

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengembangan sektor industri merupakan salah satu strategi utama dalam mendorong pertumbuhan ekonomi nasional, membuka lapangan kerja, serta mempercepat alih teknologi. Salah satu arah pengembangan industri kimia yang relevan dengan potensi sumber daya alam Indonesia adalah pemanfaatan limbah agroindustri menjadi produk bernilai tambah, salah satunya kulit jeruk manis (*Citrus sinensis*) sebagai sumber pektin. Berdasarkan data Direktorat Jenderal Hortikultura Kementerian Pertanian, produksi jeruk nasional pada tahun 2024 mencapai 2,65 juta ton, dengan sentra produksi utama antara lain Banyuwangi, Malang, Bangli, Karo, Sambas, dan Barito Kuala (Direktorat Jenderal Hortikultura, 2025).

Limbah kulit jeruk yang dihasilkan dari konsumsi maupun pengolahan buah segar diperkirakan mencapai sekitar 50% dari berat buah (Negrea et al., 2025), namun pemanfaatannya di Indonesia masih sangat terbatas, umumnya hanya sebagai kompos atau dibuang begitu saja tanpa memberikan nilai tambah ekonomi yang signifikan (Tahir et al., 2023). Kulit jeruk manis mengandung pektin dengan kadar berkisar 14–24% (Rahmanda et al., 2021), sehingga limbah ini berpotensi besar dikembangkan sebagai bahan baku industri bernilai tambah. Pektin merupakan polisakarida dinding sel tanaman yang larut dalam air, tersusun atas rantai asam galakturonat yang sebagian besar teresterifikasi dengan gugus metoksil (Freitas et al., 2021). Senyawa ini banyak dimanfaatkan sebagai bahan pengental dan pembentuk gel pada industri pangan, serta memiliki aplikasi luas pada industri kosmetik dan farmasi, misalnya sebagai bahan tambahan pada krim, sabun, dan sediaan farmasi berbasis penghantaran obat. Hingga saat ini, seluruh kebutuhan pektin di Indonesia masih dipenuhi melalui impor, sehingga belum terdapat produsen pektin skala industri di dalam negeri.

Kondisi ini membuka peluang strategis bagi pendirian pabrik pektin berbasis kulit jeruk di Indonesia. Selain mengurangi limbah agroindustri dan ketergantungan terhadap produk impor, pendirian pabrik pektin juga berpotensi menekan pengeluaran devisa negara, menciptakan lapangan kerja baru, serta memperkuat rantai nilai hilirisasi hasil pertanian nasional secara berkelanjutan.

1.2 Kapasitas Rancangan

Pabrik pektin dari kulit jeruk ini direncanakan mulai beroperasi penuh pada tahun 2029. Penentuan kapasitas produksi didasarkan pada proyeksi kebutuhan pektin dalam negeri, dengan mempertimbangkan ketersediaan bahan baku serta kelayakan teknis dan ekonomis pabrik agar dapat beroperasi secara berkelanjutan.

1.2.1 Produksi Pektin dalam Negeri

Hingga saat ini, belum terdapat pabrik di Indonesia yang memproduksi pektin dalam skala industri, sehingga seluruh kebutuhan pektin nasional dipenuhi melalui impor. Kondisi ini menunjukkan adanya peluang pasar yang terbuka lebar bagi produsen pektin dalam negeri, sekaligus adanya risiko ketergantungan terhadap pasokan luar negeri yang rentan terhadap fluktuasi nilai tukar dan gangguan rantai pasok global.

1.2.2 Ketersediaan Bahan Baku

Bahan baku utama pabrik ini adalah kulit jeruk segar yang bersumber dari sentra produksi jeruk siam di Jawa Timur, khususnya Kabupaten Malang. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik Kabupaten Malang, produksi jeruk siam di Kabupaten Malang menunjukkan tren peningkatan setiap tahun, yaitu sebesar 328,87 ribu ton pada 2022, 353,14 ribu ton pada 2023, dan 376,81 ribu ton pada 2024. Produksi tersebut didominasi oleh tiga kecamatan, yaitu Poncokusumo (225,15 ribu ton), Dau (38,61 ribu ton), dan Karangploso (36,40 ribu ton) (BPS Kabupaten Malang, 2025). Dengan asumsi rasio limbah kulit sekitar 50% dari berat buah, ketersediaan bahan baku kulit jeruk di wilayah ini jauh melampaui kebutuhan pabrik berkapasitas 2.000 ton pektin/tahun, sehingga kontinuitas pasokan bahan baku dapat terjamin.

Bahan pendukung berupa asam sitrat sebagai pelarut ekstraksi diperoleh secara komersial dari pemasok bahan kimia industri di Kota Surabaya, antara lain PT. Bumi Prima Lestari, CV. Mitra Usaha Mandiri, PT. Aroma Sakti Chemindo, dan CV. Cahaya Semesta, yang dikirim melalui jalur darat menggunakan truk kontainer menuju lokasi pabrik.

