

SKRIPSI
PRARANCANGAN PABRIK NATRIUM NITRAT DARI
NATRIUM KLORIDA DAN ASAM NITRAT
KAPASITAS 45.000 TON/TAHUN



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

Oleh :

Iin Septianingsih 20140269D

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SETIA BUDI
SURAKARTA

2018



Prarancangan Pabrik Natrium Nitrat dari Natrium Klorida dan Asam Nitrat Kapasitas 45.000 Ton/Tahun

LEMBAR PERSETUJUAN

LAPORAN TUGAS AKHIR

PRARANCANGAN PABRIK NATRIUM NITRAT DARI
NATRIUM KLORIDA DAN ASAM NITRAT
KAPASITAS 45.000 TON/TAHUN

Disusun Oleh :

IIN SEPTIANINGSIH


20140269D


Telah disetujui oleh Pembimbing

Pada tanggal 16 Agustus 2019

Pembimbing I

Pembimbing II


Dr. Supriyono, S.T., M.T.
NIS.01199508011049


Narimo, S.T., M.M.
NIS.01199609021057

Mengetahui,

Ketua Program Studi




Ir. Dewi Astuti H, ST., M.Eng

NIS.01199601032053

Iin Septianingsih
20140269D

x

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

**PRARANCANGAN PABRIK NATRIUM NITRAT DARI
NATRIUM KLORIDA DAN ASAM NITRAT
KAPASITAS 45.000 TON/TAHUN**

Oleh :

**Iin Septianingsih
20140269D**


Telah Dipertahankan didepan penguji
Pada Tanggal 16 Agustus 2019

Penguji 1 : Ir. Petrus Darmawan, S.T., M.T.

Penguji II : Gregorius Prima Indra B, S.T., M.Eng.

Penguji III : Dr. Supriyono, S.T., M.T.

Penguji IV : Narimo, S.T., M.M.



Dekan Fakultas Teknik
Universitas Setia Budi



Ir. Petrus Darmawan, S.T., M.T.
NIS.01199905141068

Mengetahui,

Ketua Program Studi
S1 Teknik Kimia



Dewi Astuti H, S.T., M.Eng
NIS.01199601032053

iii

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

Berusaha dan berdo'a adalah dua bekal terpenting ketika seseorang sedang dalam perjalanan menuju kesuksesan. Dan jangan pula berprasangka buruk kepada takdir ketika perjalanan itu belum sampai pada tujuan. Karena berputus asa tidaklah lebih baik dari berprasangka baik dengan terus berusaha. Teruslah berjalan meskipun langkahmu kecil-kecil asalkan jangan berbelok ke belakang

Allah SWT akan selalu memberikan jalan kepada hamba-hamba-Nya yang mau berusaha dan meminta kepada-Nya. Ketika kamu memiliki impian yang menurut orang lain tidak mungkin terwujud, jadikan itu sebagai motivasi terhebatmu. Karena kita memiliki Allah yang Maha Segala-Nya. Tidak ada yang tidak mungkin bagi-Nya ketika kita mau berusaha dan selalu meminta kepada-Nya

"Barang siapa yang mempermudah kesulitan orang lain, maka Allah akan mempermudah urusannya di dunia dan di akhirat." (HR. Muslim)

"Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan, maka apabila kamu telah selesai dari suatu urusan kerjakanlah dengan sungguh-sungguh urusan yang lain, dan hanya kepada Allah kamu berharap." (QS. Al-Insyirah: 6-8)

Lakukan pekerjaanmu dengan ikhlas dan penuh kesungguhan dan ketekunan, maka kamu akan terasa ringan untuk terus menjalaninya. Dan bertawakal kepada-Nya atas apa yang telah kamu kerjakan



=

TERIMAKASIH KU UNTUK.....

Allah SWT

Alhamdulillah,, puji syukurku panjatkan kepada-Mu ya Alloh. Terimakasih untuk semua nikmat yang telah Engkau berikan kepada hamba-Mu. Semoga Engkau selalu memberikan kelancaran dan perlindungan dalam setiap langkah ku. Amiin ;)

Ibu, Bapak, Kakak dan Nenek Tercinta

Terimakasih untuk semua kasih sayang, perjuangan dan motivasi yang begitu besar selama ini. Aku akan selalu mengingat semua pesan dalam aku menjalankan amanah ini. Terimakasih untuk do'a yang selalu engkau panjatkan disetiap selesai sholat mu. Engkau adalah motivator terhebat dalam hidupku

Bapak Supriyono dan Bapak Narimo

Terimakasih telah membimbing dalam pengerjaan tugas akhir ini dan telah mengajarkan banyak ilmu selama bimbingan ini ☺.

Pak Petrus, Pak Dion, Pak Indra, Pak Argoto, Ibu Dewi, Ibu Happy, Ibu Peni, dan semua Bapak dan Ibu Dosen teknik kimia USB dan juga Pak Bowo

Terimakasih telah mengajarkan banyak ilmu selama di kelas, terimakasih telah memberikan masukan-masukan yang positif, dan kesediaan waktu dalam membimbing.

Terimakasih untuk Fahrul Untuk Motivasi dan bantuannya selama Tugas akhir ☺

Teman seperjuangan tekim USB angkatan 2014, Ryan, Hera, Rio, Carla, Eme, Tamara, Lala, Caesar, Arum, Bagus

Terimakasih buat motivasinya dan menemani berjuang selama 5 tahun. Semangat buat kalian ya kawan :)

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmaanirrohim

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah, puji syukur ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmat hidayah dan petunjuk-Nya sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir prarancangan pabrik kimia ini dengan baik. Tak lupa sholawat serta salam semoga senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, keluarga, sahabat dan seluruh pengikutnya.

Judul tugas akhir ini adalah **Prarancangan Pabrik Natrium Nitrat dari Natrium Klorida dan Asam Nitrat Kapasitas 45.000 Ton/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. Yayasan Universitas Setia Budi yang telah memberikan beasiswa belajar selama 4 tahun.
2. Dr. Djoni Tarigan MBA, selaku Rektor Universitas Setia Budi Surakarta.
3. Petrus Darmawan, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Setia Budi Surakarta dan selaku Penguji I, yang meluangkan waktunya untuk menguji hasil laporan tugas skripsi.
4. Dewi Astuti Herawati, S.T., M.Eng. selaku Ketua Program Studi Teknik kimia, Fakultas Teknik Universitas Setia Budi Surakarta

5. Dr. Supriyono, S.T., M.T. dan Narimo, S.T., M.M. selaku pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan nasehat hingga selesainya tugas akhir ini.
6. Gregorius Prima Indra B, S.T., M.Eng. selaku dosen penguji II 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. Orang tua yang selalu memberika do'a dan motivasi.
9. 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.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Surakarta,.....

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul.....	i
Lembar Persetujuan.....	ii
Lembar Pengesahan.....	iii
Daftar Isi	viii
Daftar Tabel	xii
Daftar Grafik.....	xv
Daftar Gambar	xvi
BAB I Pendahuluan.....	1
Latar Belakang Pendirian Pabrik.....	1
Penentuan Kapasitas Rancangan Pabrik.....	2
1.2.1.Kebutuhan Natrium Nitrat Indonesia	5
1.2.2.Kebutuhan Natrium Nitrat.....	7
Pemilihan Lokasi Pabrik.....	8
Tinjauan Pustaka	11
1.4.1.Macam-Macam proses pembuatan Natrium Nitrat.....	12
1.4.2.Alasan Pemilihan Proses	13
1.4.3.Kegunaan Produk.....	14
1.4.4.Sifat Fisis dan Kimia Bahan Baku dan Produk.....	16
1.4.4.1.Sifat Fisis dan Kimia Bahan Baku	16
1.4.4.2.Sifat Fisis dan Kimia Produk Utama dan Samping.	18
1.4.5.Proses Pembuatan yang Dipilih	20
BAB II Spesifikasi Bahan	35
Spesifikasi Bahan baku.....	35
Spesifikasi Prouk Utama	36
BAB III Deskripsi Proses.....	37
Langkah Proses	37

Tahap penyimpanan bahan baku.....	37
Tahap penyiapan bahan baku.....	37
Tahap pembentuk produk.....	38
Tahap pemisahan dan pemurnian produk.....	38
BAB IV NERACA MASSA DAN NERACA PANAS.....	41
4.1 Neraca Massa	41
4.2 Neraca Panas	48
BAB V SPESIFIKASI ALAT.....	58
5.1 Silo Penyimpanan HNO ₃	58
5.2 Silo Penyimpanan NaNO ₃	58
5.3 Gudang NaCl.....	59
5.4 Mixer	59
5.5 Reaktor 1	60
5.6 Reaktor 2	61
5.7 Evaporator 1	62
5.8 Distilasi 1	63
5.9 Kristalizer	64
5.10 Centrifuge 1.....	64
5.11 Rotary dryer	64
5.12 Cyclone	65
5.13 Cooling conveyor	66
5.14 Heater udara	66
5.15 Heater 01	67
5.16 Heater 02	67
5.17 Reboiler 1	68
5.18 Kondesor 1	68
5.19 Kondesor 2	69
5.20 Cooler 1.....	69

