

**PRARANCANGAN PABRIK KLORIN DIOKSIDA
DARI NATRIUM KLORAT, ASAM SULFAT DAN HIDROGEN
PEROKSIDA KAPASITAS 26.000 TON/TAHUN
(Prarancangan Absorber 301 (AB-301))**

(Skripsi)

Oleh

ISYAEBONI RAKASERI

NPM 1615041007



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

ABSTRAK

PRARANCANGAN PABRIK KLOORIN DIOKSIDA DARI NATRIUM KLOORAT, ASAM SULFAT DAN HIDROGEN PEROKSIDA KAPASITAS 26.000 TON/TAHUN

(Perancangan Absorber 301 (AB-301))

Oleh

ISYAEBONI RAKASERI

Klorin dioksida merupakan senyawa anorganik yang digunakan sebagai *bleaching agent* dalam industri pulp, kertas dan tekstil menggantikan Cl_2 , *chloride* dan *hypochloride*. Klorin dioksida dapat diproduksi dengan beberapa cara antara lain: 1) Proses Solvay 2) Proses Mathiesson dan 3) Proses *Hydrogen Peroxide-Atmosphere*. Penyediaan kebutuhan utilitas pabrik berupa sistem pengolahan dan penyediaan air, sistem penyediaan *steam*, *cooling water*, penyedia udara dan instrumentasi.

Kapasitas produksi pabrik klorin dioksida direncanakan sebesar 26.000 ton/tahun dengan 330 hari kerja dalam 1 tahun. Lokasi pabrik direncanakan didirikan di Karawang, Jawa Barat. Tenaga kerja yang dibutuhkan sebanyak 115 orang dengan bentuk badan usaha Perseroan Terbatas (PT) dengan struktur organisasi lini.

Dari analisis ekonomi diperoleh:

<i>Fixed Capital Investment</i>	(FCI)	= Rp 400.891.056.119
<i>Working Capital Investment</i>	(WCI)	= Rp 70.745.480.492
<i>Total Capital Investment</i>	(TCI)	= Rp 471.636.536.610
<i>Break Even Point</i>	(BEP)	= 35,52%
<i>Shut Down Point</i>	(SDP)	= 11,58%
<i>Pay Out Time before taxes</i>	(POT) _b	= 2,99 tahun
<i>Pay Out Time after taxes</i>	(POT) _a	= 3,74 tahun

<i>Return on Investment before taxes</i>	(ROI) _b	=	42,59%
<i>Return on Investment after taxes</i>	(ROI) _a	=	34,71%
<i>Discounted cash flow</i>	(DCF)	=	42,11%

Berdasarkan beberapa paparan di atas, maka pendirian pabrik klorin dioksida ini layak untuk dikaji lebih lanjut, karena merupakan pabrik yang menguntungkan dari sisi ekonomi dan mempunyai prospek yang relatif baik.

ABSTRACT

PREDESIGN OF CHLORINE DIOXIDE FROM SODIUM CHLORATE, SULFURIC ACID AND HYDROGEN PEROXIDE WITH CAPACITY 26.000 TONS/YEARS

(Absorber 301 Design (AB-301))

By

ISYAEBONI RAKASERI

Chlorine dioxide is an organic compound that is used as a bleaching agent in the pulp, paper and textile industries to replace Cl₂, chloride and hypochloride. Chlorine dioxide can be produced in several ways, including: 1) Solvay Process 2) Mathiesson Process and 3) Hydrogen Peroxide-Atmosphere Process. Provision of utility plant needs a treatment system and water supply, steam supply system, cooling water, air and instrumentation providers.

Capacity of the plant is planned to production chlorine dioxide is 26.000 tons/year with 330 working days in a year. The location of plant is planned in Karawang, West Java. Labor needed in this plant as many as 115 people with a business entity form Limited Liability Company (PT) with line organizational structure.

From the economic analysis are obtained :

<i>Fixed Capital Investment</i>	(FCI)	= Rp 400.891.056.119
<i>Working Capital Investment</i>	(WCI)	= Rp 70.745.480.492
<i>Total Capital Investment</i>	(TCI)	= Rp 471.636.536.610
<i>Break Even Point</i>	(BEP)	= 35,52%
<i>Shut Down Point</i>	(SDP)	= 11,58%
<i>Pay Out Time before taxes</i>	(POT) _b	= 2,99 years

<i>Pay Out Time after taxes</i>	(POT) _a	= 3,74 years
<i>Return on Investment before taxes</i>	(ROI) _b	= 42,59%
<i>Return on Investment after taxes</i>	(ROI) _a	= 34,71%
<i>Discounted cash flow</i>	(DCF)	= 42,11%

By considering above the summary, it is proper establishment of chlorine dioxide plant for studied further, because the plant is profitable and has good prospects future.

**PRARANCANGAN PABRIK
KLORIN DIOKSIDA DARI NATRIUM KLORAT, ASAM SULFAT, DAN
HIDROGEN PEROKSIDA DENGAN KAPASITAS 26.000 TON/TAHUN
(Tugas Khusus Perancangan Absorber (AB-301))**

**Oleh
ISYAEBONI RAKASERI
1615041007**

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Kimia
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2022

**Judul Skripsi : PRARANCANGAN PABRIK KLOLIN
DIOKSIDA DARI NATRIUM KLOLAT,
ASAM SULFAT, DAN HIDROGEN
PEROKSIDA DENGAN KAPASITAS 26.000
TON/TAHUN
(Tugas Khusus Perancangan Absorber
(AB-301))**

Nama Mahasiswa : Tsyaeboni Rakasari

Nomor Pokok Mahasiswa : 1615041007

Program Studi : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik



Dr. Eng. Dewi Agustina I, S.T., M.T.
NIP. 197208252000032001

Dr. Sri Ismiyati D, S.T., M.Eng.
NIP. 197904192006041001

2. Ketua Jurusan


Yuli Darni, S.T., M.T.
NIP. 197407122000032001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Dr. Eng. Dewi Agustina I, S.T., M.T.

Sekretaris

: Dr. Sri Ismiyati D, S.T., M.Eng.

Penguji

Bukan pembimbing I : Ir. Azhar, M.T.

Bukan Pembimbing II : Dr. Lillis Hermida, S.T., M.Sc.

Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP. 197509282001121001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 15 Agustus 2022

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan oleh orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya juga tidak terdapat karya atas pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana diterbitkan dalam daftar pustaka. Selain itu saya menyatakan pada skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya ini tidak benar maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 26 Agustus 2022



Isyaeuon Rakaseri
NPM. 1615041007

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Palu, Sulawesi Tengah pada tanggal 30 Maret 1999, putri tunggal dari pasangan Bapak Raden Rasman dan Ibu Kanasari.

Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar Negeri Dadali pada tahun 2010, Sekolah Menengah Pertama Negeri 23 Bandung pada tahun 2013, dan Sekolah Menengah Atas Negeri 13 Bandung pada tahun 2016.

Pada tahun 2016, penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui Jalur SMNPTN 2016. Selama menjadi mahasiswa penulis aktif dalam organisasi sebagai staff Departemen Hubungan Luar Himpunan Mahasiswa Teknik Kimia (Himatemia) FT Unila periode 2017 dan sekertaris Departemen Hubungan Luar Himpunan Mahasiswa Teknik Kimia (Himatemia) FT Unila periode 2018.

Pada tahun 2019, penulis melakukan Kerja Praktik di PT. Riau Andalan Pulp and Paper dengan Tugas Khusus “Efisiensi Kinerja *Screeener* dan *Cleaner* di

Departemen *Pulp Dryer #4*". Penulis juga melakukan penelitian dengan judul "Studi Sifat Keterbakaran (Combustibility Properties) Dari Pelet Biomassa Sebelum dan Sesudah Proses Torefaksi Dengan Menggunakan *Thermogravimetri Analyzer*"

Pada tahun 2020, penulis mendapatkan kesempatan dan amanah sebagai asisten laboratorium Praktikum Intruksional 1 dan Pada tahun 2021 penulis kembali mendapat kesempatan menjadi asisten laboratorium Identifikasi dan Kuantifikasi Kimia.

Pada tahun 2022, penulis mendapat kesempatan menjadi *oral presenter* dalam *International Conference on Biomass and Bioenergy* (ICBB) dan penulis dapat melakukan publikasi jurnal internasional pada kesempatan tersebut dengan judul "*Thermogravimetric Assessment for Combustion Characteristic of Torrefied Pellet Biomass*"

MOTTO

إِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا

Inna ma'al-'usri yusrā

Artinya, “Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan” - QS Al-Insyirah : 6

قَالَ رَبِّ إِنِّي وَهَنَ الْعَظْمُ مِنِّي وَاشْتَعَلَ الرَّأْسُ شَيْبًا
وَلَمْ أَكُنْ بِدُعَائِكَ رَبِّ شَقِيًّا

*Qoola Rabbi innii wahanal'azmu minnii washta'alar raasu shaibanw wa lam akum
bidu'aaa'ika Rabbi shaqiyyaa*

Artinya, “Dia (Zakaria) berkata, "Ya Tuhanku, sungguh tulangku telah lemah dan kepalaku telah dipenuhi uban, dan aku belum pernah kecewa dalam berdoa kepada-Mu, ya Tuhanku. - QS Maryam : 4

Sebuah KaryaKu....

Dengan sepenuh hati kupersembahkan tugas akhir ini kepada:

Allah SWT

*Karena kehendak-Nya, semua ini dapat ku peroleh
Atas berkah dan karunia-Nya, aku bisa menyelesaikan karya kecil ini
Atas karunia-Nya dan anugerah-Nya, aku bisa bertahan selama ini.*

*Kedua orang tuaku dan seluruh keluarga besar,
terima kasih atas segalanya, doa, kasih sayang, pengorbanan, dan
keikhlasannya.*

*Ini hanyalah setitik balasan yang tidak bisa dibandingkan dengan
pengorbanan dan kasih sayang selama ini*

Terimakasih atas segalanya.

Sahabat-sahabatku,

*terimakasih atas dukungan, doa, keceriaan dan ketulusannya selama
ini.*

Para pengajar sebagai tanda hormatku,

*terima kasih atas ilmu yang telah diberikan selama ini, baik itu
berupa ilmu teknik kimia, maupun ilmu kehidupan yang tentunya
sangat berguna dan bermanfaat.*

*Dan tak lupa kupersembahkan kepada Almamaterku tercinta,
semoga kelak berguna dikemudian hari.*

SANWACANA

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT, atas segala berkat dan rahmat-Nya, sehingga tugas akhir ini dengan judul “Prarancangan Pabrik Klorin Dioksida dari Natrium Klorat, Asam Sulfat, dan Hidrogen Peroksida dengan Kapasitas 26.000 Ton/Tahun” dapat diselesaikan dengan baik.

Tugas akhir ini disusun dalam rangka memenuhi salah satu syarat guna memperoleh gelar sarjana (S-1) di Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Penyusunan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan dari beberapa pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang telah dan selalu memberikan kemudahan dalam setiap langkah penulis hingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dan mendapatkan gelar sarjana.
2. Keluarga tercinta, Mamah, Papap, serta seluruh keluarga besar atas pengorbanan, doa, dukungan, kepercayaan, ketulusan, bantuan dan semangat yang telah diberikan serta cinta dan kasih sayang yang selalu mengiringi setiap saat.
3. Ibu Yuli Darni, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia Universitas Lampung.
4. Ibu Dr. Eng. Dewi Agustina I, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I, yang telah memberikan ilmu, pengarahan, saran, bimbingan, pengertian dan kritik dalam penyelesaian tugas akhir. Semoga ilmu bermanfaat yang diberikan dapat berguna di kemudian hari.

