

BAB II

DESKRIPSI PROSES

2.1 Spesifikasi Bahan Baku dan Produk

2.1.1 Bahan Baku

a. Tandan Kosong Kelapa Sawit

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan limbah padat yang dihasilkan dari proses pengolahan tandan buah segar (TBS) di pabrik kelapa sawit. Pada pra-rancangan pabrik ini, TKKS direncanakan diperoleh dari PT Wilmar Kuala Tanjung yang berlokasi satu wilayah di Kawasan Industri Kuala Tanjung, Kab. Batubara, Provinsi Sumatera Utara. Bersumber juga dari PTPN IV berlokasi di Kawasan Ekonomi Khusus Sei Mangkei, Sumatera Utara. Berikut merupakan spesifikasi TKKS:

- Bentuk: Padat (30°C, 1 atm)
- Warna: Coklat
- Komposisi (basis kering):
 - Selulosa: 40,160 %
 - Lignin: 19,410 %
 - Pentosan: 25,650 %
 - Air: 11,780 %
 - Abu (ekstraktif): 3 %

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan biomassa lignoselulosa yang tersusun atas selulosa, hemiselulosa (pentosan), dan lignin. Keberadaan fraksi pentosan dalam TKKS menjadikannya bahan baku potensial untuk produksi furfural melalui reaksi hidrolisis dan dehidrasi dengan katalis asam. Menurut Ganing et al. (2024), berikut komposisi TKKS pada Tabel 2.1:

Tabel 2.1. Komposisi Tandan Kosong Kelapa Sawit (Ganing et al., 2024)

No	Konsentrasi H ₂ SO ₄	Kadar Hemiselulosa (%)	Kadar Selulosa (%)	Kadar lignin (%)
1	0%	30,30	16,15	23,44
2	3%	29,90	30,00	19,40
3	5%	26,89	36,35	18,42
4	7%	23,38	41,09	10,14

Tandan kosong kelapa sawit yang digunakan pada bahan baku memiliki karakteristik fisik dan kimia sebagai berikut:

1) Selulosa

Menurut Perry (1999), berikut merupakan sifat kimia dan fisika dari selulosa:

Sifat fisika:

- Fase : padat
- Rumus molekul : (C₆H₁₀O₅)_n
- Berat molekul : 162,14 kg/kmol
- Specific gravity : 1,3-1,4 g/cm³

Sifat Kimia:

Selulosa tahan terhadap alkali kuat (17,5% berat) tetapi dengan mudah terhidrolisis oleh asam menjadi gula yang larut dalam air. Selulosa juga tahan terhadap agen pengoksidasi dengan ketahanan panas serat selulosa adalah mencapai temperature 211-280°C tergantung pada jenis seratnya.

2) Hemiselulosa

Menurut Perry (1999) dan Yang dkk. (2007), sifat fisika dan kimia hemiselulosa sebagai berikut:

Sifat Fisika:

- Fase : padat
- Rumus molekul : (C₅H₈O₄)_n
- Berat molekul : 132,11 kg/kmol
- Specific gravity : 1,429 g/cm³
- Titik didih : 200°C
- Titik lebur : 97,5°C

Sifat Kimia:

- Hemiselulosa terdiri dari berbagai sakarida (xilosa, manosa, glukosa, galaktosa)
- Hemiselulosa tersusun secara acak, berstruktur amorf, kaya cabang yang sangat mudah dihilangkan dari batang utama.
- Hemiselulosa terdegradasi menjadi volatile yang berevolusi keluar (CO, CO₂, dan beberapa hidrokarbon lainnya).

3) Lignin

Menurut Perry (1999) dan Santoso (1995), sifat fisika dan kimia lignin sebagai berikut:

Sifat Fisika:

- Fase : padat
- Rumus molekul : C₂₄H₂₂O₈
- Berat molekul : 438,43 kg/kmol
- Specific gravity : 1,35-1,40 g/cm³
- Titik didih : > 200°C
- Tidak memiliki titik lebur yang terdefinisi (bersifat amorf)

Sifat Kimia:

Lignin memiliki reaktivitas yang rendah dan jumlah gugusan reaktif yang sedikit. Gugus-gugus fungsi yang terkandung dalam senyawa lignin dapat dianalisis menggunakan spektrum inframerah.

b. Asam sulfat

Asam sulfat digunakan sebagai katalis dalam proses produksi furfural untuk mempercepat reaksi hidrolisis dan dehidrasi pentosan. Pada pra-rancangan pabrik ini, asam sulfat direncanakan diperoleh dari PT Petrokimia Gresik, yang merupakan produsen asam sulfat. Spesifikasi produk asam sulfat dari PT Petrokimia Gresik mengacu pada SNI 06-0030-1996 adalah sebagai berikut:

- Bentuk : Cair (30°C, 1 atm)
- Warna : Jernih
- Bau : Berbau tajam
- Komposisi:
 - H₂SO₄: minimum 98 % berat

- H₂O: maksimum 0,5 % berat
- Minyak maksimal 10 ppm

Menurut Perry (1999) dan Ullmann (2005), sifat fisika dan kimia asam sulfat sebagai berikut:

Sifat Fisika:

- Fase : Cair
- Rumus molekul : H₂SO₄
- Berat molekul : 98,08 gr/mol
- *Specific gravity* : 1,834 g/cm³
- Titik didih : 340°C
- Titik leleh : 10,31°C

Sifat Kimia:

- Asam sulfat larut dalam air dan terdekomposisi 95% dalam etik alcohol.
- Asam sulfat merupakan asam kuat bervalensi dua dan bersifat higroskopis.
- Asam pengoksidasi dan bahan pendehidrasi terhadap senyawa organik.

Dehidrasi itu penting dalam mengabsorpsi air yang terbentuk sehingga konversi reaksi-reaksi sulfonasi dan esterifikasi mendapatkan hasil yang lebih tinggi.

c. Air

Air berfungsi sebagai media reaksi hidrolisis pentosan menjadi furfural dengan bantuan katalis asam, sekaligus digunakan dalam proses sebagai bentuk *steam* untuk mendistilasi dan memisahkan furfural dari campuran reaksi melalui pembentukan azeotrope (Ye *et al.*, 2021). *Water Treatment Plant (WTP) Kawasan Industri Kuala Tanjung (KIKT)* Berikut terkait sifat fisika dan sifat kimia air menurut Perry's (1997):

- Sifat Fisika Air

Berat Molekul	: 18 g/mol
Densitas	: 997 kg/m ³
Viskositas dinamik (μ)	: 0,890 mPa·s
Viskositas kinematik (ν)	: 0,893 mm ² /s
Titik didih (1 atm)	: 100 °C
Titik beku	: 0 °C
Panas penguapan (λ)	: 2257 kg

- Sifat Kimia Air
 - Struktur Molekul: Molekul air berbentuk bengkok (bent) dengan sudut ikatan H-O-H sebesar 104,5°, bersifat polar dengan momen dipol 1,85 D.
 - pH: Air murni memiliki pH 7,0 pada suhu 25°C (netral).
 - Konstanta Disosiasi: $K_w = 1,0 \times 10^{-14}$ pada 25°C.
 - Kelarutan: Air merupakan pelarut universal yang dapat melarutkan berbagai senyawa ionik dan polar.
 - Reaktivitas: Air dapat bertindak sebagai asam lemah maupun basa lemah (amfoter), serta berperan sebagai nukleofil dalam reaksi hidrolisis.

Pada proses produksi furfural penggunaan air menjadi faktor penting dan krusial sehingga harus diperhatikan untuk mendapatkan furfural dengan spesifikasi terbaik.

Berikut pada Tabel 2.2 spesifikasi Air yang digunakan dalam proses produksi furfural:

Tabel 2.2. Spesifikasi Air untuk produksi Furfural (Permenkes No. 492/Menkes/Per/IV/2010; ASTM D1193-06, 2006)

No	Parameter	Spesifikasi	Satuan
A Parameter Fisika			
1	Warna	Tidak berwarna	–
2	Bau	Tidak berbau	–
3	Kekeruhan	Maks. 5	NTU
4	Suhu	25–30	°C
5	Total Dissolved Solids (TDS)	Maks. 500	ppm
6	Total Suspended Solids (TSS)	Maks. 10	ppm
B Parameter Kimia			
7	pH	6,5–8,5	–
8	Kesadahan total (sebagai CaCO ₃)	Maks. 100	ppm
9	Klorida (Cl ⁻)	Maks. 250	ppm
10	Sulfat (SO ₄ ²⁻)	Maks. 250	ppm
11	Besi (Fe)	Maks. 0,3	ppm
12	Mangan (Mn)	Maks. 0,1	ppm

B Parameter Kimia			
13	Silika (SiO ₂)	Maks. 50	ppm
14	Alkalinitas (sebagai CaCO ₃)	50–150	ppm
15	COD (Chemical Oxygen Demand)	Maks. 10	ppm
16	Logam berat (Pb, Hg, As, Cr)	Maks. 0,01	ppm
C Parameter Mikrobiologi			
17	Total Coliform	0	CFU/100 mL
18	E. coli	0	CFU/100 mL
19	Total Plate Count	Maks. 100	CFU/mL

2.1.2 Produk

a. Furfural

- **Spesifikasi produk**

Furfural merupakan senyawa aldehida heterosiklik yang banyak digunakan sebagai bahan baku industri resin, pelarut selektif, serta intermediate dalam sintesis berbagai senyawa kimia. Produk furfural yang dihasilkan pada pabrik ini dirancang mengacu pada spesifikasi produk komersial 2-furaldehyde yang beredar di pasaran dengan kemurnian tinggi. Spesifikasi produk furfural yang direncanakan sebagai berikut:

Nama Produk	: Furfural (2-Furaldehyde)
Rumus Molekul	: C ₅ H ₄ O ₂
Berat Molekul	: 96,08 g/mol
Kemurnian	: ≥99%
Bentuk Fisik	: Cair
Warna	: Kuning muda

- **Sifat Fisika Furfural**

Menurut data dari MSDS Furfural (2024) berikut pada Tabel 2.3. sifat fisika furfural:

Tabel 2.3. Sifat Fisika Fufural (MSDS., 2024)

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Rumus Molekul	C ₅ H ₄ O ₂	–
2	Berat Molekul	96,08	g/mol
3	Warna	Tidak berwarna hingga kuning	–
4	Bau	Seperti almond (aromatik)	–
5	Titik Didih (1 atm)	161,7	°C
6	Titik Beku/Leleh	–36,5 hingga –36,7	°C
7	Densitas (25°C)	1,161	g/cm ³
8	Viskositas (25°C)	1,49	mPa·s

• **Sifat Kimia Furfural**

Menurut Zeitsch, K (2000) serta MSDS (2024) berikut sifat kimia furfural:

Struktur Kimia : Senyawa aldehida heterosiklik aromatik dengan cincin furan

Gugus Fungsi : Aldehida (–CHO) pada posisi C-2 cincin furan

Reaktivitas : • Bereaksi dengan oksidator kuat
• Mengalami polimerisasi eksotermik dengan asam/basa kuat
• Mengalami reaksi kondensasi dengan fenol, amina, dan urea

Stabilitas : • Tidak stabil terhadap cahaya dan udara
• Mengalami resinifikasi pada suhu kamar
• Polimerisasi irreversibel saat dipanaskan dalam kondisi asam

pH Larutan : Sedikit asam

b. Produk Samping

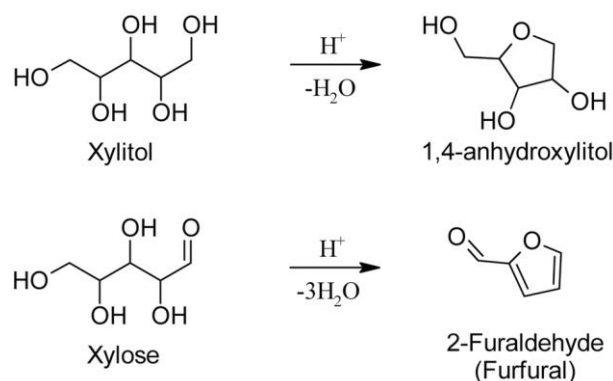
Proses produksi ini menghasilkan residu lignoselulosa berupa lignin cake sebagai produk samping dari tahap pemisahan sentrifuge dan filter press. Residu padat ini memiliki komposisi selulosa 50–60%, lignin 30–40%, dan sisa hemiselulosa 5–10% pada basis kering, dengan moisture content 55–65% dan pH 3–4 akibat asam sisa yang terserap selama proses. Nilai kalor residu ini pada basis kering berkisar 18–20 MJ/kg, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan bakar padat (*solid fuel*) untuk kebutuhan boiler di

unit utilitas pabrik. Setelah melalui proses netralisasi, residu ini juga dapat diolah menjadi kompos atau dijual sebagai feedstock bagi industri pulp dan kertas serta industri semen.

