

LAPORAN *CAPSTONE DESIGN* II
PRARANCANGAN PABRIK GARAM FARMASI DARI
GARAM INDUSTRI KAPASITAS 3.000 TON/TAHUN



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

Oleh :

Erina Indah Pramisti

27210343D

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SETIA BUDI
SURAKARTA
2026

LEMBAR PENGESAHAN
LAPORAN *CAPSTONE DESIGN* II
PRARANCANGAN PABRIK GARAM FARMASI DARI GARAM
INDUSTRI KAPASITAS 3.000 TON/TAHUN

Oleh:

ERINA INDAH PRAMISTI

27210343D

Telah dipertahankan oleh tim penguji

Pada tanggal 9 April 2026

Nama

Tanda Tangan

Penguji I : Dr. Supriyono, ST., MT.

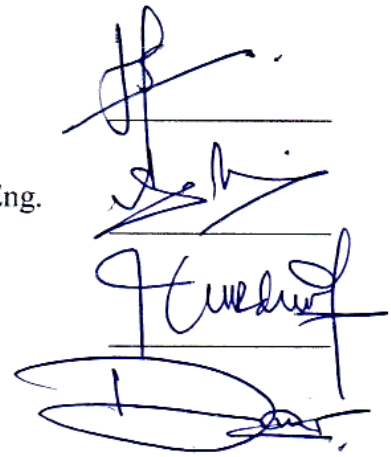
Penguji II : Dewi Astuti Herawati, ST., M.Eng.

Penguji

III : Ir. Sumardiyono, MT.

Penguji

IV : Petrus Darmawan, ST., MT.



Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik

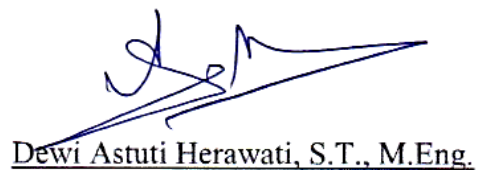
Kepala Program Studi S1 Teknik

Kimia



Dr. Suseno, M.,Si

NIS. 01199408011044



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

NIS. 01199601032053

LEMBAR PERSETUJUAN
LAPORAN *CAPSTONE DESIGN* II

PRARANCANGAN PABRIK GARAM FARMASI DARI GARAM
INDUSTRI KAPASITAS 3.000 TON/TAHUN

Disusun Oleh:
Erina Indah Pramisti 27210343D

Telah disetujui oleh Pembimbing
Pada tanggal 19 Januari 2026

Pembimbing I

Pembimbing II



Ir. Sumardiyono, MT.
NIS. 01199403231041



Petrus Darmawan, ST., MT.
NIS. 01199905141068

Mengetahui,
Ketua Program Studi



Dewi Astuti Herawati, ST., M.Eng.
NIS. 01199601032053

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN DOKUMEN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Erina Indah Pramisti

NIM : 27210343D

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Hasil karya *Capstonr Design II* berikut adalah benar hasil karya saya sendiri dan bukan merupakan karya cipta pihak lain maupun serta tidak bertentangan dengan karya cipta pihak lain.
2. Jika ternyata dikemudian hari hasil karya *Capstonr Design II* tersebut terbukti bertentangan dengan hak cipta lain, maka saya bersedia mempertanggungjawabkan secara hukum.

Demikian pernyataan keaslian hasil karya *Capstonr Design II* ini saya buat dengan sebenarnya untuk menghindari adanya klaim pihak lain terhadap karya tersebut serta untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Surakarta, 8 April 2026




Erina Indah Pramisti

NIM. 27210343D

NIM. 2/210343D

MOTTO

“Jika Bukan Karena Allah Yang Memampukan, Aku Mungkin Sudah
Lama Menyerah”

(Q.S Al-Insyirah: 05-06)

“Jangan Bandingkan Perjalananmu Dengan Orang Lain. Bulan Tetap
Bersinar Meski Bintang Lebih Banyak”

PERSEMBAHAN

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, hidayah, dan pertolongan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Dengan rasa hormat dan penuh cinta, karya ini penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua tercinta yang selalu menjadi sumber kekuatan, semangat, dan doa tiada henti. Terimakasih atas cinta, pengorbanan, dan dukungan yang tak ternilai harganya.
2. Saudaraku yang senantiasa memberikan semangat, candaan, serta perhatian yang membuat perjalanan ini terasa lebih ringan dan menyenangkan.
3. Dosen pembimbing dan seluruh dosen pengajar atas ilmu, bimbingan, serta arahnya selama masa studi hingga selesainya tugas akhir ini.
4. Teman-teman seperjuangan, yang telah menjadi bagian penting dalam setiap proses, canda tawa, dan perjuangan selama menempuh studi ini.

Tugas akhir ini hanyalah bagian kecil dari perjalanan panjang belajar dan pengabdian. Semoga awal dari kontribusi yang lebih luas bagi ilmu pengetahuan dan masyarakat.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT Yang Maha Segalanya, atas seluruh curahan ramat dan hidayah-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “PRARANCANGAN PABRIK GARAM FARMASI DARI GARAM INDUSTRI KAPASITAS 3.000 TON/TAHUN” ini tepat pada waktunya. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelas Sarjana Teknik pada Program Studi S1-Teknik Kimia Universitas Setia Budi.

Dalam penyelesaian tugas akhir ini, penulis banyak memperoleh bantuan maupun pengajaran, bimbingan, serta pengarahan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu penulis menyampaikan penghargaan dan terimakasih yang tak terhingga kepada:

1. Dr. Drs. Suseno, S.Si., M.Si., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Setia Budi.
2. Dewi Astuti Herawati S.T., M.Eng. selaku Kepala Program Studi Teknik Kimia Universitas Setia Budi.
3. Ir. Sumardiyono, M.T. dan Petrus Darmawan, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu ditengah kesibukan beliau, memberikan kritik, saran, dan pengarahan kepada penulis dalam proses pengerjaan tugas akhir ini.
4. Dr. Supriyono, ST., MT. dan Dewi Astuti Herawati S.T., M.Eng. selaku dosen penguji dalam tugas akhir ini.
5. Kedua orang tua penulis, bapak dan ibu tercinta, yang senantiasa memberikan doa yang tidak pernah terputus, kasih sayang yang tulus, serta dukungan moral maupun materiil yang luar biasa. Terima kasih telah menjadi motivasi terbesar bagi penulis untuk menyelesaikan studi ini
6. Kakak penulis, yang selalu memberikan semangat, bantuan, serta nasihat-nasihat berharga yang menguatkan penulis dalam menghadapi setiap tantangan selama masa perkuliahan.
7. Sahabat seperjuangan Teknik Kimia angkatan 2021 yang telah menjadi tempat berbagi keluh kesah, memberikan keceriaan, dan bantuan teknis selama penyusunan tugas akhir ini.