5. Ibu Dr. Sri Ismiyati D, S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing II, yang telah memberikan ilmu, pengarahan, saran, bimbingan, pengertian dan kritik dalam penyelesaian tugas akhir. Semoga ilmu bermanfaat yang diberikan dapat berguna di kemudian hari.
6. Bapak Ir. Azhar, M.T. selaku Dosen Peguji I dan Dosen Penguji Penelitian yang telah memberikan ilmu, pengarahan, saran, bimbingan, pengertian dan kritik dalam penyelesaian tugas akhir. Semoga ilmu bermanfaat yang diberikan dapat berguna di kemudian hari.
7. Dr. Lilis Hermida, S.T., M.Sc., selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan ilmu, pengarahan, saran, dan kritik dalam penyelesaian tugas akhir. Semoga ilmu bermanfaat yang diberikan dapat berguna di kemudian hari..
8. Seluruh Dosen Teknik Kimia Universitas Lampung, atas semua ilmu dan bekal masa depan yang akan selalu bermanfaat.
9. Tiara Cahya Putri sebagai teman dari awal perkuliahan hingga meraih gelar sarjana yang juga selaku patner kerja praktik dan patner tugas akhir yang selalu membersamai penulis, menjadi partner yang luar biasa, partner yang selalu sabar, menjadi *supporter* serta penenang, dan saling melengkapi, atas kerjasamanya dengan penulis selama ini dalam penyelesaian Laporan Tugas Akhir.
10. Teman-teman yang Semoga selalu Berkah, Anniza Hasna Purnama, Aknasasia Virginia Krisanti, dan Cecellia Nia Rehmalem Barutu, sebagai teman seperjuangan dari ospek, tiga hari dua malam hingga meraih gelar sarjana, yang selalu menjadi pendengar yang baik, pemberi saran yang baik, yang selalu ada

untuk penulis saat senang maupun sedih, yang tidak pernah lelah kebersamai penulis dan yang selalu sabar.

11. Nima, Raynee, Marini, Shavira, Medina, Zulaikha, Rani dan Nida Asla yang telah tumbuh dan berkembang bersama penulis, yang selalu ada untuk penulis saat senang maupun sedih, yang tidak pernah lelah kebersamai penulis dan selalu mencurahkan segala dukungannya walau terhalang jarak.
12. Sigit, Agoy, Nopal, Ali, Jeri dan teman-teman Teknik Kimia FT Unila 2016, yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu atas bantuannya selama penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini.
13. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan Tugas Akhir ini dan tentunya untuk diri sendiri yang selalu percaya dan yakin bahwa mampu menyelesaikan perkuliahan dengan cara dan waktu yang sebaik-baiknya.

Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan mereka terhadap penulis dan semoga skripsi ini dapat dipergunakan sebaik-baiknya.

Bandar Lampung, 15 Agustus 2022

Penulis,

Isyaeboni Rakaseri

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
HALAMAN JUDUL	v
LEMBAR PENGESAHAN	vi
PERNYATAAN	viii
RIWAYAT HIDUP	ix
MOTTO	xi
PERSEMBAHAN	xii
SANWACANA	xiii
DAFTAR ISI	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR	xviii
BAB I PENDAHULUAN	19
1.1 Latar Belakang	19
1.2 Kegunaan Produk	20
1.3 Ketersediaan Bahan Baku	20
1.4 Analisis Pasar	20
1.5 Kapasitas Pabrik	22
1.6 Lokasi Pabrik	23
BAB II DESKRIPSI DAN PEMILIHAN PROSES	27
2.1 Macam-macam Proses Pembuatan	28
2.2 Seleksi Proses	30
2.3 Pemilihan Proses	54
2.4 Uraian Proses	55
BAB III SPESIFIKASI BAHAN BAKU DAN PRODUK	58
3.1 Spesifikasi Bahan Baku	58
3.2 Spesifikasi Produk	59
BAB X SIMPULAN DAN SARAN	61
10.1 Simpulan	61
10.2 Saran	61
DAFTAR PUSTAKA	62

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Data impor klorin dioksida di Indonesia.....	21
Tabel 1. 2 Kriteria pemilihan lokasi pabrik	25
Tabel 2. 1 Nilai ΔG^0 dan ΔH^0 pada suhu 298,15 K (Yaws, 1999).....	31
Tabel 2. 3 Nilai konstanta C_p (kJ/mol.K) (Yaws, 1999)	33
Tabel 2. 4 Nilai ΔG^0 dan ΔH^0 pada suhu 298,15 K (Yaws, 1999).....	36
Tabel 2. 5 Nilai Konstanta C_p (J/mol.K) (Yaws, 1999).....	37
Tabel 2. 6 Nilai ΔG^0 dan ΔH^0 pada suhu 298,15 K (Yaws, 1999).....	40
Tabel 2. 7 Nilai Konstanta C_p (kJ/mol.K) (Yaws, 1999)	41
Tabel 2. 8 Perbandingan nilai Gibbs free energy dan entalpi reaksi pada proses pembuatan klorin dioksida	44
Tabel 2. 9 Harga bahan baku dan produk pada proses Solvay (Alibaba.com, 2020)	45
Tabel 2. 10 Harga bahan baku dan produk pada proses Solvay.....	47
Tabel 2. 11 Berat molekul dan harga pada proses Mathiesson	48
(Alibaba.com, 2020).....	48
Tabel 2. 12 Harga bahan baku dan produk pada proses Mathiesson	50
Tabel 2. 13 Harga bahan baku dan produk pada proses HP-A	51
Tabel 2. 14 Harga bahan baku dan produk pada proses HP-A	53
Tabel 2. 15 Perbandingan keuntungan pada proses pembuatan klorin dioksida... 53	53
Tabel 2. 16 Perbandingan proses pembuatan klorin dioksida.....	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Data impor klorin dioksida di Indonesia	21
Gambar 2. 1 Diagram alir uraian proses HP-A pembuatan klorin dioksida	55

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri merupakan salah satu kontributor terbesar bagi perekonomian nasional dengan sumbangannya mencapai lebih 20 persen. Berdasarkan jumlah persentase tersebut, Indonesia masuk dalam jajaran lima besar negara-negara di dunia yang kontribusi industrinya cukup tinggi. Perkembangan industri di Indonesia diharapkan dapat memenuhi kebutuhan bahan baku dalam industri dan menambah devisa bagi Indonesia. Devisa sangat penting bagi suatu negara diantaranya untuk menjadi alat pembayaran jasa impor dan barang-barang internasional serta menjadi sumber pendapatan negara dalam membiayai pembangunan. Karena itu sektor ekspor harus ditingkatkan. Persediaan devisa negara akan terkuras membiayai impor bila tanpa diimbangi dengan ekspor. Pendirian pabrik klorin dioksida (ClO_2) diharapkan mampu memperkecil ketergantungan Indonesia akan impor bahan kimia dari luar negeri.

Klorin dioksida merupakan salah satu bahan kimia yang banyak dibutuhkan namun masih didatangkan dari luar negeri, salah satu negara pengimpor terbesar adalah China. Klorin dioksida semakin banyak digunakan sebagai *bleaching agent* dalam industri pulp dan kertas menggantikan Cl_2 , *chloride*, dan *hypochloride* karena klorin dioksida dapat menghancurkan lignin tanpa merusak selulosa dan menghasilkan selulosa berwarna putih yang khas (Kirk Othmer, 2006).

Klorin dioksida (ClO_2) banyak digunakan untuk beberapa tujuan, termasuk aplikasinya sebagai *bleaching agent* untuk memutihkan selulosa, pulp, dan tepung. ClO_2 juga digunakan sebagai antiseptik, bakterisida, membersihkan dan melepaskan kulit sintetis, pembuatan garam klorit, dan digunakan pada industri tekstil. Selain itu, klorin dioksida digunakan juga pada bidang sanitasi seperti pada air untuk industri atau air minum dan pembuangan kotoran (saluran air). Perusahaan

air minum menggunakan klorin dioksida untuk mengatasi masalah rasa dan bau pada air rumah tangga.

1.2 Kegunaan Produk

Dalam industri tekstil, klorin dioksida digunakan sebagai zat pemutih dan menghasilkan serat tekstil berkualitas tinggi. Misalnya, wol tahan penyusutan kualitasnya berasal dari reaksi klorin dioksida dengan belerang.

Klorin dioksida digunakan pada industri pengolahan air untuk mengurangi bau atau rasa tidak enak, menghilangkan lumpur, bakteri, jamur dan alga, serta untuk membantu menghilangkan besi dan mangan dari air yang tidak diolah. Klorin dioksida juga berperan sebagai disinfektan.

Dalam industri pulp dan kertas klorin dioksida digunakan sebagai *bleaching agent* menggantikan klorin dan hipoklorit. Karena fungsi klorin dioksida tidak seperti zat pengoksidasi lainnya, klorin dioksida tidak memecah selulosa, dan dengan demikian menjaga sifat mekanis pulp yang diputihkan.

1.3 Ketersediaan Bahan Baku

Bahan baku pembuatan klorin dioksida berupa natrium klorat yang diimpor dari ERCO Worldwide yang berlokasi di China, hidrogen peroksida yang didapatkan dari PT. Peroksida Indonesia Pratama yang berlokasi di Karawang, Jawa Barat, serta asam sulfat didapatkan dari PT. Timur Raya Tunggal yang berlokasi di Karawang, Jawa Barat.

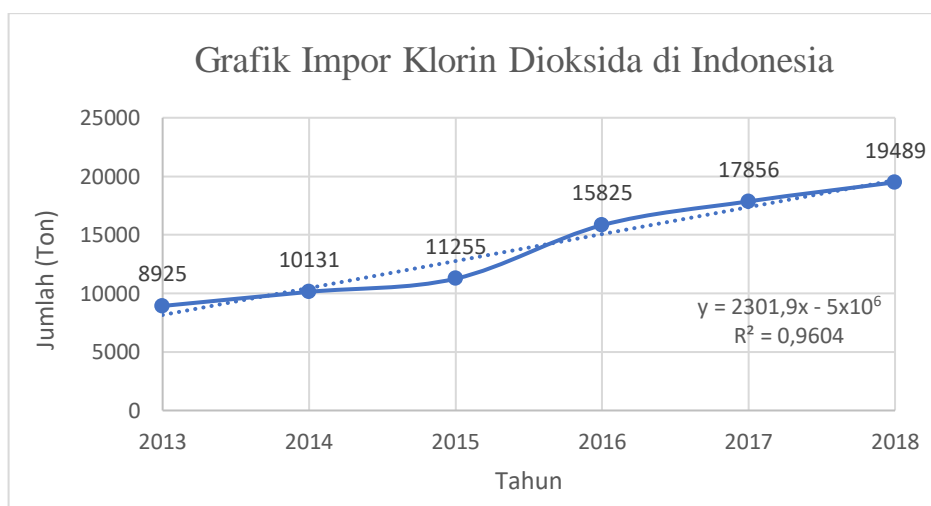
1.4 Analisis Pasar

Analisis pasar merupakan langkah untuk mengetahui seberapa besar minat pasar terhadap suatu produk. Adapun analisis pasar klorin dioksida berdasarkan data impor klorin dioksida adalah sebagai berikut:

Tabel 1. 1 Data impor klorin dioksida di Indonesia

Tahun	Jumlah (ton)
2013	8925
2014	10.131
2015	11.255
2016	15.825
2017	17.856
2018	19.489

Sumber : Badan Pusat Statistik, 2020



Gambar 1. 1 Data impor klorin dioksida di Indonesia

Pada Grafik 1.1., sumbu x merupakan tahun ke-n

Tahun 2013 = tahun ke 1

Tahun 2014 = tahun ke 2

Tahun 2016 = tahun ke 3

Tahun 2016 = tahun ke 4

Tahun 2017 = tahun ke 5

Tahun 2018 = tahun ke 6

Berdasarkan data tersebut maka di plotkan pada Grafik 1.1 dan dilakukan pendekatan berupa persamaan garis lurus $y = mx + C$.

Dimana :

y = kebutuhan impor klorin dioksida (ton/tahun)

x = tahun ke n

m = *slope*

C = *intercept*

Maka di dapatkan *slope* sebesar :

$$m = \frac{n \sum x \cdot y - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} = 2.301,85714$$

$$CC = \frac{\sum y}{n} - \left(m - \frac{\sum x}{n} \right) = -4.625.479,6$$

Melalui perhitungan persamaan garis lurus maka didapatkan nilai $y = 2.301,85714x - 4.625.479,6$ yang dapat digunakan untuk memprediksi kebutuhan impor Klorin dioksida di Indonesia di tahun 2025. Didapatkan prediksi kebutuhan impor klorin dioksida di Indonesia sebesar 35.781,14 ton/tahun.

1.5 Kapasitas Pabrik

Kapasitas produksi suatu pabrik ditentukan berdasarkan kebutuhan konsumsi produk dalam negeri yang belum terpenuhi dan melihat kapasitas pabrik yang sudah berdiri sebagai pertimbangannya. Di Indonesia sendiri belum terdapat pabrik klorin dioksida maka sebagai pertimbangan dibandingkan dengan pabrik yang sudah berdiri di luar negeri yaitu ERCO Worldwide Inc yang berada di Saskatoon, Saskatchewan, Kanada memproduksi klorin dioksida sebanyak 35.000 ton/tahun dan ERCO Worldwide Inc yang berada di Port Edwards, Wisconsin, USA memproduksi klorin dioksida sebanyak 71.000 ton/tahun.

