



BAB II

SELEKSI DAN URAIAN PROSES

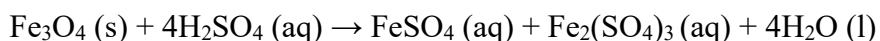
II.1. Macam – Macam Proses

Proses pembuatan *ferrous sulfate heptahydrate* dapat dilakukan dengan beberapa proses, antara lain:

1. Pembuatan *ferrous sulfate heptahydrate* dari *pickling liquor* dan asam sulfat
2. Pembuatan *ferrous sulfate heptahydrate* dari *magnetite* dan asam sulfat dengan katalis besi

II.1.1. Pembuatan Ferrous Sulfate Heptahydrate Dari Magnetite Dan Asam Sulfat

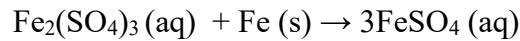
Ferrous sulfate heptahydrate dapat dibuat dari biji tambang yaitu *magnetite* yang mengandung besi oksida. Proses diawali dengan *size reduction* magnetite (Fe_3O_4) untuk mereduksi ukuran partikel hingga diameter (<10 mm) guna memaksimalkan luas permukaan kontak antarmuka padat-cair. Magnetite yang telah di haluskan kemudian di cuci menggunakan air (H_2O) untuk menghilangkan impurities yang larut hingga menjadi *slurry*. Kandungan padatan dalam campuran padat-cair (*magnetite* dan air) dalam rentang 60 –70% w/w. Kemudian *slurry* dilarutkan dalam reaktor tangki berpengaduk pada rentang suhu operasi 80-90°C menggunakan asam sulfat $\geq 60\%$ dengan perbandingan *slurry* dan asam sulfat 1:1. Reaksi yang terjadi:



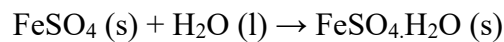
Setelah proses pelarutan, dilanjutkan dengan filtrasi menggunakan filter untuk memisahkan besi oksida padat tak larut dari larutan induk besi(II) sulfat yang murni. Keberadaan besi(III) sulfat ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) tidak diinginkan dalam produk akhir, sehingga perlu ditambahkan logam besi (Fe) sebagai agen pereduksi untuk mengubah ion ferri (Fe^{3+}) menjadi ion ferro (Fe^{2+}). Reaksi yang terjadi:



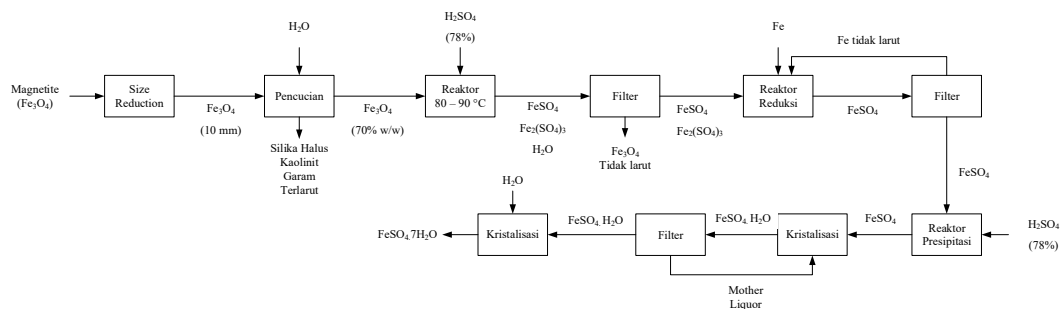
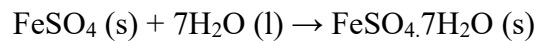
“Pabrik Besi Sulfat Heptahidrat dari Larutan Pickling dan Asam Sulfat dengan Proses Presipitasi Kapasitas 60.000 ton/tahun”



Kemudian dilakukan proses filtrasi untuk menghilangkan sisa besi yang tidak tereduksi menggunakan filter drum. Larutan yang telah di filtrasi kemudian di pindahkan ke precipitation reactor dengan menambahkan asam sulfat untuk memicu pembentukan kristal monohidrat, konsentrasi asam sulfat dalam larutan harus ditingkatkan hingga konsentrasi 55–65% w/w. Pada precipitation reactor suhu dijaga pada 70–90 °C dan waktu tinggal 3–5 jam dengan konversi 97%. Kemudian larutan di pekatan menggunakan evaporator. Larutan jenuh yang dihasilkan kemudian dilakukan proses kristalisasi fasa monohidrat ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$).



