



BAB II

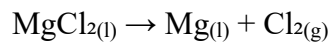
PEMILIHAN DAN URAIAN PROSES

II.1 Macam Proses

Pembuatan klorin dapat dilakukan melalui berbagai metode dengan memanfaatkan bahan baku yang berbeda-beda. Secara umum, terdapat empat jenis proses utama yang dapat digunakan untuk menghasilkan klorin, diantaranya sebagai berikut :

1. Proses elektrolisis MgCl_2

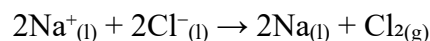
Pembuatan klorin dapat dilakukan melalui proses elektrolisis magnesium klorida (MgCl_2) cair. Reaksi elektrolisis yang terjadi dapat dinyatakan sebagai berikut:



Proses ini bersifat endotermis dan berlangsung di dalam reaktor elektrolisis pada suhu operasi sekitar 670–730 °C dengan tekanan 1 atm. Selama proses elektrolisis, ion magnesium (Mg^{2+}) bermigrasi menuju katoda dan tereduksi membentuk magnesium dalam bentuk pasta yang selanjutnya dapat dicetak. Sementara itu, ion klorida (Cl^-) bergerak menuju anoda dan mengalami oksidasi menghasilkan gas klorin (Cl_2) yang keluar dalam fase gas.

2. Proses elektrolisis lelehan NaCl

Pembuatan klorin dapat dilakukan melalui proses elektrolisis lelehan natrium klorida (NaCl). Reaksi elektrolisis yang terjadi dapat dituliskan sebagai berikut:



Dalam proses ini, NaCl padat terlebih dahulu dilelehkan, kemudian lelehannya dimasukkan ke dalam reaktor sel elektrolisis dan dialiri arus listrik searah (DC). Pada kondisi tersebut, NaCl terurai menjadi ion Na^+ dan Cl^- . Proses elektrolisis berlangsung pada suhu operasi yang tinggi, yaitu sekitar 810 °C. Selama elektrolisis, ion Na^+ bergerak menuju katoda dan mengalami reduksi sehingga mengendap serta menempel pada permukaan katoda,

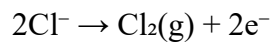


sedangkan ion Cl^- bergerak menuju anoda dan teroksidasi membentuk gas klorin (Cl_2).

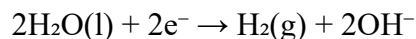
3. Proses elektrolisis NaCl

Pada umumnya, bahan baku larutan natrium klorida diperoleh dari garam berkualitas industri yang dilarutkan dalam sejumlah air. Proses pembuatan klorin dari larutan NaCl dilakukan melalui elektrolisis, yaitu pemecahan senyawa menggunakan energi listrik. Reaksi elektrolisis ini terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu reaksi oksidasi di anoda dan reaksi reduksi di katoda. Reaksi elektrokimia yang terjadi dapat dijelaskan sebagai berikut:

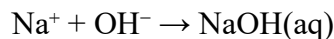
Reaksi pada anoda (oksidasi):



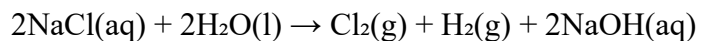
Reaksi pada katoda (reduksi):



Reaksi samping:



Reaksi keseluruhan:



Selama proses elektrolisis, pada bagian katoda terbentuk gelembung gas hidrogen (H_2) dan ion OH^- yang menyebabkan larutan bersifat basa. Hal ini dapat dibuktikan dengan penambahan indikator fenolftalein yang mengubah warna larutan dari bening menjadi merah muda. Sementara itu, gas klorin (Cl_2) terbentuk dan dilepaskan pada bagian anoda. Proses ini umumnya berlangsung pada tekanan atmosfer.

Dalam proses klor-alkali, terdapat kondisi khusus yang harus diperhatikan, yaitu gas klorin yang terbentuk tidak boleh bersentuhan dengan larutan natrium hidroksida (NaOH) karena dapat menurunkan kualitas produk serta menimbulkan risiko keselamatan. Oleh karena itu, ruang anoda dan katoda dipisahkan menggunakan sekat berupa diafragma atau membran. Sekat ini bersifat berpori sehingga memungkinkan perpindahan ion, namun mencegah pencampuran produk anolit dan katolit serta menghindari pencampuran gas hidrogen dan klorin yang dapat menyebabkan ledakan (O'Brien, 2005).



