

LAPORAN SKRIPSI
PRARANCANGAN PABRIK FERROSULFAT HEPTAHIDRAT
DARI *PICKLING LIQUOR* DAN ASAM SULFAT
KAPASITAS 28.000 TON/TAHUN



Disusun Sebagai Salah Satu Persyaratan Untuk Menyelesaikan
Pendidikan Strata Satu Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik
Universitas Setia Budi Surakarta

Oleh :

Widia Arrifa Asna 21150282D

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SETIA BUDI
SURAKARTA
2020

LEMBAR PERSETUJUAN

LAPORAN TUGAS AKHIR

**PRARANCANGAN PABRIK FERROSULFAT HEPTAHIDRAT
DARI PICKLING LIQUOR DAN ASAM SULFAT
KAPASITAS 28.000 TON/TAHUN**

Oleh :

Widia Arrifa Asna 21150282D

Telah disetujui oleh pembimbing

Pada tanggal, 22 Agustus 2020

Pembimbing I

Ir. Petrus Darmawan, S.T., M.T.

NIS. 01199905141068

Pembimbing II

Ir. Dewi Astuti Herawati, S.T., M.Eng.

NIS. 01199601032053

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Kimia

Gregorius Prima Indra Budianto, S.T., M.Eng.

NIS. 01201407261183

LEMBAR PENGESAHAN

LAPORAN TUGAS AKHIR

PRARANCANGAN PABRIK FERROSULFAT HEPTAHIDRAT
DARI PICKLING LIQUOR DAN ASAM SULFAT
KAPASITAS 28.000 TON/TAHUN

Oleh :

Widia Arrifa Asna 21150282D

Telah dipertahankan di depan tim penguji

Pada tanggal, 22 Agustus 2020

Nama

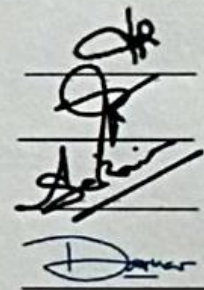
Tanda Tangan

Penguji 1 : Ir. Argoto Mahayana, S. T., M.T.

Penguji 2 : Gregorius Prima Indra Budiarto, S.T., M.Eng.

Penguji 3 : Ir. Dewi Astuti Herawati, S.T., M.Eng.

Penguji 4 : Ir. Petrus Darmawan, S.T., M.T.



Mengetahui,

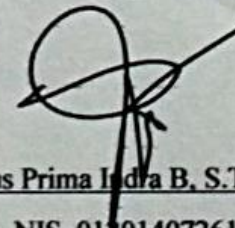
Dean Fakultas Teknik

Ketua Program Studi



Dr. Drs. Suseno, M.Si.

NIS. 01199408011044



Gregorius Prima Indra B. S.T., M.Eng.

NIS. 01201407261183

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

DONE IS BETTER THAN PERFECT

”Karena sesungguhnya sesudah kesulitan ada kemudahan,
sesungguhnya sesudah kesulitan itu kemudahan”

(Surat Al-Insyirah ayat 5-6)

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan kepada Allah SWT atas berkatnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini sendiri, dengan bantuan-Nya pula penulis semangat dalam mengerjakan skripsi walaupun dengan waktu yang lama, namun penulis tetap bersyukur. Kepada Bapak-Ibuku dirumah penulis mengucapkan banyak-banyak terimakasih atas semua dukungan yang diberikan walau penulis banyak kekurangan namun beliau-beliau selalu memberi *support* dalam bentuk apapun. Terimakasih kepada dosen pembimbing saya selama skripsi pak Petrus dan bu Dewi atas bimbingannya. Kepada April terimakasih atas waktunya mau membantu penulis mengerjakan hitungan skripsi dari awal belum mengerjakan apa-apa sampai selesai semuanya, apalah penulis ini yang tidak paham akan hitungan kalau tidak dibantu mungkin tidak akan selesai. Terimakasih kepada Iis, Nurul dan Tari yang membantu menulis lampiran skripsi tanpa bantuannya saya sulit untuk mengerjakan skripsi ini sendiri. Terimakasih kepada teman-temanku angkatan 2015 S1 Teknik Kimia USB atas kata-kata motivasinya. Terakhir saya ucapkan terimakasih pada diriku yang harus selalu kuat bahkan harus mengerjakan sendiri, tidak apa-apa kamu salah tapi jangan mudah menyerah, karena banyak harapan dari orang tuamu yang harus kamu emban untuk kedepannya. Tetap semangat Allah SWT selalu memberi jalan bagi hamba-Nya yang selalu bersyukur.

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmat hidayah dan petunjuknya-Nya sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir prarancangan pabrik kimia ini dengan baik.

Judul Tugas Akhir ini adalah **Prarancangan Pabrik Ferrosulfat Heptahidrat dari Pickling Liquor dan Asam sulfat kapasitas 28.000/Tahun**. Tugas Prarancangan Pabrik Kimia merupakan tugas akhir yang harus diselesaikan oleh setiap mahasiswa Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Setia Budi Surakarta sebagai prasyarat untuk menyelesaikan jenjang studi sarjana. Dengan tugas ini diharapkan kemampuan penalaran dan penerapan teori-teori yang telah diperoleh selama kuliah dapat berkembang dan dapat dipahami dengan baik.

Penyusunan laporan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan dan bimbingan serta dorongan dari berbagai pihak. Melalui laporan ini penyusun ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kepada Allah SWT atas limpahan berkat, rahmat dan hidayahnya sangat membantu penulis agar tetap semangat dan kuat dalam mengerjakan skripsi dari awal sampai akhir. Allah adalah motivator terhebat dalam hidupku
2. Djoni Tarigan, MBA., selaku Rektor Universitas Setia Budi Surakarta.
3. Dr. Drs. Suseno, M.Si selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Setia Budi Surakarta Gregorius Prima Indra Budiando, S.T., M.Eng., selaku Ketua Program Studi Teknik kimia, Fakultas Teknik, Universitas Setia Budi Surakarta dan selaku pembimbing II, yang telah memberikan bimbingan dan nasehat hingga selesainya tugas akhir ini.
4. Ir. Petrus Darmawan, S.T., M.T. selaku pembimbing I yang dengan kesabarannya telah memberikan bimbingan kepada penulis hingga terselainya tugas akhir ini.
5. Ir. Dewi Astuti Herawati, S.T., M.Eng. selaku pembimbing 2 dengan kesabarannya memberikan bimbingan kepada penulis.

6. Ir. Argoto Mahayana, S. T., M.T. dan Gregorius Prima Indra Budianto, S.T., M.Eng. selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktunya untuk menguji hasil laporan tugas akhir ini.
7. Bapak dan Ibu dosen jurusan teknik kimia atas ilmu dan bimbingannya selama kuliah.
8. Serta semua yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam skripsi ini, untuk itu saran dan kritik yang membangun dari pembaca sangat penulis harapkan. Dan semoga laporan ini bermanfaat bagi semua pihak.