Dikarenakan di Indonesia belum terdapat pabrik klorin dioksida maka dalam hal ini dapat diambil dari data impor kebutuhan produk tersebut. Berdasarkan data impor tersebut didapatkan persamaan garis lurus data impor klorin dioksida pada tahun 2025 sebesar 35.781,14 ton/tahun.

Bedasarkan Undang-Undang No. 5 Tahun 1999 Pasal 25 tentang larangan praktik monopoli dan persaingan usaha tidak sehat menyatakan bahwa pelaku usaha hanya diperbolehkan menguasai 75% (tujuh puluh lima persen) pangsa pasar satu jenis barang atau jasa tertentu. Maka dari itu kami berencana membangun pabrik klorin dioksida dengan kapasitas 26.000 ton/tahun atau sekitar 75% dari kebutuhan klorin dioksida Indonesia.

1.6 Lokasi Pabrik

Pemilihan lokasi pabrik merupakan salah satu faktor terpenting dari keberhasilan membangun suatu pabrik. Penentuan lokasi pabrik yang tepat akan menghasilkan biaya produksi dan distribusi yang minimal sehingga pabrik tersebut dapat berjalan efisien, ekonomis dan juga menguntungkan.

Pada penentuan lokasi pabrik harus diusahakan agar biaya transportasi serta upah pekerja memiliki nilai sekecil mungkin.

Ada beberapa faktor yang harus diperhatikan dalam pemilihan lokasi pendirian pabrik antara lain:

a. **Penyediaan bahan baku**

Salah satu hal yang harus dipertimbangkan dalam penempatan lokasi pabrik yaitu letak sumber bahan baku yang tujuannya untuk memudahkan mendapatkan bahan baku menuju lokasi pabrik dan memperkecil biaya peralatan transportasi. Bahan baku asam sulfat diperoleh dari PT. Timur Raya Tunggal, Karawang, bahan baku hidrogen peroksida diperoleh dari PT. Peroksida Indonesia Pratama, Karawang, sedangkan bahan baku natrium klorat diimpor dari ERCO Worldwide, China.

b. **Daerah pemasaran**

Untuk memudahkan pemasaran produk, lokasi pabrik harus dekat dengan daerah pemasaran atau dekat dengan konsumen. Klorin dioksida digunakan pada industri tekstil, industri pulp dan kertas dan pengolahan air.

c. Tenaga kerja

Salah satu hal yang dipertimbangkan untuk mendirikan sebuah pabrik yaitu harus ditempatkan pada daerah yang banyak tenaga kerjanya, dari tingkat sarjana sampai pekerja buruh.

d. Penyediaan air

Dalam menjalankan suatu proses dalam pabrik, dibutuhkan air yang jumlahnya cukup besar yaitu untuk air pendingin, air proses serta untuk kebutuhan sehari-hari bagi karyawannya dan masyarakat sekitar pabrik.

e. Sarana transportasi

Pemilihan lokasi diharuskan sedekat mungkin letaknya dengan ke areal-areal industri yang tidak jauh dari pelabuhan sehingga akan mempermudah dalam penanganan memasok bahan baku serta mempermudah dalam jangkauan pemasaran produk.

f. Utilitas

Utilitas utama dalam pabrik ini meliputi kebutuhan listrik dan kebutuhan air yang digunakan untuk proses dan sanitasi.

g. Kebijakan pemerintah dan kondisi alam

Dalam membangun pabrik diperlukan koordinasi dan persetujuan pembangunan dari pemerintah maka dari itu diperlukan lokasi dengan pemerintahan yang mendukung jalannya pembangunan pabrik. Kondisi alam juga menjadi faktor penting dalam mempertimbangkan lokasi pabrik. Struktur tanah yang stabil membuat daerah tersebut minim bencana alam sehingga pabrik bisa didirikan.

Tabel 1. 2 Kriteria pemilihan lokasi pabrik

Kriteria	Lokasi		
	Karawang	Gresik	Cilegon
Bahan baku	Transportasi darat (Karawang) dan impor (China)	Transportasi darat (Gresik) dan impor (China)	Transportasi darat (Karawang) dan impor (China)
Transportasi	Pelabuhan dan transportasi darat	Pelabuhan dan transportasi darat	Pelabuhan dan transportasi darat
Unit Pendukung	Sumber air dari Sungai Citarum	Sumber air dari Sungai Bengawan Solo	Sumber air laut
Unit Pendukung	Sumber air dari Sungai Citarum	Sumber air dari Sungai Bengawan Solo	Sumber air laut
Pemasaran	Pabrik tekstil, pengolahan air, pabrik disinfektan	Pabrik tekstil	Pabrik tekstil, pengolahan air, pabrik disinfektan
UMR	Rp4.790.000,-	Rp4.297.000,-	Rp4.310.000,-
Harga Tanah	± Rp3.000.000,-	± Rp3.800.000,-	± Rp3.500.000,-

Tabel 1. 3 Penilaian dari masing-masing lokasi pabrik

Kriteria	Lokasi		
	Karawang	Gresik	Cilegon
Bahan baku (30%)	75	75	70
Transportasi (20%)	70	70	65
Unit pendukung (sumber air) (10%)	75	75	65
UMR (Upah Minimum Regional) (15%)	73	75	76
Harga tanah (15%)	75	70	73
Pemasaran (20%)	75	70	73
Kebijakan pemerintah & kondisi alam (10%)	75	70	70
Nilai akhir	88,7	86,75	84,45

Berdasarkan kriteria pemilihan dan penilaian dari masing – masing lokasi pabrik diperoleh tempat dengan skor tertinggi sebesar 88,7 tempat tersebut berlokasi di Karawang Jawa Barat. Diharapkan dengan berdirinya pabrik klorin dioksida di Karawang mampu memenuhi kebutuhan klorin dioksida untuk menunjang industri-industri yang menggunakan klorin dioksida sebagai bahan penunjangnya.

BAB II

DESKRIPSI DAN PEMILIHAN PROSES

Klorin dioksida pertama kali ditemukan pada tahun 1811 dalam bentuk gas berwarna kuning kehijauan oleh Sir H. Davy dengan mereaksikan *Potassium chlorate* (KClO_3) dengan asam klorida (HCl). Kemudian ditemukan bahwa ClO_2 dapat digunakan dalam larutan asam asetat (CH_3COOH) yang digunakan untuk *bleaching* bubur kertas. Pada tahun 1930-an “*Mathiesson Alkali Work*” pertama kali mengembangkan proses komersil pembuatan ClO_2 (Kirk Othmer, 2006).

Pada tahun 1940-an U.S. merekomendasikan suatu studi yaitu sebagai suatu bagian dari *clean water act*, yang dilakukan untuk mengembangkan suatu strategi untuk mencegah, mengurangi atau menentukan pengganti *chloride* dan senyawanya. Beberapa tahun terakhir, Cl_2 dikritik para pecinta lingkungan, padahal Cl_2 termasuk salah satu zat kimia yang paling banyak digunakan untuk bermacam industri kimia. Adapun kerugian penggunaan Cl_2 , yaitu (Kirk Othmer, 2006):

- 1) Cl_2 sangat reaktif terhadap bermacam-macam, zat termasuk H_2O , NH_3 dan hidrokarbon.
- 2) Kelarutan dalam air relatif rendah sehingga membuatnya sukar untuk membasmi kuman (disinfektan) tanpa mengakitkannya menguap.
- 3) Cl_2 kurang efektif dalam pengontrolan bau dan rasa.

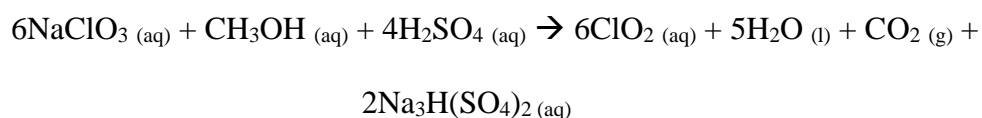
Oleh karena alasan-alasan tersebut Cl_2 digantikan dengan ClO_2 yang ramah lingkungan.

2.1 Macam-macam Proses Pembuatan

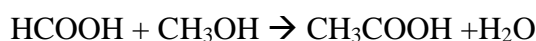
Mekanisme reaksi dasar pembentukan ClO_2 sama untuk semua proses pembuatan ClO_2 yang dikenal, semua proses menggunakan *chlorate* sebagai bahan baku, dalam semua proses pembuatan ClO_2 berlangsung dalam larutan yang sangat asam. Proses yang sering digunakan di seluruh dunia adalah:

a. Solvay Process atau Proses Metanol

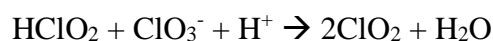
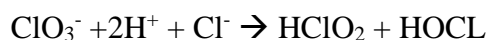
Proses Solvay menggunakan metanol sebagai agen pereduksi. Reaksi keseluruhan proses ini yaitu (US Patent No. 4.770.868, 1988):



Pada reaksi ini klorat mengoksidasi metanol dengan membentuk formaldehid, kemudian asam formik, lalu karbon dioksida. Oksidasi dari asam formik menjadi karbon dioksida merupakan reaksi yang lambat. Dari oksidasi tersebut membentuk *volatile* metilformat

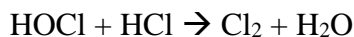


Kemudian pada reaksi dibutuhkan asam sulfat dengan konsentrasi tinggi untuk mencapai laju produksi yang diinginkan dan menghasilkan “*acid salt cake*”. Metanol yang diumpankan digunakan secara efisien dalam proses pembentukan ClO_2 yaitu sekitar 40% dikarenakan tidak sempurnanya oksidasi methanol serta sangat lambatnya reaksi antara metanol dan klorat. Mekanisme secara keseluruhan untuk proses klorat adalah sebagai berikut:





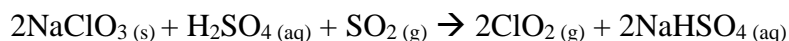
Klorin juga terbentuk dari reaksi samping HOCl dan HCl sebagai berikut:



Generator klorin dioksida terdiri dari dua reaktor yang disusun secara seri dengan suhu reaksi 63°C. Gas ClO₂ hasil reaksi didinginkan oleh kondenser untuk mengembunkan air dan menghasilkan gas ClO₂ dengan konsentrasi tinggi. Kemudian ClO₂ dikontakkan dengan air pada menara absorber untuk menghasilkan larutan yang memiliki konsentrasi tinggi dan mengandung sedikit klorin.

b. Mathiesson Process atau Proses SO₂

Proses ini menggunakan SO₂ sebagai zat pereduksi. Reaksi utama dalam pembuatan ClO₂, yaitu sebagai berikut (US Patent, No. 5.145.660):

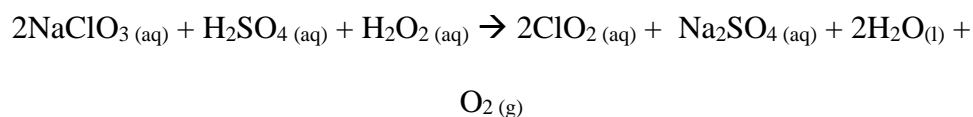


Dalam proses ini dioperasikan dua reaktor yang dihubungkan secara seri. Larutan sodium klorat dan asam sulfat dimasukkan dalam reaktor pertama melalui bagian atas secara kontinyu. SO₂ dicairkan dengan udara dan dialirkan melalui *sparger* pada bagian bawah reaktor. Sulfur dioksida digunakan sebagai reduktor untuk memproduksi klorin dioksida dengan kandungan klorin yang lebih sedikit. ClO₂ yang dihasilkan dari reaktor ini masih mengandung SO₂ yang kemudian dialirkan ke *stripper* lalu dicuci dengan *scrubber packed* untuk menghilangkan sulfur dioksida yang tidak bereaksi. Temperatur operasi pada reaktor pertama dan kedua yaitu 46°C. Proses ini juga memproduksi asam sulfat untuk mengurangi kebutuhan asam

secara keseluruhan.

c. *Hydrogen Peroxide-Atmospheric Process (HP-A Process)* atau Proses H₂O₂

Proses ini menggunakan H₂O₂ sebagai agen pereduksi. Reaksi proses ini yaitu (Mingxin, 2011):



Pembuatan klorin dioksida dengan proses HP-A menggunakan bahan baku natrium klorat (NaClO₃), hidrogen peroksida (H₂O₂), dan asam sulfat (H₂SO₄). Umpan berupa NaClO₃, H₂O₂ dan H₂SO₄ dilarutkan terlebih dahulu dengan air, kemudian direaksikan dalam reaktor pada suhu 58°C dan menghasilkan gas ClO₂ dan O₂ sebagai aliran *output* atas. Gas ClO₂ dan O₂ yang dihasilkan akan dialirkan menuju absorber untuk menyerap ClO₂. Dalam absorber, gas ClO₂ dan O₂ akan dikontakkan dengan air pendingin, gas ClO₂ yang telah berubah fasa disimpan pada tangki penyimpanan. Untuk aliran *output* bawah, yaitu Na₂SO₄, H₂O serta sisa reaktan NaClO₃, H₂O₂ dan H₂SO₄ akan dialirkan menuju evaporator untuk sebelum dikristalkan pada *crystallizer* untuk menjadi produk samping..

