

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan produsen kelapa sawit terbesar di dunia sejak tahun 2005, baik berkontribusi terhadap pasar global maupun perekonomian nasional. Produksi minyak sawit Indonesia menunjukkan tren peningkatan yang konsisten, di mana pada tahun 2018 tercatat mencapai 40,5 juta ton dengan luas areal perkebunan sekitar 14,3 juta hektare. Seiring dengan ekspansi dan peningkatan produktivitas, jumlah tersebut terus bertambah hingga pada tahun 2022 produksi minyak sawit nasional mencapai 45,58 juta ton, atau meningkat sekitar 1,02% dibandingkan tahun sebelumnya, yang menegaskan dominasi Indonesia dalam industri kelapa sawit dunia (Purnomo et al., 2020). Namun, proses produksi minyak kelapa sawit menghasilkan limbah dalam jumlah besar yang dapat dikelompokkan menjadi limbah padat dan limbah cair. Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan limbah paling banyak secara volume, sedangkan POME merupakan limbah paling signifikan secara lingkungan (Letti et al., 2021). Padahal, baik limbah padat maupun limbah cair yang dihasilkan dari industri kelapa sawit masih mengandung berbagai komponen bernilai yang berpotensi untuk dimanfaatkan lebih lanjut, sehingga tidak hanya dipandang sebagai bahan buangan, tetapi juga sebagai sumber daya yang dapat diolah menjadi produk bernilai tambah. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah kelapa sawit menjadi isu penting dalam upaya mewujudkan industri kelapa sawit yang berkelanjutan dan berorientasi pada ekonomi sirkular.

Salah satu limbah padat yang paling melimpah adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS), jumlahnya mencapai sekitar 23–28% dari berat tandan buah segar (TBS) yang diolah (Windiastuti et al., 2022; Yusuf et al., 2025). Limbah TKKS kaya akan komponen lignoselulosa yang menjadikannya sumber biomassa sangat potensial untuk dikonversi menjadi berbagai produk bernilai tambah. Selulosa (37–55,75%) dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku microcrystalline cellulose (MCC) yang digunakan dalam industri pangan, farmasi, kosmetik, serta bahan biokomposit dan kertas khusus (Rizquna et al., 2025). Hemiselulosa (\pm 28,93%), yang kaya akan gula pentosa, berpotensi dikonversi menjadi furfural, xylitol, bioetanol generasi kedua, serta berbagai platform chemicals yang menjadi bahan antara industri resin, pelarut, dan bahan bakar terbarukan (Adamu et al., 2024). Lignin (15,32–16,5%) dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku bioenergi, perekat ramah lingkungan, aditif aspal, karbon aktif, hingga precursor material karbon

untuk aplikasi material maju (Akbar et al., 2024). Sementara itu, lipid residu yang masih tersisa dalam TKKS dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku biodiesel, surfaktan, atau sumber energi melalui proses termokimia (Volpi et al., 2019). Melihat potensi aplikasinya, TKKS memiliki peran strategis sebagai bahan baku biorefinery yang mendukung pemanfaatan limbah secara berkelanjutan dan peningkatan nilai ekonomi industri kelapa sawit.

Salah satu senyawa yang dapat dikonversi dari biomassa lignoselulosa adalah furfural. Secara kimia, furfural termasuk aldehida furan yang sangat reaktif dan fleksibel untuk diturunkan menjadi berbagai produk kimia strategis (Othman et al., 2020). Senyawa ini banyak dimanfaatkan dalam industri kimia sebagai pelarut selektif dan bahan baku furfural alkohol, tetrahydrofuran (THF), resin, serta asam maleat, sementara turunannya juga diaplikasikan dalam industri farmasi, energi terbarukan, pangan, dan penyamakan kulit (Majesty & Herdiansyah, 2019). Pemanfaatan furfural yang luas meningkatkan permintaan pasar global terhadap furfural, yang tercermin dari nilai ekonominya yang tinggi dan kelayakan finansial proses produksinya.

Kebutuhan furfural di Indonesia untuk industri dalam negeri hingga saat ini masih sangat bergantung pada impor, meskipun Indonesia memiliki ketersediaan biomassa lignoselulosa yang melimpah, khususnya dari limbah industri kelapa sawit seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Impor furfural Indonesia menunjukkan tren meningkat dari 387.578 ton (2020) hingga puncaknya 755.602 ton (2023), sebelum menurun menjadi 403.433 ton pada 2024, yang menandakan tingginya kebutuhan domestik dan peluang pengembangan produksi furfural dalam negeri (BPS, 2026). Di sisi lain, limbah TKKS tersedia dalam jumlah besar dan kaya akan fraksi hemiselulosa yang dapat dikonversi menjadi furfural, sehingga berpotensi menjadi sumber bahan baku lokal yang strategis untuk mengurangi ketergantungan impor dan mendorong pengembangan industri kimia berbasis biomassa di Indonesia.

Metode pembuatan furfural dari biomassa lignoselulosa telah berkembang melalui berbagai pendekatan, seperti hidrolisis asam, sistem biphasic, penggunaan katalis homogen dan heterogen, serta pemanfaatan pemanasan non-konvensional (Cai et al., 2025; Bakili et al., 2025). Di antara berbagai metode tersebut, hidrolisis asam masih menjadi pendekatan paling matang dan banyak diterapkan secara industri. Namun, metode konvensional ini memiliki keterbatasan berupa degradasi furfural akibat waktu tinggal yang panjang pada kondisi reaksi asam, sehingga yield yang diperoleh relatif rendah, berkisar antara 60–75% dari pentosan (Muryanto et al., 2025).

Oleh karena itu, dikembangkan pendekatan metode SupraYield, yaitu hidrolisis asam satu tahap yang dioperasikan pada suhu tinggi (200–210°C) dan waktu reaksi singkat untuk mempercepat pembentukan furfural sekaligus menekan reaksi samping (Mohamad et al., 2020). Proses ini dikombinasikan dengan continuous steam stripping yang mengekstrak furfural segera setelah terbentuk sehingga mencegah degradasi produk, dan mampu menghasilkan yield furfural hingga 85–92% dari pentosan, jauh lebih tinggi dibandingkan metode konvensional (Sadipun et al., 2023). Selain optimasi tahap reaksi, efisiensi tahap pemurnian furfural juga menjadi faktor kritis dalam menentukan performa produksi secara keseluruhan. Metode distilasi konvensional memerlukan beberapa kolom distilasi bertingkat yang konsumsi energinya tinggi. Sebagai solusi, teknologi Extractive Dividing Wall Column (EDWC) dikembangkan untuk mengintegrasikan proses ekstraksi dan distilasi pemurnian furfural dalam satu kolom tunggal, sehingga konsumsi energi, jumlah peralatan, dan biaya investasi dapat ditekan secara signifikan dibandingkan sistem distilasi konvensional bertingkat (Nhien et al., 2021). Kombinasi proses SupraYield dengan teknologi EDWC menjadikan perancangan pabrik furfural ini relevan terhadap tuntutan efisiensi dan keberlanjutan industri kimia modern.

Berdasarkan uraian di atas, Indonesia memiliki potensi yang sangat besar untuk mengembangkan industri furfural berbasis biomassa TKKS guna mengurangi ketergantungan terhadap impor sekaligus memanfaatkan limbah agroindustri secara bernilai tambah. Oleh karena itu, perancangan pabrik furfural dari biomassa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan integrasi proses SupraYield dan teknologi Extractive Dividing Wall Column (EDWC) berkapasitas 5.000 ton/tahun dinilai layak dan strategis untuk dikaji lebih lanjut, baik dari aspek teknis, ekonomis, maupun keberlanjutan industri.

1.2 Kapasitas Produksi

Penentuan kapasitas produksi menjadi aspek paling krusial pada perancangan pabrik kimia, hal ini karena akan memengaruhi seluruh perhitungan teknis dan ekonomis (Peters *et al.*, 2003). Secara umum, kapasitas produksi yang lebih besar berpotensi memberikan keuntungan ekonomi yang lebih tinggi melalui penerapan skala ekonomi. Namun, penentuan kapasitas tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan pertimbangan keuntungan semata, karena kapasitas yang terlalu besar tanpa dukungan pasar dan ketersediaan bahan baku yang memadai dapat meningkatkan risiko operasional dan menurunkan kelayakan ekonomi pabrik.

Oleh karena itu, kapasitas produksi pabrik Furfural dalam perancangan ini ditetapkan berdasarkan beberapa pertimbangan yang saling berkaitan dan realistis. Penentuan kapasitas dilakukan dengan memperhatikan proyeksi kebutuhan Furfural di Indonesia agar kapasitas yang dirancang sejalan dengan permintaan pasar dan dapat mendukung upaya substitusi impor sebagai prioritas utama. Selain itu, aspek ketersediaan bahan baku juga menjadi pertimbangan penting untuk menjamin kontinuitas proses produksi secara berkelanjutan. Di sisi lain, penentuan kapasitas pabrik juga mempertimbangkan kapasitas minimum yang masih layak secara komersial, dengan menyesuaikan skala produksi terhadap kondisi pasar dan ketersediaan sumber daya yang ada.

