



**PRA-RANCANGAN PABRIK *MUCIC ACID* DARI LIMBAH
KULIT KOPI DENGAN METODE OKSIDASI MIKROBIAL
KAPASITAS 12.000 TON/TAHUN**

Diajukan untuk memenuhi syarat memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi S1
Teknik Kimia (S1)

SKRIPSI

Diajukan guna melengkapi Tugas Akhir dan memenuhi syarat untuk menyelesaikan
Program Studi Teknik Kimia (S1)

Oleh

Izza Ulil Akrom	221910401064
Ahmad Isma'il Jailani	221910401093
Gavinda Tsubutul Akmal	221910401098

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK KIMIA
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2026**

PERSEMBAHAN

Tugas Akhir dengan judul “Pra-Rancangan Pabrik *Mucic Acid* Dari Limbah Kulit Kopi Dengan Metode Oksidasi Mikrobial Kapasitas 12.000 Ton/Tahun” ini kami persembahkan kepada:

1. Diri saya sendiri dan teman satu tim yang telah bekerja keras dengan segala usaha untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini. Dedikasi dan kerja sama yang luar biasa, saling menghargai, dan selalu mendukung dalam menghadapi berbagai tantangan menjadi kunci keberhasilan kami;
2. Kedua orang tua dan segenap keluarga yang senantiasa memberikan doa, dukungan, kasih sayang, bimbingan, dan menjadi sumber inspirasi serta kekuatan dalam menghadapi setiap tantangan yang datang selama proses penyusunan Tugas Akhir ini sehingga kami mampu melewati masa-masa sulit dan terus berjuang untuk mencapai tujuan ini;
3. Ir. Felix Aries Setiawan, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan dedikasi ilmu dan dukungan untuk membantu menyelesaikan kesulitan yang kami hadapi selama proses penyusunan Tugas Akhir ini;
4. Ir. Istiqomah Rahmawati, S.Si., M.Si., IPM. selaku Dosen Penguji Utama dan Sonya Hakim Raharjo, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji Anggota yang telah memberikan saran dan kritik untuk menyempurnakan Tugas Akhir ini;
5. Seluruh dosen Teknik Kimia UNEJ yang telah menyampaikan berbagai wawasan yang sangat membantu dalam penyusunan Tugas Akhir ini;
6. Seluruh civitas akademik Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah membantu kelancaran proses penyusunan;
7. Rekan-rekan mahasiswa, khususnya Teknik Kimia angkatan 2022 yang telah memberikan semangat, dukungan, doa, dan kerja sama selama masa studi dan penyusunan Tugas Akhir ini.

MOTTO

“Bersungguh-sungguhlah, karena sesungguhnya Allah menyukai orang yang bekerja keras.”

(HR. Thabrani)

"Lalu aku selesai, dengan semua yang telah diupayakan. Lalu aku berani, dengan semua yang telah aku putuskan. Lalu aku beranjak, dengan jalan yang telah aku pilih selanjutnya."

-Gavinda Tsubutul Akmal-

“Setiap halaman yang terselesaikan adalah bukti bahwa keraguan pun bisa dikalahkan.”

- Izza Ulil Akrom –

"Jika kamu tidak berjuang, kamu tidak akan menang."

(Eren Yeager)

-Ahmad Isma'il Jailani-

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama Ketua : Ahmad Isma'il Jailani

NIM : 221910401093

Nama Anggota 1 : Gavinda Tsubutul Akmal

NIM : 221910401098

Nama Anggota 2 : Izza Ulil Akrom

NIM : 221910401064

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul "Pra-Rancangan Pabrik Mucic Acid dari Limbah Kulit Kopi dengan Metode Oksidasi Mikrobial Kapasitas 12,000 Ton/Tahun" Adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan skripsi ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapatkan sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 1 Juli 2026

Yang menyatakan,

Anggota 2

Ketua

Anggota 1



Ahmad Isma'il Jailani

NIM. 221910401093

Gavinda Tsubutul Akmal

NIM. 221910401098

Izza Ulil Akrom

NIM. 221910401064

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi berjudul Pra-Rancangan Pabrik Mucic Acid dari Limbah Kulit Kopi dengan Metode Oksidasi Mikrobial Kapasitas 12.000 Ton/Tahun telah diuji dan disahkan oleh Fakultas Teknik Universitas Jember pada:

Hari : Rabu

Tanggal : 1 Juli 2026

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Pembimbing

1. Pembimbing Utama

Nama : Ir. Felix Arie Setiawan, S.T., M.Eng., Ph.D.

NIP : 198711182019031013

Tanda Tangan


(.....)

Penguji

1. Penguji Utama

Nama : Ir. Istiqomah Rahmawati, S.Si., M.Si., IPM.

NIP : 199108282024062002


(.....)

2. Penguji Anggota

Nama : Sonya Hakim Raharjo, S.T., M.T

NIP : 199507142024062002


(.....)

ABSTRACT

Coffee husk has a high pectin content so it has the potential to be used as a raw material for making mucic acid, a value-added compound widely used in the chemical, pharmaceutical, cosmetic, and food industries, as well as a raw material for bio-based polymers. The objective of this pre-design is to design a technically and economically feasible mucic acid factory by utilizing coffee skin waste as the main raw material. The factory is designed using a pectin hydrolysis process with citric acid followed by microbial oxidation using *Trichoderma* sp. The production process includes washing, drying, size reduction, extraction-hydrolysis, filtration, evaporation, neutralization, fermentation, acidification, crystal separation, drying, and product refining. The production capacity is set at 12,000 tons/year based on projected global market needs. The factory location was chosen in Tangerang City, Banten, by considering the availability of infrastructure, distribution access, and proximity to industrial areas. The factory is designed to operate semi-continuously for 330 days/year and 24 hours/day with a workforce requirement of 170 people. Solid waste in the form of coffee skin cake is used as fertilizer, while liquid waste is treated before being disposed of to support a more environmentally friendly production concept. Based on the results of the economic evaluation, the Total Capital Investment (TCI) was obtained at IDR 79.41 trillion, Total Production Cost (TPC) of IDR 21.37 trillion, net profit of IDR 8.89 trillion, Pay Out Time (POT) of 4.7 years, Return on Investment (ROI) of 11%, and Break Even Point (BEP) of 50%. The evaluation results indicate that the pre-design of a mucic acid factory from coffee skin waste with a capacity of 12,000 tons/year is feasible to be established.

Keywords: *mucic acid, coffee skin, pectin, Trichoderma sp., pre-plant design, economic evaluation.*

RINGKASAN

Kulit kopi memiliki kandungan pektin yang tinggi sehingga berpotensi dijadikan bahan baku pembuatan mucic acid, yaitu senyawa bernilai tambah yang banyak dimanfaatkan pada industri kimia, farmasi, kosmetik, pangan, serta sebagai bahan baku polimer berbasis hayati. Tujuan pra-rancangan ini adalah merancang pabrik mucic acid yang layak secara teknis dan ekonomis dengan memanfaatkan limbah kulit kopi sebagai bahan baku utama. Pabrik dirancang menggunakan proses hidrolisis pektin dengan asam sitrat yang dilanjutkan dengan oksidasi mikrobial menggunakan *Trichoderma* sp. Proses produksi meliputi tahap pencucian, pengeringan, pengecilan ukuran, ekstraksi-hidrolisis, filtrasi, evaporasi, penetralan, fermentasi, pengasaman, pemisahan kristal, pengeringan, dan penghalusan produk. Kapasitas produksi ditetapkan sebesar 12.000 ton/tahun berdasarkan proyeksi kebutuhan pasar global. Lokasi pabrik dipilih di Kota Tangerang, Banten, dengan mempertimbangkan aspek ketersediaan infrastruktur, akses distribusi, dan kedekatan dengan kawasan industri. Pabrik dirancang beroperasi secara semi-kontinu selama 330 hari/tahun dan 24 jam/hari dengan kebutuhan tenaga kerja sebanyak 170 orang. Limbah padat berupa cake kulit kopi dimanfaatkan sebagai pupuk, sedangkan limbah cair diolah sebelum dibuang sehingga mendukung konsep produksi yang lebih ramah lingkungan. Berdasarkan hasil evaluasi ekonomi diperoleh Total Capital Investment (TCI) sebesar Rp79,41 triliun, Total Production Cost (TPC) sebesar Rp21,37 triliun, keuntungan bersih sebesar Rp8,89 triliun, Pay Out Time (POT) selama 4,7 tahun, Return on Investment (ROI) sebesar 11%, dan Break Even Point (BEP) sebesar 50%. Hasil evaluasi tersebut menunjukkan bahwa pra-rancangan pabrik mucic acid dari limbah kulit kopi dengan kapasitas 12.000 ton/tahun layak untuk didirikan.

Kata kunci: mucic acid, kulit kopi, pektin, *Trichoderma* sp., pra-rancangan pabrik, evaluasi ekonomi.

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, penulis mampu menyelesaikan laporan Tugas Akhir Perancangan Pabrik yang berjudul “Pra-Rancangan Pabrik Kalium Sulfat dari Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Kapasitas 24.000 Ton/Tahun”. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan Strata I pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Jember. Dalam penyelesaian laporan ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karenanya penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Iwan Taruna, M.Eng., IPM. selaku rektor Universitas Jember;
2. Dr. Ir. Triwahju Hardianto, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
3. Ir. Felix Aries Setiawan, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Kepala Program Studi S1 Teknik Kimia;
4. Ir. Felix Aries Setiawan, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing;
5. Ir. Istiqomah Rahmawati, S.Si., M.Si., IPM. selaku Dosen Penguji Utama dan Sonya Hakim Raharjo, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji Anggota;
6. Seluruh dosen Teknik Kimia Universitas Jember yang telah menyampaikan berbagai wawasan dan ilmu yang sangat bermanfaat;
7. Seluruh civitas akademik Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah membantu kelancaran proses penyusunan;
8. Kedua orang tua yang telah memberikan dukungan serta doa untuk kelancaran dan keberhasilan dalam proses pengerjaan laporan ini.

Jember, 1 Juli 2026

Penulis

DAFTAR ISI

SKRIPSI.....	1
PERSEMBAHAN.....	ii
MOTTO	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN	v
ABSTRACK	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Sejarah dan Perkembangan	2
BAB 2 PERENCANAAN PABRIK.....	4
2.1 Pemilihan Kapasitas	4
2.2 Pemilihan Proses	5
2.2.1 Hidrolisis Enzim	6
2.2.2 Hidrolisis Asam	6
2.2.3 Oksidasi mikrobial dengan jamur <i>Trichoderma</i> sp.....	8
2.2.4 Oksidasi elektrolitik dengan elektroda emas (Au), Platina (Pt) dan Nikel (Ni).....	8
2.3 Uraian Proses	10
2.3.1 Tahap Persiapan dan Pengeringan Bahan Baku	11
2.3.2 Tahap Ekstraksi-Hidrolisis	12
2.3.3 Tahap Filtrasi	12
2.3.4 Tahap Evaporasi	13

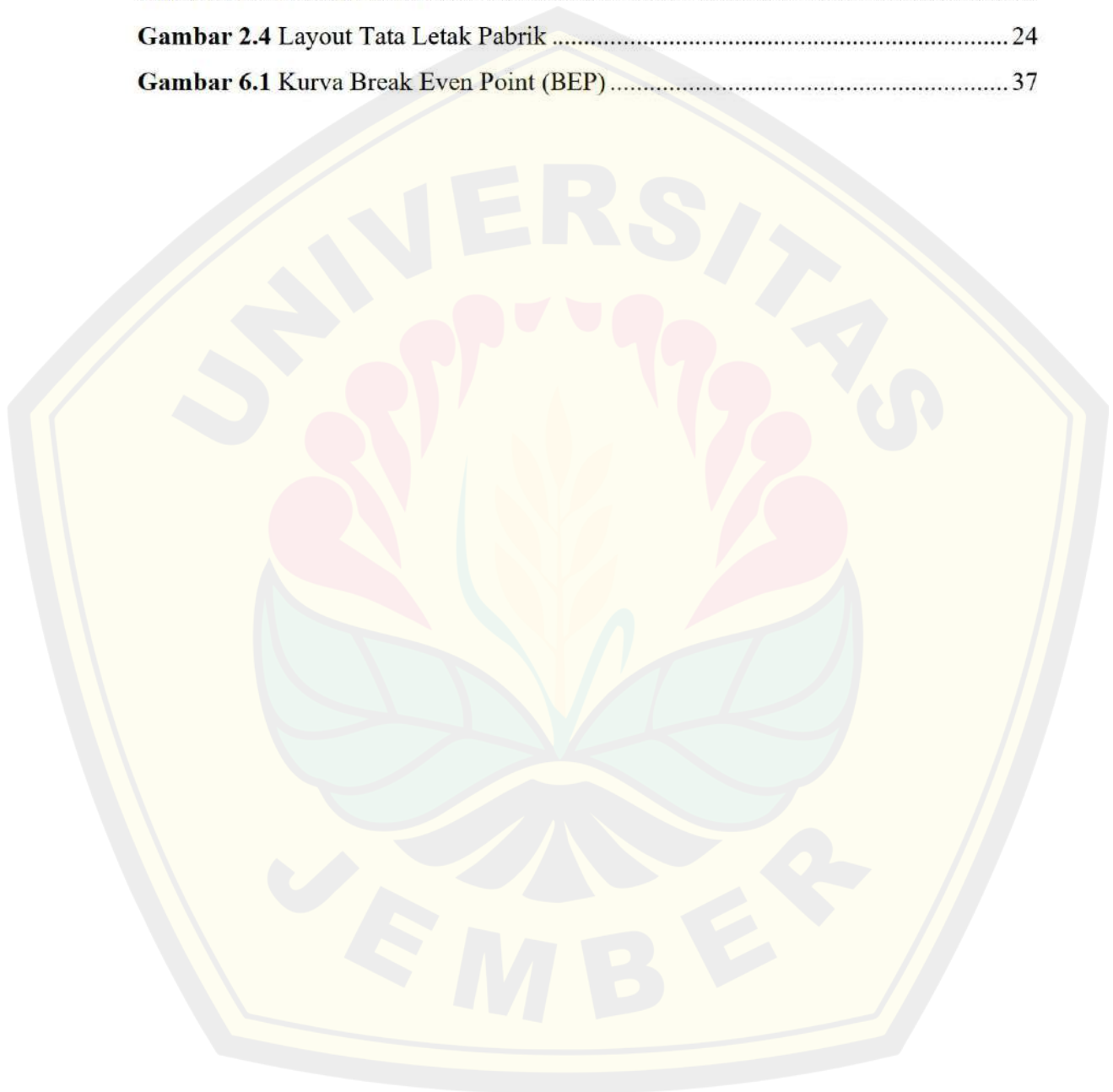
2.3.5 Tahap Penetralkan	13
2.3.6 Tahap Oksidasi	14
2.3.7 Tahap Pengasaman	14
2.3.8 Tahap Pembentukan <i>Mucic acid</i>	15
2.4 Spesifikasi Bahan dan Produk.....	18
2.4.1 Spesifikasi Bahan Baku	18
2.4.2 Spesifikasi Bahan Pendukung.....	18
2.4.3 Spesifikasi Produk	21
2.5 Pemilihan lokasi dan tata letak.....	22
2.5.1 Pemilihan Lokasi	22
2.5.2 Tata Letak Pabrik.....	23
BAB 3 NERACA MASSA DAN ENERGI.....	25
3.1 Neraca Massa Pabrik <i>Mucic acid</i>	25
3.2 Neraca Panas dan Energi.....	26
BAB IV SPESIFIKASI ALAT	28
BAB V SAFETY.....	31
5.1 HAZID (Hazard Identification)	31
5.1 HAZOP (Hazard and Operability Study)	34
BAB VI EVALUASI EKONOMI	36
6.1 Total Modal	36
6.2 Ongkos Produksi.....	36
6.3 Keuntungan.....	36
6.4 Lama Waktu Pengembalian.....	37
6.5 Laju Pengembalian Modal.....	37
6.6 Break Even Point	37
BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN.....	39
7.1 Kesimpulan	39
7.2 Saran	39

