



UNIVERSITAS INDONESIA

**ELEKTROLISIS PLASMA PADA PROSES PRODUKSI KLOOR
ALKALI MENGGUNAKAN LARUTAN KALIUM KLOORIDA**

SKRIPSI

ADIBOWO MURSID

0806332686

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA**

DEPOK

JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**ELEKTROLISIS PLASMA PADA PROSES PRODUKSI KLOOR
ALKALI MENGGUNAKAN LARUTAN KALSIUM KLOORIDA**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

ADIBOWO MURSID

0806332686

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA

UNIVERSITAS INDONESIA

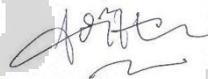
JUNI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar**

Nama : Adibowo Mursid

NPM : 0806332686

Tanda Tangan : 

Tanggal : 27 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Adibowo Mursid
NPM : 0806 332 686
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Elektrolisis Plasma Pada Proses Produksi Klor Alkali
Menggunakan Larutan Kalium Klorida

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Nelson Saksono, MT.
Penguji : Prof. Sutrasno K., MSc.
Penguji : Ir. Yuliusman, MSc
Penguji : M. Ibadurrohman, ST., MT., MSc. Ing



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 27 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT., karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi dengan judul Elektrolisis Plasma Pada Proses Produksi Klor Alkali Menggunakan Larutan Kalium Klorida dilakukan untuk mempublikasikan penelitian dan sebagai sumbangsih teknologi untuk masyarakat. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Orang tua dan keluarga yang selalu memberi dukungan dalam segala hal yang tidak mungkin saya sebutkan satu per satu.
- (2) Bapak Dr. Ir. Nelson Saksono, MT. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
- (3) Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA., selaku kepala Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
- (4) Bapak Prof. Ir. Setijo Bismo, DEA selaku pembimbing akademis.
- (5) Fakhrian, Krisna, Bagus, Taher, Viktor dan segenap mahasiswa Laboratorium Intensifikasi Proses atas kerjasama dan dukungan selama proses penelitian.
- (6) Mba Tiwi, Mang Ijal, dan Kang Jajat selaku laboran yang banyak membantu dan memberi arahan selama proses penelitian
- (7) Segenap teman-teman Departemen Teknik Kimia UI 2008, atas semangatnya selama proses pengambilan data dan penyelesaian skripsi ini.

Saya menyadari bahwa laporan skripsi ini masih jauh dari sempurna dengan segala keterbatasan yang ada. Oleh karena itu, semua saran dan kritik yang membangun sangat saya harapkan.

Akhir kata, saya berharap kepada Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu dan semoga hasil penelitian ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 21 Juni 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Adibowo Mursid

NPM : 0806332686

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**ELEKTROLISIS PLASMA PADA PROSES PRODUKSI KLOOR ALKALI
MENGUNAKAN LARUTAN KALSIUM KLOORIDA**

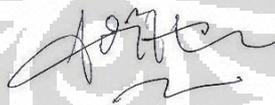
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 21 Juni 2012

Yang menyatakan



(Adibowo Mursid)

ABSTRAK

Nama : Adibowo Mursid
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Elektrolisis Plasma Pada Proses Produksi Klor Alkali Menggunakan Larutan Kalium Klorida

Konsumsi energi proses produksi klor alkali yang tinggi mendorong perlu dilakukannya peningkatan efisiensi proses. Elektrolisis plasma merupakan modifikasi proses elektrolisis yang dapat meningkatkan nilai produksi dan efisiensi energi hingga berkali-kali lipat. Penelitian ini menggunakan larutan kalium klorida sebagai bahan baku elektrolisis untuk memproduksi gas klor sebagai produk utama. Pada penelitian ini, berbagai fenomena terkait pembentukan plasma dijelaskan, seperti intensitas warna, penurunan nilai arus, dan pengaruh ketinggian elektroda. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi tertinggi didapat pada konsentrasi tertinggi dan tegangan 400 V dengan peningkatan efisiensi terhadap proses elektrolisis mencapai 13 kali lebih besar.

Kata Kunci :

Elektrolisis plasma, klor-alkali, kalium klorida

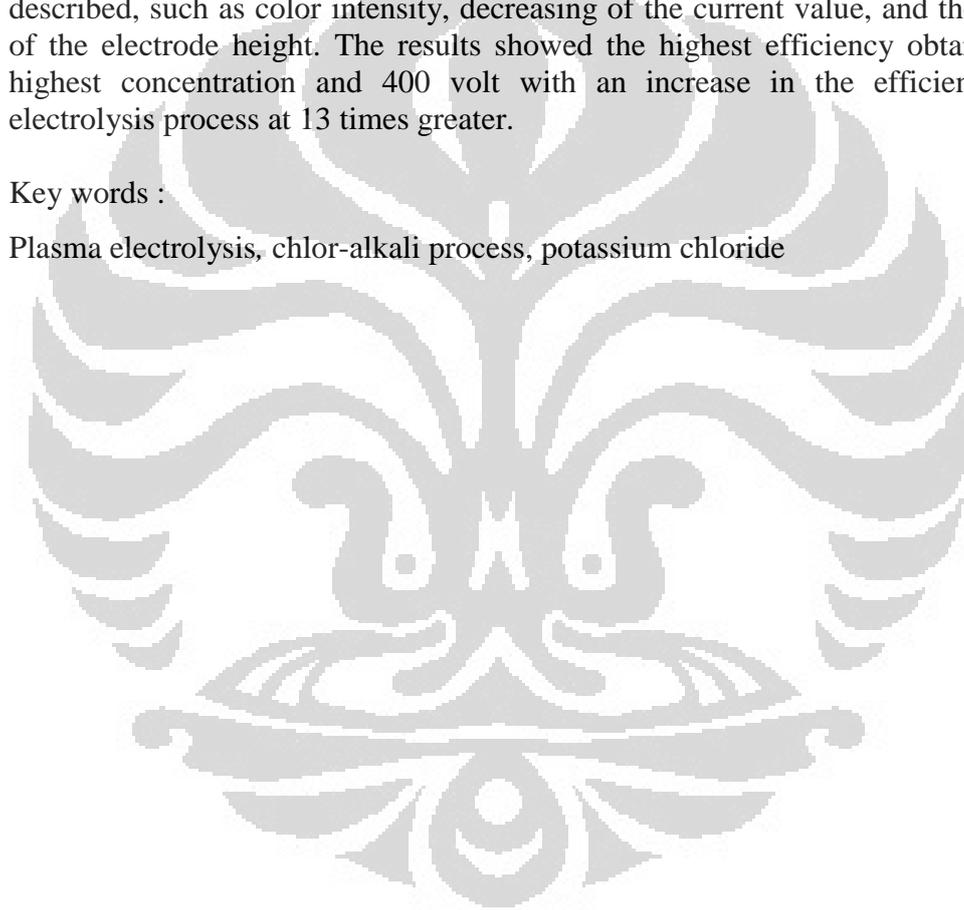
ABSTRACT

Name : Adibowo Mursid
Study Program : Chemical Engineering
Title : Plasma Electrolysis In Chloralkali Process Using Potassium Chlorida Solution

High energy consumption of chlor-alkali process encourage the importance of the efficiency improvement. Plasma electrolysis is a modification of electrolysis method that can increase productivity and efficiency level up to several times. This study uses a solution of potassium chloride as a raw material to produce chlorine gas as the main product. In this study, various phenomena related to plasma formation are described, such as color intensity, decreasing of the current value, and the influence of the electrode height. The results showed the highest efficiency obtained at the highest concentration and 400 volt with an increase in the efficiency of the electrolysis process at 13 times greater.

Key words :

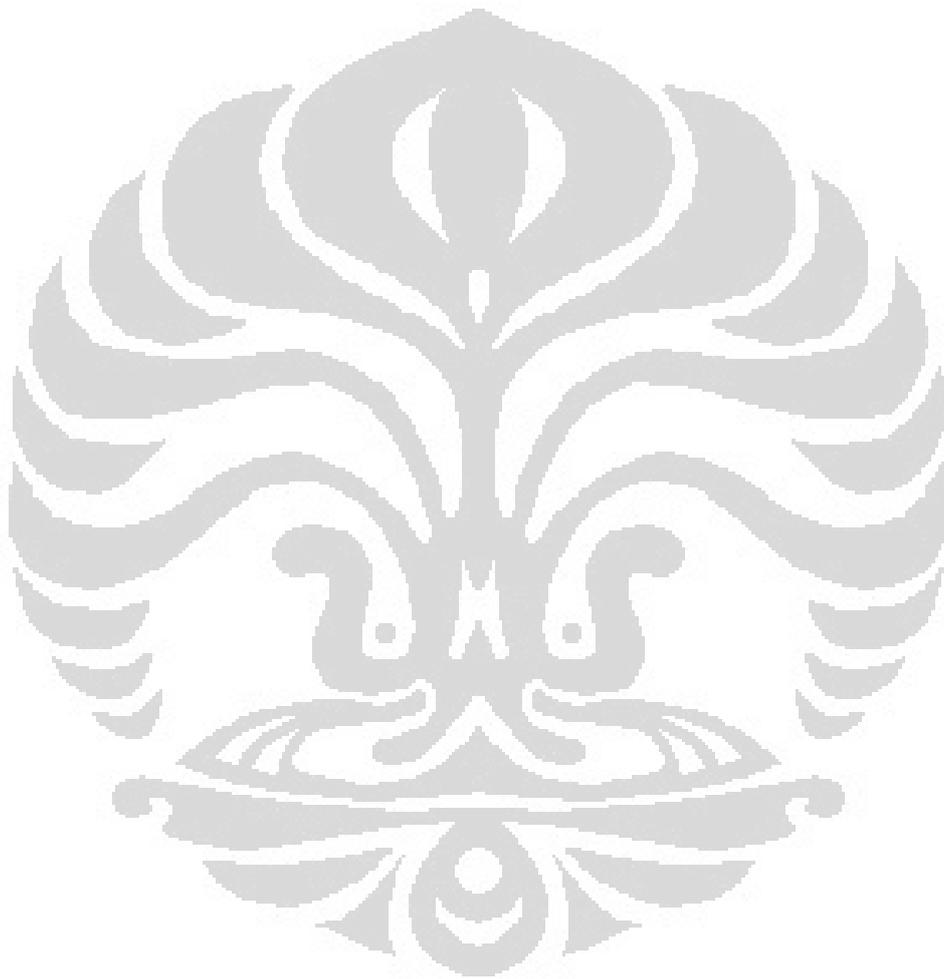
Plasma electrolysis, chlor-alkali process, potassium chloride