Besi sulfat monohidrat kemudian disaring menggunakan filter untuk memisahkan kristal padat dari cairan yang mengandung pengotor. Besi sulfat monohidrat menjadi heptahidrat dilakukan dengan penambahan air pada reaktor kristalisasi. Waktu tinggal reaktor kristalisasi 4–18 jam dan suhu dijaga 20–35 °C (Kehrmann, 2025).



**Gambar II. 1 Proses Pembentukan Ferrous Sulfate Heptahidrate Dari Magnetite
dan Asam Sulfat**

II.1.2. Pembuatan Ferrous Sulfate Heptahidrate Dari Pickling Liquor Dan Asam Sulfat

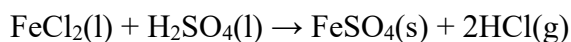
Pickling liquor merupakan limbah cair yang dapat ditemukan dari hasil buangan industri baja. Pickling liquor memiliki kandungan FeCl_2 38%, HCl 2%



PRA RANCANGAN PABRIK

“Pabrik Besi Sulfat Heptahidrat dari Larutan Pickling dan Asam Sulfat dengan Proses Presipitasi Kapasitas 60.000 ton/tahun”

dan 60% H₂O. Pada langkah pertama, asam sulfat dengan konsentrasi 60% w/w dipanaskan terlebih dahulu pada suhu 85°C. Pemanasan digunakan untuk memberikan energi yang cukup untuk melepaskan klorida dari molekul besi dan mengubahnya menjadi uap asam klorida (HCl). Pickling liquor kemudian dimasukkan kedalam precipitating reactor dengan penambahan asam sulfat yang telah dipanaskan dengan rasio 1:1,5. Di dalam reaktor, konsentrasi asam sulfat dijaga pada konsentrasi 60% w/w. Dengan menjaga konsentrasi asam pada 60%, ferrous sulfate akan mengendap (precipitate) sehingga dapat dipisahkan secara fisik dari larutan menggunakan filtrasi. Reaksi yang terjadi:



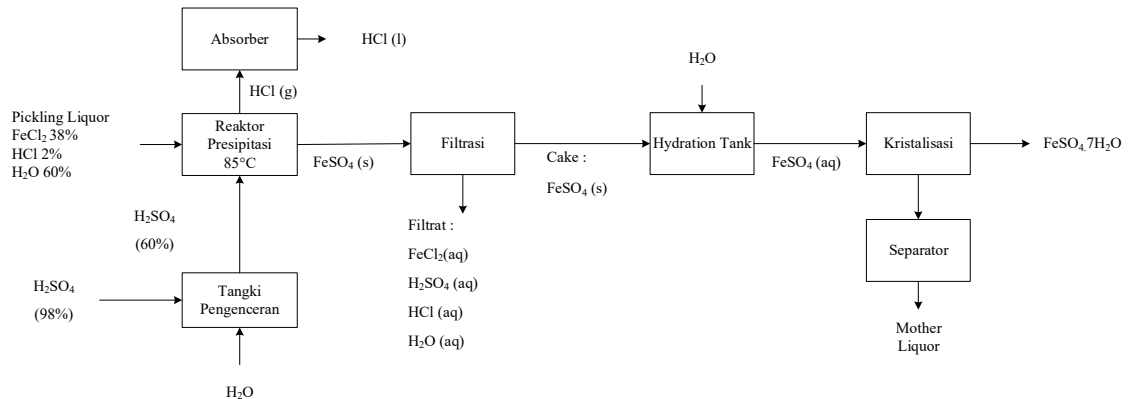
Reaksi terjadi pada suhu 85°C pada tekanan atmosfer dan waktu tinggal 1 – 2 jam di dalam reaktor dengan konversi 99%. Uap HCl dialirkan menuju menara absorber dimana gas tersebut dikumpulkan. Proses ini menjaga suhu aliran udara tetap di bawah titik didih *binary system water-HCl* (136°C) agar uap dapat dikelola dengan stabil tanpa penguapan massal yang tak terkendali. Uap HCl di dalam absorber didinginkan pada suhu 45°C untuk meningkatkan kelarutan gas dalam air sehingga HCl cair dapat dikumpulkan (Connolly, 1995).