2.2 Konsep Proses

2.2.1 Dasar Reaksi Pembentukan Furfural

Furfural merupakan senyawa organik penting yang dihasilkan dari biomassa melalui proses dehidrasi pentosa (gula berat atom karbon lima). Berdasarkan tinjauan komprehensif oleh Danon *et al* (2014) tahapan-tahapan reaksi furfural secara umum terdapat pada Gambar 2.1 serta penjelasan Langkah-langkahnya yaitu sebagai berikut:



Gambar 2.1. Mekanisme Pembentukan Furfural (Danon et al., 2014)

1. Tahap Pembukaan Cincin Pentosa

Reaksi pembentukan furfural diawali dengan pembukaan cincin pentosa dalam medium asam. Dalam larutan *aqueous*, pentosa seperti xilosa berada dalam kesetimbangan antara bentuk piranosa, furanosa, dan bentuk rantai terbuka. Katalis asam memprotonasi atom oksigen pada cincin gula sehingga ikatan C–O melemah dan cincin terbuka membentuk struktur asiklik yang mengandung gugus karbonil. Bentuk rantai terbuka ini sangat penting karena hanya struktur inilah yang dapat melanjutkan reaksi menuju pembentukan furfural.

2. Tahap Enolisasi dan Isomerisasi

Setelah cincin terbuka, gugus karbonil pada pentosa mengalami enolisasi membentuk intermediat enediol atau mengalami isomerisasi dari aldopentosa menjadi ketopentosa melalui perpindahan hidrida intramolekular. Tahap ini merupakan tahap penentu laju reaksi karena menentukan terbentuknya intermediat reaktif yang stabil. Intermediat enol atau ketopentosa bersifat lebih mudah mengalami eliminasi air dibandingkan aldopentosa awal.

3. Tahap Dehidrasi Bertahap

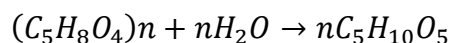
Intermediat yang terbentuk selanjutnya mengalami dehidrasi yang dikatalisis oleh asam melalui protonasi gugus hidroksil, diikuti oleh eliminasi molekul air. Secara keseluruhan, reaksi ini melibatkan pelepasan tiga molekul air secara bertahap. Proses dehidrasi menghasilkan struktur tidak jenuh yang semakin mendekati kerangka cincin furan.

4. Tahap Siklisasi dan Pembentukan Furfural

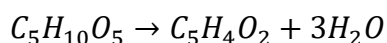
Pada tahap akhir, terjadi siklisasi intramolekular yang membentuk cincin furan, diikuti oleh dehidrasi terakhir sehingga dihasilkan 2-furaldehida (furfural). Gugus aldehida tetap dipertahankan pada struktur produk akhir. Tahap ini berlangsung relatif cepat, namun pada kondisi asam dan temperatur tinggi dapat bersaing dengan reaksi samping seperti pembentukan humin.

2.2.2 Mekanisme Proses Pembentukan Furfural dari Limbah TKKS

Pembentukan furfural dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) diawali dengan pengecilan ukuran partikel menggunakan hammer mill hingga berukuran 2–8 mm. Tahap ini bertujuan untuk membuka struktur lignoselulosa dan meningkatkan luas permukaan kontak antara biomassa dan larutan asam, tanpa penghilangan lignin secara khusus. Selanjutnya, slurry TKKS yang telah dicampur dengan larutan H₂SO₄ encer dipanaskan hingga suhu operasi 150–160°C. Pada kondisi suhu dan tekanan tinggi (6–8 bar), lapisan lignin pelindung yang menyelubungi hemiselulosa mengalami pelunakan (*softening*) akibat tercapainya *glass transition temperature* lignin pada rentang 120–160°C, sehingga ion H⁺ dari asam sulfat dapat berpenetrasi ke dalam matriks lignoselulosa dan mengakses rantai xilan hemiselulosa (Lavarack *et al.*, 2002). Selanjutnya, hemiselulosa mengalami hidrolisis asam yang memutus ikatan glikosidik pada xilan dan menghasilkan monomer xilosa (Duan *et al.*, 2022). Tahap ini penting karena furfural tidak terbentuk langsung dari polimer, melainkan dari gula pentosa hasil hidrolisis. Reaksi hidrolisa sebagai berikut:



Xilosa yang terbentuk kemudian mengalami dehidrasi terkatalisis asam melalui mekanisme pembukaan cincin, enolisasi/isomerisasi, dan eliminasi air secara bertahap. Secara keseluruhan, tiga molekul air dilepaskan hingga terbentuk cincin furan dengan gugus aldehida, yaitu furfural (Wang *et al.*, 2025). Berikut reaksi dehidrasi xilosa menjadi furfural:



2.2.3 Kondisi Operasi

Proses produksi furfural dari TKKS dengan metode SupraYield® diawali dengan tahap persiapan bahan baku. Proses *reduksi ukuran* menggunakan hammer mill hingga ukuran partikel 2–8 mm. Larutan katalis disiapkan dengan menginjeksikan asam sulfat 98% secara langsung ke aliran air proses menggunakan metering pump hingga diperoleh konsentrasi sekitar 3% berat terhadap biomassa kering.

Campuran TKKS dan larutan asam dihomogenisasi di mixer (M-01) kemudian dipanaskan melalui heat exchanger sebelum masuk ke reaktor pra-hidrolisis (R-01) yang beroperasi pada suhu 150–160°C dan tekanan 6–8 bar dengan waktu tinggal 29 menit, sehingga hemiselulosa terhidrolisis menjadi xilosa. Slurry hasil pra-hidrolisis kemudian mengalami flash separation untuk menurunkan tekanan hingga 1 bar, selanjutnya dipisahkan menggunakan sentrifuge untuk memisahkan hidrolisat cair dari residu padatan selulosa dan lignin.

Hidrolisat cair diumpankan ke Reaktor SupraYield® (R-02) yang beroperasi secara semi-batch pada suhu 210–220°C dan tekanan 20–25 bar dengan holding time 5 menit, sehingga terjadi hidrolisis lanjutan dan dehidrasi xilosa menjadi furfural. Setelah reaksi berlangsung, tekanan diturunkan secara bertahap melalui flash distillation sehingga furfural yang terbentuk langsung menguap bersama uap air dan segera meninggalkan fasa cair, meminimalkan reaksi samping dan menghasilkan yield hingga 80% (Arnold & Buzzard, 2003). Uap furfural kemudian dikondensasikan di kondensor menghasilkan campuran cair furfural dan air.

Tahap pemurnian dilakukan menggunakan Dividing Wall Column (DWC) yang dioperasikan pada kondisi vakum untuk memisahkan air dari furfural menggunakan n-Butyl Chloride sebagai solven ekstraktan dengan recovery solven 98,24%. Produk furfural yang diperoleh memiliki kemurnian 99,96% yang selanjutnya dialirkan ke tangki penyimpanan produk.

2.2.4 Perbandingan Mol Reaktan

Proses produksi furfural dari TKKS melibatkan dua reaksi berurutan. Reaksi pertama adalah hidrolisis xylan menjadi xilosa, dimana setiap unit xylan ($C_5H_8O_4$) bereaksi dengan 1 mol air menghasilkan 1 mol xilosa ($C_5H_{10}O_5$). Reaksi kedua adalah dehidrasi xilosa menjadi furfural, dimana 1 mol xilosa terkonversi menjadi 1 mol furfural ($C_5H_4O_2$) dengan melepaskan 3 mol air. Secara keseluruhan, 1 mol unit xylan menghasilkan 1 mol furfural dengan konsumsi air neto sebesar 2 mol (Arnold & Buzzard, 2003; Lavarack *et al.*, 2002).

Air digunakan dalam jumlah yang jauh melebihi kebutuhan stoikiometri minimum karena sistem ini menggunakan pendekatan slurry dengan *liquid-to-solid ratio* tinggi. Kelebihan air ini berfungsi sebagai medium reaksi untuk memastikan homogenisasi slurry, mendukung transfer panas yang optimal di dalam reaktor, serta memudahkan pemompaan umpan dari mixer menuju reaktor. Katalis H₂SO₄ berfungsi menyediakan ion H⁺ yang berperan memutus ikatan glikosidik pada rantai xylan tanpa ikut dikonsumsi secara stoikiometri.

2.2.5 Sifat Reaksi

Kedua reaksi dalam proses pembentukan furfural memiliki sifat termal yang berbeda. Reaksi hidrolisis xylan menjadi xilosa yang berlangsung di R-01 bersifat endotermis, sehingga memerlukan pasokan panas secara kontinyu melalui steam jacket untuk mempertahankan suhu operasi 150–160°C selama reaksi berlangsung.

Sebaliknya, reaksi dehidrasi xilosa menjadi furfural yang berlangsung di R-02 bersifat eksotermis. Meskipun demikian, R-02 tetap memerlukan pemanasan awal untuk mencapai suhu operasi 210–220°C yang diperlukan agar reaksi dehidrasi berlangsung dengan laju yang cukup cepat. Pada suhu operasi tinggi ini, furfural yang terbentuk langsung menguap melalui mekanisme flash distillation sehingga terhindar dari reaksi samping berupa resinifikasi dan kondensasi yang dapat menurunkan yield produk (Arnold & Buzzard, 2003).

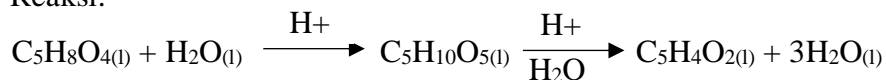
2.2.6 Tinjauan Termodinamika

Proses pembentukan furfural atau reaksi hidrolisis pentosan dan air serta reaksi dehidrasi pentosa ditinjau dari konsep termodinamika sebagai berikut:

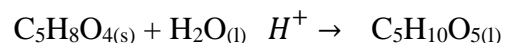
1) Panas Reaksi (ΔH_R)

Panas reaksi (ΔH_R) digunakan untuk menentukan apakah reaksi bersifat eksotermis atau endotermis. Dalam perhitungan digunakan ΔH°_f untuk masing-masing komponen menurut Yaws, (1999). Berikut merupakan perhitungan panas reaksi (ΔH_R):

Reaksi:



- Reaksi 1



Tabel 2.4. Harga ΔH°_f Masing-masing Komponen (Yaws, 1999)

Komponen	ΔH°_f 298K (kJ/mol)
$C_5H_8O_4(s)$	-844
$H_2O(l)$	-285,84
$C_5H_{10}O_5(l)$	-1.063

$$\Delta H^\circ_{f298} = \Delta H^\circ_f (\text{produk}) - \Delta H^\circ_f (\text{reaktan})$$

$$\Delta H^\circ_{f298} = (\Delta H^\circ C_5H_{10}O_5(l)) - ((\Delta H^\circ C_5H_8O_4(s)) - (\Delta H^\circ H_2O(l))) \text{ kJ/mol}$$

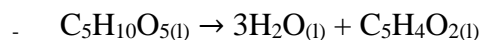
$$\Delta H^\circ_{f298} = (-1.063 - (-844 + (-285,84))) \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H^\circ_{f298} = (-1.063) - (-1.129,84) \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H^\circ_{f298} = 66,84 \text{ kJ/mol}$$

Ditinjau dari harga ΔH°_f reaksi, menunjukkan bahwa reaksi pembentukan pentosan merupakan reaksi endotermis yakni reaksi yang membutuhkan panas karena harga entalpi bernilai positif.