1.2.3 Kebutuhan Pektin dalam Negeri

Kebutuhan pektin nasional ditinjau berdasarkan data volume ekspor dan impor komoditas pektin (kode HS 1302.20 – *Pectic substances, pectinates and pectates*) yang dipublikasikan Badan Pusat Statistik (Badan Pusat Statistik, 2025). Nilai konsumsi dalam negeri dihitung dari selisih data impor terhadap data ekspor, sedangkan data produksi tidak tersedia karena belum

ada pabrik pektin yang beroperasi di Indonesia. Data ekspor dan impor pektin ditampilkan pada Tabel 1.1 dan 1.2 berikut.

Tabel 1.1 Data Ekspor Pektin Indonesia Tahun 2020–2025

Tahun	Jumlah (ton/tahun)	% Pertumbuhan
2020	126,41	-39,29
2021	561,75	344,39
2022	359,88	-35,94
2023	351,29	-2,39
2024	388,11	10,48
2025	345,13	-11,07

Tabel 1.2 Data Impor Pektin Indonesia Tahun 2020–2025

Tahun	Jumlah (ton/tahun)	% Pertumbuhan
2020	369,36	-30,65
2021	455,04	23,20
2022	534,12	17,38
2023	467,15	-12,54
2024	510,68	9,32
2025	439,69	-13,90

1.2.4 Perkiraan Kapasitas Produksi

Berdasarkan grafik data ekspor dan impor pada Tabel 1.1 dan 1.2, kebutuhan pektin nasional cenderung fluktuatif dari tahun ke tahun, sehingga proyeksi kapasitas pabrik pada tahun operasi (2029) dihitung menggunakan metode discounted sebagai berikut:

$$M = P \times (1 + i)^n$$

Keterangan:

M = nilai proyeksi pada tahun rancangan (2029)

P = nilai data pada tahun dasar (2025)

i = rata-rata pertumbuhan per tahun (%)

n = selisih tahun proyeksi terhadap tahun dasar (2029 – 2025 = 4 tahun)

Kapasitas produksi kemudian ditentukan dari neraca massa peluang pasar sebagai berikut:

$$M_{\text{impor}} + M_{\text{produksi_lama}} + M_{\text{kapasitas_baru}} = M_{\text{ekspor}} + M_{\text{konsumsi}}$$

$$M_{\text{kapasitas_baru}} = (M_{\text{ekspor}} + M_{\text{konsumsi}}) - (M_{\text{impor}} + M_{\text{produksi_lama}})$$

Hasil perhitungan proyeksi tahun 2029 adalah sebagai berikut:

a) Proyeksi impor 2029 = $510,68 \times (1 - 0,0103)^4 = 489,99$ ton/tahun

b) Proyeksi ekspor 2029 = $388,11 \times (1 + 0,4621)^4 = 1.773,70$ ton/tahun

c) Proyeksi konsumsi 2029 = 0,36 ton/tahun (mengikuti tren penurunan konsumsi neto pada data historis)

d) Produksi dalam negeri saat ini = 0 ton/tahun (belum ada pabrik beroperasi)

e) Peluang kapasitas baru = $(1.773,70 + 0,36) - (489,99 + 0) = 1.284,06$ ton/tahun

Peluang kapasitas sebesar 1.284 ton/tahun tersebut merupakan estimasi minimum, karena belum memperhitungkan potensi pertumbuhan pasar setelah tahun rancangan serta peluang substitusi impor yang lebih agresif mengingat pabrik ini akan menjadi produsen pektin skala industri pertama di Indonesia. Dengan pertimbangan tersebut, kapasitas produksi dirancang sebesar 1,5 kali peluang kapasitas sebagai margin desain, mengikuti praktik umum perancangan pabrik kimia baru pada pasar yang belum memiliki pemain domestik (Aji & Widayat, 2020), sehingga:

$$\text{Kapasitas produksi} = 1,5 \times 1.284,06 \text{ ton/tahun} = 1.926,10 \text{ ton/tahun} \approx 2.000 \text{ ton/tahun}$$

Pemenuhan kapasitas terhadap proyeksi peluang pasar = $2.000 / 1.284 \times 100\% = 155,8\%$. Dengan demikian, kapasitas pabrik pektin sebesar 2.000 ton/tahun mampu memenuhi proyeksi peluang kapasitas tahun 2029 dan masih menyisakan ruang bagi pemenuhan pertumbuhan permintaan pascatahun rancangan, tanpa berisiko menimbulkan kelebihan pasokan (*oversupply*) yang signifikan terhadap ukuran pasar domestik saat ini.