5.21 Cooler 2.....	70
5.22 Cooler 3.....	71
5.23 Blower	71
5.24 Bucket elevator 1.....	72
5.25 Belt conveyer 1.....	72
5.26 Belt conveyer 2.....	73
5.27 Screw conveyer 1.....	73
5.28 Screw conveyer 2.....	74
5.29 Hooper 1.....	74
5.30 Hooper 2.....	74
5.31 Pompa 01.....	75
5.32 Pompa 02.....	75
5.33 Pompa 03.....	76
5.34 Pompa 04.....	76
5.35 Pompa 05.....	76
5.36 Pompa 06.....	77
5.37 Pompa 07.....	77
5.38 Pompa 08.....	78
BAB VI UTILITAS	79
6.1 Unit Pendukung Utilitas	79
6.1.1 Unit Pengadaan dan pengolahan air	79
6.1.2 Unit Sanitasi	84
6.1.3 Unit Pengadaan Steam	85
6.1.4 Unit Pengadaan Listrik.....	86
6.1.5 Unit Pengadaan Bahan Bakar.....	89
6.1.6 Unit Penyediaan Udara Tekan	89
6.1.7 Unit Pengolahan Limbah.....	90

6.1.8 Laboratorium.....	90
6.1.9 Kesehatan Dan Keselamatan Kerja.....	92
BAB VII ORGANISASI DAN TATA LETAK PABRIK.....	103
1.1 Bentuk Perusahaan	103
1.2 Struktur Organisasi	104
1.3 Sistem Gaji dan Kepegawaian	109
1.4 Kesejahteraan Karyawan.....	111
1.5 Manajemen Produksi.....	114
1.6 Tata Letak Pabrik	119
1.7 Tata Letak Peralatan.....	120
BAB VIII EVALUASI EKONOMI.....	122
8.1 Perhitungan Biaya	124
8.2 <i>Total Fixed Capital Investment</i>	127
8.3 <i>Working Capital</i>	128
8.4 <i>Manufacturing Cost</i>	128
8.5 <i>General Expanses</i>	129
8.6 Analisa Ekonomi.....	129
BAB IX KESIMPULAN	134
DAFTAR PUSTAKA	P-1
LAMPIRAN.....	135

• DAFTAR TABEL

• Tabel 1	Data impor natrium nitrat di jepang.....	2
• Tabel 2	Data impor natrium nitrat di thailand.....	3
• Tabel 3	Data impor natrium nitrat di vietnam.....	4
• Tabel 4	Data impor natrium nitrat di indonesia	5
• Tabel 5	Kebutuhan natrium nitrat berbagai negara.....	7
• Tabel 6	Kapasitas produk pabrik komersial.....	7
• Tabel 7	Perbandingan proses sintesis natrium nitrat.....	14
• Tabel 8	Harga ΔH_f° dan ΔG_f°	22
• Tabel 4.1.1	Neraca massa disekitar mixer -120.....	43
• Tabel 4.1.2	Neraca massa sekitar reaktor -210.....	43
• Tabel 4.1.3	Neraca massa sekitar reaktor -220	44
• Tabel 4.1.4	Neraca massa sekitar evaporator -310	44
• Tabel 4.1.5	Neraca massa sekitar distalasi -610	45
• Tabel 4.1.6	Neraca massa sekitar kristalizer -320	45
• Tabel 4.1.7	Neraca massa sekitar centrifuge 330.....	46
• Tabel 4.1.8	Neraca massa sekitar rotary dryer 420.....	46
• Tabel 4.1.9	Neraca massa sekitar cyclone 511	47
• Tabel 4.1.10	Neraca massa sekitar cooling conveyer J-512	47
• Tabel 4.2.1	Konstanta kapasitas panas	48
• Tabel 4.2.1	Neraca panas sekitar mixer 120	49
• Tabel 4.2.2	Neraca panas sekitar heater -222	49
• Tabel 4.2.3	Neraca panas sekitar heater -221	50
• Tabel 4.2.4	Neraca panas sekitar reaktor 210	50
• Tabel 4.2.5	Neraca panas sekitar reaktor -220.....	51
• Tabel 4.2.6	Neraca panas sekitar evaporator 310	52
• Tabel 4.2.7	Neraca panas sekitar distilasi.....	52
• Tabel 4.2.8	Neraca panas sekitar kondesor 312.....	53
• Tabel 4.2.9	Neraca panas sekitar E-222	53
• Tabel 4.2.10	Neraca panas sekitar E-614	54
• Tabel 4.2.11	Neraca panas sekitar E-615.....	54
• Tabel 4.2.12	Neraca panas sekitar H-320.....	55
• Tabel 4.2.13	Neraca panas sekitar CF-330	55
• Tabel 4.2.14	Neraca panas sekitar RD-420.....	56
• Tabel 4.2.15	Neraca panas sekitar Cyclone	56
• Tabel 4.2.16	Neraca panas sekitar Heater udara	57
• Tabel 4.2.17	Neraca panas sekitar J-512.....	57
• Tabel 6.1.30	Kebutuhan air proses.....	81
• Tabel 6.1.31	Kebutuhan air pendingin 27C	81

- Tabel 6.1.32 Kebutuhan air pendingin 9C 82
- Tabel 6.1.33 Kebutuhan air sanitasi 82
- Tabel 6.1.34 Kebutuhan air untuk steam 83
- Tabel 6.1.35 Kebutuhan air make up 84
- Tabel 37 Pembagian shif karyawan 111
- Tabel 38 Luas bangunan pabrik 118
- Tabel 8.1.1 Cost index chemical plant 123
- Tabel 8.1.2 Total fixed capital investment 127
- Tabel 8.1.3 Working capital 128
- Tabel 8.1.4 Manufacturing cost 128
- Tabel 8.1.5 General expenses 129
- Tabel 8.1.6 Fixed cost 131
- Tabel 8.1.7 Variable cost 131
- Tabel 8.1.8 Regulated cost 132

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Pendirian Pabrik

Seiring dengan perkembangan teknologi dan kemajuan zaman, pembangunan di segala bidang haruslah diperhatikan. Pembangunan ekonomi serta pengembangan industri yang baik akan senantiasa meningkatkan taraf hidup bangsa. Pembangunan industri saat ini sedang giat berkembang, termasuk diantaranya adalah industri kimia, baik industri kimia yang menghasilkan produk jadi (produk siap pakai) maupun produk antara (*intermediet*) untuk diolah lebih lanjut. Pembangunan dan pengembangan industri kimia dalam negeri dinilai sangat penting untuk mencukupi kebutuhan akan bahan kimia dalam negeri yang selama ini masih belum terpenuhi sehingga untuk memenuhi kebutuhan bahan kimia dalam negeri harus mengimpor dari luar negeri yang dapat merugikan Negara dalam hal pengeluaran devisa.

Salah satu produk antara (*intermediet*) yang perlu dipertimbangkan adalah natrium nitrat (NaNO_3). Sodium nitrat merupakan kristal bening tidak berwarna dan tidak berbau. Bahan kimia ini mempunyai sifat-sifat antara lain mudah larut dalam air, gliserol, amoniak, dan alkohol serta mempunyai titik lebur pada temperature 308°C . Pada prarancangan pabrik kimia NaNO_3 sebelumnya yang dilakukan oleh Sulistyarini (2006) mempunyai kapasitas prarancangan sebanyak 50.000 ton/tahun. Pada prarancangan pabrik NaNO_3 oleh Andirio (2006) dengan bahan baku NaOH dan HNO_3 mempunyai kapasitas rancangan 45.000 ton/tahun. Pada prarancangan pabrik

kimia NaNO_3 oleh Yuningsih dan Utami (2011) mempunyai kapasitas rancangan 30.000 ton/tahun. Kebutuhan NaNO_3 yang ada di Indonesia semakin bertambah dan pemenuhan kebutuhan natrium nitrat nasional hingga saat ini masih mengimpor karena di Indonesia belum ada industri kimia yang memproduksi natrium nitrat, sehingga dapat dipastikan semakin lama kebutuhan NaNO_3 akan semakin meningkat. Salah satu bahan baku dalam pembuatan NaNO_3 adalah natrium klorida (NaCl) dan asam nitrat (HNO_3). Natrium nitrat merupakan bahan kimia *intermediet* yang dapat diolah lebih lanjut seperti untuk bahan kimia tambahan dalam produksi pupuk yang mengandung senyawa nitrogen, pembuatan kaca, pembuatan dinamit, bahan tambahan dalam pembuatan korek api, pembuatan kalium nitrat, sebagai reagent dalam kimia analisis dan obat-obatan serta masih banyak lagi.

Kebutuhan NaNO_3 di Indonesia diperkirakan akan terus meningkat seiring dengan industri yang menggunakannya, karenanya pendirian pabrik ini dipandang perlu untuk memenuhi kebutuhan NaNO_3 di dalam negeri dan diharapkan juga dapat membuka lapangan pekerjaan baru dalam bidang industri kimia di Indonesia.

1.2 Penentuan Kapasitas Rancangan Pabrik

Dalam penentuan kapasitas prarancangan pabrik natrium nitrat (NaNO_3) ini didasarkan pada beberapa pertimbangan yang perlu diperhatikan, yaitu:

1.2.1 Kebutuhan Natrium Nitrat di Negara lain

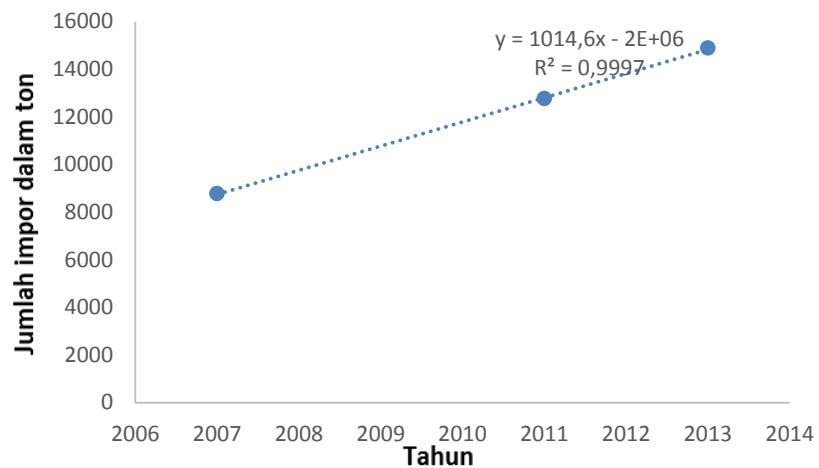
a. Jepang

Kebutuhan akan natrium nitrat di Negara Jepang ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 1. Data Impor natrium nitrat Jepang

Tahun	Jumlah (Ton)
2007	8.777,0680
2011	12.757,5450
2013	14.833,9900

(Sumber: data.un, 2018)



r 1. Grafik Data Impor Natrium Nitrat Jepang

Dari persamaan regresi linear yang didapat, kemudian dihitung kebutuhan natrium nitrat Negara Jepang pada tahun 2022 berdasar persamaan $y=1014.6*x-2000000$ adalah berkisar 52.000 ton.