Berdasarkan pendekatan tersebut, kapasitas pabrik Furfural yang dirancang diharapkan tidak hanya memenuhi aspek teknis, tetapi juga layak secara ekonomi serta memiliki prospek operasional yang berkelanjutan dalam jangka panjang.

1.2.1 Prediksi Kebutuhan Furfural di Indonesia

Prediksi kebutuhan Furfural dapat diproyeksikan dengan menggunakan data impor, ekspor, produksi, serta konsumsi. Namun demikian, hingga saat ini furfural belum diproduksi secara komersial di Indonesia, sehingga data produksi dan konsumsi domestik tidak tersedia secara langsung. Oleh karena itu, dalam perancangan ini, proyeksi kebutuhan furfural di Indonesia dilakukan terutama berdasarkan data impor dan ekspor. Nilai ekspor furfural dari Indonesia tercatat relatif kecil, yang mengindikasikan bahwa furfural yang masuk ke Indonesia pada umumnya digunakan untuk memenuhi kebutuhan industri dalam negeri, bukan untuk tujuan ekspor ulang. Kondisi ini juga menunjukkan bahwa Indonesia masih berperan sebagai negara konsumen, dengan ketergantungan terhadap pasokan furfural dari luar negeri. Kecilnya volume ekspor dapat disebabkan oleh belum adanya fasilitas produksi furfural skala komersial di dalam negeri, serta keterbatasan ketersediaan produk untuk dipasarkan ke luar negeri.

Furfural merupakan bahan kimia antara yang banyak digunakan sebagai bahan baku maupun pelarut dalam berbagai sektor industri. Kebutuhan furfural di Indonesia berasal dari industri resin dan perekat berbasis furan, industri pemurnian minyak pelumas sebagai selective solvent, serta industri kimia lanjutan yang memproduksi senyawa turunan furfural. Selain itu, furfural juga berpotensi digunakan dalam industri farmasi dan bahan aditif, meskipun penggunaannya masih terbatas.

Maka, proyeksi kebutuhan furfural di Indonesia yang didasarkan pada data impor dan ekspor dinilai cukup representatif untuk menggambarkan kondisi pasar aktual, sekaligus menunjukkan

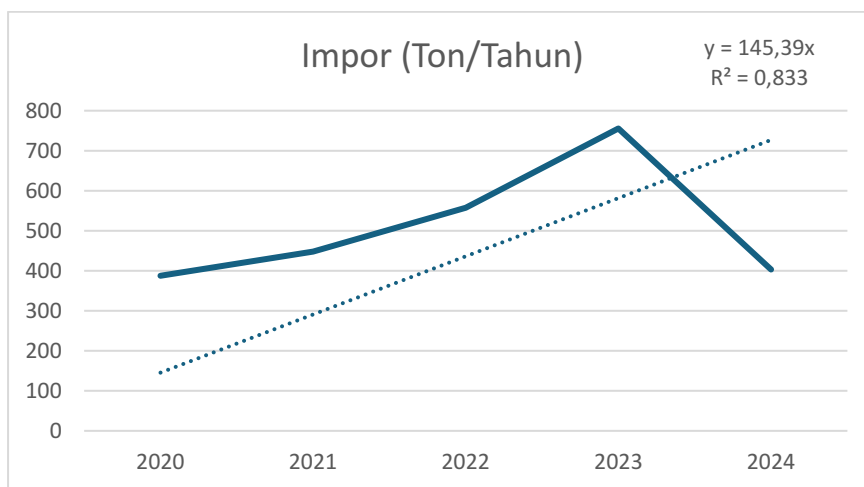
peluang pengembangan produksi furfural domestik guna mengurangi ketergantungan terhadap impor. Berikut pada Tabel 1.1 Data impor dan ekspor menurut BPS (2026).

Berikut merupakan data ekspor-impor furfural di Indonesia yang dapat dilihat pada tabel 1.1.

Tabel 1.1. Data Ekspor dan Impor Fufural di Indonesia (BPS, 2026)

Tahun	Impor (Ton/Tahun)	Ekspor (Ton/Tahun)
2020	387,578	0,001
2021	448,014	0
2022	557,717	0,05025
2023	755,602	0,071
2024	403,433	0,0002

Selanjutnya, data impor dan ekspor furfural dianalisis untuk memproyeksikan kebutuhan di masa mendatang. Pada tahap awal, proyeksi dilakukan menggunakan metode regresi berdasarkan tren data historis. Namun, pada Gambar 1.1. di bawah ini dapat terlihat bahwa hasil analisis menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh kurang dari 0,9, sehingga tingkat kecocokan model regresi terhadap data dinilai belum memadai untuk digunakan sebagai dasar proyeksi jangka panjang.



Gambar 1.1. Grafik tren impor Furfural tahun 2020-2024
(BPS, 2026)

Oleh karena itu, dalam perancangan ini digunakan metode *discounted* sebagai pendekatan alternatif dalam memproyeksikan kebutuhan Furfural. Metode ini dipilih karena dinilai lebih representatif dalam menggambarkan kecenderungan data yang berfluktuasi serta lebih sesuai

untuk kondisi pasar Furfural di Indonesia yang masih terbatas dan belum stabil. Metode *discounted* dapat dihitung dengan formula sebagai berikut:

$$m = P(1 + i)^n$$

Dimana:

m = Jumlah produk pada tahun-tahun mendatang (ton/tahun)

P = Data besarnya impor tahun 2024 (ton/tahun)

i = Rata-rata kenaikan impor tiap tahun (%)

n = Selisih tahun (tahun proyeksi – 2024)

Setelah perhitungan didapatkan, selanjutnya kapasitas produksi dihitung menggunakan neraca massa peluang kapasitas dengan rumus sebagai berikut.

$$M1 + M2 + M3 = M4 + M5$$

$$M3 = (M4 + M5) - (M1 + M2)$$

Dimana:

M1 = nilai impor pada tahun 2030

M2 = nilai produksi pabrik lama

M3 = nilai produksi pabrik baru pada tahun 2030

M4 = nilai ekspor pada tahun 2030

M5 = konsumsi dalam negeri tahun 2030

Perhitungan kapasitas produksi dapat dilihat pada Tabel 1.2. sebagai berikut:

Tabel 1.2. Perhitungan kapasitas Furfural menggunakan metode discounted

(Peters, 2003)

Tahun	Impor		Ekspor		Konsumsi=impor	
	Jumlah (Ton)	%P	Jumlah (Ton)	%P	Jumlah (Kg)	%P
2020	387,578	0	0,001	0,00	387,578	0
2021	448,014	15,59324833	0,001	0,00	448,014	15,59
2022	557,717	24,48651158	0,05025	4925,00	557,717	24,49
2023	755,602	35,48125662	0,071	41,29	755,602	35,48

2024	403,433	46,60773794	0,0002	-99,72	403,433	-46,61
Total %P		28,95		4866,58		28,9532786
i		7,24		1216,64		7,238319649
i/100		0,07		12,17		0,072383196

Peluang kapasitas berdasarkan data ekspor dan impor,

$$M3 = (M4 + M5) - (M1 + M2)$$

$$M3 = (1.041,93301 + 613,5803197) - (0 + 0)$$

$$M3 = 1.655,513329$$

Berdasarkan perhitungan kapasitas produksi, diperoleh bahwa peluang kapasitas produksi pada tahun 2030 mencapai 1.655,513329 ton per tahun. Namun, mengingat belum adanya pabrik Furfural yang beroperasi di Indonesia, maka kapasitas pabrik baru yang direncanakan dikalikan dengan faktor 1,5 dari nilai proyeksi tersebut, sehingga diperoleh:

$$M_{32030} = 1.655,513329 \times 1,5 = 2.483,26994 \text{ ton/tahun}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh peluang kapasitas produksi domestic sebesar 2.483,27 ton per tahun.

1.2.2 Ketersediaan Bahan Baku

Pada perancangan pabrik setelah memprediksi kebutuhan furfural di Indonesia maka selanjutnya diperlukan analisa ketersediaan bahan baku. Analisis ini menjadi penting untuk memastikan bahwa kapasitas pabrik yang dirancang dapat didukung oleh pasokan bahan baku yang mencukupi dan berkelanjutan. Dalam perancangan ini, bahan baku utama pembuatan furfural adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang merupakan limbah padat dari industri pengolahan kelapa sawit.