1.3 Penentuan Lokasi Pabrik

Penentuan lokasi pabrik mengacu pada teori lokasi industri Alfred Weber, yang membagi jenis pabrik menjadi *weight loss* (bobot produk lebih ringan dari bahan baku, sebaiknya berlokasi dekat sumber bahan baku) dan *weight gain* (bobot produk lebih berat, sebaiknya berlokasi dekat pasar). Proses produksi pektin dari kulit jeruk tergolong *weight loss*, karena dari setiap ton kulit jeruk yang diolah hanya dihasilkan pektin dalam kisaran 14–24% beratnya. Oleh karena itu, lokasi pabrik idealnya berada sedekat mungkin dengan sentra bahan baku untuk meminimalkan biaya transportasi kulit jeruk yang bersifat mudah rusak (*perishable*).

Berdasarkan pertimbangan tersebut, ditetapkan tiga alternatif lokasi yang dinilai strategis dan realistis untuk dibandingkan secara kuantitatif:

1. Kelurahan Tlogowaru, Kecamatan Kedungkandang, Kota Malang, Jawa Timur
2. Kecamatan Tumpang, Kabupaten Malang, Jawa Timur (berbatasan langsung dengan sentra jeruk Poncokusumo)
3. Kecamatan Kepanjen, Kabupaten Malang, Jawa Timur (pusat pemerintahan dan kawasan industri Kabupaten Malang)

Parameter dan perbandingan penilaian lokasi pabrik pektin disajikan pada Tabel 1.3 dan 1.4 berikut.

Tabel 1.3 Parameter dan Bobot Penilaian Lokasi Pabrik (Tipe *Weight Loss*)

Prioritas	Parameter	Alasan Teknis	Bobot
1	Kedekatan bahan baku	Kulit jeruk mudah rusak, biaya transportasi signifikan	25
2	Aksesibilitas & infrastruktur transportasi	Distribusi produk dan pasokan bahan pendukung	20
3	Ketersediaan utilitas (air, listrik)	Proses ekstraksi membutuhkan air dalam jumlah besar	15
4	Ketersediaan tenaga kerja	Kebutuhan operator dan staf pabrik	15
5	Kebijakan pemerintah & tata ruang	Kesesuaian RTRW dan kemudahan perizinan	10
6	Upah minimum & biaya operasional	Efisiensi biaya tenaga kerja	10
7	Potensi bencana & karakteristik lokasi	Keberlangsungan operasional jangka panjang	5

Tabel 1.4 Penilaian Perbandingan Lokasi Pabrik

Parameter	Bobot	Kota Malang (Tlogowaru)	Kab. Malang (Tumpang)	Kab. Malang (Kepanjen)
Kedekatan bahan baku	25	$8 \times 25 = 200$	$10 \times 25 = 250$	$7 \times 25 = 175$
Aksesibilitas & infrastruktur	20	$9 \times 20 = 180$	$6 \times 20 = 120$	$8 \times 20 = 160$

Parameter	Bobot	Kota Malang (Tlogowaru)	Kab. Malang (Tumpang)	Kab. Malang (Kepanjen)
Utilitas (air & listrik)	15	$9 \times 15 = 135$	$6 \times 15 = 90$	$8 \times 15 = 120$
Tenaga kerja	15	$9 \times 15 = 135$	$6 \times 15 = 90$	$7 \times 15 = 105$
Kebijakan & tata ruang	10	$8 \times 10 = 80$	$6 \times 10 = 60$	$7 \times 10 = 70$
Upah minimum	10	$6 \times 10 = 60$	$7 \times 10 = 70$	$7 \times 10 = 70$
Potensi bencana	5	$7 \times 5 = 35$	$6 \times 5 = 30$	$7 \times 5 = 35$
Total	100	825	710	735

Keterangan skor: 1–2 sangat buruk; 3–4 kurang; 5–6 cukup; 7–8 baik; 9–10 sangat baik.

Berdasarkan hasil pembobotan pada Tabel 1.4, lokasi terpilih adalah Kelurahan Tlogowaru, Kecamatan Kedungkandang, Kota Malang, Jawa Timur dengan total skor tertinggi (825). Meskipun skor kedekatan bahan baku sedikit lebih rendah dibanding Kecamatan Tumpang (yang berbatasan langsung dengan sentra jeruk Poncokusumo), Kota Malang unggul signifikan pada aksesibilitas infrastruktur, ketersediaan utilitas kota, dan ketersediaan tenaga kerja terdidik, sementara jarak ke sentra bahan baku di Kabupaten Malang tetap tergolong dekat (kurang dari 30 km) sehingga biaya transportasi bahan baku masih dapat ditekan. Analisis SWOT untuk penentuan lokasi pabrik pektin disertakan pada Tabel 1.5 berikut ini.