Sebagai manusia biasa, penulis menyadari dalam penyusunan tugas akhir ini jauh dari kata sempurna karena keterbatasan kemampuan dan ilmu pengetahuan yang dimiliki penulis. Oleh karena

itu, atas kesalahan dan kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis memohon maaf dan bersedia menerima saran maupun kritik yang membangun.

Terakhir, harapan penulis, semoga tugas akhir ini memberikan manfaat bagi siapa saja yang membacanya.

Surakarta, 8 April 2026

Penulis,

Erina Indah Pramisti

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN.....	iii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Pendirian Pabrik	1
1.2 Perbandingan Proses	5
1.3 Data Perancangan.....	8
BAB II PERANCANGAN PRODUK	18
2.1 Spesifikasi bahan baku.....	18
2.2 Spesifikasi produk.....	20
2.3 Pengendalian kualitas.....	20
BAB III PERANCANGAN PROSES	25
3.1 UraianProse	25
3.2 Diagram alir kualitatif.....	29
3.3 Neraca Massa Dan Energi.....	30
3.4 Diagram alir kuantitatif.....	37
3.5 Spesifikasi alat proses.....	38
BAB IV PERANCANGAN PABRIK	53
4.1 Lokasi pabrik	53
4.2 Tata letak pabrik dan alat proses	55
4.3 Utilitas.....	57
4.4 Unit pengolahan limbah.....	81
4.5 Analisis ekonomi	84
BAB V KESIMPULAN	94
DAFTAR PUSTAKA	95
LAMPIRAN 1_PERHITUNGAN NERACA MASSA DAN ENERGI	97
LAMPIRAN 2_DESAIN REKTOR.....	124
LAMPIRAN 3_MANAJEMEN PERUSAHAAN.....	134
LAMPIRAN 4 PFD	137

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Grafik Data Impor Garam Farmasi	2
Gambar 2	Diagram Alir Kualitatif	29
Gambar 3	Diagram Alir Kuantitatif	37
Gambar 4	Tata Letak Pabrik Garam Farmasi	55
Gambar 5	Tata Letak Alat	56
Gambar 6	Diagram Alir Pengolahan Air	75
Gambar 7	Index Harga Alat	86
Gambar 8	Grafik BEP dan SDP	93

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Data Impor Garam Farmasi.....	2
Tabel 2	PT produksi garam farmasi di Indonesia	3
Tabel 3	Perbandingan Proses	7
Tabel 4	Data Panas Pembentukan Standar (ΔH_f) dan Panas Penguapan Standar (ΔH_g).....	11
Tabel 5	Neraca Massa	30
Tabel 6	Neraca Energi.....	34
Tabel 7	Spesifikasi Alat Proses	38
Tabel 8	Spesifikasi Alat Utilitas.....	59
Tabel 9	Standar Baku Mutu Air Sanitasi.....	60
Tabel 10	Standar Kualitas Air Pendingin	62
Tabel 11	Index harga Alat	86
Tabel 12	Physycal Plant Cost (PPC).....	87
Tabel 13	Direct Plant Cost (DPC).....	87
Tabel 14	Fixed Capital Investment (FCI)	87
Tabel 15	Working Capital Investment	88
Tabel 16	Direct Manufacturing Cost.....	88
Tabel 17	Indirect Manufacturing Cost	88
Tabel 18	Fixed Manufacturing Cost	89
Tabel 19	Total Manufacturing Cost	89
Tabel 20	General expense	89

ABSTRAK

Indonesia merupakan negara maritim dengan garis pantai mencapai 99.093 km yang memiliki potensi besar dalam produksi garam. Namun, kebutuhan garam farmasi dalam negeri masih sangat bergantung pada impor karena spesifikasi kemurniannya yang tinggi (99,8%). Prarancangan pabrik garam farmasi ini bertujuan untuk memenuhi kebutuhan industri farmasi nasional, mengurangi ketergantungan impor, serta meningkatkan nilai ekonomi garam industri lokal. Pabrik ini direncanakan memiliki kapasitas produksi sebesar 3.000 ton/tahun dengan bahan baku utama garam industri. Proses produksi diawali dengan tahap penyiapan garam industri, Na_2CO_3 dan NaOH yang dilarutkan dalam air untuk membentuk larutan jenuh. Kemudian semua bahan dicampur di reaktor untuk mengendapkan pengotor ion Ca^{2+} , Mg^{2+} . Ion Ca^{2+} , Mg^{2+} akan dipisahkan melalui thickener dan nanofiltrasi. Larutan murni kemudian diuapkan dalam *evaporator* untuk membentuk kristal garam kembali, yang dilanjutkan dengan pemisahan menggunakan *centrifuge*. Kristal yang dihasilkan dikeringkan dalam *rotary dryer* hingga mencapai kadar air minimal, lalu dihaluskan dan diayak untuk mendapatkan ukuran butir yang seragam sesuai standar Farmakope. Ditinjau dari aspek ekonomi, pabrik ini dikategorikan sebagai industri berisiko rendah (*low risk*). Analisis ekonomi menunjukkan nilai ROI sebelum pajak sebesar 33,17%, POT sebelum pajak 2,43 tahun, BEP 45,39%, serta DCFRR sebesar 15,40%. Berdasarkan parameter teknis dan ekonomi tersebut, prarancangan pabrik garam farmasi ini dinyatakan layak untuk didirikan dan memiliki prospek komersial yang baik.