2.2 Seleksi Proses

2.2.1 Berdasarkan nilai *gibbs free energy* dan entalpi reaksi

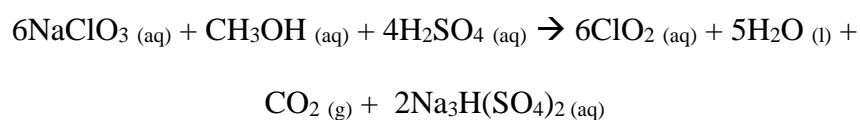
Besar atau kecil nilai entalpi reaksi (ΔH) menunjukkan jumlah energi yang dibutuhkan maupun dihasilkan. ΔH bernilai positif (+) menunjukkan bahwa reaksi tersebut bersifat endoterm yakni reaksi membutuhkan panas untuk berlangsungnya reaksi sehingga semakin besar ΔH maka semakin besar juga

energi yang dibutuhkan. Sedangkan ΔH bernilai negatif (-) menunjukkan bahwa reaksi tersebut bersifat eksoterm yakni reaksi menghasilkan panas selama proses berlangsungnya reaksi.

Sedangkan *Gibbs free energy* (ΔG°) menunjukkan spontan atau tidak spontannya suatu reaksi kimia, yang berguna untuk meninjau kelayakan suatu industri. ΔG° bernilai positif (+) menunjukkan bahwa reaksi tidak dapat berlangsung secara spontan, sehingga dibutuhkan energi tambahan dari luar yang sangat besar. Sedangkan ΔG° bernilai negatif (-) menunjukkan bahwa reaksi tersebut dapat berlangsung secara spontan dan hanya membutuhkan sedikit energi dari luar. Oleh karena itu semakin kecil atau negatif ΔG° maka reaksi tersebut akan semakin baik karena untuk berlangsung spontan energi yang dibutuhkan semakin kecil (Smith, 2001). Berikut ini adalah perhitungan nilai *Gibbs free energy* dan entalpi reaksi dari proses pembuatan klorin dioksida.

a. Proses Solvay

Reaksi dari pembentukan klorin dioksida dengan proses Solvay adalah sebagai berikut:



Tabel 2. 1 Nilai ΔG^0 dan ΔH^0 pada suhu 298,15 K (Yaws, 1999)

Komponen	ΔG^0_{298} (kJ/mol)	ΔH^0_{298} (kJ/mol)
NaClO ₃	-262,2	-365,8
CH ₃ OH	166,27	-245,9
H ₂ SO ₄	-690,1	-814
ClO ₂	120,5	102,5

Tabel 2. 2 Nilai ΔG^0 dan ΔH^0 pada suhu 298,15 K (lanjutan) (Yaws, 1999)

Komponen	ΔG^0_{298} (kJ/mol)	ΔH^0_{298} (kJ/mol)
H ₂ O	-237,129	-285,83
CO ₂	-394,359	-393,59
Na ₃ H(SO ₄) ₂	-2278,9	130,6

Pembuatan klorin dioksida dengan proses Solvay dioperasikan pada suhu 63°C atau 336,15 K.

- Menghitung nilai entalpi reaksi (ΔH) 25°C atau 298,15 K.

$$\begin{aligned}\Delta H^0_{298} &= \Delta H^0_0 = \Delta H^0_0 \text{ produk} - \Delta H^0_0 \text{ reaktan} && \text{(Smith, 2001)} \\ &= ((6.102,5) + (5.(-285,83)) + (-393,59) + (2.(130,6)) - \\ &\quad ((6.(-365,8)) + (-238,66) + (4.(-814))) \\ &= 4.750,16 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

- Menghitung nilai *Gibbs free energy* (ΔG^0) pada suhu 25°C atau 298,15 K.

$$\begin{aligned}\Delta G^0_{298} &= \Delta G^0_0 = \Delta G^0_0 \text{ produk} - \Delta G^0_0 \text{ reaktan} && \text{(Smith, 2001)} \\ &= ((6.120,5) + (5.(-237,129)) + (-394,359) + (2.(-2.278,9)) \\ &\quad - ((6.(-262,2)) + (166,27) + (4.(-690,1))) \\ &= -905,904 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

- Menghitung entalpi reaksi (ΔH_r) pada suhu operasi.

Untuk menghitung ΔH^0 pada suhu tertentu menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta H^0 = \Delta H^0_0 + R \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^0}{R} dT$$

Untuk mencari nilai $\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^0}{R} dT$ adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^0}{R} dT &= \Delta A(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_0^3) \\ &\quad + \Delta D \left(\frac{T - T_0}{TT_0} \right)\end{aligned}$$

Maka nilai ΔH° adalah sebagai berikut :

$$\Delta H^\circ = \Delta H_0^\circ + R \left[\Delta A(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_0^3) + \Delta D \left(\frac{T - T_0}{TT_0} \right) \right]$$

(Smith, 2001)

Maka untuk ΔA , ΔB , ΔC , dan ΔD diketahui nilai konstanta Cp masing masing senyawa sebagai berikut :

Tabel 2. 3 Nilai konstanta Cp (kJ/mol.K) (Yaws, 1999)

Komponen	A	B	C	D
NaClO ₃	31,8	0	0	0
CH ₃ OH	40,152	0,31046	-0,0010291	1,4596.10 ⁻⁶
H ₂ SO ₄	26,004	0,70337	-0,0013856	1,0342.10 ⁻⁶
ClO ₂	186,153	-0,80657	0,0018068	-5,0986.10 ⁻⁷
H ₂ O	92,053	-0,039953	-0,00021103	5,3469.10 ⁻⁷
CO ₂	27,437	0,042315	-0,000019555	3,9968.10 ⁻⁹
Na ₃ H(SO ₄) ₂	8,648	0,9648	0,00009143	0

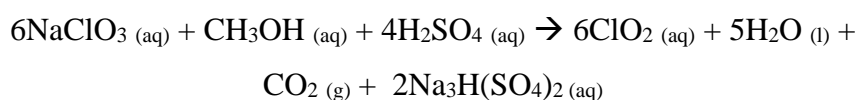
Dimana :

$$R = 8,314$$

$$T = 63 \text{ }^\circ\text{C} = 336,15 \text{ K}$$

$$T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298,15 \text{ K}$$

Dengan reaksi sebagai berikut :



Diperoleh nilai :

$$\Delta A = (A \text{ ClO}_2 + A \text{ H}_2\text{O} + A \text{ CO}_2 + A \text{ Na}_3\text{H(SO}_4)_2) - (A \text{ NaClO}_3 + A \text{ CH}_3\text{OH} + A \text{ H}_2\text{SO}_4)$$

$$\Delta A = ((6.186,153) + (5.92,053) + (27,437) + (2.8,648)) - ((6.31,8) + (40,152) + (4.26,004))$$

$$\Delta A = 1.286,948$$

Dengan cara yang sama, maka didapatkan nilai sebagai berikut:

$$\Delta B = -6,19121$$

$$\Delta C = 0,016520455$$

$$\Delta D = -5,97811 \cdot 10^{-6}$$

Substitusikan nilai ΔA , ΔB , ΔC , dan ΔD kedalam rumus ΔH° untuk menghitung nilai ΔH° :

$$\Delta H^\circ = \Delta H_0^\circ + R \left[\Delta A(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_0^3) + \Delta D \left(\frac{T - T_0}{TT_0} \right) \right]$$

$$\Delta H^\circ = 4.750,16$$

$$\begin{aligned} &+ 8,314 \left[1.286,948(336,15 - 298,15) \right. \\ &+ \frac{-6,19121}{2}(336,15^2 - 298,15^2) \\ &+ \frac{0,016520455}{3}(336,15^3 - 298,15^3) \\ &\left. + (-5,97811 \cdot 10^{-6}) \left(\frac{336,15 - 298,15}{(336,15)(298,15)} \right) \right] \\ &= 12.956,8194 \end{aligned}$$

Diperoleh nilai ΔH° pada proses solvay sebesar 12.956,8194

- Menghitung entalpi reaksi dan *Gibbs free energy* pada suhu operasi. Untuk menghitung ΔG reaksi menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\Delta G^o = \Delta H_0^o - \frac{T}{T_0} (\Delta H_0^o - \Delta G_0^o) + R \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^o}{R} dT - RT \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^o}{R} \frac{dT}{T}$$

Untuk mencari nilai $\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^o}{R} dT$ adalah sebagai berikut :

$$\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^o}{R} dT = \Delta A(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_0^3) + \Delta D \left(\frac{T - T_0}{TT_0} \right)$$

Untuk mencari nilai $\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^o}{R} \frac{dT}{T}$ adalah sebagai berikut :

$$\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^o}{R} \frac{dT}{T} = \Delta A \ln \frac{T}{T_0} + \left[\Delta B + \left(\Delta C + \frac{\Delta D}{T_0^2 T^2} \right) \left(\frac{T + T_0}{2} \right) \right] (T - T_0)$$

Maka nilai ΔG^o adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \Delta G^o = & \Delta H_0^o - \frac{T}{T_0} (\Delta H_0^o - \Delta G_0^o) + \\ & R \left[\Delta A(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_0^3) + \Delta D \left(\frac{T - T_0}{TT_0} \right) \right] \\ & - RT \left[\Delta A \ln \frac{T}{T_0} + \left[\Delta B + \left(\Delta C + \frac{\Delta D}{T_0^2 T^2} \right) \left(\frac{T + T_0}{2} \right) \right] (T - T_0) \right] \end{aligned}$$

(Smith, 2001)

$$\Delta G^o = 4750,16 - \frac{336,15}{298,15} (4750,16 - (-905,904)) +$$

$$8,314 \left[\begin{aligned} & 1286,948 (336,15 - 298,15) + \frac{-6,1912}{2} (336,15^2 - 298,15^2) \\ & + \frac{0,01652}{3} (336,15^3 - 298,15^3) - 0,000059 \left(\frac{336,15 - 298,15}{336,15 \times 298,15} \right) \end{aligned} \right]$$

$$-8,314 \times 298,15 \left[\begin{aligned} & 1286,948 \ln 1,1274 + \\ & \left[-6,1912 + \left(0,01652 + \frac{-0,000059}{298,15^2 \times 336,15^2} \right) \left(\frac{336,15 + 298,15}{2} \right) \right] \end{aligned} \right] (336,15 -$$

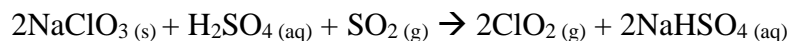
298,15)

$$\Delta G^o = -121.200,29$$

Diperoleh nilai ΔG^0 pada proses solvay sebesar -121.200,29

b. Proses *Mathiesson*

Reaksi dari pembentukan klorin dioksida dengan proses *Mathiesson* adalah sebagai berikut:



Tabel 2. 4 Nilai ΔG^0 dan ΔH^0 pada suhu 298,15 K (Yaws, 1999)

Komponen	ΔG^0_{298} (kJ/mol)	ΔH^0_{298} (kJ/mol)
NaClO ₃	-262,2	-365,8
H ₂ SO ₄	-690,1	-814
SO ₂	-300,2	-296,8
ClO ₂	120,5	102,5
NaHSO ₄	-992,9	-1125,5

Pembuatan klorin dioksida dengan proses *Mathiesson* dioperasikan pada suhu 46°C atau 319,15 K.