Pemanfaatan TKKS sebagai bahan baku furfural sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular, karena limbah industri yang sebelumnya bernilai rendah dapat diolah kembali menjadi produk kimia bernilai tambah. Selain itu, ketersediaan TKKS di Indonesia sangat dipengaruhi oleh luas lahan perkebunan kelapa sawit serta kapasitas pabrik kelapa sawit yang beroperasi, mengingat TKKS dihasilkan sebagai produk samping dari proses pengolahan tandan buah segar (TBS) menjadi minyak kelapa sawit. Data luas tanaman perkebunan menurut BPS (2025) dapat dilihat pada Tabel 1.3. berikut:

Tabel 1.3. Luas tanaman perkebunan tahun 2020-2024 (BPS, 2025)

No	Tahun	Luas Tanaman Perkebunan (Ribuan hektar)
1	2020	14.858,30
2	2021	14.663,60
3	2022	15.338,60
4	2023	15.928,71
5	2024	16.005,06

Berdasarkan data pada Tabel 3, luas tanaman perkebunan kelapa sawit di Indonesia selama periode 2020–2024 menunjukkan kecenderungan meningkat. Pada tahun 2020, luas perkebunan tercatat sebesar 14.858,30 ribu hektar dan mengalami peningkatan secara bertahap hingga mencapai 16.005,06 ribu hektar pada tahun 2024. Peningkatan luas lahan ini mengindikasikan adanya ekspansi sektor perkebunan kelapa sawit yang berkelanjutan di Indonesia. Sejalan dengan peningkatan luas areal perkebunan, produksi minyak kelapa sawit (CPO) nasional juga menunjukkan tren peningkatan. Pada tahun 2022, produksi CPO meningkat menjadi 46,82 juta ton dan kembali naik pada tahun 2023 menjadi 47,08 juta ton (BPS., 2024). Dalam proses produksi minyak kelapa sawit, dihasilkan limbah biomassa dalam jumlah besar, salah satunya berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Menurut Stichnothe (2011), untuk menghasilkan 1 ton crude palm oil (CPO) diperlukan sekitar 5 ton tandan buah segar (TBS), dan dari setiap 1 ton TBS yang diproses dihasilkan sekitar 0,23 ton TKKS. Dengan demikian, setiap 1 ton CPO yang diproduksi menghasilkan sekitar 1,15 ton TKKS.

Mengacu pada data produksi CPO Indonesia tahun 2023 sebesar 47,08 juta ton, potensi TKKS yang dihasilkan diperkirakan mencapai lebih dari 54 juta ton per tahun. Jumlah ini menunjukkan bahwa ketersediaan TKKS sebagai bahan baku pembuatan furfural di Indonesia sangat melimpah dan berkelanjutan, sehingga mampu mendukung operasi pabrik furfural yang dirancang tanpa risiko kekurangan bahan baku. Peningkatan produksi CPO ini secara langsung berbanding lurus dengan meningkatnya jumlah limbah padat yang dihasilkan, termasuk TKKS, yang merupakan produk samping utama dari pengolahan tandan buah segar. Berdasarkan kondisi tersebut, dapat disimpulkan bahwa ketersediaan TKKS di Indonesia sangat melimpah dan memiliki kecenderungan meningkat seiring dengan pertumbuhan luas areal dan produksi kelapa sawit.

Komposisi kimia TKKS terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin dalam bentuk padatan lignoselulosa. Menurut Amraini *et al* (2023), kandungan hemiselulosa dalam TKKS berkisar antara

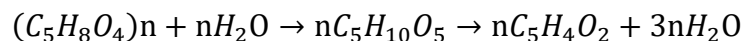
20–30% berat kering, dengan xilan sebagai komponen dominan. Selulosa biasanya berada pada kisaran 35–45%, sedangkan lignin sekitar 20–25%. Untuk kandungan lebih lengkapnya terdapat pada Tabel 1.4. di bawah ini. Komponen utama TKKS yang berperan langsung dalam pembentukan furfural adalah hemiselulosa, khususnya fraksi xilan yang tersusun dari gula pentosa (terutama xilosa), Dengan kandungan hemiselulosa yang relatif tinggi, TKKS menjadi sumber pentosa yang cukup baik untuk produksi furfural.

Tabel 1.4. Komponen utama TKKS (Amraini et al., 2023)

Komponen	Kandungan (% berat kering)
Selulosa	35 – 45 %
Hemiselulosa	20 – 30 %
Lignin	20 – 25 %
Abu	3 – 6 %
Ekstraktif	2 – 5 %
Kadar air (awal)*	50 – 65 %

Pada perancangan pabrik furfural ini, kapasitas produksi yang direncanakan sebesar 5.000 ton per tahun. Untuk menentukan kebutuhan bahan baku, digunakan pendekatan stoikiometri reaksi utama serta data konversi TKKS terhadap furfural yang dilaporkan dalam literatur.

Reaksi utama pembentukan furfural dari fraksi pentosan dalam TKKS dapat dituliskan sebagai berikut (Arnold dan Buzzard, 2011):



Berdasarkan yield teoritis pembentukan furfural pentosan adalah didapat sebesar 0,727 atau 72,7% terhadap massa pentosan teoritis. Berikut terkait perhitungan disesuaikan dengan Berat Molekul (BM):

$$\frac{96}{132} = 0,727$$

Berdasarkan penelitian Panjaitan *et al.* (2017), biomassa TKKS memiliki kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin masing-masing sebesar 40,3%; 31,2%; dan 23,2%. Namun, tidak seluruh fraksi hemiselulosa merupakan xilan/pentosan yang dapat dikonversi menjadi furfural. Penelitian

Othman *et al.* (2021) menyebutkan bahwa biomassa TKKS diperkirakan mengandung sekitar 23–26% xilan, yaitu polimer pentosa yang menjadi prekursor utama pembentukan furfural. Oleh karena itu, pada perancangan ini digunakan asumsi kandungan pentosan/xilan rata-rata sebesar 25% massa kering TKKS. Sementara itu, proses SupraYield® dilaporkan mampu menghasilkan furfural sebesar sekitar 78% dari yield teoritis pentosan. Maka jumlah furfural yang dapat dihasilkan dari 1 ton TKKS kering adalah:

$$\text{Furfural per ton TKKS} = 0,25 \times 0,727 \times 0,78 = 0,142 \text{ ton Furfural/ton TKKS}$$

Maka, kebutuhan TKKS untuk menghasilkan 1 ton furfural adalah:

$$\text{TKKS per ton furfural} = \frac{1}{0,142} = 7,04 \text{ ton TKKS/ton furfural}$$

Maka kapasitas produksi furfural sebesar 5.000 ton per tahun, dapat dihitung kebutuhan bahan baku TKKS per tahun adalah:

$$\begin{aligned} \text{TKKS tahunan} &= 5.000 \times 7,04 \\ \text{TKKS tahunan} &= \frac{35.200 \text{ ton TKKS}}{\text{tahun}} \end{aligned}$$

Apabila pabrik beroperasi selama 330 hari per tahun, maka kebutuhan TKKS per hari adalah:

$$\begin{aligned} \text{TKKS harian} &= \frac{35.200}{330} \\ \text{TKKS harian} &\approx 106,67 \text{ ton/hari} \end{aligned}$$

Berdasarkan data perusahaan perkebunan kelapa sawit berskala besar di Indonesia, terlihat bahwa kapasitas produksi CPO masing-masing perusahaan berada pada kisaran jutaan ton per tahun. Berikut pada Tabel 1.5. daftar perusahaan kelapa sawit besar di Indonesia dan estimasi kapasitas produksi:

Tabel 1.5. Perusahaan Kelapa Sawit Besar di Indonesia dan Estimasi Kapasitas Produksi (BPS., 2023)

No	Perusahaan	Wilayah Operasi Utama	Estimasi Kapasitas Produksi CPO
----	------------	--------------------------	------------------------------------

		Riau, Sumatera Utara,	
1	Wilmar Group	Kalimantan	± 10–12 juta ton/tahun
	Sinar Mas Agribusiness &	Sumatera,	
2	Food (GAR)	Kalimantan, Papua	± 7–9 juta ton/tahun
3	Asian Agri Group	Riau, Sumatera Utara	± 5–6 juta ton/tahun
		Kalimantan, Sulawesi,	
4	Astra Agro Lestari	Sumatera	± 4–5 juta ton/tahun
5	Indofood Agri Resources	Sumatera, Kalimantan	± 3–4 juta ton/tahun
	PT Perkebunan Nusantara		
6	(PTPN Group)	Sumatera, Kalimantan	± 2–3 juta ton/tahun

Proses produksi furfural juga memerlukan bahan pembantu berupa katalis asam sulfat. Kebutuhan asam sulfat dapat dipenuhi dari industri dalam negeri, khususnya dari industri pupuk fosfat dan industri smelter logam yang menghasilkan asam sulfat sebagai produk utama maupun produk samping. Daftar perusahaannya yaitu PT Petrokimia Gresik, PT Pupuk Sriwidjaja Palembang, PT Pupuk Iskandar Muda, PT Pupuk Kalimantan Timur, PT Smelting Gresik, PT Freeport Indonesia, dan PT Acidatama. Dengan keberadaan industri tersebut, ketersediaan katalis asam sulfat untuk proses produksi furfural dapat dijamin secara berkelanjutan.

1.2.3 Kemungkinan Ekspor Furfural

Kemungkinan ekspor furfural ditunjukkan karena pada perhitungan kapasitas furfural secara domestic didapatkan sebesar 2.483,27 ton per tahun, sementara itu kebutuhan bahan baku TKKS di Indonesia masih berlimpah sebanyak 54 juta ton per tahun (tahun 2023). Maka dari itu, dengan ketersediaan bahan baku yang sangat besar ini, terdapat peluang signifikan untuk meningkatkan kapasitas produksi pabrik guna memenuhi kebutuhan pasar ekspor.