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Penelitian	3
1.6 Sistematika Penelitian.....	3
BAB 2 TINJAUAN TEORI.....	5
2.1 Industri Klor Alkali.....	5
2.1.1 Produk dari Proses Klor Alkali	5
2.1.2 Metode Proses Produksi Klor Alkali	7
2.2 Kalium Klorida Sebagai Bahan Baku Proses Klor Alkali	9
2.3 Proses Elektrolisis.....	9
2.4 Plasma	11
2.4.1 Elektrolisis Plasma.....	14
2.4.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Elektrolisis Plasma	15
2.5 Metode Analisis Titrasi.....	18
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Variabel Penelitian.....	19
3.2 Diagram Alir Penelitian	19
3.3 Bahan dan Peralatan Penelitian.....	21
3.4 Rancang Bangun Peralatan Elektrolisis Plasma.....	21
3.5 Preparasi Bahan	24
3.6 Uji Pendahuluan Peralatan Elektrolisis Plasma	25
3.7 Prosedur Penelitian	26
3.8 Perhitungan Produktivitas Proses Elektrolisis Plasma.....	27
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	28
4.1 Fenomena Terbentuknya Plasma dalam Larutan KCl	28
4.2. Hubungan Antara Tegangan dengan Arus	31
4.3 Produktivitas gas Cl ₂ dalam Proses Elektrolisis Plasma.....	34
4.4 Hubungan Tegangan dengan pH Larutan	37
4.5 Konsumsi Energi per Satuan Produk (W _r)	38
4.6 Perbandingan Proses Elektrolisis dengan Elektrolisis Plasma.....	39
4.7 Pengaruh Kedalaman Elektroda.....	41
4.8 Pengaruh Waktu Proses Elektrolisis Plasma Terhadap Produktivitas .	43

4.9 Perbandingan KCl dan NaCl sebagai larutan proses Klor alkali	44
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	45
DAFTAR REFERENSI	47
LAMPIRAN	

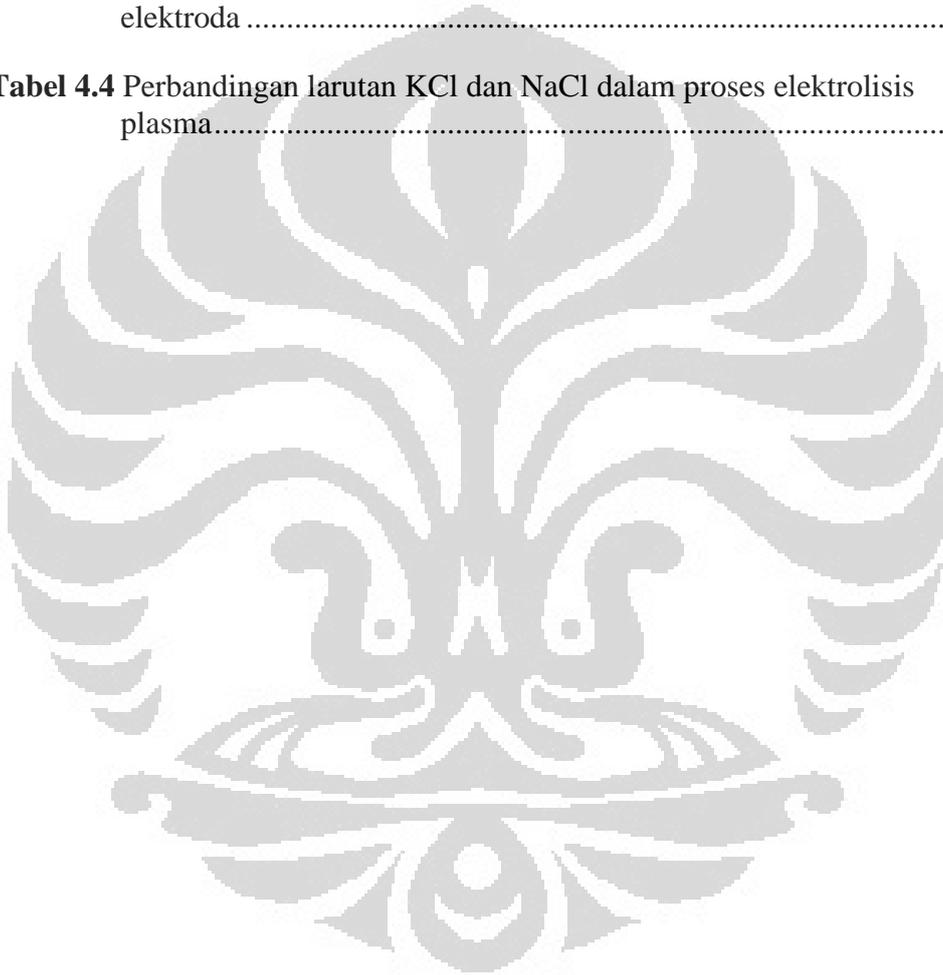


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Hubungan tegangan dan arus pada proses elektrolisis plasma.....	15
Gambar 2.2 Efek tegangan terhadap pembentukan radikal H \cdot pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal H \cdot	16
Gambar 2.3 Efek konduktivitas larutan terhadap produksi gas H $_2$ O $_2$	17
Gambar 2.4 Efek pH larutan terhadap pembentukan radikal H \cdot pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal H \cdot	17
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian.....	20
Gambar 3.2 Ilustrasi reaktor elektrolisis plasma	22
Gambar 3.3 Skema rangkaian alat elektrolisis plasma.....	24
Gambar 4.1 Perbandingan intensitas plasma dalam larutan KCl 0,05 M pada variasi tegangan	29
Gambar 4.2 Hubungan tegangan dan arus pada larutan 0,075 M KCl.....	32
Gambar 4.3 Fluktuasi arus proses elektrolisis plasma. 0,075 M KCl	32
Gambar 4.4 Hubungan tegangan dan arus dalam pembentukan plasma	33
Gambar 4.5 Hubungan antara konsentrasi dan tegangan terhadap produksi gas Cl $_2$	34
Gambar 4.6 Pengaruh tegangan dan konsentrasi terhadap kondisi pH larutan	37
Gambar 4.7 Data konsumsi energi per satuan produk.....	38
Gambar 4.8 perbandingan efisiensi energi elektrolisis plasma dan elektrolisis..	40
Gambar 4.9 Variasi kedalaman elektroda terhadap efisiensi proses.	42
Gambar 4.10 Uji stabilitas larutan selama 2 jam.....	43

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan tiga metode produksi klor alkali.....	8
Tabel 2.2 Sifat fisis kalium klorida	9
Tabel 4.1 Jumlah produksi gas total untuk 3 variasi tegangan.....	36
Tabel 4.2 Perbandingan elektrolisis plasma dengan elektrolisis pada konsentrasi 0,075 M	40
Tabel 4.3 Kondisi arus dan produksi gas klor untuk variasi kedalaman elektroda	41
Tabel 4.4 Perbandingan larutan KCl dan NaCl dalam proses elektrolisis plasma.....	44



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Efisiensi energi merupakan suatu permasalahan yang dihadapi oleh semua jenis industri yang ada. Peningkatan efisiensi industri tentu akan mendorong pertumbuhan sektor-sektor lain seperti perdagangan dan layanan jasa pada masyarakat seperti reaksi berantai. Dengan kata lain, di negeri yang luas ini dengan jumlah industri yang banyak, peningkatan efisiensi industri akan berdampak positif terhadap peningkatan pertumbuhan ekonomi nasional (Kunaifi, 2008).

Sektor industri merupakan salah satu pengonsumsi energi terbesar di Indonesia. Dari data PLN tahun 2010 diketahui bahwa konsumsi listrik sektor industri mencapai sebesar 22 terra watt hour (TWH) dari jumlah konsumsi listrik nasional sebesar 64.8 TWH menjadikan konsumsi listrik sektor industri sebesar 34% dari konsumsi listrik nasional. Maka dari itu, apabila ditemukan suatu cara untuk mengurangi konsumsi energi tersebut tentu akan menghasilkan keuntungan yang besar bagi negara ini.

Salah satu sektor industri yang mengonsumsi energi dalam jumlah besar adalah sektor industri klor alkali. Sektor industri klor alkali merupakan sektor industri yang menggunakan proses elektrolisis untuk menghasilkan gas klor dan natrium hidroksida sebagai bahan utamanya. Dalam prosesnya, industri ini menggunakan energi listrik yang besar sebagai bahan baku untuk mereaksikan larutan natrium klorida dalam air. Maka dari itu, perlu dilakukan suatu modifikasi dari cara yang ada untuk menurunkan jumlah energi listrik seiring meningkatkan jumlah produk proses elektrolisa tersebut.

Sampai saat ini, sudah banyak penelitian dilakukan terkait dengan elektrolisis untuk menghasilkan efisiensi produk yang lebih tinggi, salah satunya adalah proses elektrolisis plasma. Elektrolisis plasma pada dasarnya mirip dengan proses elektrolisis, namun perbedaannya terletak pada penggunaan tegangan listrik yang lebih tinggi untuk menghasilkan plasma. Penelitian yang sudah ada membuktikan bahwa untuk tegangan sebesar 300 V, jumlah produksi gas dapat

berjumlah 8 kali lebih banyak dibandingkan proses elektrolisis biasa (Mizuno, dkk. 2005). Sampai saat ini juga sedang dikembangkan berbagai penelitian terkait dengan elektrolisis plasma dengan menggunakan berbagai senyawa kimia seperti KOH, NaCl, dan lain-lain. Namun demikian, penelitian elektrolisis plasma menggunakan larutan KCl belum diteliti sebelumnya, padahal KCl memiliki potensi sebagai bahan baku pada proses produksi klor alkali.