Berdasarkan metode pemisahan antara anolit dan katolit, proses elektrolisis NaCl untuk pembuatan klorin dibedakan menjadi beberapa teknologi, yaitu:

A. Teknologi Sel Diafragma

Teknologi sel diafragma merupakan pengembangan dari teknologi sel merkuri. Diafragma berfungsi sebagai pemisah antara anoda dan katoda dan terbuat dari bahan berserat berpori yang terisi larutan elektrolit. Keunggulan utama teknologi ini adalah tidak memerlukan umpan garam dengan kemurnian tinggi. Namun, kelemahannya adalah produk yang dihasilkan memiliki tingkat kemurnian lebih rendah karena pemisahan ion tidak berlangsung secara sempurna.

A. Teknologi Sel Membran

Sel membran merupakan pengembangan lebih lanjut dari teknologi sel diafragma. Teknologi ini menggunakan membran selektif yang hanya memungkinkan ion Na^+ melewati membran, sementara ion Cl^- dan OH^- tertahan. Efisiensi proses dengan sel membran tergolong tinggi, mencapai sekitar 95%. Keunggulan utama sel membran adalah produksi gas klorin yang lebih besar dengan kemurnian tinggi, meskipun membutuhkan umpan garam dengan kualitas yang sangat baik. Membran yang umum digunakan adalah perfluoro-sulfonic acid dengan nama dagang Nafion, yang memiliki ketahanan kimia tinggi, resistansi listrik rendah, serta kekuatan mekanik yang baik (Millet, 2013).

4. Proses Weldon

Pembuatan klorin dapat dilakukan melalui proses Weldon, yaitu dengan mereaksikan mangan dioksida (MnO_2) dan asam klorida (HCl) pada suhu operasi sekitar 100–110 °C. Pada kondisi tersebut, reaksi menghasilkan gas klorin, mangan klorida, dan air, yang dapat dinyatakan melalui persamaan reaksi kesetimbangan sebagai berikut:



Mangan klorida (MnCl_2) yang terbentuk dalam proses ini tidak sepenuhnya dianggap sebagai produk samping, karena dapat didaur ulang untuk meningkatkan konversi reaksi secara keseluruhan. Namun demikian, pada



PRA RANCANGAN PABRIK
PABRIK KLOLIN DARI GARAM LAUT DENGAN PROSES
ELEKTROLISIS SEL MEMBRAN

pelaksanaannya sebagian mangan dan klorin tetap mengalami kehilangan akibat terbentuknya senyawa $MnCl_2$, sehingga efisiensi proses tidak mencapai 100% (O'Brien, 2005).

II.2 Seleksi Proses

Tabel II.1 Perbandingan Proses Pembuatan Klorin

Parameter	Elektrolisis Lelehan NaCl	Elektrolisis $MgCl_2$	Proses Weldon	Elektrolisis NaCl Sel Membran	Elektrolisis NaCl Sel Diafragma
Bahan Baku	NaCl	$MgCl_2$	MnO_2 , HCl	NaCl, H_2O	NaCl, H_2O
Suhu Proses	800–810 °C	670–730 °C	100–110 °C	85 °C	±30 °C
Tekanan Operasi	Atmosfer	Atmosfer	Atmosfer	Atmosfer	Atmosfer
Kompleksitas Proses	Sederhana	Sederhana	Kompleks	Sederhana	Sederhana
Konsumsi Energi	Sangat tinggi	Tinggi	Sedang	Rendah	Rendah
Produk Utama	Cl_2	Cl_2	Cl_2	Cl_2	Cl_2
Prosentase Kemurnian Produk Utama	99%	98%	85%	99%	90%
Produk Samping	—	—	$MnCl_2$, H_2O	H_2 , NaOH	H_2 , NaOH

Berdasarkan uraian berbagai metode pembuatan klorin yang telah dipaparkan, dapat disimpulkan bahwa proses elektrolisis NaCl dengan teknologi sel membran merupakan metode yang paling efisien dan efektif. Proses ini memiliki sejumlah keunggulan, antara lain:

1. Ketersediaan bahan baku yang melimpah dan mudah diperoleh di Indonesia, karena menggunakan natrium klorida sebagai bahan utama.
2. Suhu operasi relatif rendah, sehingga konsumsi energi lebih kecil dibandingkan proses pembuatan klorin lainnya.

