

BAB II

DESKRIPSI PROSES

2.1 Spesifikasi Bahan Baku dan Produk

2.1.1 Spesifikasi Bahan Baku

Bahan baku pembuatan furfural didapat dari PT. Majapahit Cahaya Nusantara dan PT. Petrokimia Gresik dengan kandungan sebagai berikut:

1. Sekam Padi

Tabel 2.1 Spesifikasi sekam padi menurut PT Majapahit Cahaya Nusantara (2025) yaitu:

Spesifikasi	Nilai (%)
<i>Total moisture</i>	9,91
<i>Total Sulfur</i>	0,003
<i>Total Ash</i>	20,16

Sifat fisika dari sekam padi menurut Siahan dkk. (2013), sebagai berikut:

Sifat Fisika:

- Warna : Kekuningan atau Keemasan
- Kerapatan Jenis : 1,125 kg/m³
- Lebar : 2,5 – 5 mm
- Panjang : 5 – 10 mm

Berikut merupakan kandungan kimia pada sekam padi menurut Jahiding dkk. (2011), dapat dilihat pada Tabel 2.2 yaitu:

Tabel 2.2 Kandungan Kimia dalam Sekam Padi (Jahiding dkk., 2011)

No.	Kandungan	Kadar (%) Berat
1.	Karbohidrat Kasar	33,38
2.	Pentosa	18,81
3.	Protein Kasar	3,03

4.	Serat Kasar	26,76
5.	Lemak	1,18
6.	Air	11,88
7.	Abu	4,96

2. Asam Sulfat

Berikut merupakan sifat fisika dan kimia dari asam sulfat sebagai berikut:

Spesifikasi Asam sulfat menurut Anggaeni dkk., (2020) yaitu:

- Bentuk : Cair (30°C, 1 atm)
- Warna : Bening
- Bau : Berbau menyengat
- Komposisi : $\text{H}_2\text{SO}_{4(l)}$ minimum = 98% berat
 $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$ maksimum = 2% berat

Menurut Perry & Green, (2008), sifat fisika dan kimia asam sulfat adalah sebagai berikut:

Sifat Fisika

- Rumus Molekul : H_2SO_4
- Berat Molekul : 98,08 g/mol
- Titik didih : 340°C
- Specifik gravity : 1,834 g/cm³
- Titik Leleh : 10,31°C

Sifat Kimia

- Asam sulfat adalah asam kuat dengan valensi 2 dan bersifat higroskopis.
- Asam sulfat dapat larut dalam air dan terdekomposisi 95% dalam etil alkohol.
- Asam sulfat merupakan asam pengoksidasi dan bahan penghidrasi, khususnya terhadap senyawa organik. Aksi dehidrasi itu sangat penting dalam mengadsorbsi

air yang terbentuk sehingga konversi reaksi-reaksi sulfonasi dan esterifikasi mendapatkan hasil yang lebih tinggi.

3. Air (H₂O)

Menurut MSDS (Material Safety Data Sheet, 2021), sifat fisika dan kimia air adalah sebagai berikut:

Sifat fisika:

- Wujud : Cair (30°C, 1 atm)
- Warna : Tidak Berwarna
- Bau : Tidak Berbau
- pH : Netral
- BM : 18,153 g/mol
- Titik Beku : 0°C
- Titik Didih : 100°C
- Densitas : 0,998 g/cm³ (30°C, 1 atm)

Sifat Kimia:

- Bersifat polar
- Dapat dijadikan pelarut yang baik
- Memiliki ikatan hidrogen
- Bersifat netral dalam keadaan murni

2.1.2 Spesifikasi Produk

Spesifikasi produk furfural yang dihasilkan adalah sebagai berikut:

1. Furfural (C₅H₄O₂)

- Wujud : Cair (30°C, 1 atm)
- Warna : Kuning Kecoklatan
- Bau : Almond-like
- Komposisi : C₅H₄O₂ minimum = 95% berat

H₂O maksimum = 5% berat

Menurut (Mc Ketta, 1976) sifat fisika dan kimia adalah sebagai berikut:

Sifat Fisik:

- Fasa : Cair
- Rumus molekul : C₅H₄O₂
- Berat molekul : 96,082 gr/mol
- Titik beku, 1 atm : -36,5°C
- Titik didih, 1 atm : 161,7°C
- Specific gravity : 1,1610 g/cm³

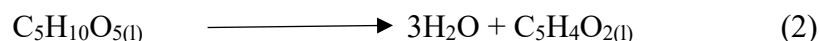
Sifat Kimia:

- Furfural mempunyai bau penetrasi khas aldehida siklik.
- Furfural adalah aldehida erosiklik berwarna kuning kecoklatan dengan bau menyerupai almond. Apabila terkena cahaya furfural berwarna kekuningan (teroksidasi).
- Furfural dibuat dari pentosan menggunakan katalis asam encer dan uap furfural yang terbentuk disuling.

2.2 Konsep Proses

2.2.1 Dasar Reaksi

Reaksi yang terjadi pada pembentukan furfural yaitu sebagai berikut:



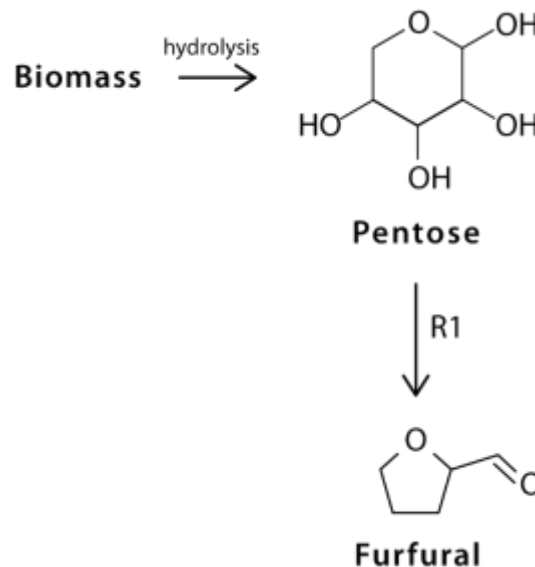
Reaksi yang terjadi adalah reaksi berurutan seri dan katalitik dimana terdapat penggunaan katalis asam sulfat (H₂SO₄). Perbandingan mol reaktan dari koefisien reaksi masing-masing reaktan secara stoikiometri adalah 1 : 1. Akan tetapi, pada reaksi ini air dibuat lebih banyak untuk menggeser kesetimbangan reaksi ke arah kanan dan mencegah terjadinya reaksi produk samping. Pemilihan air sebagai preaktan berlebihan (excess reactant) dikarenakan harga air lebih terjangkau atau murah dibandingkan

dengan pentosan atau hemiselulosa. Maka dari itu, perbandingan antara pentosan dan air sebesar 1 : 3.

2.2.2 Mekanisme Reaksi

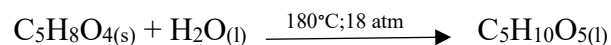
Pembuatan furfural melalui proses berdasarkan reaksi hidrolisa dan reaksi dehidrasi. Sekam padi akan mengalami hidrolisis dengan penambahan katalis asam sulfat. Pentosan ($C_5H_8O_4(s)$) merupakan hemiselulosa yang dihidrolisis dengan $H_2O(l)$ akan menghasilkan pentosa ($C_5H_{10}O_5(l)$) selanjutnya akan didehidrasi dan menghasilkan furfural ($C_5H_4O_2(l)$). Furfural dihasilkan dari residu yang mempunyai kandungan lignoselulosa.