Surakarta, 20 Juli 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
INTISARI.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Penentuan Kapasitas Rancangan.....	2
1.3 Pemilihan Lokasi Pabrik	5
1.4 Macam – macam Proses.....	9
1.5 Manfaat Ferrosulfat Heptahidrat	11
1.6 Sifat Fisika dan Kimia Bahan Baku, Produk dan Bahan Pembantu	12
1.7 Tinjauan Proses Secara Umum	14
BAB II SPESIFIKASI BAHAN	
2.1 Spesifikasi Bahan Baku.....	20
2.2 Spesifikasi Bahan Pembantu	20
2.3 Spesifikasi Produk.....	21

BAB III DESKRIPSI PROSES

3.1 Langkah Proses	22
--------------------------	----

BAB IV NERACA MASSA DAN NERACA PANAS

4.1 Neraca Massa	27
------------------------	----

4.2 Neraca Panas	30
------------------------	----

BAB V SPESIFIKASI ALAT

5.1 Tangki Penyimpanan <i>Pickling Liquor</i>	39
---	----

5.2 Tangki Penyimpanan H ₂ SO ₄	39
---	----

5.3 Mixer	40
-----------------	----

5.4 Reaktor	40
-------------------	----

5.5 Evaporator	42
----------------------	----

5.6 Kondensor	42
---------------------	----

5.7 Cooler	43
------------------	----

5.8 Kristalizer	43
-----------------------	----

5.9 Heater Udara	44
------------------------	----

5.10 Rotary dryer	45
-------------------------	----

5.11 Blower	45
-------------------	----

5.12 Cyclone	46
--------------------	----

5.13 Cooling Conveyor	46
-----------------------------	----

5.14 Bucket Elevator	47
----------------------------	----

5.15 Silo	47
-----------------	----

5.16 Heater-01	48
----------------------	----

5.17 Heater-02.....	48
5.18 Heater-03.....	49
5.19 Heater-04.....	49
5.20 Screw Conveyor.....	50
5.21 Pompa-01.....	50
5.22 Pompa-02.....	51
5.23 Pompa-03.....	51
5.24 Pompa-04.....	52
5.25 Pompa-05.....	52
5.26 Pompa-06.....	53
5.27 Pompa-07.....	53

BAB VI UTILITAS

6.1 Unit Pendukung Proses.....	54
6.2 Unit Pengadaan Listrik.....	60
6.3 Unit Pengadaan Bahan bakar.....	63
6.4 Unit Pengadaan Udara Tekan.....	63
6.5 Unit Penyediaan Limbah.....	63
6.6 Laboratorium.....	64
6.7 Kesehatan dan Keselamatan Kerja.....	66
6.8 Alat-alat Utilitas.....	67

BAB VII ORGANISASI DAN TATA LETAK PABRIK

7.1 Bentuk Perusahaan.....	77
----------------------------	----

7.2 Struktur Organisasi	78
7.3 Sistem Kepegawaian dan Sistem Gaji.....	82
7.4 Kesejahteraan Karyawan.....	90
7.5 Manajemen Produksi.....	93
7.6 Tata Letak Pabrik	95
7.7 Tata Letak Peralatan.....	99
BAB VIII EVALUASI EKONOMI	
8.1 Perhitungan Biaya	104
8.2 <i>Total Fixed Capital Investment</i>	106
8.3 <i>Working Capital</i>	107
8.4 <i>Manufacturing Cost</i>	107
8.5 <i>General Expense</i>	108
8.6 Analisis Ekonomi.....	108
BAB IX KESIMPULAN	113
DAFTAR PUSTAKA	114
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Data Impor Ferrosulfat Heptahidrat di Indonesia	2
Tabel 1.2 Daftar Produksi Industri Ferrosulfat Heptahidrat di Dunia	4
Tabel 1.3 Konsumen Ferrosulfat Heptahidrat di Jawa Timur.....	7
Tabel 1.4 Kelebihan dan Kelebihan Ferrosulfat Heptahidrat.....	11
Tabel 1.5 Daftar Harga Panas Pembentukan dari Reaksi	15
Tabel 1.6 Daftar Harga Cp dari Reaksi	16
Tabel 1.7 Daftar Harga ΔG_f Komponen Reaksi.....	17
Tabel 4.1 Neraca Massa Disekitar Mixer-120	28
Tabel 4.2 Neraca Massa Disekitar Reaktor-210	28
Tabel 4.3 Neraca Massa Disekitar Evaporator-310	29
Tabel 4.4 Neraca Massa Disekitar Kristalizer-320	29
Tabel 4.5 Neraca Massa Disekitar Rotary Dryer-410.....	30
Tabel 4.6 Neraca Massa Disekitar Cyclone-413.....	30
Tabel 4.7 Konstanta Kapasitas Panas	31
Tabel 4.8 Neraca Panas Mixer-120.....	31
Tabel 4.9 Neraca Panas Heater-221	32
Tabel 4.10 Neraca Panas Heater-222	32
Tabel 4.11 Neraca Panas Heater-212	33
Tabel 4.12 Neraca Panas Heater-223	33
Tabel 4.13 Neraca Panas Reaktor-210	34
Tabel 4.14 Neraca Panas Evaporator-310.....	34

Tabel 4.15 Neraca Panas Kondensor-312	35
Tabel 4.16 Neraca Panas Cooler-322	35
Tabel 4.17 Neraca Panas Kriticalizer-320	36
Tabel 4.18 Neraca Panas Rotary Dryer-410	36
Tabel 4.19 Neraca Panas Cyclone-413	37
Tabel 4.20 Neraca Panas Heater Udara-412	37
Tabel 4.21 Neraca Panas Cooling Conveyor-420	38
Tabel 6.1 Kebutuhan air proses.....	55
Tabel 6.2 Kebutuhan air pendingin.....	56
Tabel 6.3 Kebutuhan air sanitasi.....	57
Tabel 6.4 Kebutuhan air untuk steam	57
Tabel 6.5 Kebutuhan air makeup	58
Tabel 6.6 Kebutuhan listrik untuk keperluan proses.....	61
Tabel 6.7 Kebutuhan listrik untuk keperluan utilitas	61
Tabel 7.1 Daftar gaji karyawan	83
Tabel 7.2 Luas bangunan pabrik	97
Tabel 8.1 Cost index chemical plant	103
Tabel 8.2 Total fixed capital investment.....	106
Tabel 8.3 Working capital.....	107
Tabel 8.4 Manufacturing cost	107
Tabel 8.5 General expenses.....	108
Tabel 8.6 Fixed cost	110