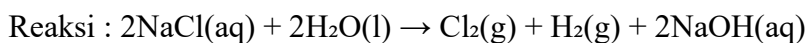


3. Tingkat kemurnian produk yang tinggi, baik untuk klorin maupun produk samping yang dihasilkan.
4. Rangkaian proses yang lebih sederhana, sehingga lebih mudah dioperasikan dan dikendalikan.
5. Produk samping bernilai ekonomi, seperti gas hidrogen dan natrium hidroksida, yang dapat dimanfaatkan atau dipasarkan kembali.

II.3 Analisis Potensial Ekonomi

Tabel II.2 Harga Bahan Baku dan Produk serta Sumber

Komponen	BM (kg/kmol)	Harga/kg (Rp)	Sumber
NaCl	58,5	8.000	Garam dari air laut
H ₂ O	18	0	Air Laut
Cl ₂	70,9	19.425	Mbizmarket
NaOH	40	25.000	Alibaba
H ₂	2,02	50.000	Alibaba



Untuk menghasilkan 1 kmol Cl₂, kebutuhan bahan baku dan produk ditentukan berdasarkan koefisien stoikiometri reaksi tersebut, dengan penjelasan sebagai berikut:

a) Natrium klorida (NaCl)

Berdasarkan persamaan reaksi, pembentukan 1 kmol Cl₂ memerlukan 2 kmol NaCl. Oleh karena itu, jumlah NaCl yang dibutuhkan adalah 2 kmol.

b) Air (H₂O)

Air berperan sebagai reaktan dalam proses elektrolisis. Dari persamaan reaksi, untuk setiap 1 kmol Cl₂ yang terbentuk diperlukan 2 kmol H₂O. Dengan demikian, kebutuhan air adalah 2 kmol.

c) Gas klorin (Cl₂)

Berdasarkan stoikiometri reaksi, 1 kmol Cl₂ dihasilkan sebagai produk utama dari proses elektrolisis NaCl.



PRA RANCANGAN PABRIK
PABRIK KLOLIN DARI GARAM LAUT DENGAN PROSES
ELEKTROLISIS SEL MEMBRAN

d) Gas hidrogen (H_2)

Reaksi elektrolisis juga menghasilkan 1 kmol H_2 sebagai produk samping untuk setiap 1 kmol Cl_2 yang terbentuk.

e) Natrium hidroksida (NaOH)

Selain gas klorin dan hidrogen, proses elektrolisis menghasilkan 2 kmol NaOH untuk setiap 1 kmol Cl_2 yang diproduksi, sesuai dengan koefisien reaksi.

Tabel II.3 Mol $\rightarrow$ Kg:

Komponen	kmol	BM (kg/kmol)	Total (kg)
NaCl	2	58,5	117
H_2O	2	18	36
Cl_2	1	70,9	70,9
H_2	1	2,02	2,02
NaOH	2	40	80

Tabel II.4 Total Biaya Bahan Baku

Komponen	Jumlah (kg)	Harga/kg (Rp)	Biaya (Rp)
NaCl	117	8.000	936.000
H_2O	36	0	0
Total Biaya Bahan Baku			Rp 936.000

Tabel II.5 Total Nilai Produk

Komponen	Jumlah (kg)	Harga/kg (Rp)	Nilai (Rp)
Cl_2	70,9	19.425	Rp 1.376.483
H_2	2,02	50.000	Rp 101.000
NaOH	80	25.000	Rp 2.000.000
Total Nilai Produk			Rp 3.477.483



Potensial Ekonomi (PE)

$$\begin{aligned}\text{PE} &= \text{Total Hasil Produk} - \text{Biaya Bahan Baku} \\ &= \text{Rp } 3.477.483 - \text{Rp } 936.000 \\ &= \text{Rp } 2.541.483 \text{ per } 1 \text{ kmol Cl}_2\end{aligned}$$

II.4 Uraian Proses

Proses produksi klorin melalui elektrolisis garam laut terdiri atas tiga tahapan utama, yaitu tahap persiapan bahan baku, tahap elektrolisis, dan tahap pemurnian produk. Selain menghasilkan klorin sebagai produk utama, proses ini juga menghasilkan gas hidrogen (H_2) dan natrium hidroksida (NaOH) sebagai produk samping.