Menurut Arnold & Buzzard (2003), mekanisme reaksi proses pembentukan furfural dari pentosan dan air yang merupakan reaksi berurutan seri dapat dilihat pada gambar dibawah sebagai berikut:

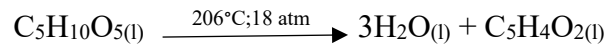


Gambar 2.1 Mekanisme Reaksi

1. Reaksi Hidrolisis



2. Reaksi Dehidrasi



2.2.3 Kondisi Operasi

Kondisi operasi pada perencanaan pabrik furfural berlangsung pada suhu 206°C dan tekanan sebesar 18 atm menggunakan reaktor (Arnold & Buzzard, 2003). Kondisi operasi tersebut bisa mencapai konversi furfural sebesar 80% dengan perbandingan antara solid : liquid sebesar 1 : 3. Reaksi Pembentukan furfural diawali dengan reaksi hidrolisa pentosan yang akan membentuk pentosa selanjutnya diikuti reaksi dehidrasi pentosa menjadi furfural. Pembentukan furfural menggunakan proses Supra Yield yang berlangsung pada fase Padat-Cair. Bahan baku yang digunakan adalah sekam padi dan air menggunakan katalis asam sulfat. Pemilihan kondisi operasi memperhatikan pertimbangan sebagai berikut:

1. Temperature operasi yang diizinkan adalah 206°C karena pada temperature tersebut didapatkan konversi yang optimal.
2. Reaksi pembentukan furfural merupakan reaksi irreversible dengan reaksi padat-cair, sehingga tekanan berperan kecil dalam konversi reaksi. Sehingga dipilihlah tekanan operasi 18 atm.
3. Asam sulfat dengan konsentrasi 4,4% berat digunakan untuk menjaga reaksi yang terjadi pada suasana sedikit asam atau dapat mendekati netral guna mencegah terjadinya pembentukan zeolit pada suasana asam.

2.2.4 Sifat Reaksi

Berdasarkan data kelarutan masing-masing komponen dalam air pada suhu kamar, diketahui $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4(s)$ tidak larut dalam air pada suhu yang rendah, sedangkan $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_{5(l)}$ juga tidak larut dalam air dan $\text{C}_5\text{H}_4\text{O}_{2(l)}$ sedikit larut dalam air. Reaksi pembentukan furfural berjalan pada suhu $200 - 235^\circ\text{C}$. Reaksi yang terjadi secara

endotermis yaitu membutuhkan panas selama proses reaksi berlangsung. Sehingga diperlukan heater pada reaktor untuk mempertahankan suhu reaktor.

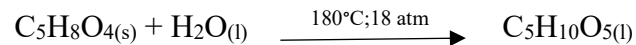
2.2.5 Tinjauan Termodinamika

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

1. Panas Reaksi (ΔH_R)

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

• Reaksi 1



Tabel 2.3 Harga ΔH°_f Masing-masing Komponen (Yaws, 1999)

Komponen	$\Delta H^\circ_f 298\text{K} \text{ (kJ/mol)}$
$\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4(\text{s})$	-844
$\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	-241,80
$\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_5(\text{l})$	-1.063

$$\Delta H^\circ_{f 298} = \Delta H^\circ_{f \text{ Produk}} - \Delta H^\circ_{f \text{ Reaktan}}$$

$$\Delta H^\circ_{f 298} = (\Delta H^\circ_f \text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_5(\text{l})) - ((\Delta H^\circ_f \text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4(\text{s})) + (\Delta H^\circ_f \text{H}_2\text{O}(\text{l}))) \text{ kJ/mol}$$

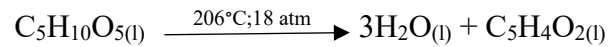
$$\Delta H^\circ_{f 298} = (-1.063) - ((-844) + (-241,80)) \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H^\circ_{f 298} = (-1.063) - (-1.085,80) \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H^\circ_{f 298} = 22,80 \text{ kJ/mol}$$

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

- **Reaksi 2**



Tabel 2.4 Harga Masing – masing Komponen (Yaws, 1999)

Komponen	$\Delta H^\circ_{f 298K}$ (kJ/mol)
$\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_{5(s)}$	-1.630
$\text{H}_2\text{O}_{(l)}$	-241,80
$\text{C}_5\text{H}_4\text{O}_{2(l)}$	-151,04

$$\Delta H^\circ_{f 298} = \Delta H^\circ_{f \text{ Produk}} - \Delta H^\circ_{f \text{ Reaktan}}$$

$$\Delta H^\circ_{f 298} = ((\Delta H^\circ_{f \text{ H}_2\text{O}_{(l)}} \times 3) + (\Delta H^\circ_{f \text{ C}_5\text{H}_4\text{O}_{2(l)}})) - (\Delta H^\circ_{f \text{ C}_5\text{H}_{10}\text{O}_{5(l)}}) \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H^\circ_{f 298} = ((-241,80 \times 3) + (-151,04)) - (-1.063) \text{ kJ/mol}$$

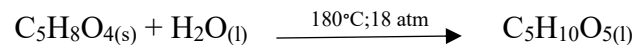
$$\Delta H^\circ_{f 298} = 186,56 \text{ kJ/mol}$$

Dilihat dari harga ΔH°_f reaksi yang dihasilkan, menunjukkan bahwa reaksi pembentukan furfural merupakan reaksi endotermis karena harga entalpi bernilai positif.

2. Energi Bebas Gibbs (ΔG°)

Ditinjau dari harga kesetimbangan, dengan persamaan energi Gibbs didapat:

- **Reaksi 1**



Tabel 2.5 Harga Masing – masing Komponen (Yaws, 1999)

Komponen	$\Delta H^\circ_{f 298K}$ (kJ/mol)
$\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_{4(s)}$	-690
$\text{H}_2\text{O}_{(l)}$	-228,60
$\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_{5(l)}$	-1.063

$$\Delta G^\circ_{f 298} = \Delta G^\circ_{f \text{ produk}} - \Delta G^\circ_{f \text{ reaktan}}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f298} = (\Delta G^{\circ}_f \text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_{5(l)}) - ((\Delta G^{\circ}_f \text{C}_5\text{H}_8\text{O}_{4(s)}) + (\Delta G^{\circ}_f \text{H}_2\text{O}_{(l)})) \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f298} = (-1.063) - ((-690) + (-228,60)) \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f298} = -144,40 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G^{\circ}_{f298} = -RT \ln K_{298}$$

$$\ln K_{298} = \frac{-\Delta G}{RT} = \frac{-(-144,4)}{0,008314 \times 298}$$

$$\ln K_{298} = \frac{144,4}{2,477572}$$

$$\ln K_{298} = 58,28$$

$$K_{298} = 2,051 \times 10^{25}$$

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

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

$$\ln \left(\frac{K_{479}}{2,051 \times 10^{25}} \right) = \left[- \left(\frac{22800}{8,314} \right) \times \left(\frac{1}{479} \right) - \left(\frac{1}{298} \right) \right]$$

$$\ln \left(\frac{K_{479}}{2,051 \times 10^{25}} \right) = \left[- \left(\frac{22800}{8,314} \right) \times \left(\frac{298-479}{142.742} \right) \right]$$

$$\ln \left(\frac{K_{479}}{2,051 \times 10^{25}} \right) = \frac{4.126.800}{1.186,757}$$

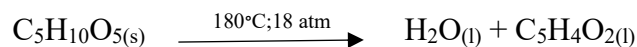
$$\left(\frac{K_{479}}{2,051 \times 10^{25}} \right) = e^{3,47737573909}$$

$$\left(\frac{K_{479}}{2,051 \times 10^{25}} \right) = 32,37465$$

$$K_{479} = 6,64 \times 10^{26}$$

Pada reaksi 1 didapatkan harga $K > 1$, maka dari itu reaksi berjalan ke arah kanan (*irreversible*).