Analisis potensi pasar ekspor dilakukan dengan mengidentifikasi negara-negara yang memiliki kebutuhan furfural namun belum memiliki fasilitas produksi domestik atau masih bergantung pada impor. Data impor furfural dari berbagai negara diperoleh dari UN Comtrade Database dengan HS Code 2932.13 untuk periode tahun 2020-2024. Dari data tersebut, dilakukan seleksi negara tujuan ekspor berdasarkan beberapa kriteria, yaitu: negara yang belum memiliki produksi furfural domestik atau produksinya masih terbatas, volume impor yang signifikan, minimal 100 ton/tahun, jarak logistik yang ekonomis dari Indonesia, dan pertumbuhan ekonomi dan industri yang positif.

Negara-negara yang sudah memiliki pabrik furfural dalam skala besar, seperti India (kapasitas 6.000-11.000 ton/tahun), Thailand (~5.000 ton/tahun), Italia (6.000 ton/tahun), dan Prancis (10.000 ton/tahun), tidak dimasukkan sebagai target ekspor prioritas karena dapat memenuhi kebutuhan domestiknya sendiri. Demikian pula, negara-negara di Eropa dan Amerika yang memiliki jarak logistik sangat jauh dari Indonesia juga tidak diprioritaskan mengingat biaya transportasi yang tinggi akan mengurangi daya saing produk. Berdasarkan kriteria tersebut, berikut pada Tabel 1.6. merupakan data negara-negara untuk perluasan ekspor dilihat dari data impor dalam satuan (ton) disertai dengan proyeksi pada tahun 2030:

Tabel 1.6. Data Impor Historis dan Proyeksi Kebutuhan Furfural Negara dalam Satuan Ton (UN Data, 2025)

Negara	2020	2021	2022	2023	2024	2030
Jepang	1.831	-	1.727	1.396	1.712	1.217
Korea Selatan	610,5	-	590,7	591,9	610,2	592,3
Malaysia	186,7	-	106	239,2	-	254,3
Thailand	60	139,2	118,4	119	99,3	153,6
Vietnam	275,2	470	327,3	243,7	-	127,1

Proyeksi kebutuhan furfural di negara-negara tujuan ekspor pada tahun 2030 dihitung menggunakan metode regresi linear sederhana. Metode ini dipilih karena data impor furfural dari beberapa negara menunjukkan pola yang cukup fluktuatif dari tahun ke tahun, sehingga penggunaan metode pertumbuhan majemuk (*Compound Annual Growth Rate/CAGR*) berpotensi menghasilkan proyeksi yang kurang akurat atau terlalu ekstrem. Metode regresi linear memberikan pendekatan yang lebih stabil dengan mempertimbangkan tren keseluruhan data historis tanpa terlalu sensitif terhadap fluktuasi tahun-ke-tahun. Selain itu, metode ini juga sesuai dengan rekomendasi Peters *et al.* (2003) untuk proyeksi kapasitas pabrik kimia ketika data historis menunjukkan variabilitas yang tinggi.

Hasil proyeksi menunjukkan bahwa total kebutuhan furfural dari lima negara target pada tahun 2030 diperkirakan mencapai 2343,955 ton/tahun. Jika ditambah dengan kebutuhan domestik Indonesia maka total kebutuhan furfural yaitu:

$$\begin{aligned} \text{Kapasitas Final} &= \text{Kapasitas domestik} + \text{Kapasitas ekspor} \\ &= 2.483,27 \text{ ton per tahun} + 2.343,955 \text{ ton per tahun} \end{aligned}$$

$$= 4.827 \approx 5.000 \text{ ton per tahun}$$

1.2.4 Kapasitas Minimum

Penentuan kapasitas produksi merupakan salah satu tahapan penting dalam perancangan pabrik karena berkaitan langsung dengan kelayakan teknis, ekonomi, serta keberlanjutan operasional pabrik. Kapasitas pabrik harus dirancang sedemikian rupa agar mampu memenuhi kebutuhan pasar yang dituju, namun tetap realistis terhadap ketersediaan bahan baku, tingkat penguasaan teknologi, serta kondisi industri di wilayah pendirian pabrik. Kapasitas yang terlalu kecil dapat menyebabkan pabrik tidak ekonomis untuk dioperasikan, sedangkan kapasitas yang terlalu besar berisiko menimbulkan kelebihan produksi yang tidak terserap pasar dan meningkatkan biaya investasi serta operasional.

Secara global, furfural telah diproduksi secara komersial di berbagai negara dengan kapasitas yang bervariasi, mulai dari skala kecil hingga skala besar. Negara-negara seperti Tiongkok, Republik Dominika, Afrika Selatan, Amerika Serikat, dan beberapa negara Eropa telah lama mengembangkan industri furfural berbasis biomassa lignoselulosa seperti tongkol jagung, bagasse tebu, jerami, dan residu pertanian lainnya. Berikut pada Tabel 1.7. daftar perusahaan produsen Furfural di dunia diantaranya yaitu:

Tabel 1.7. Daftar perusahaan produsen Furfural di dunia (Elvers et al., 2014).

No	Negara	Perusahaan	Kapasitas (ton/tahun)	Bahan Baku
1	Argentina	Idunor S.A.	3.000	Ekstrak kayu
		E. C. Welbers	1.500	Kayu
2	Brazil	Agroquinica Rafard S.A.	4.600	Bagasse
		Rep.		
3	Dominika	Central Romana Co.	32.000	Bagasse
4	Mexico	Furfuraly Denvados	1.800	Tongkol jagung
		Amerika	Great Lakes	
5	Serikat	Chemical Co.	45.000	Bagasse, sekam padi
		Lenzig		
6	Austria	Aktiengesellschaft	10.000	Residu alkali dari pulp

7	Perancis	Agrifurance S.A.	10.000	Tongkol jagung
		Schwedtsche		
8	Jerman	Zellstoff A.G.	200	Sulfit, residu alkali
9	Spanyol	Furfural Espan S.A.	6.500	Almond
10	Hongaria	Pet Nitrogen	2.000	Tongkol jagung
11	Polandia	Prowerk Group	5.000	Tongkol jagung
		State owned		
12	Slovenia	company	1.500	Ekstraksi kayu chestnut
13	Kenya	Kenya Furfural Ltd	5.000	Tongkol jagung
	Afrika			
14	Selatan	Smithchem Ltd	17.000	<i>Bagasse</i>
		Agrifurance		
		Industries / Rayco		
		BioRefinery Pvt.		<i>Bagasse, tongkol</i>
15	India	Ltd.	6.000 / 11.000	jagung, sekam padi
16	China	–	50.000	Tongkol jagung
17	Turki	Culcovar	2.000	–
		Capum S.R.L / ICL		
18	Italia	S.p.A.	6.000	Sekam padi
19	Australia	Pinehill Sugar	5.000	<i>Bagasse</i>

Berbeda dengan kondisi tersebut, Indonesia hingga saat ini belum memiliki pabrik furfural komersial yang beroperasi secara khusus, meskipun ketersediaan bahan baku berbasis biomassa sangat melimpah, khususnya dari limbah industri kelapa sawit yang mencapai lebih dari 54 juta ton per tahun. Kebutuhan furfural dalam negeri masih sepenuhnya dipenuhi melalui impor, dengan volume yang relatif terbatas dan fluktuatif, mencerminkan bahwa pasar furfural di Indonesia masih berada pada tahap awal perkembangan.

Berdasarkan pertimbangan kondisi tersebut, tujuan utama pendirian pabrik furfural dalam perancangan ini adalah sebagai upaya substitusi impor sekaligus memanfaatkan peluang pasar ekspor regional. Analisis potensi pasar menunjukkan bahwa negara-negara di kawasan Asia,

khususnya Jepang, Korea Selatan, Malaysia, dan Vietnam, merupakan pasar potensial yang belum terlayani secara optimal.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, kapasitas produksi pabrik furfural ditetapkan sebesar 5.000 ton per tahun. Kapasitas ini dinilai optimal karena kebutuhan bahan baku TKKS hanya 35.200 ton/tahun atau kurang dari 0,065% dari ketersediaan nasional dan berada dalam kisaran kapasitas komersial proven teknologi (5.000-11.000 ton/tahun).

Adapun industri-industri di Indonesia yang berpotensi menggunakan furfural meliputi industri resin dan bahan kimia berbasis furan, industri farmasi dan kimia antara, industri pemurnian minyak pelumas yang memanfaatkan furfural sebagai pelarut selektif, serta industri pestisida dan bahan kimia pertanian. Selain itu, furfural juga berpotensi digunakan sebagai bahan baku pendukung dalam pengembangan biofuel, biopolimer, dan produk kimia berbasis biomassa yang sejalan dengan arah pengembangan industri hijau dan ekonomi sirkular di Indonesia. Berikut pada Tabel 1.8. daftar konsumen untuk pabrik furfural di Indonesia. Dengan adanya pabrik furfural domestik, diharapkan industri-industri tersebut dapat memperoleh bahan baku secara lebih mudah, stabil, dan kompetitif, sekaligus mendorong tumbuhnya rantai nilai industri kimia berbasis sumber daya lokal.

Tabel 1.8. Daftar konsumen untuk pabrik furfural di Indonesia (Kementerian Perindustrian RI., 2023).