- Reaksi 2

**Tabel 2.5.** Harga ΔH°_f Masing-masing Komponen (Yaws, 1999)

Komponen	ΔH°_f 298K (kJ/mol)
$C_5H_{10}O_5(l)$	-1.063
$H_2O(l)$	-285,84
$C_5H_4O_2(l)$	-151,04

$$\Delta H^\circ_{f298} = \Delta H^\circ_{f \text{ produk}} - \Delta H^\circ_{f \text{ reaktan}}$$

$$\Delta H^\circ_{f298} = ((\Delta H^\circ_f H_2O(l) \times 3) + (\Delta H^\circ_f C_5H_4O_2(l))) - (\Delta H^\circ_f C_5H_{10}O_5(l)) \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H^\circ_{f298} = ((-285,84 \times 3) + (-151,04)) - (-1.063) \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H^\circ_{f298} = (-1.008,56) - (-1.063) \text{ kJ/mol}$$

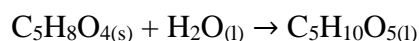
$$\Delta H^\circ_{f298} = +54,44 \text{ kJ/mol}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, diketahui bahwa harga ΔH°_f reaksi pembentukan furfural bernilai positif sehingga dapat disimpulkan bahwa reaksi bersifat endotermis.

2) Energi Bebas Gibbs (ΔG°)

Menurut Yaws (1999), data besarnya energi gibbs untuk masing-masing komponen pada suhu 298 K sebagai berikut:

- Reaksi 1



Tabel 2.6. Harga ΔG°_f Masing-masing Komponen (Yaws, 1999)

Komponen	$\Delta G^\circ_{f\ 298K}$ (kJ/mol)
$C_5H_8O_4(s)$	-434,30
$H_2O(l)$	-228,60
$C_5H_{10}O_5(l)$	-662,90

$$\Delta G^\circ_{f298} = \Delta G^\circ_f (\text{produk}) - \Delta G^\circ_f (\text{reaktan})$$

$$\Delta G^\circ_{f298} = (\Delta G^\circ_f C_5H_{10}O_5(s)) - ((\Delta G^\circ_f C_5H_8O_4(s)) + (\Delta G^\circ_f H_2O(l))) \text{ kJ/mol}$$

$$= (-662,90) - ((-434,30) + (-228,60)) \text{ kJ/mol}$$

$$= (-662,90) - (-662,90) \text{ kJ/mol}$$

$$= 0 \text{ kJ/mol}$$

Nilai $\Delta G^\circ_{298} = 0$ kJ/mol pada Reaksi 1 merupakan konsekuensi langsung dari pendekatan/asumsi yang digunakan untuk mengestimasi ΔG°_f pentosan (bukan hasil perhitungan independen), dan menunjukkan bahwa secara termodinamika reaksi hidrolisis pentosan berada pada kondisi mendekati setimbang (netral).

Menurut Smith (2001), perhitungan harga ketetapan kesetimbangan (K) dapat ditinjau dari rumus berikut:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K$$

$$\Delta G^\circ = \text{Energi gibbs standar (kJ/mol)}$$

$$R = \text{Tetapan gas ideal (8,314 J/mol}^\circ \text{ K)}$$

$$T = \text{Temperatur (K)}$$

$$K = \text{Konstanta kesetimbangan}$$

$$\Delta G^\circ_{f\ 298} = -RT \ln K_{298}$$

$$\ln K_{298} = \frac{-\Delta G}{RT} = \frac{-(0)}{0,008314 \times 298}$$

$$\ln K_{298} = 0$$

$$K_{298} = 1$$

$$\ln \left(\frac{K_1}{K_2} \right) = \left[\left(\frac{\Delta H}{R} \right) \times \left(\frac{1}{T_1} \right) - \left(\frac{1}{T_2} \right) \right]$$

$$\ln \left(\frac{K_{479}}{K_{298}} \right) = \left[- \left(\frac{\Delta H_{f\ 298}}{R} \right) \times \left(\frac{1}{479K} \right) - \left(\frac{1}{298K} \right) \right]$$

$$\ln \left(\frac{K_{479}}{1} \right) = \left[- \left(\frac{66,84}{0,008314} \right) \times \left(\frac{1}{479} \right) - \left(\frac{1}{298} \right) \right]$$

$$\ln \left(\frac{K_{479}}{1} \right) = [(-8.039,45) \times (-1,268 \times 10^{-3})]$$

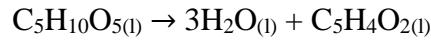
$$\ln \left(\frac{K_{479}}{1} \right) = 10,194$$

$$\left(\frac{K_{479}}{1}\right) = 2,675 \times 10^4$$

$$K_{479} = 2,675 \times 10^4$$

Pada reaksi 1 diperoleh harga $K > 1$, maka reaksi berjalan ke arah kanan (*irreversible*), dapat membentuk produk.

- **Reaksi 2**



Tabel 2.7. Harga ΔG°_f Masing-masing Komponen (Yaws, 1999)

Komponen	ΔG°_f 298K (kJ/mol)
$C_5H_{10}O_{5(l)}$	-662,90
$H_2O_{(l)}$	-228,60
$C_5H_4O_{2(l)}$	-133,82

$$\Delta G^\circ_{298} = \Delta G^\circ_f (\text{produk}) - \Delta G^\circ_f (\text{reaktan})$$

$$= ((\Delta G^\circ_f H_2O_{(l)} \times 3) + (\Delta G^\circ_f C_5H_4O_{2(l)})) - (\Delta G^\circ_f C_5H_{10}O_{5(l)})$$

$$= ((-3 \times 228,60) + (-133,82)) - (-662,90)$$

$$= -156,72 \text{ kJ/mol}$$

Energi pembentukan Gibbs digunakan untuk menentukan konstanta kesetimbangan reaksi, sehingga:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_{298}$$

$$\ln K_{298} = \frac{-\Delta G}{RT} = \frac{-(-274,33)}{0,008314 \times 298}$$

$$\ln K_{298} = \frac{156,72}{2,4776}$$

$$\ln K_{298} = 63,25$$

$$K_{298} = 2,96 \times 10^{27}$$

$$\ln \left(\frac{K_1}{K_2}\right) = \left[\left(\frac{\Delta H}{R}\right) \times \left(\frac{1}{T_1}\right) - \left(\frac{1}{T_2}\right)\right]$$

$$\ln \left(\frac{K_{479}}{K_{298}}\right) = \left[-\left(\frac{\Delta H_{f298}}{R}\right) \times \left(\frac{1}{479K}\right) - \left(\frac{1}{298K}\right)\right]$$

$$\ln \left(\frac{K_{479}}{K_{298}}\right) = \left[-\left(\frac{54,44}{0,008314}\right) \times \left(\frac{1}{479}\right) - \left(\frac{1}{298}\right)\right]$$

$$\ln \left(\frac{K_{479}}{K_{298}}\right) = [-6.549,67 \times (-1,268 \times 10^{-3})]$$

$$\ln \left(\frac{K_{479}}{K_{298}}\right) = 8,30$$

$$\left(\frac{K_{479}}{K_{298}}\right) = 4,03 \times 10^3$$

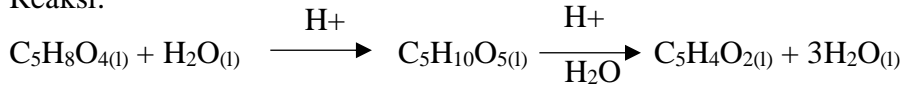
$$K_{479} = (2,96 \times 10^{27}) \times (4,03 \times 10^3)$$

$$K_{479} = 1,20 \times 10^{31}$$

Nilai K yang diperoleh sangat besar ($K > 1$), maka reaksi pembentukan furfural bersifat *irreversible*. Pada kesetimbangan, hampir seluruh pentosa terkonversi menjadi furfural dan reaksi balik (furfural + air \rightarrow pentosa) praktis tidak terjadi secara termodinamika.

2.2.7 Tinjauan Kinetika

Reaksi:



Secara kinetika, persamaan reaksi di atas dapat ditulis sebagai berikut:

Menurut Arnold & Buzzard (2003), kinetika reaksi pembentukan furfural adalah sebagai berikut:



Berdasarkan model reaksi seri orde pertama, persamaan laju reaksi untuk masing-masing tahap adalah sebagai berikut (Arnold & Buzzard, 2003; Levenspiel, 1999):

$$-r_{pn} = K_0 \cdot C_{pn}$$

$$-r_{pe} = K_1 \cdot C_{pe} - K_0 \cdot C_{pn}$$

Reaktor yang digunakan adalah Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR). Berdasarkan neraca massa CSTR pada kondisi steady-state, waktu tinggal reaktor (τ) untuk reaksi orde pertama diperoleh melalui:

$$\tau = \frac{X}{K(1 - X)}$$

sehingga volume reaktor dapat dihitung sebagai:

$$V = \tau \times Q$$

di mana Q adalah laju alir volumetrik umpan dan X adalah konversi yang ditargetkan.

Pada proses pembuatan furfural, didapatkan harga sebesar:

$$K_0 = 7,832 \times 10^{-4} C_{\text{H}} \times e^{\frac{-5163}{T}}$$

$$K_1 = 9,306 \times 10^{15} C_{\text{H}} \times C_{\text{pe}} e^{\frac{-16894}{T}}$$

Keterangan:

K_0 = Konstanta laju reaksi pembentukan pentose (/jam)

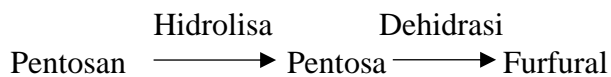
K_1 = Konstanta laju reaksi pembentukan furfural (/jam)

C_{H} = Konsentrasi ion hidrogen pada suhu 20°C (gr/liter)

C_{pe} = Konsentrasi pentose (gr/liter)

T = Temperatur (K)

Reaksi pembentukan furfural:



Konversi pentosa menjadi furfural : 80%

Konversi pentosan menjadi pentose : 80%

Nilai K_0 dan K_1 merupakan fungsi suhu yang mengikuti persamaan Arrhenius, sehingga semakin tinggi suhu operasi, semakin besar nilai konstanta laju reaksi dan semakin cepat reaksi berlangsung. Berdasarkan reaksi yang terjadi, terdapat suhu optimum operasi karena pada suhu yang terlalu tinggi, laju reaksi degradasi furfural (*yield-loss reactions*) meningkat melebihi laju pembentukannya, sehingga yield furfural justru menurun. Menurut Arnold & Buzzard (2003), rentang suhu operasi SupraYield® pada 200–235°C, dengan konversi pentosa menjadi furfural mencapai 80% pada kondisi operasi suhu 210–220°C, konsentrasi asam 2%, dan holding time sekitar 5 menit.

2.3 Langkah Proses

2.3.1 Tahap Persiapan dan Pencampuran Bahan Baku

Bahan baku Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) yang diperoleh dari beberapa perusahaan kelapa sawit disimpan terlebih dahulu di area penyimpanan bahan baku (gudang). TKKS memiliki kandungan hemiselulosa sekitar 25–35%, selulosa 35–45%, dan lignin 20–30% (basis kering), yang menjadikannya sumber pentosa yang potensial untuk produksi furfural.

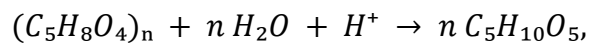
TKKS dari area penyimpanan diangkut secara mekanis menggunakan screw conveyor menuju unit pengecilan ukuran. Pengecilan ukuran dilakukan menggunakan hammer mill (C-110) yang dilengkapi dengan screen untuk menghasilkan partikel berukuran seragam 2–8 mm. Pengecilan ukuran partikel ini bertujuan untuk memperluas luas permukaan kontak antara biomassa dengan larutan asam, sehingga penetrasi katalis ke dalam matriks lignoselulosa menjadi lebih efektif dan laju hidrolisis meningkat. Ukuran partikel yang terlalu besar menyebabkan keterbatasan difusi asam ke inti partikel sehingga konversi hemiselulosa menurun, sedangkan partikel yang terlalu halus dapat menyebabkan pepadatan material dan menghambat aliran uap selama proses berlangsung.

TKKS yang telah direduksi ukurannya kemudian diangkut menggunakan screw conveyor menuju Mixer (M-01). Secara paralel, air proses yang diperoleh dari unit utilitas pada suhu 30°C dan tekanan 1 atm dialirkan langsung ke M-01. Katalis berupa asam sulfat (H₂SO₄) dengan kemurnian 98% disimpan dalam tangki penyimpanan asam sulfat pekat dan dialirkan ke M-01 menggunakan metering pump dengan laju alir yang dikontrol secara presisi. Ketiga komponen tersebut (TKKS, air, dan H₂SO₄) dicampurkan di dalam M-01 sehingga terbentuk slurry homogen dengan konsentrasi asam sulfat sebesar 3% terhadap berat TKKS kering dan rasio liquid-to-solid sebesar 4–5:1. Pencampuran dilakukan dengan agitasi agar distribusi asam dalam slurry merata sebelum diumpankan ke tahap pra-hidrolisis.