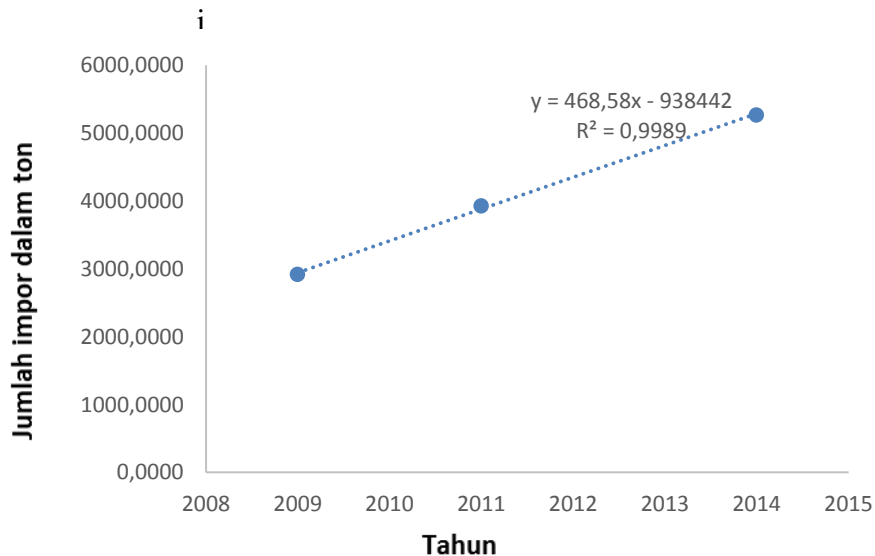
b. Thailand

Kebutuhan akan natrium nitrat di negara Thailand ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 2. Data Impor natrium nitrat Thailand

Tahun	Jumlah (Ton)
2009	2.917,5160
2011	3.927,0410
2014	5.269,4840

(Sumber: data.un, 2018)



Gambar 2. Grafik Data Impor Natrium Nitrat Thailand

Dari persamaan regresi linear yang didapat, kemudian dihitung kebutuhan natrium nitrat Negara Thailand pada tahun 2022 berdasar persamaan $y=468.58*x-938442$ adalah berkisar 9.000 ton.

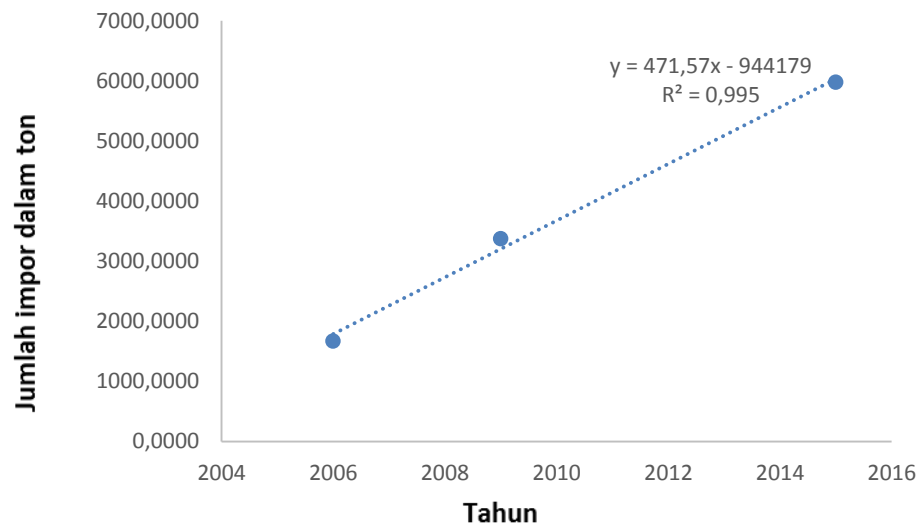
c. Vietnam

Kebutuhan akan natrium nitrat di Negara Vietnam ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 3. Data Impor natrium nitrat Vietnam

Tahun	Jumlah (Ton)
2006	1.669,4750
2009	3.372,3830
2015	5.971,2200

(Sumber: data.un, 2018)



Gambar 3. Grafik Data Impor Natrium Nitrat Vietnam

Dari persamaan regresi linear yang didapat, kemudian dihitung kebutuhan natrium nitrat Negara Vietnam pada tahun 2022 berdasar persamaan $y=471.57*x-944179$ adalah berkisar 9.500 ton.

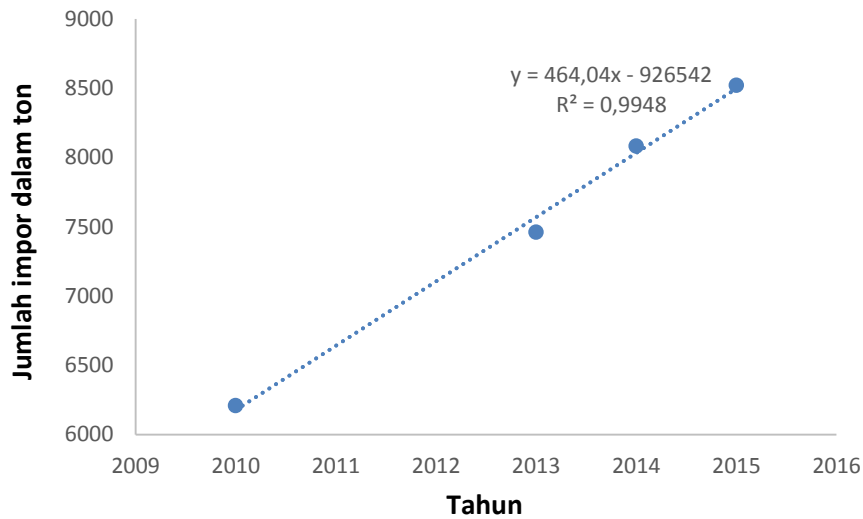
1.2.2 Kebutuhan Natrium Nitrat Indonesia

Kebutuhan NaNO_3 di Indonesia selama beberapa tahun kebelakang semakin meningkat dimulai pada tahun 2010, dan untuk memenuhi kebutuhan tersebut, Indonesia masih mengimpor seluruhnya dari luar negeri. Berdasarkan data yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik mengenai impor NaNO_3 di Indonesia pada tahun 2010-2015 ditunjukkan pada pada Tabel 4.

Tabel 4. Data Impor Natrium Nitrat di Indonesia

Tahun	Jumlah (Ton)
2010	6.209,1470
2013	7.460,5850
2014	8.081,9780
2015	8.521,0050

(Sumber : Badan Pusat Statistik Indonesia, 2018)



Gambar 4. Grafik Data Impor Natrium Nitrat di Indonesia

Dari data statistik impor dapat dibuat grafik yang menunjukkan bahwa kebutuhan natrium nitrat di Indonesia cenderung semakin meningkat setiap tahunnya. Pengoperasian pabrik natrium nitrat diproyeksikan akan dimulai pada tahun 2022. Dari gambar 4, diperoleh suatu persamaan regresi linear untuk mengetahui kebutuhan akan konsumsi natrium nitrat pada tahun 2022 yaitu sebagai berikut :

$$y = 464,04 \cdot x - 926542$$

$$y = (464,04 \cdot 2022) - 926542$$

$$y = 11746,88 \text{ ton}$$

dimana :

y = Data impor natrium nitrat (Ton)

x = Tahun kebutuhan natrium nitrat

Dari perhitungan terhadap persamaan yang didapatkan dari grafik, maka dapat disimpulkan bahwa perkiraan kebutuhan akan natrium nitrat pada tahun 2022 adalah berkisar pada angka 12.000 ton.

Dari perhitungan diatas maka dapat diketahui bahwa kebutuhan akan natrium nitrat pada tahun 2022 di berbagai negara adalah sebagai berikut :

Tabel 5. Kebutuhan natrium nitrat berbagai negara

Negara	Jumlah Kebuuhan (Ton)
Indonesia	12.000
Jepang	52.000
Thailand	9.000
Vietnam	9.500

Kebutuhan total untuk natrium nitrat di beberapa Negara di Asia adalah sekitar 82.500 ton pada tahun 2022.

1.2.3 Kapasitas rancangan NaNO_3 Komersial

Untuk memproduksi natrium nitrat harus diperhitungkan juga kapasitas produksi komersial yang masih eksis hingga sekarang, sehingga besar kemungkinan prarancangan pabrik yang akan didirikan akan memberikan keuntungan. Kapasitas produksi secara komersial yang telah ada terlihat pada tabel 6.