Kata Kunci: Garam Industri, Garam Farmasi, Natrium Klorida, Natrium Hidroksida, Natrium Karbonat

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Pendirian Pabrik

Indonesia adalah negara maritim yang memiliki garis pantai sepanjang 99.093 km, dengan panjang pantai yang dimiliki sangat potensial untuk pengembangan usaha garam (Dewi, 2024). Produksi garam di Indonesia banyak dilakukan di daerah pesisir, terutama di Jawa Timur, Madura, Nusa Tenggara Timur (NTT), dan Sulawesi Selatan. Namun faktanya, Indonesia masih mengimpor garam dalam jumlah yang sangat besar. Ini disebabkan karena kualitas garam di Indonesia belum memenuhi standar garam impor (Safrida, 2021). Banyak industri di dalam negeri yang masih bergantung pada natrium klorida (NaCl) dari luar negeri sebagai bahan baku. Hingga saat ini, garam farmasi masih menjadi salah satu jenis garam yang terus diimpor.

Garam banyak digunakan dalam berbagai industri, seperti kimia, farmasi, pangan, serta kebutuhan sehari-hari. Komponen utama garam terdiri dari natrium klorida (NaCl), air, serta ion-ion seperti magnesium, kalsium, dan sulfat. Di Indonesia, garam yang diproduksi umumnya dibedakan menjadi garam konsumsi dan garam industri, berdasarkan tujuan penggunaannya.

Garam farmasi (NaCl) adalah bahan baku berkualitas tinggi yang diproduksi secara khusus untuk memenuhi standar kemurnian ketat farmakope, berbeda dari garam konsumsi biasa. Garam ini merupakan komponen penting yang digunakan dalam industri farmasi untuk memproduksi larutan infus, obat-obatan, dan produk injeksi medis. Oleh karena itu, garam farmasi harus melalui proses pemurnian yang ketat seperti rekristalisasi dan filtrasi untuk memastikan bahwa ia bebas dari kontaminan berbahaya seperti logam berat, serta mencapai tingkat kemurnian 99,8% agar aman untuk digunakan dalam formulasi medis.

Kebutuhan garam farmasi di Indonesia terus meningkat seiring dengan perkembangan industri farmasi dan kesehatan. Menurut data dari Kementerian Perindustrian, konsumsi garam farmasi meningkat setiap tahun, sementara kapasitas produksi dalam negeri masih terbatas, sehingga Indonesia masih bergantung pada impor untuk memenuhi kebutuhan tersebut.

Penentuan kapasitas produksi pabrik garam farmasi didasarkan pada upaya mengurangi ketergantungan terhadap impor. Dengan membandingkan data impor dan ekspor, diketahui bahwa jumlah garam farmasi yang diimpor jauh lebih besar daripada yang diekspor. Tingginya permintaan garam farmasi di pasar menjadi faktor utama dalam menentukan kapasitas produksi pabrik guna memenuhi kebutuhan dalam negeri.

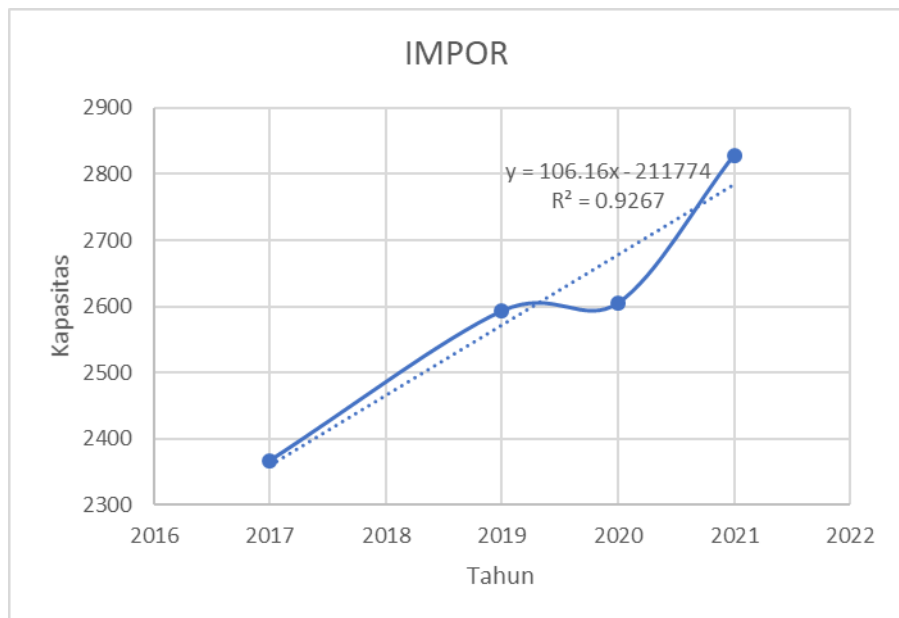
1.1.1 Supply

- Data impor

Tabel 1 Data Impor Garam Farmasi

Tahun ke-	Tahun	Impor (Ton/Tahun)
1	2017	2.367,39
2	2019	2.593,15
	2020	2.605,13
4	2021	2.828,57

(sumber: bps.go.id)



Gambar 1 Grafik Data Impor Garam Farmasi

Pabrik ini rencana akan berdiri pada tahun 2030, sehingga dengan persamaan regresi linear impor dalam negeri dapat diprediksi.

$$y = b x + a$$

dimana;

y = Kapasitas Produksi (ton/tahun)

a = Konstanta

x = Tahun perencanaan berdirinya pabrik (2030)

b = Koefisien regresi (kemiringan)

sehingga, $y = 106,16x - 211.774$

maka impor pada tahun 2030 adalah:

$$\begin{aligned} y &= 106,16x - 211.774 \\ &= 106,16 (2030) - 211.774 \\ &= 3.730,8 \text{ ton /tahun} \end{aligned}$$

- Data produksi

Tabel 2 PT Produksi Garam Farmasi Di Indonesia

Pabrik	Kapasitas (ton/tahun)
PT Karya Daya Syafarmasi	1.300
PT Tudung Karya Daya Inovasi	1.300

(Sumber: Badan POM)

Produksi garam farmasi di Indonesia saat ini masih terbatas pada beberapa pabrik dengan kapasitas yang relatif kecil dibandingkan dengan kebutuhan nasional. Terdapat dua perusahaan utama yang berperan dalam produksi garam farmasi, yaitu PT Karya Daya Syafarmasi dan PT Tudung Karya Daya Inovasi, masing-masing dengan kapasitas produksi sebesar 1.300 ton per tahun (BPOM, 2025). Dengan total kapasitas produksi domestik sebesar 2.600 ton per tahun, kebutuhan garam farmasi di Indonesia masih harus dipenuhi melalui impor.