DAFTAR PUSTAKA.....	40
LAMPIRAN.....	46



DAFTAR GAMBAR

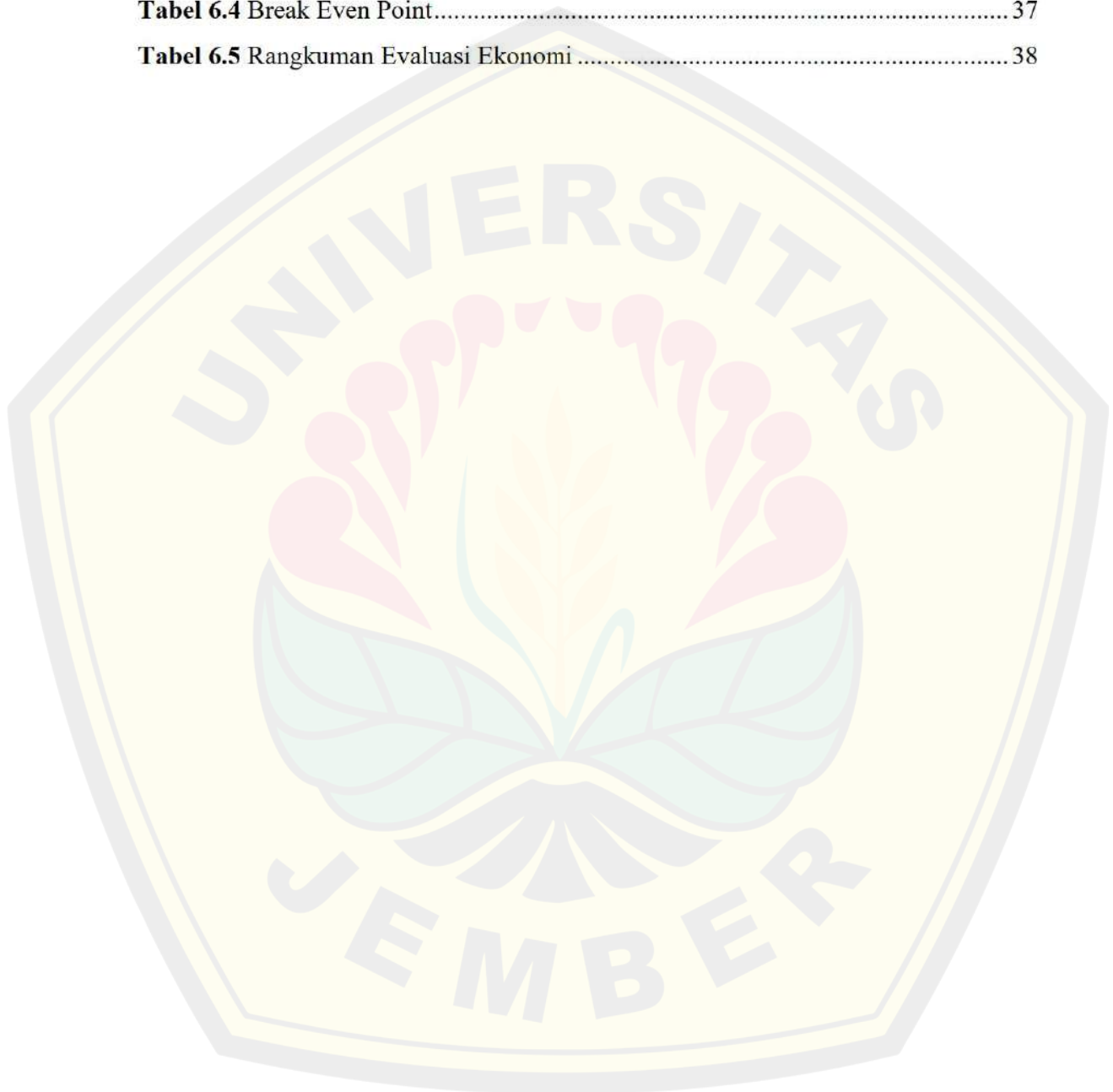
Gambar 1.1 CAGR Mucic acid	2
Gambar 2.1 PFD Pra-Rancangan Pabrik Mucic acid	16
Gambar 2.2 Blok Flow Diagram Proses Mucic acid	17
Gambar 2.3 Lokasi Pabrik.....	22
Gambar 2.4 Layout Tata Letak Pabrik	24
Gambar 6.1 Kurva Break Even Point (BEP)	37



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Pabrik yang Berpotensi menggunakan Mucic acid	3
Tabel 2.1 Market share mucic acid.....	4
Tabel 2.2 Kebutuhan <i>mucic acid</i> global dalam ton/tahun	5
Tabel 2.3 Perbandingan Proses Hidrolisis Enzim dengan Hidrolisis Asam.....	7
Tabel 2.4 Perbandingan Proses Oksidasi.....	9
Tabel 2.5 Perbandingan mikroorganisme penghasil mucic acid	10
Tabel 3.1 Neraca Massa Pabrik Mucic acid	25
Tabel 3.2 Blower G-121	26
Tabel 3.3 Blower G-123	26
Tabel 3.4 Heat exchanger E-122	26
Tabel 3.5 Conveyor circulating air J-120.....	26
Tabel 3.6 Ekstraktor H-210	26
Tabel 3.7 Blower G-331	26
Tabel 3.8 Heat exchanger E-332	26
Tabel 3.9 Heat exchanger E-412	27
Tabel 3.10 Blower G-333	27
Tabel 3.11 Conveyor circulating air J-330.....	27
Tabel 3.12 Flash Evaporator (V-410).....	27
Tabel 4.1 Gudang F-110.....	28
Tabel 4.2 Washer X-112.....	28
Tabel 4.3 Conveyor circulating air J-120.....	29
Tabel 4.4 Tangki Penyimpanan (F-130).....	29
Tabel 4.5 Crushers C-140.....	30
Tabel 4.6 Screener (H-141)	30
Tabel 5.1 HAZID (Hazard Identification).....	31
Tabel 5.2 HAZOP Ekstraktor	34
Tabel 5.3 HAZOP Flash Evaporator	35

Tabel 5.4 HAZOP Fermentor	35
Tabel 5.5 HAZOP Acidification Reactor	35
Tabel 6.1 Total Capital Investment	36
Tabel 6.2 Total Production Cost (TPC).....	36
Tabel 6.3 Keuntungan	36
Tabel 6.4 Break Even Point.....	37
Tabel 6.5 Rangkuman Evaluasi Ekonomi	38



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kopi merupakan salah satu komoditas perkebunan utama di Indonesia. Produksi kopi nasional meningkat dari 758,72 ribu ton pada 2023 menjadi 807,58 ribu ton pada 2024, yang terdiri atas sekitar 74% robusta dan 26% arabika (BPS, 2024). Tingginya produksi tersebut turut meningkatkan limbah pengolahan kopi berupa 48% daging buah, 42% kulit kopi, dan 6% kulit biji (Gede *et al.*, 2023). Kulit kopi umumnya hanya dimanfaatkan sebagai pakan ternak dan pupuk atau dibuang tanpa pengolahan, sehingga berpotensi menimbulkan kerugian ekonomi (Novita *et al.*, 2018). Padahal, kulit kopi mengandung pektin sebesar 27,20–57,24% yang dapat dimanfaatkan dalam bidang pangan, pengemasan, farmasi, dan biomedis (Dea *et al.*, 2022). Pektin tersebut dapat dihidrolisis menjadi D-galakturonat, kemudian dioksidasi menjadi *mucic acid* (Ortiz-Sanchez *et al.*, 2020). Kandungan asam galakturonat dalam pektin kulit kopi robusta dapat mencapai 45,01%, bergantung pada jenis pelarut, pH, suhu, dan waktu ekstraksi yang memengaruhi hidrolisis protopektin menjadi pektin (Li *et al.*, 2023).

Mucic acid atau asam galaktarat merupakan senyawa yang banyak digunakan dalam industri kimia, farmasi, kosmetik, dan pangan. Senyawa ini dimanfaatkan sebagai prekursor nilon berbasis bio, piron, polietilena furanoat, bahan pengembang tepung *self-rising*, dan bahan pembuatan asam furoat. Produksi komersialnya umumnya dilakukan melalui oksidasi galaktosa menggunakan asam nitrat atau oksidasi elektrolitik D-galakturonat. Namun, dampak lingkungan dari proses konvensional mendorong pengembangan metode produksi berbasis bio yang lebih ramah lingkungan (Jeong *et al.*, 2020).

Mucic acid merupakan asam organik dikarboksilat berkarbon enam yang juga dikenal sebagai asam meso-galaktarat atau asam mukat. Selain digunakan sebagai agen pengkelat dan bahan perawatan kulit, senyawa ini dapat dimanfaatkan dalam sintesis polimer dan sebagai bahan kimia platform. *Mucic acid* saat ini diproduksi melalui

oksidasi D-galaktosa atau senyawa bergalaktosa menggunakan asam nitrat maupun oksidasi elektrolitik D-galUA (Karothu *et al.*, 2025).

1.2 Sejarah dan Perkembangan

Kajian *mucic acid* berkembang melalui penelitian pektin, yaitu polisakarida utama dinding sel tumbuhan. Pada akhir abad ke-19 hingga awal abad ke-20, keterbatasan metode analisis menyebabkan struktur pektin belum dipahami secara jelas (Rees 1969). Penelitian pada 1920–1930 menunjukkan bahwa pektin terutama tersusun atas unit asam galakturonat berikatan α -1,4 yang membentuk rantai galakturonan (ASPINALL, 1980). Di alam, rantai tersebut mengalami esterifikasi, asetilasi, dan penyisipan gula lain, terutama L-ramnosa, sehingga membentuk struktur pektin yang kompleks (Lima *et al.*, 2010).

Pada 2024, nilai pasar *mucic acid* mencapai USD 1,2 miliar dan diproyeksikan meningkat menjadi USD 2,0 miliar pada 2033 dengan *Compound Annual Growth Rate* (CAGR) sebesar 6,5% selama 2026–2033. Pertumbuhan ini didorong oleh kemajuan teknologi, perubahan kebutuhan konsumen, pengembangan aplikasi baru, digitalisasi, dan tuntutan keberlanjutan.



Gambar 1.1 CAGR Mucic acid

Sumber: <https://www.marketresearchintellect.com/product/mucic-acid-market/>

Pabrik *mucic acid* direncanakan untuk memenuhi kebutuhan industri farmasi, kosmetik, pangan, dan kimia dalam negeri. Senyawa ini digunakan sebagai agen

pengkelat serta bahan antara dalam sintesis senyawa kompleks, termasuk polimer ramah lingkungan dan bahan kimia fungsional (Vidgren *et al.*, 2020). Selain itu, senyawa ini juga digunakan pada industri kimia khusus, seperti pembuatan polimer ramah lingkungan dan bahan kimia fungsional. Lokasi pabrik di Tangerang dipilih karena memiliki akses logistik yang strategis menuju kawasan industri Jabodetabek, Pelabuhan Tanjung Priok, dan Bandara Soekarno-Hatta sehingga mendukung distribusi domestik maupun ekspor. Distribusi dalam negeri dilakukan menggunakan truk tangki kimia atau kontainer tertutup, sedangkan ekspor menggunakan *chemical grade container* sesuai standar keselamatan internasional. Pabrik-pabrik yang berpotensi menggunakan *mucic acid* di Indonesia disajikan pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Pabrik yang Berpotensi menggunakan Mucic acid

Negara	Nama Perusahaan
Indonesia	PT. Paragon Technology and Innovation
Indonesia	PT. Indofood
Indonesia	PT. Lion Wings
Indonesia	PT. L'Oreal Indonesia
Indonesia	PT. Unilever Indonesia Tbk
Thailand	U&V Holding Co., Ltd
Thailand	Siam Pharmaceutical Co., Ltd.
Thailand	Biolab Co., Ltd.
Malaysia	Tropika Beauty Sdn.Bhd
Malaysia	Puras Malaysia
Malaysia	Joa Lab
Australia	Jurlique International Pty.Ltd
Australia	Kora Organics
Australia	Beerenberg Farm
Singapura	The Face Inc
Singapura	Novartis
Singapura	ICM Pharma
Singapura	The Polyolefin Company
Filipina	Philippine Resins Industries, Inc
Filipina	United Laboratories, Inc.
Filipina	Beauty Elements Ventures Inc.
Sri Lanka	State Pharmaceuticals Manufacturing Corporation (SPMC)
Sri Lanka	Hemas Manufacturing (Pvt) Ltd.
Sri Lanka	Link Natural Products (Pvt) Ltd.

BAB 2 PERENCANAAN PABRIK

2.1 Pemilihan Kapasitas

Penentuan kapasitas merupakan tahap awal perancangan pabrik untuk menetapkan jumlah produksi berdasarkan data ekspor-impor, konsumsi, serta produksi dalam dan luar negeri. Karena data perdagangan *mucic acid* di Indonesia belum tersedia, kapasitas pabrik ditentukan berdasarkan kebutuhan dan pangsa pasar global.