Tabel 6. Kapasitas produksi pabrik komersial

Pabrik	Proses	Kapasitas (Ton/Th)
DNL, Dehaj India	Sintesis	30.000

Qena Districq Egypt	<i>Shank</i>	113.000
Maria Elina, Chili	<i>Gugenheim</i>	650.000
Pedro de Valdivia	<i>Gugenheim</i>	750.000

(Sumber : Kirk Othmer, 1997)

Dengan beberapa pertimbangan diatas, maka akan didirikan pabrik natrium nitrat dengan proses sintesis dengan kapasitas 45.000 ton/tahun, dan diharapkan :

1. Dapat memenuhi 85% kebutuhan natrium nitrat dalam negeri pada tahun 2022.
2. Dapat memenuhi 50% kebutuhan akan natrium nitrat Negara Jepang pada tahun 2022.
3. Dapat memenuhi 50% kebutuhn natrium nitrat Negara Thailand pada tahun 2022.
4. Dapat memenuhi 50% kebutuhan natrium nitrat Negara Vietnam pada tahun yang sama.
5. Dapat memberikan keuntungan karena kapasitas rancangan berada diatas kapasitas produksi minimal di dunia.
6. Meningkatkan devisa Negara karena mencakup pasar ekspor.
7. Membuka peluang bagi industri lain di Indonesia untuk berdiri dan meningkatkan kapasitas produksi bagi pabrik yang berbahan baku NaNO_3 .
8. Dapat mengurangi jumlah pengangguran yang ada di Indonesia.

1.2.4 Ketersediaan Bahan Baku

Bahan baku NaNO_3 adalah NaCl dan HNO_3 . Untuk memenuhi kebutuhan bahan baku pada pabrik NaNO_3 dengan kapasitas 45.000 ton/tahun ini, maka HNO_3 dapat diperoleh dari PT. Multi Nitrotama Kimia, Cikampek dengan kapasitas produksi 150.000 ton/tahun. Sedangkan NaCl diperoleh dari PT Cheetham Garam Indonesia dengan kapasitas produksi 800.000 ton/tahun yang terdapat di Cilegon. Ketersediaan bahan baku ini dirasa sudah cukup untuk memenuhi kebutuhan bahan baku untuk pabrik ini. Sehingga untuk pemenuhan kebutuhan bahan baku tidak perlu dikhawatirkan.

1.3 Pemilihan Lokasi Pabrik

Letak geografis suatu pabrik sangatlah berpengaruh terhadap keberhasilan suatu perusahaan tersebut. Beberapa faktor dapat menjadi acuan dalam menentukan lokasi pendirian suatu pabrik, diantaranya adalah penyediaan bahan baku, pemasaran produk, transportasi dan tenaga kerja dan masih banyak faktor yang harus dipertimbangkan. Dengan mempertimbangkan beberapa faktor tersebut maka, lokasi pabrik natrium nitrat yang akan beroperasi pada tahun 2022 dipilih di kawasan industri Cilegon dengan pertimbangan :

a. Penyediaan bahan baku

Bahan baku pembuatan natrium nitrat adalah natrium klorida yang diperoleh dari PT Cheetham Garam Indonesia yang juga berada di Cilegon, sedangkan bahan baku asam nitrat diperoleh dari PT Multi Nitrotama Kimia di Cikampek

b. Letak pabrik terhadap lokasi pemasaran

Natrium nitrat merupakan bahan kimia *intermediet* maka pemilihan lokasi pabrik di Cilegon dinilai tepat karena merupakan kawasan industri yang berarti memperpendek jarak antara pabrik yang memproduksi dengan pabrik yang membutuhkan natrium nitrat.

c. Transportasi

Kawasan industri Cilegon memiliki lokasi yang dekat dengan pelabuhan merak, selain itu juga infrastruktur jalan raya yang memadai untuk kawasan industri sehingga mempermudah sistem pengiriman bahan baku maupun produk yang dapat menunjang kemajuan suatu industri.

d. Tenaga kerja

Ketersediaan tenaga kerja yang terampil merupakan salah satu faktor penting guna menunjang kredibilitas suatu pabrik. Kawasan industri Cilegon terletak di daerah Jawa dan Jabodetabek yang syarat dengan lembaga pendidikan formal di mana banyak terdapat perguruan tinggi, akademi, dan sekolah keterampilan yang dapat mencukupi kebutuhan tenaga kerja yang terampil dan terdidik, sehingga mampu memperlancar jalannya proses industri.

e. Utilitas

Sarana-sarana pendukung seperti ketersediaan air, listrik dan sarana lainnya harus diperhatikan agar proses produksi dapat berjalan dengan baik. Pemenuhan kebutuhan listrik dapat dibebankan pada PLN atau PLTU Suralaya yang jalurnya tersedia di wilayah ini, dan untuk *back up* listrik akan disediakan generator tambahan,

sedangkan untuk penyediaan air proses, air pendingin dan air umpan *boiler* diambil dari sungai Cidanau.

f. Peraturan daerah

Mengacu pada otonomi daerah, kebijakan pemerintah daerah sangat mendukung pendirian pabrik yang nantinya akan menambah pendapatan daerah.

g. Keadaan masyarakat

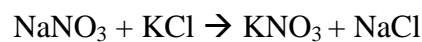
Masyarakat yang membutuhkan pekerjaan akan mendukung pendirian pabrik. Karena dengan didirikannya pabrik, maka akan terbuka lapangan pekerjaan baru yang memberikan kesempatan pada masyarakat di sekitar pabrik.



Gambar 2. Peta Lokasi Krakatau Industrial Estate Cilegon (KIEC)
 (Kementrian Perindustrian RI, 2012)

1.4 Tinjauan Pustaka

Natrium nitrat atau juga biasa disebut dengan sodium nitrat merupakan bahan kimia *intermediet* atau bahan kimia antara yang diperoleh dari endapan alamiah yang terdapat di dataran tinggi Chile dan merupakan endapan yang cukup lebar, yaitu 8-65 km serta tebal 0,3-1,2 m. Produk dengan kualitas tinggi dapat dihasilkan dengan kristalisasi dan pengeringan (Austin, 1984). Natrium nitrat digunakan sebagai bahan baku pada pabrik pembuatan pupuk NPK dengan cara mereaksikan,



Saat ini pupuk KNO_3 lebih diminati. Selain sebagai bahan baku NaNO_3 adalah sebagai produk *intemediet* pada pabrik pembuatan kaca. Sodium nitrat sebanyak 25% akan mengoksidasi *calumit*. Penggunaan NaNO_3 sangat efektif untuk mengurangi *bubble* yang membuat kaca tidak cacat (Yuningsih dan Utami, 2011). Sodium nitrat juga memiliki sifat anti mikrobial sehingga digunakan sebagai pengawet makanan. Senyawa ini ditemukan secara alami dalam sayuran hijau berdaun. Selain itu, senyawa ini berpotensi kesehatan dalam menambah oksigen pada darah, selain efek sampingnya pada kesehatan khususnya bila terdapat dalam dosis tinggi.

1.4.1 Macam-macam Proses Pembuatan Natrium Nitrat

Dalam pembuatan natrium nitrat (NaNO_3) dikenal tiga macam proses yaitu:

1. Proses *Shank*

Bahan baku berasal dari garam hasil penambangan (garam *Chile*) yang mengandung NaNO_3 . Prosesnya meliputi *including, loading, leaching, washing* dan

unloading. Pada prinsipnya proses yang utama adalah pemurnian dari garam hasil penambangan di mana zat-zat selain NaNO_3 dikurangi kadarnya sehingga diperoleh NaNO_3 dengan kadar $\pm 60\%$. (Kirk dan Othmer, 1983)

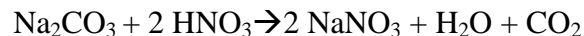
2. Proses *Guggenheim*

Pada prinsipnya proses *Guggenheim* sama dengan proses *Shank*, hanya alatnya lebih disempurnakan, yaitu melalui proses *crushing*, *leaching*, *filtering*, *crystalizing*, dan *graining* sehingga kadar NaNO_3 lebih besar yaitu $\pm 85\%$. (Kirk dan Othmer, 1983).

3. Proses Sintesis

Ada 2 macam proses sintesis.

a. Mereaksikan Na_2CO_3 dengan HNO_3



(Kirk dan Othmer, 1983)

Proses ini berlangsung pada suhu $305\text{-}350^\circ\text{C}$ pada tekanan vakum di dalam reaktor *fluidized bed*. Reaksi ini akan menghasilkan produk NaNO_3 dengan konversi sebesar 97-98% terhadap HNO_3 (U.S.Patent 2535990. 1950)

b. Mereaksikan NaCl dengan HNO_3



(Kobe, 1957)

Proses ini berlangsung pada suhu 60°C pada tekanan 1 atm dalam reaktor alir tangki berpengaduk (RATB) (Kobe, 1957). Besarnya konversi yang

diperoleh adalah 95% terhadap NaCl (U.S. Patent 1978751. 1934) Proses Sintesis menghasilkan kadar NaNO_3 yang lebih tinggi dari proses *Shank* dan *Guggenheim*, yaitu $\pm 90-99\%$ (Kirk dan Othmer, 1983).

1.4.2 Alasan Pemilihan Proses

Proses yang dipilih dalam pembuatan natrium nitrat pada pabrik ini adalah proses sintesis antara natrium klorida dan asam nitrat. Pemilihan proses ini didasarkan pada beberapa alasan berikut :

- a. Tingkat kemurnian hasil dari proses sintesis lebih tinggi yaitu berkisar antara 90-99% sedangkan untuk proses *Shank* memiliki kemurnian hasil $\pm 60\%$ dan *Guggenheim* $\pm 85\%$.
- b. Sintesis natrium klorida dari reaksi antara natrium klorida dan asam nitrat berlangsung pada reactor alir tangki berpengaduk (RATB) sehingga proses yang berlangsung relatif sederhana dibandingkan dengan sintesis dari reaksi antara natrium karbonat dan asam nitrat yang berlangsung dalam reaktor *fluidized bed*.
- c. Sintesis natrium nitrat dari natrium klorida dan asam nitrat berlangsung pada tekanan atmosferis sehingga proses produksi relative lebih sederhana jika dibandingkan dengan sintesis dari natrium karbonat dan asam nitrat yang berlangsung pada tekanan vakum.