Suspensi *ferrous sulfate* yang dihasilkan dari reaktor presipitasi selanjutnya dipisahkan menggunakan *filter* untuk memisahkan padatan dari filtrat. Pada unit ini, filtrat yang mengandung sisa asam dan pengotor dipisahkan, sedangkan cake berupa *ferrous sulfate* dialirkan menuju *hydration tank*. Cake *ferrous sulfate* di larutkan dengan penambahan air untuk menyediakan jumlah air pada proses hidrasi *heptahydrate*. Kemudian campuran tersebut kemudian dialirkan ke *crystalizer*, dimana *ferrous sulfate* di kristalisasi membentuk kristal *ferrous sulfate heptahydrate*. Hasil kristal kemudian masuk proses penyaringan oleh separator agar terpisah antara kristal *ferrous sulfate heptahydrate* dengan larutan induknya (Kehrmann, 2006).



PRA RANCANGAN PABRIK

“Pabrik Besi Sulfat Heptahidrat dari Larutan Pickling dan Asam Sulfat dengan Proses Presipitasi Kapasitas 60.000 ton/tahun”

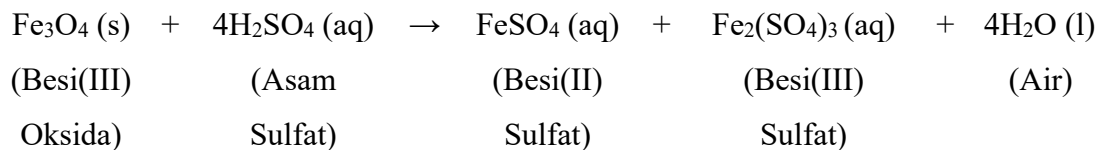


Gambar II. 2 Proses Pembentukan Ferrous Sulfate Heptahidrate Dari Pickling Liquor Dan Asam Sulfat

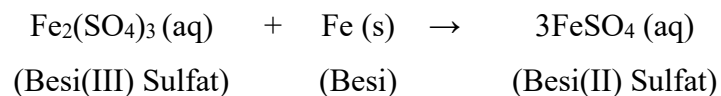
II.2. Potensi Ekonomi

II.2.1 Ferrous Sulfate Heptahidrate Dari Magnetite Dan Asam Sulfat

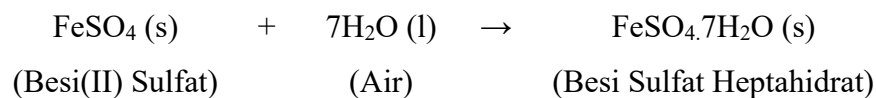
Reaksi 1: Presipitasi Besi(II) Sulfat



Reaksi 2: Reduksi Fe^{3+}



Reaksi 3: Kristalisasi heptahidrat





PRA RANCANGAN PABRIK

“Pabrik Besi Sulfat Heptahidrat dari Larutan Pickling dan Asam Sulfat dengan Proses Presipitasi Kapasitas 60.000 ton/tahun”

Tabel II. 1 Analisa Hasil Stokiometri Ferrous Sulfate Heptahidrate Dari Magnetite Dan Asam Sulfat

Reaksi	Komponen					
	Besi(III) Oksida	Asam Sulfat	Besi(II) Sulfat	Besi(III) Sulfat	Besi	Besi Sulfat Heptahidrat
1	-1	-4	+1	+1		
2			+3	-1	-1	
3			-1			+1
Jumlah	-1	-4	3	0	-1	+1