2.3.2 Tahap Pra-hidrolisis, *flash separation*, dan *solid-liquid separation*

Slurry homogen yang terdiri dari TKKS, air, dan katalis H₂SO₄ 3% dipompa dari M-01 melewati HE-01 untuk dipanaskan terlebih dahulu sebelum menuju reaktor pra-hidrolisis (R-01). R-01 merupakan pressure vessel vertikal yang dilengkapi dengan agitator tipe Rushton turbine dan sistem pemanas berupa steam jacket. Reaktor dioperasikan pada suhu 160°C dan tekanan 7 bar dengan waktu reaksi (τ) selama 29 menit, serta rasio liquid-to-solid 4–5:1. Agitasi dilakukan pada kecepatan 40 rpm untuk memastikan distribusi panas dan kontak yang merata antara katalis asam dengan biomassa.

Pada kondisi operasi tersebut, terjadi reaksi hidrolisis katalitik yang memecah struktur hemiselulosa (pentosan/xylan) yang terdapat dalam TKKS menjadi monomer xylose (C₅H₁₀O₅) yang larut dalam fasa cair, mengikuti mekanisme berikut:



Ion hidrogen dari asam sulfat bertindak sebagai katalis yang memutus ikatan glikosidik dalam rantai polimer hemiselulosa. Yield hidrolisis pada tahap ini mencapai 75–90%, sehingga sebagian besar hemiselulosa berhasil dikonversi menjadi xylose terlarut. Produk dari R-01 berupa slurry panas yang terdiri dari fasa cair mengandung xylose 4–6%, asam asetat 0,5–1%, oligosakarida, dan traces furfural, serta fasa padat berupa residu lignoselulosa (selulosa dan lignin).

Slurry panas hasil pra-hidrolisis dengan suhu 155–160°C dan tekanan 7–8 bar selanjutnya dialirkan ke flash tank untuk mengalami depressurisasi mendadak dari tekanan operasi menuju tekanan atmosferik (1 bar). Proses flash evaporation ini menyebabkan sebagian air dalam slurry menguap seketika membentuk flash steam. Suhu slurry turun dari sekitar 155°C menjadi 95–100°C akibat pelepasan energi selama evaporasi.

Fasa uap yang keluar dari flash tank diarahkan ke kondensor (CD-01) untuk dikondensasikan. Sementara itu, slurry sisa dengan suhu 95–100°C dan viskositas yang meningkat akibat berkurangnya kandungan air sebesar 15–20% dari volume awal, selanjutnya dialirkan ke unit pemisahan padatan-cairan.

Slurry dari flash tank dipisahkan menggunakan sentrifuge untuk memisahkan fasa cair (hidrolisat xylose) dari fasa padat (residu lignoselulosa). Overflow berupa hidrolisat xylose dengan komposisi xylose 4–6%, air 90–92%, asam sisa 0,3–0,5%, asam asetat 0,5–1%, oligosakarida 1–2%, dan traces furfural, dengan suspended solids kurang dari 0,5%, pH 2,0–2,5, dan suhu 90–95°C.

Hidrolisat cair ini kemudian disaring melalui fine filter (100 mesh) untuk menghilangkan partikel tersuspensi yang dapat mengganggu proses dehidrasi di R-02. Underflow berupa cake residu lignoselulosa dengan kandungan selulosa 50–60%, lignin 30–40%, dan sisa hemiselulosa 5–10% (basis kering), dengan moisture content 55–65%, dimanfaatkan sebagai bahan bakar padat untuk boiler, bahan composting setelah netralisasi, atau feedstock untuk industri pulp dan kertas.

2.3.3 Tahap Reaksi Hidrolisis dan Dehidrasi

Hidrolisat xylose yang telah disaring selanjutnya dipanaskan terlebih dahulu melalui heat exchanger preheater (HE-02) secara bertahap sebelum diumpankan ke reaktor SupraYield® (R-02). R-02 merupakan reaktor autoklaf silinder vertikal bertekanan tinggi yang dilengkapi dengan sistem pemanas steam jacket. Proses di R-02 berlangsung dalam tiga fase utama: heating & pressurization, holding time, dan flash distillation.

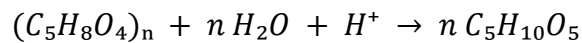
Pada fase pertama (heating & pressurization, berlangsung ±15–20 menit), hidrolisat yang masuk pada suhu sekitar 90°C dipanaskan secara bertahap menggunakan steam jacket hingga mencapai suhu operasi 210–220°C. Seiring pemanasan, tekanan dalam reaktor meningkat secara bertahap dari tekanan atmosferik hingga 20–25 bar akibat ekspansi termal dan pembentukan uap air. Pada rentang suhu 120–180°C selama pemanasan, sudah mulai terjadi reaksi hidrolisis lanjutan dari oligosakarida yang belum terkonversi sempurna di R-01, serta awal reaksi dehidrasi xylose menjadi furfural yang mulai signifikan pada suhu di atas 160°C.

Fase kedua adalah holding time selama 5 menit pada suhu konstan 210–220°C dan tekanan 20–25 bar. Pada fase ini terjadi dua reaksi kimia simultan yang sangat intensif, yaitu hidrolisis lanjutan oligosakarida menjadi xylose dan dehidrasi katalitik xylose menjadi furfural, mengikuti mekanisme berikut: Reaktor SupraYield® merupakan reaktor berbentuk silinder vertikal dengan tekanan hingga 30 bar, dilengkapi dengan sistem pemanas berupa *steam jacket*. Proses di reaktor

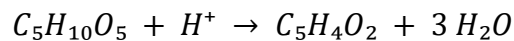
SupraYield® berlangsung dalam tiga fase utama yaitu *heating & pressurization*, *holding time*, dan *flash distillation* yang merupakan kunci inovasi dari proses ini.

Pada fase pertama yaitu *heating & pressurization* yang berlangsung selama 15-20 menit, hidrolisat yang masuk pada suhu 90°C dipanaskan secara bertahap menggunakan *steam jacket* hingga mencapai suhu operasi 210-220°C. Selama proses pemanasan ini, tekanan dalam reaktor meningkat secara bertahap dari tekanan atmosferik hingga mencapai 20-25 bar akibat ekspansi termal dan pembentukan uap air. Pada rentang suhu 120-180°C selama fase pemanasan, sudah mulai terjadi reaksi kimia meskipun dengan laju yang masih relatif lambat, yaitu hidrolisis lanjutan dari oligosakarida dan hemiselulosa yang belum terkonversi sempurna pada tahap pra-hidrolisis (sekitar 15-25% yang tersisa) menjadi xylose, serta awal reaksi dehidrasi xylose menjadi furfural yang mulai signifikan pada suhu di atas 160°C.

Fase kedua adalah *holding time* selama 3-5 menit pada suhu konstan 210-220°C dan tekanan 20-25 bar, dimana terjadi reaksi kimia simultan yang sangat intensif. Reaksi pertama adalah *completion hydrolysis* yaitu hidrolisis lanjutan dari hemiselulosa dan oligosakarida yang tersisa menjadi xylose mengikuti mekanisme berikut:



Reaksi kedua adalah dehidrasi katalitik xylose menjadi furfural mengikuti mekanisme berikut:



Pada awal *holding time*, laju pembentukan xylose dari hidrolisis oligosakarida masih cukup tinggi, namun setelah 2–3 menit ketika pentosan mulai habis, laju konsumsi xylose melalui dehidrasi menjadi dominan dan konsentrasi furfural terus meningkat. Pada akhir *holding time*, konversi total xylose menjadi furfural telah mencapai lebih dari 90%.

Fase ketiga adalah *flash distillation* yang merupakan inovasi kunci proses SupraYield®, berlangsung selama 30–45 menit. Pada fase ini, valve depressurisasi dibuka secara bertahap dan terkontrol untuk menurunkan tekanan reaktor secara perlahan dari 20–25 bar menuju tekanan atmosferik (1 bar). Laju depressurisasi disesuaikan dengan laju produksi furfural agar furfural yang terbentuk segera menguap dan keluar dari reaktor dalam bentuk uap bersama steam, meminimalkan waktu tinggal furfural dalam fasa cair yang berpotensi menyebabkan degradasi menjadi produk samping (tar dan resin).

Mekanisme ini bekerja berdasarkan prinsip penurunan *bubble point*: ketika tekanan diturunkan, *bubble point liquid mixture* juga turun, sehingga liquid yang sebelumnya berada di

bawah bubble point akan mencapai kondisi pendidihan pada tekanan yang lebih rendah. Depressurisasi bertahap ini juga mencegah terjadinya bumping atau excessive foaming yang dapat menyebabkan carry-over material cair ke sistem kondensasi.

Bottom product yang tersisa di R-02 setelah flash distillation selesai berupa spent liquor (30–40% dari volume feed awal) yang mengandung air, asam sisa, asam asetat, heavy ends, dan sejumlah kecil unreacted xylose (<5%).

2.3.4 Tahap Kondensasi dan Penyiapan Umpan Distilasi

Fasa uap yang keluar dari R-02 selama fase flash distillation, terdiri dari furfural, uap air, dan senyawa volatil lainnya, dialirkan menuju kondensor (CD-02). Di dalam CD-02, uap didinginkan menggunakan air pendingin dari unit utilitas sehingga mengalami perubahan fasa menjadi kondensat cair. Proses kondensasi berlangsung pada tekanan atmosferik (1 bar). Kondensat yang dihasilkan merupakan campuran cair yang didominasi air dan furfural, dengan konsentrasi furfural yang belum memenuhi spesifikasi produk akhir (umumnya berkisar 10–20% furfural dalam campuran air-furfural).

Tidak dilakukan pemisahan fraksional pada tahap ini. CD-01 berfungsi murni sebagai unit perubahan fasa dan penyiapan umpan distilasi. Kondensat selanjutnya dipompa secara kontinu sebagai umpan ke unit pemurnian, yaitu kolom *Extractive Distillation with Dividing Wall Column* (EDWC/D-01). Dengan adanya tahap kondensasi ini, umpan ke kolom distilasi telah berada dalam kondisi cair, bebas dari padatan, serta memiliki temperatur dan tekanan yang terkontrol sehingga operasi pemurnian dapat berlangsung secara stabil dan efisien.

2.3.5 Tahap Pemurnian Akhir Produk

Pemurnian furfural dilakukan menggunakan *Extractive Distillation with Dividing Wall Column* (EDWC) (D-01) yang dioperasikan pada tekanan 1 bar. D-01 merupakan kolom distilasi yang memiliki sekat vertikal (*dividing wall*) di bagian tengah kolom, sehingga membagi ruang dalam kolom menjadi beberapa zona pemisahan yang memungkinkan pemisahan multikomponen berlangsung secara simultan dalam satu unit.

Proses distilasi ekstraktif dilakukan dengan penambahan solvent n-butyl chloride sebagai entrainer yang masuk ke bagian atas kolom. Solvent ini berfungsi mengubah volatilitas relatif antara furfural dan air sehingga pemisahan yang sulit dilakukan dengan distilasi biasa akibat kedekatan karakteristik penguapan kedua komponen dapat diatasi secara lebih efektif.

Kondensor (CD-03) terintegrasi di bagian atas kolom untuk mengkondensasikan uap yang naik dari zona rectifying, sedangkan reboiler yang terletak di bagian bawah kolom menyediakan energi panas yang diperlukan untuk mempertahankan proses pemisahan. Di dalam kolom, distribusi aliran cair dan uap pada masing-masing zona yang dipisahkan oleh dividing wall memungkinkan tercapainya efisiensi pemisahan yang tinggi dalam satu unit operasi.

Di dalam D-01, fraksi ringan yang didominasi oleh air dan senyawa volatil lainnya bergerak menuju bagian atas kolom dan keluar sebagai produk atas (distillate). Distilat ini masih mengandung sejumlah kecil furfural yang belum terpisah sempurna. Sementara itu, fraksi kaya furfural terkonsentrasi pada zona produk utama (sidestream) yang berada di sisi dividing wall. Aliran ini diambil sebagai produk utama furfural dengan kemurnian mencapai 98–99% berat, sesuai dengan spesifikasi furfural teknis yang umum dipasarkan secara komersial.