- **Reaksi 2**



Tabel 2.6 Harga Masing – masing Komponen (Yaws, 1999)

Komponen	$\Delta H^\circ_{f, 298K}$ (kJ/mol)
$\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_{5(l)}$	-1.063
$\text{H}_2\text{O}_{(l)}$	-228,60
$\text{C}_5\text{H}_4\text{O}_{2(l)}$	-102,870

$$\Delta G^\circ_{f, 298} = \Delta G^\circ_{f, \text{produk}} - \Delta G^\circ_{f, \text{reaktan}}$$

$$\Delta G^\circ_{f, 298} = ((\Delta G^\circ_{f, \text{H}_2\text{O}_{(l)}}) + (\Delta G^\circ_{f, \text{C}_5\text{H}_4\text{O}_{2(l)}}) - (\Delta G^\circ_{f, \text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_{5(l)}}) \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G^\circ_{f, 298} = ((-228,60 \times 3) + (-102,870)) - (-1.063) \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G^\circ_{f, 298} = -274,33 \text{ kJ/mol}$$

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

$$\ln K_{298} = \frac{274,33}{2,477572}$$

$$\ln K_{298} = 83,013$$

$$K_{298} = 1,223 \times 10^{48}$$

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

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

$$\ln \left(\frac{K_{479}}{1,223 \times 10^{48}} \right) = \left[- \left(\frac{186560}{8,314} \right) \times \left(\frac{1}{479} \right) - \left(\frac{1}{298} \right) \right]$$

$$\ln \left(\frac{K_{479}}{1,223 \times 10^{48}} \right) = \left[- \left(\frac{22800}{8,314} \right) \times \left(\frac{298-479}{142.742} \right) \right]$$

$$\ln \left(\frac{K_{479}}{1,223 \times 10^{48}} \right) = \frac{33.767,360}{1.186,757}$$

$$\left(\frac{K_{479}}{1,223 \times 10^{48}} \right) = e^{28,4534744687}$$

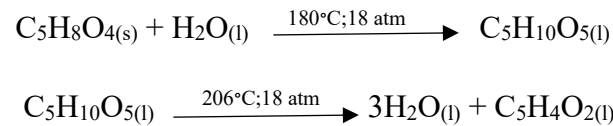
$$\left(\frac{K^{479}}{1,223 \times 10^{48}}\right) = 2.276.077.013.194$$

$$K^{479} = 2,78 \times 10^{60}$$

Pada reaksi 2 didapatkan harga $K > 1$, maka dari itu reaksi berjalan ke arah kanan (*irreversible*).

2.2.6 Tinjauan Kinetika

Tinjauan kinetika reaksi bertujuan untuk mengetahui adanya pengaruh perubahan temperature terhadap laju reaksi. Reaksi pembentukan furfural sebagai berikut:



Tinjauan kinetika reaksi pembentukan furfural secara katalitik pada berbagai suhu dapat ditinjau pada persamaan Arrhenius, sebagai berikut:

$$k = A e^{-E_a/RT}$$

Keterangan:

k = konstanta kecepatan reaksi (m^{-1})

A = faktor frekuensi tumbukan ($1/\text{mol} \cdot \text{min}$)

E_a = energi aktivasi (J/mol)

R = konstanta gas ($8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$)

T = suhu (K)

Harga k pada setiap reaksi sebesar menurut Arnold & Buzzard (2003) yaitu:

$$k_1 = 7,832 \times 10^4 \text{ CH } e^{\frac{-5613}{T}}$$

$$k_1 = (7,832 \times 10^4 \text{ 1/mol} \cdot \text{min}) \times (146.634 \text{ mol/l}) e^{\frac{-5613 \text{ J/mol}}{(8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}) \times (1880 \text{ K})}}$$

$$k_1 = 4,136 \times 10^7 \text{ min}^{-1}$$

$$k_2 = 9,306 \times 10^{15} \text{ CH C}_{pe} e^{\frac{-16894}{T}}$$

$$k_2 = (9,306 \times 10^{15} \text{ 1/mol.min}) \times (146.634 \times 1.920 \text{ mol/l}) e^{\frac{-16894 \text{ J/mol}}{(8,314 \text{ J/mol.K}) \times (206 \text{ K})}}$$

$$k_2 = 1,363 \times 10^{20} \text{ min}^{-1}$$

Keterangan:

C_H = Konsentrasi air (mol/l)

C_{pe} = Konsentrasi pentose (mol/l)

T = Temperature (K)

2.3 Langkah Proses

2.3.1 Tahap Persiapan Bahan Baku

Furfural dibuat melalui bahan baku sekam padi yang didapat dari limbah pertanian kemudian disimpan di dalam gudang. Bahan baku dilewatkan *belt elevator* dan selanjutnya diumpkan pada *roll crusher* untuk proses penghancuran bentuk menjadi partikel yang lebih kecil. Selanjutnya bahan baku diumpkan ke dalam Reaktor (R-01) menggunakan *Bucket Elevator* (BE).

Bahan baku lainnya yaitu air yang didapat dari unit utilitas. Air disimpan pada tangki penampungan dengan temperature 30°C dan tekanan 1 atm. Menggunakan katalis asam sulfat 98% (H₂SO₄) dan air diencerkan dengan alat Mixer (M-01) sebelum direaksikan ke dalam Reaktor (R-01).

2.3.2 Tahap Reaksi Hidrolisa dan Dehidrasi

Tahap hidrolisa dan dehidrasi terjadi di dalam Reaktor (R-01). Sebelum semua bahan baku masuk ke dalam Reaktor (R-01), *valve* output produk utama dan *valve* produk bawah reaktor harus tertutup. Kemudian bahan baku masuk ke dalam reaktor sesuai dengan rasio bahan baku. Setelah bahan baku masuk, dilakukan proses

pengkondisian kondisi operasi, *valve* aliran *steam* dibuka, *steam* digunakan untuk menaikkan suhu reaksi, sehingga pada saat *steam* masuk kondisi operasi tercapai. Selanjutnya, *valve* gas *inert* dibuka agar dapat mengatur tekanan reaksi.

Reaksi yang terjadi di dalam reaktor adalah endotermis. Reaktor beroperasi pada temperature 206°C dan tekanan 18 atm. Di dalam reaktor terjadi reaksi hidrolisa pentosan yang terkandung di dalam sekam padi menjadi pentosa. Reaksi dehidrasi pentosa menjadi furfural melepaskan 3 molekul air. Setelah beroperasi selama 1 jam, kemudian didinginkan dengan air pendingin hingga temperature 90°C, lalu tekanannya diturunkan dengan *venting* gas *inert* lewat bagian atas reaktor, untuk mencegah terbawanya *slurry* pada aliran produk, maka diberi *filter* pada aliran keluaran produk, setelah pengeluaran produk selesai *valve* pengeluaran produk bawah dibuka. Hasil utama reaktor (R-01) akan masuk ke tahap selanjutnya, sedangkan hasil bawah reaktor berupa campuran padatan yang akan masuk kedalam *filter* untuk dipisahkan antara padatan dan cairan. Hasil bawah yang keluar dari reaktor berupa *slurry*.