Tabel II. 2 Data Perhitungan Potensi Ekonomi

Bahan/Produk	Harga/kg (Rp)	BM (kg/kmol)	Sumber
Besi(III) Oksida	16.777,43	0,1597	Alibaba, 2026
Asam Sulfat	10.150,00	0,0981	PT Timur Raya Tunggal
Besi(II) Sulfat	2.517,00	0,1519	Alibaba, 2026
Besi(III) Sulfat	16.777,00	0,3999	Alibaba, 2026
Besi	6.711,00	0,0558	Alibaba, 2026
Besi Sulfat Heptahidrat	16.000,00	0,2781	Alibaba, 2026

$$\begin{aligned}
 PE &= ((\text{Koef} \times \text{BM} \times \text{Harga}) \text{FeSO}_4 + (\text{Koef} \times \text{BM} \times \text{Harga}) \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}) - \\
 &\quad ((\text{Koef} \times \text{BM} \times \text{Harga}) \text{Fe}_3\text{O}_4 + (\text{Koef} \times \text{BM} \times \text{Harga}) \text{H}_2\text{SO}_4 + (\text{Koef} \times \\
 &\quad \text{BM} \times \text{Harga}) \text{Fe}) \\
 &= (1.147,06 + 4.448,80) - (2.679,19 + 3.982,05 + 374,78) \\
 &= 1.440,15
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil analisis perhitungan, diperoleh bahwa Proses Pembentukan *Ferrous Sulfate Heptahidrate* dari *Magnetite* dan Asam Sulfat memiliki potensial ekonomi positif sebesar Rp 1.440,15/kmol produk atau Rp 5.179,48 /kg produk. Nilai positif ini menunjukkan bahwa harga jual $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ lebih tinggi dibandingkan total harga bahan baku yang digunakan, yaitu Fe_3O_4 , H_2SO_4 , dan Fe.



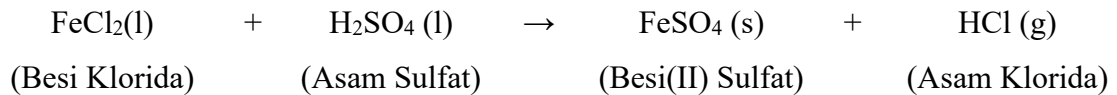
PRA RANCANGAN PABRIK

“Pabrik Besi Sulfat Heptahidrat dari Larutan Pickling dan Asam Sulfat dengan Proses Presipitasi Kapasitas 60.000 ton/tahun”

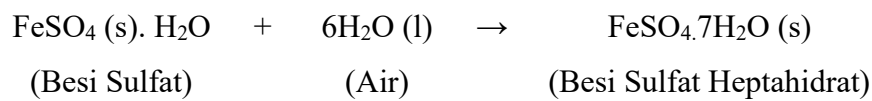
Dengan demikian, secara sederhana dapat disimpulkan bahwa proses ini berpotensi ekonomis untuk dikembangkan apabila efisiensi proses dijaga dengan baik.

II.2.2 Ferrous Sulfate Heptahidrat Dari Pickling Liquor Dan Asam Sulfat

Reaksi 1:



Reaksi 2:



Tabel II. 3 Analisa Hasil Stokiometri Ferrous Sulfate Heptahidrat Dari Pickling Liquor Dan Asam Sulfat

Reaksi	Komponen				
	Besi Klorida	Asam Sulfat	Besi(II) Sulfat	Asam Klorida	Besi Sulfat Heptahidrat
1	-1	-1	1	2	
2			-1		1
Jumlah	-1	-1	0	2	1

Tabel II. 4 Data Perhitungan Potensi Ekonomi

Bahan/Produk	Harga/kg (Rp)	BM (kg/mol)	Sumber
Besi Klorida	3.700,00	0,12675	PT Krakatau Steel
Asam Sulfat	10.150,00	0,09808	PT Timur Tunggal Raya
Besi(II) Sulfat	2.517,00	0,151908	Alibaba, 2026
Asam Klorida	8.000,00	0,03646	Alibaba, 2026
Besi Sulfat Heptahidrat	16.000,00	0,27805	Alibaba, 2026

$$\text{PE} = ((\text{Koef} \times \text{BM} \times \text{Harga}) \text{HCl} + (\text{Koef} \times \text{BM} \times \text{Harga}) \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}) - ((\text{Koef} \times \text{BM} \times \text{Harga}) \text{FeCl}_2 + (\text{Koef} \times \text{BM} \times \text{Harga}) \text{H}_2\text{SO}_4)$$