Dengan mempertimbangkan data impor dan produksi domestik, dapat dihitung total pasokan garam farmasi di Indonesia pada tahun 2030:

$$\begin{aligned}
 \text{Supply} &= \text{Impor} + \text{Produksi} \\
 &= 3.852,3 \text{ ton /tahun} + 2.600 \text{ ton /tahun} \\
 &= 6.452,3 \text{ ton/tahun}
 \end{aligned}$$

1.1.2 *Demand* (Permintaan)

Meskipun Indonesia berpotensi besar dalam produksi garam, industri garam farmasi nasional masih terbatas kapasitasnya karena keterbatasan teknologi pemurnian yang ada. Teknologi yang dimiliki saat ini belum mampu menghasilkan garam dengan tingkat kemurnian tinggi yang sesuai dengan standar farmasi internasional. Kondisi ini mengakibatkan Indonesia belum kompetitif di pasar ekspor garam farmasi, dan bahkan untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri, Indonesia masih harus bergantung pada impor.

1.1.3 Data konsumsi garam farmasi dalam negeri

Kebutuhan garam farmasi di Indonesia mencapai 7.000 ton/tahun. Garam ini sangat penting sebagai bahan baku aktif maupun tambahan dalam produksi obat-obatan, seperti infus, cairan hemodialisis, pelarut vaksin, sirup, dan oralit. Saat ini, sebagian besar kebutuhan tersebut masih dipenuhi melalui impor.

1.1.4 Kapasitas pabrik

- a. *Supply* = Produksi + Impor

$$\begin{aligned}
 &= 2.600 \text{ ton/tahun} + 3.852,3 \text{ ton /tahun} \\
 &= 6.452,3 \text{ ton/tahun}
 \end{aligned}$$
- b. *Demand* = Konsumsi + Ekspor

$$\begin{aligned}
 &= 7.000 \text{ ton/tahun} + 0 \\
 &= 7.000 \text{ ton/tahun}
 \end{aligned}$$
- c. Peluang kapasitas pabrik (dengan data impor)

$$\begin{aligned}
 \text{Demand} - \text{Supply} &= 7.000 \text{ ton/tahun} - 6.452,3 \text{ ton/tahun} \\
 &= 547,7 \text{ ton/tahun}
 \end{aligned}$$
- d. Peluang kapasitas pabrik (tanpa impor)

Peluang kapasitas pabrik (dengan data impor) + data impor

$$= 547,7 \text{ ton/tahun} + 3.852,3 \text{ ton /tahun}$$

$$= 4.400 \text{ ton/tahun}$$

Berdasarkan data diatas, total *supply* garam farmasi saat ini terdiri dari produksi dalam negeri sebesar 2.600 ton per tahun dan impor sebesar 3.852,3 ton per tahun, sehingga total supply mencapai 6.452,3 ton per tahun. Disisi lain, demand nasional mencapai 7.000 ton per tahun. Jika memperhitungkan data impor, peluang kapasitas baru hanya sebesar 547,7 ton per tahun. Namun, karena tujuan pendirian pabrik ini adalah untuk mengurangi ketergantungan terhadap impor, maka peluang kapasitas dihitung tanpa memasukkan data impor, yaitu sebesar 4.400 ton per tahun. Dengan mempertimbangkan peluang ini, kapasitas pabrik dirancang sebesar 3.000 ton per tahun untuk memenuhi kebutuhan pasar domestik melalui produksi lokal.

1.2 Perbandingan Proses

1.2.1 *Chemical Treatment*

Pemurnian natrium klorida (NaCl) dari campuran garam yang tidak murni dapat dilakukan melalui metode pengendapan menggunakan reagen selektif seperti natrium karbonat (Na_2CO_3) dan natrium hidroksida (NaOH). Tujuan dari penambahan kedua reagen ini adalah untuk menghilangkan ion-ion pengotor, terutama kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}), yang umum ditemukan dalam garam mentah. Natrium karbonat bereaksi dengan ion Ca^{2+} membentuk endapan kalsium karbonat (CaCO_3), serta dengan ion Mg^{2+} membentuk magnesium karbonat (MgCO_3). Kedua senyawa ini tidak larut dalam air sehingga dapat dipisahkan dengan penyaringan. Selain itu, natrium hidroksida juga dapat digunakan untuk mengendapkan pengotor melalui pembentukan hidroksida. Ion Ca^{2+} bereaksi dengan NaOH membentuk kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), sementara Mg^{2+} membentuk magnesium hidroksida ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Endapan-endapan tersebut dapat dipisahkan dari larutan, sehingga NaCl yang tersisa menjadi lebih murni (Mishra & Ramaprabhu, 2011).