Tabel 1.5 Analisis SWOT Lokasi Pabrik di Kelurahan Tlogowaru, Kota Malang

Aspek	Uraian
<i>Strengths</i> (Kekuatan)	Dekat sentra bahan baku (Poncokusumo, Dau, Karangploso), akses jalan dan tol Pandaan–Malang, utilitas kota lengkap, tenaga kerja terdidik dari banyak perguruan tinggi.
<i>Weaknesses</i> (Kelemahan)	UMK Kota Malang relatif lebih tinggi dibanding kawasan industri Kabupaten Malang, lahan industri terbatas, dan bersaing dengan permukiman.
<i>Opportunities</i> (Peluang)	Belum ada pesaing domestik, RT/RW Kota Malang mendukung kawasan industri ringan, insentif PBB-P2 bagi industri baru.
<i>Threats</i> (Ancaman)	Potensi alih fungsi lahan pertanian penyangga di sekitar lokasi, risiko gempa dan longsor kategori sedang menurut indeks BNPB.

1.3.1 Bahan Baku

Bahan baku utama berupa kulit jeruk segar bersumber dari sentra jeruk siam Kabupaten Malang, terutama Kecamatan Poncokusumo, Dau, dan Karangploso, yang berjarak sekitar 20–

35 km dari lokasi pabrik dan dapat ditempuh melalui jalur darat dalam waktu kurang dari satu jam. Bahan pendukung berupa asam sitrat dipasok dari Surabaya melalui jalur darat dengan akses tol yang memadai.

1.3.2 Target Pasar

Produk pektin dipasarkan secara nasional kepada industri makanan-minuman dan farmasi sebagai *gelling agent*, *thickener*, dan *stabilizer*, meliputi produsen yoghurt dan minuman susu fermentasi, produsen *confectionery/jelly*, produsen selai, serta industri farmasi untuk sediaan obat diare.

Tabel 1.6 Target Perusahaan Pengguna Pektin di Indonesia

No	Perusahaan	Lokasi	Produk
1	PT Cisarua Mountain Dairy Tbk	Bogor, Jawa Barat	Yoghurt (Cimory)
2	PT Mengniu Dairy Indonesia	Cikarang, Jawa Barat	Yoghurt drink
3	PT Lautan Natural Krimerindo	Surabaya, Jawa Timur	Minuman krimer
4	PT Sarana Mitra Inti Global	Jakarta	Selai buah
5	PT Kalbe Farma Tbk	Jakarta	Obat diare
6	PT Kimia Farma Tbk	Jakarta	Obat diare

1.3.3 Aksesibilitas dengan Sumber Air dan Utilitas

Kebutuhan air bersih pabrik dilayani oleh Perumda Air Minum Tugu Tirta (PDAM Kota Malang), yang tercatat memiliki kapasitas produksi air bersih sekitar 1.813 liter/detik dengan cakupan wilayah pelayanan meliputi seluruh area 145,28 km² Kota. Pasokan listrik dilayani oleh PT PLN (Persero) Unit Pelayanan Malang Kota dengan jaringan tegangan menengah 20 kV yang tersedia untuk sambungan industri.

1.3.4 Karakteristik Lokasi, Iklim, dan Potensi Bencana

Kelurahan Tlogowaru terletak di Kecamatan Kedungkandang, Kota Malang, pada ketinggian sekitar 440–660 mdpl. Berdasarkan data BNPB, Kota Malang tergolong berisiko bencana kelas sedang, dengan risiko gempa bumi dan tanah longsor pada kategori sedang, serta risiko banjir dan kekeringan pada kategori rendah. Data risiko bencana terkini dapat diverifikasi melalui portal resmi InaRISK BNPB.

1.3.5 Aksesibilitas Transportasi dan Fasilitas Umum

Lokasi pabrik memiliki akses langsung ke Jalan Raya Tlogowaru yang terhubung dengan jaringan jalan utama Kota Malang, serta berjarak sekitar 15 km dari Exit Tol Singosari pada ruas Tol Pandaan–Malang. Untuk distribusi ekspor, pabrik dapat memanfaatkan Bandara Internasional Juanda Surabaya (± 95 km) dan Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya (± 100 km) yang keduanya terhubung melalui jalan tol.

1.3.6 Ketersediaan Tenaga Kerja

Berdasarkan data BPS Kota Malang, jumlah penduduk Kota Malang pada tahun 2022 tercatat sebesar 846.126 jiwa dengan laju pertumbuhan penduduk 0,14% per tahun. Jumlah angkatan kerja pada Agustus 2025 tercatat sebanyak 486.794 orang, dengan Tingkat Partisipasi Angkatan Kerja (TPAK) sebesar 69,85% (BPS Kota Malang, 2025). Kota Malang juga memiliki basis tenaga kerja terdidik yang besar melalui keberadaan sejumlah perguruan tinggi, antara lain Universitas Brawijaya, Universitas Negeri Malang, Politeknik Negeri Malang, dan Universitas Islam Malang.