Pada bagian bawah kolom, solvent n-butyl cellosolve bersama fraksi berat (heavy ends) terkumpul sebagai aliran bottom product. Solvent kemudian dipulihkan dan direcycle kembali ke bagian atas kolom sehingga kebutuhan solvent segar dapat ditekan dan biaya operasi menjadi lebih ekonomis. Produk furfural dengan kemurnian 98–99% selanjutnya dipompa menuju tangki penyimpanan produk (F-110 dan F-120) yang dirancang sesuai standar API 650. Tangki penyimpanan ini beroperasi pada kondisi tekanan atmosferik dan suhu lingkungan serta berfungsi sebagai buffer inventory sebelum produk didistribusikan ke konsumen atau dipasarkan.

2.5 Neraca Massa dan Neraca Panas

2.5.1 Neraca Massa

Berikut ini adalah rangkuman dari neraca massa pabrik furfural dengan kapasitas 5.000 ton/tahun. Perhitungan lengkapnya terlampir pada lampiran B.

1. Neraca Massa di Mixer (M-01)

Tabel 2.8. Neraca Massa di Mixer (M-01)

Komponen	Aliran 1 (kg/jam)	Aliran 2 (kg/jam)	Aliran 3 (kg/jam)	Aliran 4 (kg/jam)
Air (H ₂ O)	25.405,04	–	–	1.197,00
Asam Sulfat (H ₂ SO ₄)	–	136,42	–	–
Hemiselulosa (Pentosan)	–	–	1.114,10	–
Selulosa	–	–	1.782,56	–
Lignin	–	–	980,41	–
Abu	–	–	267,38	–
Ekstraktif + Protein + Lain	–	–	534,77	–
Total	25.405,04	136,42	4.679,22	1.197,00

Tabel 2.9. Tabel Output Mixer M-01

Komponen	Aliran 1 (kg/jam)	Aliran 2 (kg/jam)	Aliran 3 (kg/jam)	Aliran 4 (kg/jam)
Air (H ₂ O)	25.405,04	–	–	1.197,00
Asam Sulfat (H ₂ SO ₄)	–	136,42	–	–
Hemiselulosa (Pentosan)	–	–	1.114,10	–
Selulosa	–	–	1.782,56	–
Lignin	–	–	980,41	–
Abu	–	–	267,38	–
Ekstraktif + Protein + Lain	–	–	534,77	–
Total	25.405,04	136,42	4.679,22	1.197,00

2. Neraca Massa di Reaktor (R-01)

Tabel 2.10. Neraca Massa R-01

Komponen	Fase	INPUT Aliran 5 (kg/jam)	OUTPUT Aliran 6 (kg/jam)
Hemiselulosa (Pentosan)	Slurry	1.114,10	111,41
Selulosa	Slurry	1.782,56	1.746,91
Lignin	Slurry	980,41	931,39
Abu	Slurry	267,38	267,38
Ekstraktif + Protein	Slurry	534,77	534,77
Air (H ₂ O)	Liquid	26.602,04	25.264,35
Asam Sulfat (H ₂ SO ₄)	Liquid	136,42	136,42
Xylose (C ₅ H ₁₀ O ₅)	Cair	–	1.139,42
Glukosa (C ₆ H ₁₂ O ₆)	Cair	–	39,61
Lignin terdegradasi	Cair	–	49,02
Total		31.417,68	30.220,68

3. Neraca Massa di Flash Tank + Centrifuge (FT-01)

Tabel 2.11. Neraca Massa FT-01

Komponen	Fase	INPUT Aliran 6 (kg/jam)	OUTPUT Aliran 9 (kg/jam)	OUTPUT Aliran 8 (kg/jam)	OUTPUT Aliran 7 (kg/jam)
Hemiselulosa sisa	Padat	111,41	–	66,85	44,56
Selulosa sisa	Padat	1.746,91	–	1.711,97	34,94
Lignin sisa	Padat	931,39	–	912,76	18,63
Abu	Padat	267,38	–	262,04	5,34
Ekstraktif + Protein	Padat	534,77	–	524,07	10,70
Air (H ₂ O)	Campuran	25.264,35	4.547,58	5.280,04	15.436,72
Asam Sulfat (H ₂ SO ₄)	Liquid	136,42	–	–	136,42
Xylose	Liquid	1.139,42	–	–	1.139,42
Pentosan terlarut	Liquid	111,41	–	–	44,56
Glukosa	Liquid	39,61	–	–	39,61
Lignin terdegradasi	Liquid	49,02	–	–	49,02
Solid lolos (2%)	Solid	71,84	–	–	71,84
Total		30.220,68	4.547,58	8.757,73	16.917,59

4. Neraca Massa di Kondensor CD-02

Tabel 2.12. Neraca Massa CD-02

Komponen	INPUT Aliran 9 (kg/jam)	OUTPUT Aliran 4 (kg/jam)	OUTPUT Aliran 14 (kg/jam)
Air (H ₂ O)	4.547,58	1.197,00	3.350,58
Total	4.547,58	1.197,00	3.350,58

5. Neraca Massa di R-02

Tabel 2.13. Neraca Massa R-02

Komponen	Fase	INPUT Aliran 7 (kg/jam)	OUTPUT Aliran 10 (kg/jam)	OUTPUT Aliran 11 (kg/jam)
Air (H ₂ O)	Campuran	15.436,72	316,16	15.491,71
Xylose (C ₅ H ₁₀ O ₅)	Liquid	1.139,42	–	154,05
Pentosan terlarut	Liquid	44,56	–	4,46
Glukosa	Liquid	39,61	–	39,61
Lignin terdegradasi	Liquid	49,02	–	49,02
Solid lolos (2%)	Solid	71,84	–	71,84
Asam Sulfat (H ₂ SO ₄)	Liquid	136,42	–	136,42
Furfural (C ₅ H ₄ O ₂)	Campuran	–	646,61	13,20
Total		16.917,59	962,77	15.960,31

6. Neraca Massa di CD-02

Tabel 2.14. Neraca Massa CD-02

Komponen	INPUT Aliran 10 (kg/jam)	OUTPUT Aliran 12 (kg/jam)
Air (H ₂ O)	316,16	316,16
Furfural (C ₅ H ₄ O ₂)	646,61	646,61
Total	962,77	962,77

7. Neraca Massa di D-01

Tabel 2.15. Neraca Massa D-01

Komponen	INPUT			OUTPUT	
	Aliran 12	Aliran 15	Aliran 16	Aliran 17	Aliran 18
	(kg/jam)	(kg/jam)	(kg/jam)	(kg/jam)	(kg/jam)
Air (H ₂ O)	316,16	–	–	315,88	0,28
Furfural (C ₅ H ₄ O ₂)	646,61	–	–	9,21	637,40
n-Butyl Chloride	–	10,90	612,17	623,07	–
Total	962,77	10,90	612,17	948,16	637,68

2.5.2 Neraca Panas

Berikut ini adalah rangkuman dari neraca panas pabrik furfural dengan kapasitas 5.000 ton/tahun. Perhitungan lengkapnya terlampir pada lampiran B.

1. Neraca Panas di M-01

Tabel 2.16. Neraca Panas di sekitar Mixer (M-01)

Komponen	INPUT			OUTPUT
	H1 dan H2 (30°C, kJ/jam)	H3 (30°C, kJ/jam)	H4 (30°C, kJ/jam)	H5 (30.7°C, kJ/jam)
Air (H ₂ O)	635.990,03	–	–	635.990,03
Asam Sulfat (H ₂ SO ₄)	1.090,73	–	–	1.090,73
Hemiselulosa (Pentosan)	–	7.115,49	–	7.115,49
Selulosa	–	11.445,82	–	11.445,82
Lignin	–	6.550,77	–	6.550,77
Abu + Ekstraktif	–	3.032,91	–	3.032,91
Slurry total	–	–	–	665.225,75
Total	637.080,76	28.144,99	0	665.225,75

2. Neraca Panas di HE-01

Tabel 2.17. Neraca Panas di sekitar Mixer (M-01)

Komponen	INPUT		OUTPUT
	H5 (30.7°C, kJ/jam)	Q Steam (3 bar, kJ/jam)	H6 (120°C, kJ/jam)
Air (H ₂ O)	637.080,76	–	10.601.862,67
TKKS kering	32.085,29	–	534.754,86
Q steam (3 bar)	–	11.630.501,64	–
Q heat loss (10%)	–	–	1.163.050,16
Total	669.166,05	11.630.501,64	11.136.617,53

3. Neraca Panas di R-01

Tabel 2.18. Neraca Panas di sekitar Reaktor (R-01)

Komponen	INPUT		OUTPUT	
	H6 (120°C, kJ/jam)	Q (7 bar, kJ/jam)	H7 (160°C, kJ/jam)	Q Reaksi (endoterm, kJ/jam)
Air (H ₂ O)	10.105.716,91	–	14.389.190,52	–
Asam Sulfat (H ₂ SO ₄)	19.299,06	–	27.811,94	–
Hemiselulosa (Pentosan)	135.194,24	–	19.211,81	–
Selulosa	217.470,62	–	302.856,45	–
Lignin	124.464,72	–	168.027,37	–
Abu + Ekstraktif	57.625,29	–	81.888,57	–
Xylose	–	–	243.238,33	–
Glukosa	–	–	8.455,16	–
Lignin terdegradasi	–	–	10.664,31	–
Q steam (7 bar)	–	6.421.696,69	–	–
Q Reaksi (endoterm)	–	–	–	1.187.953,38
Q heat loss (10%)	–	–	642.169,67	–
Total	10.659.770,83	6.421.696,69	15.251.344,47	1.187.953,38

4. Neraca Panas di FT-01

Tabel 2.19. Neraca Panas di sekitar FT-01

Komponen	INPUT		OUTPUT	
	H7 (160°C, kJ/jam)	H8 (100°C, kJ/jam)	H10 (90°C, kJ/jam)	H9 (90°C, kJ/jam)
Air (H ₂ O) sensible	14.389.190,52	641.515,07	–	6.277.482,21
Air (H ₂ O) laten vap	–	10.263.894,34	–	–
Asam Sulfat	27.811,94	–	–	13.050,21
Padatan	572.984,09	–	1.700.433,03	–
Xylose, Glukosa, Lignin deg	261.133,25	–	–	135.790,39
Pentosan, Solid lolos	–	–	–	10.533,20
Q heat loss (Flash)	–	1.752.705,29	–	–
Q heat loss (Centrifuge)	–	–	697.215,62	–
Total	15.251.344,47	11.003.091,48	1.700.433,03	4.342.506,78

5. Neraca Panas di HE-02

Tabel 2.20. Neraca Panas di sekitar HE-02

Komponen	INPUT		OUTPUT
	H9 (90°C, kJ/jam)	Q Steam (5.5 bar, kJ/jam)	H11 (150°C, kJ/jam)
Air (H ₂ O)	4.192.602,94	–	8.120.998,50
Asam Sulfat (H ₂ SO ₄)	13.050,21	–	25.665,44
Xylose	117.114,75	–	225.220,67
Pentosan terlarut	4.454,72	–	8.566,77
Glukosa	4.071,00	–	7.828,85
Lignin terdegradasi	5.134,67	–	9.874,37
Solid lolos	6.078,47	–	11.689,37
Q steam (5.5 bar)	–	4.519.263,56	–
Q heat loss (10%)	–	–	451.926,36
Total	4.342.506,78	4.519.263,56	8.409.843,98

6. Neraca Panas R-02

Tabel 2.21. Neraca Panas di sekitar R-02

Komponen	INPUT		OUTPUT		
	H11 (150°C, kJ/jam)	Q Steam (kJ/jam)	H12 (97.9°C, kJ/jam)	H13 (97.9°C, kJ/jam)	Q Reaksi (eksoterm, kJ/jam)
Air (H ₂ O)	8.120.998,50	–	813.678,18	4.720.199,28	–
Asam Sulfat	25.665,44	–	–	14.683,57	–
Xylose	225.220,67	–	–	17.758,34	–
Pentosan terlarut	8.566,77	–	–	499,61	–
Glukosa	7.828,85	–	–	4.565,79	–
Lignin terdegradasi	9.874,37	–	–	5.758,73	–
Solid lolos	11.689,37	–	–	6.817,24	–
Furfural (vapour)	–	–	380.683,34	1.629,96	–
Q steam (5.5 bar)	–	4.900.120,31	–	–	–
Q Reaksi eksoterm	–	–	–	–	57.776,22
Q Reaksi endoterm	–	–	–	–	47.518,14
Q heat loss (10%)	–	–	–	49.001,20	–
Q flash (adiabatik)	–	–	–	7.306.865,37	–
Total	8.409.843,98	4.900.120,31	1.194.361,52	4.771.912,53	57.776,22