Tabel 2.1 Market share mucic acid

Year	Market Share (Billion)	CAGR (%)	Sumber
2023	2.1	6.10	https://dataintelo.com/report/d-galacturonic-acid-market
2024	1.2	6.50	https://www.marketresearchintellect.com/product/mucic-acid-market/
2024	1.2	5.50	https://www.linkedin.com/pulse/galactaric-acid-market-size-2026 -
2024	68	16.58	https://www.openpr.com/news/3727432/mucic-acid-market-size-share-and-forecast-by-key
2024	0.85	10.22	https://www.htfmarketinsights.com/report/4415197-asiapacific-dgalacturonic-acid-market
2025	0.4682	5.70	https://datahorizonresearch.com/d-galacturonic-acid-market-62074
2026	0.26161	7.20	https://www.linkedin.com/pulse/mucic-acid-cas-526-99-8-market-size-2026-strategy-jsqec#:~:text=Download%20Sample%20Get%20Special%20Discount%20Mucic%20D%20
Rata-rata		8.257142857	

Data menunjukkan pangsa pasar *mucic acid* dalam miliar USD dan nilai *Compound Annual Growth Rate* (CAGR). Kebutuhan pada 2031 diproyeksikan menggunakan metode *discounted* dengan persamaan berikut (Maritsa & Irfin, 2025).

$$m = P(1 + i)^n \dots\dots\dots (1.2)$$

Keterangan :

m = jumlah produk pada tahun yang akan direncanakan 2031 (ton)

P = jumlah produk pada tahun pertama (ton)

i = pertumbuhan rata-rata per tahun (%)

n = selisih tahun yang diperhitungkan

Tabel 2.2 Kebutuhan *mucic acid* global dalam ton/tahun

Years	Market Share (USD)	Harga (USD)	Capacity (Ton/year)
2031	3961610573	155	25558.77789
2031	2091111414	155	13491.04138
2031	2091111414	155	13491.04138
2031	118496313449.89	155	764492.3448
2031	1481203918	155	9556.15431
2031	753651859.3	155	4862.27006
2031	370363575	155	2389.44242
Rata rata			119120.1532

Berdasarkan proyeksi tersebut, kapasitas pabrik ditetapkan sebesar 10% dari kebutuhan global rata-rata, yaitu 11.912,01532 ton/tahun, kemudian dibulatkan menjadi 12.000 ton/tahun. Persentase 10% dipilih untuk mengantisipasi fluktuasi permintaan karena *mucic acid* masih tergolong produk baru di Indonesia.

2.2 Pemilihan Proses

Pemilihan proses menentukan efisiensi dan keberlanjutan operasi pabrik. *Mucic acid* diproduksi melalui oksidasi *D-galacturonic acid* (Rautiainen *et al.*, 2015), yang diperoleh dari hidrolisis pektin (Ortiz-Sanchez *et al.*, 2020). Keberhasilan hidrolisis dipengaruhi oleh pH, suhu, waktu reaksi, rasio bahan, konsentrasi, dan jenis bahan baku (Zulnazri *et al.*, 2023).

Filtrat yang mengandung pektin selanjutnya dialirkan ke dalam *holding tank* pada suhu 25–30 °C selama 15 jam untuk menstabilkan aliran, menghomogenkan campuran, dan mengendapkan partikel padatan kasar sebelum proses pemisahan berikutnya (Brilliantina *et al.*, 2023) Pektin yang dihasilkan harus memenuhi standar *International Pectin Producers Association* (IPPA), yaitu memiliki kadar asam galakturonat minimal 35%. Kadar tersebut dipengaruhi oleh pH, suhu, dan waktu ekstraksi, dengan kondisi optimum pada pH 1,5–2,0, suhu 85–95 °C, dan waktu ekstraksi 1,5–2,5 jam (Zhang *et al.*, 2013).

Larutan pektin hasil ekstraksi selanjutnya dioksidasi untuk mengonversi D-galakturonat menjadi *mucic acid* sebagai produk akhir (Vidgren *et al.*, 2020). Oleh

karena itu, pemilihan metode dan kondisi oksidasi yang tepat menjadi faktor penting untuk memperoleh *mucic acid* dengan hasil yang optimal.

2.2.1 Hidrolisis Enzim

Hidrolisis enzim digunakan untuk mendegradasi pektin menjadi asam galakturonat dengan bantuan enzim pektinolitik, hemiselulolitik, dan penghidrolisis karbohidrat (Ortiz-Sanchez *et al.*, 2020). Pada tahap *pre-treatment*, tongkol jagung dikeringkan pada 100 °C, digiling hingga ukuran 10 mesh, lalu sebanyak 5 g direndam dalam NaOH 2% (b/v) dan diautoklaf pada 121 °C selama 1 jam. Residu dipisahkan, dicuci dua kali dengan ± 200 mL akuades, dinetralkan hingga pH 4,8 menggunakan asam asetat, kemudian dikeringkan pada 60 °C selama 16 jam (Pocan *et al.*, 2018).

Hidrolisis dilakukan dalam reaktor *batch* menggunakan buffer sitrat 0,05 M pada pH 4,8 dan rasio padatan-cairan 3% (b/v). Enzim selulase dan β -glukosidase masing-masing ditambahkan sebanyak 0,16 dan 0,18 mL/g bahan kering. Reaksi berlangsung pada 50 °C dan 150 rpm selama 24 jam, kemudian enzim dinonaktifkan dalam air mendidih selama 5 menit. Campuran disentrifugasi pada 5.000 rpm selama 3 menit dan supernatan dianalisis, dengan hasil glukosa dan gula pereduksi sebesar 21,5–33,6% (Pocan *et al.*, 2018).

2.2.2 Hidrolisis Asam

Hidrolisis asam merupakan pemecahan polisakarida, seperti pati dan selulosa, menjadi gula sederhana menggunakan asam (Herawati *et al.*, 2021.) Asam yang umum digunakan meliputi asam sulfat, fosfat, klorida, asetat, dan sitrat (Kurniawan *et al.*, 2022). Asam sitrat dipilih karena dapat berinteraksi dengan gugus OH dan COOH pada pektin, khususnya unit asam galakturonat, sehingga struktur pektin lebih terbuka dan mudah dipisahkan dari lignoselulosa (Liew *et al.*, 2014). Selain meningkatkan kestabilan reaksi, asam sitrat mampu mempertahankan pH dan mengurangi degradasi produk secara berlebihan (Fazira Rizki & Reza, 2026).

Penggunaan asam kuat dapat mempercepat pemutusan rantai pektin dan pembentukan asam pektat sehingga menurunkan rendemen pektin (Tuhuloula *et al.*,

2013). Hidrolisis menggunakan HCl 0,1 N pada pH 3,5 menghasilkan rendemen 28% (Kalapathy & Proctor., 2001), sedangkan asam sitrat 7% menghasilkan rendemen pektin 39,585% (Hermanto Madjaga *et al.*, 2017).

Hidrolisis dilakukan dengan mencampurkan 10 g tepung kulit buah sukun dan 500 mL asam sitrat 7%, kemudian dipanaskan pada 90 °C selama 90 menit. Hasil hidrolisis disaring dan filtrat didinginkan, lalu diendapkan selama 24 jam menggunakan etanol 96% dengan perbandingan volume 1:1,5. Endapan dicuci dengan etanol dan dikeringkan pada 50 °C selama 24 jam. Proses tersebut menghasilkan *yield* pektin 39,58% dengan kadar galakturonat 89,76% (Hermanto Madjaga *et al.*, 2017). Perbandingan hidrolisis enzim dan asam sebagai dasar pemilihan proses disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Perbandingan Proses Hidrolisis Enzim dengan Hidrolisis Asam

No	Parameter	Perbandingan Proses Hidrolisis	
		Hidrolisis Enzim	Hidrolisis Asam
1	Bahan Baku	Enzim <i>Cellulase</i> dan β -glukosidase	Asam Sitrat
2	Suhu	50°C	90°C
3	pH	4,8	2
4	Tekanan (atm)	1 atm	1 atm
5	<i>Yield</i>	21,5% - 33,6%	49,07%
6	Waktu	24 jam	90 menit
7	Korosi	Rendah karena dalam kondisi basa lemah	Rendah-sedang karena menggunakan asam lemah
8	Jenis Reaktor	<i>Reaktor Batch</i>	<i>Reaktor batch</i>
9	Reaksi Samping	Terbentuk <i>cellobiose</i> , xilosa, dan arabinosa	Tidak ada
10	Harga	Mahal	Murah
11	Kelebihan	Aman, hemat energi, dan tanpa bahan kimia keras	Asam lemah, waktu singkat, korosi rendah, dan <i>yield</i> tinggi
12	Kekurangan	Reaksi lama, enzim mahal dan sensitif, serta menghasilkan produk samping	Reaksi tidak selektif, berpotensi mendegradasi pektin, dan menghasilkan limbah

Sumber: ((Pocan *et al.*, 2018) & (Hermanto Madjaga *et al.*, 2017))

Berdasarkan perbandingan tersebut, hidrolisis asam menggunakan asam sitrat dipilih karena menghasilkan *yield* cukup tinggi, membutuhkan waktu lebih singkat,

serta mampu menjaga kestabilan pH dan mengurangi degradasi produk (Hermanto Madjaga *et al.*, 2017)

2.2.3 Oksidasi mikrobial dengan jamur *Trichoderma* sp

Jamur *Trichoderma* sp. dipilih karena mampu menghasilkan enzim uronate dehydrogenase (UDH) yang aktif pada kondisi asam. Eliminasi gen *gar2* yang mengode D-galacturonate reductase dapat menonaktifkan jalur metabolisme samping sehingga D-galakturonat tidak digunakan untuk pertumbuhan sel, tetapi diarahkan ke pembentukan mucic acid.

Oksidasi dilakukan melalui fermentasi aerob menggunakan *Trichoderma* sp. hasil rekayasa genetik pada suhu 30 °C dan pH 4. Penonaktifan gen D-galacturonate reductase mencegah pembentukan L-galactonate, piruvat, dan gliserol sehingga reaksi lebih selektif. D-galakturonat diberikan secara *batch* atau *fed-batch* untuk mencegah inhibisi substrat, sedangkan glukosa, xilosa, atau laktosa ditambahkan sebagai sumber energi. Fermentasi berlangsung selama 6 hari atau sekitar 150–200 jam dan menghasilkan *yield* 1–1,01 g mucic acid/g D-galakturonat, mendekati *yield* teoritis sebesar 1,08 g/g (Vidgren *et al.*, 2020)

2.2.4 Oksidasi elektrolitik dengan elektroda emas (Au), Platina (Pt) dan Nikel (Ni)

Oksidasi D-galakturonat dilakukan dalam reaktor *batch* berupa sel elektrolisis kaca berisi NaOH 0,1 M pada suhu 25 °C dan tekanan 1 atm. NaOH digunakan untuk menciptakan kondisi basa sekaligus sebagai elektrolit penghantar arus. Pada elektroda platina, reaksi berlangsung selama 25 jam dengan *yield mucic acid* 34% karena terbentuk asam format dan asam glikolat. Elektroda emas menghasilkan *yield* tertinggi, yaitu 86% dalam 6 jam, karena oksidasi berlangsung lebih stabil dan selektif. Sebaliknya, elektroda nikel hanya menghasilkan *yield* 7–8,5% akibat degradasi D-galakturonat pada potensial tinggi sehingga kurang sesuai untuk proses ini (Parpot *et al.*, 2004). Perbandingan oksidasi mikrobial dan elektrolitik disajikan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Perbandingan Proses Oksidasi

No	Parameter	Perbandingan Proses Oksidasi	
		Oksidasi Mikrobial	Oksidasi Elektrolitik
1	Bahan Baku	<i>Trichoderma sp.</i>	Elektrolit : larutan NaOH 0,1 M Elektroda : Emas (Au), Platina (Pt), Nikel (Ni) Tegangan : 0.75 V – 1.5 V Rapat Arus : Au : 0.57-1.07 mA/ cm ² Pt : 0.16-0.32 mA/ cm ² Ni : 13-14 mA/ cm ²
2	Suhu	30 °C	25 °C
3	pH	4-5	>13
4	Tekanan (atm)	1 atm	1 atm
5	Yield	1-1.01 g/g <i>galacturonic acid</i>	Emas (Au) : 86% Platina (Pt) : 34% Ni : 7-8,5%
6	Waktu	72 jam	6 jam
7	Korosi	Sedang	Tinggi
8	Jenis Reaktor	<i>Stirred Tank Reactor</i>	Reaktor <i>batch</i>
9	Reaksi Samping	Tidak ada	Menghasilkan Asam format, glikolat, dan oksalat
10	Harga	Relatif murah	Mahal
11	Kelebihan	Selektivitas dan <i>yield</i> tinggi, kondisi ringan, serta ramah lingkungan	Selektivitas tinggi, kondisi ringan, dan tanpa oksidator berbahaya
12	Kekurangan	Proses lama, bergantung pada stabilitas mikroorganisme, dan memerlukan rekayasa genetika	Elektroda mahal, reaksi samping, dan kondisi sangat basa yang korosif

Sumber ((Parpot *et al.*, 2004) & (Vidgren *et al.*, 2020))

Berdasarkan Tabel 2.4, oksidasi mikrobial dipilih karena *Trichoderma sp.* menghasilkan enzim uronate dehydrogenase (UDH), sehingga konversi D-galakturonat menjadi *mucic acid* berlangsung efisien dan selektif (Vidgren *et al.*, 2020). Perbandingan mikroorganisme penghasil *mucic acid* disajikan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Perbandingan mikroorganisme penghasil mucic acid

Mikroorganisme	Konsentrasi <i>Mucic acid</i> tertinggi	Skala	Keterangan
<i>Gluconobacter oxydans</i>	2,55 g/L	1 L	Produksi relatif rendah
<i>Escherichia coli</i>	10,3 g/L	0,05 L	Produksi skala kecil
<i>Trichoderma</i> sp	53 g/L	0.11 L	Konsentrasi tertinggi
<i>Trichoderma reesei</i>	21 g/L	10 L	Berpotensi pada skala besar
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	20 g/L	3 L	Produksi cukup tinggi
<i>Pseudomonas putida</i>	22,4 g/L	0,015 L	Produksi tinggi pada skala kecil

Sumber : (Bieringer *et al.*, 2026)

Berdasarkan Tabel 2.5, *Trichoderma* sp. dipilih karena menghasilkan konsentrasi *mucic acid* tertinggi, yaitu 53 g/L. Mikroorganisme ini juga tahan terhadap kondisi asam sehingga sesuai dengan kondisi proses yang dirancang (Vidgren *et al.*, 2020).

2.3 Uraian Proses

Mucic acid dari kulit kopi diproduksi melalui oksidasi mikrobial D-galakturonat hasil hidrolisis pektin. Kulit kopi dicuci, dikeringkan pada 55 °C selama 10 jam, lalu dihaluskan (Maulida *et al.*, 2023). Pektin kemudian diekstraksi menggunakan larutan asam pada suhu 70–80 °C selama 40–90 menit (Diana *et al.*, 2023). Proses ekstraksi ini dilakukan dengan pH proses yang diatur pada rentang 1,0 - 3,0 (Fakayode & Abobi, 2018). Meskipun mempercepat ekstraksi, penggunaan asam kuat dapat menyebabkan depolimerisasi pektin, meningkatkan limbah cair asam, serta menambah kebutuhan energi dan bahan kimia (Chandel *et al.*, 2022).