Kalium klorida sendiri merupakan garam yang mudah dijumpai di pasaran dengan harga kompetitif dengan garam serupa natrium klorida. Kalium klorida merupakan garam yang dapat terionisasi dengan baik dalam pelarut air sehingga cocok digunakan dalam proses elektrolisis. Selain itu, kalium klorida juga memiliki nilai konduktivitas yang baik jika dibandingkan dengan garam natrium klorida.

Pada penelitian ini akan diuji berbagai variabel yang dapat mempengaruhi efisiensi dan produksi proses elektrolisis plasma menggunakan larutan kalium klorida. Berbagai variabel yang terkait diantara adalah konsentrasi larutan, tegangan dan keadaan elektroda yang digunakan. Variabel tersebut kemudian akan digunakan untuk menghitung nilai konsumsi energi dan jumlah produksi reaksi utama yang dibandingkan dengan proses elektrolisis biasa.

1.2 Perumusan Masalah

Industri klor alkali merupakan industri yang penting keberadaannya. Maka dari itu, yang menjadi permasalahan adalah:

1. Bagaimana pengaruh variabel operasi terhadap efektivitas proses elektrolisis plasma
2. Mengetahui efisiensi proses elektrolisis plasma dalam satuan energi per jumlah produksi dihasilkan.

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menguji variabel-variabel proses elektrolisis plasma, yaitu tegangan, konsentrasi, dan konfigurasi elektroda terhadap jumlah produksi gas dan keadaan larutan.

2. Membandingkan nilai efisiensi dan konsumsi energi proses elektrolisis plasma dengan proses elektrolisis biasa.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat secara umum yakni ke depannya proses produksi klor alkali dapat dilakukan dengan lebih efisien sehingga secara global dapat membantu mengurangi masalah krisis energi. Hal ini terkait dengan tingginya kebutuhan energi listrik proses klor alkali dan dampaknya terhadap kehidupan sehari-hari, mengingat kegunaan proses ini pada bahan-bahan rumah tangga seperti PVC dan bahan pemutih.

1.5 Batasan Penelitian

Penelitian ini dibatasi hal-hal sebagai berikut:

- a. Penelitian dilakukan sepenuhnya di Laboratorium Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia
- b. Kalium klorida yang digunakan sebagai larutan uji pada penelitian berasal dari inventaris Laboratorium Dasar Proses Kimia (DPK) Departemen Teknik Kimia FT-UI.
- c. Pengujian elektrolisis plasma dilakukan pada kondisi suhu kamar (25°C) dan tekanan atmosfer (1 atm)

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan makalah ini adalah sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang penelitian dan penulisan, rumusan masalah yang dibahas, tujuan dan manfaat dilakukannya penelitian, batasan-batasan masalah, serta sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tinjauan pustaka yang dijadikan dasar penelitian. Meliputi tinjauan proses produksi klor alkali, data produk, dan teori elektrolisis plasma serta faktor-faktor yang mempengaruhi.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Membahas mengenai prosedur penelitian, diagram alir penelitian, variabel-variabel yang terlibat dan digunakan pada penelitian ini, serta penjelasan tahapan uji penelitian.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Membahas aspek kualitatif yaitu fenomena plasma, dan aspek kuantitatif yang membahas produktivitas, efisiensi dan perbandingan proses elektrolisis plasma, serta faktor-faktor pendukung yang mempengaruhinya

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Industri Klor Alkali

Sektor industri klor alkali merupakan salah satu sektor industri yang menjadi tumpuan sektor industri kimia lain karena menjadi bahan baku dari sektor industri lain. Di Eropa, industri klor alkali menyokong sekitar 55% industri kimia dan farmasi Eropa yang memberikan keuntungan hingga 660 miliar pada tahun 2009 (*European Chlor Alkali Industry-Progress Report*, 2009).

Produk dari sektor industri klor alkali adalah gas klor, gas hidrogen, dan natrium hidroksida (NaOH). Dari ketiga bahan tersebut, yang menjadi produk primer adalah gas klor. Gas klor merupakan bahan kimia yang melimpah dan mempunyai kegunaan yang luas dalam sektor industri lain. Salah satu kegunaan gas klor adalah sebagai pemutih, pembersih dan desinfektan. Gas klor juga mempunyai kegunaan penting dalam produksi material, pelarut, dan insektisida. Gas klor dan natrium hidroksida merupakan bahan baku dari ribuan zat dan produk yang berguna bagi kehidupan manusia seperti: obat-obatan, detergen, deodoran, plastik, herbisida, insektisida, disinfektan, dan lain-lain. Sedangkan gas Hidrogen yang dihasilkan dari proses produksi klor alkali dapat digunakan untuk produksi amonia atau dapat pula digunakan sebagai bahan bakar produksi uap (Tegge, 1989).

2.1.1 Produk dari Proses Klor Alkali

Produk proses produksi klor alkali adalah gas klor, gas hidrogen dan basa kuat sebagai produk utama, serta kalium hipoklorit dan kalium klorat sebagai produk samping.

a. Gas Klor (Cl_2)

Gas klor (Cl_2) adalah unsur halogen kedua teringan. Klor memiliki afinitas elektron tertinggi dan keelektronegatifan ketiga tertinggi diantara semua elemen. Maka dari itu, klor merupakan unsur yang bersifat oksidator kuat. Gas klor secara volume paling banyak digunakan sebagai bahan pembuat polivinil klorida (PVC)

dengan 38% dari total produksi. PVC adalah bahan termoplastik yang banyak digunakan pada produk sehari-hari. Gas klor juga digunakan sebagai bahan pemutih industri kertas dan sebagai disinfektan air. Penggunaan lain gas klor adalah sebagai bahan pembuat berbagai bahan kimia organik dan inorganik.

Produksi gas klor dalam skala industri seluruhnya menggunakan proses klor alkali sedangkan untuk skala laboratorium dapat digunakan reaksi antara asam klorida dan mangan dioksida sebagai berikut:



Reaksi ini memiliki kelemahan yaitu produksi gas klor dalam jumlah relatif sedikit dan masalah pada mangan (II) klorida yang kurang memiliki nilai ekonomi, proses klor alkali lebih disukai untuk digunakan dalam pembuatan gas klor.

Secara umum, proses klor alkali menggunakan metode elektrolisis. Pada proses ini, larutan garam dielektrolisa menggunakan aliran listrik searah yang dapat mengkonversi ion klorida menjadi klor dalam bentuk elemen senyawa. Reaksi utama yang terjadi adalah



Pada metode ini, gas klor (Cl_2) dihasilkan pada elektroda positif (anoda) dan kalium hidroksida (KOH) dan gas hidrogen dihasilkan pada elektroda negatif. Dalam proses ini juga terbentuk produk sampingan seperti ion hipoklorit, klorat, dan lain sebagainya pada kondisi tertentu.

b. Gas Hidrogen (H_2)

Hidrogen adalah unsur kimia pada tabel periodik yang memiliki simbol H dan nomor atom 1. Hidrogen pada suhu dan tekanan standar, tidak berwarna, tidak berbau, bersifat non-logam, bervalensi tunggal, dan merupakan gas diatomik yang sangat mudah terbakar. Hidrogen adalah unsur teringan di dunia.

Sejumlah besar H_2 diperlukan dalam industri petrokimia dan kimia. Penggunaan terbesar H_2 adalah untuk memproses bahan bakar fosil dan dalam

pembuatan ammonia. Konsumen utama dari H_2 di kilang petrokimia meliputi hidrodealkilasi, hidrodesulfurisasi, dan *hydrocracking*. Selain digunakan sebagai pereaksi, H_2 memiliki penerapan yang luas dalam bidang fisika dan teknik. Gas hidrogen ini digunakan sebagai gas tameng di metode pengelasan seperti pengelasan hidrogen atomik.

Hidrogen dapat dihasilkan dari air melalui proses elektrolisis, namun metode konvensional ini secara komersial lebih mahal daripada produksi hidrogen dari gas alam.

c. Kalium Hidroksida (KOH)

Kalium hidroksida paling banyak dikenal sebagai bahan penetral keasaman karena sifatnya sebagai basa kuat. Kegunaan KOH dalam industri adalah sebagai bahan pembuat bahan organik seperti hipoklorit yang digunakan sebagai bahan pemutih industri atau rumah tangga.

d. Kalium Klorat ($KClO_3$)

Kalium klorat ($KClO_3$) merupakan bahan klorat yang paling banyak ditemukan sebagai bahan industri. Kalium klorat merupakan bahan kunci pembuat senjata api. Kalium klorat juga digunakan pada generator oksigen, seperti yang dapat ditemukan pada pesawat dan kapal selam. Pada beberapa negara, kalium klorat digunakan sebagai bahan pestisida.

2.1.2 Metode Proses Produksi Klor Alkali

Proses produksi klor alkali terbagi menjadi 3 sesuai perkembangan teknologi, yaitu metode sel merkuri, sel diafragma, dan sel membran. Semua metoda tersebut menggunakan proses elektrolisis.

Metode sel merkuri menggunakan kotak berbahan besi berlapis karet yang memiliki lubang masukan untuk masukan larutan. Merkuri berperan sebagai katoda yang mengalir sepanjang dasar kotak. Metode ini memiliki kerugian besar terkait dengan isu pencemaran lingkungan. Limbah merkuri pada perairan dapat menimbulkan penyakit syaraf akut. Oleh karena itu, dunia telah melarang adanya pembangunan pabrik baru yang menggunakan metode ini.