2.3.3 Tahap Pemurnian Produk

Produk *filter* berupa cairan dengan temperature 90°C dan hasil produk atas pada reaktor yang sudah didinginkan dengan temperature 90°C disalurkan ke evaporator 1. Evaporator 1 berfungsi untuk menguapkan kandungan 99% air pada suhu 100°C, dan dilakukan ulang penguapan pada temperatur yang lebih besar di evaporator 2 yaitu temperatur 120°C. Hasil atas dari evaporator akan menuju ke kondensor untuk diubah fasanya yang awalnya fasa uap menjadi fasa cair, kemudian air diolah lagi di unit utilitas menuju ke tangki penampungan air. Keluaran dari evaporator 2 memiliki temperature 120°C dipanaskan dalam HE-2 hingga mencapai *T Bubble* sebelum diumpankan ke dalam menara distilasi. Hasil tersebut diumpankan ke dalam menara distilasi dengan temperature 175°C untuk memisahkan furfural dan asam sulfat, hasil atas terdiri dari furfural dan sedikit air dengan temperature 180°C kemudian dialirkan menuju kondensor untuk pendinginan sedangkan produk bawah yang keluar dari menara distilasi pada temperature 147°C. Hasil dari produk bawah berupa asam sulfat, furfural, dan air 100% yang akan di-*recycle* menuju *mixer*. Hasil produk furfural

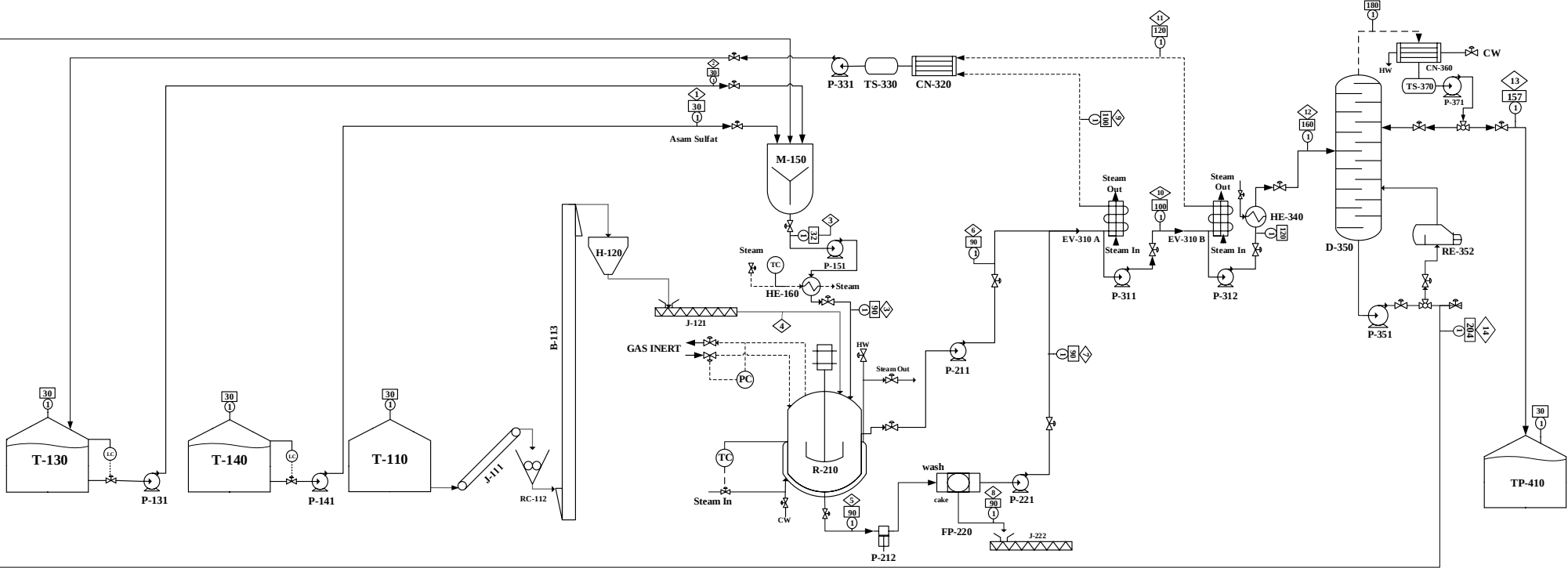
dengan konsentrasi 99% disipan di tangki penyimpanan sementara sebelum dipindahkan ke tangki penyimpanan produk yang ada di gudang. Hasil filter yang berupa padatan akan diproses lebih lanjut untuk dibuat arang briket yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar *boiler*.

2.3.4 Tahap Penyimpanan Produk

Produk yang sudah jadi ditampung di tangki penyimpanan sementara kemudian dialirkan melalui pipa menuju gudang untuk disimpan pada temperature 30°C dengan tekanan 1 atm.

2.4 Diagram Alir Proses

PROSES FLOW DIAGRAM PABRIK FURFURAL DARI SEKAM PADI
DENGAN PROSES SUPRA YIELD KAPASITAS 2.200 TON/TAHUN



Komponen	Arus (Kg/jam)													
	Arus 1	Arus 2	Arus 3	Arus 4	Arus 5	Arus 6	Arus 7	Arus 8	Arus 9	Arus 10	Arus 11	Arus 12	Arus 13	Arus 14
Asam Sulfat	6.622	-	234.405	-	23.441	210.965	17.275	6.165	-	228.240	-	228.240	0.456	227.784
Air	0.135	4860.943	4.861.083	229.110	518.350	4.665.154	382.017	136.333	4996.699	50.472	49.967	0.505	0.500	0.005
Lignin	-	-	-	362.758	362.758	-	-	362.758	-	-	-	-	-	-
Selulosa	-	-	-	630.054	630.054	-	-	630.054	-	-	-	-	-	-
Hemiselulosa (Pentosan)	-	-	-	610.961	122.192	-	-	122.192	-	-	-	-	-	-
Abu (Ekstraktif)	-	-	-	95.656	95.656	-	-	95.656	-	-	-	-	-	-
Pentosa	-	-	-	-	111.084	-	-	111.084	-	-	-	-	-	-
C ₅ H ₄ O ₂ (Furfural)	-	-	2.796	-	28.717	258.454	21.164	7.553	-	279.618	-	279.618	276.822	2.796
TOTAL	6.757	4860.943	5,098.285	1928.539	1,892.251	5,134.572	420.457	1471.794	4996.699	558.330	49.967	508.363	277.778	230.585



PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA
KIMIA INDUSTRI
SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2025

DIGAMBAR OLEH:
Reza Kautsar Insani
NIM. 40040121650044

DOSEN PEMBIMBING:
Dr. Mohamad Endy Julianto, S.T., M.T.