Asam sitrat dipilih karena mampu mempertahankan kualitas pektin dan mengurangi degradasi rantai polimer (Mansor *et al.*, 2025). Pelarut ini juga bersifat *food grade* serta menghasilkan rendemen dan kualitas pektin yang baik (Pattarapisitporn & Noma, 2025). Berdasarkan standar JECFA, pektin harus memiliki kadar asam galakturonat minimal 65% sebelum dihidrolisis menjadi D-galakturonat. Selanjutnya, D-galakturonat dioksidasi secara mikrobial menggunakan *Trichoderma* sp. Mikroorganisme dipilih berdasarkan kemampuan menghasilkan enzim oksidatif

yang aktif dan stabil, memberikan hasil tinggi, serta meminimalkan reaksi samping (Liem *et al.*, 2021). Tahapan produksi *mucic acid* dijelaskan sebagai berikut:

2.3.1 Tahap Persiapan dan Pengeringan Bahan Baku

Kulit kopi diperoleh dari perkebunan di Kabupaten OKU Selatan dan sentra produksi lain di Sumatera Selatan melalui perjanjian pemasokan (*supply agreement*). Sentra tersebut meliputi Pagar Alam, Lahat, Muara Enim, Empat Lawang, OKU, Musi Rawas, dan OKU Selatan (Kumaisyaroh, 2023). Bahan diangkut menggunakan truk bak tertutup dalam kondisi kering untuk menjaga mutu serta mencegah peningkatan kadar air, fermentasi, dan pertumbuhan jamur. Kulit kopi dari proses basah memiliki kadar air sekitar 75% dan perlu dikeringkan hingga 7–18%, bahkan dikeringkan kembali secara berkala untuk mencegah fermentasi dan pertumbuhan kapang (Oliveira *et al.*, 2021).

Kulit kopi dialirkan melalui *belt conveyor* (J-111) menuju *washer* (X-112), kemudian dikeringkan menggunakan *air-circulating conveyor* (B-120) pada 55 °C selama 5 jam (Maulida *et al.*, 2023). Pengeringan pada 50–60 °C dilakukan untuk menurunkan kadar air tanpa merusak struktur pektin (Nadir *et al.*, 2018). Setelah didinginkan pada suhu ruang, bahan dipindahkan melalui *air-circulating conveyor* (J-123) pada 30–35 °C menuju tangki penyimpanan (F-130) hingga stabil (Yani *et al.*, 2025).

Air-circulating conveyor menggunakan blower pengering (G-121) dan *heat exchanger* (E-122) untuk mengalirkan udara panas secara sirkulatif, sedangkan blower pendingin (G-123) mengalirkan udara bersuhu 25 °C. Bahan selanjutnya dialirkan melalui *conveyor* (J-131) menuju *crusher* (C-140), lalu diayak pada *screening unit* (H-141) hingga berukuran 40 mesh (Wahyu *et al.*, 2025). Partikel yang tertahan dikembalikan ke *crusher* menggunakan *bucket elevator*. Sementara itu, asam sitrat 98% diencerkan dalam Mixer I (M-152) hingga 5,7 mM atau sekitar 0,11%, kemudian dipompakan ke *extractor* (H-210) sebagai pelarut ekstraksi dan hidrolisis pektin (Ortiz-Sanchez *et al.*, 2020).

2.3.2 Tahap Ekstraksi-Hidrolisis

Partikel kulit kopi diekstraksi dan dihidrolisis menggunakan asam sitrat yang mampu memutus ikatan protopektin dan melepaskan asam galakturonat dari dinding sel tanaman (Riyamol *et al.*, 2023). Proses dilakukan dalam *extractor* CSTR (H-210) menggunakan asam sitrat 0,11% pada suhu $\pm 75^\circ\text{C}$, pH 2, kecepatan pengadukan 200 rpm, dan rasio bahan terhadap pelarut 1:25 (b/b) selama 90 menit. Waktu tersebut dipilih untuk memaksimalkan pelepasan asam galakturonat tanpa menyebabkan degradasi berlebih (Ortiz-Sanchez *et al.*, 2020). Kondisi pH 2 juga mendukung pemutusan protopektin dan difusi asam galakturonat ke fase cair (Dhora *et al.*, 2023). Reaksi hidrolisis pektin ditunjukkan pada Persamaan 2.1 (Garfias Silva *et al.*, 2022) :



Pada kondisi asam, ion H^+ mengatalisis pemutusan ikatan glikosidik α -(1 $\rightarrow$ 4) pada rantai poligalakturonat. Molekul air kemudian bereaksi dengan karbon anomerik sehingga unit anhidro-asam galakturonat berubah menjadi monomer asam D-galakturonat. Nilai (n) menunjukkan derajat polimerisasi pektin yang berkisar antara 72–100 (Gawskoska, 2018). Asam sitrat tidak dikonsumsi dalam reaksi, tetapi berfungsi menyediakan kondisi asam dan menurunkan energi aktivasi hidrolisis (Garfias Silva *et al.*, 2022).

Proses ini menghasilkan *slurry* yang terdiri atas fase cair dan padat. Campuran kemudian dialirkan ke *storage tank* (F-220) untuk menstabilkan aliran dan menghomogenkan komposisi sebelum tahap berikutnya (Ortiz-Sanchez *et al.*, 2020).

2.3.3 Tahap Filtrasi

Larutan hasil ekstraksi yang mengandung pektin dan residu padat dipisahkan menggunakan Filter Press I (H-310). Fraksi padat berupa *cake* dialirkan melalui Conveyor IV (J-311) menuju Mixer II anaerob (M-320) pada suhu $36,85^\circ\text{C}$ untuk diolah menjadi pupuk dengan penambahan unsur hara makro N, P, dan K serta unsur mikro Fe, Cu, dan Zn (Yuniastuti dan Titiek Purbiati *et al.*, 2025).

Pengomposan anaerob dipilih karena lebih efisien dan tidak memerlukan pembalikan seperti proses aerob (Sawir *et al.*, 2022). Proses berlangsung selama 10–12 hari hingga kompos berwarna gelap dan berbau seperti tanah (Ngapiyatun *et al.*, 2020). Menurut Fry (1973) Suhu optimal pengomposan berkisar 25–35 °C.

Padatan dari Mixer II (M-320) selanjutnya dikeringkan menggunakan *air-circulating conveyor* (J-330) pada suhu 60 °C untuk menurunkan kadar air, kemudian didinginkan hingga 35 °C sehingga diperoleh produk pupuk kering (Ortiz-Sanchez *et al.*, 2020).

2.3.4 Tahap Evaporasi

Filtrat dipanaskan menggunakan *preheater* (E-412), kemudian dialirkan ke *flash evaporator* (V-410) pada suhu 100 °C dan tekanan 1 atm selama 10–15 menit. Proses ini bertujuan mengurangi kandungan air dan meningkatkan konsentrasi D-galakturonat sebelum tahap berikutnya. *Flash evaporator* dipilih karena umpan masih berbentuk cair, sedangkan *dryer* digunakan untuk menghasilkan produk kering. Waktu penguapan dibatasi karena proses lebih dari 30 menit dapat merusak struktur pektin (Davitadze, 2023). Uap yang terbentuk dikondensasikan dalam *condenser* (E-414), kemudian dialirkan ke unit pengolahan limbah.

2.3.5 Tahap Penetralan

Sintesis *mucic acid* mencapai produktivitas optimum pada pH 4,0 dan suhu 35 °C (Tamminen *et al.*, 2022). Karena pH larutan dapat turun hingga sekitar 2 selama proses oksidasi, diperlukan penambahan basa untuk menaikkannya. Basa berbasis natrium dan amonium dapat digunakan, tetapi amonium berpotensi membentuk garam galaktarat apabila bereaksi dengan ekstrak ragi sehingga menurunkan hasil *mucic acid* (Ortiz-Sanchez *et al.*, 2020). Oleh karena itu, NaOH dipilih sebagai agen penetral.

Larutan pekat dialirkan ke reaktor penetralan (M-420). NaOH yang telah diencerkan dalam Mixer II (M-352) ditambahkan secara bertahap hingga larutan mencapai pH 4,0–5,0 pada suhu 35 °C.

2.3.6 Tahap Oksidasi

Asam galakturonat yang telah dinetralkan dioksidasi secara aerob menggunakan *Trichoderma* sp. Mikroorganisme ini dipilih karena menghasilkan enzim *uronate dehydrogenase* (UDH) yang mendukung oksidasi secara efisien dan meminimalkan produk samping (Vidgren *et al.*, 2020). Nutrisi berupa sumber nitrogen, mineral, dan laktosa dari *storage tank* (F-440) dialirkan ke *mixing tank* (M-442), kemudian ditambahkan *Trichoderma* sp. Campuran diinkubasi pada suhu 28 °C dan 200 rpm selama tiga hari untuk mengaktifkan mikroorganisme sebelum digunakan (Tamminen *et al.*, 2022).

Campuran hasil inkubasi dan larutan asam galakturonat dialirkan ke fermentor (R-510). Fermentasi berlangsung secara aerob pada pH sekitar 5, suhu 30–35 °C, dan waktu ±3 hari. Pertumbuhan jamur dipengaruhi oleh suhu, cahaya, udara, pH, dan nutrisi (Vitale *et al.*, 2025). *Trichoderma* sp. tumbuh optimal pada suhu 25–33 °C dan pH 4–7, sedangkan suhu di atas 40 °C dan pH tinggi dapat menghambat pertumbuhannya (Subasari *et al.*, 2025). Ketersediaan karbon dan nitrogen juga memengaruhi kolonisasi serta pembentukan spora (Subhan *et al.*, 2025). Oksigen diperlukan untuk respirasi, pertumbuhan miselium, dan pembentukan konidia (Yao *et al.*, 2023), sedangkan pengadukan kontinu menjaga pemerataan oksigen, nutrisi, dan substrat di dalam reaktor (Ortiz-Sanchez *et al.*, 2020).

Reaksi oksidasi D-galakturonat menjadi *mucic acid* ditunjukkan pada Persamaan 2.2 (Tan *et al.*, 2022) :



Setelah fermentasi, campuran dialirkan menggunakan Pump XIV (L-514), didinginkan dalam Cooler II (E-611), kemudian dimasukkan ke *acidification reactor* (M-610) untuk tahap pengasaman.

2.3.7 Tahap Pengasaman

Filtrat yang mengandung *mucic acid* dari fermentor (R-510) dialirkan ke *acidification reactor* (M-610). Larutan HCl dari tangki (F-520) ditambahkan untuk

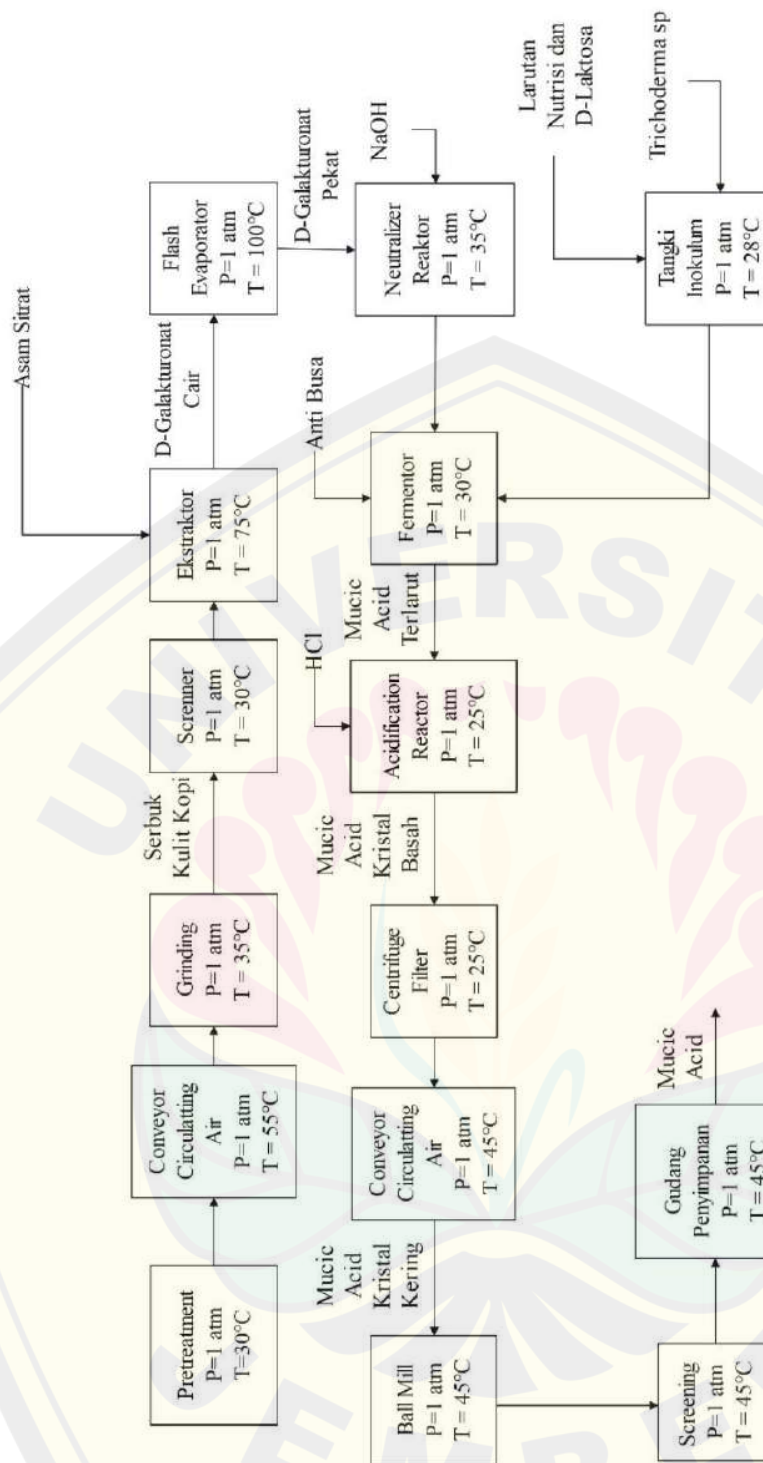
menurunkan pH menjadi 1–2 pada suhu 25 °C dan tekanan 1 atm selama 30 menit (Ortiz-Sanchez *et al.*, 2020). Pengasaman menggeser kesetimbangan ionik dan menurunkan kelarutan *mucic acid* sehingga terbentuk endapan kristal (Meera *et al.*, 2017). Kelarutan *mucic acid* menurun secara signifikan pada pH di bawah 4,6 sehingga pH 1–2 efektif untuk proses pengendapan (Tamminen *et al.*, 2022).

Pemisahan *mucic acid* dilakukan melalui presipitasi, yaitu penurunan kelarutan zat terlarut akibat perubahan pH hingga terbentuk padatan kristalin yang dapat dipisahkan dari fase cair (Adji *et al.*, 2023).