- Menghitung nilai entalpi reaksi (ΔH) 25°C atau 298,15 K.

$$\Delta H^0_{298} = \Delta H^0_{\text{produk}} - \Delta H^0_{\text{reaktan}} \quad (\text{Smith, 2001})$$

$$\begin{aligned} \Delta H^0_{298} &= \Delta H^0_{\text{produk}} - \Delta H^0_{\text{reaktan}} \\ &= ((2 \cdot 102,5) + (2 \cdot (-1125,5))) - ((2 \cdot (-365,8)) + (-814) + (-296,8)) \\ &= -203,6 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

- Menghitung nilai *Gibbs free energy* (ΔG) 25°C atau 298,15 K.

$$\Delta G^0_{298} = \Delta G^0_{\text{produk}} - \Delta G^0_{\text{reaktan}} \quad (\text{Smith, 2001})$$

$$\begin{aligned} \Delta G^0_{298} &= \Delta G^0_{\text{produk}} - \Delta G^0_{\text{reaktan}} \\ &= ((2 \cdot 120,5) + (2 \cdot (-992,2))) - ((2 \cdot (-262,2)) + (-690,1) + (-300,2)) \\ &= -230,1 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

- Menghitung entalpi reaksi pada suhu operasi.

Untuk menghitung ΔH_r pada suhu tertentu menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta H_r = \Delta H^0 + (C_p)_H$$

Untuk mencari nilai $\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^0}{R} dT$ adalah sebagai berikut :

$$\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^0}{R} dT = \Delta A(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_0^3) + \Delta D \left(\frac{T - T_0}{TT_0} \right)$$

Maka nilai ΔH^0 adalah sebagai berikut :

$$\Delta H^0 = \Delta H_0^0 + R \left[\Delta A(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_0^3) + \Delta D \left(\frac{T - T_0}{TT_0} \right) \right]$$

(Smith, 2001)

Maka untuk ΔA , ΔB , ΔC , dan ΔD diketahui nilai konstanta Cp masing masing senyawa sebagai berikut :

Tabel 2. 5 Nilai Konstanta Cp (J/mol.K) (Yaws, 1999)

Komponen	A	B	C	D
NaClO ₃	9,48	0,0468	0	0
H ₂ SO ₄	26,004	0,70337	-0,0013856	1,0342.10 ⁻⁶
SO ₂	203,445	-1,0537	0,002611300	-1,0697.10 ⁻⁶
ClO ₂	186,153	-0,80657	0,0018068	-5,0986.10 ⁻⁷
NaHSO ₄	7,005	0,7125	0,00006712	0

Dimana :

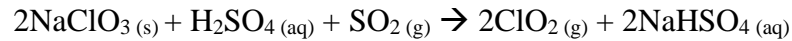
$$R = 8,314$$

$$T = 46 \text{ }^\circ\text{C} = 319,15 \text{ K}$$

$$T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298,15 \text{ K}$$

$$\tau = \frac{T}{T_0} = \frac{319,15}{298,15} = 1,0704$$

Dengan reaksi sebagai berikut :



$$\Delta A = (A \text{ ClO}_2 + A \text{ NaHSO}_4) - (A \text{ NaClO}_3 + A \text{ H}_2\text{SO}_4)$$

$$\Delta A = ((6.186,153) + (2. 7,005)) - ((2. 9,48) + (26,004) + (203,445))$$

$$\Delta A = 130,902$$

Dengan cara yang sama, maka didapatkan nilai sebagai berikut:

$$\Delta B = -0,64391$$

$$\Delta C = 0,00245502$$

$$\Delta D = -9,8422 \cdot 10^{-7}$$

Subtitusikan nilai ΔA , ΔB , ΔC , dan ΔD kedalam rumus ΔH° untuk menghitung nilai ΔH° :

$$\Delta H^\circ = \Delta H_0^\circ + R \left[\Delta A(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_0^3) + \Delta D \left(\frac{T - T_0}{TT_0} \right) \right]$$

$$\Delta H^\circ = -203,6$$

$$+ 8,314 \left[130,902(319,15 - 298,15) \right]$$

$$+ \frac{-0,64391}{2}(319,15^2 - 298,15^2)$$

$$+ \frac{0,002455}{3}(319,15^3 - 298,15^3)$$

$$+ (-9,8422 \cdot 10^{-7} \left(\frac{319,15 - 298,15}{(319,15)(298,15)} \right)]$$

$$= 1.177,5753$$

Diperoleh nilai ΔH° pada proses *Matthieson* sebesar 1.177,5753

- Menghitung entalpi reaksi dan *Gibbs free energy* pada suhu operasi.

Untuk menghitung ΔG reaksi menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\Delta G^o = \Delta H_0^o - \frac{T}{T_0} (\Delta H_0^o - \Delta G_0^o) + R \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^o}{R} dT - RT \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^o}{R} \frac{dT}{T}$$

Untuk mencari nilai $\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^o}{R} dT$ adalah sebagai berikut :

$$\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^o}{R} dT = \Delta A(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_0^3) + \Delta D \left(\frac{T - T_0}{TT_0} \right)$$

Untuk mencari nilai $\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^o}{R} \frac{dT}{T}$ adalah sebagai berikut :

$$\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^o}{R} \frac{dT}{T} = \Delta A \ln \frac{T}{T_0} + \left[\Delta B + \left(\Delta C + \frac{\Delta D}{T_0^2 T^2} \right) \left(\frac{T + T_0}{2} \right) \right] (T - T_0)$$

Maka nilai ΔG^o adalah sebagai berikut (Smith, 2001):

$$\Delta G^o = \Delta H_0^o - \frac{T}{T_0} (\Delta H_0^o - \Delta G_0^o) + R \left[\Delta A(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_0^3) + \Delta D \left(\frac{T - T_0}{TT_0} \right) \right] - RT \left[\Delta A \ln \frac{T}{T_0} + \left[\Delta B + \left(\Delta C + \frac{\Delta D}{T_0^2 T^2} \right) \left(\frac{T + T_0}{2} \right) \right] (T - T_0) \right]$$

$$\Delta G^o = -203 - \frac{319,15}{298,15} (-203 - (5128,9999)) +$$

$$8,314 \left[\begin{aligned} & 130,902 (319,15 - 298,15) + \frac{-0,64391}{2} (319,15^2 - 298,15^2) \\ & + \frac{0,002455}{3} (319,15^3 - 298,15^3) + 9,8422 \times 10^{-7} \left(\frac{319,15 - 298,15}{319,15 \times 298,15} \right) \end{aligned} \right]$$

$$-8,314 \times 298,15 \left[\begin{aligned} & 130,902 \ln 1,0705 + \\ & \left[-0,64391 + \left(0,00245 + \frac{9,8422 \times 10^{-7}}{298,15^2 \times 319,15^2} \right) \left(\frac{319,15 + 298,15}{2} \right) \right] \end{aligned} \right]$$

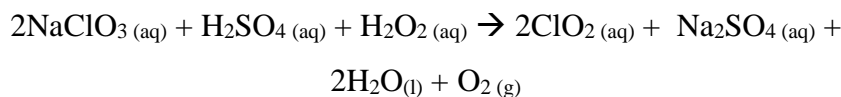
$$(319,15 - 298,15)$$

$$\Delta G^o = 5.128,9999$$

Diperoleh nilai ΔG^0 pada proses *Matthieson* sebesar 5.128,9999

c. Proses HP-A

Reaksi dari pembentukan klorin dioksida dengan proses HP-A adalah sebagai berikut:



Tabel 2. 6 Nilai ΔG^0 dan ΔH^0 pada suhu 298,15 K (Yaws, 1999)

Komponen	ΔG^0_{298} (kJ/mol)	ΔH^0_{298} (kJ/mol)
NaClO ₃	-262,2	-365,8
H ₂ SO ₄	-690,1	-814
H ₂ O ₂	-120,4	-285,83
ClO ₂	120,5	102,5
Na ₂ SO ₄	-1.270,2	-1387,1
H ₂ O	-237,129	-285,83
O ₂	16,4	0

Pembuatan klorin dioksida dengan proses HP-A dioperasikan pada suhu 58°C atau 331,15 K.

- Menghitung nilai *Gibbs free energy* pada suhu 25°C atau 298,15 K.

$$\Delta G^0_{298} = \Delta G^0_{\text{produk}} - \Delta G^0_{\text{reaktan}} \quad (\text{Smith, 2001})$$

$$\Delta G^0_{298} = \Delta G^0_{\text{produk}} - \Delta G^0_{\text{reaktan}}$$

$$= ((2 \cdot 120,5) + (-1270,2) + (2 \cdot (-237,129)) + (16,4)) -$$

$$((2 \cdot (-262,2)) + (690,1) + (-120,4))$$

$$= -138,558 \text{ kJ/mol}$$

- Menghitung nilai entalpi reaksi pada suhu 25°C atau 298,15 K.

$$\Delta H^0_{298} = \Delta H^0_{\text{produk}} - \Delta H^0_{\text{reaktan}} \quad (\text{Smith, 2001})$$

$$\Delta H^0_{298} = \Delta H^0_{\text{produk}} - \Delta H^0_{\text{reaktan}}$$

$$\begin{aligned}
&= ((2.102,5) + (-1387,1) + (2.(-285,83) + (-11,7)) - \\
&\quad ((2.(-365,8)) + (-814) + (-191,2)) \\
&= -28,66 \text{ kJ/mol}
\end{aligned}$$

- Menghitung entalpi reaksi pada suhu operasi.

Untuk menghitung ΔH_r pada suhu tertentu menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta H_r = \Delta H^0 + (C_p)_H$$

Untuk mencari nilai $\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^0}{R} dT$ adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^0}{R} dT &= \Delta A(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_0^3) \\
&\quad + \Delta D \left(\frac{T - T_0}{TT_0} \right)
\end{aligned}$$

Maka nilai ΔH^0 adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
\Delta H^o &= \Delta H_0^o + R \left[\Delta A(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_0^3) \right. \\
&\quad \left. + \Delta D \left(\frac{T - T_0}{TT_0} \right) \right] \quad (\text{Smith, 2001})
\end{aligned}$$

Maka untuk ΔA , ΔB , ΔC , dan ΔD diketahui nilai konstanta C_p masing masing senyawa sebagai berikut :

Tabel 2. 7 Nilai Konstanta C_p (kJ/mol.K) (Yaws, 1999)

Komponen	A	B	C	D
NaClO ₃	31,8	0	0	0
H ₂ SO ₄	26,004	0,70337	-0,0013856	1,0342.10 ⁻⁶
H ₂ O ₂	-15,248	0,67693	-0,0014948	1,2018.10 ⁻⁶
ClO ₂	186,153	-0,80657	0,0018068	-5,0986.10 ⁻⁷
Na ₂ SO ₄	233,15	-0,009527	-0,00003466	1,577.10 ⁻⁸
H ₂ O	92,053	-0,039953	-0,00021103	5,3469.10 ⁻⁷
O ₂	46,432	0,39506	-0,0070522	3,9897.10 ⁻⁵

Dimana :

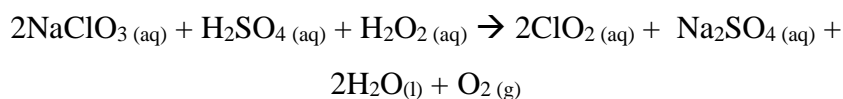
$$R = 8,314$$

$$T = 58 \text{ }^\circ\text{C} = 331,15 \text{ K}$$

$$T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298,15 \text{ K}$$

$$\tau = \frac{T}{T_0} = \frac{331,15}{298,15} = 1,1107$$

Dengan reaksi sebagai berikut :



$$\Delta A = (A \text{ ClO}_2 + A \text{ NaHSO}_4 + A \text{ H}_2\text{O} + A \text{ O}_2) -$$

$$(A \text{ NaClO}_3 + A \text{ H}_2\text{SO}_4 + A \text{ H}_2\text{O}_2)$$

$$\Delta A = ((2.186,153) + (233,15) + (2.92,053) + (46,432)) -$$

$$((2.31,8) + (26,004) + (-15,248))$$

$$\Delta A = 761,638$$

Dengan cara yang sama, maka didapatkan nilai sebagai berikut:

$$\Delta B = -2,687813$$

$$\Delta C = -0,00101492$$

$$\Delta D = 3,7726 \cdot 10^{-5}$$

Subtitusikan nilai ΔA , ΔB , ΔC , dan ΔD kedalam rumus ΔH° untuk menghitung nilai ΔH° :

$$\Delta H^\circ = \Delta H_0^\circ + R \left[\Delta A(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_0^3) + \Delta D \left(\frac{T - T_0}{TT_0} \right) \right]$$

$$\frac{(C_P)_H}{R} = 761,638 + \frac{-2,687813}{2} (331,15 + 298,15) + \frac{-0,00101492}{3} (331,15^2 + 298,15^2 + 331,15 \times 298,15) + \frac{3,7726 \cdot 10^{-5}}{331,15 \times 298,15} = -45,70$$

$$(C_P)_H = -184,66 \times 8,314 = -1.535,23$$

$$\Delta H_r = \Delta H^0 + (C_P)_H$$

$$\Delta H_r = -28,66 + (-1.535,23) = -1.563,89 \text{ kJ/mol}$$

Diperoleh nilai ΔH^0 pada proses HP-A sebesar $-1.563,89 \text{ kJ/mol}$

- Menghitung entalpi reaksi dan *Gibbs free energy* pada suhu operasi.