KETERANGAN ALAT

B : Bucket Elevator
CN : Condensor
D : Distilasi
EV : Evaporator
FP : Filter
H : Hopper
HE : Heat Exchanger
J : Belt Conveyor

M : Mixer
P : Pompa
R : Reaktor
RC : Roll Crusher
RE : Reboiler
T : Tangki Feed
TP : Tangki Penyimpanan Sementara
TS : Tangki Penyimpanan Sementara

KETERANGAN SIMBOL

: Temperatur (°C)
 : Tekanan (Atm)
 : Nomor Aliran

TC

 : Temperature Control

LC

 : Level Control

PC

 : Pressure Control

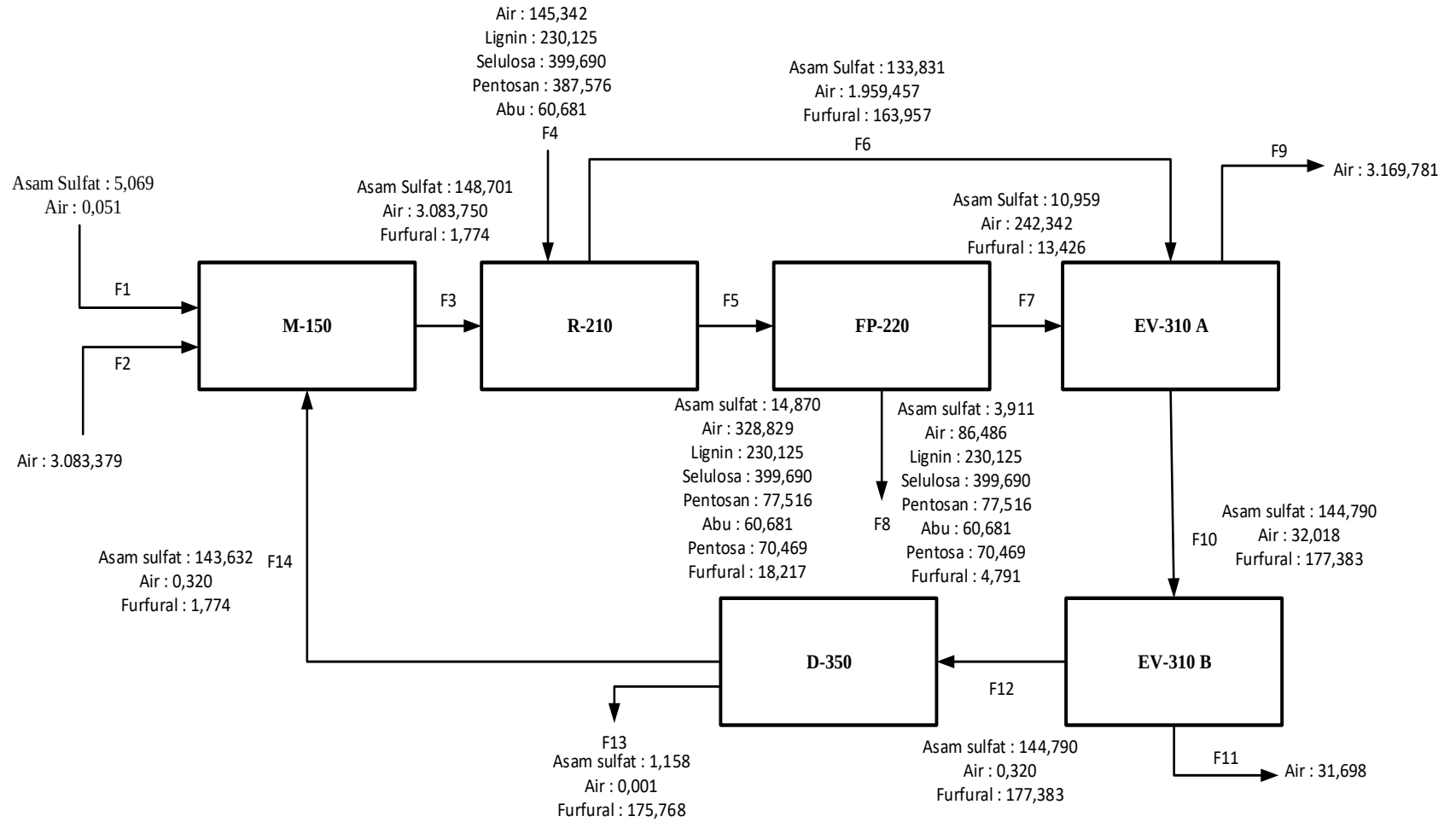
CW

 : Cooling Water

HW

 : Hot Water
— : Fasa Cair
- - - : Fasa Uap
— : Fasa Solid

2.5 Diagram Alir Neraca Massa



Satuan : kg/jam

2.5 Neraca Massa dan Neraca Panas

2.5.1 Neraca Massa

1. Neraca Massa *Mixer* (M-150)

Tabel 2.7 Neraca Massa Mixer (M-150)

Komposisi	Laju Alir Masuk			Laju Alir Keluar
	Arus 1 (kg/jam)	Arus 2 (kg/jam)	Arus 14 (kg/jam)	Arus 3 (kg/jam)
H ₂ SO ₄	6,622	-	227,784	234,405
H ₂ O	0,135	4.860,943	0,005	4.861,083
C ₅ H ₄ O ₂	-	-	2,796	2,796
Jumlah	6,757	4.860,943	230,585	5.098,285
Total		5.098,285		

2. Neraca Massa Reaktor (R-210)

Tabel 2.8 Neraca Massa Reaktor (R-210)

Komposisi	Laju Alir Masuk		Laju Alir Keluar	
	Arus 3 (kg/jam)	Arus 4 (kg/jam)	Arus 5 (kg/jam)	Arus 6 (kg/jam)
H ₂ SO ₄	234,405	-	23,441	210,965
H ₂ O	4.861,083	229,110	518,350	4.665,154
Lignin	-	362,758	362,758	-
Selulosa	-	630,054	630,054	-
Hemiselulosa (Pentosan)	-	610,961	122,192	-
Abu (Ekstraktif)	-	95,656	95,656	-
Pentosa	-	-	111,084	-
Furfural	2,796	-	28,717	258,454
Jumlah	5.098,285	1.928,539	1.892,251	5.134,572
Total		7.026,824		7.026,824

3. Neraca Massa *Filter Press* (FP-220)

Tabel 2.9 Neraca Massa Filter Press (FP-220)

Komposisi	Laju Alir Masuk	Laju Alir Keluar	
	Arus 5 (kg/jam)	Arus 7 (kg/jam)	Arus 8 (kg/jam)
H ₂ SO ₄	23,717	17,275	6,165
H ₂ O	518,350	382,017	136,333
Lignin	362,758	-	362,758
selulosa	630,054	-	630,054
Hemiselulosa (Pentosan)	122,192	-	122,192
Abu (Ekstraktif)	95,656	-	95,656
Pentosa	111,084	-	111,084
Furfural	28,717	21,164	7,553
jumlah	1.892,251	420,457	1.471,794
Total		1.892,251	

4. Neraca Massa Evaporator (EV-310 A)

Tabel 2.10 Neraca Massa Evaporator (EV-310 A)

Komposisi	Laju Alir Masuk		Laju Alir Keluar	
	Arus 6 (kg/jam)	Arus 7 (kg/jam)	Arus 9 (kg/jam)	Arus 10 (kg/jam)
H ₂ SO ₄	210,965	17,275	-	228,240
H ₂ O	4.665,154	382,017	4.996,699	50,472
Furfural	258,454	21,164	-	279,618
Jumlah	5.134,572	420,457	4.996,699	558,330
Total	5.555,029		5.555,029	

5. Neraca Massa Evaporator (EV-310 B)

Tabel 2.11 Neraca Massa Evaporator (EV-310 B)