PRA RANCANGAN PABRIK

“Pabrik Besi Sulfat Heptahidrat dari Larutan Pickling dan Asam Sulfat dengan Proses Presipitasi Kapasitas 60.000 ton/tahun”

$$\begin{aligned} PE &= (583,36 + 4.448,80) - (468,98 + 995,51) \\ &= 3.567,67 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil analisis perhitungan, diperoleh bahwa Proses Pembentukan *Ferrous Sulfate Heptahydrate* dari *Pickling Liquor* dan Asam Sulfat memiliki potensial ekonomi positif sebesar Rp 3.567,67/kmol produk atau Rp 12.831,05/kg produk. Nilai positif ini menunjukkan bahwa harga jual $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ lebih tinggi dibandingkan total harga bahan baku yang digunakan, yaitu Fe_3O_4 , H_2SO_4 , dan Fe. Dengan demikian, secara sederhana dapat disimpulkan bahwa proses ini berpotensi ekonomis untuk dikembangkan apabila efisiensi proses dan produk samping dijaga dengan baik.

II.3. Pemilihan Proses

Berdasarkan beberapa proses yang dapat dilakukan dalam pembentukan *Ferrous Sulfate Heptahydrate*, dapat dibuat perbandingan sebagai berikut.

Tabel II. 5 Seleksi Proses Pembentukan *Ferrous Sulfate Heptahydrate*

No.	Parameter	Magnetite dan Asam Sulfat	Pickling Liquor dan Asam Sulfat
1.	Fase	Padat – Cair	Cair – Cair
2.	Suhu Operasi (°C)	70 – 90	45 – 85
3.	Waktu Tinggal Presipitasi (jam)	3 – 5	1 – 2
4.	Hasil Sampling	-	HCl
5.	Konversi (%)	97	99
6.	Potensial Ekonomi (Rp/kg produk)	5.179,48	12.831,05

Berdasarkan perbandingan antara beberapa proses tersebut, proses kedua dipilih sebagai proses dalam pembuatan *ferrous sulfate heptahydrate*. Berikut ini beberapa pertimbangannya :

1. Harga bahan baku pickling liquor merupakan limbah pabrik baja yang lebih terjangkau sehingga potensial ekonomi yang diperoleh cukup besar.



PRA RANCANGAN PABRIK

“Pabrik Besi Sulfat Heptahidrat dari Larutan Pickling dan Asam Sulfat dengan Proses Presipitasi Kapasitas 60.000 ton/tahun”

2. Proses membutuhkan biaya rendah karena proses berlangsung pada suhu yang rendah.
3. Hasil samping berupa HCl yang bernilai tinggi.
4. Konversi produk lebih tinggi

II.4. Uraian Proses

1. Tahap Persiapan Bahan Baku

Bahan baku utama dalam proses ini adalah *pickling liquor* yang merupakan limbah cair dari industri baja dengan kandungan utama *ferrous chloride* (FeCl_2), asam klorida (HCl), dan air. Pickling liquor mengandung sekitar 38% w/w FeCl_2 , 2% w/w HCl, dan H_2O 60% dan $\text{pH} \leq 1$ yang di simpan pada tangki (F-110). Selain itu, asam sulfat pekat dengan konsentrasi 98% disimpan dalam tangki (F-120) pada suhu 30°C . Sebelum masuk reaktor presipitasi (R-210), asam sulfat diencerkan terlebih dahulu dalam tangki pengenceran (M-122) dengan menambahkan H_2O hingga diperoleh konsentrasi sebesar 60% w/w. Asam sulfat dengan konsentrasi 60% w/w dipanaskan terlebih dahulu pada suhu 85°C pada heat exchanger (E-124).