Metode sel diafragma menggunakan kotak metal dengan elektroda plat metal. Asbestos dimasukkan dalam bentuk *slurry* akan terkumpul pada bagian katoda membentuk diafragma. Diafragma ini berfungsi sebagai penahan ion hidroksil agar tidak beraksi dengan gas klor membentuk reaksi samping. Asbestos sendiri merupakan bahan beracun yang dapat menimbulkan penyakit dan kanker pada manusia melalui pernafasan. Pada tahun 2007 diterbitkan undang-undang yang melarang penggunaan asbestos di Amerika Serikat sehingga menurunkan penggunaan asbestos dalam industri secara drastis.

Metode sel membran merupakan metode terkini pada industri klor alkali dengan tingkat efisiensi tertinggi. Metode ini menggunakan ion-exchange membrane sebagai pemisah antara ruang anoda dan katoda. Membran ini akan mencegah ion hidroksil menuju ruang anoda, namun dapat melewatkan ion Na^+ sehingga terjadi reaksi pembentukan basa kuat. Karena memiliki efisiensi tinggi dan faktor ekonomis, metoda membran sel menjadi metoda yang paling banyak digunakan pada industri klor alkali.

Tabel 2.1 Perbandingan tiga metode produksi klor alkali

Metode	Keuntungan	Kelemahan
Sel Merkuri	50% kemurnian kaustik, kualitas gas klor dan hidrogen yang baik	Penggunaan merkuri, biaya operasi tinggi, dibutuhkan garam solid, dibutuhkan ruang dasar luas
Sel Diafragma	Konsumsi energi rendah, digunakan larutan <i>brine</i>	Penggunaan asbestos, tingkat kemurnian kaustik rendah, kualitas gas klor rendah
Sel Membran	Konsumsi energi rendah, biaya modal rendah, biaya operasi rendah	Memerlukan larutan dengan konsentrasi tinggi, terdapat gas oksigen pada gas klor, harga membran yang mahal

(sumber: www.nexant.com, 2003)

2.2 Kalium Klorida Sebagai Bahan Baku Proses Klor Alkali

Kalium klorida (KCl) merupakan garam metal halida yang berbentuk kristal putih pada kondisi murni. Garam kalium klorida memiliki kelarutan baik dengan air dan memiliki konduktivitas yang tetap dalam bentuk larutan. Kalium klorida paling dikenal penggunaannya sebagai pupuk. Selain itu, kalium klorida juga digunakan sebagai bahan industri obat, penelitian, dan proses pembuatan makanan.

Tabel 2.2 Sifat fisis kalium klorida

Formula	KCl
Massa molar	74,5513 g/mol
Titik leleh	770° C (1,418° F)
Densitas	1.98 g/cm ³
Titik didih	1,420° C (2,588° F)
Kelarutan di air	344 g/L (20°C)
Konduktivitas termal	0.036 W/(cm·K)

(Sumber: Sirdeshmukh, D. B., 2001)

Seperti natrium klorida, kalium klorida juga merupakan bahan yang digunakan secara umum pada proses produksi klor alkali. Sebagai bahan baku, kalium klorida memiliki keunggulan tersendiri, yaitu pada produk samping KClO yang dihasilkan. KClO atau kalium hipoklorit memiliki sifat dan kegunaan yang mirip dengan NaClO yaitu sebagai pemutih. Namun, NaClO memiliki kelemahan yaitu meninggalkan 1 kilo residu NaCl untuk setiap 1 galon pemutih tersebut digunakan. Pada sisi lain, KClO akan menghasilkan residu KCl yang bersifat menyuburkan apabila terbuang ke tanah.

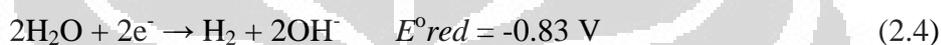
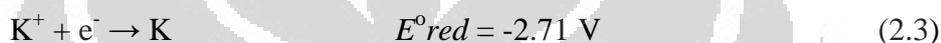
2.3 Proses Elektrolisis

Pada studi kimia, elektrolisis adalah suatu metode pemisahan elemen terikat dan komponen dengan cara mengalirkan arus listrik. Garam sebagai komponen ionik akan terlarut dalam air yang menghasilkan terbentuknya ion sehingga bersifat konduktif. Arus listrik dialirkan dari *power supply* menggunakan sepasang elektroda yang dibenamkan di dalam larutan. Elektroda yang

mengalirkan arus negatif disebut dengan katoda sedangkan elektroda yang mengalirkan arus positif disebut dengan anoda. Setiap elektroda akan menarik ion yang dihasilkan oleh elektroda lainnya dimana ion positif akan berjalan menuju katoda sedangkan ion negatif akan mengalir menuju anoda. Sejumlah energi akan diperlukan untuk memisahkan kedua ion tersebut kemudian mengumpulkan ion-ion tersebut pada masing-masing elektroda. Selanjutnya elektron tersebut akan diserap atau dilepaskan oleh ion dan akan membentuk suatu elemen atau komponen baru.

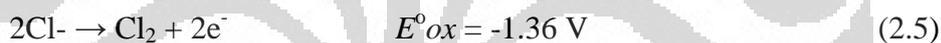
Contoh reaksi elektrolisa untuk larutan KCl adalah sebagai Pers. 2.3 hingga 2.6 berikut:

Reaksinya pada katoda (-) adalah

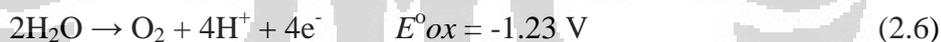


(lebih mudah direduksi)

Reaksinya pada anoda (+) adalah



(lebih mudah dioksidasi)



Dari reaksi tersebut K^+ sebagai ion positif akan terkumpul pada elektroda negatif (katoda), sedangkan Cl^- sebagai ion negatif akan terkumpul pada elektroda positif (anoda). Namun karena hukum deret volta, reaksi 2.4 akan lebih mudah terbentuk dibandingkan reaksi 2.3, sehingga alih-alih logam K terbentuk, yang akan terkumpul di katoda adalah gas H_2 . Selanjutnya, ion K^+ akan bergabung dengan ion OH^- membentuk KOH.

Jumlah zat yang dihasilkan dalam proses elektrolisa akan mengikuti hukum Faraday. Michael Faraday merangkum hasil pengamatannya dalam dua hukum pada tahun 1833, yang berisi:

1. Massa zat yang terbentuk pada masing-masing elektroda sebanding dengan muatan listrik yang mengalir pada elektrolisis tersebut
2. Massa dari macam-macam zat yang diendapkan pada masing-masing elektroda (terbentuk pada masing-masing elektroda) oleh sejumlah arus listrik

yang sama banyaknya akan sebanding dengan berat ekivalen masing-masing zat tersebut.

Dua pernyataan diatas dapat disederhanakan menjadi persamaan :

$$m = \frac{Q M}{F z} \quad (2.7)$$

$$n = \frac{i.t}{z.96500} \quad (2.8)$$

dimana, m adalah massa zat dalam gram, z adalah jumlah valensi ion-ion, i adalah kuat arus dalam Ampere, t adalah waktu dalam detik, dan F adalah 1 Faraday atau 96.500 Coulomb dan M adalah massa molar.

2.6 Plasma

Plasma dapat didefinisikan sebagai gas yang terionisasi sebagian dalam perbandingan antara elektron bebas dibandingkan dengan yang terikat pada atom atau molekul. Plasma juga memiliki kemampuan untuk mengeluarkan arus positif dan negatif sehingga sangat konduktif dan terpengaruh dengan medan magnet. Di dalam ilmu fisika dan ilmu kimia, plasma adalah gas yang terionisasi secara parsial, dimana proporsi tertentu dari elektron dalam keadaan bebas daripada berikatan dengan atom atau molekul. Plasma juga dapat dikatakan sebagai atom yang kehilangan elektron karena beberapa atau semua elektron di orbit atom terluar telah terpisah dari atom atau molekul.

Teknologi plasma melibatkan pembentukan bunga api listrik dengan melewati arus listrik melalui suatu gas dalam proses yang disebut pemutusan listrik (*electrical breakdown*). Karena tahanan listrik sepanjang sistem, dihasilkan sejumlah panas dalam jumlah yang signifikan yang mengambil elektron dari molekul-molekul gas menghasilkan suatu aliran gas yang terionisasi (Gomez, et al, 2009).

Plasma terbentuk akibat adanya perbedaan muatan listrik yang sangat tinggi antara elektrodanya dan mengalir melalui gas dan menghamburkan energi yang dimiliki oleh gas tersebut sehingga membuat gas menjadi cukup panas. Hal ini membuat partikel dalam gas ini akan bertumbukan dengan

partikel disekitarnya tapi juga akan mempengaruhi medan magnetik disekitarnya. (Moustakas, dkk., 2005)

Plasma yang terbentuk dari eksitasi ion akan menyerupai bunga api yang berwarna. Warna dari plasma ditentukan dari jenis senyawa yang dipakai untuk menghasilkannya, sebagai contoh plasma yang terbentuk akibat eksitasi ion kalium adalah ungu sedangkan plasma dari eksitasi ion neon akan menghasilkan warna merah bata. Bentuk dari plasma yang dihasilkan juga akan berbeda-beda sesuai dengan jenis plasma yang akan terbentuk yang akan dijelaskan kemudian.

Spesi aktif yang dihasilkan plasma biasanya dihasilkan dalam jumlah yang lebih besar dan mencapai konsentrasi yang lebih tinggi daripada spesi yang sama yang dihasilkan dalam reaktor kimia konvensional. Spesi aktif ini biasanya dihasilkan dari discharge pijar (*torc*) atau plasma pancaran (*arc*) yang terdiri dari foton, spesi netral, dan partikel bermuatan (Roth, 2001).

a. Foton

Foton dihasilkan dalam spektrum panjang gelombang yang luas pada spektrum elektromagnetik seperti diberikan pada Tabel 2.5. Dalam spektrum elektromagnetik infra merah, energi foton infra merah terlalu rendah untuk berinteraksi dengan gas kerja dan membangkitkan radiasi dari plasma. Foton jenis ini mengandung energi di bawah 1,7 eV dan kebanyakan mempunyai efek umum yang sama dengan dinding panas atau reaksi-reaksi kimia biasa.