Komposisi	Laju Alir Masuk	Laju Alir Keluar	
	Arus 10 (kg/jam)	Arus 11 (kg/jam)	Arus 12 (kg/jam)
H ₂ SO ₄	228,240	-	228,240
H ₂ O	50,472	49,967	0,505

Furfural	279,618	-	279,618
Jumlah	558,330	49,967	508,363
Total		558,330	

6. Neraca Massa Distilasi (D-350)

Tabel 2.12 Neraca Massa Distilasi (D-350)

Komposisi	Laju Alir Masuk	Laju Alir Keluar	
	Arus 12 (kg/jam)	Arus 13 (kg/jam)	Arus 14 (kg/jam)
H ₂ SO ₄	228,240	0,456	227,784
H ₂ O	0,505	0,500	0,005
Furfural	279,618	276,822	2,796
Jumlah	508,363	277,778	230,585
Total		508,363	

7. Neraca Massa Overall

Tabel 2.13 Neraca Massa Overall

Komponen	Input				Output		
	Arus 1	Arus 2	Arus 4	Arus 8	Arus 9	Arus 11	Arus 13
H ₂ SO ₄	6,622	-	-	6,165	-	-	0,456
H ₂ O	0,135	4.860,943	229,110	136,333	4.996,699	49,967	0,500
Lignin	-	-	362,758	362,758	-	-	-
Selulosa	-	-	630,054	630,054	-	-	-
Hemiselulosa (Pentosan)	-	-	610,961	122,192	-	-	-
Abu (Ekstraktif)	-	-	95,656	95,656	-	-	-
Pentosa	-	-	-	111,084	-	-	-
Furfural	-	-	-	7,553	-	-	276,822
Jumlah	6,757	4.860,943	1.928,539	1.471,794	4.996,669	49,967	277,778
Total		6.796,239			6.796,239		

2.5.2 Neraca Panas

1. Neraca Panas Mixer (M-150)

Tabel 2.14 Neraca Panas Mixer (M-150)

Arus	Input (kJ)	Output (kJ)
Q1	50,236	-
Q2	101.945,535	-
Q16	63.638,873	-
Q3	-	165.634,645
Jumlah	165.634,645	165.634,645

2. Neraca Panas *Heat Exchanger* (HE-160)

Tabel 2.15 Neraca Panas Heat Exchanger (HE-160)

Arus	Input (kJ)	Output (kJ)
Q3	165.318,957	-
<i>Qheat</i>	1.177.725,949	-
Q4	-	1.343.044,906
Jumlah	1.343.044,906	1.343.044,906

3. Neraca Panas Reaktor (R-210)

Tabel 2.16 Neraca Panas Reaktor (R-210)

Arus	Input (kJ)	Output (kJ)
Q4	1.343.044,906	-
Q5	10.553,141	-
Q6	-	704.266,281
Q7	-	3.768.361,776
<i>Qheat</i>	3.449.362,171	-
<i>Qreaksi</i>	-	330.332,160
Jumlah	4.802.960,217	4.802.960,217

Setelah bereaksi, untuk mencapai suhu dan tekanan alat selanjutnya diberikan pendingin di sekitar reaktor.

Tabel 2.17 Neraca Panas Reaktor (R-210)

Arus	Input (kJ)	Output (kJ)
Q6	704.266,281	-

Q7	3.768.361	-
Q6	-	250.835,611
Q7	-	1.317.712,952
<i>Qcool</i>	-	2.904.079,494
Jumlah	4.472.628,057	4.472.628,057

4. Neraca Panas Evaporator (EV-310 A)

Tabel 2.18 Neraca Panas Evaporator (EV-310 A)

Arus	Input (kJ)	Output (kJ)
Q6	1.317.712,952	-
Q7	107.904,115	-
Qheat	10.635.801,797	-
Q8	-	79.332,676
Q9	-	704.855,427
Qlaten	-	11.277.230,762
Jumlah	12.061.418,864	12.061.418,864

5. Neraca Panas Evaporator (EV-310 B)

Tabel 2 19 Neraca Panas Evaporator (EV-310 B)

Arus	Input (kJ)	Output (kJ)
Q8	79.332,676	-
Qheat	123.745,178	-
Q10	-	81.359,673
Q11	-	8.945,873
Qlaten	-	112.772,302
Jumlah	203.077,853	203.077,853

6. Neraca Panas *Heat Exchanger* (HE-340)

Tabel 2.20 Neraca Panas Heat Exchanger (HE-340)

Arus	Input (kJ)	Output (kJ)
Q10	81.359,673	-
<i>Qheat</i>	51.008,888	-
Q12	-	132.368,561

Jumlah	132.368,561	132.368,561
---------------	--------------------	--------------------

7. Neraca Panas Kondensor Evaporator (CN-320)

Tabel 2.21 Neraca Panas Kondensor (CN-320)

Arus	Input (kJ)	Output (kJ)
Q9	704.855,318	-
Q11	8.945,871	-
Qlaten	11.390.003,070	-
Q19	-	1.582.141,219
<i>Qcool</i>	-	10.521.663,041
Jumlah	12.103.804,259	12.103.804,259

8. Neraca Panas Distilasi (D-350)

Tabel 2.22 Neraca Panas Distilasi (D-350)

Arus	Input (kJ)	Output (kJ)
Qin	132.368,561	-
Qreboiler	-13.703,323	-
Qdistilat	-	67.670,561
Hresidu	-	63.638,874
Qkondensor	-	-12.644,197
Jumlah	118.665,238	118.665,238

9. Neraca Panas Overall

Tabel 2.23 Neraca Panas Overall

Komponen	Input (kJ)	Output (kJ)
Mixer (M-150)	165.634,645	165.634,645
Heat Exchanger (HE-160)	1.343.044,906	1.343.044,906
Reaktor (R-210)	4.802.960,217	4.472.628,057

Evaporator (EV-310 A)	12.061.418,864	12.061.418,864
Heat Exchanger (HE-340)	132.368,561	132.368,561
Evaporator (EV-310 B)	203.077,676	203.077,676
Kondensor (CN-320)	12.103.804,259	12.103.804,259
Distilasi (D-350)	118.665,238	118.665,238
Qreaksi	-	330.332,16
Total	30.930.974,366	30.930,974,366

Total Panas = 30.930.974,366

Panas yang hilang = Input – Output

Panas yang hilang = 330.332,16

%Kehilangan Panas Overall = (Total Kehilangan Panas : Total Panas Overall) x 100%

%Kehilangan Panas Overall = (330.332,16 : 30.930.974,366) x 100%

%Kehilangan Panas Overall = 1,068%

Efisiensi Panas = 100% - Kehilangan Panas Overall

Efisiensi Panas = 98,932%

2.6 Tata Letak Pabrik dan Pemetaan

Tata letak pabrik adalah desain fasilitas yang mencakup perencanaan dan penerapan sistem produksi barang atau jasa. Perancangan ini meliputi area produksi dan utilitas, gudang, perkantoran, serta bangunan pendukung lainnya. Tata letak pabrik disusun untuk meningkatkan efisiensi proses produksi. Dalam menentukan tata letak,

penting untuk memperhatikan penempatan peralatan produksi agar kesehatan dan keselamatan pekerja tetap terjamin. Selain peralatan yang terdapat dalam diagram alir proses, terdapat pula bangunan fisik lain, seperti perkantoran, bengkel, poliklinik, laboratorium, kantin, fasilitas keselamatan kebakaran, dan pos penjagaan, yang harus diatur sedemikian rupa agar tidak mengganggu jalannya produksi.