7. Neraca Panas di CD-02

Tabel 2.22. Neraca Panas di sekitar Kondensor (CD-02)

Komponen	INPUT	OUTPUT
	H12 – Vapour Masuk (kJ/jam)	H16 – ke D-01 (40°C, kJ/jam)
Air (H ₂ O) – sensibel	43.341,90	–
Air (H ₂ O) – laten	721.866,11	–
Furfural (vapour) – sensibel	57.900,75	–
Furfural – laten	341.217,07	–
Air outlet liquid	–	19.830,52633
Furfural outlet liquid	–	16.433,79199
Q ke Cooling Water	–	10.629.170,44
Q heat loss (10%)	–	1.216.741,73
Total	1.164.325,822	1.164.325,822

8. Neraca Panas di D-01

Tabel 2.23. Neraca Panas di sekitar Destilasi (D-01)

Komponen	Inlet (kJ/jam)	Outlet (kJ/jam)
<i>H feed 1</i>	73160,61848	-
<i>H feed 2</i>	1750925,542	-
<i>Q steam aktual</i>	6275243,649	-
<i>H distilat</i>	-	519069,9813
<i>H bottom</i>	-	6952735,463
<i>Q heat loss</i>	-	627524,3649
Total	8099329,81	8099329,81

2.6 Tata Letak Pabrik dan Pemetaan

Tata letak pabrik merupakan perencanaan menyeluruh mengenai penempatan dan pengaturan fasilitas produksi dalam suatu industri guna menciptakan sistem kerja yang efektif dan efisien. Secara umum, perencanaan ini mencakup pengaturan area produksi, utilitas, penyimpanan bahan baku dan produk jadi, perkantoran, ruang perluasan, serta berbagai fasilitas pendukung lainnya. Penataan yang baik sangat diperlukan agar seluruh area pabrik dapat dimanfaatkan secara optimal sehingga kelangsungan proses produksi dapat berjalan tanpa hambatan. Selain mempertimbangkan efisiensi operasional, penempatan peralatan produksi juga harus memperhatikan aspek kesehatan dan keselamatan kerja bagi seluruh tenaga kerja yang terlibat. Fasilitas penunjang seperti gedung perkantoran, bengkel, poliklinik, laboratorium, kantin, unit pemadam kebakaran, dan pos keamanan perlu diatur posisinya agar tidak menimbulkan gangguan terhadap jalannya proses produksi.

Menurut Yamit dalam Ramadhan (2012), terdapat beberapa prinsip dasar yang menjadi acuan dalam penyusunan tata letak fasilitas pabrik, yaitu:

1. Integrasi secara total

Seluruh faktor yang berpengaruh terhadap proses produksi harus dipertimbangkan secara menyeluruh dan terintegrasi dalam satu sistem tata letak yang terpadu.

2. Meminimalkan jarak perpindahan material

Perpindahan bahan dari satu tahap proses ke tahap berikutnya sebaiknya dirancang dengan jarak sedekat mungkin guna menghemat waktu dan biaya transportasi internal.

3. Kelancaran aliran kerja

Pergerakan material dalam proses produksi dirancang agar berlangsung secara kontinu tanpa adanya penundaan atau gangguan yang dapat menghambat produktivitas.

4. Keselamatan dan kenyamanan kerja

Tata letak yang baik harus mampu menciptakan lingkungan kerja yang aman, nyaman, dan kondusif bagi seluruh karyawan yang bekerja di dalamnya.

5. Fleksibilitas

Susunan tata letak dirancang agar mudah disesuaikan apabila sewaktu-waktu diperlukan perubahan atau pengembangan, baik dalam skala kecil maupun besar, tanpa membutuhkan biaya dan waktu yang berlebihan.

2.6.1 Tata Letak Pabrik

Menurut Saputro & Kurniawan (2020), dalam merancang tata letak pabrik, terdapat beberapa aspek penting yang perlu dipertimbangkan agar operasional pabrik dapat berjalan secara efisien, aman, dan berkelanjutan, di antaranya sebagai berikut:

1) Perluasan Pabrik dan Penambahan Bangunan

Seiring berkembangnya kegiatan industri, kemungkinan terjadinya perluasan kapasitas produksi maupun penambahan fasilitas bangunan perlu diantisipasi sejak tahap perencanaan awal. Dengan mempersiapkan lahan cadangan sejak dini, permasalahan terkait keterbatasan ruang di masa mendatang dapat diatasi tanpa mengganggu operasional yang sedang berjalan. Pada pabrik furfural ini, sejumlah area telah disiapkan khusus sebagai lahan cadangan untuk mengakomodasi kemungkinan penambahan kapasitas produksi maupun pengembangan unit pengolahan di masa depan.

2) Keamanan

Proses produksi pada industri kimia berpotensi menimbulkan risiko bahaya seperti kebakaran, ledakan, paparan gas beracun, maupun tumpahan bahan kimia berbahaya. Oleh karena itu, penempatan setiap unit proses harus mempertimbangkan aspek keselamatan secara menyeluruh. Unit-unit yang mengandung bahan mudah terbakar atau bertekanan tinggi ditempatkan di area khusus dengan jarak aman yang memadai dari fasilitas lainnya. Sarana pemadam kebakaran dan *safety station* dengan perlengkapan lengkap disediakan di titik-titik strategis yang mudah dijangkau.

3) Luas Lahan yang Tersedia

Ketersediaan lahan merupakan faktor pembatas yang perlu diperhatikan sejak awal perencanaan pabrik. Tingginya harga tanah menuntut adanya efisiensi dalam pemanfaatan ruang, sehingga penempatan peralatan dan bangunan harus dirancang secara cermat. Peralatan yang saling berkaitan dalam alur proses diletakkan berdekatan untuk mengoptimalkan penggunaan lahan, sementara jumlah bangunan disesuaikan dengan kebutuhan aktual agar tidak terjadi pemborosan area.

4) Instalasi dan Utilitas

Kelancaran proses produksi sangat bergantung pada ketersediaan sistem instalasi dan utilitas yang memadai, mencakup pasokan air, *steam*, udara bertekanan, gas, dan listrik. Penempatan unit utilitas dirancang berdekatan dengan area proses utama agar distribusi

energi dan fluida berlangsung efisien, meminimalkan panjang perpipaan, serta memudahkan perawatan dan perbaikan oleh tenaga teknis.

Secara garis besar, kawasan pabrik furfural dari TKKS ini dibagi menjadi beberapa daerah utama, yaitu:

1) Daerah administrasi, perkantoran, laboratorium, dan ruang *control*

Area ini berfungsi sebagai pusat pengendalian operasional pabrik secara keseluruhan. Laboratorium bertugas melakukan analisis kualitas bahan baku dan produk, sedangkan ruang kontrol difungsikan untuk memantau dan mengendalikan jalannya proses produksi secara *real-time*.

2) Daerah proses produksi

Inti dari seluruh kegiatan pabrik, yaitu tempat berlangsungnya serangkaian proses konversi bahan baku TKKS menjadi produk furfural. Area ini ditempatkan pada lokasi dengan aksesibilitas tinggi, berdekatan dengan gudang penyimpanan guna memperlancar alur material.

3) Daerah pergudangan, bengkel, dan garasi

Gudang digunakan untuk menyimpan persediaan bahan baku maupun produk jadi, bengkel berfungsi sebagai unit perawatan dan perbaikan peralatan produksi, sedangkan garasi diperuntukkan bagi kendaraan operasional dan alat angkut barang.

4) Daerah utilitas

Area ini mencakup seluruh unit pendukung proses seperti sistem penyediaan air, pembangkit *steam*, unit pengolahan limbah, serta fasilitas kelistrikan. Penempatan daerah utilitas diatur agar tidak mengganggu alur proses produksi, namun tetap mudah diakses untuk keperluan operasional dan pemeliharaan.

Menurut Peters & Timmerhaus (1991), penyusunan tata letak pabrik (*plant layout*) dilakukan setelah diagram alir proses (*process flow diagram*) selesai dirancang dan sebelum perancangan detail piping, struktur, maupun instalasi listrik dimulai. Tata letak yang baik harus mempertimbangkan dua belas faktor utama, yaitu pengembangan lokasi baru atau penambahan pada lokasi yang sudah ada, jenis dan jumlah produk yang dihasilkan, jenis proses serta sistem pengendaliannya, kemudahan operasional dan aksesibilitas, distribusi utilitas dan layanan secara ekonomis, jenis bangunan dan persyaratan kode bangunan, pertimbangan kesehatan dan keselamatan, kebutuhan pengolahan limbah, peralatan penunjang, ketersediaan dan kebutuhan

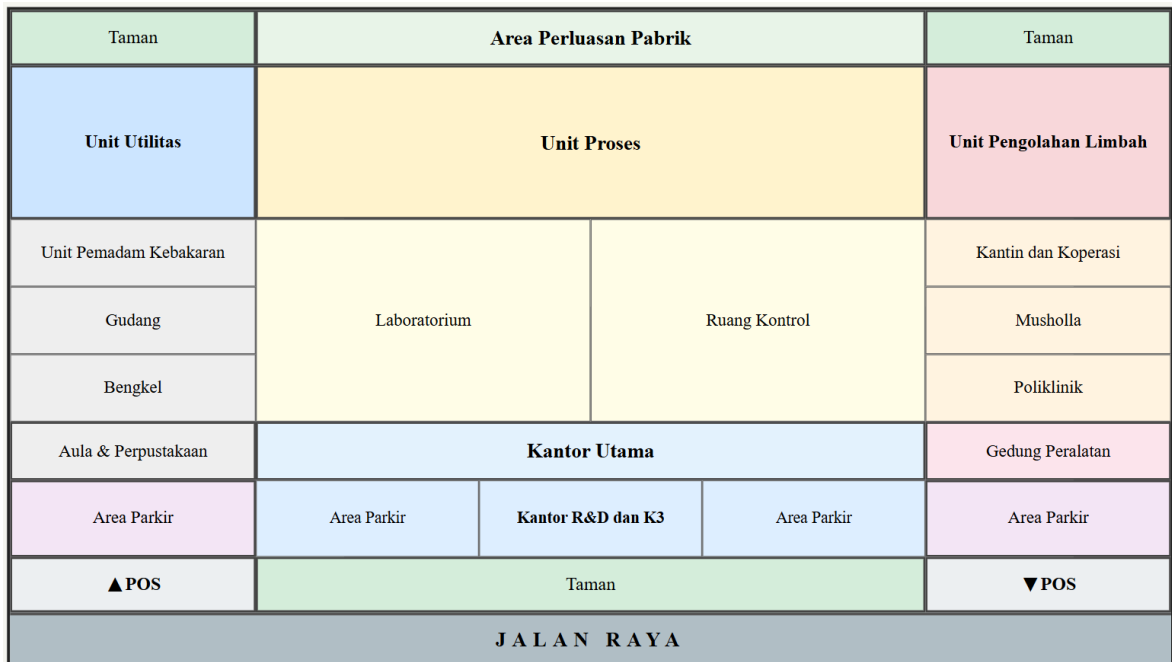
ruang, jalan dan jalur transportasi, serta kemungkinan perluasan di masa depan (Peters & Timmerhaus, 1991).