No	Nama Perusahaan	Jenis Industri	Lokasi Pabrik / Operasi
1	PT Pertamina	Pengolahan minyak dan gas bumi	Cilacap, Balongan, Balikpapan
2	PT Wiraswasta Gemilang Indonesia	Pengolahan oli bekas	Bekasi
3	PT Mustika Makmur Petroleum Industry	Pengolahan minyak diesel	Tangerang
4	PT Nusaraya Putra Mandiri	Pengolahan minyak pelumas	Cilegon
5	PT Pasific Paint	Produksi cat dan tinta	Jakarta Utara

6	PT Karet Deli	Produksi ban	Medan
7	PT Kitachem Ekasedjati	Produksi zat perekat	Jakarta
8	PT Indagro INC	Produksi herbisida	Bogor
	PT Paint Manufacturer		
9	Pasific	Produksi cat dan tinta	Jakarta
10	PT Arianto Darmawan	Produksi <i>lubricating oil</i>	Jakarta
		Produksi alkyd resin,	
11	PT Pardic Jaya Chemicals	molding resin, coating resin	Jakarta
	PT Indonesia Pine	Produksi rosin ester & resin	
	Chemical Industri	(adhesive, tinta, marka	Gresik, Jawa
12	(INDOPICRI)	jalan)	Timur
			Jakarta &
		Produksi Unsaturated	cabang di 5
13	PT Justus Kimiaraya	Polyester Resin (UPR)	kota
	PT Tunas Sumber		
	Ideakreasi Kimia (Tunas		
14	Resin)	Produksi <i>synthetic resin</i>	Jakarta
		Produksi resin alkyd,	
		amino, acrylic, dan	Cikande,
15	PT Citra Resins Industries	modifikasi	Serang, Banten
			Jakarta,
			Surabaya,
16	PT Hade Sejati Pratama	Distributor epoxy resin	Semarang

1.3 Pemilihan Lokasi Pabrik

Penentuan lokasi pabrik merupakan salah satu tahapan penting dalam perancangan pabrik kimia karena berpengaruh langsung terhadap kelangsungan operasi pabrik, baik dari segi teknis maupun ekonomis. Lokasi yang tepat dapat menjamin ketersediaan bahan baku secara berkelanjutan, mempermudah distribusi produk, menekan biaya transportasi, serta mendukung

efisiensi operasional pabrik. Oleh karena itu, dalam penentuan lokasi pabrik furfural perlu dilakukan kajian menyeluruh terhadap beberapa faktor utama, antara lain ketersediaan bahan baku, kedekatan dengan pasar, akses transportasi, serta ketersediaan lahan industri yang memadai.

Pada pra-rancangan pabrik ini, bahan baku utama yang digunakan adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS), yang merupakan limbah padat dari industri kelapa sawit. Indonesia sebagai negara penghasil kelapa sawit terbesar di dunia memiliki potensi TKKS yang sangat melimpah dan tersebar di berbagai wilayah. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2024, produksi kelapa sawit terbesar berada di wilayah Sumatera dan Kalimantan, sehingga kedua wilayah tersebut memiliki potensi bahan baku TKKS yang paling besar untuk mendukung pendirian pabrik furfural secara berkelanjutan.

Faktor ketersediaan lahan industri juga menjadi pertimbangan penting dalam penentuan lokasi pabrik. Lahan yang dimaksud merupakan kawasan industri atau kawasan peruntukan industri yang secara tata ruang diperbolehkan untuk pendirian pabrik, sehingga mampu mendukung pembangunan dan pengoperasian pabrik dalam jangka panjang. Oleh karena itu, dilakukan perbandingan antara potensi bahan baku TKKS dan luas wilayah industri yang tersedia di masing-masing wilayah Indonesia untuk menentukan lokasi yang paling optimal. Hasil perbandingan tersebut disajikan dalam bentuk tabel 1.9. berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2024 untuk memberikan gambaran kuantitatif mengenai potensi masing-masing wilayah sebagai lokasi pendirian pabrik furfural.

Tabel 1.9. Luas Lahan Menurut Wilayah Pulau Tahun 2024 (BPS, 2024)

No.	Wilayah	Luas Lahan Panen (Ha)
1	Sumatera	8.778.610
2	Jawa	33.710
3	Kalimantan	6.515.060
4	Sulawesi	425.900
5	Papua dan Maluku	251.820

Data produksi kelapa sawit berdasarkan wilayah pulau di Indonesia pada tahun 2024 dapat dilihat pada tabel 1.10. berikut:

Tabel 1. 10. Produksi Kelapa Sawit Menurut Wilayah Pulau Tahun 2024 (BPS, 2024)

No.	Wilayah	Ton/Tahun
1	Sumatera	21.803.831,37
2	Jawa	78.260
3	Kalimantan	19.818.500
4	Sulawesi	1.073.530
5	Papua dan Maluku	760.690

Berdasarkan data serta faktor primer di atas, dapat dipertimbangkan beberapa alternatif dalam pemilihan lokasi pabrik furfural yang akan didirikan. Dalam menghitung potensi ketersediaan TKKS per wilayah, digunakan rasio konversi yang konsisten dengan sub-bab 1.2.2, yaitu setiap 1 ton CPO yang diproduksi menghasilkan sekitar 1,15 ton TKKS (Stichnothe, 2011). Hal ini didasarkan pada asumsi bahwa setiap 1 ton CPO memerlukan 5 ton tandan buah segar (TBS), dan dari setiap 1 ton TBS dihasilkan sekitar 0,23 ton TKKS. Dengan menggunakan data produksi CPO per wilayah pada Tabel 1.10, potensi TKKS masing-masing wilayah dihitung sebagai berikut:

Pulau Sumatera = 21.803.831,37 ton/tahun, maka:

$$\begin{aligned}
 & 21.803.831,37 \text{ ton CPO} \times 1,15 \\
 & = 25.074.406,08 \text{ ton TKKS/tahun}
 \end{aligned}$$

Menggunakan perbandingan untuk mencari besarnya bahan baku yang dibutuhkan, dapat dilihat pada tabel 1.11.

Tabel 1.11. Perbandingan Perhitungan Bahan Baku dan Luas Wilayah (BPS, 2024)

No.	Wilayah	Bahan Baku (ton/tahun)	Indikator		
			Lokasi Pasar	Transportasi	Luas Wilayah
1	Sumatera	25.074.406,08	Kuala Tanjung Industrial Estate	Tersedia pengangkutan baik dari darat, udara, dan laut	5.084 Ha
2	Jawa	89.999	Gresik, Jawa Timur	Kawasan yang merupakan lalu lintas perdagangan,	5.450 Ha

No.	Wilayah	Bahan Baku (ton/tahun)	Indikator		
			Lokasi Pasar	Transportasi	Luas Wilayah
				memudahkan untuk distribusi ke berbagai pulau	
				Tersedia	
3	Kalimantan	22.791.275,00	Kawasan Industri Berau	pengangkutan darat dan laut, tetapi belum memiliki transportasi udara	3.400 Ha
				Tersedia transportasi	
4	Sulawesi	1.234.559,50	Kawasan Industri Morowali	darat dan laut, namun distribusi antarwilayah masih terbatas	30 Ha
				Transportasi laut	
5	Papua dan Maluku	874.793,50	Kawasan Industri Sorong	tersedia, namun infrastruktur darat dan udara masih terbatas	1 Ha

Potensi TKKS dihitung menggunakan rasio 1 ton CPO = 1,15 ton TKKS (Stichnothe, 2011), konsisten dengan perhitungan kebutuhan bahan baku pada sub-bab 1.2.2. Berdasarkan data pada Tabel 1.9, 1.10, dan 1.11, lokasi pendirian pabrik furfural dipilih di Kawasan Industri Kuala Tanjung, Kabupaten Batu Bara, Provinsi Sumatera Utara, dengan mempertimbangkan sepuluh faktor utama berikut:

1. Sumber Bahan Baku

Salah satu factor pemilihan lokasi mempertimbangkan bahan baku dan produk yang dihasilkan. Menurut Weber, proses produksi dapat diklasifikasikan ke dalam dua kategori, yaitu weight gain dan weight loss. Weight gain terjadi apabila berat produk akhir lebih besar dibandingkan berat bahan baku, sehingga pabrik lebih menguntungkan bila didirikan dekat

dengan pasar untuk mengurangi biaya distribusi produk. Sebaliknya, *weight loss* terjadi apabila berat produk akhir lebih kecil dibandingkan berat bahan baku, sehingga pabrik lebih efisien bila didirikan dekat dengan sumber bahan baku guna meminimalkan biaya transportasi bahan baku dalam jumlah besar. Proses produksi furfural dari TKKS termasuk dalam kategori *weight loss*. Hal ini didasarkan pada perhitungan kebutuhan bahan baku yang telah dilakukan pada sub-bab 1.2.2, pabrik furfural lebih tepat dan lebih efisien didirikan di dekat sumber bahan baku TKKS, yaitu di kawasan yang memiliki industri kelapa sawit yang berkembang pesat. Lokasi pendirian pabrik furfural dipilih di Kawasan Industri Kuala Tanjung, Kabupaten Batu Bara, Provinsi Sumatera Utara, karena memiliki kedekatan dengan sumber bahan baku utama berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Provinsi Sumatera Utara merupakan salah satu wilayah penghasil kelapa sawit terbesar di Indonesia dengan banyaknya pabrik kelapa sawit (PKS) yang tersebar di berbagai kabupaten, seperti Asahan, Labuhan Batu, Serdang Bedagai, dan Simalungun. Tingginya produksi kelapa sawit di wilayah tersebut berbanding lurus dengan jumlah limbah TKKS yang dihasilkan.