Prinsip dasar dalam penyusunan tata letak fasilitas pabrik, menurut (Zulian Yamit, 2003:132), didasarkan pada tujuan dan manfaat dari pengaturan tata letak yang optimal. Prinsip-prinsip tersebut dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Integrasi Secara Total

Tata letak fasilitas pabrik dilakukan secara terintegrasi dari semua faktor yang mempengaruhi proses produksi menjadi satu unit yang besar.

2. Jarak Perpindahan Barang Paling Minimum

Waktu perpindahan antar barang dalam suatu industri harus seminimal mungkin dengan cara mengurangi jarak perpindahan antar barang.

3. Memperlancar Aliran Kerja

Sebagai penunjang dari prinsip sebelumnya, material diusahakan bergerak terus tanpa adanya interupsi atau gangguan jadwal kerja.

4. Kepuasan dan Keselamatan Kerja

Layout yang baik adalah apabila mampu memberikan keselamatan dan keamanan bagi pekerja yang bekerja didalamnya.

5. Fleksibilitas

Layout yang baik harus memiliki fleksibilitas serta mampu menghadapi penyesuaian atau pengaturan kembali (*re-layout*), maupun *layout* yang baru dapat dibuat dengan cepat dan murah.

2.6.1 Tata Letak Pabrik

Berikut hal-hal yang harus diperhatikan dalam merancang tata letak pabrik:

1. Perluasan Pabrik dan Penambahan Bangunan

Perluasan pabrik dan penambahan bangunan merupakan kemungkinan yang harus diperhitungkan sejak awal agar masalah terkait lokasi dan infrastruktur dapat

diatasi di masa mendatang. Perencanaan dan pengaturan yang baik diharapkan dapat menjaga efisiensi serta kelangsungan operasional industri. Secara umum, tujuan utama dari perencanaan tata letak pabrik adalah mengoptimalkan area kerja dan fasilitas produksi agar operasional berjalan secara ekonomis, aman, dan nyaman, sehingga dapat meningkatkan moral serta kinerja operator. Lebih lanjut, perencanaan tata letak yang baik memberikan manfaat bagi sistem produksi, termasuk penyediaan area khusus untuk ekspansi pabrik, penambahan peralatan, serta peningkatan kapasitas produksi seiring dengan perkembangan produk.

2. Keamanan

Keamanan dalam proses produksi industri sangat penting, mengingat adanya potensi bahaya seperti kebakaran, ledakan, asap, api, atau gas beracun. Oleh karena itu, aspek keamanan harus diperhatikan dalam perancangan tata letak pabrik. Untuk mengatasi dan menanggulangi risiko tersebut, diperlukan peralatan pemadam kebakaran serta safety station yang dilengkapi dengan perlengkapan keselamatan. Selain itu, tangki penyimpanan bahan baku atau unit lain yang berisi bahan mudah meledak harus ditempatkan di area khusus dengan jarak yang aman antarbangunan guna meminimalkan risiko kecelakaan.

3. Luas Lahan yang Tersedia

Luas lahan yang tersedia saat pembelian tanah di tahap perancangan pabrik merupakan faktor penting yang perlu dipertimbangkan. Salah satu kendala utama dalam penyediaan lahan adalah ketidaksesuaian dengan perkiraan awal, terutama jika harga tanah terlalu tinggi. Oleh karena itu, efisiensi dalam pemanfaatan ruang harus dioptimalkan, misalnya dengan menempatkan peralatan tertentu berdekatan agar penggunaan lahan dapat dimaksimalkan.

4. Instalasi dan Utilitas

Perancangan pabrik mencakup instalasi dan utilitas yang diperlukan untuk mendukung kelancaran produksi dan distribusi, seperti gas, udara, steam, dan listrik. Oleh karena itu, penempatan peralatan proses harus diatur secara optimal agar pekerja dapat mengaksesnya dengan mudah, sehingga proses produksi berjalan lancar,

perawatan lebih efisien, dan waktu dapat dihemat. Lokasi pabrik dipilih berdasarkan pertimbangan efisiensi dan keuntungan, baik dari aspek teknis maupun ekonomis. Selain itu, perencanaan tata letak pabrik mencakup pengaturan area penyimpanan, area proses, serta handling area untuk memastikan operasional yang efektif.

Secara garis besar, tata letak pabrik dibagi menjadi beberapa daerah utama sebagai berikut:

a. Daerah Administrasi, Perkantoran, Laboratorium, dan Ruang Kontrol

Daerah administrasi merupakan pusat kegiatan administrasi suatu pabrik dimana akan mengatur kelancaran operasional pabrik. Sedangkan laboratorium dan ruang kontrol sebagai pusat pengendali proses, kualitas, dan kuantitas bahan baku serta produk.

b. Daerah Proses Produksi

Daerah proses produksi merupakan daerah inti dari suatu pabrik sebagai tempat berlangsungnya produksi. Daerah proses produksi rencananya akan diletakkan pada tempat yang memiliki akses mudah dan mobilitas tinggi, serta dekat dengan sumber bahan baku, gudang penyimpanan sementara, utilitas, dan penunjang lainnya.

c. Daerah Pergudangan, Bengkel, dan Garasi

Gudang sebagai tempat penyimpanan persediaan produk jadi dan tempat persediaan peralatan, sedangkan bengkel peralatan bertugas memperbaiki peralatan yang bermasalah, serta garasi untuk meletakkan alat-alat seperti tangki maupun kendaraan pengangkut barang.