Untuk menghitung ΔG reaksi menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\Delta G^0 = \Delta H_0^0 - \frac{T}{T_0} (\Delta H_0^0 - \Delta G_0^0) + R \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^0}{R} dT - RT \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^0}{R} \frac{dT}{T}$$

Untuk mencari nilai $\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^0}{R} dT$ adalah sebagai berikut :

$$\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^0}{R} dT = \Delta A(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_0^3) + \Delta D \left(\frac{T - T_0}{TT_0} \right)$$

Untuk mencari nilai $\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^0}{R} \frac{dT}{T}$ adalah sebagai berikut :

$$\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_P^0}{R} \frac{dT}{T} = \Delta A \ln \frac{T}{T_0} + \left[\Delta B + \left(\Delta C + \frac{\Delta D}{T_0^2 T^2} \right) \left(\frac{T + T_0}{2} \right) \right] (T - T_0)$$

Maka nilai ΔG^0 adalah sebagai berikut (Smith,2001):

$$\begin{aligned} \Delta G^0 = & \Delta H_0^0 - \frac{T}{T_0} (\Delta H_0^0 - \Delta G_0^0) + \\ & R \left[\Delta A(T - T_0) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_0^3) + \Delta D \left(\frac{T - T_0}{TT_0} \right) \right] \\ & - RT \left[\Delta A \ln \frac{T}{T_0} + \left[\Delta B + \left(\Delta C + \frac{\Delta D}{T_0^2 T^2} \right) \left(\frac{T + T_0}{2} \right) \right] (T - T_0) \right] \end{aligned}$$

$$\Delta G^o = -28,66 - \frac{331,15}{298,15} (-28,66 - (-138,558)) +$$

$$8,314 \left[\begin{aligned} &761,638 (331,15 - 298,15) + \frac{-2,6878}{2} (331,15^2 - 298,15^2) \\ &+ \frac{-0,001014}{3} (331,15^3 - 298,15^3) - 3,7726 \times 10^{-5} \left(\frac{331,15 - 298,15}{331,15 \times 298,15} \right) \right] \\ &-8,314 \times 298,15 \left[\begin{aligned} &761,638 \ln 1,1107 + \\ &\left[-2,6878 + \left(-0,001014 + \frac{-3,7726 \times 10^{-5}}{298,15^2 \times 331,15^2} \right) \right] \\ &\left(\frac{331,15 + 298,15}{2} \right) \right] \\ &(331,15 - 298,15) \end{aligned} \right] \\ \Delta G^o = -270.838,5112 \end{aligned}$$

Diperoleh nilai ΔG^o pada proses HP-A sebesar -270838,5112 kJ/mol

Tabel 2. 8 Perbandingan nilai Gibbs free energy dan entalpi reaksi pada proses pembuatan klorin dioksida

Jenis proses	ΔH pada	ΔG pada	ΔH pada	ΔG pada
	suhu standar (kJ/mol)	suhu standar (kJ/mol)	suhu operasi (kJ/mol)	suhu operasi (kJ/mol)
Solvay	4.750,16	-905,904	12.956,82	-121.200,39
Mathiesson	-203,60	-230,100	1.177,58	5.128,99
HP-A	-28,66	-138,558	-1563,89	-270.838,5112

2.2.2 Berdasarkan tinjauan ekonomi

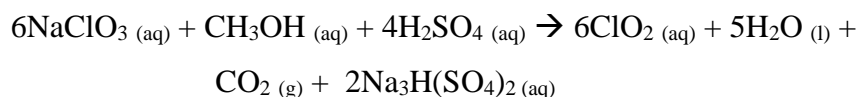
Tinjauan ekonomi ini bertujuan untuk mengetahui potensial ekonomi berdasarkan perhitungan ekonomi kasar pembelian bahan baku dan penjualan produk.

a. Proses Solvay

Tabel 2. 9 Harga bahan baku dan produk pada proses Solvay (Alibaba.com, 2020)

Komponen	Harga (Rp/kg)
NaClO ₃	9.875
H ₂ SO ₄	4.350
CH ₃ OH	2.530
ClO ₂	20.550

Reaksi:



Perhitungan berdasarkan asumsi pembentukan 1 kg ClO₂ dengan konversi terhadap NaClO₃ 89%.

$$\text{Mol ClO}_2 \text{ terbentuk} = \frac{1}{67,5} (0,89) = 0,0129 \text{ kmol}$$

Secara stoikiometri, maka diperoleh mol yang bereaksi:

$$\text{Mol NaClO}_3 \text{ bereaksi} = \frac{6}{6} (0,0129) = 0,0129 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol CH}_3\text{OH} \text{ bereaksi} = \frac{1}{6} (0,0129) = 0,0021 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol H}_2\text{SO}_4 \text{ bereaksi} = \frac{4}{6} (0,0129) = 0,0086 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol H}_2\text{O} \text{ terbentuk} = \frac{5}{6} (0,0129) = 0,0107 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol CO}_2 \text{ terbentuk} = \frac{1}{6} (0,0129) = 0,0021 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol Na}_3\text{H}(\text{SO}_4)_2 \text{ terbentuk} = \frac{2}{6} (0,0129) = 0,0043 \text{ kmol}$$

Berdasarkan konversi 89% terhadap NaClO_3 , maka diperoleh mol umpan dan mol sisa:

$$\begin{aligned}\text{Mol NaClO}_3 \text{ umpan} &= \frac{\text{Mol NaClO}_3 \text{ bereaksi}}{\text{Konversi}} \\ &= \frac{0,0129}{0,89} = 0,0145 \text{ kmol}\end{aligned}$$

$$\text{Mol CH}_3\text{OH umpan} = \frac{1}{6} (0,0145) = 0,0024 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol H}_2\text{SO}_4 \text{ umpan} = \frac{4}{6} (0,0145) = 0,0097 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol ClO}_2 \text{ mula-mula} = 0 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol H}_2\text{O mula-mula} = 0 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol CO}_2 \text{ mula-mula} = 0 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol Na}_3\text{H(SO}_4)_2 \text{ mula-mula} = 0 \text{ kmol}$$

$$\begin{aligned}\text{Mol NaClO}_3 \text{ sisa} &= \text{Mol NaClO}_3 \text{ umpan} - \text{Mol NaClO}_3 \text{ bereaksi} \\ &= 0,0145 - 0,0129 \\ &= 0,0016 \text{ kmol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Mol CH}_3\text{OH sisa} &= \text{Mol CH}_3\text{OH umpan} - \text{Mol CH}_3\text{OH bereaksi} \\ &= 0,0024 - 0,0021 \\ &= 0,0003 \text{ kmol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Mol H}_2\text{SO}_4 \text{ sisa} &= \text{Mol H}_2\text{SO}_4 \text{ umpan} - \text{Mol H}_2\text{SO}_4 \text{ bereaksi} \\ &= 0,0097 - 0,0086 \\ &= 0,0011 \text{ kmol}\end{aligned}$$

	6NaClO_3	$+\text{CH}_3\text{OH}$	$+\text{4H}_2\text{SO}_4$	\rightarrow	6ClO_2	$+\text{5H}_2\text{O}$	$+\text{CO}_2$	$+\text{2Na}_3\text{H(SO}_4)_2$
M	0,0145	0,0024	0,0097		0	0	0	0
R	0,0129	0,0021	0,0086		0,0129	0,0107	0,0021	0,0043
S	0,0016	0,0003	0,0011		0,0129	0,0107	0,0021	0,0043

$$\begin{aligned}\text{Massa NaClO}_3 \text{ untuk bahan baku} &= \text{Berat Molekul} \times \text{Mol NaClO}_3 \text{ mula-} \\ &\quad \text{mula} \\ &= 106,4390 \times 0,0145 \\ &= 1,5426 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Harga NaClO}_3 \text{ bahan baku} &= \text{Harga NaClO}_3 \times \text{Massa NaClO}_3 \\
 &\quad \text{untuk bahan baku} \\
 &= \text{Rp}9.875/\text{kg} \times 1,5426 \text{ kg} \\
 &= \text{Rp}13.557
 \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama maka didapatkan:

Tabel 2. 10 Harga bahan baku dan produk pada proses Solvay

Komponen	Berat Molekul (kg/kmol)	Harga (Rp/kg)	Massa Molar (kmol)	Massa (kg)	Harga (Rp)
NaClO ₃	106,4390	9.875	0,0145	1,5426	13.557
H ₂ SO ₄	98,0770	4.350	0,0097	0,0774	3.668
CH ₃ OH	32,0417	2.530	0,0024	0,9476	174
ClO ₂	67,4510	20.550	0,0129	0,8700	17.878

$$\begin{aligned}
 \text{Harga bahan baku} &= \text{Harga NaClO}_3 + \text{Harga H}_2\text{SO}_4 + \\
 &\quad \text{Harga CH}_3\text{OH} \\
 &= \text{Rp} (13.557 + 3.668 + 174) \\
 &= \text{Rp}17.399 \\
 \text{Harga produk} &= \text{Harga ClO}_2 \\
 &= \text{Rp}17.878 \\
 \text{Keuntungan} &= \text{Harga produk} - \text{Harga bahan baku} \\
 &= \text{Rp} (17.878 - \text{Rp}17.399) \\
 &= \text{Rp}478
 \end{aligned}$$

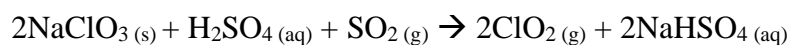
b. Proses Mathiesson

Tabel 2. 11 Berat molekul dan harga pada proses Mathiesson

(Alibaba.com, 2020)

Komponen	Harga (Rp/kg)
NaClO ₃	9.875
H ₂ SO ₄	4.350
SO ₂	2.530
ClO ₂	20.550
NaHSO ₄	2.900

Reaksi:



Perhitungan berdasarkan asumsi pembentukan 1 kg ClO₂ dengan konversi terhadap NaClO₃ 88%.

$$\text{Mol ClO}_2 \text{ terbentuk} = \frac{1}{67,5} (0,88) = 0,0130 \text{ kmol}$$

Secara stoikiometri, maka diperoleh mol yang bereaksi:

$$\text{Mol NaClO}_3 \text{ bereaksi} = \frac{2}{2} (0,0130) = 0,0130 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol SO}_2 \text{ bereaksi} = \frac{1}{2} (0,0130) = 0,0065 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol H}_2\text{SO}_4 \text{ bereaksi} = \frac{1}{2} (0,0130) = 0,0065 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol NaHSO}_4 \text{ terbentuk} = \frac{2}{2} (0,0130) = 0,0130 \text{ kmol}$$

Berdasarkan konversi 88% terhadap NaClO₃, maka diperoleh mol umpan dan mol sisa:

$$\begin{aligned} \text{Mol NaClO}_3 \text{ umpan} &= \frac{\text{Mol NaClO}_3 \text{ bereaksi}}{\text{Konversi}} \\ &= \frac{0,0130}{0,88} = 0,0148 \text{ kmol} \end{aligned}$$

$$\text{Mol SO}_2 \text{ umpan} = \frac{1}{2} (0,0148) = 0,0074 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol H}_2\text{SO}_4 \text{ umpan} = \frac{1}{2} (0,0148) = 0,0074 \text{ kmol}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Mol ClO}_2 \text{ mula-mula} &= 0 \text{ kmol} \\
 \text{Mol NaHSO}_4 \text{ mula-mula} &= 0 \text{ kmol} \\
 \text{Mol NaClO}_3 \text{ sisa} &= \text{Mol NaClO}_3 \text{ umpan} - \text{Mol NaClO}_3 \\
 &\quad \text{bereaksi} \\
 &= 0,0148 - 0,0130 \\
 &= 0,0018 \text{ kmol} \\
 \text{Mol SO}_2 \text{ sisa} &= \text{Mol SO}_2 \text{ umpan} - \text{Mol SO}_2 \\
 &\quad \text{bereaksi} \\
 &= 0,0074 - 0,0065 \\
 &= 0,0009 \text{ kmol} \\
 \text{Mol H}_2\text{SO}_4 \text{ sisa} &= \text{Mol H}_2\text{SO}_4 \text{ umpan} - \text{Mol H}_2\text{SO}_4 \\
 &\quad \text{bereaksi} \\
 &= 0,0074 - 0,0065 \\
 &= 0,0009 \text{ kmol}
 \end{aligned}$$