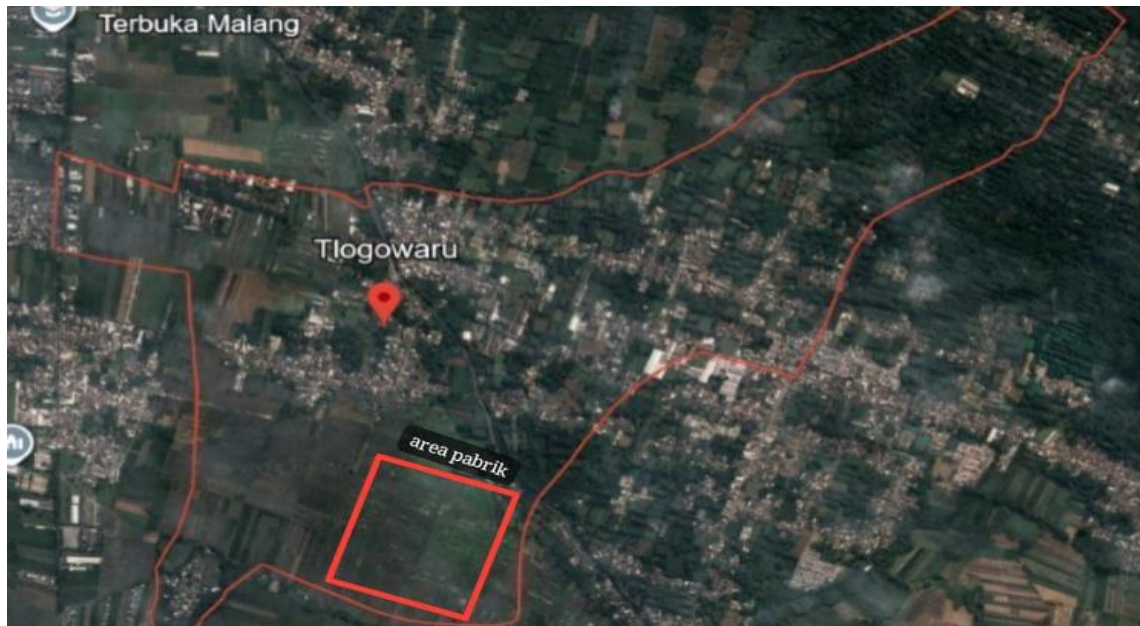
1.3.7 Kebijakan Pemerintah dan Upah Minimum

Upah Minimum Kota (UMK) Malang tahun 2026 ditetapkan sebesar Rp3.736.101 melalui Keputusan Gubernur Jawa Timur Nomor 100.3.3.1/937/013/2025 tanggal 24 Desember 2025 (Pemerintah Kota Malang, 2025). Berdasarkan Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kota Malang, kawasan Kelurahan Tlogowaru diarahkan sebagai kawasan permukiman dan industri ringan, sehingga pendirian pabrik pektin di lokasi ini sesuai dengan peruntukan ruang yang ditetapkan pemerintah daerah. Kemudahan perizinan didukung sistem *Online Single Submission* (OSS), serta insentif keringanan PBB-P2 (Pajak Bumi dan Bangunan Perdesaan dan Perkotaan) bagi industri baru pada tahun-tahun awal operasi.

1.3.8 Ketersediaan Lahan

Kelurahan Tlogowaru memiliki luas wilayah sekitar 3,86 km² (386 hektare), dengan sebagian lahan di bagian selatan dan timur kelurahan yang berbatasan dengan area pertanian/tegalan masih tersedia untuk pengembangan kawasan industri ringan. Untuk kapasitas produksi penuh 2.000 ton pektin/tahun, kebutuhan lahan pabrik diperkirakan sekitar 1,5 hektare, dengan tambahan cadangan sekitar 0,5 hektare untuk kebutuhan perluasan pabrik di masa mendatang, sehingga total kebutuhan lahan sekitar 2 hektare. Di bawah ini merupakan

gambar lokasi yang akan didirikan pabrik pektin mendatang dapat dilihat pada Gambar 1.1 berikut.



Gambar 1.1 Lokasi Pabrik (Google Earth, 2026)

1.4 Tinjauan Proses

Pektin dalam kulit jeruk terikat sebagai protopektin, yaitu bentuk pektin tidak larut yang terjebak dalam matriks polisakarida dinding sel primer (selulosa, hemiselulosa, dan lignin) melalui ikatan hidrogen, ikatan ionik dengan Ca^{2+} , dan ikatan ester (Dang et al., 2025). Untuk memperoleh pektin dalam bentuk terlarut, protopektin harus dihidrolisis atau dilepaskan dari matriks dinding sel melalui pemberian energi (panas, gelombang mikro, atau gelombang ultrasonik), katalis (asam atau enzim), atau kombinasi keduanya. Berbagai metode ekstraksi pektin dari kulit jeruk telah dikembangkan dan dilaporkan secara luas dalam literatur ilmiah, masing-masing dengan mekanisme, kondisi operasi, dan tingkat kesiapan skala industri yang berbeda.