d. Daerah Utilitas

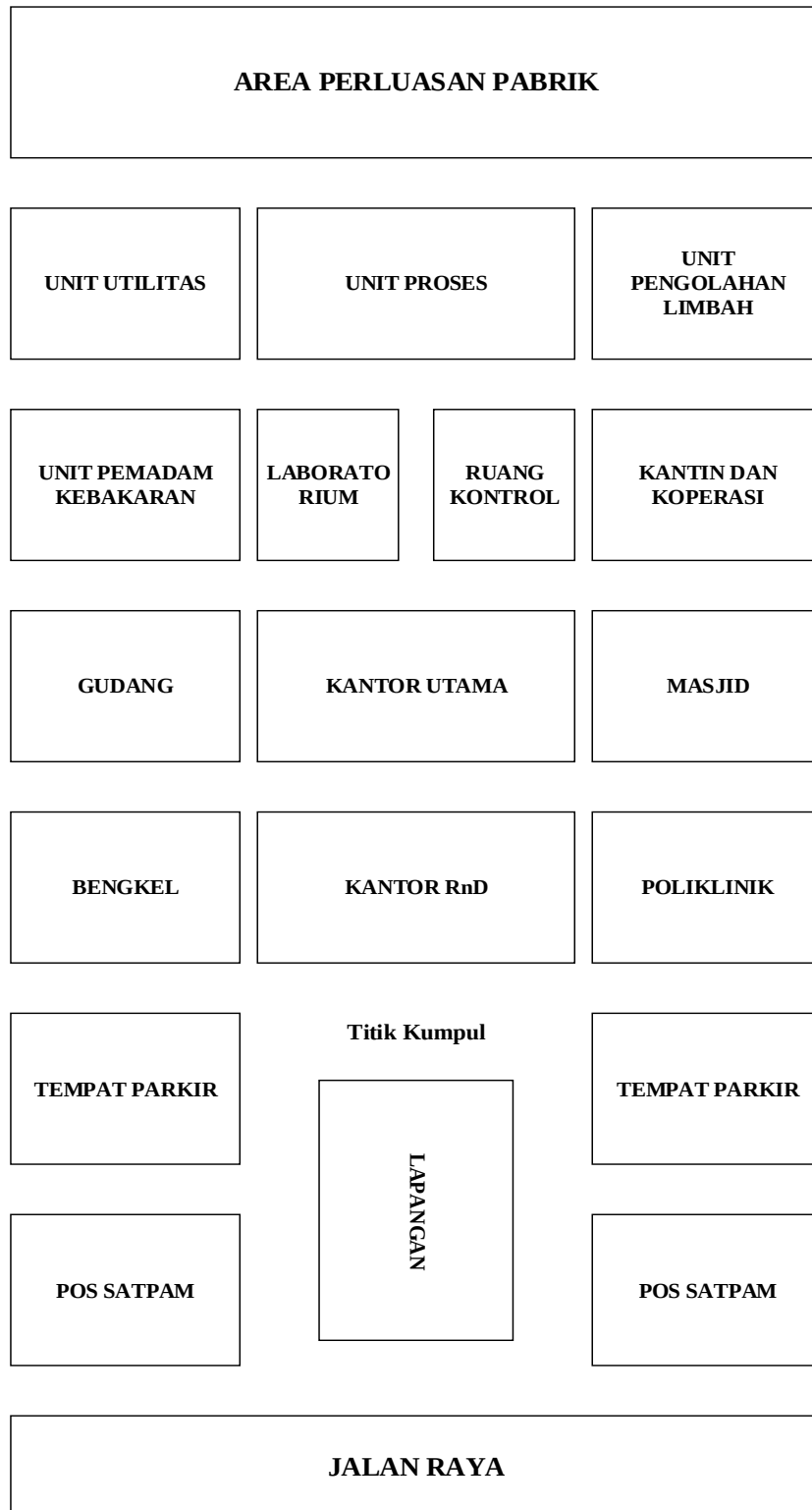
Daerah utilitas adalah unit pendukung proses, dimana dalam operasional pabrik juga membutuhkan siklus air, *steam*, dan unit pengolahan limbah, sehingga daerah utilitas juga harus diperhatikan dalam penempatannya. Untuk pabrik furfural, daftar bangunan beserta luas dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.24 Daftar Bangunan dan Luas Bangunan

Nama Area	Luas (m ²)
Area Pengembangan	2.000

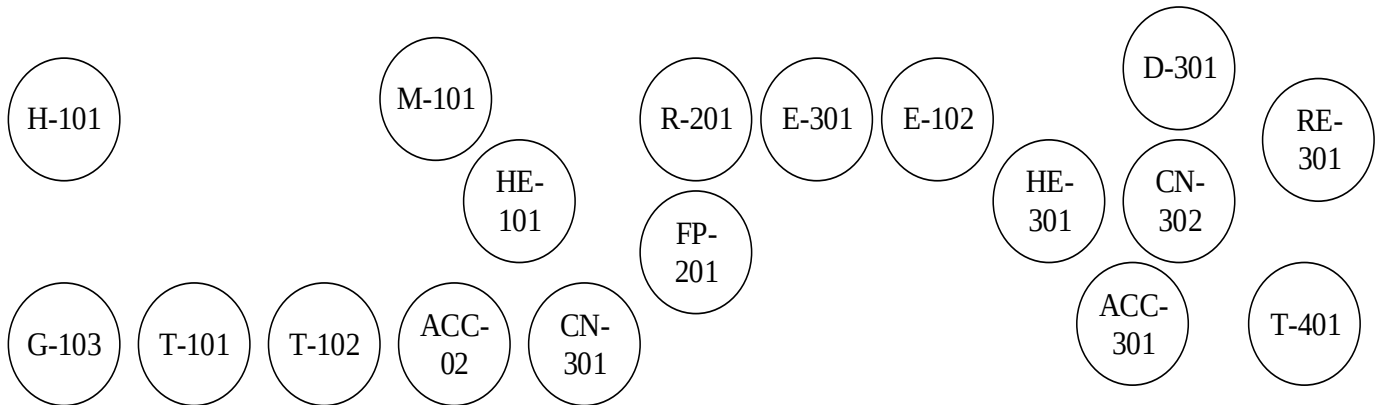
Pos Keamanan	20
Masjid	200
Utilitas	1.000
Laboratorium	250
Kantor Utama	1.000
Kantor RnD dan K3	200
Bengkel	400
Pemadam Kebakaran	100
Area Proses	3.000
Koperasi dan Kantin	200
Jalan/Taman	1.000
Gudang	300
Gedung Peralatan	600
Aula	200
Perpustakaan	100
Ruang Kontrol	200
Poliklinik	100
Tempat parkir	500
Unit Pengelolaan Limbah	400
Total	11.770

Denah tata letak pabrik furfural dapat dilihat pada Gambar sebagai berikut:



Gambar 2.2 Denah Tata Letak Pabrik Furfural

2.6.2 Tata Letak Peralatan Proses



Gambar 2.3 Denah Tata Letak Peralatan Proses

Layout pabrik atau tata letak pabrik merupakan pengaturan fasilitas produksi untuk memastikan proses produksi berjalan secara efektif dan efisien. Fasilitas tersebut mencakup mesin, peralatan produksi, alat transportasi material, serta peralatan pengawasan. Perencanaan *layout* menurut (James A Moore) merupakan perencanaan menyeluruh mengenai tata letak fasilitas industri, yang mencakup penempatan personel, peralatan operasional gudang, sistem pemindahan material, serta alat pendukung lainnya, sehingga dapat mencapai tujuan optimal dengan memanfaatkan fasilitas yang tersedia 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 urusan proses produksi lancar
4. Karyawan mendapatkan kepuasan kerja sehingga produktivitas meningkat karena suasana kerja menyenangkan
5. Fleksibilitas dapat diantisipasi karena adanya perubahan teknologi, komunikasi, dan kebutuhan konsumen.

Hal ini 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 biaya produksi. Dalam menentukan tata letak proses produksi pada pabrik furfural ada beberapa hal yang perlu diperhatikan sebagai berikut:

1. Aliran Bahan Baku dan Produk

Pengaliran bahan baku dan produk yang tepat akan memberikan keuntungan ekonomi 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 sehingga tidak mengganggu lalu lintas pekerja dan apabila ada masalah dapat teratasi dengan mudah.

2. Aliran Udara

Aliran udara di dalam dan di sekitar area harus diperhatikan untuk menghindari terjadinya stagnasi udara yang dapat menyebabkan akumulasi zat atau bahan kimia yang dapat membahayakan keselamatan kerja.

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 instrumen 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, agar jika terjadi kebakaran tidak ada yang terperangkap di dalamnya, 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 serta keamanan proses produksi pabrik yang akan memberikan keuntungan dari segi ekonomi. Letak alat-alat proses harus sebaik mungkin sehingga memberikan biaya konstruksi dan operasional yang minimal.

10. Jarak Antar Alat Proses

Jarak antar alat proses harus diperhatikan, jika alat proses yang beroperasi pada suhu dan tekanan tinggi, sebaiknya dipisahkan dari alat proses yang lain. Apabila terjadi 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.