Berdasarkan hasil perhitungan dari data produksi kelapa sawit yang bersumber dari Badan Pusat Statistik (BPS), total potensi tandan kosong kelapa sawit (TKKS) di wilayah Sumatera Utara mencapai 9.577.658,501 ton/tahun. Jumlah tersebut dinilai sangat mencukupi untuk memenuhi kebutuhan bahan baku dalam perancangan pabrik furfural. Kedekatan lokasi pabrik dengan sumber TKKS diharapkan dapat menekan biaya transportasi bahan baku serta menjamin kontinuitas pasokan dalam jangka panjang. Selain itu, bahan penunjang berupa katalis asam sulfat dapat diperoleh dari pemasok bahan kimia industri dalam negeri sehingga tidak menjadi kendala dalam operasional pabrik.

2. Letak Pasar

Produksi furfural dari pabrik ini direncanakan untuk memenuhi kebutuhan furfural dalam negeri dan dilakukan kegiatan ekspor ke negara lain. Furfural merupakan bahan kimia antara (*intermediate*) yang banyak digunakan pada industri resin, bahan kimia lanjutan, pelarut, serta industri farmasi dan petrokimia. Untuk pasar dalam negeri, produk furfural akan didistribusikan terutama ke industri kimia dan manufaktur di wilayah Sumatera dan Pulau Jawa, yang merupakan pusat kegiatan industri nasional. Di wilayah Sumatera Utara dan sekitarnya, furfural berpotensi dimanfaatkan oleh beberapa industri strategis seperti PT. Wilmar Group sebagai perusahaan agribisnis kelapa sawit terbesar yang dapat menggunakan

furfural dalam proses *refining* minyak sawit, produksi biodiesel, dan ekstraksi produk sampingan bernilai tinggi serta PT. PLN (Persero) untuk aplikasi *cooling tower treatment*, *boiler water treatment*, dan *refining* minyak trafo pada berbagai aset pembangkit listrik dan sistem transmisi distribusi di Sumatera dan seluruh Indonesia. Selain itu, distribusi juga mencakup industri pengolahan karet, resin, dan bahan kimia di kawasan Medan, Asahan, serta Sumatera bagian selatan. Untuk skala nasional, furfural berpotensi digunakan oleh PT. Pertamina (Persero) sebagai perusahaan energi dan petrokimia nasional untuk proses *refining* minyak bumi dalam ekstraksi selektif senyawa aromatik dan peningkatan kualitas produk petroleum, serta oleh industri resin, pelapis (*coating*), farmasi, dan manufaktur bahan kimia yang berlokasi di kawasan industri Cilegon, Gresik, Tuban, Jakarta, Bandung, dan Semarang. Untuk pasar ekspor, keberadaan Pelabuhan Kuala Tanjung sebagai pelabuhan internasional memberikan akses langsung ke pasar Asia Tenggara, Jepang, dan Korea yang merupakan konsumen furfural terbesar di dunia.

3. Transportasi

Kawasan Industri Kuala Tanjung, seperti yang dilihat pada Gambar 1.2. didukung oleh sistem transportasi yang memadai, baik dari segi transportasi darat maupun laut. Akses jalan raya yang menghubungkan kawasan industri dengan sentra perkebunan kelapa sawit di Sumatera Utara mempermudah pengangkutan bahan baku TKKS ke lokasi pabrik. Selain itu, keberadaan Pelabuhan Kuala Tanjung memberikan kemudahan dalam pengiriman produk jadi maupun penerimaan bahan penunjang melalui jalur laut. Dukungan infrastruktur transportasi yang baik ini diharapkan dapat menekan biaya logistik dan meningkatkan efisiensi distribusi bahan baku serta produk. Tersedianya jalur transportasi darat dan laut yang terintegrasi, Kawasan Industri Kuala Tanjung dinilai memenuhi syarat sebagai lokasi pendirian pabrik furfural dari segi aspek transportasi.

4. Kebutuhan *Supplier*

Proses produksi furfural juga memerlukan bahan penunjang, antara lain katalis asam sulfat, bahan kimia pendukung, serta material utilitas. Pemilihan lokasi pabrik di Kawasan Industri Kuala Tanjung dinilai menguntungkan karena berada di kawasan industri yang telah berkembang, sehingga memudahkan akses terhadap pemasok bahan kimia industri dalam negeri. Kebutuhan bahan penunjang dapat dipenuhi melalui jaringan distribusi bahan kimia

yang telah tersedia di wilayah Sumatera maupun dari pusat industri kimia di Pulau Jawa dengan dukungan transportasi laut melalui Pelabuhan Kuala Tanjung.

5. Kebutuhan Energi

Kebutuhan energi pabrik meliputi energi listrik dan energi panas yang digunakan dalam proses produksi furfural, seperti pada tahap reaksi, pemisahan, dan utilitas pendukung. Kawasan Industri Kuala Tanjung memiliki akses terhadap jaringan listrik nasional yang dikelola oleh PT PLN (Persero), sehingga pasokan energi listrik dinilai mencukupi dan stabil untuk mendukung operasional pabrik. Selain itu, kebutuhan energi panas dapat dipenuhi melalui penggunaan boiler dengan bahan bakar yang tersedia secara komersial, sehingga tidak menjadi kendala dalam perancangan dan pengoperasian pabrik.

6. Ketersediaan Utilitas dan Air

Ketersediaan utilitas dan air merupakan faktor penting dalam penentuan lokasi pabrik karena air dibutuhkan dalam jumlah cukup besar untuk proses produksi, pendinginan, dan keperluan utilitas lainnya. Kawasan Industri Kuala Tanjung memiliki ketersediaan sumber air industri yang memadai, baik dari sistem penyediaan kawasan industri maupun sumber air permukaan yang dikelola sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Selain itu, fasilitas utilitas pendukung seperti sistem pengolahan air, pengolahan limbah, serta sarana pendukung lainnya telah tersedia di kawasan industri, sehingga mendukung kelancaran operasional pabrik furfural.

7. Perluasan Pabrik

Pemilihan lokasi pabrik di Kawasan Industri Kuala Tanjung juga mempertimbangkan kemungkinan perluasan pabrik di masa mendatang. Kawasan industri ini masih memiliki ketersediaan lahan yang relatif luas dan direncanakan untuk pengembangan industri jangka panjang. Dengan adanya ketersediaan lahan tersebut, pabrik furfural memiliki peluang untuk meningkatkan kapasitas produksi atau mengembangkan produk turunan furfural tanpa mengalami kendala keterbatasan lahan. Faktor ini menjadi salah satu keunggulan lokasi pabrik dalam mendukung keberlanjutan dan pengembangan usaha di masa depan.

8. Kebutuhan Tenaga Kerja

Kebutuhan tenaga kerja dalam perancangan pabrik furfural mencakup tenaga kerja produksi, operator, teknisi, serta staf pendukung administratif dan manajemen. Untuk mengestimasi tingkat upah tenaga kerja lokal, digunakan data upah minimum setempat sebagai acuan dasar. Berdasarkan keputusan Pemerintah Provinsi Sumatera Utara, Upah Minimum

Provinsi (UMP) Sumatera Utara tahun 2026 ditetapkan sebesar \pm Rp 3.228.949 per bulan, sebagaimana diatur dalam formula perhitungan UMP PP No. 49 tahun 2025. Di tingkat kabupaten, misalnya di Kabupaten Batu Bara yang menjadi lokasi Kawasan Industri Kuala Tanjung, yaitu Upah Minimum Kabupaten/Kota (UMK) 2025 ditetapkan sekitar Rp 3.676.000 per bulan.

9. Regulasi Pemerintah

Pemilihan lokasi pabrik di Kawasan Industri Kuala Tanjung mempertimbangkan aspek regulasi pemerintah yang berlaku baik di tingkat nasional maupun daerah. Secara nasional, kawasan ini ditetapkan sebagai bagian dari proyek pengembangan kawasan industri dan pelabuhan yang diatur oleh pemerintah pusat melalui Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 26 Tahun 2012 tentang Penetapan Lokasi Pelabuhan Kuala Tanjung sebagai Kawasan Pelabuhan dan Industri yang mendukung pembangunan pelabuhan dan kawasan industri di Sumatera Utara.

Pelaksanaan pengembangan kawasan industri dan pembinaan kegiatan industri di wilayah Sumatera Utara diatur melalui Peraturan Gubernur Sumatera Utara Nomor 7 Tahun 2023 tentang Tata Cara Pembinaan, Pengawasan, Monitoring, dan Evaluasi terhadap Pelaksanaan Rencana Pembangunan Industri di Provinsi Sumatera Utara sebagai bagian dari upaya pengelolaan dan pengembangan sektor industri.

10. Iklim

Kawasan Industri Kuala Tanjung dan seluruh wilayah Sumatera Utara beriklim tropis dengan suhu rata-rata berkisar antara 25–32°C sepanjang tahun dan kelembaban udara yang relatif tinggi. Kondisi iklim tropis ini tidak memerlukan biaya tambahan untuk konstruksi pelindung peralatan dari cuaca ekstrem seperti yang dibutuhkan di iklim dingin. Meskipun curah hujan yang tinggi di wilayah tropis perlu diperhatikan dalam desain sistem drainase kawasan pabrik, secara keseluruhan kondisi iklim di Kawasan Industri Kuala Tanjung dinilai tidak menjadi hambatan yang signifikan terhadap operasional pabrik furfural.