2.3.8 Tahap Pembentukan *Mucic acid*

Campuran hasil asidifikasi dipisahkan menggunakan *centrifuge filter* (H-620) untuk memisahkan kristal *mucic acid* dari larutan induk. Kristal kemudian dikeringkan dalam *dryer* (B-623) pada suhu 45 °C dan tekanan 1 atm untuk menurunkan kadar air (Ortiz-Sanchez *et al.*, 2020). Produk kering digiling menggunakan *ball mill* (C-630), lalu diayak pada *screening unit* (H-632) hingga berukuran 40 mesh. Partikel yang tidak lolos dikembalikan ke *ball mill* melalui *bucket elevator* (J-633).

Gambar 2.1 PFD Pra-Rancangan Pabrik Mucic acid



Gambar 2.2 Blok Flow Diagram Proses Mucic acid

2.4 Spesifikasi Bahan dan Produk

Kualitas produk harus memenuhi spesifikasi dan target perancangan pabrik. Oleh karena itu, sifat fisika dan kimia bahan perlu diketahui sebagai dasar evaluasi proses dan mutu produk. Pembuatan *mucic acid* menggunakan kulit kopi, asam sitrat ($C_6H_8O_7$), NaOH, HCl, *Trichoderma* sp., dan air. Sifat fisika dan kimia bahan baku, bahan pendukung, serta produk disajikan sebagai berikut.

2.4.1 Spesifikasi Bahan Baku

a. Kulit Kopi

Sifat-sifat Fisika

Densitas	: 0,3-0,45 g/cm ³
Titik didih	: 250 °C
Kapasitas Panas	: 1,5 kJ/kg.K
Kandungan Pektin	: 53.62%
Kandungan Air	: 8,92%
Kadar Protein	: 12,14%
Kadar Abu	: 11,78%
Lignoselulosa	: 13,54%
Harga	: 2.500 - 6.000/kg
Asal	: Perkebunan Oku Selatan

2.4.2 Spesifikasi Bahan Pendukung

a. Asam Sitrat

Sifat-sifat Fisika

Berat Molekul	: 192 gr/mol
Spesific Grafity	: 1,54 pada suhu 20 °C
Titik Lebur	: 153 °C
Titik Didih	: 310 °C
Bentuk dan Warna	: Berbentuk Kristal dan berwarna putih
Bau	: Tidak berbau dan memiliki rasa asam

Harga : Rp. 583.500/25kg

Asal : PT. Ajs Chemindo

Sifat-sifat Kimia

1. Menyebabkan iritasi mata apabila terpapar kontak langsung
2. Dapat digunakan sebagai pengawet dan penghilang kesadahan dalam air karena mampu mengikat ion-ion logam
3. Asam sitrat dapat berupa anhidrat atau monohidrat untuk setiap satu molekulnya. Anhidrat mengkristal dalam air panas sedangkan monohidrat mengkristal dalam air dingin.
4. Asam sitrat dapat diubah menjadi anhidrat dengan pemanasan 70-75 °C. Apabila dipanaskan lebih dari 175 °C asam sitrat akan terdekomposisi.

b. Air

Sifat-sifat Fisika

Warna : Tidak Berwarna

Bau : Tidak Berbau

Densitas : 1,000 g/cm³ pada 3,98 °C

Berat Molekul : 18,02 g/mol

Titik Didih : 100 °C pada 1,013 hPa

Titik Beku : 0 °C

pH : 6,0-8,0 pada 25 °C

Specific Gravity : 1

Kapasitas Panas Spesifik : 4184 J/kg.K

Kapasitas Kalor : 4,22 kJ/kg.K

Sifat-sifat Kimia

1. Senyawa polar yang dapat melarutkan berbagai senyawa yang bersifat polar
2. Dapat berperan sebagai oksidator maupun reduktor, yaitu zat yang dapat memberi maupun menerima elektron
3. Tidak bersifat toksik

c. NaOH

Sifat-sifat Fisika

Berat Molekul : 39,997 gr/mol

Bentuk : Kristal

Warna : Putih

Kelarutan dalam air : Larut dalam air

 ΔH°_f (kJ/mol) : -425,8 kJ/mol ΔG°_f (kJ/mol) : -379,7 kJ/mol

Kapasitas kalor : 59,5 J/mol K

Entropi molar standar: 64,4 J/mol K

Harga : 2.100.000/25kg

Asal : PT. Chemindo Multi Indosukses

Sumber: (PubChem. (2025). *Sodium hydroxide* (CID 14798). National Center for Biotechnology Information.)

Sifat-sifat Kimia

1. Sangat mudah menyerap gas CO₂
2. Merupakan basa kuat
3. Bersifat sangat korosif terhadap jaringan organik

d. Asam klorida (HCl)

Sifat-sifat Fisika:

Rumus molekul : HCl

Berat Molekul : 36,46 gr/mol

Densitas : 1161-1190 kg/m³

Titik Lebur : -114,24 °C

Titik Didih : -85,06 °C

C_p (298 K) : 29,14 J/mol K ΔH_f (298 K) : -166,844 kJ/mol

Bentuk dan warna : Transparan cenderung kuning pucat

Bau : Berbau tajam

Harga : Rp. 960.000/2.5 liter

Asal : PT. Chemindo Multi Indosukses

Sifat-sifat Kimia

1. Oksidator kuat
2. Dapat melarutkan berbagai logam dan menghasilkan logam klorida dan gas hidrogen.
3. Larut dalam air dan terionisasi menjadi ion hidrogen (H^+) dan ion klorida (Cl^-).
4. Sangat korosif

e. *Trichoderma sp.*

Bentuk koloni : Bulat, membentuk lingkaran

Warna koloni : Hijau gelap

Bentuk konidium : Oval

Warna konidium : Hijau muda

Dinding konidium : Tipis

Hifa : Hialin, bersekat

Harga : Rp. 120.000/kg

Asal : Toko Pertanian *E-Commerce*

f. Antifoam

Bahan dasar : Polydimethylsiloxane (PDMS)

Densitas : 1 g/cm^3 (*estimated*)

Cp (298 K) : 1,46 J/mol K

Boiling point : $> 100 \text{ }^\circ\text{C}$; $> 212 \text{ }^\circ\text{F}$;

Mixture vapor pressure : $< 20.30 \text{ mmHg}$

2.4.3 Spesifikasi Produk

a. *Mucic acid*

Rumus Molekul : $C_6H_{10}O_8$

Titik Lebur : $220\text{--}225 \text{ }^\circ\text{C}$

Titik Didih	: 269.65 °C
Densitas	: 1.5274
Kemurnian	: 98 %
Kelarutan	: Mudah larut
Bentuk	: Kristal
Harga	: \$155/Kg

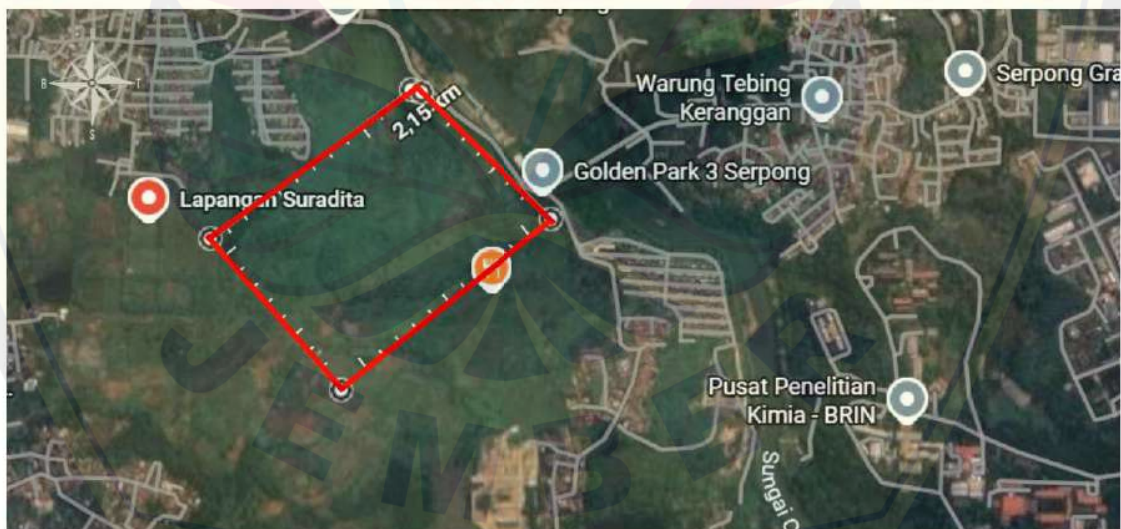
b) Pupuk Kompos

Warna	: Coklat Kehitaman
Bentuk	: Padatan
Kandungan	: Karbon dan Nitrogen
Harga	: Rp. 4000/Kg

2.5 Pemilihan lokasi dan tata letak

2.5.1 Pemilihan Lokasi

Lokasi pabrik berpengaruh terhadap keberhasilan dan keberlanjutan operasinya. Penentuan lokasi mempertimbangkan ketersediaan bahan baku, transportasi, utilitas, tenaga kerja, dan pasar. Berdasarkan pertimbangan tersebut, pabrik *mucic acid* direncanakan berlokasi di Kawasan Industri Tangerang, Jl. Lingkar Selatan No. 99, Suradita, Kecamatan Cisauk, Banten.



Gambar 2.3 Lokasi Pabrik

Faktor-faktor pemilihan daerah pendirian pabrik *mucic acid* sebagai berikut:

a. Faktor utama

1. Bahan baku: Lokasi pabrik mendukung penerimaan kulit kopi dari sentra produksi di Sumatera Selatan.
2. Transportasi: Wilayah Tangerang memiliki akses jalan tol dan Bandara Soekarno-Hatta serta relatif dekat dengan Pelabuhan Merak sebagai jalur penghubung Pulau Jawa dan Sumatera.
3. Kebutuhan air: diperoleh dari air Sungai Cisadane yang telah dimurnikan untuk proses, sarana utilitas, dan keperluan rumah tangga
4. Ketersediaan Sumber Daya Manusia (SDM) : Ketersediaan lulusan SMA/SMK hingga perguruan tinggi di wilayah Jabodetabek mendukung pemenuhan tenaga kerja terampil dan keberlanjutan operasi pabrik.
5. Ketersediaan utilitas: Asam sitrat dipasok oleh PT Sumber Rejeki Abadi Sentosa di Tangerang, sedangkan nutrisi mikroba diperoleh dari PT Plaza Tirta Mandiri di Jakarta. Kebutuhan listrik dipenuhi oleh PLN, didukung fasilitas bahan bakar dan pengolahan limbah kawasan industri.
6. Target pasar/konsumen : Kedekatan dengan industri farmasi, kosmetik, dan pangan di Jabodetabek mempermudah distribusi serta mengurangi biaya dan waktu pengiriman. Akses menuju pelabuhan dan bandara juga mendukung pemasaran ekspor.

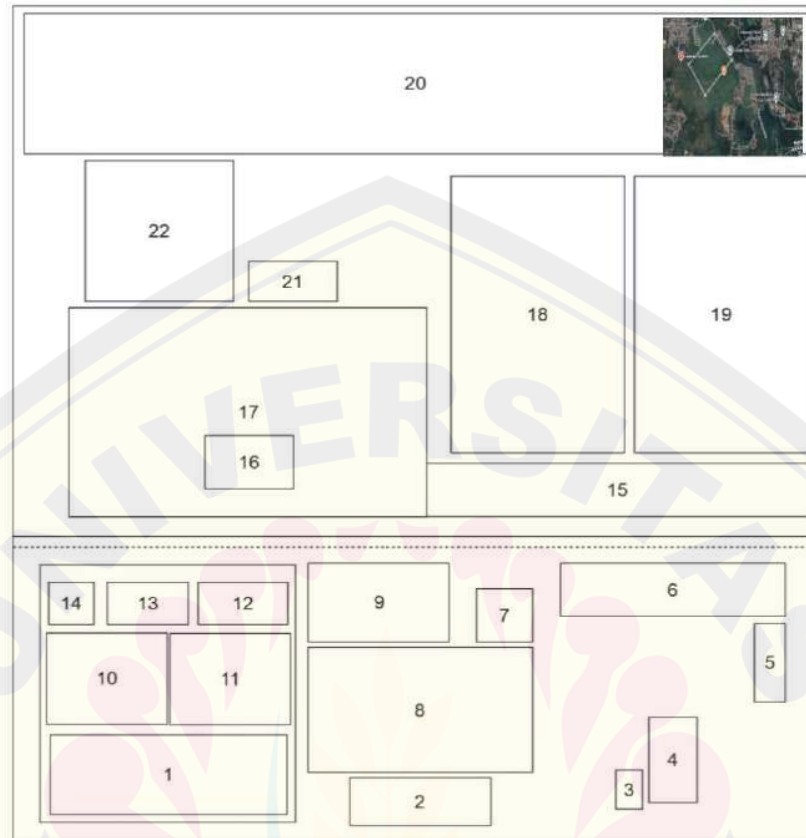
b. Faktor khusus

Lokasi di kawasan industri memberikan kemudahan akses terhadap infrastruktur, utilitas, pemasok, dan industri lain yang berpotensi menjadi konsumen *mucic acid*.

2.5.2 Tata Letak Pabrik

Tata letak pabrik dirancang untuk memperlancar aliran bahan, distribusi utilitas, dan kegiatan operasional dengan meminimalkan panjang pipa, biaya konstruksi, serta penanganan material. Pengaturan yang efisien juga mempermudah arus barang, pemasangan peralatan, pemanfaatan ruang, dan proses produksi. Selain itu, tata letak

harus mendukung kenyamanan kerja serta memudahkan penanggulangan dan evakuasi saat terjadi kecelakaan.