Tabel 8.7 Variabel cost	110
Tabel 8.8 Regulated cost	110
Tabel 9.1 Analisis Kelayakan Ekonomi	112

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Grafik Kebutuhan Impor Ferrosulfat Heptahidrat.....	3
Gambar 1.2 Peta Lokasi Wilayah KIG Berdasarkan Google Earth	6
Gambar 3.1 Diagram alir kualitatif	25
Gambar 3.2 Diagram alir kuantitatif	26
Gambar 6.1 Proses Pengolahan Air	76
Gambar 7.1 Jadwal Karyawan	89
Gambar 7.2 Struktur organisasi dan industri.....	92
Gambar 7.3 Tata letak pabrik.....	98
Gambar 7.4 Tata letak peralatan	101
Gambar 8.1 Cost Index Chemical Plant.....	103
Gambar 8.2 Grafik SDP dan BEP.....	111

INTISARI

Prarancangan pabrik ferrosulfat heptahidrat direncanakan akan didirikan pada tahun 2024 yang berlokasi di Gresik, Jawa Timur yang berdekatan dengan PT Petrokimia Gresik dan PT Smelting sebagai penyedia bahan baku. Pabrik ini beroperasi selama 330 hari/tahun dengan kapasitas 28.000 ton/tahun, dengan pertimbangan dapat memenuhi kebutuhan dalam negeri.

Prarancangan pabrik ferrosulfat heptahidrat dilakukan dengan mereaksikan *pickling liquor* sebesar 3883,8493 kg/jam dan asam sulfat sebesar 6533,0740 kg/jam dalam reaktor RTB (reaktor tangki berpengaduk) yang disusun secara seri agar proses reaksi yang semula *batch* dapat berjalan secara kontinyu yang dilengkapi dengan jaket pemanas dan pada kondisi tekanan 1 atm dan suhu 85 °C. Reaksi berlangsung secara endotermis (membutuhkan panas), *irreversible*, dan *non adiabatic*. Untuk menunjang proses produksi maka, didirikan unit pendukung yaitu unit penyedia air sebesar 10411,67 kg/jam. Kebutuhan listrik diperoleh dari PLN dan 1 generator 400 KW, bahan bakar sebanyak 0,1198 m³/jam, dan udara tekan sebesar 50 m³/jam.

Dari analisa ekonomi yang dilakukan terhadap pabrik ini dengan modal tetap (FCI) Rp 338.010.766.504,59 modal kerja (*working capital*) Rp 74.206.387.743,24. Keuntungan sebelum pajak Rp 118.095.460.360,04 per tahun setelah dipotong pajak sebesar 30% keuntungan mencapai Rp 82.666.822.252,04 per tahun. *Return On Investment* (ROI) sebelum pajak 34,938% dan setelah pajak 24,457%. *Pay Out Time* (POT) sebelum pajak adalah 2,2253 tahun dan setelah pajak 2,902 tahun. *Break Even Point* (BEP) sebesar 40,802%, *Shut Down Point* (SDP) sebesar 21,011%. Dari data analisis kelayakan diatas dapat disimpulkan bahwa pabrik ini menguntungkan dan layak didirikan.
Kata kunci : *Pickling Liquor*, Ferrosulfat Heptahidrat, Reaktor Tangki Berpengaduk



LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai mahasiswa Universitas Setia Budi, yang bertanda tangan di bawah ini, saya:

Nama : WIDIA ARRIFA ASNA
NIM : 21150282D
Fakultas/Jurusan : TEKNIK / SI TEKNIK KIMIA
E-mail address : widiaca797@gmail.com

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Perpustakaan Universitas Setia Budi, Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right) atas karya ilmiah :

KTI Skripsi Tesis PKPA PKL/KKL

yang berjudul *) :

Pra rancangan pabrik ferrosulfat heptahidrat dari pickling liquor dan asam sulfat kapasitas 28.000 ton / tahun

berserta perangkat yang diperlukan (bila ada). Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Perpustakaan Universitas Setia Budi berhak menyimpan, mengalih-media/format-kan, mengelolanya dalam bentuk pangkalan data (database), mendistribusikannya, dan menampilkan/mempublikasikannya di Internet atau media lain *) :

secara *fulltext*

hanya sebatas cantuman bibliografi dan abstrak, karena _____

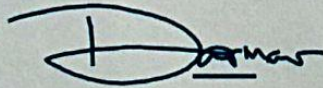
untuk kepentingan akademis tanpa perlu meminta ijin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan atau penerbit yang bersangkutan.

Saya bersedia untuk menanggung secara pribadi, tanpa melibatkan pihak Perpustakaan Universitas Setia Budi, segala bentuk tuntutan yang timbul atas pelanggaran Hak Cipta dalam karya ilmiah saya ini.

Demikian pernyataan ini yang saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : rumah widia (Jl. solar raya, wuragen, kartasura, sukoharjo)
Pada tanggal :

Pembimbing I



(Ir. Petrus Darmawan, S.T., M.T.)
nama terang dan tanda tangan

Penulis



(WIDIA ARRIFA ASNA)
nama terang dan tanda tangan

Dibuat rangkap 2, untuk penulis dan perpustakaan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini pertumbuhan industri di Indonesia menunjukkan kemajuan yang sangat pesat, terlihat dengan bertambahnya jumlah pabrik yang menghasilkan zat kimia maupun meningkatnya kebutuhan akan zat kimia di pasaran. Keberadaan industri – industri yang ada memegang peranan yang sangat penting pada sektor perekonomian di negara kita. Namun disisi lain industri dapat menimbulkan limbah yang dapat merusak ekologi lingkungan. Oleh karena itu teknologi pengolahan limbah disarankan untuk mengurangi polusi dan pemanfaatan limbah lanjut untuk diolah menjadi produk yang berguna dan bermanfaat.

Pickling liquor yang merupakan produk samping dari industri baja mempunyai kandungan FeCl_2 , HCl , dan H_2O . Untuk mengurangi volume limbah dari industri baja, dilakukan pengolahan terhadap *pickling liquor*. Kandungan FeCl_2 pada *pickling liquor* merupakan bahan baku pembuatan ferrosulfat heptahidrat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).