Dari beberapa alasan diatas, dapat disimpulkan bahwa proses sintesis dengan bahan baku natrium klorida dan asam nitrat lebih menguntungkan dibandingkan

dengan proses sintesis menggunakan bahan baku natrium karbonat dan juga asam nitrat. Perbandingan proses sintesis juga dapat dilihat pada tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan proses sintesis natrium nitrat

Tinjauan	Bahan baku yang digunakan	
	Na ₂ CO ₃	NaCl
Konversi	97-98% terhadap HNO ₃ (1)	95% terhadap NaCl (2)
Kondisi Operasi	P < 1 atm, T = 305 – 350 ^o C (1)	P = 1 atm, T = 60 ^o C (3)
Tipe Reaktor	<i>Fluidized bed</i>	RATB
Harga bahan	US \$ 160-165/ton	US \$ 60/ton

Sumber :
 1. US. Patent 2535990. 1950
 2. US. Patent 1978751. 1934
 3. Kobe, 1957

1.4.3 Kegunaan Produk

Natrium nitrat merupakan bahan *intermediet* yang sebagian besar dikonsumsi sebagai bahan baku untuk pembuatan pupuk (terutama pupuk NPK), bahan eksplosif pada pembuatan dinamit, pembuatan kaca, dan pembuatan cat. Adapun kegunaan NaNO₃ dalam industri antara lain :

a. Pembuatan pupuk NPK

Pada proses pembuatan pupuk NPK, natrium nitrat merupakan bahan baku yang menghasilkan nitrogen pada pupuk tersebut. Di mana natrium nitrat direaksikan dengan

garam kalium klorida sehingga membentuk kalium nitrat. Selanjutnya kalium nitrat dialirkan pada batuan fosfat yang mempunyai kadar fosfat tinggi sehingga dihasilkan pupuk NPK yang memberi nutrisi pada daun. Dewasa ini pupuk kalium nitrat lebih disukai dibandingkan kalium klorida karena tanaman tidak tumbuh baik pada tanah yang mengandung klorida.

b. Pembuatan dinamit

Reaksi antara natrium nitrat dengan ammonium nitrat akan menghasilkan gas yang sangat eksplosif sehingga dapat menimbulkan ledakan. Jenis dinamit yang dihasilkan yaitu, *straight dynamite*, *amonia dynamite*, *gelatin dynamite*, gelatin nitrat, dan amonia gelatin. Perbandingan jenis dinamit ditentukan dengan pemakaian perbandingan ammonium nitrat dengan natrium nitrat.

c. Pembuatan kaca

Pada industri pembuatan kaca, natrium nitrat sebagai bahan tambahan yang dicampur dengan *calumit*, di mana natrium nitrat mengoksidasi *calumit*. *Calumit* merupakan *slag* atau sisa proses peleburan logam yang berfungsi untuk meningkatkan *melting potensial*, menurunkan devitrifikasi, menurunkan viskositas *molten glass*. Pada pencampuran tersebut membutuhkan natrium nitrat sebanyak 2,5%. Penggunaan NaNO_3 sangat efektif untuk mengurangi *bubble* sehingga kaca tidak cacat.

d. Pembuatan cat

Pada industri pengolahan cat, reaksi natrium nitrat dengan *lead* atau timbal (Pb) akan membentuk timbal oksida (PbO) yang banyak digunakan oleh industri cat

sebagai penguat warna cat sehingga warna cat lebih kuat dan merata pada suspensinya.

1.4.4 Sifat Fisis dan Kimia Bahan Baku dan Produk

1.4.4.1 Sifat Fisis dan Kimia Bahan Baku

a. Natrium klorida

Natrium klorida dikenal sebagai garam dapur dan merupakan senyawa ionic. Natrium klorida pada umumnya merupakan padatan bening tak berbau. Natrium klorida adalah garam paling berpengaruh terhadap salinitas laut dan cairan ekstraseluler pada banyak organisme multiseluler. Natrium klorida juga digunakan sebagai bahan utama dalam garam dapur, dan biasanya juga digunakan sebagai pengawet makanan. Natrium klorida biasanya dibuat dengan evaporasi air laut atau air payau. Sifat fisis dan sifat kimia dari natrium klorida adalah sebagai berikut :

Sifat fisis (Perry, 1997 : Yaws, 1999) :

- Rumus molekul : NaCl
- Berat molekul : 58,45 g/mol
- Titik didih : 1413^oC pada 1 atm
- Titik beku : 800,4^oC pada 1 atm
- Bentuk : kristal kubik padat
- Warna : putih
- Densitas : 2,163 g/ml

- Kapasitas panas : 50.075 J/mol.K

Sifat kimia (Kirk dan Othmer, 1997) :

- Dapat larut dalam air dan bermacam – macam *solvent* (etilen, glikol, etanol, methanol, cairan ammoniak) tetapi tidak larut dalam gliserol.
- Bersifat higroskopis.
- Tidak mudah terbakar.

b. Asam Nitrat

Asam nitrat juga dikenal sebagai *aqua fortis*, hydrogen nitrat maupun nitril hidrosida. Asam nitrat juga diketahui mempunyai sifat asam dan pengoksidasi yang sangat kuat, asam nitrat pada umumnya digunakan pada proses pembuatan bahan-bahan kimia, seperti obat-obatan, serat sintetik, bahan pewarna dan juga banyak digunakan dalam industri pupuk. Sifat fisis dan kimia asam nitrat adalah sebagai berikut :

Sifat fisis (Perry, 1997: Yaws, 1997) :

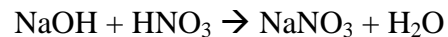
- Rumus molekul : HNO_3
- Berat molekul : 63,02 g/mol
- Titik didih : 86°C pada 1 atm
- Titik beku : -42°C pada 1 atm
- Bentuk : cair
- Warna : putih

- Densitas : 1,502 g/ml
- Kapasitas panas : 110,68 J/mol.K

Sifat kimia (Kirk dan Othmer, 1997) :

- Merupakan asam monobasik kuat.
- Asam nitrat dapat bereaksi dengan semua logam kecuali emas, iridium, platinum, rhodium, tantalum dan titanium.
- Asam nitrat merupakan pengionisasi yang kuat.

Reaksi yang terjadi :



- Asam nitrat merupakan pengoksidasi yang kuat

Reaksi yang terjadi :



- asam nitrat tidak stabil terhadap panas dan bisa terurai sebagai berikut :



1.4.4.2 Sifat Fisis dan Kimia Produk Utama serta Produk Samping

a. Natrium nitrat

Sodium nitrat merupakan bahan kimia *intermediet* dalam pembuatan pupuk yang mengandung senyawa nitrogen. Selain sebagai bahan dalam pembuatan pupuk, sodium nitrat juga digunakan sebagai bahan pembuatan

kembang api, bom asap, pengawet makanan, propelan roket padat, bahan dalam gelad dan tembikar, bahan baku pembuatan kalium nitrat, dan sebagai reagen pada kimia analisa. Sifat fisis dan kimia natrium nitrat adalah sebagai berikut :

Sifat Fisis (Perry, 1997) :

- Rumus molekul : NaNO_3
- Berat molekul : 84,99 g/mol
- Titik didih : 380°C pada 1 atm
- Titik beku : 308°C pada 1 atm
- Bentuk : kristal trigonal padat
- Warna : putih
- Densitas : 2,257 g/ml
- Panas laten : 5.355 kal/mol pada 310°C
- Kapasitas panas : 33,6402 J/mol.K

Sifat Kimia (Kirk dan Othmer, 1997) :

- Mudah larut dalam air, gliserol, amoniak dan alcohol.
- Bersifat higroskopis.

b. Chlorine

Klorin merupakan unsur halogen golongan VII A. Sama halnya dengan ion klorida, klorin banyak terdapat di alam dan merupakan zat yang

banyak diperlukan makhluk hidup terutama manusia. Pada kondisi ruang, klorin berwujud gas dengan bentuk Cl_2 . Klorin merupakan salah satu oksida kuat dan banyak digunakan sebagai pemutih dan disinfektan, yang mana merupakan bahan terpenting pada industri.

Sifat Fisis (Perry, 1997: Yaws, 1999) :

- Rumus molekul : Cl_2
- Berat molekul : 70,91 g/mol
- Titik didih : $-34,6^\circ\text{C}$ pada 1 atm
- Titik beku : $-101,6^\circ\text{C}$ pada 1 atm
- Bentuk : gas
- Warna : kuning kehijauan
- Densitas : 1,56 g/ml
- Kapasitas panas : 33.7191 J/mol.K

Sifat kimia (Perry, 1997):

- Larut dalam larutan alkali (NaOH dan KOH)

c. *Nitrosyl Chloride*

Nitrosyl klorida atau dikenal juga nitrogen oksiklorida merupakan senyawa berwujud gas pada suhu kamar dan berwarna kuning. NOCl merupakan salah satu senyawa yang bereaksi dengan air, dan dapat terbilang dalam uap asam sulfat. NOCl merupakan elemen terpenting pada pembuatan *aqua regia*. Dalam sintesis organik, NOCl digunakan sebagai zat

pengoksidasi. NOCl terkadang juga digunakan sebagai katalis. Sifat fisis dan kimia NOCl adalah sebagai berikut :

Sifat Fisis (Perry, 1997 : Yaws, 1999) :

- Rumus molekul : NOCl
- Berat molekul : 65,47 g/mol
- Titik didih : $-5,5^{\circ}\text{C}$ pada 1 atm
- Titik beku : $-64,5^{\circ}\text{C}$ pada 1 atm
- Bentuk : gas
- Warna : merah kekuningan
- Densitas : 1,417 g/ml
- Kapasitas panas : 44.2666 J/mol.K

Sifat kimia (Perry, 1997)) :

- Larut dalam H_2SO_4

1.4.5 Proses pembuatan yang dipilih

a. Kondisi Operasi

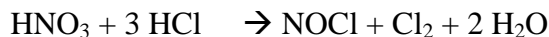
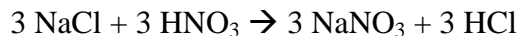
Kondisi operasi pada pembuatan natrium nitrat berjalan pada suhu 60°C dengan tekanan 1,013 bar. Pemilihan kondisi operasi tersebut berdasarkan pertimbangan bahwa kondisi tersebut merupakan kondisi optimum untuk pembentukan NaNO_3 dari NaCl dan HNO_3 (Kobe, 1957). Selain itu untuk menjaga supaya HNO_3 tetap bereaksi dengan NaCl membentuk NaNO_3 karena HNO_3 kurang stabil jika pada suhu tinggi dan akan terdekomposisi menjadi gas NO_2 , H_2O dan O_2

(Kirk dan Othmer, 1997). Pada prarancangan pabrik natrium nitrat rasio mol reaktan HNO_3 dengan NaCl yang digunakan adalah 1,3 : 1, sehingga akan diperoleh konversi sebesar 95% terhadap NaCl (U.S. Patent 1978751. 1934).