Jalan Raya

Skala 1:5000

Gambar 2.4 Layout Tata Letak Pabrik

Keterangan Gambar :

1	Taman	9	Kantor Teknik dan Produksi	16	Control Room
2	Parkir Karyawan	10	Muster Area	17	Area Proses
3	Pos Keamanan/Satpam	11	Mess	18	Unit Pengolahan Limbah
4	Parkir Tamu	12	Masjid	19	Gudang Bahan Baku
5	Ruang Timbang Truk	13	Kantin	20	Perluasan Pabrik
6	Parkir Truk	14	Klinik	21	Kontrol Utilitas
7	Laboratorium	15	Area Pretreatment	22	Utilitas
8	Kantor Utama				

BAB 3 NERACA MASSA DAN ENERGI

3.1 Neraca Massa Pabrik *Mucic acid*Tabel 3.1 Neraca Massa Pabrik *Mucic acid*

Komponen	Aliran (Kg/jam)											
	<1>	<2>	<3>	<4>	<5>	<6>	<7>	<8>	<9>	<10>	<11>	<12>
Soil (pengotor)	39.995368	39.995368	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Protein	485.54	-	485.54	485.54	485.54	485.54	48.55	436.99	-	-	-	-
Abu	471.15	-	471.15	471.15	471.15	471.15	47.11	424.04	-	-	-	-
Lignoselulosa	541.54	-	541.54	541.54	541.54	541.54	54.11	487.43	-	-	-	-
Pektin *	2144.55	-	2144.55	2144.55	2144.55	214.46	1930.09	-	-	-	-	386.02
Air (H ₂ O)	356.76	39585.41	756.61	291.42	291.42	291.42	29.14	262.28	-	24757.64	24758.2	25020.48
Asam Sitrat 98%	-	-	-	-	-	-	-	-	27.26	-	-	27.26
Asam Sitrat 0.11%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27.26	-
Pektin **	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cake	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pengotor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Galakturonat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	924.37
NaOH (4M)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	424.03
Natrium Sitrat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1544.08
Larutan Nutrisi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Trichoderma	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anti foam	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Mucic acid</i> *	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Mucic acid</i> **	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HCl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaCl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH ₄ Cl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FeCl ₂ ·4H ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZnCl ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AlCl ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CoCl ₂ ·6H ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₃ BO ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	4039.5354	39625.405	4399.39	3934.2	3934.2	3934.2	393.37	3540.83	27.26	24757.64	24785.46	28326.24

3.2 Neraca Panas dan Energi

Tabel 3.2 Blower G-121

Jenis Energi	Nilai
Energi kompresi <i>blower</i>	7262113.271
Daya listrik <i>blower</i>	2017.253686

Tabel 3.3 Blower G-123

Jenis Energi	Nilai
Energi kompresi <i>blower</i>	7218123.877
Daya listrik <i>blower</i>	2005.03441

Tabel 3.4 Heat exchanger E-122

Neraca Panas Total			
Panas Masuk		Panas Keluar	
U1	1900011.924	U2	8584083.72
Q Supply	6779072.393	Q loss	95000.59618
total	8679084.316		8679084.316

Tabel 3.5 Conveyor circulating air J-120

Neraca Panas Total			
Panas Masuk		Panas Keluar	
Q1	4962329.567	Q2	1653610.849
Udara Masuk	948009.6273	Udara Keluar	4256728.345
total	5910339.194		5910339.194

Tabel 3.6 Ekstraktor H-210

Neraca Panas Total			
Panas Masuk		Panas Keluar	
Q1	963047.1453	Q3	3746740.594
Q2	2633.759215		
steam masuk	3990397.541	steam keluar	1209337.852
Total	4956078.445		4956078.445

Tabel 3.7 Blower G-331

Jenis Energi	Nilai
Energi kompresi <i>blower</i>	115480.203
Daya listrik <i>blower</i>	32.07783416

Tabel 3.8 Heat exchanger E-332

Neraca Panas Total	
Panas Masuk	Panas Keluar

U1	15103.73702	U2	151668.6968
Q Supply	137,320	Q loss	755
total	152423.8837		152423.8837

Tabel 3.9 Heat exchanger E-412

Neraca Panas Total			
Panas Masuk		Panas Keluar	
U1	92829.48761	U2	139382.879
Q Supply	51194.86573	Q loss	4641.474381
total	144024.3533		144024.3533

Tabel 3.10 Blower G-333

Jenis Energi	Nilai
Energi kompresi <i>blower</i>	113524.8352
Daya listrik <i>blower</i>	31.53467645

Tabel 3.11 Conveyor circulating air J-330

Neraca Panas Total			
Panas Masuk		Panas Keluar	
Q3	110310.3896	Q4	31447.18393
Udara Masuk	14910.05676	Udara Keluar	93773.26244
total	125220.4464		125220.4464

Berdasarkan simulasi aspen hysis

Tabel 3.12 Flash Evaporator (V-410)

Kebutuhan Steam	= 50280 kJ/jam
Massa Steam	= 18.31 kg/jam
Power	= 13.97 kW

BAB IV SPESIFIKASI ALAT

Tabel spesifikasi alat di bawah ini merupakan keseluruhan peralatan yang digunakan pada pabrik *mucic acid*. Spesifikasi Keseluruhan peralatan dapat dilihat pada lampiran

Tabel 4.1 Gudang F-110

Gudang F-110	
Kode Alat	F-110
Fungsi	Penyimpanan Kulit Kopi
Type	Bangunan Persegi
Bahan Kontruksi	Dasar beton, tiang baja, atap asbeston
Kapasitas	287893.944 kg
Volume	468.1202341 m ³
Panjang (P)	14
Lebar (L)	7
Tinggi (T)	7
% Kelembapan	98%
% Akurasi suhu	98%

Tabel 4.2 Ekstraktor H-210

Ekstraktor H-210	
Kode Alat	H-210
Fungsi	Untuk mengekstraksi dan menghidrolisis pektin menjadi asam galakturonat
Bahan Kontruksi	Carbon Steel SA-285 Grade C
Jumlah	1 unit
Type	Tangki Batch Berpengaduk
Tekanan Operasi	1
Temperature Operasi	75
Volume Bahan	28.38039845
Waktu Operasi	1.5
Volume Tangki (Berisi)	42.57059768

Volume Ruang Kosong	28.38039845
Volume Total Tangki	56.76079691
Diameter Dalam	138
Tinggi Silinder	207
Tinggi Total Tangki	251.5819304
tekanan Desain	8.822555661
Tebal Silinder	0.157336691
Tebal tutup atas	0.284642265
Tebal tutup bawah	1.163751773
Putaran Pengaduk (N)	1.666666667
Jenis Impeller	Flat Six-Blade Turbine with Disk
Diameter Impeller	54.80211484
Power Pengaduk	15.69586385
Jumlah kaki penyangga	4
Tinggi Kaki (leg)	130.7909652
Panjang I- Beam	4
Lebar I-beam	2.625
Diameter Baut	0.494288719
Lebar Plat Horizontal (bhp)	3.784577438
Tinggi Gusset (hg)	8.637629063
Tebal Horizontal Plate	0.089646207
Tebal vertical plate/gusset (tg)	0.309030666
Diameter dalam jaket pendingin	265
Tebal jaket pendingin	0.125980861
Diameter Luar Jaket pendingin	265.2519617
Lebar jaket	185509.9454
Tinggi Jaket Pendingin	222.7301169

Tabel 4.3 Evaporator V-410

Evaporator V-410	
Nama	Evaporator
Kode	V-410
Fungsi	Menguapkan H ₂ O
Tipe	Long Tube Vertical Jenis Single Effect
Bahan	Stainless Stell, SA-167, Grade 3, Type 304
Luas Penampang (A)	0.02478
Diameter Luas Penampang	0.17769
Tinggi Shell	21.333
Tinggi Fluida	21.333
Volume Larutan	18.82
Volume Tangki	949.333
Tinggi silinder	10.8416
Tekanan Hidrostastik	1.30159
Tekanan Total	15.9975
Tekanan Desain	17.5973
Tebal Silinder	1
Head Evaporator	
Tebal Head atas	2.07357
Tebal Head bawah	2.07357
Tinggi Head atas	21.3634
Tinggi Head bawah	21.3634
Tinggi Evaporator Total	426.727
Nozzle	
Nozzle Aliran Umpan Masuk	
Laju Alir Volumetrik (Q)	18.8175
Kecepatan aliran (v)	139.689
Nre	4864.87
Nozzle Aliran Umpan Keluar	
Laju Alir Volumetrik (Q)	1.9518
Kecepatan aliran (v)	14.4925
Nre	44171.5

Nozzle Aliran H₂O	
Laju Alir Volumetrik (Q)	18.7977
Kecepatan aliran (v)	139.543
Nre	4660.92
Nozzle Aliran Galakturonat	
Laju Alir Volumetrik (Q)	0.00021
Kecepatan aliran (v)	0.00157
Nre	0.001
Nozzle Aliran Steam Masuk	
Laju Alir Volumetrik (Q)	61.8741
Kecepatan aliran (v)	459.43
Nre	11.4462
Nozzle Aliran Steam Keluar	
Laju Alir Volumetrik (Q)	61.8741
Kecepatan aliran (v)	459.43
Nre	11.4462

Tabel 4.4 Fermentor M-510

Fermentor M-510	
Kode Alat	R-510
Fungsi	Mengoksidasi larutan galaktarat menjadi <i>mucic acid</i>
Bahan Konstruksi	Carbon Steel SA-285 Crade C
Jumlah	26
Tipe	Vertical Cylindrical Agitated Tank with Dished Ends
Tekanan Operasi	1
Temperatur Operasi	35
Volume Bahan	15.1368
Waktu Operasi	72
Volume Tangki (berisi)	15.1368
Void Fraction (ruang kosong)	25
Volume Total Tangki	20.1824

Diameter Dalam (ID)	101.5
Tinggi Silinder (Ls)	153
Tinggi Total Tangki (Lt)	186.8026
Tekanan Desain	22.6555
Tebal Silinder (ts)	4/16
Tebal Tutup Atas (tha)	16.9013
Tebal Tutup Bawah (thb)	16.9013
Putaran Pengaduk (N)	200
Jenis Impeller	Six-Blade Turbine With Disk
Diameter Impeller (Da)	2.5375
Power Pengaduk	4.416679487
Jumlah Kaki Penyangga (Legs)	4
Tinggi Kaki (leg)	98.4013
Panjang I-Beam	4
Lebar I-Beam	2 5/8
Diameter Baut	0.37339
Lebar Plat Horizontal (bhp)	4.046
Tinggi Gusset (hg)	9.073333333
Tebal Horizontal Plate (thp)	0.058966378
Tebal Vertical Plate/Gusset (tg)	0.022112392

Tabel 4.5 Accidification Reaktor M-610

Accidification Reaktor M-610	
Kode Alat	M-610
Fungsi	Mengkristalkan <i>mucic acid</i>
Bahan Konstruksi	Carbon Steel SA-285 Crade C
Jumlah	1
Tipe	Vertical Cylindrical Agitated Tank with Dished Ends
Tekanan Operasi	1

Temperatur Operasi	35
Volume Bahan	3.5509
Waktu Operasi	72
Volume Tangki (berisi)	3.5509
Void Fraction (ruang kosong)	25
Volume Total Tangki	4.7346
Diameter Dalam (ID)	59.625
Tinggi Silinder (Ls)	90
Tinggi Total Tangki (Lt)	110.5347
Tekanan Desain	20.4316
Tebal Silinder (ts)	3/16
Tebal Tutup Atas (tha)	10.2674
Tebal Tutup Bawah (thb)	10.2674
Putaran Pengaduk (N)	200
Jenis Impeller	Six-Blade Turbine With Disk
Diameter Impeller (Da)	1.490625
Power Pengaduk	460.339046
Jumlah Kaki Penyangga (Legs)	4
Tinggi Kaki (leg)	60.2674
Panjang I-Beam	3
Lebar I-Beam	2 3/8
Diameter Baut	0.19117
Lebar Plat Horizontal (bhp)	3.509
Tinggi Gusset (hg)	7.939166667
Tebal Horizontal Plate (thp)	0.052177631
Tebal Vertical Plate/Gusset (tg)	0.019566612

BAB V SAFETY

5.1 HAZID (Hazard Identification)

Hazard Identification (HAZID) merupakan metode untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi potensi bahaya di lingkungan kerja sebagai dasar penerapan keselamatan dan kesehatan kerja (K3). Hasil identifikasi digunakan untuk menentukan tindakan pengendalian melalui eliminasi, substitusi, maupun metode pengendalian risiko lainnya (Rahma & Asyari, 2025). Analisis HAZID mencakup sumber, penyebab, konsekuensi, potensi penyimpangan parameter, serta efektivitas perlindungan dan mitigasi. Risiko kemudian diklasifikasikan berdasarkan tingkatnya (*risk level*) untuk menentukan prioritas dan rekomendasi pengendalian.

Tabel 5.1 HAZID (Hazard Identification)

No.	Area/Unit	Hazard	Penyebab	Dampak	Mitigasi/Rekomendasi
1	Gudang Kulit Kopi	Kebakaran	Korsleting dan debu kulit kopi mudah terbakar	Kerusakan fasilitas, kehilangan bahan, dan gangguan produksi	Inspeksi listrik, pengendalian debu, dan APAR
2	Conveyor	Terjepit roller atau pulley	Kontak dengan bagian bergerak	Cedera pekerja dan gangguan operasi	Guard, emergency stop, dan LOTO
3	Washer	Terjepit agitator	Kontak dengan agitator bergerak	Cedera pekerja	Guard dan LOTO
4	Air Circulating Conveyor	Paparan panas	Kontak dengan udara 75°C atau permukaan alat	Luka bakar dan gangguan operasi	Insulasi, APD, dan rambu panas
5	Blower	Kebisingan berlebih	Putaran impeller dan aliran udara tinggi	Gangguan pendengaran dan ketidaknyamanan kerja	Pelindung telinga dan pemantauan kebisingan
6	Heat Exchanger	Kebocoran steam atau permukaan panas	Kerusakan gasket, korosi, atau sambungan pipa	Luka bakar, penurunan efisiensi, dan gangguan operasi	Inspeksi, insulasi, dan APD tahan panas

No.	Area/Unit	Hazard	Penyebab	Dampak	Mitigasi/Rekomendasi
7	Tangki Penyimpanan Kulit Kopi Kering	Penurunan kualitas bahan	Masuknya udara lembap	Penurunan kualitas dan efisiensi ekstraksi	Tangki tertutup, kontrol kelembapan, dan inspeksi bahan
8	Crusher	Kontak dengan penghancur bergerak	Kontak dengan pisau atau komponen berputar	Cedera serius dan gangguan operasi	Guard, interlock, dan LOTO
9	Screener	Paparan debu halus	Debu dari proses pengayakan	Gangguan pernapasan dan kualitas lingkungan kerja	Dust collector, enclosure, dan masker
10	Bucket Elevator	Tumpahan atau jatuhnya material	Kerusakan bucket atau belt dan kelebihan kapasitas	Kehilangan material, pencemaran, dan gangguan operasi	Inspeksi dan operasi sesuai kapasitas
11	Tangki Asam Sitrat	Kebocoran akibat korosi	Degradasi tangki atau sambungan pipa	Kehilangan bahan, pencemaran, dan gangguan operasi	Material tahan korosi, inspeksi, dan perawatan
12	Dosing Pump	Kebocoran bahan korosif	Kerusakan diafragma, seal, atau sambungan	Paparan HCl, korosi, dan gangguan operasi	Inspeksi, material tahan korosi, dan secondary containment
13	Mixer Pengenceran Asam Sitrat	Percikan atau kebocoran	Turbulensi, kerusakan sambungan, atau salah pengisian	Iritasi, korosi, dan gangguan operasi	APD, penutup tangki, inspeksi, dan SOP
14	Ekstraktor	Overheating	Kegagalan kontrol steam atau temperatur	Penurunan kualitas pektin, kenaikan tekanan, dan cedera panas	Kontrol suhu, inspeksi steam, dan alarm
15	Filter Press	Kebocoran slurry	Kerusakan filter cloth, gasket, atau plate	Kehilangan produk, pencemaran, dan gangguan operasi	Inspeksi komponen dan pemasangan plate yang tepat
16	Mixer II	Kebocoran campuran pupuk	Kerusakan gasket,	Tumpahan, pencemaran, dan kerugian ekonomi	Inspeksi dan perawatan preventif