	2NaClO_3	+	H_2SO_4	+	SO_2	\rightarrow	2ClO_2	+	2NaHSO_4
	3								4
M	0,0148		0,007		0,007		0		0
			4		4				
R	0,0130		0,006		0,006		0,013		0,0130
			5		5		0		
S	0,0018		0,000		0,000		0,013		0,0130
			9		9		0		

Massa NaClO_3 untuk bahan baku = Berat Molekul x Mol NaClO_3 mula-mula

$$= 106,4390 \times 0,0148$$

$$= 1,5789 \text{ kg}$$

Harga NaClO_3 bahan baku = Harga NaClO_3 x Massa NaClO_3 untuk bahan baku

$$= \text{Rp}9.875/\text{kg} \times 1,5789 \text{ kg}$$

$$= \text{Rp}13.721$$

Dengan cara yang sama maka didapatkan:

Tabel 2. 12 Harga bahan baku dan produk pada proses Mathiesson

Komponen	Berat Molekul (kg/mol)	Harga (Rp/kg)	Massa Molar (kmol)	Massa (kg)	Harga (Rp)
NaClO ₃	106,4390	9.875	0,0148	1,5789	13.721
H ₂ SO ₄	98,0770	4.350	0,0074	0,7265	2.781
SO ₂	64,0630	2.530	0,0074	0,4744	4.321
ClO ₂	67,4510	20.550	0,0130	0,8806	18.097
NaHSO ₄	120,0580	2.900	0,0130	1,5656	4.540

$$\begin{aligned} \text{Harga bahan baku} &= \text{Harga NaClO}_3 + \text{Harga H}_2\text{SO}_4 + \text{Harga SO}_2 \\ &= \text{Rp } (13.721 + 2.781 + 4.321) \\ &= \text{Rp}20.823 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Harga produk} &= \text{Harga ClO}_2 + \text{Harga NaHSO}_4 \\ &= \text{Rp } (18.097 + 4.540) \\ &= \text{Rp}22.637 \end{aligned}$$

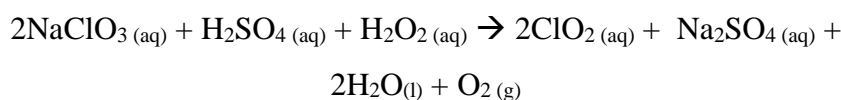
$$\begin{aligned} \text{Keuntungan} &= \text{Harga produk} - \text{Harga bahan baku} \\ &= \text{Rp } (22.637 - 20.823) \\ &= \text{Rp}1.815 \end{aligned}$$

c. Proses HP-A

Tabel 2. 13 Harga bahan baku dan produk pada proses HP-A (Alibaba.com, 2020)

Komponen	Harga (Rp/kg)
NaClO ₃	9.875
H ₂ SO ₄	4.350
H ₂ O ₂	5.800
ClO ₂	20.550

Reaksi:



Perhitungan berdasarkan asumsi pembentukan 1 kg ClO₂ dengan konversi terhadap NaClO₃ 99%.

$$\text{Mol ClO}_2 \text{ terbentuk} = \frac{1}{67,5} (0,99) = 0,0144 \text{ kmol}$$

Secara stoikiometri, maka diperoleh mol yang bereaksi:

$$\text{Mol NaClO}_3 \text{ bereaksi} = \frac{2}{2} (0,0144) = 0,0144 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol H}_2\text{O}_2 \text{ bereaksi} = \frac{1}{2} (0,0144) = 0,0072 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol H}_2\text{SO}_4 \text{ bereaksi} = \frac{1}{2} (0,0144) = 0,0072 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol Na}_2\text{SO}_4 \text{ terbentuk} = \frac{1}{2} (0,0144) = 0,0072 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol H}_2\text{O} \text{ terbentuk} = \frac{2}{2} (0,0144) = 0,0144 \text{ kmol}$$

$$\text{Mol O}_2 \text{ terbentuk} = \frac{1}{2} (0,0144) = 0,0072 \text{ kmol}$$

Berdasarkan konversi 99% terhadap NaClO₃, maka diperoleh mol umpan dan mol sisa:

$$\begin{aligned} \text{Mol NaClO}_3 \text{ umpan} &= \frac{\text{Mol NaClO}_3 \text{ bereaksi}}{\text{Konversi}} \\ &= \frac{0,0144}{0,99} = 0,0145 \text{ kmol} \end{aligned}$$

$$\text{Mol H}_2\text{O}_2 \text{ umpan} = \frac{1}{2} (0,0145) = 0,0073 \text{ kmol}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Mol H}_2\text{SO}_4 \text{ umpan} &= \frac{1}{2} (0,0145) = 0,0073 \text{ kmol} \\
 \text{Mol ClO}_2 \text{ mula-mula} &= 0 \text{ kmol} \\
 \text{Mol Na}_2\text{SO}_4 \text{ mula-mula} &= 0 \text{ kmol} \\
 \text{Mol H}_2\text{O} \text{ mula-mula} &= 0 \text{ kmol} \\
 \text{Mol O}_2 \text{ mula-mula} &= 0 \text{ kmol} \\
 \text{Mol NaClO}_3 \text{ sisa} &= \text{Mol NaClO}_3 \text{ umpan} - \text{Mol NaClO}_3 \\
 &\quad \text{bereaksi} \\
 &= 0,0145 - 0,0144 \\
 &= 0,0001 \text{ kmol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Mol H}_2\text{O}_2 \text{ sisa} &= \text{Mol H}_2\text{O}_2 \text{ umpan} - \text{Mol H}_2\text{O}_2 \\
 &\quad \text{bereaksi} \\
 &= 0,0073 - 0,0072 \\
 &= 0,0001 \text{ kmol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Mol H}_2\text{SO}_4 \text{ sisa} &= \text{Mol H}_2\text{SO}_4 \text{ umpan} - \text{Mol H}_2\text{SO}_4 \\
 &\quad \text{bereaksi} \\
 &= 0,0145 - 0,0144 \\
 &= 0,0001 \text{ kmol}
 \end{aligned}$$

	2NaClO_3	+	H_2SO_4	+	H_2O_2	\rightarrow	2ClO_2	+	Na_2SO_4	+	$2\text{H}_2\text{O}$	+	O_2
M	0,0145		0,0073		0,0073		0		0		0		0
R	0,0144		0,0072		0,0072		0,0144		0,0072		0,0144		0,0072
S	0,0001		0,0001		0,0001		0,0144		0,0072		0,0144		0,0072

$$\begin{aligned}
 \text{Massa NaClO}_3 \text{ untuk bahan baku} &= \text{Berat Molekul} \times \text{Mol NaClO}_3 \\
 &= 106,4390 \times 0,0145 \\
 &= 1,5461 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Harga NaClO}_3 \text{ bahan baku} &= \text{Harga NaClO}_3 \times \text{Massa NaClO}_3 \\
 &\quad \text{untuk bahan baku} \\
 &= \text{Rp}9.875/\text{kg} \times 1,5462 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$= \text{Rp}15.115$$

Dengan cara yang sama maka didapatkan:

Tabel 2. 14 Harga bahan baku dan produk pada proses HP-A

Komponen	Berat Molekul (kg/kmol)	Harga (Rp/kg)	Massa Molar (kmol)	Massa (kg)	Harga (Rp)
NaClO ₃	106,4390	9.875	0,0145	1,5461	15.115
H ₂ SO ₄	98,0770	4.350	0,0073	0,7123	3.068
H ₂ O ₂	34,0140	5.800	0,0073	0,2470	1.419
ClO ₂	67,4510	20.550	0,0144	0,9700	19.934

$$\text{Harga bahan baku} = \text{Harga NaClO}_3 + \text{Harga H}_2\text{SO}_4 + \text{Harga H}_2\text{O}_2$$

$$= \text{Rp} (15.115 + 3.068 + 1.419)$$

$$= \text{Rp}19.602$$

$$\text{Harga produk} = \text{Harga ClO}_2 + \text{Harga Na}_2\text{SO}_4$$

$$= \text{Rp} (19.934 + 2.962)$$

$$= \text{Rp}22.895$$

$$\text{Keuntungan} = \text{Harga produk} - \text{Harga bahan baku}$$

$$= \text{Rp} (22.895 - 19.602)$$

$$= \text{Rp}3.294$$

Tabel 2. 15 Perbandingan keuntungan pada proses pembuatan klorin dioksida

Jenis proses	Harga bahan baku	Harga produk	Keuntungan
Solvay	Rp17.399	Rp17.878	Rp478
Mathiesson	Rp20.823	Rp22.637	Rp1.815
HP-A	Rp19.602	Rp22.895	Rp3.294

2.3 Pemilihan Proses

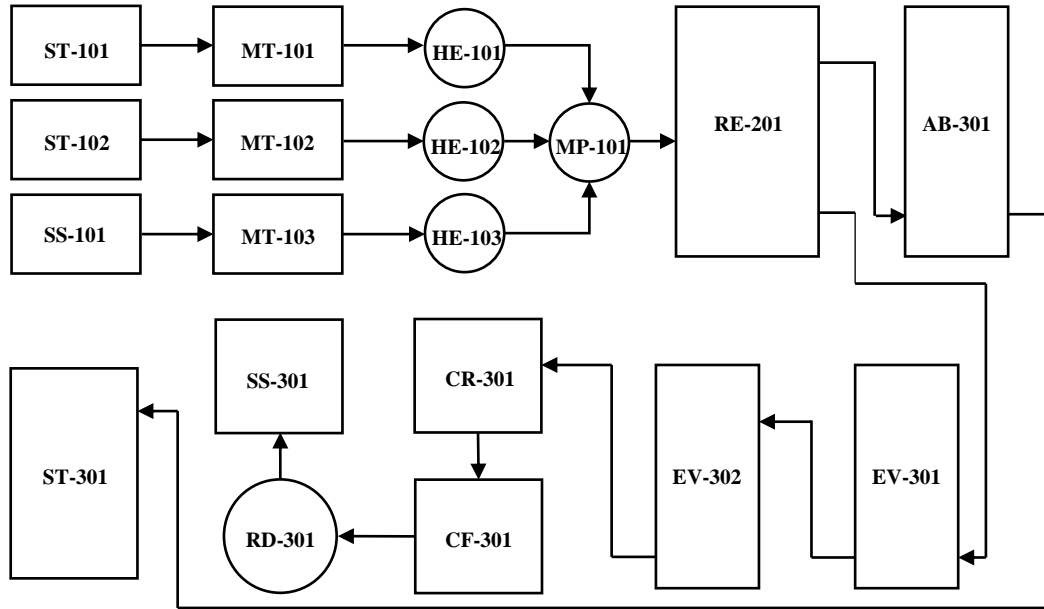
Tabel 2. 16 Perbandingan proses pembuatan klorin dioksida

Parameter	Proses Solvay	Proses Mathiesson	Proses HP-A
Suhu Operasi (°C)	63	46	58
Tekanan (atm)	0,85	0,7	1
Konversi (%)	86%	88%	99%
Entalpi reaksi pada T (kJ/mol)	12.956,8194	1.177,5753	-1.563,89
<i>Gibbs free energy</i> pada T (kJ/mol)	-121.200,39	5.128,99	-270.838,51
Keuntungan (Rp)	478	1.815	3.294

Dari data perbandingan diatas, maka dapat disimpulkan bahwa proses yang dipilih adalah Proses HP-A (*Hydrogen Peroxide-Atmosphere*) berdasarkan kondisi proses yang rendah yaitu suhu 58 °C pada tekanan atmosfer dengan konversi yang didapat mencapai 99%. Berdasarkan perhitungan nilai ΔH_r , didapatkan nilai entalpi sebesar -1.563,89 kJ/mol maka secara keseluruhan reaksi yang terjadi yaitu eksotermis atau melepaskan panas. Untuk nilai energi bebas Gibbs pada reaksi pembuatan klorin dioksida diperoleh bahwa pada proses HP-A diperoleh nilai yang rendah dibanding kedua proses lainnya, yaitu -270.838,51 kJ/mol yang menunjukkan reaksi secara keseluruhan berlangsung secara spontan karena $\Delta G^0 < 0$. Selain itu, dari perhitungan harga bahan baku dan produk didapatkanlah nilai keuntungan yang lebih besar pada proses HP-A dibandingkan dengan proses Solvay dan Mathiesson .

