporasi Vakum

2.5.1.10.1. Neraca Massa EV-101

Tabel 2. 22 Neraca Massa EV - 101

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
Larutan Asam Laktat Encer (Umpan)	5.617,42	-
- Air	5.109,75	-
- Asam Laktat	471,79	-
- Pengotor	35,88	-
Intermediate (45%)	-	1.048,42
- Air	576,63	-
- Asam Laktat	471,79	-
- Pengotor	-	-
Uap Air (V_1)	-	4.569,00
Total	5.617,42	5.617,42

2.5.1.10.2. Neraca Massa EV-102

Tabel 2. 23 Neraca Massa EV - 102

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
Intermediate (45%)	1.048,42	-
- Air	576,63	-
- Asam Laktat	471,79	-
- Pengotor	-	-
Produk Akhir (90%)	-	524,21

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
- Air	52,42	-
- Asam Laktat	471,79	-
- Pengotor	-	-
Uap Air (V ₂)	-	524,21
Total	1.048,42	1.048,42

2.5.2. 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).

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

Tabel 2. 24 Neraca Panas T-101

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	C _p (kJ/kg.K)	ΔT (°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

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

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

Tabel 2. 25 Neraca Panas T-102

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	Cp (kJ/kg.K)	ΔT (°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
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)

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

2.5.2.3. Neraca Panas Reaktor Hidrolisis (R-101)

Tabel 2. 26 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 sukrosa bereaksi = 5,48 kmol/jam

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

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

Tabel 2. 27 Neraca Panas R-101 (Balance)

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Entalpi Masuk (H _{in})	424.918	-
Panas Reaksi (Q _{rxn})	-195.636	-
Entalpi Keluar (H _{out})	-	444.145
Beban Pendingin (Q _c)	-214.863	-
Total	229.255	229.255

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

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

Tabel 2. 28 Neraca Panas T-103

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	C _p (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

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

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

2.5.2.5. Neraca Panas Reaktor Fermentasi (R-102)

Tabel 2. 29 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
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

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

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

Tabel 2. 30 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

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

2.5.2.6. Neraca Panas Mikrofiltrasi (MF-101)

Tabel 2. 31 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 & Pengotor	258,20	129,10	129,10	2,276	15	8.815	8.815
Total	9.313,12	7.743,82	1.569,30	-	-	289.722	289.722

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

2.5.2.7. Neraca Panas Asidifikasi (T-105)

Tabel 2. 32 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 Laktat	6.611,73	-	1,380	15	136.480	-
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 & Pengotor	129,10	129,10	2,276	15	4.408	4.408
Total	9.099,81	9.113,16	-	-	231.402	245.124

Panas reaksi (Q_{rxn}):

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

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

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

Tabel 2. 33 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

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

2.5.2.8. Neraca Panas Filtrasi Gypsum (F-101)

Tabel 2. 34 Neraca Panas F-101

Komponen	Input (kg/jam)	Output Filtrat (kg/jam)	Output Wet cake (kg/jam)	C _p (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

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

2.5.2.9. Neraca Panas Unit Pemurnian (REF-101)

Tabel 2. 35 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

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

Tabel 2. 36 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
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: $-10 \text{ kJ/equiv} \times 2.310 \text{ equiv} = -23.100 \text{ kJ/jam}$

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

Tabel 2. 37 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

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Beban Pendingin (Q _c)	-32.682	-
Total	52.398	52.398

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

Tabel 2. 38 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 _i)	115,5°C
C _p 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 _i)	2.211,94 kJ/kg

Perhitungan:

$$Q1, \text{ sensibel} = F \times C_p \times (T_1 - T_F)$$

$$Q1, \text{ sensibel} = 5.435,47 \times 4,18 \times (115,5 - 30) = 1.944.504 \text{ kJ/jam}$$

$$Q1, \text{ laten} = V_1 \times \lambda(T_1) = 3.630 \times 2.211,94 = 8.029.342 \text{ kJ/jam}$$

$$Q1, \text{ total} = 1.944.504 + 8.029.342 = 9.973.846 \text{ kJ/jam}$$

Tabel 2. 39 Neraca Panas EV-101 (Balance)