Industri ferrosulfat heptahidrat merupakan industri penunjang untuk industri lain, bermutu, bernilai tinggi, dan padat ketrampilan serta padat teknologi. Dalam perdagangan ferrosulfat heptahidrat dikenal dengan nama *copperas*. Hampir semua industri yang menggunakan ferrosulfat heptahidrat sebagai bahan baku utama maupun bahan pendamping namun selama ini masih selalu mengimpor dari luar negeri. Padahal kebutuhan dalam negeri sangat banyak tetapi belum ada pabrik lokal yang memproduksi ferrosulfat heptahidrat. Oleh karena itu perlu didirikan pabrik ferrosulfat heptahidrat yang diharapkan dapat menjadi solusi pemenuhan kebutuhan ferrosulfat heptahidrat di dalam negeri sehingga tidak diperlukan mengimpor dari luar negeri lagi, dan mengurangi pencemaran limbah pabrik baja

1.2 Penentuan Kapasitas Rancangan

Kapasitas produksi dapat diartikan sebagai jumlah maksimum *output* yang dapat diproduksi dalam satuan waktu tertentu. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi dalam pemilihan kapasitas pabrik ferrosulfat heptahidrat, antara lain :

1.2.1 Kebutuhan ferrosulfat heptahidrat di Indonesia

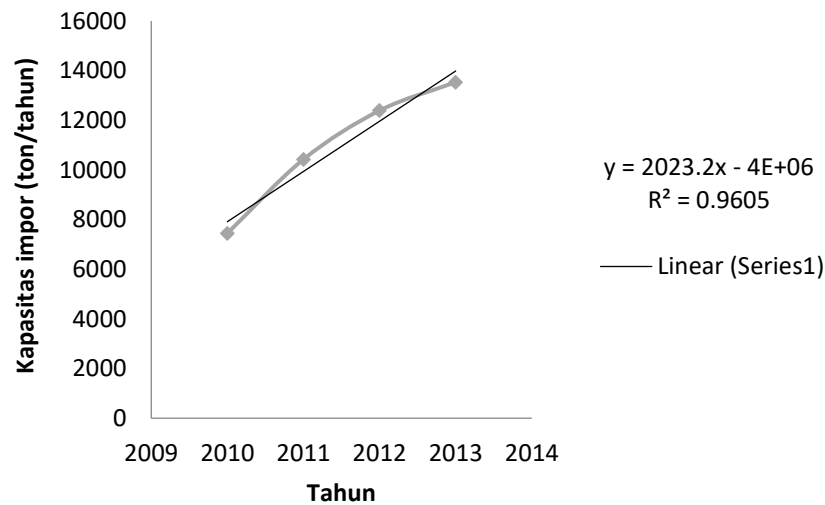
Kebutuhan ferrosulfat heptahidrat dalam negeri terus meningkat. Untuk memenuhi kebutuhan akan ferrosulfat heptahidrat sampai saat ini harus melalui impor dari luar negeri. Kapasitas impor kebutuhan ferrosulfat heptahidrat dalam negeri dapat di lihat pada tabel berikut :

Tabel 1.1 Data Impor Ferrosulfat Heptahidrat

No	Tahun	Impor (ton/tahun)
1	2010	7447,655
2	2011	10424,747
3	2012	12391,583
4	2013	13536,176

(Sumber : Badan Pusat Statistik, 2013)

Dari tabel 1.1 dapat dilihat bahwa kebutuhan ferrosulfat heptahidrat setiap tahunnya mengalami kenaikan. Maka dari itu, kebutuhan impor ferrosulfat heptahidrat di Indonesia pada tahun 2024 dapat dinyatakan pada gambar di bawah ini menggunakan cara regresi linier menggunakan data pada tabel 1.1 berikut regresi linier untuk data impor :



Gambar 1.1 Grafik Kebutuhan Impor Ferrosulfat Heptahidrat

(Sumber : Badan Pusat Statistik, 2013)

Dari gambar 1.1 diperoleh persamaan $y = 2023,2x - 4E+06$, sehingga untuk tahun 2024 diperkirakan kebutuhan ferrosulfat heptahidrat 36240,539 ton/tahun.

1.2.2 Ketersediaan bahan baku

Bahan baku pembuatan ferrosulfat heptahidrat adalah *pickling liquor* yang dapat diperoleh dari PT Gunawan Dian Jaya Steel, Surabaya dengan kapasitas limbah *pickling liquor* dengan karakteristik $FeCl_2$ 40%, HCl 2% dan H_2O 58% yang dapat dihasilkan yakni sebesar 100.000 ton/tahun di Gresik Jawa Timur. Bahan baku asam sulfat dapat diperoleh dari PT Petrokimia Gresik, Jawa Timur dengan kapasitas 50.000 ton/tahun.

1.2.3 Kapasitas komersial

Untuk mencukupi kebutuhan ferrosulfat heptahidrat di dalam negeri, maka Indonesia memerlukan impor dari luar negeri. berikut ini beberapa daftar industri produksi ferrosulfat heptahidrat di dunia yang sudah beroperasi.

Tabel 1.2 Daftar Produksi Industri Ferrosulfat Heptahidrat di Dunia

Nama Industri	Asal Industri	Kapasitas Produksi (ton/tahun)
Add-Iron Corporation (http://www.qccorporation.com)	North Lima, Ohio, USA	10.000
Crown Technology (http://www.crowntech.com)	Indianapolis, Indiana, USA	21.000
Hengyang Tian Xin Chemical Industrial Co., Ltd (http://www.made-in-China.com/manufacturers/5.html)	Hunan, China	25.000
Anshan Xinxingda Mineral Substance Co., Ltd (http://www.made-in-China.com/manufacturers/5.html)	Liaoning, China	10.000
Mineral King Minerals (https://www.manta.com/c/mm515pt/mineral-king-minerals-inc)	Hanford, California	25.000
QC Corporation (https://www.vlsci.com/product/diamond-brand-ferrous-sulfate)	Cape Girardeau, Missouri, German	45.000
SEM Minerals (https://www.seminerals.com/sem-minerals--l.p.html)	Gardner Expy, Quincy, IL, USA	18.000

Dasar pertimbangan berikut untuk menentukan kapasitas produksi ferrosulfat heptahidrat:

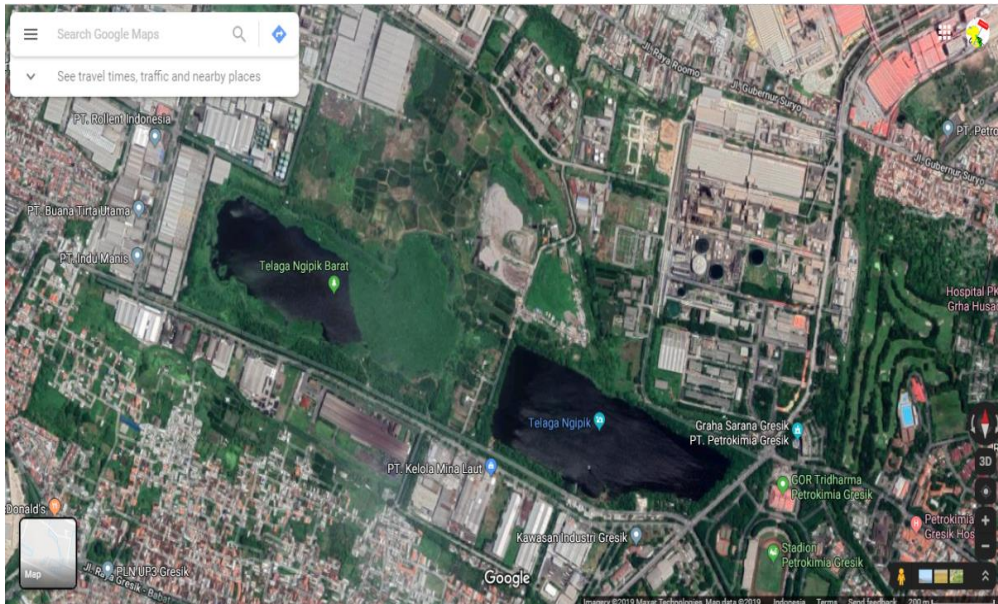
1. Dapat memenuhi kebutuhan ferrosulfat heptahidrat dalam negeri pada tahun 2024 sebesar 36.240,539 ton/tahun.