Reaksi dijalankan pada kondisi isothermal sehingga suhu dalam reaktor harus dijaga konstan pada kondisi 60°C , sehingga dalam proses digunakan reaktor alir tangki berpengaduk (RATB). Selain itu, fase reaktan adalah cair sehingga memungkinkan penggunaan reaktor jenis RATB. Untuk menjaga reaksi berjalan pada suhu yang diinginkan, maka digunakan jaket reaktor sebagai media pemanas atau pendingin.

b. Mekanisme Reaksi

Reaksi pembentukan natrium nitrat (NaNO_3) dari natrium klorida (NaCl) dan asam nitrat (HNO_3) berdasarkan urutan mekanisme reaksi adalah sebagai berikut :



NaCl bereaksi dengan HNO_3 membentuk NaNO_3 dan HCl terlebih dahulu. Selanjutnya HCl akan bereaksi dengan sisa HNO_3 yang belum bereaksi dengan NaCl sehingga membentuk air dan gas NOCl serta Gas Cl_2 . Reaksi tersebut merupakan reaksi penggaraman atau reaksi netralisasi. Reaksi NaCl dan HNO_3 menjadi NaNO_3 berlangsung di dalam reaktor alir tangki berpengaduk (RATB) pada suhu 60°C dan tekanan 1,013 bar (Kobe, 1957). Reaksi antara HNO_3 dengan NaCl dengan perbandingan mol reaktan HNO_3 dan NaCl adalah 1.3 : 1.

c. Tinjauan Termodinamika

Tinjauan secara termodinamika digunakan untuk mengetahui apakah proses tersebut bersifat endotermis atau eksotermis serta arah reaksi *reversible* atau *irreversible*. Untuk menentukan sifat reaksi, panas reaksi dapat dihitung dari panas pembentukan standar (ΔH_f°) pada kondisi $P = 1.013 \text{ bar}$ dan $T = 25^\circ\text{C}$.

Tabel 8. Harga ΔH_f° dan ΔG_f°

Komponen	ΔH_f° . kJ/mol	ΔG_f° . kJ/mol
NaCl	-411384.9372	-384493.7238
HNO ₃	-133849.3724	-73514.6444
NaNO ₃	-467405.8577	-366610.8787
NOCl	53556.4854	67364.0168
Cl ₂	0	0
H ₂ O	-285846.8619	-237196.2343

(Sumber : Perry, 1997 : Yaws, 1999)

Pada proses pembentukan natrium nitrat akan terjadi reaksi sebagai berikut :



- Panas reaksi standar (ΔH_r°)

$$\Delta H_r^\circ = \sum \Delta H_f^\circ \text{ produk} - \sum \Delta H_f^\circ \text{ reaktan}$$

$$\Delta H_r^\circ = (3. \Delta H_f^\circ \text{ NaNO}_3 + \Delta H_f^\circ \text{ NOCl} + \Delta H_f^\circ \text{ Cl}_2 + 2. \Delta H_f^\circ \text{ H}_2\text{O}) - (3. \Delta H_f^\circ \text{ NaCl} + 4. \Delta H_f^\circ \text{ HNO}_3)$$

$$\Delta H_r^\circ = [3(-467405.8577) + (53556.4854) + 0 + 2(-285846.8619)] - [3(-411384.9372) + 4(-133849.3724)]$$

$$\Delta H_r^\circ = -150802.511 \text{ kJ/mol}$$

Karena ΔH_r° bernilai negatif maka reaksi bersifat eksotermis.

ΔH_{333} pada suhu 60°C (333 K) adalah :

$$dH = C_p \cdot dT$$

$$\Delta H_{333} = \int_{298}^{333} C_p \cdot dT$$

$$\Delta H_{333} = [\sum C_p \text{ produk} - \sum C_p \text{ reaktan}] dT$$

$$\Delta H_{333} = (33.6402 + 33.7191 + 44.2666 + 75.5565) - (110.68 + 50.075) \\ (333-298) \text{ K}$$

$$\Delta H_{333} = 924.9590 \text{ J/mol}$$

$$\Delta H = \Delta H_r^\circ - \Delta H_{333}$$

$$\Delta H = -150802.511 - (0.924959) \text{ (kJ/mol)}$$

$$\Delta H = -150803.436 \text{ kJ/mol}$$

- Konstanta kesetimbangan (K) pada keadaan standar

$$\Delta G_f^\circ = -R T \ln K$$

Dimana :

$$\Delta G_f^\circ = \text{energi Gibbs pada keadaan standar (T = 298 K dan P = 1 atm) (J/mol)}$$

$$\Delta H_r^\circ = \text{Panas reaksi (J/mol)}$$

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

$$T = \text{Suhu standar}$$

$$R = \text{tetapan gas ideal (8.314 J/mol.K)}$$

Sehingga ΔG_f° dari reaksi tersebut adalah :

$$\begin{aligned}\Delta G_f^\circ &= \Delta G_f^\circ \text{ produk} - \Delta G_f^\circ \text{ reaktan} \\ &= (3. \Delta G_f \text{ NaNO}_3 + \Delta G \text{ NOCl} + \Delta G \text{ Cl}_2 + 2. \Delta G \text{ H}_2\text{O}) - \\ &\quad (3. \Delta G \text{ NaCl} + 4. \Delta G \text{ HNO}_3) \\ &= [3(-366610.8787) + 67364.0168 + 0 + 2(-237196.2343)] - \\ &\quad [3(-384493.7238) + 4(-73514.6444)] \\ &= -59321.342 \text{ J/mol}\end{aligned}$$

$$\Delta G_f^\circ = -R T \ln K$$

$$\begin{aligned}\ln K_{298} &= -\frac{\Delta G_f}{R.T} \\ &= \frac{-59321.342 \text{ J/mol}}{8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \cdot 298 \text{ K}}\end{aligned}$$

$$\ln K_{298} = 23.9433$$

$$K_{298} = 2.5 \cdot 10^{10}$$

- Konstanta Keseimbangan (K) pada $T = 60^\circ\text{C} = 333 \text{ K}$

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = -\frac{\Delta H_r}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

dimana :

K1 = konstanta keseimbangan pada 298 K

K2 = konstanta keseimbangan pada suhu operasi

T1 = suhu standar (298 K)

T2 = suhu operasi (333 K)

R = tetapan gas ideal (8.314 J/mol.K)

ΔH_r° = panas reaksi standar pada 298 K

Maka :

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = - \frac{-150802.511 \text{ J/mol}}{8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}} \left(\frac{1}{333 \text{ K}} - \frac{1}{298 \text{ K}} \right)$$

$$\ln \frac{K_2}{2.5 \cdot 10^{-10}} = -6.3974$$

$$\frac{K_2}{948.3227} = 1.6659 \cdot 10^{-3}$$

$$K_2 = 4.1645 \times 10^4$$

Dari perhitungan konstanta kesetimbangan pada suhu reaksi, didapatkan konstanta kesetimbangan reaksi yang relative besar, sehingga dapat disimpulkan bahwa reaksi akan berlangsung searah yaitu ke kanan (*irreversible*).

d. Tinjauan Kinetika Reaksi

Dari segi kinetika reaksi dapat diperoleh beberapalangkah berikut,

Reaksi orde 2



Mula	C_{A0}	C_{B0}				
Rx	$X_A \cdot C_{A0}$	$4/3 \cdot X_A \cdot C_{A0}$	$X_A \cdot C_{A0}$	$1/3 \cdot X_A \cdot C_{A0}$	$1/3 \cdot X_A \cdot C_{A0}$	$2/3 \cdot X_A \cdot C_{A0}$
Sisa	$C_{A0} \cdot (1 - X_A)$	$4/3 \cdot C_{A0} \cdot (1 - X_A)$	$X_A \cdot C_{A0}$	$1/3 \cdot X_A \cdot C_{A0}$	$1/3 \cdot X_A \cdot C_{A0}$	$2/3 \cdot X_A \cdot C_{A0}$

Persamaan kecepatan reaksi :

$$-(r_A) = k \cdot (C_A)(C_B)$$

Dimana :

$$C_A = \frac{n_A}{v} = \frac{n_{A0}(1-x_A)}{v} = C_{A0}(1-x_A)$$

$$C_B = \frac{n_B}{v} = \frac{n_{B0} - n_{A0} \cdot x_A}{v} = C_{B0} - (C_{A0} \cdot x_A)$$

Sehingga :

$$(-r_A) = k C_{A0} (1 - x_A) (C_{B0} - C_{A0} \cdot x_A)$$

Keterangan :

(-ra) = kecepatan reaksi zat A (NaCl)

k = konstanta kecepatan reaksi (L/mol.jam)

C_A = konsentrasi NaCl pada waktu ke t (mol/L)

C_B = konsentrasi HNO₃ pada waktu ke t (mol/L)

C_{A0} = konsentrasi NaCl mula-mula (mol/L)

C_{B0} = konsentrasi HNO₃ mula-mula (mol/L)

X_A = konversi terhadap NaCl

Dari beberapa literatur diperoleh data-data sebagai berikut :

$$C_{A0} : C_{B0} = 1 : 1,3$$

$$\text{Konversi } (X_A) = 95\%$$

Dengan beberapa persamaan tersebut maka nilai k dapat dihitung.