No.	Area/Unit	Hazard	Penyebab	Dampak	Mitigasi/Rekomendasi
17	Silo Pupuk	Kebocoran tangki	nozzle, atau sambungan Korosi, kerusakan sambungan, atau material	Kehilangan produk, pencemaran, dan kerugian ekonomi	Inspeksi, perawatan, dan material sesuai
18	Flash Evaporator	Tekanan berlebih	Jalur uap tersumbat atau kontrol gagal	Kerusakan alat, kebocoran fluida panas, dan cedera	PRV, pemantauan tekanan, dan inspeksi
19	Kondensor	Kebocoran fluida	Korosi atau kerusakan tube, gasket, dan pipa	Pencampuran fluida, gangguan operasi, dan kerusakan alat	Inspeksi dan perawatan preventif
20	Mixer III	Kebocoran NaOH	Kerusakan gasket, nozzle, atau sambungan	Luka bakar kimia, korosi, dan pencemaran	Inspeksi, material tahan korosi, APD, dan SOP
21	Tangki NaOH	Kebocoran NaOH	Korosi, kerusakan sambungan, atau material	Luka bakar kimia, pencemaran, dan kehilangan bahan	Inspeksi, material tahan korosi, dan bundwall
22	Tangki Nutrisi	Kebocoran larutan nutrisi	Kerusakan tangki, gasket, atau sambungan	Kehilangan bahan, pencemaran, dan gangguan fermentasi	Inspeksi dan perawatan preventif
23	Mixer Inokulum	Kebocoran media	Kerusakan gasket, nozzle, atau sambungan	Tumpahan, pencemaran, dan kerugian ekonomi	Inspeksi dan perawatan preventif
24	Fermentor	Kebocoran media fermentasi	Kerusakan gasket, nozzle, pipa, atau dinding	Tumpahan, pencemaran, dan kehilangan batch	Inspeksi dan perawatan preventif
25	Tangki Transisi	Kebocoran tangki	Korosi, kerusakan sambungan, atau material	Kehilangan produk, pencemaran, dan gangguan operasi	Inspeksi, perawatan, dan material sesuai
26	Tangki HCl	Kebocoran HCl	Retak HDPE, benturan, atau kegagalan sambungan	Paparan HCl, pencemaran, dan kerugian ekonomi	Inspeksi, bundwall, dan APD

No.	Area/Unit	Hazard	Penyebab	Dampak	Mitigasi/Rekomendasi
27	Mixer Pengenceran HCl	Kebocoran HCl	Kerusakan gasket, nozzle, sambungan, atau material	Luka bakar kimia, korosi, pencemaran, dan gangguan operasi	Material tahan korosi, inspeksi, dan APD
28	Centrifuge Filter	Kegagalan rotor	Beban tidak seimbang, keausan, atau putaran berlebih	Kerusakan alat, pelepasan material, dan cedera	Inspeksi rotor, pemantauan getaran, dan operasi sesuai kapasitas
29	Bal Mill	Paparan debu halus	Pelepasan partikel saat operasi atau pengeluaran produk	Gangguan pernapasan, pencemaran, dan kehilangan produk	Dust collector, enclosure, dan masker
30	Silo Mucic Acid	Paparan debu kristal	Pelepasan partikel saat transfer material	Gangguan pernapasan, pencemaran, dan kehilangan produk	Dust collector, sistem tertutup, dan APD

5.1 HAZOP (Hazard and Operability Study)

Hazard and Operability Study (HAZOP) merupakan metode sistematis untuk mengidentifikasi penyimpangan proses dan peralatan yang berpotensi membahayakan manusia, lingkungan, serta fasilitas produksi (Monalisa *et al.*, 2024). HAZOP mengevaluasi setiap tahapan operasi untuk menemukan penyimpangan dari kondisi rancangan, kemudian menganalisis konsekuensinya terhadap gangguan operasi, kerugian, dan kecelakaan kerja (Hasil *et al.*, 2018).

Safety Instrumented System (SIS) digunakan untuk mengendalikan risiko melalui *feedback control* yang mendeteksi dan mengoreksi penyimpangan suhu (T), tekanan (P), laju alir (F), dan ketinggian cairan (L).

a. Ekstraktor (H-210)

Tabel 5.2 HAZOP Ekstraktor

Parameter	Guide Word	Deviasi	Penyebab	Dampak	Safeguard
Temperatur	More	Temperatur tinggi	Steam berlebih atau kegagalan kontrol temperatur	Degradasi pektin	TIC

Parameter	Guide Word	Deviasi	Penyebab	Dampak	Safeguard
Feed Flow	Less	Temperatur rendah	Steam kurang atau fouling pada jaket pemanas	Rendemen ekstraksi menurun	FI
	No	Tidak ada aliran umpan	Pompa gagal atau pipa tersumbat	Proses ekstraksi berhenti	
	More	Laju alir umpan tinggi	Kegagalan kontrol aliran	Waktu tinggal berkurang sehingga ekstraksi tidak optimal	

b. Flash Evaporator (V-410)

Tabel 0.3 HAZOP Flash Evaporator

Parameter	Guide Word	Deviasi	Penyebab	Dampak	Safeguard
Temperatur	More	Temperatur tinggi	Steam berlebih	Degradasi pektin	TIC
	Less	Temperatur rendah	Steam kurang	Penguapan tidak optimal	
Pressure	More	Tekanan tinggi	Outlet vapor tersumbat	Kerusakan peralatan	PI
Feed Flow	More	Laju alir umpan tinggi	Kegagalan kontrol aliran	Pemekatan tidak optimal	FI

c. Fermentor

Tabel 0.4 HAZOP Fermentor

Parameter	Guide Word	Deviasi	Penyebab	Dampak	Safeguard
Temperatur	More	Temperatur tinggi	Kegagalan sistem pendingin atau kontrol temperatur	Penurunan aktivitas Trichoderma	TIC
	Less	Temperatur rendah	Kegagalan sistem pemanas atau kontrol temperatur	Laju fermentasi menurun	
Residence Time	Less	Waktu fermentasi rendah	Penghentian proses terlalu dini	Konversi substrat tidak optimal	SOP operasi
	More	Waktu fermentasi tinggi	Keterlambatan pengosongan fermentor	Penurunan kualitas produk	SOP operasi

d. Acidification Reactor (M-610)

Tabel 0.5 HAZOP Acidification Reactor

Parameter	Guide Word	Deviasi	Penyebab	Dampak	Safeguard
pH	More	pH tinggi	HCl kurang atau dosing <i>pump</i> gagal	Kristalisasi tidak optimal	pH Meter
	Less	pH rendah	HCl berlebih atau kegagalan kontrol aliran	Kualitas produk menurun	

BAB VI EVALUASI EKONOMI

6.1 Total Modal

Total modal atau *Total Capital Investment* (TCI) adalah sejumlah dana yang diperlukan dalam mendirikan sebuah pabrik, meliputi *Fixed Bed Capital Investment* (FCI) dan *Working Capital Investment* (WCI).

Tabel 6.1 Total Capital Investment

No	Komponen	Biaya (Rp)
1	<i>Fixed Capital Investment</i>	71467522099984.10
2	<i>Working Capital Investment</i>	7940835788887.12
	<i>Total Capital Investment</i>	79408357888871.20

6.2 Ongkos Produksi

Ongkos produksi atau *Total Production Cost* (TPC) adalah sejumlah yang diperlukan dalam operasional pabrik, meliputi *Manufacturing Cost* (MC) dan *General Express* (GE).

Tabel 6.2 Total Production Cost (TPC)

No	Komponen	Biaya (Rp)
1	<i>Manufacturing Cost</i>	19230615555103.90
2	<i>General Expenses</i> (GE)	2142759263717.34
	<i>Total Production Cost</i>	21373374818821.20

6.3 Keuntungan

Keuntungan menurut KBBI adalah suatu hal yang mendapatkan untung atau laba. Berdasarkan pengertian tersebut, keuntungan menjadi tujuan pendirian pabrik dan dapat dihitung melalui arus kas tahunan (*Annual Cash Flow*).

Tabel 6.3 Keuntungan

No	Komponen	Biaya (Rp)
1	Total Penjualan Produk (SP)	32,772,325,638,808.80
2	<i>Total Production Cost</i> (TPC)	21373374818821.20
3	Laba Kotor (NPBT)	11,398,950,819,987.60
4	Pajak Pendapatan	2507769180397.26
5	Laba Bersih (NPAT)	8891181639590.29
6	Depresiasi (DO)	7146752209998.41
7	<i>Annual Cash Flow</i> (ACF)	16037933849588.70
8	% <i>Annual Cash Flow</i> (ACF)	20%

6.4 Lama Waktu Pengembalian

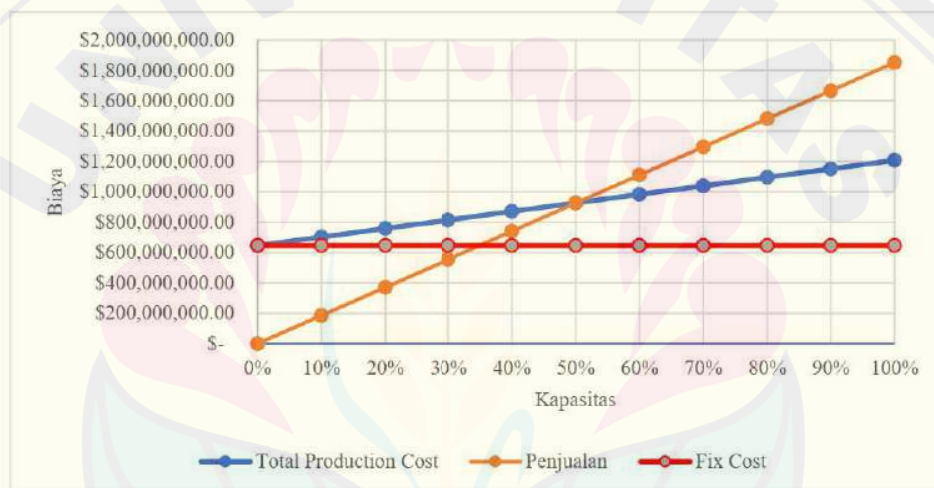
Lama waktu pengembalian atau *Pay Out Time* (POT) didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan suatu pabrik dalam mengembalikan modal sejumlah modal yang digunakan. dimana hasil dari POT yaitu 4,7 tahun.

6.5 Laju Pengembalian Modal

Rate of Return (ROR) adalah perbandingan laba tahunan terhadap modal investasi. Nilai ROR sebesar 11%, lebih tinggi dari bunga bank 4%, sehingga pabrik *mucic acid* dinilai layak didirikan.

6.6 Break Even Point

BEP menunjukkan batas minimal penjualan agar pabrik tidak mengalami kerugian. BEP dapat dihitung berdasarkan biaya tetap dan variabel terhadap penjualan.



Gambar 6.1 Kurva Break Even Point (BEP)

Tabel 6.4 Break Even Point

No	Komponen	Biaya (Rp)
1	<i>Fixed Cost</i> (FC)	11444921561715.30
2	<i>Selling Price</i> (SP)	32772325638808.80
3	<i>Direct Production Cost</i> (DPC)	9928453257105.97
4	BEP (%)	50%
5	Kapasitas Produksi <i>Mucic acid</i>	12000 ton/tahun
6	Kapasitas Minimum untuk BEP	6012.07433 ton/tahun
7	Pendapatan Minimum BEP	16492821303835.30

Nilai *Break Even Point* (BEP) sebesar 50% menunjukkan bahwa pabrik mencapai titik impas setelah penjualan mampu menutupi seluruh biaya. Pada grafik BEP, garis biaya tetap (*fixed cost*) bernilai konstan, sedangkan garis pendapatan penjualan (*selling price*) meningkat seiring kapasitas produksi. Titik perpotongan kedua garis menunjukkan tercapainya kondisi impas. Karena nilai BEP berada dalam rentang kelayakan 40–60%, pabrik mucic acid dinyatakan layak secara ekonomi (Kusnarjo, 2010).

Tabel 6.5 Rangkuman Evaluasi Ekonomi

No	Parameter	Hasil Perhitungan	Syarat Kelayakan
1	Annual Cash Flow (ACF)	20%	%ACF>bunga bank
2	Pay Out Time (POT)	4.769430377	<50% umur pabrik <5 tahun
3	Net Profit Over Total Lifetime of the Project (NPOTLP)	\$3,511,805,962.60	NPOTLP>TCI+bunga
4	Total Capital Sink (TCS)	\$4,291,113,072.66	TCS>TCI
5	Rate of return (ROR)	11%	ROR>bunga bank
6	Discounted Cash Flow Rate of Return (DCF-ROR)	16%	DCF-ROR>8.42%
7	Break Even Point (BEP)	50%	BEP range 40-60%

BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN

7.1 Kesimpulan

Berdasarkan penjelasan proses dan hasil dari perhitungan Pra-Rancangan Pabrik *Mucic acid* diperoleh kesimpulan berikut:

1. Pabrik *mucic acid* berbahan baku kulit kopi menggunakan metode oksidasi mikrobial dan direncanakan berlokasi di Kota Tangerang, Banten.
2. Kapasitas produksi pabrik sebesar 12.000 ton/tahun.
3. Pabrik beroperasi secara semi-kontinu selama 330 hari/tahun dan 24 jam/hari dengan 170 tenaga kerja.
4. Limbah yang dihasilkan berupa limbah padat, yaitu cake kulit kopi yang diolah menjadi pupuk, serta limbah cair dari bahan baku dan bahan pendukung.
5. Hasil evaluasi ekonomi meliputi: Evaluasi ekonomi diperoleh:
 - Total *Capital Investment* (TCI) = Rp 7940835788871.20
 - Total *Production Cost* (TPC) = Rp 21373374818821.20
 - Keuntungan (Laba Bersih) = Rp 8891181639590.29
 - Lama Waktu Pengembalian = 4,7 tahun
 - Laju Pengembalian Modal = 11%
 - *Break Even Point* (BEP) = 50%
6. Berdasarkan evaluasi ekonomi, pabrik *mucic acid* dari limbah kulit kopi berkapasitas 12.000 ton/tahun dinyatakan layak didirikan dan direncanakan beroperasi pada 2031.