2. Bahan baku *pickling liquor* yang memadai, sehingga diharapkan dengan didirikannya pabrik ferrosulfat heptahidrat dapat mengurangi pembuangan limbah yang dapat mencemari lingkungan.
 3. Dapat memenuhi kapasitas produksi pabrik ferrosulfat heptahidrat yang telah berdiri sebelumnya minimal yaitu 10.000 ton/tahun dari pabrik Anshan Xinxingda Mineral Substance Co., Ltd yang berasal dari China dan kapasitas produksi maksimal dari pabrik QC Corporation yang terletak di negara Jerman sebesar 45.000 ton/tahun.
 4. Dapat memberikan keuntungan karena kapasitas rancangan berada diatas kapasitas produksi minimal di dunia.
 5. Meningkatkan devisa Negara karena mencakup pasar ekspor.
 6. Membuka peluang bagi industri lain di Indonesia untuk berdiri dan meningkatkan kapasitas produksi bagi pabrik yang berbahan baku $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.
 7. Dapat mengurangi jumlah pengangguran yang ada di Indonesia.
- Dengan beberapa pertimbangan diatas, maka akan didirikan pabrik ferrosulfat heptahidrat dengan proses *steel pickling* dengan kapasitas 28.000 ton/tahun

1.3 Penentuan Lokasi Pabrik

Letak geografis suatu pabrik memberikan pengaruh yang besar terhadap suksesnya usaha. Oleh karena itu dalam pemilihan lokasi pabrik dibutuhkan pertimbangan - pertimbangan yang didasarkan pada berbagai faktor baik dari segi ekonomis maupun teknis. Untuk itu sebelum pabrik berdiri perlu dilakukan studi kelayakan untuk mempertimbangkan faktor - faktor penunjang yang mendukung kelangsungan pabrik tersebut. Pabrik ferrosulfat heptahidrat dari *pickling liquor* dan asam sulfat ini direncanakan akan didirikan di daerah Gresik, Jawa Timur. Berikut ini gambar lokasi

perencanaan pabrik akan didirikan berdasarkan KIG (Kawasan Industri Gresik) dan Kementerian Perindustrian :



Gambar 1.2 Peta Lokasi KIG Berdasarkan Google Earth

(Sumber: www.google.com/earth/)

Adapun pemilihan lokasi tersebut berdasarkan faktor – faktor berikut :

1.3.1 Faktor primer

a. Penyediaan bahan baku

Lokasi pabrik dipilih mendekati sumber bahan baku untuk mengurangi biaya transportasi dan kehilangan bahan baku dalam transportasi. Bahan baku *pickling liquor* dengan karakteristik FeCl_2 40%, HCl 2%, dan H_2SO_4 58% diperoleh dari PT Gunawan Dian Jaya Steel. Sedangkan bahan baku asam sulfat diperoleh dari PT Petrokimia Gresik Jawa Timur.

b. Penyediaan utilitas

Sarana utilitas utama yang diperlukan bagi kelancaran proses produksi agar dapat berkesinambungan dan berproduksi adalah

air, tenaga listrik, penyediaan uap dan udara tekan. Kebutuhan air dapat diperoleh dari sungai Brantas yang memiliki debit besar dengan fluktuasi antara musim kemarau dan hujan yang relatif kecil atau dapat diperoleh dari air tanah. Sedangkan listrik dapat diperoleh dari PLN dan generator sebagai cadangan bila PLN ada gangguan.

Gresik adalah daerah yang mempunyai prospek yang baik sebagai daerah pengembangan industri dan tidak sedikit industri yang berdiri, sehingga kebutuhan listrik dan bahan bakar tidak menjadi masalah.

c. Pemasaran produk

Faktor yang perlu diperhatikan adalah letak daerah pabrik yang membutuhkan ferrosulfat heptahidrat, di daerah Gresik adalah tempat yang cukup strategis untuk memasarkan produknya karena terdapat pabrik - pabrik yang membutuhkan ferrosulfat heptahidrat di daerah tersebut.

Tabel 1.3. Konsumen Ferrosulfat Heptahidrat di Jawa Timur

Nama Industri	Asal Industri
PT Tirta Wana Semesta Kencana	Semambung, Gedangan, Sidoarjo
PT Indochito International	Dusun Gemurung Kidul, Sidoarjo
PT Panjimas Textile	Dusun Iopang, Driyorejo, Gresik
PT Semen Gresik, Tbk	Tuban Barat, Tlogobendung, Gresik
PT Semen Holcim Tuban	Tambakboyo, Tuban

(Sumber: <http://www.pabrik-berbahan-baku-ferro-sulfat/html>)

d. Sarana transportasi

Sarana dan prasarana transportasi sangat diperlukan dalam proses penyediaan bahan baku dan pemasaran produk. Dengan sarana fasilitas jalan raya, rel kereta api dan pelabuhan laut yang memadai maka dimungkinkan pemilihan lokasi di Gresik sudah tepat.

e. Tenaga kerja

Gresik adalah daerah industri dengan kepadatan penduduk yang tinggi sehingga menjamin ketersediaan akan tenaga kerja yang terampil dan murah. Namun ada beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu kuantitas tenaga kerja yang tersedia, kualitas tenaga kerja, besar upah minimum, jam kerja perminggu serta keahlian dan produktifitas kerja. Didirikannya pabrik ferrosulfat heptahidrat diharapkan akan mampu menyerap tenaga kerja dan menunjang program pemerintah untuk mengurangi angka pengangguran.