- Reaksi pengendapan Kalsium (Ca^{2+}) dengan Natrium Katbonat (Na_2CO_3)
 $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3(\text{s}) + 2\text{NaCl}(\text{aq})$
- Reaksi pengendapan Kalsium (Ca^{2+}) dengan Natrium Hidroksida (NaOH)
 $\text{CaCl}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s}) + 2\text{NaCl}(\text{aq})$
- Reaksi pengendapan Magnesium (Mg^{2+}) dengan Natrium Hidroksida (NaOH)
 $\text{MgCl}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2(\text{s}) + 2\text{NaCl}(\text{aq})$
- Reaksi pengendapan Magnesium (Mg^{2+}) dengan dengan Natrium Katbonat (Na_2CO_3)
 $\text{MgCl}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{MgCO}_3(\text{s}) + 2\text{NaCl}(\text{aq})$

1.2.2 Membran Nanofiltrasi (NF)

Pemurnian natrium klorida (NaCl) dari larutan garam mentah dapat dilakukan secara efisien menggunakan teknologi nanofiltrasi (NF). Teknologi ini memanfaatkan membran semi-permeabel yang mampu memisahkan ion-ion berdasarkan ukuran dan muatan. Membran nanofiltrasi secara khusus dirancang untuk menolak ion-ion divalen seperti kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}), yang umumnya menjadi pengotor dalam garam mentah, sementara ion-ion monovalen seperti natrium (Na^+) dan klorida (Cl^-) dapat melewati membran dengan mudah. Pengembangan membran nanofiltrasi berbahan dasar poliamida yang dimodifikasi untuk meningkatkan selektivitas terhadap ion tertentu, sehingga efisiensi pemisahan ion divalen dari larutan garam semakin meningkat.

Membran ini menunjukkan performa tinggi dalam menghilangkan Ca^{2+} dan Mg^{2+} dari air asin dan air laut (Sun et al., 2023). Pemurnian NaCl dengan nanofiltrasi tidak hanya mampu menghasilkan produk dengan tingkat kemurnian tinggi, tetapi juga memiliki keuntungan dalam hal efisiensi energi dan pengurangan limbah (Morgante et al., 2024).

1.2.3 Pertukaran Ion (*Ion Exchanger*)

Pemurnian NaCl menggunakan *ion exchange* bertujuan untuk menghilangkan jejak ion pengotor seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan SO_4^{2-} . Larutan garam dialirkan melalui resin kationik dan anionik, di mana resin kationik menukar Ca^{2+} dan Mg^{2+} dengan Na^+ , sedangkan resin anionik menukar SO_4^{2-} dengan Cl^- , sehingga meningkatkan kemurnian NaCl hingga >99,99%.

Setelah resin jenuh, regenerasi dilakukan menggunakan HCl atau NaOH untuk mengembalikan kapasitas pertukaran ion. Metode ini sangat efektif untuk aplikasi garam farmasi, elektrolisis, dan elektronik karena dapat menghilangkan pengotor hingga tingkat ppm atau ppb. Namun, ion exchange memerlukan biaya operasional tinggi dan bergantung pada pre-treatment agar resin tidak cepat jenuh.

Tabel 3 Perbandingan Proses

Metode Proses	Kelebihan	Kekurangan
Chemical Treatment	1. Efektif dalam menghilangkan kontaminan spesifik seperti logam berat dan senyawa organik beracun. 2. Dapat dengan cepat menyesuaikan komposisi kimia air atau larutan. 3. Relatif murah untuk skala besar.	1. Berpotensi menghasilkan limbah sekunder yang memerlukan pengolahan lebih lanjut. 2. Penggunaan bahan kimia bisa menyebabkan risiko lingkungan dan kesehatan. 3. Membutuhkan kontrol yang ketat agar tidak terjadi overdosis bahan kimia.
Membrane NanoFiltrasi (NF)	1. Mampu menghilangkan partikel kecil seperti ion divalen, bakteri, dan virus. 2. Memerlukan energi lebih rendah dibandingkan reverse osmosis (RO). 3. Dapat mengurangi kesadahan air.	1. Membran dapat mengalami fouling sehingga memerlukan pemeliharaan rutin. 2. Biaya investasi awal relatif tinggi. 3. Tidak efektif untuk ion monovalen

		seperti natrium dan klorida dalam jumlah besar.
Pertukaran Ion (Ion Exchanger)	1. Efektif dalam menghilangkan ion spesifik seperti kalsium, magnesium, dan logam berat. 2. Regenerasi resin dapat dilakukan untuk memperpanjang umur pakai. 3. Dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk pengolahan air dan industri kimia.	1. Memerlukan regenerasi dengan bahan kimia seperti asam atau basa. 2. Resin bisa mengalami keausan dan perlu diganti secara berkala. 3. Tidak efektif untuk menghilangkan partikel non-ionik atau senyawa organik kompleks

Dalam pendirian pabrik ini metode *chemical treatment* dipilih karena biaya operasional yang lebih rendah dibandingkan nanofiltrasi, yang membutuhkan pompa tekanan tinggi, atau *ion exchange*, yang memerlukan regenerasi resin secara berkala. Selain itu, proses ini lebih sederhana dan dapat diterapkan dalam skala industri dengan mudah, tanpa memerlukan infrastruktur kompleks seperti sistem membran atau kolom pertukaran ion.

1.3 Data Perancangan

1.3.1 Persamaan Reaksi

Adapun reaksi yang terjadi dalam proses pemurnian NaCl adalah sebagai berikut:

- Reaksi pengendapan Kalsium (Ca^{2+}) dengan Natrium Katbonat (Na_2CO_3)

$$\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 (\text{s}) + 2\text{NaCl} (\text{aq})$$
- Reaksi pengendapan Kalsium (Ca^{2+}) dengan Natrium Hidroksida (NaOH)

$$\text{CaCl}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Ca} (\text{OH})_2 (\text{s}) + 2\text{NaCl} (\text{aq})$$
- Reaksi pengendapan Magnesium (Mg^{2+}) dengan Natrium Hidroksida (NaOH)

$$\text{MgCl}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Mg} (\text{OH})_2 (\text{s}) + 2\text{NaCl} (\text{aq})$$
- Reaksi pengendapan Magnesium (Mg^{2+}) dengan dengan Natrium Katbonat (Na_2CO_3)

$$\text{MgCl}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{MgCO}_3 (\text{s}) + 2\text{NaCl} (\text{aq})$$

1.3.2 Tinjauan Kinetika

- a. Reaksi Kalsium (Ca^{2+}) dengan Natrium Katbonat (Na_2CO_3)



- Laju reaksi kimia:

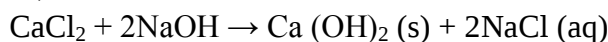
$$-r_A = k \cdot C_A^m \cdot C_B^n$$

$$-r_{\text{Ca}^{2+}} = k [\text{Ca}^{2+}]^m [\text{CO}_3^{2-}]^n$$
- Model kinetika:

$$R_g = k_g(S)^g$$

(Levenspiel, 1999)

- b. Reaksi Kalsium (Ca^{2+}) dengan Natrium Hidroksida (NaOH)



- Laju reaksi kimia;

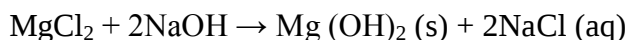
$$-r_A = k \cdot C_A^m \cdot C_B^n$$

$$-r_{\text{Ca}^{2+}} = k [\text{Ca}^{2+}]^m [\text{OH}^-]^n$$
- Model kinetika:

$$R_g = k_g(C_A - C_{Ae})$$

(Levenspiel, 1999)

- c. Reaksi pengendapan Magnesium (Mg^{2+}) dengan Natrium Hidroksida (NaOH)



- Laju reaksi kimia;

$$-r_A = k \cdot C_A^m \cdot C_B^n$$

$$-r_{\text{Mg}^{2+}} = k [\text{Mg}^{2+}]^m [\text{OH}^-]^n$$
- Model kinetika:

$$J = A \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{kT}\right)$$

(Levenspiel, 1999)

- d. Reaksi pengendapan Magnesium (Mg^{2+}) dengan Natrium Katbonat (Na_2CO_3)



- Laju reaksi kimia;

$$-r_A = k \cdot C_A^m \cdot C_B^n$$

$$-r_{\text{Mg}^{2+}} = k [\text{Mg}^{2+}]^m [\text{CO}_3^{2-}]^n$$

- Model kinetika:

$$-r = k_f [\text{Mg}^{2+}] [\text{CO}_3^{2-}] - k_r [\text{MgCO}_3]$$

(Levenspiel, 1999)

1.3.3 Tinjauan Termodinamika

Tinjauan termodinamika digunakan untuk mempelajari sifat suatu reaksi, termasuk apakah reaksi tersebut eksotermis atau endotermis, serta apakah berlangsung secara *reversible* atau *irreversible*. Hal ini dapat dilakukan dengan mengamati perubahan entalpi selama jalannya reaksi. Adapun reaksi yang terjadi dalam proses pemurnian NaCl adalah sebagai berikut:

- Reaksi pengendapan Kalsium (Ca^{2+}) dengan Natrium Katbonat (Na_2CO_3)

$$\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 (\text{s}) + 2\text{NaCl} (\text{aq})$$
- Reaksi pengendapan Kalsium (Ca^{2+}) dengan Natrium Hidroksida (NaOH)

$$\text{CaCl}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Ca} (\text{OH})_2 (\text{s}) + 2\text{NaCl} (\text{aq})$$
- Reaksi pengendapan Magnesium (Mg^{2+}) dengan Natrium Hidroksida (NaOH)

$$\text{MgCl}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Mg} (\text{OH})_2 (\text{s}) + 2\text{NaCl} (\text{aq})$$
- Reaksi pengendapan Magnesium (Mg^{2+}) dengan Natrium Katbonat (Na_2CO_3)

$$\text{MgCl}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{MgCO}_3 (\text{s}) + 2\text{NaCl} (\text{aq})$$

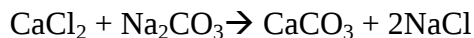
Perubahan entalpi menunjukkan jumlah energi panas yang diserap atau dilepaskan selama suatu reaksi kimia berlangsung. Besarnya nilai ΔH menggambarkan seberapa banyak kalor yang terlibat dalam proses tersebut. Jika ΔH bernilai positif, berarti reaksi membutuhkan energi dari lingkungan agar dapat terbentuk. Reaksi dikatakan bersifat eksotermis atau endotermis, dapat ditentukan dengan menghitung panas pembentukan standar (ΔH_f) dan panas penguapan standar (ΔH_g) pada tekanan 1 atm dan suhu 298 K.

Tabel 4 Data Panas Pembentukan Standar (ΔH_f°) dan Panas Penguapan Standar (ΔH_g°)

Zat Kimia	ΔH_f° (kJ/mol)	ΔG_f° (kJ/mol)
MgCl ₂	-641,30	-591,80
NaOH	-425,60	-379,50
Mg (OH) ₂	-924,7	-833,6
MgCO ₃	-1095,8	-1028,3
NaCl	-411,20	-384,1
CaCl ₂	-795,8	-748,1
Na ₂ CO ₃	-1130,7	-1046,8
Ca (OH) ₂	-986,2	-945,3
CaCO ₃	-1207	-1129,1

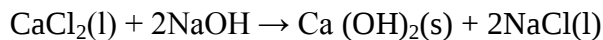
(Yaws, 1999)

- Pengendapan Kalsium (Ca²⁺) dengan Natrium Karbonat (Na₂CO₃):



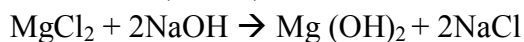
$$\begin{aligned}\Delta H_f^\circ \text{ reaksi} &= \Delta H_f^\circ \text{ produk} - \Delta H_f^\circ \text{ reaktan} \\ &= [(\Delta H_f^\circ \text{ CaCO}_3 + 2 \times \Delta H_f^\circ \text{ NaCl}) - (\Delta H_f^\circ \text{ CaCl}_2 + \Delta H_f^\circ \text{ Na}_2\text{CO}_3)] \\ &= [(-1207 + (2 \times (-411,20))) - (-795,8 + (-1130,7))] \\ &= [(-2029,4) - (-1926,5)] \\ &= -102,9 \text{ kJ/mol (reaksi eksotermis)}\end{aligned}$$

- Pengendapan Kalsium (Ca²⁺) dengan Natrium Hidroksida (NaOH)



$$\begin{aligned}\Delta H_f^\circ \text{ reaksi} &= \Delta H_f^\circ \text{ produk} - \Delta H_f^\circ \text{ reaktan} \\ &= [(\Delta H_f^\circ \text{ Ca (OH)}_2 + 2 \times \Delta H_f^\circ \text{ NaCl}) - (\Delta H_f^\circ \text{ CaCl}_2 + 2 \times \Delta H_f^\circ \text{ NaOH})] \\ &= [(-986,2) + (2 \times -411,20)) - (-795,8 + 2 \times (-425,60))] \\ &= [(-1808,6) - (-1647)] \\ &= -161,6 \text{ kJ/mol (reaksi eksotermis)}\end{aligned}$$