Kinetika reaksi

Diketahui : $X_A = 90\% = 0,90$

t = 30 menit

	A	+	B	→	C
Mula2	C_{A0}		C_{B0}		
Reaksi	$C_{A0} \cdot X_A$		$C_{A0} \cdot X_A$		$C_{A0} \cdot X_A$
Sisa	$C_{A0}(1-X_A)$		$C_{B0} - C_{A0} \cdot X_A$		$C_{A0} \cdot X_A$

- Nacl 37 %

$$BM = 58,45$$

$$C_{A0} = 37 \frac{\text{gram}}{100 \text{ mL}} : 58,45 \frac{\text{mol}}{\text{gram}} = 6,3302 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

$$\begin{aligned} C_A &= C_{A0} (1-X_a) \\ &= 6,3302 \frac{\text{mol}}{\text{L}} (1-0,90) \\ &= 0,633 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \end{aligned}$$

- HNO₃ 60 %

$$BM = 17,30$$

$$C_{B0} = 60 \frac{\text{gram}}{100 \text{ mL}} : 63,02 \frac{\text{mol}}{\text{gram}} = 9,5208 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

$$\begin{aligned} C_B &= C_{B0} - C_{A0} X_a \\ &= 9,5208 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 6,3302 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 0,90 \\ &= 3,82362 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \end{aligned}$$

❖ Orde 0

$$(-r_a) = k C_A^0$$

$$\frac{-dC_A}{dt} = k$$

$$\int_{C_{A0}}^{C_A} -C_A = k t$$

$$-C_A + C_{A0} = k t$$

$$-0,633 \frac{\text{mol}}{\text{L}} + 6,3302 \frac{\text{mol}}{\text{L}} = k \cdot 30 \text{ menit}$$

$$k = 0,1899 \frac{\text{mol}}{\text{L} \cdot \text{menit}}$$

❖ Orde 1

$$(-r_a) = k C_A^1$$

$$\frac{-dC_A}{dt} = k C_A$$

$$\frac{-dC_A}{C_A} = k dt$$

$$\text{Ln} \frac{C_{A0}}{C_A} = k t$$

$$\text{Ln} \frac{6,3302}{0,633} = k \cdot 30$$

$$k = 0,0768 \text{ L/mol} \cdot \text{menit}$$

❖ Orde 2

○ $(-r_A) = k C_A C_B$

$$\frac{-dC_A}{dt} = k C_A C_B$$

$$(-r_A) = k (C_{A0} - C_{A0}X_A) (C_{B0} - C_{A0}X_A)$$

$$M = C_{B0}/C_{A0}$$

$$(-r_A) = k C_{A0}^2 (1 - X_A) (M - X_A)$$

$$\int_0^{X_A} \frac{dX_A}{(1 - X_A)(M - X_A)} = C_{A0} k \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{1 - X_B}{1 - X_A} = \ln \frac{M - X_A}{M(1 - X_A)} = \ln \frac{C_B C_{A0}}{C_{B0} C_A}$$

$$\ln \frac{C_B C_{A0}}{C_{B0} C_A} = C_{A0} \left(\frac{C_{B0}}{C_{A0}} - 1 \right) k t$$

$$\ln \frac{3,8236 \times 6,332}{9,5208 \times 0,633} = 6,332 \left(\frac{9,5208}{6,332} - 1 \right) k \cdot 30$$

$$1,3906 = 95,664 k$$

$$k = 0,0145 \text{ L/mol.menit}$$

○ $(-r_A) = k C_B^2$

$$\frac{-dC_B}{dt} = k C_B^2$$

$$\frac{-dC_B}{C_B^2} = k dt$$

$$\frac{1}{C_B} - \frac{1}{C_{B0}} = k t$$

$$0,2615 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0,1050 \frac{\text{mol}}{\text{L}} = k \cdot 30 \text{ menit}$$

$$k = 0,005 \text{ L/mol.menit}$$

○ $(-r_A) = k C_A^2$

$$\frac{-dC_A}{dt} = k C_A^2$$

$$\frac{-dC_A}{C_A^2} = k dt$$

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = k t$$

$$1,5798 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0,1579 \frac{\text{mol}}{\text{L}} = k \cdot 30 \text{ menit}$$

$$k = 0,0474 \text{ L/mol.menit}$$

❖ Orde 3

○ $\frac{-dC_A}{dt} = k C_A^2 C_B$

$$\frac{-dCA}{CA^2(CB_0 - CA_0 X_a)} = k dt$$

$$\frac{-dCA}{CA^2(CB_0 - CA_0)} + \frac{dCA}{(CB_0 - CA_0)(CB_0 - CA_0 X_a)} = k dt$$

$$\left(\frac{1}{CA_0(1-X_a)} - \frac{1}{CA_0}\right) \left(\frac{1}{CB_0 - CA_0}\right) + \frac{1}{CB_0 - CA_0} \ln(CB_0 - CA_0 X_a) = k t$$

$$(1,5793 - 0,1579) \frac{\text{mol}}{L} (0,3134) \frac{\text{mol}}{L} + 0,3134 \frac{\text{mol}}{L} \ln 3,8236 \frac{\text{mol}}{L} = k 30 \text{ menit}$$

$$k = 0,0289 \text{ L}^2/\text{mol}^2 \cdot \text{Menit}$$

$$\circ \frac{-dCB}{dt} = k C_A C_B^2$$

$$\frac{-dCB}{CA C_B^2} = k dt$$

$$\frac{-dCB}{CB(CA(1-X_a))} = k dt$$

$$\frac{-dCB}{(CB_0 - CA_0)CA^2} + \frac{dCB}{(CB_0 - CA_0)(CA_0(1-X_a))} = k dt$$

$$\left(\frac{1}{CB_0 - CA_0}\right) \left(\frac{1}{CB_0 - CA_0 X_a} - \frac{1}{CB_0}\right) \ln CB_0 - CA_0 \left(\frac{1}{CA_0(1-X_a)}\right) = k t$$

$$(0,3134) \frac{\text{mol}}{L} (0,2615 - 0,1050) \ln 9,5208 = k 30 \text{ menit}$$

$$k = 0,0038 \text{ L}^2/\text{mol}^2 \cdot \text{menit}$$

$$\circ \frac{-dCA}{dt} = k C_A^3$$

$$\frac{-dCA}{CA^3} = k dt$$

$$\frac{1}{2 CA^2} - \frac{1}{2 CA_0^2} = k t$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{CA^2} - \frac{1}{CA_0^2}\right) = k t$$

$$\frac{1}{2} \left(2,4957 \frac{\text{mol}^2}{L^2} - 0,0249 \frac{\text{mol}^2}{L^2}\right) = k 30 \text{ menit}$$

$$k = 0,0412 \text{ L}^2/\text{mol}^2 \cdot \text{menit}$$

$$\circ \frac{-dCB}{dt} = k C_B^3$$

$$\frac{-dCB}{CB^3} = k dt$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{CB^2} - \frac{1}{CB_0^2}\right) = k t$$

$$\frac{1}{2} (0,0684 - 0,011) = k 30$$

$$k = 0,00096 \text{ L}^2/\text{mol}^2 \cdot \text{menit}$$

kemudian nilai k masing-masing orde di masukkan di pers Levenspel

$$\frac{V}{FV} = \frac{Xa}{(-ra)}$$

$$t' = \frac{Xa}{-ra}$$

❖ Orde 0

$$\begin{aligned} t' &= \frac{Xa}{k CA^0} \\ &= \frac{0,90}{0,1899} = 4,74 \text{ menit} \end{aligned}$$

❖ Orde 1

$$\begin{aligned} t' &= \frac{Xa}{k CA^1} \\ &= \frac{0,90}{0,0789 \times 0,633} = 18,02 \text{ menit} \end{aligned}$$

❖ Orde 2

$$\begin{aligned} \circ t' &= \frac{Xa}{k CA CB} \\ &= \frac{0,90}{0,0145 \times 0,633 \times 3,8236} = 25,64 \text{ menit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \circ t' &= \frac{Xa}{k CA^2} \\ &= \frac{0,90}{0,0474 \times 0,633^2} = 47,39 \text{ menit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \circ t' &= \frac{Xa}{k CB^2} \\ &= \frac{0,90}{0,005 \times 3,8236^2} = 12,31 \text{ menit} \end{aligned}$$

❖ Orde 3

$$\begin{aligned} \circ t' &= \frac{Xa}{k CA^2 CB} \\ &= \frac{0,90}{0,0289 \times 0,633^2 \times 3,8236} = 20,33 \text{ menit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \circ t' &= \frac{Xa}{k CA CB^1} \\ &= \frac{0,90}{0,038 \times 0,633 \times 3,8236^2} = 2,56 \text{ menit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \circ t' &= \frac{Xa}{k CA^3} \\ &= \frac{0,90}{0,0412 \times 0,633^3} = 86,13 \text{ menit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \circ \quad t' &= \frac{Xa}{k C_B^3} \\ &= \frac{0,90}{0,00096 \times 3,8236^3} = 64,12 \text{ menit} \end{aligned}$$