2. Tahap Presipitasi Ferrous Sulfate

Pickling liquor dari unit penyimpanan dialirkan ke dalam reaktor presipitasi (R-210), kemudian direaksikan dengan asam sulfat 60% w/w yang telah dipanaskan. Rasio asam sulfat dan pickling liquor sebesar 1:1,5. Penggunaan asam sulfat berlebih untuk menciptakan kondisi asam yang tinggi sehingga kelarutan *ferrous sulfate* (FeSO_4) menurun secara signifikan sehingga senyawa tersebut mudah mengendap (*precipitated*). Reaksi presipitasi berlangsung pada suhu 85°C , tekanan atmosfer, dan waktu tinggal 1 jam.



Reaksi yang terjadi adalah konversi *ferrous chloride* menjadi *ferrous sulfate* dengan pelepasan asam klorida dalam bentuk gas. Hasil dari tahap ini berupa suspensi *ferrous sulfate* dalam larutan asam serta fase gas yang mengandung



PRA RANCANGAN PABRIK

“Pabrik Besi Sulfat Heptahidrat dari Larutan Pickling dan Asam Sulfat dengan Proses Presipitasi Kapasitas 60.000 ton/tahun”

HCl dan uap air. Suspensi *ferrous sulfate* kemudian difiltrasi menggunakan *filter press* (H-310) untuk memisahkan cake dan filtrat. Pada filter, filtrat yang mengandung sisa asam dan pengotor dipisahkan, sedangkan cake berupa *ferrous sulfate* dialirkan ke *hydration tank* (M-320) dengan penambahan air untuk menyediakan jumlah air pada proses hidrasi *heptahydrate*. Pada *hydration tank* dilengkapi *jacket* yang dialiri *steam* agar terjadi kondisi supersaturasi *ferrous sulfate* dengan menaikkan kelarutannya.

3. Tahap Pemisahan Asam Klorida

Gas asam klorida (85°C) yang terbentuk selama proses presipitasi dialirkan ke menara absorber (D-220) untuk dipisahkan dan ditangkap agar tidak mencemari lingkungan. Absorber yang digunakan berupa kolom berisi packing dengan aliran gas dan cairan secara berlawanan arah. H₂O digunakan sebagai absorben untuk melarutkan gas HCl sehingga diperoleh larutan asam klorida lalu disimpan ke dalam tangki penyimpanan HCl. Suhu di dalam absorber dijaga pada kisaran 45°C untuk meningkatkan kelarutan HCl dalam air.

4. Tahap Kristalisasi Ferrous Sulfate Heptahydrate

Ferrous sulfate dari *hydration tank* (M-320) selanjutnya *ferrous sulfate* dialirkan ke *crystalizer* (S-330) untuk dikristalisasi menjadi *ferrous sulfate heptahydrate*. Proses kristalisasi berlangsung pada suhu 30°C sehingga terbentuk kristal *ferrous sulfate heptahydrate*.

5. Tahap Pemurnian Ferrous Sulfate Heptahydrate

Hasil kristal kemudian masuk proses penyaringan oleh *centrifuge* (H-340) agar terpisah antara kristal *ferrous sulfate heptahydrate* dengan *mother liquor*. Kristal *ferrous sulfate heptahydrate* kemudian masuk ke proses pengeringan oleh *rotary dryer* (B-350) untuk menghasilkan kristal yang benar-benar kering. Suhu pada *rotary dryer* dijaga pada suhu 60°C untuk menghindari dekomposisi *ferrous sulfate heptahydrate* menjadi *ferrous sulfate monohydrate* akibat pelepasan air kristal. Kristal *ferrous sulfate heptahydrate* yang keluar dari *rotary dryer* dialirkan melalui *cooling conveyor* (J-352) untuk menurunkan suhu secara bertahap hingga mendekati suhu lingkungan. Pendinginan ini