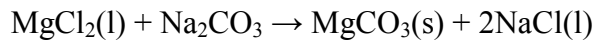
- Pengendapan Magnesium (Mg²⁺) dengan Natrium Hidroksida (NaOH)



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

$$\begin{aligned}
 &= [(\Delta H^{\circ f}_{\text{Mg (OH)}_2} + 2 \times \Delta H^{\circ f}_{\text{NaCl}}) - (\Delta H^{\circ f}_{\text{MgCl}_2} + 2 \times \Delta H^{\circ f}_{\text{NaOH}})] \\
 &= [(-924,7 + (2 \times (-411,20))) - (-641,30 + (2 \times (-425,60)))] \\
 &= [(-1747,1) - (-1492,5)] \\
 &= -254,6 \text{ kJ/mol (reaksi eksotermis)}
 \end{aligned}$$

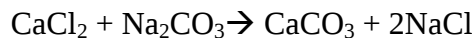
- Pengendapan Magnesium (Mg^{2+}) dengan Natrium Karbonat (Na_2CO_3)



$$\begin{aligned}
 \Delta H^{\circ f}_{\text{reaksi}} &= \Delta H^{\circ f}_{\text{produk}} - \Delta H^{\circ f}_{\text{reaktan}} \\
 &= [(\Delta H^{\circ f}_{\text{MgCO}_3} + 2 \times \Delta H^{\circ f}_{\text{NaCl}}) - (\Delta H^{\circ f}_{\text{MgCl}_2} + \Delta H^{\circ f}_{\text{Na}_2\text{CO}_3})] \\
 &= [(-1095,8 + (2 \times (-411,20))) - ((-641,30) + (-1130,7))] \\
 &= [(-1918,2) - (-1771,7)] \\
 &= -146,5 \text{ kJ/mol (reaksi eksotermis)}
 \end{aligned}$$

Energi Gibbs standar digunakan untuk menganalisis apakah suatu reaksi kimia dapat terjadi secara spontan atau memerlukan energi tambahan. Jika ΔG bernilai positif, reaksi tidak akan berlangsung dengan sendirinya dan membutuhkan suplai energi dari lingkungan agar dapat berlangsung. Reaksi semacam ini disebut sebagai reaksi endergonik. Sebaliknya, jika ΔG memiliki nilai negatif, reaksi dapat berjalan secara spontan tanpa dukungan energi eksternal, karena sistem sendiri yang melepaskan energi selama proses berlangsung. Reaksi dengan ΔG negatif dikenal sebagai reaksi eksergonik.

- Pengendapan Kalsium (Ca^{2+}) dengan Natrium Karbonat (Na_2CO_3):



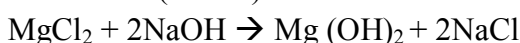
$$\begin{aligned}
 \Delta G^{\circ f}_{\text{reaksi}} &= \Delta G^{\circ f}_{\text{produk}} - \Delta G^{\circ f}_{\text{reaktan}} \\
 &= [(\Delta G^{\circ f}_{\text{CaCO}_3} + 2 \times \Delta G^{\circ f}_{\text{NaCl}}) - (\Delta G^{\circ f}_{\text{CaCl}_2} + \Delta G^{\circ f}_{\text{Na}_2\text{CO}_3})] \\
 &= [(-1129,1 + (2 \times (-384,1))) - (-748,1 + (-1046,8))] \\
 &= [(-1897,3) - (-1794,9)] \\
 &= -3692,2 \text{ kJ/mol (reaksi eksotermis)}
 \end{aligned}$$

- Pengendapan Kalsium (Ca^{2+}) dengan Natrium Hidroksida (NaOH)



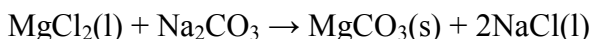
$$\begin{aligned}\Delta G^{\circ}_{\text{reaksi}} &= \Delta G^{\circ}_{\text{produk}} - \Delta G^{\circ}_{\text{reaktan}} \\ &= [(\Delta G^{\circ}_{\text{Ca}(\text{OH})_2} + 2 \times \Delta G^{\circ}_{\text{NaCl}}) - (\Delta G^{\circ}_{\text{CaCl}_2} + 2 \times \Delta G^{\circ}_{\text{NaOH}})] \\ &= [(-945,3) + (2 \times -348,1)) - (-748,1 + 2 \times (-379,50))] \\ &= [(-1641,5) - (-1507,1)] \\ &= -134,4 \text{ kJ/mol (reaksi eksotermis)}\end{aligned}$$

- Pengendapan Magnesium (Mg^{2+}) dengan Natrium Hidroksida (NaOH)



$$\begin{aligned}\Delta G^{\circ}_{\text{reaksi}} &= \Delta G^{\circ}_{\text{produk}} - \Delta G^{\circ}_{\text{reaktan}} \\ &= [(\Delta G^{\circ}_{\text{Mg}(\text{OH})_2} + 2 \times \Delta G^{\circ}_{\text{NaCl}}) - (\Delta G^{\circ}_{\text{MgCl}_2} + 2 \times \Delta G^{\circ}_{\text{NaOH}})] \\ &= [(-833,6 + (2 \times (-384,1))) - (-591,80 + (2 \times (-379,50)))] \\ &= [(-1601,8) - (-1350,8)] \\ &= -251 \text{ kJ/mol (reaksi eksotermis)}\end{aligned}$$