. 1.3.2 Faktor sekunder

a. Karakteristik lokasi

Gresik memiliki karakter iklim yang relatif mendukung karena merupakan daerah non rawan banjir, serta memiliki kondisi sosial masyarakat yang baik.

b. Kawasan industri

Gresik merupakan kawasan industri sehingga akomodasi keperluan kelangsungan proses produksi telah tersedia dengan baik, seperti : lingkungan, energi, sarana transportasi, dan sosial.

c. Harga tanah dan bangunan

Harga tanah dan bangunan yang masih terjangkau didaerah gresik merupakan daya tarik tersendiri bagi investor meskipun

sudah berada diwilayah industri. Dan letaknya yang strategis juga menjadi daya tarik investor.

d. Kebijakan pemerintahan

Pendirian pabrik perlu mempertimbangkan faktor kepentingan pemerintah yang terkait di dalamnya. Kebijaksanaan pengembangan industri dan hubungannya dengan pemerataan kesempatan kerja serta hasil - hasil pembangunan. Selain itu pabrik yang didirikan harus berwawasan lingkungan yang artinya keberadaan pabrik tersebut tidak mengganggu atau merusak lingkungan sekitarnya seperti yang telah dijelaskan di Peraturan Pemerintah Nomor 24 tahun 2009 tentang kawasan industri.

e. Peraturan daerah

Menurut peraturan daerah kabupaten Gresik No. 8 Tahun 2011 tentang rencana tata ruang wilayah kabupaten Gresik tahun 2010 - 2030 mengenai kebijakan kawasan peruntukan industri sebagaimana dimaksud dalam pasal 25 huruf e, berupa pengembangan kawasan peruntukan industri. Dan telah disediakan ± 200 hektar untuk kawasan industri.

1.4 Macam-Macam Proses Pembuatan Ferrosulfat Heptahidrat

Proses pembuatan ferrosulfat heptahidrat dapat dilakukan dengan dua macam proses yaitu :

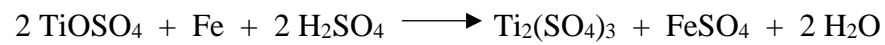
1. Hasil Samping Pembuatan Titanium Dioksida

Pada proses ini konsentrat elemenit direaksikan dengan asam sulfat 80 – 90%. Operasi ini dapat dilakukan secara kontinyu atau batch. Pada suhu 160 °C terjadi reaksi eksoterm.

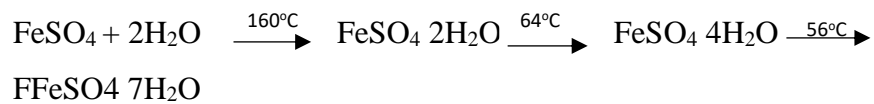
Reaksi yang terjadi :



Untuk mengurangi kandungan asam ditambahkan besi ke dalam larutan. Reaksi yang terjadi yaitu :



Setelah dilakukan pendinginan terjadi endapan ferrosulfat berbentuk kristal. Perubahan struktur karena pendinginan adalah :



Titanium sulfat berubah kembali menjadi asam metatitanic dan mengendap dengan penambahan air. Reaksi yang terjadi :



Endapan dibakar untuk menghilangkan air dan residu SO_3 . Pembakaran dilakukan diatas suhu 950°C dan akan menghasilkan titanium dioksida, TiO_2 .

(Sumber : Kirk & Othmer, 1997)

2. Proses *Steel-Pickling*

Proses pembentukan ferrosulfat heptahidrat dari *pickling liquor* dan asam sulfat dilakukan dalam reaktor alir tangki berpengaduk (RTB) beroperasi pada temperatur 85°C . Kondisi operasi dijaga pada temperatur 85°C , agar tidak terjadi oksidasi ferrosulfat menjadi ferrisulfat. Waktu reaksi yang dibutuhkan 2 jam. Tekanan operasi sebesar 1 atm, karena pada tekanan ini sudah bisa menghasilkan produk dengan kenaikan tekanan yang tidak berpengaruh. Pada kondisi ini kemurnian produk yang dihasilkan sebesar 99 % berat. Kemudian hasil reaksi di reaktor dipisahkan dalam evaporator pada suhu 100°C dan tekanan 1 atm. Konsentrasi keluar dari evaporator dengan suhu 100°C dialirkan ke pendingin untuk didinginkan pada suhu kamar. $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dikristalisasi dalam *cristalizer* sampai suhu 35°C . Kristal disaring dan larutan induk dikembalikan ke evaporator. Kristal akan pecah dan disaring,

kemudian dikeringkan dengan udara panas pada suhu 60 °C dalam *rotary dryer*.

(Sumber : Patent, 0281732)

Tabel 1.4. Kelemahan dan Kelebihan Pembuatan Ferrosulfat Heptahidrat

No	Proses	Kelebihan	Kelemahan
1.	Hasil Samping Pembuatan Titanium Dioksida	Operasi dapat dilakukan secara kontinyu dan batch	<ul style="list-style-type: none"> • Membutuhkan pengontrol yang tepat karena reaksi terjadi pada temperatur yang relatif tinggi • Proses lebih rumit dan tidak efisien
2	Proses <i>Steel-Pickling</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Bahan baku dari limbah pabrik baja, bahan bakunya lebih terjangkau • Pemanfaatan limbah pickling liquor berarti mengurangi pencemaran lingkungan. • Konversi yang dihasilkan mencapai 93% 	<ul style="list-style-type: none"> • Operasi dilakukan secara kontinyu • Bahan baku diperoleh hanya dari limbah baja, sehingga kemungkinan diperoleh terbatas

Dari tabel diatas, maka pada prarancangan ini menggunakan proses *steel – pickling*.

1.5 Manfaat Ferrosulfat Heptahidrat

Kegunaan ferrosulfat heptahidrat antara lain :

1. *Water Treatment*

Ferrosulfat heptahidrat digunakan sebagai koagulan, menghasilkan flok yang berat dan cepat mengendap.

2. Pembuatan Tinta Cetak

Ferrosulfat heptahidrat digunakan sebagai pengental tinta.

3. Industri Tekstil

Ferrosulfat heptahidrat digunakan untuk proses pencampuran warna tekstil.

4. Garam Ferrosulfat Heptahidrat

Ferrosulfat heptahidrat digunakan untuk menentukan air kristal dalam Garam Mohr hasil sintesa.

5. *Iron Oxide Pigment*

Ferrosulfat heptahidrat digunakan sebagai bahan baku produksi *iron oxide pigment*.