1.4.1 Macam-Macam Proses Pembuatan Pektin

1.4.1.1 Ekstraksi Asam (*Acid Extraction*)

Ekstraksi asam merupakan metode konvensional yang paling banyak diterapkan dalam industri pektin komersial karena kesederhanaan prosesnya dan keandalannya pada skala besar. Secara mekanisme, kulit jeruk yang telah dikeringkan dan digiling dicampur dengan larutan asam kuat (HCl , H_2SO_4 , atau HNO_3) maupun asam lemah (asam sitrat) pada rentang pH 1,0–2,5. Kondisi pH rendah ini menyebabkan protonasi gugus karboksilat bebas pada rantai asam

galakturonat serta memutus ikatan ionik Ca^{2+} dan ikatan hidrogen yang mengikat protopektin pada dinding sel, sehingga pektin terlepas dan larut ke dalam fase cair pada suhu 60–100 °C selama 60–150 menit (Mansor et al., 2025). Larutan pektin yang telah terekstrak kemudian dipisahkan dari residu padat melalui filtrasi, lalu diendapkan (presipitasi) menggunakan pelarut organik seperti etanol atau isopropanol, dicuci, dan dikeringkan menjadi serbuk pektin.

Berdasarkan studi optimasi response surface methodology (RSM) pada kulit lemon menggunakan HCl, kondisi optimum diperoleh pada suhu 70 °C, pH 1,25, dan waktu ekstraksi 70 menit, menghasilkan rendemen pektin hingga 43–45% dengan derajat esterifikasi (DE) 80,33% (Akachat et al., 2025). Pada kulit jeruk pomelo dengan pelarut asam sitrat, kondisi optimum pH 1,80, suhu 88 °C, waktu 141 menit, dan rasio cair-padat 29:1 mL/g menghasilkan rendemen 39,72% dengan DE 57,56%. Secara umum, semakin rendah pH dan semakin tinggi suhu ekstraksi, semakin banyak pektin yang terlepas dari dinding sel, namun kondisi yang terlalu ekstrem berisiko menghidrolisis rantai galakturonat itu sendiri sehingga menurunkan berat molekul dan kualitas gel pektin.

1.4.1.2 Microwave-Assisted Extraction (MAE)

MAE memanfaatkan radiasi gelombang mikro (umumnya 2,45 GHz) yang diserap secara selektif oleh molekul polar dalam bahan, terutama air dan larutan asam yang terperangkap di jaringan sel. Absorpsi energi ini menyebabkan osilasi dipol-dipol berfrekuensi tinggi sehingga menghasilkan pemanasan volumetrik (*internal heating*) secara serentak ke seluruh bagian bahan, alih-alih pemanasan konduktif dari luar ke dalam seperti pada ekstraksi konvensional. Panas internal yang terbentuk secara cepat menimbulkan tekanan uap di dalam sel yang melebihi kekuatan mekanik dinding sel, sehingga terjadi ruptur sel (*cell rupture*) yang mempercepat pelepasan protopektin dan mempersingkat lintasan difusi pelarut ke dalam jaringan (Duggal et al., 2024). Pada ekstraksi MAE kulit jeruk kinnow (*Citrus reticulata*) menggunakan asam asetat, kondisi optimum diperoleh pada suhu 110 °C, pH 2,2, dan waktu iradiasi hanya 10 menit, jauh lebih singkat dibandingkan ekstraksi asam konvensional yang membutuhkan 60–150 menit, dengan kualitas pektin (kandungan asam galakturonat 63,15%, DE 66,67%) yang setara bahkan lebih murni dibanding pektin komersial. Keunggulan utama MAE terletak pada efisiensi waktu dan energi, tetapi penerapannya pada skala industri masih menghadapi kendala biaya investasi peralatan reaktor microwave kontinu yang tinggi serta tantangan homogenitas pemanasan pada volume reaktor besar.

1.4.1.3 Ultrasound-Assisted Extraction (UAE)

UAE menggunakan gelombang ultrasonik frekuensi tinggi (>20 kHz) yang dipancarkan ke dalam campuran kulit jeruk dan pelarut. Gelombang ini menimbulkan fenomena kavitasi akustik, yaitu pembentukan, pertumbuhan, dan pecahnya gelembung mikro bertekanan rendah di dalam cairan secara sangat cepat. Ketika gelembung pecah di dekat permukaan partikel biomassa, timbul jetting mikro dan gelombang kejut (*microjet* dan *shock wave*) yang secara mekanis merobek dan mendisrupsi struktur dinding sel, sehingga meningkatkan luas permukaan kontak pelarut-bahan dan permeabilitas sel terhadap pelarut asam (Liew et al., 2016). Pada metode UAE-MAE pada kulit jeruk melaporkan bahwa UAE pada pH 1,80 selama 27,52 menit, dilanjutkan MAE pada 643,44 W selama 6,40 menit, menghasilkan rendemen pektin hingga 38,0%, lebih tinggi dibanding MAE atau UAE tunggal. UAE unggul karena dapat dioperasikan pada suhu lebih rendah dan waktu lebih singkat dibanding ekstraksi asam konvensional, namun aplikasinya pada kapasitas besar terkendala oleh keterbatasan penetrasi gelombang ultrasonik pada volume reaktor yang besar, sehingga umumnya diterapkan sebagai tahap pretreatment sebelum ekstraksi asam atau MAE, bukan sebagai proses ekstraksi tunggal pada skala industri.