Penyusunan layout dilakukan secara bertahap, dimulai dari *elementary layout* yang menggambarkan hubungan dasar antara area penyimpanan dan peralatan operasi, kemudian dikembangkan menjadi *primary layout* yang memperhitungkan urutan operasi yang aman berdasarkan aliran material, unit operasi, penyimpanan, serta ruang untuk perluasan di masa depan. Pada tahap akhir, gambar skala (*scale drawings*) yang dilengkapi dengan indikasi elevasi digunakan untuk menentukan penempatan terbaik bagi peralatan dan fasilitas, sehingga rekomendasi detail beserta gambar-gambar pendukung dapat disusun. Untuk pabrik furfural ini, daftar bangunan beserta luasnya dapat dilihat pada Tabel 2.21 berikut:

Tabel 2.24. Daftar bangunan beserta luas lahan (Penulis, 2026)

No	Nama Bangunan/Area	Luas (m ²)
1	Area Pengembangan	1.500
2	Pos Keamanan	24
3	Masjid	100
4	Unit Utilitas	800
5	Laboratorium	100
6	Kantor Utama	300
7	Kantor R&D dan K3	100
8	Bengkel	150
9	Unit Pemadam Kebakaran	50
10	Area Proses	2.000
11	Koperasi dan Kantin	100
12	Jalan dan Taman	600
13	Gudang	150
14	Gedung Peralatan	250
15	Area Pengolahan Limbah	400
16	Aula	150
17	Perpustakaan	50
18	Ruang Kontrol	100
19	Poliklinik	60
20	Tempat Parkir	250
21	Unit Pengolahan Limbah	250
Total		7.434

Denah tata letak pabrik sebagai berikut:



Gambar 2.3. Tata Letak Pabrik

2.6.2 Tata Letak Peralatan Proses

Layout pabrik disebut juga tata letak atau tata ruang didalam pabrik. Layout pabrik adalah cara penempatan fasilitas-fasilitas produksi guna memperlancar proses produksi yang efektif dan efisien. Fasilitas pabrik dapat berupa mesin-mesin, alat-alat produksi, alat pengangkutan bahan, dan peralatan pengawasan. Menurut Arif (2017), perencanaan layout adalah rencana dari keseluruhan tata letak fasilitas industri yang didalamnya, termasuk bagaimana personelnnya ditempatkan, alat-alat operasi gudang, pemindahan material, dan alat pendukung lain sehingga akan tercipta suatu tujuan yang optimum dengan kegiatan yang ada dengan menggunakan fasilitas-fasilitas yang ada dalam perusahaan. Dengan layout yang baik dalam perusahaan akan menimbulkan impulse buying bagi konsumen. Tata letak alat-alat proses harus dirancang sedemikian rupa dengan tujuan:

1. Integrasi proses produksi secara total dapat terjamin.
2. Penggunaan luas lahan yang ada menjadi efektif.
3. Biaya material handling menjadi rendah sehingga urutan proses produksi lancer, maka perusahaan tidak perlu untuk memakai alat angkut dengan biaya mahal. Dalam pemakaian alat yang dibutuhkan juga tidak terlalu lama waktu yang dibutuhkan.

4. Karyawan mendapatkan kepuasan kerja sehingga produktivitas meningkat karena suasana kerja yang menyenangkan.

Hal inilah yang menjadi patokan pengeluaran agar tidak adanya *capital* yang tidak penting. Jika tata letak peralatan proses dilakukan sedemikian baik maka proses produksi menjadi lancar, perusahaan tidak perlu membeli alat-alat angkut yang menambah *cost* biaya produksi. Dalam menentukan tata letak proses produksi pada pabrik furfural, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan seperti:

- 1) Aliran bahan baku dan produk

Pengaliran bahan baku dan produk yang tepat akan memberikan keuntungan ekonomis serta menunjang kelancaran dan keamanan selama proses produksi. Hal yang harus diperhatikan adalah elevasi pipa, untuk pipa diatas tanah sebaiknya dipasang pada ketinggian 3 meter atau lebih, sementara pemipaan dan permukaan tanah perlu diatur sedemikian baik sehingga tidak mengganggu lalu lintas pekerja, dan apabila ada masalah dapat teratasi dengan mudah.

- 2) Aliran udara

Aliran udara di dalam dan disekitar area harus diperhatikan untuk menghindari terjadinya stagnasi udara pada suatu tempat yang dapat menyebabkan akumulasi zat atau bahan kimia yang dapat membahayakan keselamatan pekerja.

- 3) Cahaya

Penerangan seluruh pabrik harus memadai, terutama untuk tempat-tempat proses yang berbahaya atau berisiko tinggi perlu diberikan penerangan berlebih.

- 4) Operasi

Peralatan yang membutuhkan lebih dari satu operator harus diletakkan dekat dengan ruang control. Valve, tempat pengambilan sampel dan instrument harus diletakkan pada posisi dan ketinggian yang mudah dijangkau oleh operator.

- 5) Perawatan

Letak alat proses harus memperhatikan ruangan untuk perawatan. Misalnya pada *heat exchanger* yang memerlukan ruangan yang cukup untuk pembersihan *tube* agar lebih leluasa.

- 6) Keamanan

Letak alat-alat proses harus sebaik mungkin dengan memiliki akses yang mudah juga, agar jika terjadi kebakaran nantinya tidak ada yang terperangkap didalamnya serta mudah dijangkau oleh kendaraan atau alat pemadam kebakaran.

7) Perluasan dan pengembangan pabrik

Setiap pabrik yang didirikan diharapkan dapat berkembang dengan penambahan unit sehingga diperlukan susunan pabrik yang memungkinkan adanya perluasan.

8) Lalu lintas manusia dan barang

Dalam perancangan suatu pabrik, tata letak peralatan proses perlu diperhatikan agar pekerja dapat mencapai seluruh alat proses dengan mudah dan cepat. Jika terjadi gangguan secara mendadak pada alat proses maka dapat diperbaiki dengan cepat.

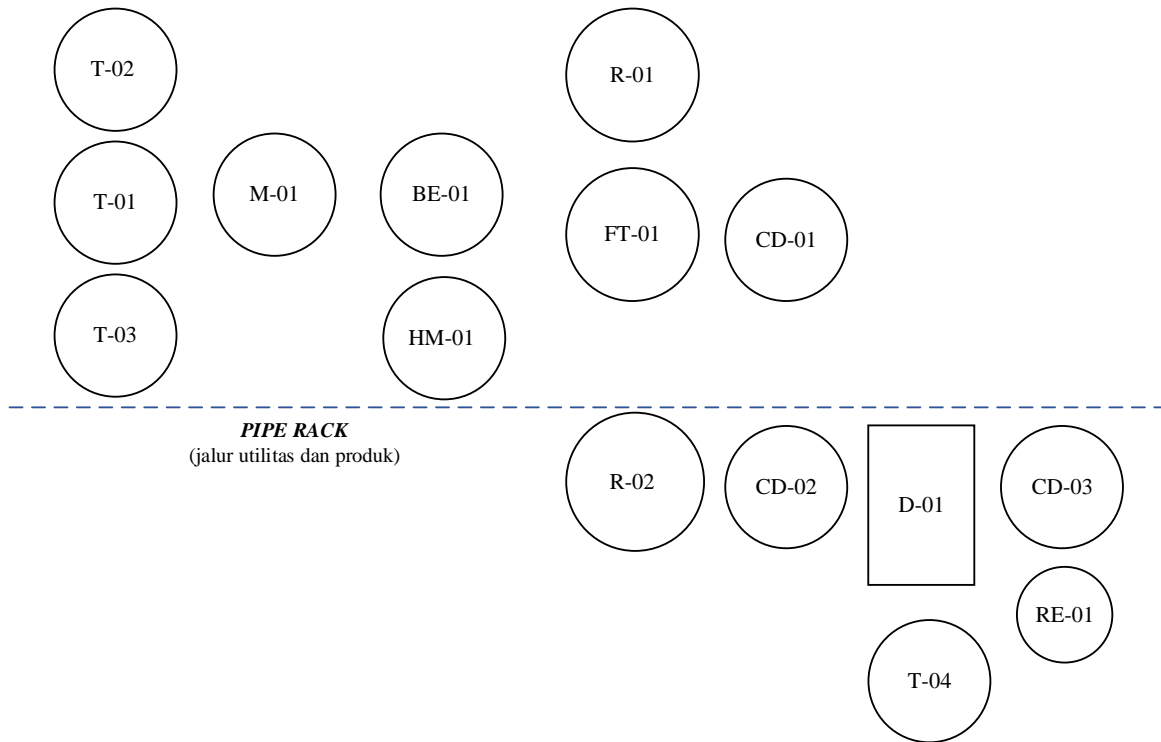
9) Pertimbangan ekonomi

Dalam perancangan alat-alat proses perlu diusahakan agar dapat menekan biaya operasi pabrik dan menjamin kelancaran dan keamanan proses produksi pabrik yang akan memberikan keuntungan dari segi ekonomi. Letak alat-alat proses harus sebaik mungkin sehingga memberikan biaya konstruksi dan operasi yang minimal.

10) Jarak antar alat proses

Jarak antara alat proses juga harus diperhatikan, jika alat proses yang beroperasi pada suhu dan tekanan tinggi, sebaiknya dipisahkan dari alat proses yang lain. Apabila terjadinya ledakan atau kebakaran pada alat tersebut, jika diberi jarak maka tidak membahayakan alat-alat proses lainnya. Letak alat harus memberikan ruangan yang cukup bagi masing-masing alat agar dapat beroperasi dengan baik.

Tata letak peralatan proses pada pra-rancangan pabrik furfural dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) ini dirancang berdasarkan prinsip-prinsip yang dikemukakan oleh Turton et al. (2009) dalam bukunya *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. Menurut Turton et al. (2009), sebelum pabrik dibangun, diperlukan representasi tiga dimensi dari proses karena banyak aspek konstruksi yang tidak dapat diselesaikan hanya dari diagram dua dimensi seperti PFD atau P&ID. Penentuan tata letak peralatan yang tepat bertujuan untuk meminimalkan biaya konstruksi dan operasional, menjamin keselamatan kerja, memudahkan akses perawatan, serta memperlancar aliran material antar peralatan. Pada pra rancangan pabrik furfural ini tata letak peralatan proses dapat dilihat pada Gambar 2.6, sebagai berikut:



Gambar 2.4. Tata Letak Peralatan Proses (Penulis, 2026)

A. Konfigurasi Layout: *Grade-Level Horizontal In-Line Arrangement*

Berdasarkan Turton et al. (2009, hal. 55), terdapat dua konfigurasi dasar dalam penyusunan plot plan peralatan proses, yaitu *grade-level horizontal in-line arrangement* dan *structure-mounted vertical arrangement*. Pada pra-rancangan pabrik furfural ini, konfigurasi yang dipilih adalah *grade-level horizontal in-line arrangement*, dengan pertimbangan sebagai berikut:

- Seluruh peralatan proses utama ditempatkan di lantai dasar (*grade level*) yang memungkinkan kemudahan akses untuk operasional, inspeksi, dan perawatan rutin.
- Peralatan disusun secara linier mengikuti aliran proses dari kiri ke kanan (bahan baku masuk di sisi kiri, produk keluar di sisi kanan), sehingga meminimalkan jarak perpindahan material dan kerumitan pemipaan.
- Pemasangan vertikal peralatan dibatasi hanya pada satu tingkat, kecuali untuk Dividing Wall Column (D-01) yang wajib dielevasi karena alasan operasional yang akan dibahas pada poin tersendiri.

Konfigurasi ini memang membutuhkan lahan yang lebih luas dibandingkan *structure-mounted vertical arrangement*, namun memberikan kemudahan operasi dan perawatan

yang lebih baik, serta biaya konstruksi yang lebih rendah sesuai pertimbangan Turton et al. (2009).

B. Pembagian PFD menjadi Tiga Subsistem Logis

Langkah pertama dalam penyusunan tata letak menurut Turton et al. (2009, hal. 54) adalah membagi PFD menjadi subsistem-subsistem logis berdasarkan fungsinya. Pembagian ini memudahkan perencanaan tata letak setiap subseksi secara terpisah sebelum diintegrasikan menjadi satu kesatuan. Pada pabrik furfural ini, seluruh peralatan dibagi menjadi tiga zona subsistem, yaitu:

1. Zona 1 (Persiapan Bahan Baku)

Mencakup T-01 (Tangki H_2SO_4), T-02 (Tangki Air), T-03 (Gudang TKKS), HM-01 (Hammer Mill), BE-01 (Bucket Elevator), dan M-01 (Mixer). Zona ini bertanggung jawab atas pengkondisian seluruh bahan baku sebelum masuk ke tahap reaksi, termasuk menerima aliran recycle kondensat dari Kondensat Tank (downstream CD-01, Zona 2) yang dikembalikan ke M-01 melalui pipe rack sebesar 1.197 kg/jam.

2. Zona 2 (Reaksi dan Pemisahan)

Mencakup R-01 (Reaktor Prahidrolisis), FT-01 (Flash Tank dan Centrifuge), CD-01 (Kondensor Uap Flash), Kondensat Tank, dan R-02 (Reaktor Hidrolisis dan Dehidrasi SupraYield®). Zona ini merupakan inti dari proses konversi pentosan menjadi furfural. Uap air yang terbentuk di FT-01 (4.548 kg/jam) dikondensasi di CD-01 dan ditampung sementara di Kondensat Tank; sebagian kondensat (fraksi 25%, sebesar 1.197 kg/jam) di-recycle kembali ke M-01, sedangkan cairan overflow dari centrifuge FT-01 dialirkan langsung ke R-02.