Foton sinar tampak mempunyai energi yang lebih besar, berkisar antara 1,6 sampai 3,3 eV. Foton ini dapat memutuskan beberapa ikatan molekular, dan mengeksitasi atom-atom dengan resonansi pada spektrum tampak. Foton ultraviolet lebih tinggi energinya, berkisar dari 3,1 sampai 95 eV, dan dapat mengionisasi dan mengeksitasi atom-atom, menggunting molekul-molekul hidrokarbon panjang, dan memutus ikatan-ikatan molekular membentuk potongan-potongan molekular yang lebih kecil. Karena tidak bermuatan, foton tidak terpengaruh oleh medan listrik atau magnet yang dapat hadir dalam selubung, dan mencapai permukaan dengan energi aslinya. Foton-foton ultraviolet dan tampak mempunyai energi yang cukup untuk memutus ikatan molekular atau atomik pada suatu permukaan dan untuk menghasilkan radikal bebas polimerik dan atau monomer.

b. Spesi Netral

Melalui tumbukan elektron netral dan reaksi kimia dalam plasma, plasma dapat menghasilkan beberapa jenis spesi-spesi netral aktif yang mempunyai energi dan mampu berinteraksi dengan permukaan. Diantaranya adalah atom-atom reaktif; spesi-spesi atomik yang sangat reaktif secara kimiawi seperti H, O, F, Cl, dan lain-lain; monomer yang membentuk cabang-cabang polimerik pada permukaan yang disentuhnya; potongan-potongan molekular yang relatif ringan, yang dapat membentuk senyawa kompleks pada permukaan dan atau mendorong pencabangan atau *crosslinking* molekul-molekul yang dekat permukaan; atom tereksitasi atau kondisi molekular, dimana eksitasi elektron orbital membuat spesi-spesi menjadi lebih reaktif secara kimiawi daripada keadaan normal; radikal bebas, potongan molekular yang dihasilkan dalam plasma dengan sekurang-kurangnya satu elektron yang tidak berpasangan. Semua spesi aktif ini dapat berinteraksi dengan kuat dengan permukaan.

c. Partikel-Partikel Bermuatan

Plasma yang diionisasi secara parsial (hampir seluruhnya oleh ionisasi tumbukan elektron netral) menghasilkan partikel-partikel bermuatan yang dapat dipercepat pada permukaan lingkungan oleh selubung medan listrik. Ion-ion positif cenderung untuk membentur permukaan lingkungan dengan energi yang lebih tinggi daripada elektron atau ion-ion negatif. Partikel-partikel bermuatan yang dihasilkan dari plasma diantaranya elektron yang dihasilkan dalam plasma oleh ionisasi tumbukan elektron netral, yang biasanya mempunyai suhu kinetika 1-10 eV. Elektron-elektron ini mencapai permukaan dalam jumlah yang sama dengan fluks ion jika permukaan tersebut adalah insulator. Ion-ion dapat positif atau negatif, namun hampir selalu positif dalam *discharge* pijar vakum dimana kemungkinan perlekatan kecil. Ion-ion positif dihasilkan oleh ionisasi dan pertukaran muatan. Ion-ion negatif dihasilkan dalam jumlah yang signifikan pada plasma tekanan atmosferik dengan perlekatan elektron. Proses ini tidak disukai pada kondisi vakum, karena pembentukan ion negatif adalah sebuah proses 3 badan. Ion-ion molekular dapat juga dihasilkan seperti potongan molekular

bermuatan seperti OH^- , yang dapat mengalami reaksi kimia kuat dalam plasma atau pada permukaan.

2.6.1 Elektrolisis Plasma

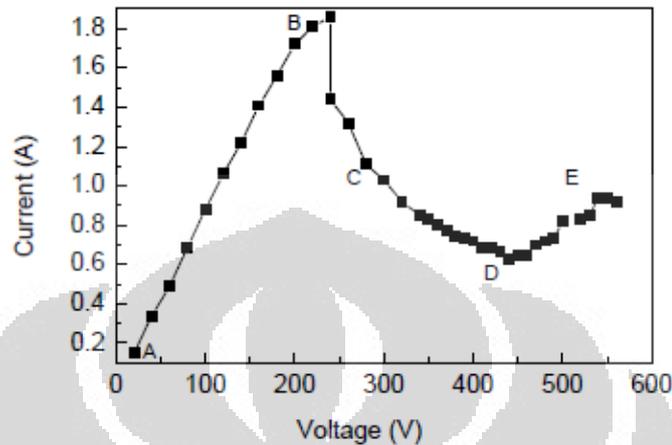
Elektrolisis plasma merupakan pengembangan metode elektrolisis. Sampai saat ini banyak zat-zat yang telah diuji coba dan memperoleh hasil yang menggembirakan, beberapa diantaranya adalah penelitian oleh Sengupta, dkk. (1997) menggunakan K_2SO_4 sebagai elektrolit, Mizuno, dkk. (2006) menggunakan K_2CO_3 , Yan, dkk. (2006) menggunakan Na_2CO_3 , dan Jin, dkk. (2010) yang menggunakan senyawa NaCl dan Na_2SO_4 . Senyawa garam tersebut digunakan sebagai bahan konduktif untuk menghantarkan arus ke seluruh elektrolit. Kelebihan elektrolisis plasma adalah menghasilkan keluaran (*yield*) berkali-kali lipat dibandingkan metode elektrolisis konvensional sehingga metode ini menjanjikan untuk dipakai lebih luas di masa depan.

Salah satu dari proses elektrolisis plasma adalah *contact glow discharge electrolysis* (CGDE). CGDE adalah metode elektrolisis dimana plasma terus-menerus dihasilkan oleh pelepasan (*discharged*) dari arus DC diantara elektroda dan permukaan elektrolit disekitarnya. Dalam metode CGDE, tegangan yang dipakai akan relatif lebih tinggi dibandingkan tegangan yang dibutuhkan pada elektrolisis. Kelebihan dari CGDE adalah tingginya hasil keluaran (*yield*) saat terjadinya *glow discharged* dibandingkan jumlah yang dihitung menggunakan persamaan Faraday dimana nilainya dapat berjumlah 8 kali lebih banyak (Mizuno, dkk. 2005).

Pada tegangan yang cukup, plasma akan terbentuk pada permukaan dari elektroda. Plasma yang terbentuk akan menyerupai nyala api berpendar yang akan memiliki warna tergantung zat apa yang menjadi bahan elektrolisa. Dalam sebuah penelitian, dikatakan bahwa suhu plasma yang terbentuk dapat mencapai 9000 K, dan tekanan didalamnya mencapai 4000 atm saat tegangan yang diberikan sebesar beberapa ratus volt (Drobyshevskii, dkk. 1977).

Elektrolisis plasma memiliki hubungan antara tegangan dan arus listrik yang berbeda dengan proses elektrolisis. Gambar 2.1 menunjukkan sifat tipikal dari proses elektrolisis plasma yang ditandai dengan menurunnya nilai arus secara

drastis saat plasma mulai terbentuk. Turunnya nilai arus merupakan tanda bahwa gas-gas di sekitar elektroda telah terionisasi resistansi pada daerah sekitar plasma menurun.



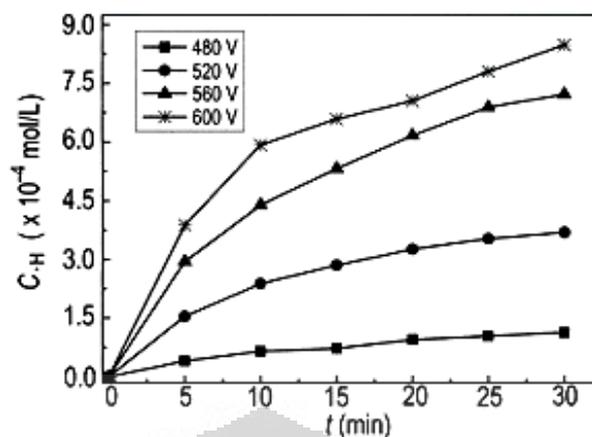
Gambar 2.1 Hubungan tegangan dan arus proses elektrolisis plasma (Yan, dkk. 2006)

2.6.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Elektrolisis Plasma

Kinerja *contact glow discharge electrolysis* (CGDE) dapat ditentukan dari konsentrasi produk keluaran, peningkatan produktivitas terhadap elektrolisis faraday, ataupun penurunan konsumsi energi yang dibutuhkan untuk sejumlah produk yang sama. Banyaknya radikal yang terbentuk seperti $\text{OH}\cdot$ maupun $\text{H}\cdot$ juga berbanding lurus dengan jumlah produksi yang akan dihasilkan. Penelitian yang telah dilakukan oleh Yan (2006), Gao (2008), dan Jin (2010) telah membuktikan berbagai hal yang nyatanya dapat mempengaruhi kinerja dari elektrolisis plasma, diantaranya adalah tegangan listrik, konduktivitas, dan pH.

a. Efek Tegangan Listrik

Efek variasi tegangan listrik pada CGDE terhadap pembentukan radikal yang dihasilkan ditunjukkan oleh gambar pada Gambar 2.2 di bawah ini:

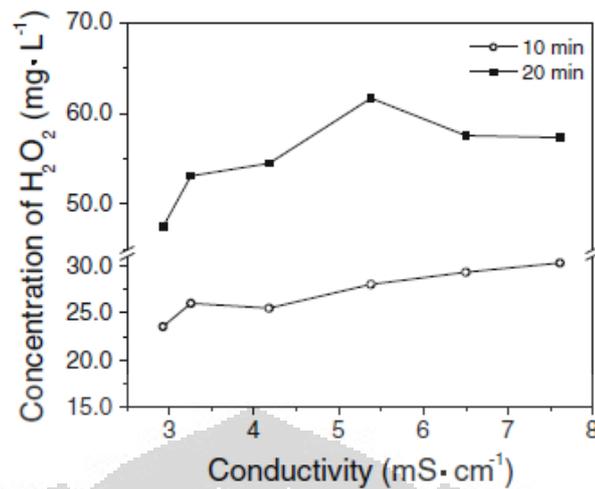


Gambar 2.2 Efek tegangan terhadap pembentukan radikal H· pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal H· (Gao, dkk., 2008)

Pada Gambar 2.2 dapat dilihat bahwa semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan untuk menghasilkan plasma, konsentrasi radikal OH• maupun H• yang terbentuk semakin tinggi pula. Hal ini disebabkan karena tegangan yang tinggi dapat memberikan energi semakin besar untuk mengeksitasi elektron, akibatnya semakin tinggi tegangan listrik yang dipakai produk yang dihasilkan juga semakin besar.

b. Efek Konduktivitas Larutan

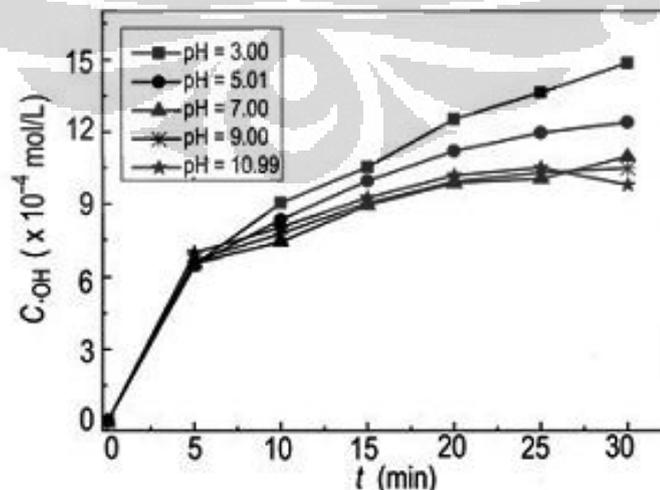
Selain tegangan, konduktivitas larutan yang digunakan pun juga mempengaruhi jumlah gas produksi yang dihasilkan. Gambar 2.3 memperlihatkan semakin besar konduktivitas larutan, gas peroksida semakin besar pula. Hal ini dikarenakan dengan konduktivitas yang tinggi elektron-elektron bisa bergerak dengan lebih mudah dibanding larutan yang konduktivitasnya rendah. Akibatnya peluang terjadinya tumbukan antara elektron dengan elektron pada molekul juga semakin besar sehingga pembentukan radikal pun juga akan terjadi dengan lebih baik.



Gambar 2.3 Efek konduktivitas larutan terhadap produksi gas H₂O₂ (Jin, dkk., 2010)

c. Efek pH larutan

Gambar 2.4 menunjukkan pembentukan radikal OH \cdot maupun H \cdot paling tinggi terjadi ketika pH larutan terendah, yaitu sekitar 3. Pengaruh pH dalam elektrolisis plasma adalah sebagai faktor stabilitas spesi radikal. Seperti terlihat pada Gambar 2.4 efek pH terhadap konsentrasi produk tidak terlalu signifikan pada awalnya, namun setelah menit ke-10, terlihat bahwa kondisi larutan yang lebih asam akan memberikan produksi hidrogen radikal yang lebih banyak. Hal ini disebabkan hidrogen radikal akan lebih stabil pada kondisi yang lebih asam dan sebaliknya terdegradasi lebih banyak pada kondisi basa. Selanjutnya hidrogen radikal tersebut akan bereaksi dengan sesamanya membentuk gas H₂



Gambar 2.4. Efek pH Larutan terhadap Pembentukan Radikal OH \cdot pada Grafik Waktu terhadap Konsentrasi Radikal OH \cdot (Gao, dkk., 2008)

2.7 Metode Analisis Titrasi

Titration merupakan metode analisa kimia secara kuantitatif yang biasa digunakan dalam laboratorium untuk menentukan konsentrasi dari reaktan. Karena pengukuran volum memainkan peranan penting dalam titration, maka teknik ini juga dikenali dengan analisa volumetrik. Analisa titration merupakan bagian dari kimia analitik dan perhitungannya berdasarkan hubungan stoikiometri dari reaksi-reaksi kimia. Peralatan untuk melakukan metode titration diantaranya adalah buret, penyangga dan labu erlenmeyer.

Titration iodometri digunakan untuk mengukur kandungan gas klor pada percobaan ini. Metode titration iodometri mengacu kepada titration dengan suatu larutan iod standar. Metode titration iodometri berkenaan dengan titration dari iod yang dibebaskan dalam reaksi kimia. Prinsip titration ini adalah menangkap gas klor dengan menggunakan larutan kalium iodida sehingga keduanya bereaksi. Kemudian larutan tersebut dititration menggunakan natrium tiosulfat untuk mencari titik akhir titration.

Reaksi yang terjadi saat proses titration adalah sebagai Pers. (2.9- 2.10) berikut:



Warna larutan iodium sebenarnya cukup kuat sehingga iodium dapat bekerja sebagai indikatornya sendiri. Akan tetapi lebih umum digunakan suatu indikator *starch* (kanji), karena warna biru tua dari kompleks kanji-iodium dipakai untuk suatu uji sangat peka terhadap iodium. Kepekaan lebih besar dalam larutan yang sedikit asam daripada larutan netral dan lebih besar dengan adanya ion iodida.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

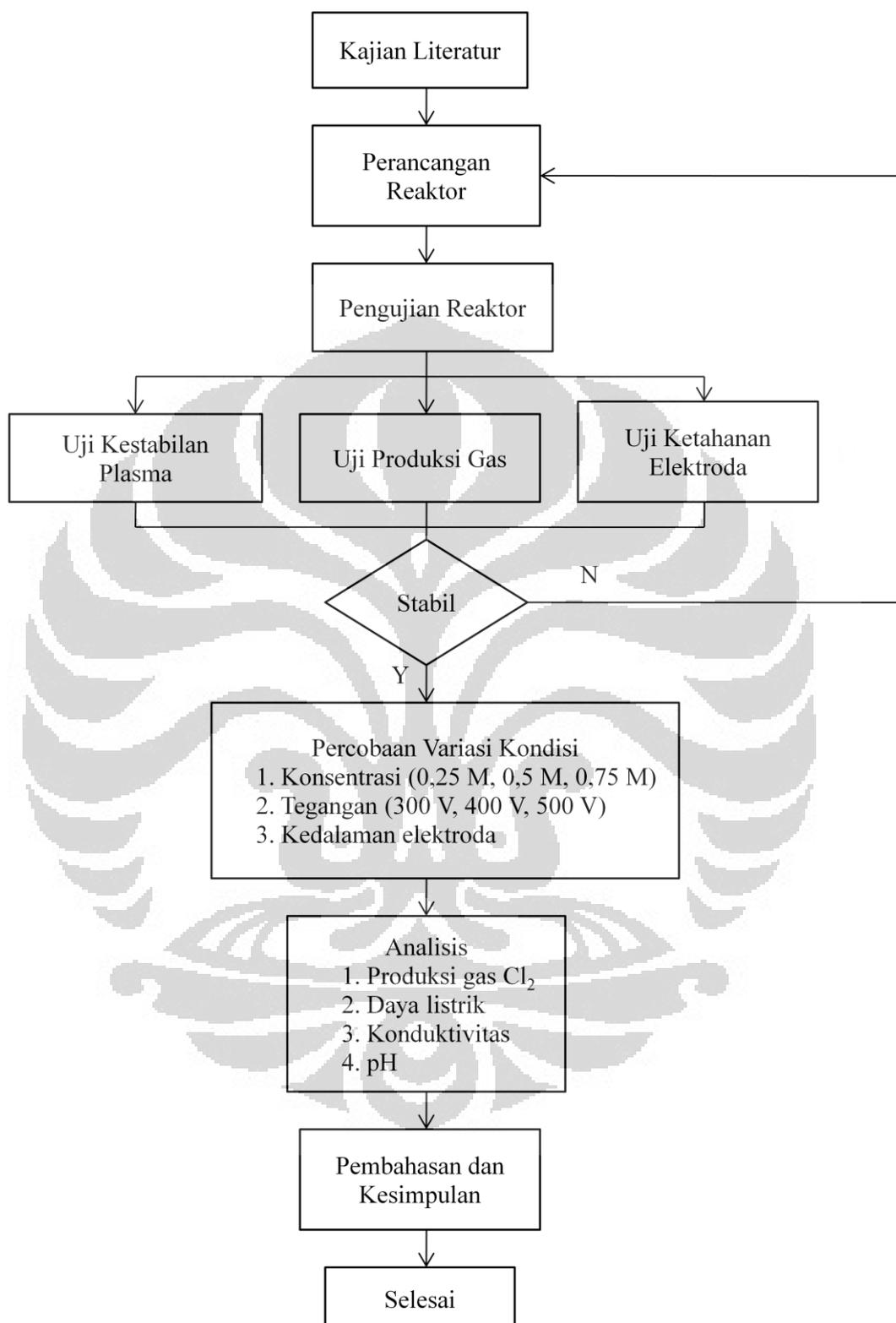
Bagian ini membahas berbagai hal yang berhubungan dengan rancangan penelitian yang akan dilakukan, alat dan bahan yang dibutuhkan dalam melakukan penelitian, dan prosedur yang dilakukan untuk penelitian ini. Pembahasan dalam rancangan penelitian meliputi perancangan reaktor plasma yang dibuat, preparasi sampel yang digunakan dalam penelitian, proses elektrolisis dari sampel yang telah dipersiapkan dan analisis dari gas produk yang dihasilkan dari proses plasma elektrolisis. Penelitian ini dilakukan di laboratorium Intensifikasi Proses, Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia.