PRA RANCANGAN PABRIK

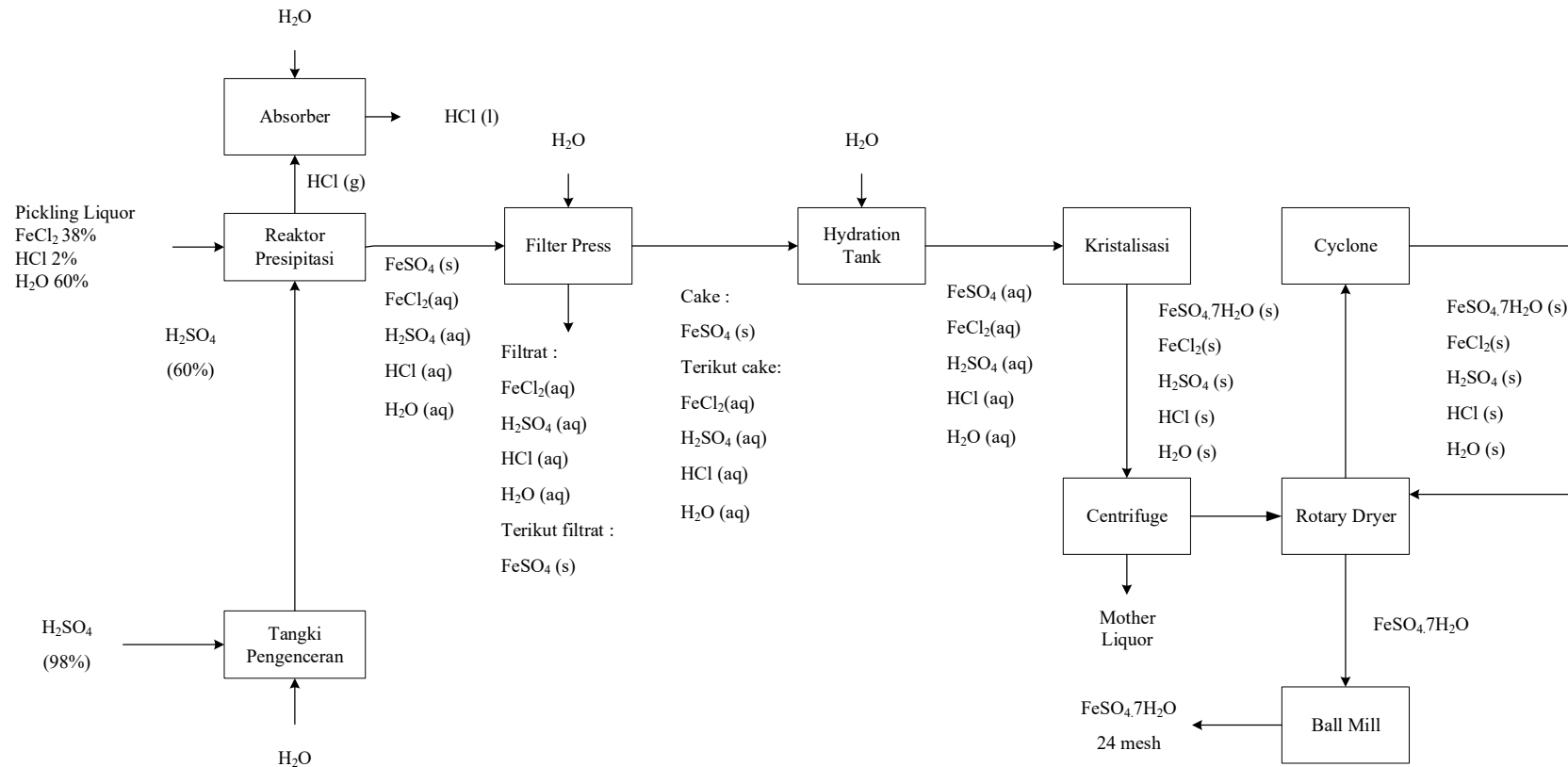
“Pabrik Besi Sulfat Heptahidrat dari Larutan Pickling dan Asam Sulfat dengan Proses Presipitasi Kapasitas 60.000 ton/tahun”

bertujuan untuk menstabilkan struktur hidrat kristal, mencegah dehidrasi lanjutan, serta menghindari kondensasi uap air selama penyimpanan. Setelah itu kristal di seragamkan ukurannya menggunakan ball mill (C-335) hingga ukuran 100 mesh dan kemudian disimpan di tangki penyimpanan (F-360).



PRA RANCANGAN PABRIK

“Pabrik Besi Sulfat Heptahidrat dari Larutan Pickling dan Asam Sulfat dengan Proses Presipitasi Kapasitas 60.000 ton/tahun”



Gambar II. 3 Basic Flow Diagram Uraian Pro