- Pengendapan Magnesium (Mg^{2+}) dengan Natrium Karbonat (Na_2CO_3)



$$\begin{aligned}\Delta G^{\circ}_{\text{reaksi}} &= \Delta G^{\circ}_{\text{produk}} - \Delta G^{\circ}_{\text{reaktan}} \\ &= [(\Delta G^{\circ}_{\text{MgCO}_3} + 2 \times \Delta G^{\circ}_{\text{NaCl}}) - (\Delta G^{\circ}_{\text{MgCl}_2} + \Delta G^{\circ}_{\text{Na}_2\text{CO}_3})] \\ &= [(-1028,3 + (2 \times (-384,1))) - ((-591,80) + (-1046,8))] \\ &= [(-1796,5) - (-1638,6)] \\ &= -157,9 \text{ kJ/mol (reaksi eksotermis)}\end{aligned}$$

Konstanta kesetimbangan (K) adalah suatu nilai yang diperoleh melalui hasil percobaan. Secara kuantitatif, konstanta ini digunakan untuk menentukan konsentrasi pereaksi dan produk dalam suatu sistem yang telah mencapai kesetimbangan. Secara kualitatif, K memberikan gambaran mengenai sejauh

mana suatu reaksi berlangsung menuju kondisi setimbang atau mendekati reaksi sempurna. Hubungan antara energi bebas dan konstanta kesetimbangan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta G = -RT \ln K$$

Keterangan:

ΔG = Energi Bebas Gibbs

R = Konstanta Gas ($8,314 \times 10^{-3} \text{ kJ/mol.K}$)

T = Temperatur (K)

K = Konstanta Kesetimbangan Reaksi

Pada keadaan standar, harga konstanta kesetimbangan (T = 298K sebagai

berikut:

- Pengendapan Kalsium (Ca^{2+}) dengan Natrium Karbonat (Na_2CO_3)

$$\begin{aligned} \ln K_{298} &= \frac{-\Delta G^\circ}{RT} \\ &= \frac{-(-102,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}})}{8,314 \times 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \cdot 298\text{K}} \\ &= 41,331 \\ K_{298} &= \exp(\ln K_{298}) \\ &= \exp(41,331) \\ &= 8,91 \times 10^{17} \\ \ln \frac{K_{298}}{K} &= \frac{-\Delta H_f}{RT} \left[\frac{1}{298\text{K}} - \frac{1}{T} \right] \\ &= \frac{-(-102,9) \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{8,314 \times 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}} \left[\frac{1}{298\text{K}} - \frac{1}{418\text{K}} \right] \\ &= 11,923 \\ K &= \frac{K_{298}}{\exp(11,923)} \\ &= \frac{8,91 \times 10^{17}}{150.693,01} = 5,91 \times 10^{12} \end{aligned}$$

- Pengendapan Kalsium (Ca^{2+}) dengan Natrium Hidroksida (NaOH)

$$\begin{aligned}
 \ln K_{298} &= \frac{-\Delta G^\circ}{RT} \\
 &= \frac{-(-134,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}})}{8,314 \times 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \cdot 298 \text{K}} \\
 &= 54,247 \\
 K_{298} &= \exp(\ln K_{298}) \\
 &= \exp(54,247) \\
 &= 83,62 \times 10^{23} \\
 \ln \frac{K_{298}}{K} &= \frac{-\Delta H_f}{RT} \left[\frac{1}{298 \text{K}} - \frac{1}{T} \right] \\
 &= \frac{-(-161,6 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}})}{8,314 \times 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}} \left[\frac{1}{298 \text{K}} - \frac{1}{418 \text{K}} \right] \\
 &= 15,573 \\
 K &= \frac{K_{298}}{\exp(15,573)} \\
 &= \frac{83,62 \times 10^{23}}{5.797.863,24} = 1,44 \times 10^{18}
 \end{aligned}$$

- Pengendapan Magnesium (Mg^{2+}) dengan Natrium Hidroksida (NaOH)

$$\begin{aligned}
 \ln K_{298} &= \frac{-\Delta G^\circ}{RT} \\
 &= \frac{-(-251 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}})}{8,314 \times 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \cdot 298 \text{K}} \\
 &= 101,309 \\
 K_{298} &= \exp(\ln K_{298}) \\
 &= \exp(101,309) \\
 &= 9,95 \times 10^{43} \\
 \ln \frac{K_{298}}{K} &= \frac{-\Delta H_f}{RT} \left[\frac{1}{298 \text{K}} - \frac{1}{T} \right] \\
 &= \frac{-(-254,6) \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{8,314 \times 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}} \left[\frac{1}{298 \text{K}} - \frac{1}{418 \text{K}} \right] \\
 &= 29,501 \\
 K &= \frac{K_{298}}{\exp(29,501)} \\
 &= \frac{9,95 \times 10^{43}}{6,49 \times 10^{12}} = 1,49 \times 10^{31}
 \end{aligned}$$

- Pengendapan Magnesium (Mg^{2+}) dengan Natrium Karbonat (Na_2CO_3)

$$\begin{aligned}
 \ln K_{298} &= \frac{-\Delta G^\circ}{RT} \\
 &= \frac{-(-157,9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}})}{8,314 \times 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \cdot 298\text{K}} \\
 &= 63,732 \\
 K_{298} &= \exp(\ln K_{298}) \\
 &= \exp(63,732) \\
 &= 4,77 \times 10^{27} \\
 \ln \frac{K_{298}}{K} &= \frac{-\Delta H_f}{RT} \left[\frac{1}{298\text{K}} - \frac{1}{T} \right] \\
 &= \frac{-(-146,5) \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{8,314 \times 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \cdot \text{K}} \left[\frac{1}{298\text{K}} - \frac{1}{418\text{K}} \right] \\
 &= 16,975 \\
 K &= \frac{K_{298}}{\exp(16,975)} \\
 &= \frac{4,77 \times 10^{27}}{23.558.564,8} = 2,02 \times 10^{20}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil tinjauan termodinamika di atas, reaksi terjadi secara *irreversible* yang ditandai dengan tingginya nilai nilai K jauh lebih besar dari 1. Nilai K yang sedikit lebih besar dari 1 menunjukkan bahwa energi bebas Gibbs dari produk sedikit lebih rendah dibandingkan pereaksi, sehingga reaksi cenderung berlangsung ke arah pembentukan produk, meskipun perubahan energi dalam sistem relatif kecil.