Komponen	Input (kJ/jam)	Output (kJ/jam)
Entalpi Umpan (H _F)	1.944.504	-
Panas dari <i>Steam</i> (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. 40 Neraca Panas EV-102 (Efek II)

Parameter	Nilai
Umpan masuk (L ₁)	1.805,47 kg/jam
Suhu umpan (T _i)	115,5°C

Parameter	Nilai
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. 41 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. 42 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
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

2.6. Tata Letak Pabrik dan Pemetaan

2.6.1. Lay Out Pabrik

Setelah diagram alir proses selesai, tahapan berikutnya sebelum perancangan sistem perpipaan, struktur bangunan, dan kelistrikan adalah penyusunan tata letak (layout) pabrik beserta fasilitas penunjangnya. Layout mencakup pengaturan area penyimpanan, area proses, dan area penunjang lainnya agar aliran bahan baku, produk, dan pekerja berlangsung efisien

dan aman. Pertimbangan layout Pabrik Asam Laktat dari Molase kapasitas 6.600 ton/tahun meliputi beberapa aspek berikut.

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

2.6.2. Pemetaan

Tabel 2. 43 Luas Bangunan dan Area 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
<i>Control</i> 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

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 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 diperhatikan agar tidak terjadi stagnansi udara 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

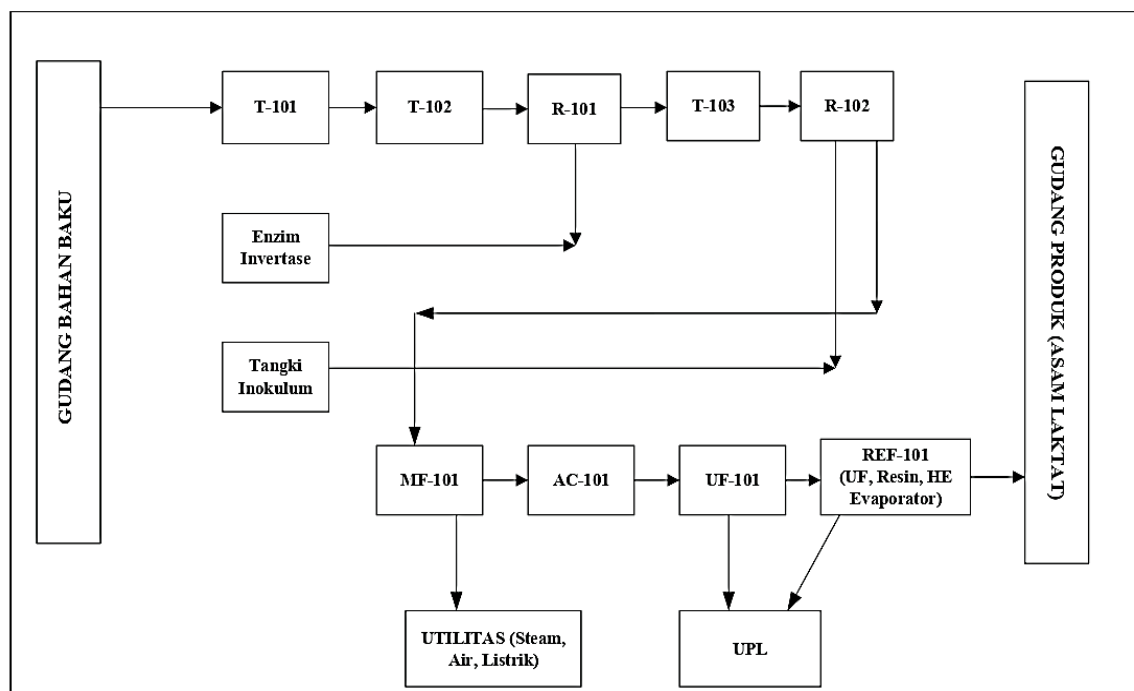
Perancangan layout peralatan perlu memastikan pekerja dapat menjangkau seluruh unit proses dengan cepat dan mudah untuk keperluan operasional maupun keadaan darurat.

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