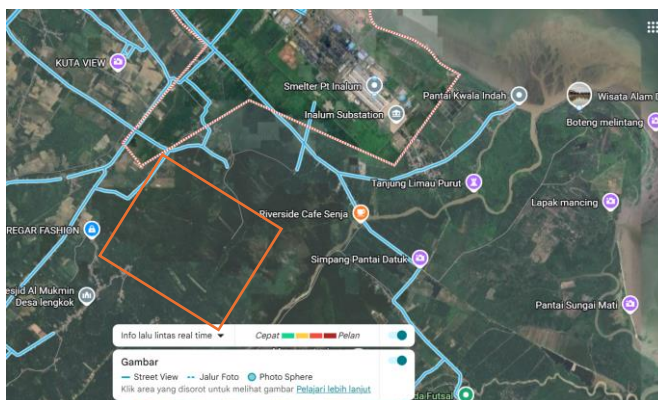
11. Proteksi Banjir dan Kebakaran

Kawasan Industri Kuala Tanjung berada di wilayah dataran rendah pesisir Sumatera Utara yang memiliki sistem drainase kawasan yang terencana sebagai bagian dari pengembangan kawasan industri terpadu. Kawasan ini dirancang dengan mempertimbangkan mitigasi risiko banjir melalui penataan infrastruktur kawasan yang memadai. Dari sisi proteksi kebakaran,

sebagai kawasan industri yang telah berkembang, Kawasan Industri Kuala Tanjung dilengkapi dengan fasilitas proteksi kebakaran internal kawasan, serta didukung oleh layanan pemadam kebakaran di Kabupaten Batu Bara. Ketersediaan fasilitas proteksi ini dinilai memadai untuk mendukung operasional pabrik furfural yang menggunakan bahan-bahan yang bersifat mudah terbakar.

12. Keadaan Masyarakat Sekitar

Keadaan masyarakat sekitar juga menjadi salah satu pertimbangan dalam penentuan lokasi pabrik. Kawasan Industri Kuala Tanjung berada di wilayah yang telah dikembangkan sebagai kawasan industri, sehingga aktivitas industri bukan merupakan hal baru bagi masyarakat setempat. Hal ini diharapkan dapat meminimalkan potensi konflik sosial akibat pendirian pabrik.



Gambar 1.2. Rencana Lokasi Pendirian Pabrik Furfural di Kawasan Industri Kuala Tanjung (Google Maps, 2022)

1.4 Tinjauan Proses

Dalam perancangan suatu pabrik kimia, pemilihan proses produksi merupakan tahap awal yang sangat penting karena akan mempengaruhi keseluruhan desain pabrik, baik dari segi teknis maupun ekonomis. Proses produksi yang dipilih harus mampu menghasilkan produk dengan kualitas dan kuantitas yang diinginkan, memiliki tingkat konversi yang tinggi, efisiensi energi yang baik, serta biaya operasi yang relatif rendah. Oleh karena itu, diperlukan suatu tinjauan proses untuk menganalisis dan membandingkan berbagai alternatif proses yang tersedia sebelum ditetapkan proses yang paling sesuai untuk digunakan dalam pra-rancangan pabrik.

1.4.1 Macam-Macam Proses Pembuatan Furfural

A. Proses *Quaker Oats*

Proses Quaker Oats merupakan salah satu proses komersial tertua untuk produksi furfural yang dikembangkan oleh Quaker Oats Company di Amerika Serikat pada tahun 1920-an. Proses ini menggunakan sistem batch (curah) yang sederhana namun efektif untuk mengkonversi biomassa menjadi furfural. Proses ini menggunakan reaktor batch bertekanan dengan bahan baku berupa tongkol jagung, sekam gandum, atau biomassa lignoselulosa lainnya. Biomassa dicampur dengan asam sulfat encer (4-6% berat) dan air dengan perbandingan solid-liquid sekitar 1:3. Campuran dipanaskan menggunakan steam hingga mencapai suhu 150-160°C dan tekanan 5-6 atm selama 4-6 jam (Sadipu et al., 2023).

Reaksi yang terjadi adalah hidrolisis pentosan menjadi pentosa, yang kemudian mengalami dehidrasi membentuk furfural. Furfural yang terbentuk akan menguap bersama steam dan dipisahkan melalui distilasi. Uap yang mengandung furfural kemudian dikondensasi dan dipisahkan dari air menggunakan dekanter atau separator.

B. Proses *Rosenlew*

Proses Rosenlew dikembangkan di Finlandia pada tahun 1950-an sebagai perbaikan dari proses batch konvensional. Proses ini merupakan salah satu sistem kontinu pertama yang berhasil dikomersialkan untuk produksi furfural. Proses Rosenlew menggunakan reaktor kontinu tipe *rotating drum* atau *screw conveyor reactor*. Bahan baku biomassa yang telah dihancurkan diumpungkan secara kontinu ke dalam reaktor bersama dengan larutan asam sulfat encer dan steam. Reaktor berputar atau menggunakan screw untuk menggerakkan biomassa sepanjang zona reaksi (Silva et al., 2017).

Zona reaksi dibagi menjadi beberapa tahap dengan temperatur yang meningkat bertahap dari 140°C hingga 170°C. Hal ini memungkinkan hidrolisis pentosan yang optimal pada tahap awal (temperatur lebih rendah) dan dehidrasi pentosa menjadi furfural pada tahap akhir (temperatur lebih tinggi). Furfural yang terbentuk segera diuapkan dan dipisahkan untuk mencegah degradasi.

C. Proses *Escher-Wyss*

Proses *Escher-Wyss* dikembangkan di Swiss pada tahun 1960-an dengan fokus pada peningkatan yield dan efisiensi energi. Proses ini menggunakan konsep perkolasi dan recycle asam yang intensif. Sistem ini menggunakan reaktor perkolasi bertingkat di mana larutan asam sulfat panas dialirkan melalui bed biomassa secara berulang

(recirculation). Biomassa ditempatkan dalam kolom perkolasi, dan larutan asam panas dipompa dari bawah ke atas melewati bed biomassa.

Proses berlangsung pada temperatur 160-175°C dengan sistem recycle yang memungkinkan pemanfaatan kembali asam sulfat. Furfural yang terbentuk dibawa keluar oleh aliran asam dan segera dipisahkan melalui flash evaporation untuk meminimalkan degradasi. Asam yang telah dipisahkan dari furfural kemudian didaur ulang kembali ke reactor (Nhien et al., 2021).

D. Proses *Suprayield*

Proses SupraYield® dikembangkan oleh Arnold dan Buzzard pada akhir 1990-an hingga awal 2000-an sebagai teknologi produksi furfural dengan yield tinggi melalui pengurangan waktu tinggal (residence time) furfural dalam fase cair. Teknologi ini didasarkan pada prinsip bahwa sebagian besar kehilangan yield terjadi akibat reaksi kondensasi dan polimerisasi furfural selama masih berada dalam media reaksi yang bersifat asam dan bersuhu tinggi.

Pada proses ini, biomassa lignoselulosa yang telah dicampur dengan katalis asam dimasukkan ke dalam reaktor fixed-bed bertekanan tinggi dan dipanaskan hingga temperatur sekitar 200–235°C pada tekanan 15–30 bar. Pada kondisi tersebut terjadi hidrolisis hemiselulosa menjadi pentosa yang kemudian mengalami dehidrasi membentuk furfural.

Berbeda dengan proses konvensional yang menggunakan steam stripping, pemisahan furfural pada proses SupraYield® dilakukan melalui mekanisme adiabatic flash distillation. Setelah reaksi berlangsung selama beberapa menit, tekanan reaktor diturunkan secara bertahap (gradual depressurisation). Penurunan tekanan menyebabkan cairan yang terserap di dalam pori-pori biomassa mengalami flash boiling sehingga furfural yang terbentuk segera berpindah ke fase uap dan keluar dari zona reaksi.

Pengeluaran furfural secara cepat dari media reaksi mengurangi peluang terjadinya reaksi samping berupa kondensasi furfural dengan pentosa maupun polimerisasi furfural menjadi resin, sehingga yield dapat ditingkatkan secara signifikan. Uap yang keluar dari reaktor kemudian dikondensasikan untuk memperoleh campuran furfural dan air yang selanjutnya dimurnikan hingga mencapai spesifikasi produk yang diinginkan. Residu

padat yang tersisa, yang sebagian besar terdiri atas lignin dan selulosa, dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler atau bahan baku produk lain.

E. Proses Berbasis Katalis

Dalam dekade terakhir (2010-2025), riset intensif dilakukan untuk mengembangkan proses produksi furfural menggunakan katalis heterogen padat sebagai pengganti asam sulfat homogen. Tujuan utamanya adalah mengurangi masalah korosi, memudahkan pemisahan katalis, dan meningkatkan sustainability proses.