3.1 Variabel Penelitian

Variabel bebas penelitian ini adalah besar tegangan dan konsentrasi larutan. Besar tegangan diatur dengan *slide regulator* sedangkan konsentrasi larutan diatur dengan jumlah garam yang dilarutkan. Variabel terikat dari penelitian ini adalah jumlah produksi gas Cl_2 , laju alir gas, arus listrik, pH, dan konduktivitas larutan

3.2 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium dengan diagram alir penelitian secara keseluruhan pada Gambar 3.1 berikut ini:



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.3 Bahan dan Peralatan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- KCl
- Aquadest

Peralatan umum yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Gelas piala 500 mL dan 1000 mL
- Gelas ukur 10 mL dan 250 mL
- *Bubbler*
- Neraca analitik
- Spatula
- Labu semprot
- Labu takar 500 mL
- Corong
- Termometer alkohol

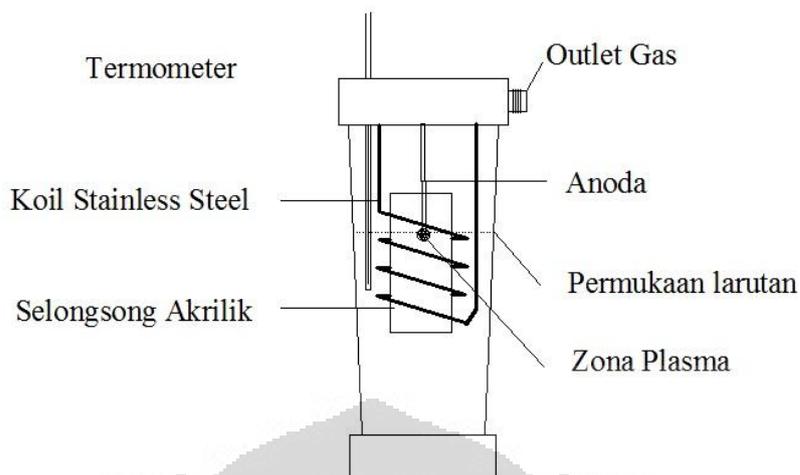
3.4 Rancang Bangun Peralatan Elektrolisis Plasma

Rancang bangun peralatan elektrolisis plasma meliputi rangkaian pembangkit plasma, reaktor plasma elektrolisis dan peralatan analisis gas klor.

a. Reaktor

Reaktor dibuat dari tabung *housing filter* yang biasa digunakan pada proses filtrasi air dengan diameter 8 cm dan tinggi 25 cm. Kapasitas tabung mencapai 2000 ml dengan larutan yang digunakan untuk semua percobaan sebanyak 800 ml. Terdapat lubang pada tutup *housing* yang digunakan sebagai output produk berupa gas Cl_2 dan H_2 . Kemudian tutup *housing* dilubangi sebanyak 3 lubang tambahan di bagian atas untuk lubang anoda dan termometer.

Bagian dalam reaktor terdiri dari anoda, koil *stainless steel*, dan separator akrilik. Anoda berada persis di tengah-tengah reaktor dimana pada elektroda ini plasma terbentuk. Katoda reaktor berupa koil *stainless steel* yang juga berfungsi sebagai sirkulasi air pendingin. Diantara anoda dan katoda, terdapat separator akrilik yang berfungsi untuk mencegah ion-ion Cl^- bertemu dengan ion hidroksil. Ilustrasi reaktor ini digambarkan sebagai berikut:



Gambar 3.2 Ilustrasi reaktor elektrolisis plasma

b. Perangkat *Bubbler*

Bubbler digunakan sebagai wadah reaksi antara larutan KI dengan gas Cl_2 yang akan dianalisis secara kuantitatif. Perangkat ini diletakkan persis di depan rangkaian setelah reaktor. Perangkat *bubbler* yang digunakan adalah labu erlenmeyer 200 mL dan selang silikon. Gas yang terbentuk dari reaktor akan mengalir melalui selang yang dibenamkan ke dalam larutan KI. Gas keluaran selang kemudian akan membentuk gelembung-gelembung gas pada larutan KI sebagai proses difusi gas dan liquid. Apabila gas keluaran reaktor mengandung Cl_2 maka KI akan teroksidasi membentuk I_2 dan berubah warna menjadi coklat.

c. Elektroda

Anoda yang digunakan pada percobaan ini adalah batang grafit. Grafit dipilih karena bersifat inert terhadap proses elektrolisis yang dilakukan. Pemakaian grafit ini perlu diperhatikan karena pada jangka waktu tertentu dapat terkikis oleh proses plasma yang dihasilkan. Sebagai katoda, *stainless steel* digunakan karena dinilai produk reaksi bagian katoda tidak terlalu bersifat korosif.

d. *Slide regulator* dan *Transformer Step Up*

Slide regulator berfungsi sebagai variabel data dari berbagai kondisi tegangan yang diinginkan. *Slide regulator* standar di pasaran mencapai tegangan 250 V. *Slide Regulator* dipasang pada rangkaian sebelum Dioda Bridge.

Trafo step up adalah alat yang digunakan untuk menaikkan besar tegangan. Trafo percobaan ini mampu menaikkan tegangan hingga 2 kali karena variasi tegangan yang diuji mencapai 500 V.

e. *Dioda Bridge*

Dioda bridge digunakan sebagai alat konversi arus listrik AC menjadi arus DC agar sesuai dengan kebutuhan proses elektrolisis. Pada komponen ini terdapat empat buah dioda yang dihubungkan saling bertemu satu sama lain. *Dioda bridge* merupakan penyearah arus bolak-balik satu gelombang penuh, jadi akan dihasilkan tegangan DC (searah) yang lebih baik dan memiliki noise rendah.

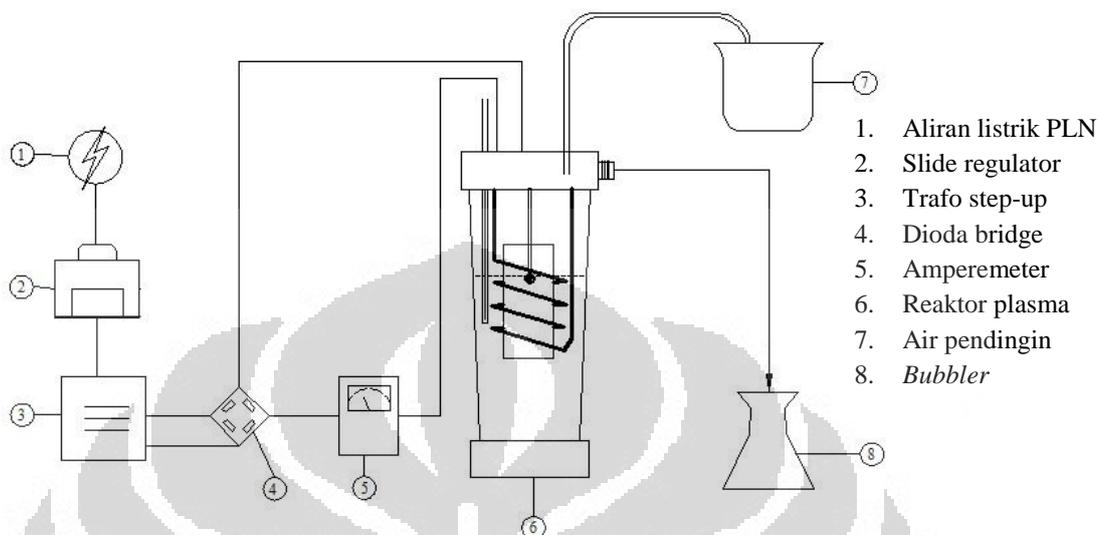
f. Sistem pendinginan larutan

Sistem pendingin larutan pada percobaan ini berupa sirkulasi air dingin. Perangkat ini terdiri dari pompa, selang, dan baskom. Pompa yang digunakan adalah pompa persitaltik berdaya 15 W. Air es dingin dialirkan oleh pompa tersebut melalui selang menuju koil *stainless steel* di dalam reaktor dan kemudian kembali mengalir keluar menuju baskom. Karena reaktor menghasilkan panas yang besar, suhu air sirkulasi terus dijaga dengan *supply* es batu.

g. Peralatan – peralatan pengumpul data

Peralatan – peralatan pengumpul data digunakan adalah *bubble soap*, amperemeter, dan pH-meter. *Bubble soap* digunakan untuk mengukur laju alir produk yang dihasilkan reaktor dalam mL/s. Amperemeter merupakan alat digital yang digunakan untuk mengukur besar arus yang mengalir. Pemasangan amperemeter pada rangkaian listrik harus diperhatikan, yaitu dirangkai seri antara dioda bridge dengan reaktor. pH meter merupakan alat digital yang dipakai untuk mengetahui kondisi pH dari suatu larutan. Pemakaian pH meter digital sendiri sangat mudah dan cepat dengan hanya mencekupkan batang amperemeter ke dalam larutan yang dianalisis.