Waktu yang paling mendekati adalah pada orde 2 :

$$(-r_a) = k C_A C_B$$

Diketahui : $X_a = 5\% = 0,05$

$t = 30$ menit

	A	+	B	→	C
Mula2	C_{A0}		C_{B0}		
Reaksi	$C_{A0} \cdot X_a$		$C_{A0} \cdot X_a$		$C_{A0} \cdot X_a$
Sisa	$C_{A0}(1-X_a)$		$C_{B0} - C_{A0} \cdot X_a$		$C_{A0} \cdot X_a$

- NaCl 37 %

BM = 58,45

$$C_{A0} = 37 \frac{\text{gram}}{100 \text{ mL}} : 58,45 \frac{\text{mol}}{\text{gram}} = 6,3302 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

$$\begin{aligned} C_A &= C_{A0} (1-X_a) \\ &= 6,3302 \frac{\text{mol}}{\text{L}} (1-0,05) \\ &= 6,0137 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \end{aligned}$$

- HNO₃ 60 %

BM = 17,30

$$C_{B0} = 60 \frac{\text{gram}}{100 \text{ mL}} : 63,02 \frac{\text{mol}}{\text{gram}} = 9,5208 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

$$\begin{aligned} C_B &= C_{B0} - C_{A0} X_a \\ &= 9,5208 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 6,3302 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 0,05 \\ &= 9,20429 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \end{aligned}$$

❖ Orde 0

$$(-r_a) = k C_A^0$$

$$\frac{-dC_A}{dt} = k$$

$$\int_{C_{A0}}^{C_A} -C_A = k t$$

$$-C_A + C_{A0} = k t$$

$$-6,0137 \frac{\text{mol}}{\text{L}} + 6,3302 \frac{\text{mol}}{\text{L}} = k \cdot 30 \text{ menit}$$

$$k = 0,0106 \frac{\text{mol}}{\text{L} \cdot \text{menit}}$$

❖ Orde 1

$$(-r_a) = k C_A^1$$

$$\frac{-dC_A}{dt} = k C_A$$

$$\frac{-dC_A}{C_A} = k dt$$

$$\text{Ln} \frac{C_{A0}}{C_A} = k t$$

$$\text{Ln} \frac{6,3302}{6,0137} = k \cdot 30$$

$$k = 0,0017 \text{ L/mol. menit}$$

❖ Orde 2

$$\circ (-r_A) = k C_A C_B$$

$$\frac{-dC_A}{dt} = k C_A C_B$$

$$(-r_A) = k (C_{A0} - C_{A0}X_A) (C_{B0} - C_{A0}X_A)$$

$$M = C_{B0}/C_{A0}$$

$$(-r_A) = k C_{A0}^2 (1 - X_A) (M - X_A)$$

$$\int_0^{X_A} \frac{dX_A}{(1 - X_A)(M - X_A)} = C_{A0} k \int_0^t dt$$

$$\text{Ln} \frac{1 - X_B}{1 - X_A} = \text{Ln} \frac{M - X_A}{M(1 - X_A)} = \text{Ln} \frac{C_B C_{A0}}{C_{B0} C_A}$$

$$\text{Ln} \frac{C_B C_{A0}}{C_{B0} C_A} = C_{A0} \left(\frac{C_{B0}}{C_{A0}} - 1 \right) k t$$

$$\text{Ln} \frac{9,2043 \times 6,332}{9,5208 \times 6,0137} = 6,332 \left(\frac{9,5208}{6,332} - 1 \right) k \cdot 30$$

$$0,0178 = 95,664 k$$

$$k = 0,00018 \text{ L/mol. menit}$$

$$\circ (-r_A) = k C_B^2$$

$$\frac{-dC_B}{dt} = k C_B^2$$

$$\frac{-dC_B}{C_B^2} = k dt$$

$$\frac{1}{C_B} - \frac{1}{C_{B0}} = k t$$

$$0,1086 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0,105 \frac{\text{mol}}{\text{L}} = k \cdot 30 \text{ menit}$$

$$k = 0,00012 \text{ L/mol. menit}$$

$$\circ (-r_A) = k C_A^2$$

$$\frac{-dC_A}{dt} = k C_A^2$$

$$\frac{-dCA}{CA^2} = k dt$$

$$\frac{1}{CA} - \frac{1}{CA_0} = k t$$

$$0,1663 \frac{\text{mol}}{L} - 0,1579 \frac{\text{mol}}{L} = k \text{ 30 menit}$$

$$k = 0,000028 \text{ L/mol.menit}$$

❖ Orde 3

$$\circ \frac{-dCA}{dt} = k C_A^2 C_B$$

$$\frac{-dCA}{CA^2(CB_0 - CA_0.Xa)} = k dt$$

$$\frac{-dCA}{CA^2(CB_0 - CA_0)} + \frac{dCA}{(CB_0 - CA_0)(CB_0 - CA_0.Xa)} = k dt$$

$$\left(\frac{1}{CA_0(1-Xa)} - \frac{1}{CA_0} \right) \left(\frac{1}{CB_0 - CA_0} \right) + \frac{1}{CB_0 - CA_0} \ln(CB_0 - CA_0.Xa) = k t$$

$$(0,1663 - 0,1579) \frac{\text{mol}}{L} (0,3134) \frac{\text{mol}}{L} + 0,3134 \frac{\text{mol}}{L} \ln 9,2043 \frac{\text{mol}}{L} = k \text{ 30 menit}$$

$$k = 0,0233 \text{ L}^2/\text{mol}^2. \text{ Menit}$$

$$\circ \frac{-dCB}{dt} = k C_A C_B^2$$

$$\frac{-dCB}{CA.CB^2} = k dt$$

$$\frac{-dCB}{CB.(CA(1-Xa))} = k dt$$

$$\frac{-dCB}{(CB_0 - CA_0)CA^2} + \frac{dCB}{(CB_0 - CA_0)(CA_0(1-Xa))} = k dt$$

$$\left(\frac{1}{CB_0 - CA_0} \right) \left(\frac{1}{CB_0 - CA_0.Xa} - \frac{1}{CB_0} \right) \ln CB_0 - CA_0 \left(\frac{1}{CA_0(1-Xa)} \right) = k t$$

$$(0,00001) \frac{\text{mol}}{L} (0,1086 - 0,1050) \ln 9,5208 = k \text{ 30 menit}$$

$$k = 2,7 \times 10^{-9} \text{ L}^2/\text{mol}^2. \text{ menit}$$

$$\circ \frac{-dCA}{dt} = k C_A^3$$

$$\frac{-dCA}{CA^3} = k dt$$

$$\frac{1}{2 CA^2} - \frac{1}{2 CA_0^2} = k t$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{CA^2} - \frac{1}{CA_0^2} \right) = k t$$

$$\frac{1}{2} \left(2,4957 \frac{\text{mol}^2}{L^2} - 0,0249 \frac{\text{mol}^2}{L^2} \right) = k \text{ 30 menit}$$

$$k = 0,0412 \text{ L}^2/\text{mol}^2 \cdot \text{menit}$$

$$\circ \frac{-dCB}{dt} = k C_B^3$$

$$\frac{-dCB}{CB^3} = k dt$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{CB^2} - \frac{1}{CB0^2} \right) = k t$$

$$\frac{1}{2} (0,0684 - 0,011) = k 30$$

$$k = 0,00096 \text{ L}^2/\text{mol}^2 \cdot \text{menit}$$

kemudian nilai k masing-masing orde di masukkan di pers Levenspel

$$\frac{V}{FV} = \frac{Xa}{(-ra)}$$

$$t' = \frac{Xa}{-ra}$$

❖ Orde 0

$$\begin{aligned} t' &= \frac{Xa}{k CA^0} \\ &= \frac{0,90}{0,1899} = 4,74 \text{ menit} \end{aligned}$$

❖ Orde 1

$$\begin{aligned} t' &= \frac{Xa}{k CA^1} \\ &= \frac{0,90}{0,0789 \times 0,633} = 18,02 \text{ menit} \end{aligned}$$

❖ Orde 2

$$\begin{aligned} \circ t' &= \frac{Xa}{k CA CB} \\ &= \frac{0,05}{0,00018 \times 6,0137 \times 9,2043} = 5,02 \text{ menit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \circ t' &= \frac{Xa}{k CA^2} \\ &= \frac{0,90}{0,0474 \times 0,633^2} = 47,39 \text{ menit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \circ t' &= \frac{Xa}{k CB^2} \\ &= \frac{0,90}{0,005 \times 3,8236^2} = 12,31 \text{ menit} \end{aligned}$$

❖ Orde 3

$$\begin{aligned} \circ \quad t' &= \frac{Xa}{k C_A^2 C_B} \\ &= \frac{0,90}{0,0289 \times 0,633^2 \times 3,8236} = 20,33 \text{ menit} \\ \circ \quad t' &= \frac{Xa}{k C_A C_B^1} \\ &= \frac{0,90}{0,038 \times 0,633 \times 3,8236^2} = 2,56 \text{ menit} \\ \circ \quad t' &= \frac{Xa}{k C_A^3} \\ &= \frac{0,90}{0,0412 \times 0,633^3} = 86,13 \text{ menit} \\ \circ \quad t' &= \frac{Xa}{k C_B^3} \\ &= \frac{0,90}{0,00096 \times 3,8236^3} = 64,12 \text{ menit} \end{aligned}$$

Waktu yang paling mendekati adalah pada orde 2 :

$$(-r_a) = k C_A C_B$$