II.4.1 Tahap Persiapan Bahan Baku

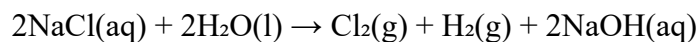
Pada tahap persiapan bahan baku, digunakan garam padat berupa garam grosok sebagai sumber natrium klorida (NaCl). Garam grosok merupakan garam hasil penguapan air laut yang masih mengandung berbagai pengotor seperti pasir, lumpur, serta ion-ion pengotor seperti kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan sulfat (SO_4^{2-}). Oleh karena itu, sebelum digunakan dalam proses elektrolisis, garam grosok harus melalui tahap pelarutan dan pemurnian. Garam grosok terlebih dahulu dilarutkan dalam air pada unit pelarut garam (salt dissolver) untuk menghasilkan larutan brine. Larutan ini kemudian dialirkan ke unit pengolahan awal (brine treater) dengan penambahan bahan kimia seperti natrium karbonat (Na_2CO_3) dan natrium hidroksida (NaOH). Penambahan bahan kimia tersebut bertujuan untuk mengendapkan ion-ion pengotor, terutama Ca^{2+} dan Mg^{2+} , dalam bentuk senyawa yang tidak larut. Selanjutnya, campuran dialirkan ke unit klarifikasi (clarifier) untuk memisahkan endapan dari larutan melalui proses sedimentasi. Larutan jernih hasil klarifikasi kemudian dialirkan ke tangki umpan filtrasi dan dilanjutkan ke unit penyaringan (brine filters) guna menghilangkan partikel halus yang masih tersisa. Untuk mencapai kemurnian yang tinggi sesuai kebutuhan membrane cell, larutan brine selanjutnya diproses dalam kolom penukar ion (ion-exchange column) untuk



menghilangkan sisa ion multivalen. Brine yang telah dimurnikan kemudian ditampung dalam tangki brine murni sebelum dialirkan ke unit elektrolisis.

II.4.2 Tahap Elektrolisis

Tahap berikutnya adalah proses elektrolisis yang berlangsung dalam reaktor membrane electrolyzer. Reaktor ini dilengkapi dengan membran semipermeabel terdiri atas dua kompartemen, yaitu anoda dan katoda, yang dipisahkan oleh membran penukar ion selektif. Pada kompartemen anoda terjadi reaksi oksidasi ion klorida (Cl^-) menjadi gas klorin (Cl_2), sedangkan pada kompartemen katoda terjadi reaksi reduksi air yang menghasilkan gas hidrogen (H_2) dan ion hidroksida (OH^-). Ion natrium (Na^+) dari larutan brine akan bermigrasi melalui membran menuju kompartemen katoda dan bereaksi dengan ion hidroksida membentuk natrium hidroksida (NaOH). Anoda dilapisi titanium katalitik, sedangkan badan sel terbuat dari polimer yang tahan terhadap korosi. Secara keseluruhan, reaksi yang terjadi adalah :



Proses elektrolisis berlangsung pada suhu sekitar 85°C dan tekanan 1 atm. Produk yang dihasilkan berupa gas klorin sebagai produk utama, serta gas hidrogen dan larutan NaOH sebagai produk samping, dengan tingkat kemurnian klorin yang dapat mencapai sekitar 99%.

Setelah proses elektrolisis, larutan yang keluar dari sel disebut sebagai depleted brine karena kandungan NaCl di dalamnya telah berkurang. Larutan ini masih mengandung sejumlah klorin terlarut sehingga perlu diolah lebih lanjut pada unit deklorinasi (dechlorinator). Pada unit ini, klorin terlarut dihilangkan, umumnya melalui proses stripping atau penggunaan vakum. Setelah proses deklorinasi, brine dapat dialirkan kembali ke unit pelarutan garam untuk digunakan ulang sebagai bagian dari sistem resirkulasi. Sistem ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan bahan baku serta mengurangi limbah proses.



II.4.3 Tahap Pemurnian Produk

Tahap terakhir adalah pemurnian produk hasil elektrolisis. Gas klorin yang dihasilkan dari kompartemen anoda umumnya masih mengandung uap air sehingga perlu didinginkan dan dikeringkan sebelum disimpan atau digunakan lebih lanjut. Pengeringan ini penting untuk mencegah terjadinya korosi pada peralatan. Gas hidrogen yang dihasilkan dari kompartemen katoda juga mengalami proses pendinginan dan pengeringan sebelum dimanfaatkan, misalnya sebagai bahan bakar atau bahan baku industri lain. Sementara itu, larutan natrium hidroksida yang dihasilkan masih dalam konsentrasi rendah (weak caustic), sehingga perlu dikonsentrasikan melalui proses evaporasi hingga mencapai konsentrasi sekitar 50%