1.4.1.4 Enzyme-Assisted Extraction (EAE)

EAE memanfaatkan enzim spesifik, seperti pectinase, cellulase, hemicellulase, dan xylanase, untuk menghidrolisis ikatan glikosidik pada polisakarida non-pektik penyusun dinding sel (selulosa dan hemiselulosa) secara selektif, sehingga melepaskan pektin tanpa memutus rantai galakturonat utamanya. Reaksi enzimatis ini umumnya berlangsung pada kondisi jauh lebih ringan dibanding ekstraksi asam, yaitu suhu 20–51 °C dan pH 3,5–6,5, dengan waktu reaksi yang jauh lebih lama, berkisar 2,9–24 jam (Kegl et al., 2025). Ekstraksi multi-enzim (kombinasi cellulase, xylanase, dan protease asam) pada kulit jeruk dengan kondisi optimum rasio cair-padat 21,7 mL/g, suhu 51 °C, pH 4,8, dan waktu 2,9 jam menghasilkan rendemen 25,0%, meningkat 32–41% dibanding ekstraksi asam-basa konvensional. EAE menghasilkan pektin dengan struktur molekul lebih utuh dan berat molekul lebih tinggi karena kondisi reaksi yang lembut, namun biaya enzim komersial dalam jumlah besar serta waktu reaksi yang jauh lebih lama membuat metode ini kurang kompetitif secara ekonomi untuk produksi pektin food-grade dalam skala industri massal.

1.4.1.5 Subcritical Water Extraction (SWE)

SWE menggunakan air pada suhu 100–374 °C dengan tekanan terkontrol (umumnya 10–50 bar) agar air tetap berada dalam fase cair meski berada di atas titik didih normalnya. Pada kondisi ini, konstanta dielektrik air menurun signifikan (dari sekitar 79 pada 25 °C menjadi sekitar 33 pada 200 °C), sehingga polaritas air berkurang dan menyerupai pelarut organik semi-polar yang mampu melarutkan pektin tanpa penambahan asam eksternal. Selain itu, produk ion air (K_w) meningkat pada kondisi subkritis, sehingga air itu sendiri berperan sebagai katalis asam-basa yang menghidrolisis ikatan pada protopektin (Liew et al., 2018). Ekstraksi SWE pada kulit jeruk pomelo dengan kondisi optimum 120 °C dan 30 bar menghasilkan rendemen pektin 19,6%, sedangkan pada kulit jeruk umum (citrus peel) yield maksimum sekitar 22% dicapai pada 120 °C. Metode ini ramah lingkungan karena tidak memerlukan bahan kimia tambahan, tetapi memerlukan bejana bertekanan tinggi (*pressure vessel*) dengan biaya investasi besar serta rendemen yang secara umum lebih rendah dibanding ekstraksi asam konvensional.

1.4.2 Perbandingan Metode Ekstraksi Pektin

Kelima metode ekstraksi tersebut memiliki karakteristik proses, kondisi operasi, dan tingkat kesiapan industri yang berbeda-beda, sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.7.

Tabel 1.7 Perbandingan Metode Ekstraksi Pektin dari Kulit Jeruk

Parameter	Ekstraksi Asam	MAE	UAE	EAE	SWE
Pelarut	HCl / H ₂ SO ₄ / asam sitrat	Asam + gel. mikro	Asam + gel. ultrasonik	Pectinase/cellulase	Air (tanpa asam)
Suhu	60–100 °C	88–110 °C	25–60 °C	20–51 °C	100–140 °C
Tekanan	1 atm	1 atm	1 atm	1 atm	10–30 bar
Waktu proses	60–150 menit	10–15 menit	15–45 menit	2,9–24 jam	20–30 menit
Rendemen tipikal	15–45%	24–51%	31–38%	10–25%	18–22%
Reaktor	Tangki berpengaduk	Reaktor microwave	Bak ultrasonik	Tangki berpengaduk	Bejana bertekanan
Kelebihan	CAPEX/OPEX rendah, mudah scale-up	Waktu & energi sangat efisien	Suhu rendah, ramah struktur pektin	Kualitas & BM tinggi	Tanpa bahan kimia tambahan
Kekurangan	Waktu lebih lama, korosif	Investasi alat mahal	Sulit scale-up (atenuasi akustik)	Enzim mahal, waktu sangat lama	Bejana tekan mahal, rendemen sedang