1.6 Sifat Fisika dan Kimia Bahan Baku, Produk dan Bahan Pembantu

1.6.1 Bahan Baku

a) *Pickling liquor*

Pickling liquor mempunyai kandungan FeCl_2 , HCl , H_2O . Dimana yang digunakan sebagai bahan baku pembuatan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ adalah FeCl_2 . Berikut ini sifat fisika dan sifat kimia FeCl_2 :

- Sifat - sifat fisika :
 - Berat molekul : 126,751 g/mol
 - Fase : cair
 - Warna : gelap
- Sifat - sifat kimia :

- Dapat bereaksi dengan cepat, stabil, mudah, aman, dan efektif
- Larut dalam air, alkohol, dan acetone
- Sangat baik sebagai koagulan

(PT. Gunawan Dian Jaya Steel)

b) Asam sulfat

Asam sulfat (H_2SO_4) sebagai bahan baku pembuatan $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Berikut ini sifat fisika dan sifat kimia H_2SO_4 :

• Sifat - sifat fisika :

- Berat molekul : 98,08 g/mol
- Wujud : cairan
- Warna : tidak berwarna

• Sifat - sifat kimia :

- Reaksi eksotermik dengan air
- Korosif
- Tidak mudah terbakar

(PT Petrokimia Gresik)

1.6.2 Produk Utama

Ferrosulfat heptahidrat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) sebagai produk utama hasil reaksi antara FeCl_2 dengan H_2SO_4 . Berikut sifat - sifat fisika dan kimia $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$:

• Sifat - sifat fisika :

- Bentuk : Kristal/granular
- Warna : Hijau dengan sedikit warna biru
- Konsentrasi : 99%

• Sifat - sifat kimia :

- Tidak dapat larut dalam alkohol
- Dapat larut dalam air

- Higroskopis
- Berbau

(Sumber: www.alibaba.com)

1.6.3 Bahan Pembantu

Air (H₂O) digunakan sebagai pengencer asam sulfat di dalam mixer kemudian akan diteruskan ke dalam reaktor untuk proses reaksi. Berikut ini sifat fisika dan kimia H₂O :

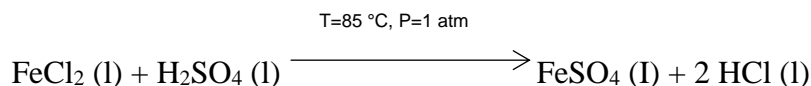
- Berat molekul : 18
- Kenampakan : cair
- Densitas (g/cm³) : 1
- Titik didih : 100 °C

(Perry's. 2008)

1.7 Tinjauan Proses Secara Umum

1.7.1 Dasar Reaksi

Reaksi pembuatan ferrosulfat heptahidrat dari *pickling liquor* dan asam sulfat adalah reaksi endotermis yang *irreversible*. Reaksi yang terjadi adalah :



Reaksi yang terjadi antara FeCl₂ dan H₂SO₄ adalah endotermis sehingga terjadi penambahan panas.

(Sumber : US Patent, 0281732)

1.7.2 Kondisi Operasi

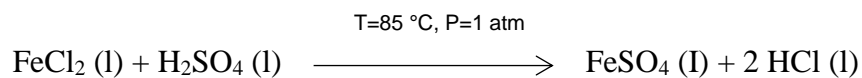
Proses pembentukan ferrosulfat heptahidrat dari *pickling liquor* dan H₂SO₄ dilakukan dalam reaktor tangki berpengaduk (RTB) beroperasi pada temperatur 85 °C. Kondisi operasi dijaga pada temperatur 85 °C, agar tidak terjadi oksidasi ferrosulfat menjadi ferrisulfat (Sumber : US Patent, 0281732). Tekanan operasi sebesar 1 atm, karena pada tekanan ini sudah bisa menghasilkan produk dengan kenaikan tekanan yang tidak berpengaruh. Pada

kondisi ini kemurnian produk yang dihasilkan sebesar 99% berat. Kemudian hasil reaksi di reaktor dipisahkan dalam evaporator pada suhu 100 °C dan tekanan 1 atm. Konsentrasi keluar dari evaporator dengan suhu 100 °C dialirkan ke pendingin untuk didinginkan pada suhu kamar. Dalam *crystalizer*, FeSO₄ 7H₂O dikristalisasi sampai suhu 20 °C. Kristal disaring dan larutan induk dikembalikan ke evaporator. Kristal akan pecah dan disaring, kemudian dikeringkan dengan udara panas pada suhu 120 °C dalam *rotary dryer*.

1.7.3 Mekanisme Reaksi

a) Tinjauan termodinamika

Mekanisme reaksi yang terjadi pada reaktor adalah :



Harga panas pembentukan (ΔH_f°) pada suhu 298,15 K (25 °C) dapat dilihat pada perhitungan sebagai berikut :

Tabel 1.5. Daftar Harga Panas Pembentukan dari Reaksi

Komponen	ΔH_f° (kal/mol), 25 °C (298,15 K)
FeCl ₂	- 81900
H ₂ SO ₄	- 193690
FeSO ₄	- 221300
HCl	- 22063

(Sumber : Perry dan Yaws 1999)

$$\begin{aligned} \Delta H_f^\circ_{298\text{ K}} &= \Delta H_f^\circ \text{ produk} - \Delta H_f^\circ \text{ reaktan} \\ &= (\Delta H_f^\circ \text{ FeSO}_4 + \Delta H_f^\circ \text{ HCl}) - (\Delta H_f^\circ \text{ FeCl}_2 + \Delta H_f^\circ \text{ H}_2\text{SO}_4) \\ &= ((-221300) + (-22063)) - ((-81900) + (-193690)) \\ &= (-243363) - (-275590) \end{aligned}$$

$$= 32227 \text{ kal/mol}$$

Menghitung harga panas pembentukan (ΔH_f°) pada suhu 358,15 K (85 °C) adalah sebagai berikut :

Tabel 1.6. Daftar Harga Cp dari Reaksi

Komponen	Cp (kal/mol), 85 °C (358,15 K)
FeCl ₂	36,5211
H ₂ SO ₄	35,2763
FeSO ₄	24,0279
HCl	33,1566

(Sumber : Perry dan Yaws 1999)

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{reaktan } 358,15 \text{ K}} &= \sum C_p \times \Delta T \\ &= (36,5211 \times (358,15 - 298,15)) + (35,2763 \times \\ &\quad (358,15 - 298,15)) \\ &= (2191,266) + (2116,578) \\ &= 4307,844 \text{ kal/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{P}_{\text{roduk } 358,15 \text{ K}}} &= \sum C_p \times \Delta T \\ &= (24,0279 \times (358,15 - 298,15)) + (33,1566 \\ &\quad \times (358,15 - 298,15)) \\ &= (1441,674) + (1989,396) \\ &= 3431,07 \text{ kal/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{r^\circ 358,15 \text{ K}} &= \Delta H_{\text{P}_{\text{roduk } 358,15}} + \Delta H_{f^\circ 298,15 \text{ K}} - \Delta H_{\text{reaktan } 358,15} \\ &= 3431,07 + 32227 - 4307,844 \text{ kal/mol} \\ &= 31350,226 \text{ kal/mol} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan $\Delta H_{r^\circ 358,15 \text{ K}}$ bernilai positif, maka reaksi pembentukan ferrosulfat heptahidrat dari *pickling liquor* dan asam sulfat adalah reaksi endotermis. Hal ini dapat disimpulkan bahwa reaksi memerlukan panas selama reaksi berlangsung.