7.2 Saran

Pabrik *mucic acid* dari limbah kulit kopi berkapasitas 12.000 ton/tahun layak didirikan di Indonesia. Pasokan dan kualitas bahan baku perlu dijaga melalui kerja sama dengan sentra kopi. Optimalisasi ekstraksi dan hidrolisis diperlukan untuk meningkatkan rendemen dan efisiensi ekonomi. Limbah cair ber-pH rendah juga harus diolah agar memenuhi baku mutu lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aspinall, G. O. (1980). *Chemistry of cell wall polysaccharides*. In *Carbohydrates: Structure and Function* (pp. 473–500). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-675403-2.50018-1>
- Bieringer, E., Pütthoff, L., Zimmermann, A., Burkhanova, E., Mijačević, D., Ehrenreich, A., Liebl, W., & Weuster-Botz, D. (2026). Regioselective oxidation of D-galacturonic acid to provide crystallized *mucic acid* using engineered *Gluconobacter oxydans*. *BioTech*, 15(2), 40. <https://doi.org/10.3390/biotech15020040>
- Brilliantina, A., Kusumasari, F. C., Fadhila, P. T., & Sasmita, I. R. A. (2023). Pengaruh waktu ekstraksi terhadap karakteristik pektin limbah kulit kopi robusta (*Coffea canephora*). *RADIKULA: Jurnal Ilmu Pertanian*, 2(2), 76–86.
- Brown, G. G. (1950). *Unit operations*. John Wiley & Sons.
- Carberry, J. J., Walker, W. H., White, A. H., Jackson, D. D., James, J. H., Lewis, W. K., & Parmelee, H. C. (1950). *Chemical process equipment: Selection and design*. McGraw-Hill.
- Chandel, V., Biswas, D., Roy, S., Vaidya, D., Verma, A., & Gupta, A. (2022). Current advancements in pectin: Extraction, properties and multifunctional applications. *Foods*, 11(17). <https://doi.org/10.3390/foods11172683>
- Davitadze, N. (2023). Modification of the process of obtaining pectin by the methods of membrane technology. *Journal of Ecological Engineering*, 24(11), 117–126. <https://doi.org/10.12911/22998993/171469>
- Dea, F. I., Purbowati, I. S. M., & Wibowo, C. (2022). Karakteristik edible film yang dihasilkan dengan bahan dasar pektin kulit buah kopi robusta dan glukomanan. *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 16(3), 446–456. <https://doi.org/10.21107/agrointek.v16i3.11480>
- Diana, E., Muarif, A., Ibrahim, I., Meriatna, M., & Ginting, Z. (2023). Pengaruh suhu dan waktu ekstraksi terhadap kualitas pektin dari limbah kulit pepaya. *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, 3(3), 351–361. <https://doi.org/10.29103/cejs.v3i3.9716>
- Edgar, T. F., Himmelblau, D. M., & Lasdon, L. S. (2001). *Optimization of chemical processes* (2nd ed.). McGraw-Hill.

- Fakayode, O. A., & Abobi, K. E. (2018). Optimization of oil and pectin extraction from orange (*Citrus sinensis*) peels: A response surface approach. *Journal of Analytical Science and Technology*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40543-018-0151-3>
- Fazira Rizki, R., & Reza, M. (2026). *Ekstraksi dan karakterisasi pektin dari limbah kulit jeruk (Citrus sinensis L.) sebagai material potensial adsorben*, 8(1).
- Garfias Silva, V., Cordova Aguilar, M. S., Ascanio, G., Aguayo, J. P., Pérez-Salas, K. Y., & Susunaga Notario, A. del C. (2022). Acid hydrolysis of pectin and mucilage from cactus (*Opuntia ficus*) for identification and quantification of mono-saccharides. *Molecules*, 27(18). <https://doi.org/10.3390/molecules27185830>
- Gede, I., Mangku, P., Suriati, L., Girindra, S., Widya, G. A. S., & Wati, T. (2023). Pemanfaatan dan pengolahan pulp kopi robusta menjadi vinegar. *Jurnal Widya Laksana*, 12(2).
- Guimarães, G. C., Júnior, M. C. C., & Rojas, E. E. G. (2009). Density and kinematic viscosity of pectin aqueous solution. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 54(2), 662–667. <https://doi.org/10.1021/jc800305a>
- Herawati, N., Ahmad Roni, K., & Fransiska, S. (2021). *Pembuatan bioetanol dari rumput gajah dengan proses hidrolisis asam*, 6(1).
- Hermanto Madjaga, B. (n.d.). Optimalisasi ekstraksi pektin dari kulit buah sukun (*Artocarpus altilis*). *KOVALEN*, 3(2), 158–165.
- Ilmiah, J., Dhora, A., Hariani, R., & Wahyuni, S. (2023). Isolasi pektin dari kulit kakao menggunakan metode ekstraksi dengan variasi konsentrasi HCl.
- Jeong, D., Ye, S., Park, H., & Kim, S. R. (2020). Simultaneous fermentation of galacturonic acid and five-carbon sugars by engineered *Saccharomyces cerevisiae*. *Bioresource Technology*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122259>
- Kalapathy, U., & Proctor, A. (2001). Effect of acid extraction and alcohol precipitation conditions on the yield and purity of soy hull pectin.
- Karothu, D. P., Tahir, I., Majhi, S. M., Ahmed, E., Catalano, L., Hickey, N. T., Weston, J., Guerin, S., & Naumov, P. (2025). The ultrastiff crystals of mucic (galactaric) acid. *Chemical Science*. <https://doi.org/10.1039/D5SC05888K>
- Kern, D. Q. (1950). *Process heat transfer*. McGraw-Hill.
- Li, Z., Zhou, B., Zheng, T., Zhao, C., Gao, Y., Wu, W., Fan, Y., Wang, X., Qiu, M., & Fan, J. (2023). Structural characteristics, rheological properties, and antioxidant

- and anti-glycosylation activities of pectin polysaccharides from Arabica coffee husks. *Foods*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/foods12020423>
- Liew, S. Q., Chin, N. L., & Yusof, Y. A. (2014). Extraction and characterization of pectin from passion fruit peels. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 231–236. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2014.11.033>
- Lima, M. S., Paiva, E. P., Andrade, S. A. C., & Paixão, J. A. (2010). Fruit pectins: A suitable tool for *Screening* gelling properties using infrared spectroscopy. *Food Hydrocolloids*, 24(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.04.002>
- Ma, Y., Svärd, M., Xiao, X., Gardner, J. M., Olsson, R. T., & Forsberg, K. (2020). Precipitation and crystallization used in the production of metal salts for Li-ion battery materials: A review. *Metals*, 10(12), 1–16. <https://doi.org/10.3390/met10121609>
- Mansor, M. H., Williamson, L., Ludwikowski, D., Howard, F., & Muthana, M. (2025). Pectin extraction from citrus waste: Structural quality and yield with mineral and organic acids. *Physchem*, 5(3). <https://doi.org/10.3390/physchem5030032>
- Maritsa, N. N., & Irfan, Z. (2025). Penentuan kapasitas produksi dan seleksi proses pra rancangan pabrik kimia pembuatan alpha terpineol dari terpenin. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 11(1), 191–200. <https://doi.org/10.33795/distilat.v11i1.6983>
- Maulida, F. E. N., Alimuddin, A., & Erwin, E. (2023). Extraction and characterization of pectin from lemon lime peel waste (*Citrus amblycarpa*). *Jurnal Kimia Mulawarman*, 20(2), 56. <https://doi.org/10.30872/jkm.v20i2.527>
- Meera, M. R., Joselin Beaula, T., Rayar, S. L., & Bena Jothy, V. (2017). Effect of hydrochloric acid (HCl) on synthesis, spectral and thermal properties of triglycine phosphate (TGP) single crystals.
- Mersmann, A. (1998). *Crystallization and precipitation*.
- Monalisa, A. E., Putri, A. P., & Maharani, A. A. (2024). Optimasi kualitas lingkungan dalam ruangan dan bangunan hijau: Penerapan metode HAZOP dalam identifikasi risiko dan peningkatan keberlanjutan. *Indoor Environmental Quality and Green Building*, 1(1), 44–52. <https://doi.org/10.61511/ineq.v1i1.2024.587>
- Nadir, M., & Risfani, I. (2018). Pengaruh waktu terhadap ekstraksi pektin dari kulit pisang kepok dengan metode microwave assisted extraction (MAE).

- Ngapiyatun, S., Rahman, A., Aziza, H., & Winarni, B. (2020). Pemanfaatan limbah sampah kota sebagai kompos.
- Novita, E., Fathurrohman, A., & Pradana, H. A. (2018). Pemanfaatan kompos blok limbah kulit kopi sebagai media tanam.
- Oliveira, P. A., Baesso, R. M., Morais, G. C., Alvarenga, A. V., & Costa-Félix, R. P. B. (2021). Ultrasound-assisted transesterification of soybean oil using low power and high frequency and no external heating source. *Ultrasonics Sonochemistry*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105709>
- Ortiz-Sanchez, M., Solarte-Toro, J. C., González-Aguirre, J. A., Peltonen, K. E., Richard, P., & Cardona Alzate, C. A. (2020). Pre-feasibility analysis of the production of *mucic acid* from orange peel waste under the biorefinery concept. *Biochemical Engineering Journal*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107680>
- Parpot, P., Pires, S. G., & Bettencourt, A. P. (2004). Electrocatalytic oxidation of D-galactose in alkaline medium. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 566(2), 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2003.11.053>
- Pattarapisitporn, A., & Noma, S. (2025). Alternative solvents for pectin extraction: Effects of extraction agents on pectin structural characteristics and functional properties. *Foods*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/foods14152644>
- Perry, R. H., & Green, D. W. (Eds.). (1999). *Perry's chemical engineers' handbook* (7th ed.). McGraw-Hill.
- Pocan, P., Bahcegul, E., Oztop, M. H., & Hamamci, H. (2018). Enzymatic hydrolysis of fruit peels and other lignocellulosic biomass as a source of sugar. *Waste and Biomass Valorization*, 9(6), 929–937. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9875-3>
- Rahma, A. H. H., & Asyari, H. (2025). Identifikasi bahaya dan analisis risiko K3 pada pekerjaan pengamanan tegangan 20 kV arah G.PRR menggunakan HAZID dan JHA (Studi kasus: PT XYZ). *Jurnal TRINISTIK*, 4(1), 9–17. <https://doi.org/10.20895/trinistik.v4i1.1551>
- Rautiainen, S., Lehtinen, P., Chen, J., Vehkamäki, M., Niemelä, K., Leskelä, M., & Repo, T. (2015). Selective oxidation of uronic acids into aldaric acids over gold catalyst. *RSC Advances*, 5(25), 19502–19507. <https://doi.org/10.1039/C5RA01802A>
- Riyamol, N., Chengaiyan, J. G., Rana, S. S., Ahmad, F., Haque, S., & Capanoglu, E. (2023). Recent advances in the extraction of pectin from various sources and

- industrial applications. *ACS Omega*, 8(49), 46309–46324. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04010>
- Sawir, H., & Syahyuda, M. (2022). Efektivitas rekayasa komposter semi anaerob skala rumah tangga.
- Subasari, A., Efri, E., Wibowo, L., & Aeny, T. N. (2025). Karakteristik dan uji antagonis beberapa isolat *Trichoderma* terhadap penyebab penyakit layu (*Fusarium oxysporum*) pada tanaman tomat. *Jurnal Agrotek Tropika*, 13(1), 240. <https://doi.org/10.23960/jat.v13i1.8719>
- Subhan, A. S., Arifin, M., Wijayanti, F., Maroeto, M., & Lestari, S. R. (2025). Dampak kombinasi jenis tanah, kompos dan *Trichoderma sp.* terhadap kerapatan spora *Trichoderma sp.* *Jurnal Agrotek Tropika*, 13(1), 44. <https://doi.org/10.23960/jat.v13i1.8626>
- Tamminen, A., Turunen, R., Barth, D., Vidgren, V., & Wiebe, M. G. (2022). Use of ambr®250 to assess *mucic acid* production in fed-batch cultures of a marine *Trichoderma sp.* D-221704. *AMB Express*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s13568-022-01436-4>
- Tan, H., Wang, J., Liu, Q., Zheng, Z., & Ouyang, J. (2022). Production of *mucic acid* from pectin-derived D-galacturonic acid: A review. *Chinese Journal of Biotechnology*, 38(2), 666–677. <https://doi.org/10.13345/j.cjb.210268>
- Tuhuloula, A., Budiarti, L., & Fitriana, E. N. (2013). Karakterisasi pektin dengan memanfaatkan limbah kulit pisang menggunakan metode ekstraksi.
- Ulrich, G. D., & Vasudevan, P. T. (2004). *A guide to chemical engineering process design and economics* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Vidgren, V., Halinen, S., Tamminen, A., Olenius, S., & Wiebe, M. G. (2020). Engineering marine fungi for conversion of D-galacturonic acid to *mucic acid*. *Microbial Cell Factories*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01411-3>
- Vitale, S., Salzano, F., Staropoli, A., Marra, R., Turrà, D., Lorito, M., & Vinale, F. (2025). Nitrogen source orchestrates pH modulation and secondary metabolism in *Trichoderma harzianum*. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40538-025-00735-9>
- Wahyu, E., Nasution, H., & Harahap, H. (2025). Sintesis dan karakterisasi edible film berbahan dasar limbah kulit kopi dengan penambahan gliserol dan sorbitol sebagai plasticizer. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 14(1), 27–35. <https://doi.org/10.32734/jtk.v14i1.15567>

- Yani, F., Miswandi, M., Trisni, D. N., Fajar, F., Yolanda, E., Nurya, A., & Juanda, J. (2025). Analisis kandungan kadar air pada kopi fermentasi menggunakan metode gravimetri. *Media Ilmiah Kesehatan Indonesia*, 3(3). <https://doi.org/10.58184/miki.v3i3.538>
- Yao, X., Guo, H., Zhang, K., Zhao, M., Ruan, J., & Chen, J. (2023). *Trichoderma* and its role in biological control of plant fungal and nematode disease. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1160551>
- Yaws, C. L. (1999). *Chemical properties handbook: Physical, thermodynamics, environmental, transport, safety, and health related properties for organic and inorganic chemicals*. McGraw-Hill.
- Yuniastuti, S., & Purbiati, T. (2022). Pengaruh penambahan pupuk hayati dan PPC terhadap keberhasilan pembuahan mangga podang di luar musim.
- Zhang, Y. Y., Mu, T. H., & Zhang, M. (2013). Optimisation of acid extraction of pectin from sweet potato residues by response surface methodology and its antiproliferation effect on cancer cells. *International Journal of Food Science and Technology*, 48(4), 778–785. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12026>
- Zulnazri, Z., Ramadani, F. F., & Muarif, A. (2023). Kinetic study of the hydrolysis reaction of kepok banana peel cellulose (*Musa paradisiaca* L.) into glucose using H₂SO₄ catalyst. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 12(2), 294–304. <https://doi.org/10.29103/jtku.v12i2.13885>

LAMPIRAN