Ekstraksi MAE dan UAE terbukti secara ilmiah mampu meningkatkan rendemen pektin sekaligus memangkas waktu proses secara drastis dibandingkan ekstraksi asam konvensional. Namun, penerapan kedua metode ini pada skala industri 2.000 ton/tahun menghadapi kendala signifikan. Reaktor microwave kontinu berkapasitas industri memerlukan investasi peralatan yang jauh lebih mahal dibanding tangki ekstraksi konvensional, serta menghadapi tantangan homogenitas pemanasan (penetrasi gelombang mikro terbatas pada kedalaman tertentu), sehingga scale-up dari skala laboratorium (gram) ke skala industri (ton) belum banyak terbukti secara komersial (Rawat et al., 2024). Kendala serupa terjadi pada UAE, karena intensitas dan penetrasi gelombang ultrasonik menurun signifikan seiring bertambahnya volume dan kekeruhan cairan pada reaktor besar (atenuasi akustik), sehingga metode ini pada praktiknya lebih banyak diterapkan sebagai tahap pretreatment untuk mempersingkat waktu ekstraksi asam konvensional, bukan sebagai proses ekstraksi utama yang berdiri sendiri pada skala pabrik.

EAE menghasilkan pektin dengan kualitas dan berat molekul terbaik karena kondisi reaksinya yang lembut, tetapi biaya enzim komersial dalam jumlah besar (skala ton bahan baku per hari) serta waktu reaksi yang mencapai puluhan jam membuat metode ini secara ekonomi kurang kompetitif untuk produksi pektin food-grade bervolume besar (Haque et al., 2025). Sementara itu, SWE menawarkan proses bebas bahan kimia tambahan yang ramah lingkungan, namun memerlukan bejana bertekanan tinggi (pressure vessel) yang meningkatkan biaya investasi awal secara signifikan, dengan rendemen yang secara konsisten lebih rendah dibanding ekstraksi asam konvensional pada bahan baku kulit jeruk (Riyamol et al., 2023).

Ekstraksi asam, meskipun membutuhkan waktu proses lebih lama dibanding MAE maupun UAE, tetap unggul dari sisi kesederhanaan desain reaktor (tangki berpengaduk konvensional yang telah terbukti pada skala industri), kemudahan pengendalian proses, ketersediaan bahan kimia (asam) secara komersial dengan harga terjangkau, serta rekam jejak penerapan komersial yang panjang pada industri pektin dunia. Oleh karena itu, dari kelima alternatif yang dikaji, ekstraksi asam tetap menjadi metode yang paling layak secara teknis dan ekonomis untuk pabrik pektin berkapasitas 2.000 ton/tahun.

1.4.3 Kegunaan Produk

Pektin berfungsi sebagai bahan multifungsi dengan kemampuan gelling, thickening, emulsifying, dan stabilizing. High-methoxyl pectin ($DE > 50\%$) membentuk gel melalui ikatan hidrogen pada kondisi pH rendah dan gula tinggi, sedangkan low-methoxyl pectin ($DE < 50\%$) membentuk gel secara ionotropik dengan ion Ca^{2+} tanpa memerlukan gula tinggi, sehingga

cocok untuk produk rendah gula (Sharma et al., 2026). Pektin juga berperan sebagai emulsifier alami pada produk dairy; menurut Jia et al. (2024), degree of methoxylation memengaruhi aktivitas pengemulsian dan stabilisasi panas konjugat whey protein–pektin, sekaligus mencegah sineresis pada yoghurt.

Pada industri farmasi, pektin digunakan sebagai matriks penghantaran obat terkontrol dan tertarget, khususnya *colon-specific drug delivery*, karena resisten terhadap degradasi lambung dan usus halus namun dapat didegradasi oleh mikroflora kolon (Kapoor et al., 2024; Sánchez et al., 2024). Selain itu, pektin dimanfaatkan pada formulasi kosmetik sebagai *thickening agent*, *texturizer*, dan *moisturizer*.

1.4.4 Pemilihan Metode Proses

Berdasarkan tinjauan komparatif teknis, kualitas produk, kelayakan ekonomi, dan kesiapan skala industri pada Tabel 1.7 serta pembahasan pada sub-bab 1.4.2, metode ekstraksi asam dipilih sebagai proses utama pada pra-rancangan pabrik pektin dari kulit jeruk berkapasitas 2.000 ton/tahun ini. Pemilihan ini didasarkan pada beberapa pertimbangan utama: (1) kestabilan dan kesederhanaan proses yang telah terbukti secara komersial pada industri pektin dunia; (2) biaya investasi (CAPEX) dan biaya operasional (OPEX) yang relatif rendah dibanding MAE, UAE, EAE, maupun SWE; (3) kemudahan scale-up dari skala laboratorium ke skala industri menggunakan peralatan tangki berpengaduk konvensional yang telah tersedia secara komersial; serta (4) ketersediaan dan kemudahan pengadaan bahan kimia (asam) dibanding enzim atau peralatan microwave/ultrasonik/bertekanan tinggi yang masih terbatas pemasoknya untuk skala industri di Indonesia.