2.4 Uraian Proses

Pembuatan klorin dioksida dengan proses HP-A menggunakan bahan baku natrium klorat (NaClO_3), hidrogen peroksida (H_2O_2) dan asam sulfat (H_2SO_4).



Gambar 2. 1 Diagram alir uraian proses HP-A pembuatan klorin dioksida

Keterangan:

ST : *Storage Tank*

AB : *Absorber*

SS : *Solid Storage*

EV : *Evaporator*

MT : *Mixing Tank*

CF : *Centrifuge*

HE : *Heat Exchanger*

CR : *Crystallizer*

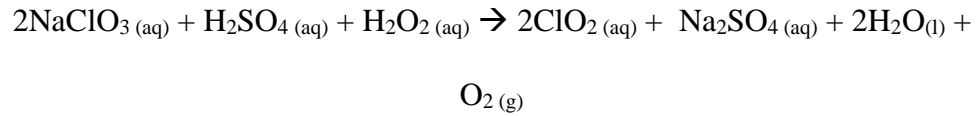
MP : *Mix Point*

RD : *Rotary Dryer*

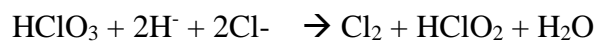
RE : *Reaktor*

Umpan berupa NaClO_3 , H_2O_2 dan H_2SO_4 dilarutkan dengan air, sebelum direaksikan dalam reaktor, temperatur umpan dinaikkan di *heater* dari temperatur 30°C menjadi 58°C . Kemudian umpan dikontakkan dalam *mixing point* terlebih dahulu sebelum diumpankan ke dalam reaktor. Reaksi yang terjadi dalam reaktor

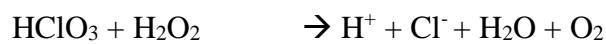
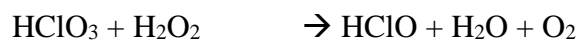
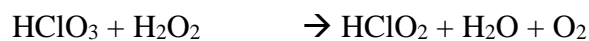
merupakan reaksi eksotermis dan spontan. Berikut ini adalah reaksi yang terjadi di dalam reaktor:



Dengan mekanisme yang berlangsung didalam larutan asam sulfat sebagai berikut :



Kemudian hidrogen peroksida mereduksi klorat menjadi *chloride* sebagai berikut :



Reaksi ini terjadi pada kondisi operasi dalam reaktor dengan tekanan 1 atm dan temperatur 58°C dan konversi reaksi mencapai 99%. Pada reaktor umpan akan bereaksi dan menghasilkan gas ClO_2 dan O_2 sebagai aliran produk atas. Aliran *output* atas reaktor akan diserap dalam absorber untuk menyerap ClO_2 dengan menggunakan air. Dalam absorber, gas ClO_2 dan O_2 yang berasal dari aliran bawah absorber akan dikontakkan dengan air

pendingin yang berasal dari atas menara absorber. Gas ClO_2 yang telah diserap oleh air pendingin akan disimpan pada tangki penyimpanan ClO_2 , sedangkan keluaran atas absorber berupa O_2 dialirkan ke atmosfer. Aliran *output* bawah reaktor yang meliputi Na_2SO_4 , H_2O , O_2 , serta umpan dari sisa reaksi akan dialirkan menuju evaporator sebelum dikristalkan pada *cyrstallizer* sebagai produk samping. Kemudian kristal dan *liquid* yang tidak terkristalkan akan dipisahkan pada *centrifuge*. Kristal produk samping akan dikeringkan pada *rotary dryer*, sedangkan *liquid* yang tidak terkristalkan akan dialirkan ke unit pengolahan limbah.

BAB III

SPEKIFIKASI BAHAN BAKU DAN PRODUK

3.1 Spesifikasi Bahan Baku

a. Spesifikasi natrium klorat (Perry, 1984)

Rumus kimia	: NaClO_3
Berat molekul	: 106,45 kg/kmol
Fase	: Padat
Titik leleh	: 248°C
Titik didih	: 248°C
Kemurnian	: 99%

b. Spesifikasi asam sulfat (Perry, 1984)

Rumus kimia	: H_2SO_4
Berat molekul	: 98 kg/kmol
Fase	: Cair
Titik didih	: 337°C
Titik leleh	: 10°C
Kemurnian	: 98%

c. Spesifikasi hidrogen peroksida (Perry, 1984)

Rumus kimia	: H_2O_2
Berat molekul	: 34 kg/kmol

Fase	: Cair
Titik didih	: 151,4°C
Titik beku	: -0,43°C
Berat jenis	: 1,454 g/cm ³
Kemurnian	: 50%

d. Spesifikasi air (Perry, 1984)

Rumus molekul	: H ₂ O
Berat molekul	: 18,015 kg/kmol
Fase	: Cair
Titik didih	: 100 °C

3.2 Spesifikasi Produk

a. Spesifikasi klorin dioksida (Perry, 1984)

Rumus kimia	: ClO ₂
Berat molekul	: 67,45 kg/kmol
Titik didih	: 11°C
Titik beku	: -59°C
Fase	: <i>Aqueos</i>
Kelarutan dalam air	: 0,0101 kg/kg air (30°C)
Kemurnian	: 1%

b. Spesifikasi natrium sulfat (Perry, 1984)

Rumus kimia	: Na_2SO_4
Berat molekul	: 142,04 g/mol
Berat jenis	: 2,742 g/cm ³
Titik didih	: 1.429 °C
Titik leleh	: 884 °C
Fase	: Padat
Kelarutan dalam air	: 0,425 kg/kg air (30°C)
Kemurnian	: 99%

BAB X

SIMPULAN DAN SARAN

10.1 Simpulan

Berdasarkan hasil analisis ekonomi yang telah dilakukan terhadap prarancangan pabrik klorin dioksida dari natrium klorat, asam sulfat dan hidrogen peroksida kapasitas 26.000 ton/tahun dapat ditarik simpulan sebagai berikut :

1. Pabrik klorin dioksida berisiko rendah karena pabrik bukan usaha baru yang belum pernah dicoba sama sekali dengan kondisi pasar yang tidak pasti. Nilai *Percent Return on Investment* (ROI) sebelum pajak adalah 42,59% dan nilai *Pay Out Time* (POT) sebelum pajak adalah 2,78 tahun masuk dalam batasan pabrik berisiko rendah, maka pabrik layak untuk didirikan.
2. *Break Even Point* (BEP) sebesar 35,52% dari kapasitas produksi total dan *Shut Down Point* (SDP) sebesar 11,58% dari kapasitas total.
3. *Discounted Cash Flow Rate of Return* (DCF) sebesar 42,11%, lebih besar dari suku bunga bank sekarang sehingga investor akan lebih memilih untuk berinvestasi ke pabrik ini dari pada ke bank.

10.2 Saran

Prarancangan pabrik klorin dioksida dari natrium klorat, asam sulfat dan hidrogen peroksida kapasitas 26.000 ton/tahun sebaiknya dikaji lebih lanjut baik dari segi proses maupun ekonominya.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik, 2020, *Statistic Indonesia*, www.bps.go.id, Indonesia. Diakses 18 November 2020.
- Banchero, Julius T. and Walter L. Badger. 1988. *Introduction to Chemical Engineering*. McGraw Hill : New York.
- Bank Indonesia. 2022. *Nilai Kurs*. www.bi.go.id. Diakses 9 Januari 2022.
- Brannan, C.R. 2002. *Rules of Thumb for Chemical Engineer*. Gulf Publising, United States of America.
- Brown. G. George., 1950. *Unit Operation 6^{ed}*. Wiley&Sons: USA.
- Brownell. L. E. and Young. E. H., 1959, *Process Equipment Design 3^{ed}*, John Wiley & Sons, New York.
- Coker, A. Kayode. 2007. *Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Engineering Plants 4th edition*. Gulf Publising, United States of America
- Coulson. J. M. and Ricardson. J. F., 1983, *Chemical Engineering vol 6*, Pergamon Press Inc, New York.
- Couper, R. James. 2003. *Process Engineering Economic*. Marcel Dekker, New York.

Fogler, H. Scott. 1992. *Elements of Chemical Reaction Engineering* 2nd edition.

Prentice Hall International Inc. : United States of America.

Foust, A. S., 1980, *Principles of Unit Operation*, 2nd edition, John Willey and

Sons, New York.

Geankoplis. Christie. J., 1993, *Transport Processes and unit Operation* 3th ^{ed}, Allyn

& Bacon Inc, New Jersey.

Himmeblau. David., 1996, *Basic Principles and Calculation in Chemical*

Engineering, Prentice Hall Inc, New Jersey.

Joshi, M.V. 1976. *Process Equipment Design*. New Delhi: Macmillan.

Kern, Donald Q. 1965. *Process Heat Transfer*. Mcgraw-Hill Co, New York.

Kirk, R.E and Othmer, D.F., 2006, "Encyclopedia of Chemical Technologi", 4nd

ed., vol. 17., John Wiley and Sons Inc., New York.

Laili, F. N. dan Sofyan, A. 2017. *Identifikasi Daya Tampung Beban Pencemaran*

Sungai Citarum Hilir di Karawang dengan WASP. Jurnal Teknik

Lingkungan, 23(1), 1-12.

Martinez, Isodora. 2021. *Heat of solution data for aqueous solutions*.

McCabe. W. L. and Smith. J. C., 1985, *Operasi Teknik Kimia*, Erlangga, Jakarta.

Megyesy. E. F., 1983, *Pressure Vessel Handbook*, Pressure Vessel Handbook

Publishing Inc, USA.

Mingxin Zhu, Hui Huang, Xian Dong, Lina Shen, Yanhua Xu.. 2011. *Kinetics and Mechanism Study on Chlorine Dioxide Generation with Hydrogen Peroxide*. International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring.

MSDS *Chlorine dioxide*, diakses pada 3 Januari 2021.

MSDS *Sodium chlorate*, diakses pada 3 Januari 2021.

MSDS *Hydrogen peroxide*, diakses pada 3 Januari 2021.

MSDS *Sulfuric acid*, diakses pada 3 Januari 2021.

Mullin, J. W. 2001. *Crystallization, 4th ed*. Elsevier Butterworth-Heinemann: Oxford, UK.

Qasim, Syed R. 1985. *Wastewater Treatment Plants 4th edition*. CBS College Publishing: New York.

Paryono, Damar A., Susilo S. B., Dahuri R., Suseno H. 2017. *Sedimentasi Delta Sungai Citarum, Kecamatan Muara Gembong, Kabupaten Bekasi*. Journal of Watershed Management Research Vol. 1 No. 1 April 2017 : 15-26.

Perry, Robert H., and Don W. Green. 2008. *Perry's Chemical Engineers' Handbook 8th edition*. McGraw Hill : New York.

Peter. M. S. and Timmerhaus. K. D., 1991, *Plant Design an Economic for Chemical Engineering 3^{ed}*, Mc Graww-Hill Book Company, New York.

- Powell, S. T., 1954, *Water Conditioning for Industry*, Mc Graw Hill Book Company, New York.
- Praveen, Verma. 2004. *Cooling Water Treatment Handbook*. Albatross Fine Chem Ltd., India.
- Rase. 1977. *Chemical Reactor Design for Process Plant, Vol. 1st, Principles and Techniques*. John Wiley and Sons : New York
- Severn, William H. and Degler, Howard E. *Steam, Air and Gas Power*. J. Wiley & Sons Inc: New York.
- Smith, J.M., H.C. Van Ness, and M.M. Abbott. 2001. *Chemical Engineering Thermodynamics 6th edition*. McGraw Hill : New York.
- Treyball. R. E. 1980. *Mass Transfer Operation 3rd edition*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Twort, A. C., Ratnayaka, D. D., Brandt, M. J. 2000. *Water Supply 5th edition*. Butterworth-Heinemann : Oxford.
- Ulrich. G. D., 1984, *A Guide to Chemical Engineering Process Design and Economics*. John Wiley & Sons Inc, New York.
- US Patent, No. 4.770.868 “*Process for production of chlorine dioxide*”.
- US Patent, No. 5.145.660 “*Procedure for production of chlorine dioxide*”.
- Walas, Stanley M. 1990. *Chemical Process Equipment*. Butterworth-Heinemann : Washington.

Wilson, E. T. 2005. *Clarifier Design*. Mc Graw Hill Book Company : London

Yaws, C. L. 1999. *Chemical Properties Handbook*. Mc Graw Hill Book Co., New
York

www.chemengonline.com. Diakses 15 Februari 2022.

www.matches.com. Diakses pada Juni 2022.