Proses ini menggantikan asam sulfat cair dengan katalis padat (heterogen) yang memiliki situs asam pada permukaannya. Katalis yang umum digunakan antara lain zeolite (H-ZSM-5, H-Beta), karbon tersulfonasi, resin asam padat (Amberlyst), dan metal oksida (Al_2O_3 , ZrO_2). Biomassa lignoselulosa yang telah dihancurkan dicampur dengan air dan diumpukan ke reaktor yang berisi katalis padat. Reaktor yang digunakan dapat berupa fixed bed reactor (katalis dikemas dalam kolom), fluidized bed reactor (katalis tersuspensi oleh aliran), atau slurry reactor (katalis powder dicampur dengan biomassa) (Suminar et al., 2023).

F. Proses *Biphasic System*

Proses biphasic system dikembangkan pada awal tahun 2010-an sebagai strategi untuk meningkatkan yield furfural melalui konsep in-situ extraction. Pendekatan ini didasarkan pada pemahaman bahwa furfural yang terbentuk dalam fase aqueous asam sangat rentan terhadap degradasi menjadi resin dan tar jika terpapar terlalu lama pada kondisi reaksi. Dengan mengekstrak furfural segera setelah terbentuk ke fase organik yang lebih aman, degradasi dapat diminimalkan dan yield ditingkatkan secara signifikan.

Proses biphasic menggunakan reaktor yang berisi dua fase liquid yang tidak bercampur (*immiscible*). Fase bawah adalah fase aqueous yang terdiri dari air, asam sulfat encer (3-5%), dan biomassa lignoselulosa tempat reaksi hidrolisis dan dehidrasi berlangsung. Fase atas adalah fase organik yang terdiri dari solvent seperti toluene, methyl isobutyl ketone (MIBK), atau 2-butanol yang berfungsi sebagai media ekstraksi. Reaktor dioperasikan pada temperatur 150-180°C dan tekanan 8-12 atm dengan agitasi yang cukup untuk memastikan kontak baik antara kedua fase namun tidak terlalu kuat sehingga membentuk emulsi permanen (Lamprey et al., 2019).

1.4.2 Pemilihan Proses

Menurut Arnold & Buzzard (2003), terdapat beberapa jenis proses produksi. Dapat dilihat pada tabel 1.12. berikut perbandingan jenis proses produksi furfural:

Tabel 1.12. Perbandingan proses produksi furfural (Arnold & Buzzard, 2003)

Parameter	Quaker Oats	Rosenlew	Escher-Wyss	Suprayield	Heterogen Catalyst	Biphasic
Tipe operasi	Batch	Continuous	Semi-Continuous	Continuous	Batch /Continuous	Batch /Semi-Continuous
Suhu (C)	150-160	140-170	160-175	200-210	140-180	150-180
Pressure (atm)	5-6	6-8	7-9	15-20	5-12	8-12
Residence Time	4-6 jam	1.5-2.5 jam	1-1.5 jam	30-60 menit	2-4 jam	1-2 jam
Yield (%)	60-65	70-75	80-85	85-92	60-75	78-88
Konversi Pentosan	60-70%	75-80%	80-85%	85-92%	70-80%	75-85%

Prarancangan ini juga diintegrasikan menggunakan teknologi *Extractive Dividing Wall Column* (EDWC). Teknologi EDWC dipilih karena mampu menggabungkan proses ekstraktif dan pemisahan distilasi dalam satu kolom sehingga konsumsi energi dan jumlah peralatan dapat dikurangi dibandingkan sistem distilasi konvensional bertingkat. Penggunaan *dividing wall* memungkinkan pemisahan berlangsung lebih efisien dengan kehilangan panas yang lebih rendah serta meningkatkan kemurnian produk furfural yang dihasilkan. Integrasi EDWC pada proses pemurnian furfural dinilai sesuai untuk kapasitas industri menengah karena memberikan efisiensi operasional yang lebih baik dan biaya utilitas yang lebih rendah.

Dari bermacam-macam proses produksi furfural seperti yang telah diuraikan di atas, maka dipilih proses *supra yield* dengan pertimbangan:

- 1) Konversi furfural dari pentosan tinggi.
- 2) Teknologi ini mempunyai tingkat konsumsi *steam* yang lebih rendah dibandingkan yang lainnya.

- 3) Waktu tinggal cepat.
- 4) Tidak memiliki produk samping.
- 5) Mampu menghemat energi lebih besar.
- 6) Persentase kehilangan produk kecil.
- 7) Yield furfural paling tinggi (85-92%) dibandingkan proses lainnya.
- 8) Kualitas produk superior dengan kemurnian di atas 95%.
- 9) Efisiensi penggunaan bahan baku yang telah terbukti (2,8–7,5 ton biomassa/ton furfural tergantung jenis bahan baku), dengan kebutuhan spesifik untuk TKKS sebesar 7,04 ton TKKS/ton furfural berdasarkan kandungan xilan 25%.
- 10) *Proven technology* untuk kapasitas 5.000-25.000 ton/tahun, sehingga sangat sesuai untuk kapasitas rancangan 5.000 ton/tahun.
- 11) Operasi kontinu meningkatkan produktivitas dan mengurangi *downtime*.

1.4.3 Kegunaan Furfural

Furfural merupakan senyawa organik yang memiliki banyak aplikasi dalam berbagai industri. Sebagai senyawa furan tersubstitusi yang paling penting secara komersial, furfural berfungsi baik sebagai pelarut maupun sebagai bahan baku (*intermediate*) untuk sintesis berbagai produk kimia bernilai tinggi (Vindianalasar et al., 2025). Berikut adalah kegunaan utama furfural dalam berbagai sektor industri:

1) Industri Perminyakan dan Petrokimia

Furfural berfungsi sebagai pelarut selektif terhadap senyawa-senyawa aromatik, olefin, dan sulfur dalam minyak bumi. Dalam proses pemurnian minyak bumi (*petroleum refining*), furfural digunakan untuk mengekstrak senyawa aromatik dari fraksi minyak pelumas (*lubricating oil*) dan minyak diesel. Proses ekstraksi dengan furfural dapat meningkatkan indeks viskositas minyak pelumas dan menghasilkan produk dengan kualitas yang lebih baik (Setyadi, 2007).

2) Industri Kimia

Furfural merupakan bahan baku utama untuk produksi furfuryl alcohol melalui reaksi hidrogenasi katalitik. Furfuryl alcohol adalah senyawa kimia penting yang digunakan dalam pembuatan resin furan, yang memiliki ketahanan kimia dan termal yang sangat baik. Resin furan banyak diaplikasikan dalam industri *foundry* (pengeroran logam) sebagai pengikat pasir

cetak (*sand binder*), serta dalam pembuatan lapisan anti korosi untuk tangki penyimpanan dan pipa industri kimia (Mualim & Permana, 2022).

3) Industri Resin dan Polimer

Menurut Suprianto *et al.* (2017), furfuryl alcohol yang diproduksi dari furfural dapat dipolimerisasi menjadi resin furan yang memiliki sifat mekanik, kimia, dan termal yang sangat baik. Resin furan digunakan dalam berbagai aplikasi:

- *Foundry industry*

Sebagai pengikat (*binder*) untuk pasir cetak dalam pengecoran logam. Resin furan memberikan kekuatan tinggi pada cetakan pasir dan dapat menahan temperatur tinggi saat logam cair dituangkan.

- *Coating* dan laminasi

Sebagai material pelapis (*coating*) untuk tangki penyimpanan, pipa, dan peralatan yang terekspos bahan kimia korosif. Resin furan memiliki ketahanan kimia yang sangat baik terhadap asam, basa, dan pelarut organik.

- Komposit

Sebagai matriks dalam material komposit fiber-reinforced yang digunakan dalam aplikasi otomotif, aerospace, dan konstruksi.

4) Industri Cat, Pelapis, dan *Coating*

Menurut Desrianty & Yani (2023), furfural merupakan pelarut yang baik untuk berbagai bahan pelapis cat, zat warna, nitrocellulose, dan cellulose acetate. Sifat polaritas furfural yang unik memungkinkannya melarutkan berbagai resin dan polimer yang sulit dilarutkan oleh pelarut konvensional. Dalam industri cat dan *coating*, furfural digunakan untuk:

- Melarutkan resin alkyd dan resin *epoxy*.
- Sebagai pelarut untuk cat nitrocellulose yang digunakan pada finishing kayu dan logam.
- Meningkatkan adhesi dan durabilitas lapisan *coating*.
- Sebagai komponen dalam formulasi cat industri yang memerlukan ketahanan kimia tinggi.

5) Industri Farmasi

Menurut Rahmawati *et al.* (2014), furfural dan turunannya digunakan sebagai building blocks dalam sintesis berbagai senyawa farmasi aktif. Beberapa aplikasi meliputi:

- Antibiotik

Nitrofuran derivatives seperti nitrofurantoin dan furazolidone adalah antibiotik yang disintesis dari furfural.

- Antiparasit

Nifurtimox (obat untuk penyakit Chagas) menggunakan furfural sebagai precursor.

- Vitamin C

Furfural merupakan salah satu intermediate dalam jalur sintesis alternatif vitamin C (asam askorbat).

- Obat antiinflamasi

Beberapa senyawa antiinflamasi non-steroid menggunakan turunan furan dalam strukturnya.