Harga ΔG_f untuk masing – masing komponen suhu 25 °C (298,15 K) adalah sebagai berikut :

Tabel 1.7. Daftar Harga ΔG_f Komponen Reaksi

Komponen	ΔG_f (kal/mol), 25 °C (298,15 K)
FeCl ₂	- 72203,12
H ₂ SO ₄	- 156078,63
FeSO ₄	- 196044,71
HCl	- 22762,01

(Sumber : Perry dan Yaws 1999)

$$\begin{aligned}\Delta G_r &= \sum \Delta G_{\text{produk}} - \sum \Delta G_{\text{reaktan}} \\ &= (\Delta G \text{ FeSO}_4 + \Delta G \text{ HCl}) - (\Delta G \text{ FeCl}_2 + \Delta G \text{ H}_2\text{SO}_4) \\ &= ((-196044,71)+(-22762,01))-((-72203,12)+(-156078,63)) \\ &= (-218806,72) - (-228281,75) \\ &= 9475,03 \text{ kal/mol}\end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas akan didapatkan, di reaktor :

$$\begin{aligned}\Delta H_{f \text{ 298,15 K}} & \text{ (Enthalpi pembentukan)} &= 32227 & \text{ kal/mol} \\ \Delta H_{f \text{ 358,15 K}} & \text{ (Enthalpi reaktan)} &= 31350,226 & \text{ kal/mol} \\ \Delta G & \text{ (Energi bebas)} &= 9475,03 & \text{ kal/mol}\end{aligned}$$

Menghitung harga konstanta keseimbangan pada suhu 25 °C (298,15 K) sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\Delta G &= - RT \ln K_{298,15 \text{ K}} \\ \ln K_{298,15 \text{ K}} &= \frac{\Delta G}{- RT} \\ &= \frac{9475,03}{- 1,987 \times 298,15} \\ &= -15,9937 \\ K_{298,15 \text{ K}} &= 1,132 \times 10^{-7}\end{aligned}$$

Menghitung harga konstanta keseimbangan pada suhu 85 °C (358,15 K) sebagai berikut :

$$\ln \left(\frac{K_{358,15}}{K_{298,15}} \right) = \frac{-\Delta H_f \ 298 \ K}{R} \times \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

$$\ln \left(\frac{K_{358,15}}{1,132 \times 10^{-7}} \right) = \frac{-32227}{1,987} \times \left(\frac{1}{358,15} - \frac{1}{298,15} \right)$$

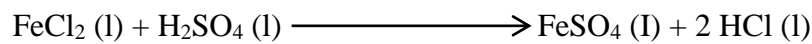
$$\left(\frac{K_{358,15}}{1,132 \times 10^{-7}} \right) = \exp(9,1133)$$

$$\left(\frac{K_{358,15}}{1,132 \times 10^{-7}} \right) = 9075,1937$$

$$K = 0,046$$

b) Tinjauan kinetika

Mekanisme reaksi pembentukan ferrosulfat heptahidrat :



Diketahui : $X_a = 93\% = 0,93$

$T = 2 \text{ jam} = 120 \text{ menit}$



mula – mula : Ca_0 Cb_0

Reaksi : $Ca_0 \cdot X_a$ $Ca_0 \cdot X_a$ $Ca_0 \cdot X_a -$

Sisa : $Ca_0 (1 - X_a)$ $Cb_0 - (Ca_0 \cdot X_a)$ $Ca_0 \cdot X_a$

❖ FeCl₂ 40%

Berat molekul = $126,751 \frac{\text{gram}}{\text{mol}}$

$$Ca_0 = 40 \frac{\text{gram}}{100 \text{ ml}} : 126,751 \frac{\text{gram}}{\text{mol}}$$

$$= 40 \frac{\text{gram}}{100 \text{ ml}} \times 126,751 \frac{\text{mol}}{\text{gram}} \times 1000 \frac{\text{ml}}{\text{L}}$$

$$= 2,78339 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

Ca = $Ca_0 (1 - X_a)$

$$= 2,7834 (1 - 0,93)$$

$$= 0,19484 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

❖ Asam Sulfat 10%

Berat molekul = $98,07848 \frac{\text{gram}}{\text{mol}}$

$$Cb_0 = 10 \frac{\text{gram}}{100 \text{ ml}} : 98,07848 \frac{\text{gram}}{\text{mol}}$$

$$= 10 \frac{\text{gram}}{100 \text{ ml}} \times 98,07848 \frac{\text{mol}}{\text{gram}} \times 1000 \frac{\text{ml}}{\text{L}}$$

$$\begin{aligned}
 &= 2,7834 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \\
 C_b &= C_{b0} - (C_{a0} \cdot X_a) \\
 &= 2,7834 (1 - 0,93) \\
 &= 0,194383 \frac{\text{mol}}{\text{L}}
 \end{aligned}$$

❖ Orde 2

$$\begin{aligned}
 (-r_a) &= - \frac{dC_a}{dt} \\
 - \frac{dC_a}{dt} &= k \cdot C_a \cdot C_b \\
 C_{a0} \frac{dX_a}{dt} &= k \cdot (C_{a0} (1 - X_a)) \cdot (C_{b0} - (C_{a0} \cdot X_a)) \\
 \frac{dC_a}{dt} &= k \cdot (C_{a0} (1 - X_a)) \cdot (C_{a0} \left(\frac{C_{b0}}{C_{a0}} - X_a\right)) \\
 \frac{dC_a}{dt} &= k \cdot C_{a0} (1 - X_a) (M - X_a) \\
 M &= \frac{C_{b0}}{C_{a0}} \\
 (-r_a) &= k \cdot C_{a0} (1 - X_a) (M - X_a) \\
 \int_0^{X_a} \frac{dX_a}{(1-X_a)(M-X_a)} &= k \cdot C_{a0} \int_0^t dt \\
 \ln \frac{C_b \cdot C_{a0}}{C_{b0} \cdot C_a} &= C_{a0} \cdot k \cdot t \\
 \ln \frac{0,194383 \times 2,78339}{2,7834 \times 0,194383} &= 2,78339 \times 240k \\
 20,39445 &= 668,0136 k \\
 k &= 0,0461
 \end{aligned}$$

❖ Nilai k dimasukkan di persamaan Levenspiel

$$\begin{aligned}
 \frac{V}{FV} &= \frac{X_a}{(-r_a)} \\
 t' &= \frac{X_a}{-r_a} \\
 t' &= \frac{X_a}{k C_a C_b} \\
 &= \frac{0,93}{0,0461 \times 0,19484 \times 0,194383} \\
 &= 122,4 \text{ menit} \\
 &= 2,04 \text{ jam}
 \end{aligned}$$