3. Zona 3 (Pemurnian dan Produk)

Mencakup CD-02 (Kondensor Uap Furfural dari R-02), D-01 (Dividing Wall Column), CD-03 (Kondensor Refluks D-01), RE-01 (Reboiler), T-04 (Tangki Produk Furfural), dan T-05 (Tangki Recycle n-Butyl Chloride). Zona ini bertugas memurnikan furfural hasil reaksi dari R-02 hingga mencapai kemurnian 98–99% berat menggunakan ekstraksi dengan n-Butyl Chloride sebagai solven di dalam D-01.

Pembagian zona ini tidak hanya berfungsi sebagai panduan perencanaan layout, tetapi juga memudahkan manajemen utilitas karena setiap zona dapat dilayani oleh titik distribusi steam, air pendingin, dan listrik yang terpisah.

C. Pipe Rack sebagai Tulang Punggung Distribusi Utilitas

Turton et al. (2009, hal. 55) menegaskan bahwa dalam konfigurasi grade-level horizontal in-line arrangement, harus terdapat pipe rack yang membentang sepanjang unit proses. Pipe rack berfungsi sebagai jalur utama distribusi pipa utilitas (steam, air proses, air pendingin, udara bertekanan), pipa produk, dan pipa umpan dari dan menuju unit proses.

Pada pabrik furfural ini, pipe rack diposisikan secara horizontal di tengah area proses, memisahkan peralatan zona 1–2 di sisi atas dari peralatan zona 3 di sisi bawah. Setiap alat proses terhubung ke pipe rack melalui cabang pipa yang tegak lurus terhadap arah pipe rack. Turton et al. (2009) juga menjelaskan bahwa ketika jalur pemipaan proses harus melewati sisi lain dari unit proses, jalur tersebut dapat diarahkan melalui pipe rack, sehingga menghindari interferensi dengan peralatan lain. Prinsip ini diterapkan pada aliran recycle kondensat dari Kondensat Tank (Zona 2) yang kembali ke M-01 (Zona 1), di mana jalurnya memanfaatkan pipe rack sebagai jalur distribusi agar tidak mengganggu lalu lintas operator di lantai dasar.

D. Posisi T-03 (Gudang TKKS), HM-01, dan BE-01

T-03 (Gudang TKKS) merupakan bangunan penyimpanan padat (solid storage) yang secara fisik merupakan struktur terpisah berupa gudang. Menurut prinsip tata letak Turton et al. (2009), area penyimpanan bahan baku padat harus dipisahkan dari area proses aktif dan ditempatkan di zona tersendiri yang memiliki akses jalan untuk kendaraan pengangkut material.

Hammer Mill (HM-01) dan Bucket Elevator (BE-01) ditempatkan sebagai jembatan antara zona penyimpanan (T-03) dan zona proses aktif (M-01). Aliran material dari T-03 ke HM-01 bersifat gravitasi atau belt conveyor mendatar, kemudian BE-01 mengangkat material yang telah dihancurkan secara vertikal ke M-01. Penempatan ini meminimalkan jarak horizontal perpindahan material padat dan menghindari risiko tumpahan material yang dapat mengganggu jalur operator.

E. Penempatan R-01, FT-01, CD-01 dan R-02 secara Berurutan

Keempat alat yang termasuk dalam Zona 2 ditempatkan secara berurutan mengikuti arah aliran proses. Turton et al. (2009, hal. 58) menekankan bahwa penempatan peralatan harus mempertimbangkan kemudahan akses untuk perawatan dan instalasi awal, karena penempatan yang salah dapat menyebabkan pembengkakan biaya konstruksi yang signifikan dan masalah operasional jangka panjang.

R-01 (Reaktor Prahidrolisis) ditempatkan berdekatan dengan FT-01 (Flash Tank dan Centrifuge) karena slurry panas bertekanan tinggi (150–160°C, 6–8 bar) yang keluar dari R-01 harus segera mengalami depressurisasi di flash tank untuk mencegah perpanjangan waktu tinggal yang tidak diinginkan. Jarak yang pendek antara R-01 dan FT-01 juga meminimalkan kehilangan panas melalui dinding pipa.

Uap yang terbentuk di FT-01 (sekitar 18% dari air umpan, sebesar 4.548 kg/jam) dialirkan ke CD-01 yang ditempatkan berdekatan untuk segera dikondensasi. Kondensat hasil CD-01 ditampung di Kondensat Tank yang ditempatkan tepat di bawah atau di sisi CD-01 sehingga aliran gravitasi dapat bekerja tanpa pompa tambahan. Dari Kondensat Tank, sebagian kondensat (fraksi 25%, sebesar 1.197 kg/jam) di-recycle kembali ke M-01 melalui pipe rack, sementara sisanya dibuang sebagai blowdown. Selanjutnya, overflow cairan centrifuge yang mengandung xylose, glukosa, dan asam sulfat (16.918 kg/jam) dialirkan langsung ke R-02 yang berada satu baris di sebelahnya, memanfaatkan perbedaan tekanan operasi sebagai driving force aliran.

F. Penempatan CD-02 Berdekatan dengan D-01

Uap furfural yang terbentuk di R-02 (sebesar 962,77 kg/jam, mengandung 98% furfural dan 2% air dari fasa vapour) dialirkan ke CD-02 (Kondensor Uap Furfural) sebelum masuk ke D-01. Turton et al. (2009, hal. 61) menjelaskan bahwa kondensor yang berfungsi sebagai pre-condenser sebelum unit pemisahan harus ditempatkan sedekat mungkin dengan unit tersebut untuk meminimalkan kondensasi prematur uap furfural sepanjang jalur pipa dan mengurangi kehilangan produk.

CD-02 diletakkan tepat di sisi masuk D-01 pada posisi grade level sehingga kondensat campuran furfural-air yang dihasilkan (pada suhu 40°C) dapat langsung mengalir sebagai umpan cair ke D-01. Dengan konfigurasi ini, jalur pipa dari CD-02 ke D-01 sangat pendek, meminimalkan kehilangan panas dan tekanan sebelum umpan masuk ke kolom distilasi ekstraktif.

G. Penempatan CD-03 (Kondensor Refluks) di Atas D-01

Menurut Turton et al. (2009), menjelaskan bahwa pada kolom distilasi, overhead condenser harus ditempatkan berdekatan secara vertikal dengan bagian atas kolom agar kondensat dapat mengalir secara gravitasi dari kondensor ke kolom sebagai refluks tanpa memerlukan pompa tambahan. Prinsip yang sama diterapkan pada penempatan CD-03 di pabrik furfural ini.

CD-03 diletakkan tepat di atas D-01 secara vertikal sehingga kondensat distilat (campuran air, furfural sisa, dan n-Butyl Chloride) yang dihasilkan pada suhu 93°C dapat langsung mengalir kembali ke bagian atas kolom sebagai aliran refluks. Uap distilat yang keluar dari puncak D-01 pada suhu 97,9°C (kondisi azeotrop furfural-air, 1 atm) menggunakan jalur pipa yang pendek dan langsung ke CD-03, meminimalkan kondensasi prematur uap sebelum mencapai kondensor.

H. Elevasi D-01 (Dividing Wall Column)

Menurut Turton et al. (2009), kolom distilasi pada umumnya harus dielevasi antara 3 hingga 5 meter di atas grade level menggunakan skirt, dengan dua alasan utama:

Alasan Pertama, untuk mencegah Kavitasi pada Pompa Produk Bawah. Produk bawah kolom distilasi berada dalam kondisi cairan pada titik gelembung (bubble point). Ketika cairan ini mengalir ke pompa melalui pipa suction, penurunan tekanan akibat gesekan sepanjang pipa menyebabkan sebagian cairan menguap dan mengakibatkan kavitasi pada pompa. Untuk menghindari hal ini, diperlukan *Net Positive Suction Head Available* (NPSHA) yang cukup besar, yang hanya dapat dicapai dengan memberikan head statis berupa perbedaan ketinggian antara dasar kolom dan inlet pompa. Turton et al. (2009) merekomendasikan perbedaan ketinggian 3–5 meter sebagai nilai yang umumnya mencukupi.

Alasan Kedua, *Driving Force* untuk Thermosiphon Reboiler (RE-01). D-01 menggunakan RE-01 sebagai thermosiphon reboiler. Mekanisme sirkulasi thermosiphon bekerja berdasarkan perbedaan densitas antara cairan yang masuk ke reboiler dengan campuran dua fasa (cairan jenuh-uap) yang keluar dari reboiler, sehingga menciptakan sirkulasi alami tanpa pompa. Agar driving force sirkulasi ini cukup besar, diperlukan head statis cairan yang substansial, yaitu perbedaan ketinggian antara level cairan di dalam kolom dan inlet reboiler sebesar 3–5 meter, sesuai pernyataan Turton et al. (2009)

Berdasarkan kedua pertimbangan di atas, D-01 pada pabrik furfural ini dielevasi menggunakan skirt dengan tinggi 3–5 meter dari grade level. RE-01 ditempatkan di sisi D-01 pada posisi grade level, dengan inlet reboiler berada tepat di bawah dasar kolom untuk memanfaatkan selisih ketinggian yang dihasilkan oleh skirt. T-05 (Tangki Recycle n-Butyl Chloride) juga ditempatkan berdekatan dengan D-01 pada grade level karena aliran bottom D-01 yang mengandung furfural murni dan n-BC mengalir secara gravitasi ke T-05 sebelum n-BC di-recycle kembali ke D-01.

I. Pemipaan Proses dan Penempatan Instrumen

Menurut Turton et al. (2009, hal. 60), tahap akhir dari penyusunan preliminary plant layout adalah merencanakan rute pipa proses dan utilitas utama. Tidak ada aturan baku dalam menentukan rute pipa, namun jalur terpendek yang menghindari benturan dengan peralatan lain dan pipa yang sudah ada adalah yang paling diinginkan. Jalur pipa utilitas berasal dari dan berakhir di header yang terletak pada pipe rack.

Semua control valve, sampling port, dan instrumen utama harus ditempatkan pada posisi yang mudah dijangkau oleh operator, umumnya dekat dengan grade level atau platform akses baja. Pada pabrik furfural ini, seluruh instrumen pengukuran tekanan dan temperatur pada R-01 dan R-02 yang beroperasi pada tekanan tinggi ditempatkan pada sisi yang menghadap ke koridor operator, dengan ketinggian yang dapat dijangkau dari lantai dasar tanpa tangga. Control valve pada jalur steam supply ke R-01, R-02, dan reboiler RE-01 juga diposisikan pada ketinggian tidak lebih dari 1,5 meter dari lantai dasar sesuai prinsip aksesibilitas (Turton et al., 2009).

J. Aliran Recycle Distilat

Tata letak peralatan pada pabrik furfural ini juga mempertimbangkan jalur aliran recycle kondensat dari Kondensat Tank kembali menuju M-01. Uap air yang terbentuk di FT-01 (Aliran 9, 4.548 kg/jam) dikondensasi di CD-01 menjadi kondensat cair, kemudian ditampung di Kondensat Tank. Sebagian kondensat tersebut (Aliran 4, 25% = 1.197 kg/jam) di-recycle ke M-01 sebagai bagian dari liquor pengencer umpan reaktor, menggantikan sebagian kebutuhan air segar. Menurut Turton et al. (2009), ketika pipa proses harus melintasi dari satu sisi ke sisi lain unit proses, jalur tersebut sebaiknya diarahkan melalui pipe rack untuk menghindari interferensi dengan peralatan lain di lantai dasar. Oleh karena itu, jalur recycle dari Kondensat Tank (Zona 2) ke M-01 (Zona 1)

diarahkan melalui pipe rack yang membentang secara horizontal di tengah area proses, sehingga tidak membentang di lantai dasar yang dapat mengganggu lalu lintas operator dan kendaraan perawatan. Perlu dicatat bahwa distilat puncak D-01 (Aliran 13, mengandung air 315,87 kg/jam, furfural sisa 9,05 kg/jam, dan n-Butyl Chloride 10,96 kg/jam) bukan merupakan aliran recycle ke M-01, melainkan dikondensasi oleh CD-03 dan sebagian dikembalikan ke D-01 sebagai refluks kolom.