Komponen – komponen sistem di atas dirangkai menurut skema pada Gambar 3.3



Gambar 3.3 Skema rangkaian alat elektrolisis plasma

3.5 Preparasi Bahan

a. Larutan elektrolit KCl:

Membuat larutan KCl dengan melarutkan sejumlah KCl padatan dengan aquadest dalam labu takar 1000 mL, untuk masing-masing konsentrasi:

- 0,025 M KCl = 1,873 g KCl padatan
- 0,05 M KCl = 3,745 g KCl padatan
- 0,075 M KCl = 5,618 g KCl padatan

Aquadest digunakan untuk menjaga kemurnian air yang dapat mempengaruhi analisis komposisi dari nilai pH.

b. Larutan analisis gas Cl₂

Larutan analisis gas Cl₂ adalah kalium iodida 2% yang dipersiapkan sebagai berikut

1. Membuat 1 L larutan 2% KI dengan melarutkan 20 g KI padatan dengan aquadest dalam labu takar 1000 mL

2. Menyiapkan masing-masing 100 mL 0,025 M KI pada tiap labu erlenmeyer 200 mL. Jumlah tersebut dihitung cukup untuk menganalisis 100% gas Cl_2 yang mungkin terkonversi dari reaktor.
3. Menyiapkan larutan indikator amilum yang akan dituangkan pada labu analisis setelah proses reaksi selesai dilakukan.

c. Larutan titrasi

Larutan titrasi yang digunakan adalah natrium tiosulfat yang dipersiapkan sebagai berikut

1. Membuat 1 L larutan Na_2CO_3 0,005 M dengan melarutkan 0,62 g Na_2CO_3 padatan dengan aquadest dalam labu takar 1000 mL
2. Menuang 50 mL larutan Na_2CO_3 0,005 M pada buret titrasi

3.6 Uji Pendahuluan Peralatan Elektrolisis Plasma

Sebelum mengambil data penelitian, dilakukan uji kebocoran pada peralatan sistem dengan metode air sabun. Caranya dengan mengalirkan udara dari kompresor ke dalam reaktor, kemudian meneteskan air sabun ke area yang berpotensi mengalami kebocoran. Untuk rangkaian pembangkit plasma, dilakukan pengujian tegangan yang keluar dari dioda dan pembentukan plasma di udara.

Setelah tes kebocoran, dilakukan uji kestabilan plasma yang dihasilkan. Tahap pertama adalah memastikan bahwa plasma yang terbentuk dapat menyala secara stabil. Faktor-faktor yang mempengaruhi kestabilan plasma antara lain adalah posisi elektroda, posisi separator, dan penempatan *bubbler* sendiri.

Setelah plasma dinyatakan sudah menyala secara stabil, dilakukan uji analisis produk gas terbentuk. Gas yang dianalisis pada percobaan ini adalah gas Cl_2 . Untuk menganalisisnya, reaktor dinyalakan dan disambungkan ke *bubbler*. Apabila terdapat gas Cl_2 keluar, warna *bubbler* akan berubah menjadi coklat. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi ada tidaknya produksi gas Cl_2 ini adalah jenis elektroda, konfigurasi anoda-katoda, dan letak selongsong akrilik.

3.7 Prosedur Penelitian

Berikut contoh prosedur penelitian untuk pengambilan data pada larutan 0,05 M KCl dan tegangan 400 V:

- Uji Produksi gas Cl₂
 1. Membuat larutan KCl 0,05 M dan diukur konduktivitas awalnya.
 2. Larutan KCl 0,05 M sebanyak 1000 mL dimasukkan dalam reaktor.
Temperatur larutan diukur dengan termometer.
 3. Menghubungkan reaktor dengan *bubbler*
 4. Memastikan rangkaian listrik terpasang dengan benar
 5. Menyalakan sekering dan amperemeter
 6. Menyalakan air pendingin
 7. Regulator tegangan dinyalakan, diputar sampai tegangan 400 volt AC.
Stopwatch dinyalakan lalu arus diukur.
 8. Setiap pengambilan data dilakukan selama 15 menit, selama itu kondisi air pendingin terus dijaga
 9. Setelah 15 menit regulator tegangan dimatikan.
 10. *Amperemeter*, aliran pendingin, dan sekering dimatikan.
 11. Larutan KI pada bubber dititrasi dengan Na₂CO₃ 0,005M dan larutan indikator
 12. Larutan yang tersisa di reaktor diukur nilai pH konduktivitasnya
- Langkah ini dilakukan berulang kali untuk setiap variasi konsentrasi dan tegangan

- Uji volume gas total
 1. Membuat larutan KCl 0,05 M dan diukur konduktivitas awalnya.
 2. Larutan KCl 0,025 M sebanyak 1000 mL dimasukkan dalam reaktor.
 3. Menghubungkan reaktor dengan *bubble soap*
 4. Memastikan rangkaian listrik terpasang dengan benar
 5. Menyalakan sekering dan amperemeter
 6. Menyalakan air pendingin
 7. Regulator tegangan dinyalakan, diputar sampai tegangan 400 volt AC
 8. Mengamati laju gas pada *bubble soap* sambil menghitung waktu yang dibutuhkan dengan *stopwatch*

Langkah ini dilakukan berulang kali untuk setiap variasi konsentrasi dan tegangan

3.8 Perhitungan Produktivitas Proses Elektrolisis Plasma

Kinerja proses elektrolisis plasma meliputi:

- Laju produksi gas total

$$\text{Laju gas (ml/s)} = \frac{\text{volume bubble soap (ml)}}{\text{waktu (s)}} \quad (3.1)$$

- Konsumsi energi total proses

$$\text{Daya (watt/mmol)} = \frac{\text{arus (A)} \times \text{tegangan (V)}}{\text{jumlah Cl}_2 \text{ (mmol)}} \quad (3.2)$$

$$\text{Energi (kJ/mmol)} = \frac{\text{daya (watt)} \times \text{waktu (menit)} \times 60}{\text{jumlah Cl}_2 \text{ (mmol)}} \quad (3.3)$$



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan ini bertujuan untuk mengetahui hasil produksi dari proses elektrolisis plasma menggunakan larutan KCl. Produk reaksi yang menjadi perhatian utama dalam percobaan ini adalah gas Cl_2 karena merupakan produk utama dari bagian anoda. Untuk melakukan hal tersebut, beberapa parameter terkait diambil dan kemudian dianalisis, diantaranya tegangan, arus, konduktivitas, dan jumlah gas Cl_2 terbentuk yang selengkapnya dibahas sebagai berikut.

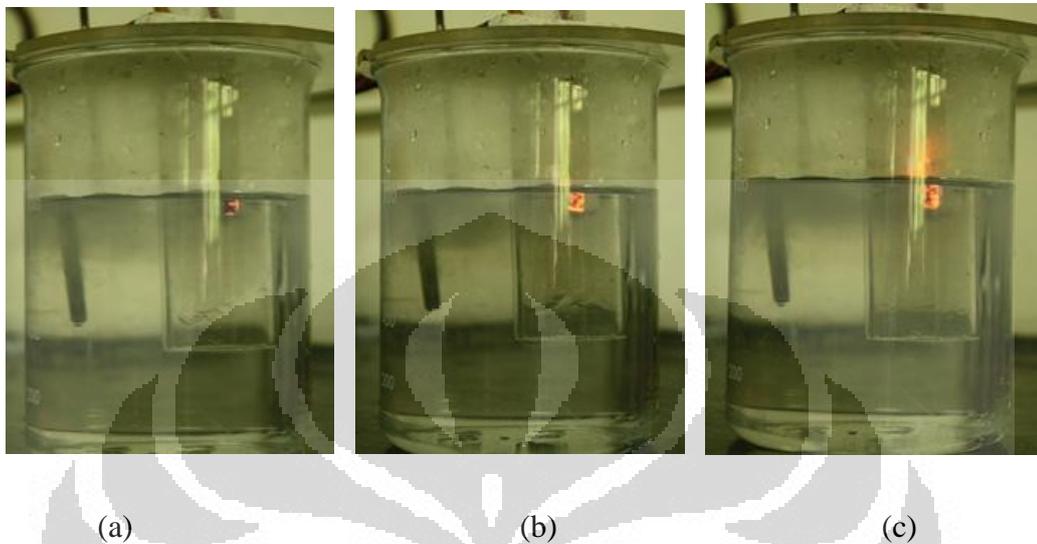
4.1 Fenomena Terbentuknya Plasma dalam Larutan Kalium Klorida

Empat macam keadaan visual plasma yang terbentuk di dalam larutan KCl ditunjukkan pada Gambar 4.1. Larutan KCl dengan konsentrasi 0,05 M digunakan dalam percobaan ini dengan memvariasikan tiga jenis tegangan yaitu 300 V, 400 V, dan 500 V. Variasi konsentrasi demikian digunakan atas dasar bahwa plasma mulai terbentuk secara stabil pada tegangan 300 V (Hal ini berlaku untuk larutan KCl dengan konsentrasi yang digunakan).

Percobaan ini dilakukan menggunakan gelas beker transparan dengan tujuan plasma yang terbentuk dapat teramati dengan jelas. Digunakan selongsong kaca mengelilingi anoda untuk mengarahkan plasma agar terbentuk di anoda. Dibutuhkannya plasma terbentuk di anoda dikarenakan produk yang ingin dianalisis adalah produk reaksi dari anoda, yaitu gas Cl_2 . Apabila selongsong kaca ini dilepas, maka plasma akan berpindah pembentukannya menuju katoda.

Pembentukan nyala plasma pada percobaan ini melalui beberapa tahap terlebih dahulu. Pada tahap pertama, saat tegangan yang diberikan sudah mencapai 300 V, plasma tidak spontan langsung menyala. Tahap awal pembentukan plasma adalah pembentukan gelembung-gelembung gas. Adanya gelembung-gelembung gas pada elektroda kemudian diikuti dengan pembentukan selubung gas pada elektroda dan pembentukan cairan yang memiliki densitas relatif lebih tinggi daripada air. Cairan ini diperkirakan adalah KOH ataupun hasil reaksi samping berupa kalium klorat. Setelah terbentuknya selubung gas yang

cukup intens, mulailah terbentuk nyala plasma pada elektroda berwarna kuning kecoklatan diikuti dengan turunnya nilai pembacaan arus listrik pada amperemeter.



Gambar 4.1 Perbandingan intensitas plasma dalam larutan KCl 0,05 M pada; (a) 300 V, (b) 400 V, (c) 500 V

Plasma yang terbentuk pada percobaan ini adalah plasma jenis *glow discharge electrolysis* dengan nyala plasma terjadi di bawah permukaan larutan. Dapat diamati dari hasil foto yang diperoleh bahwa nyala plasma semakin besar dengan bertambahnya tegangan yang diberikan. Pada tegangan 300 V, Gambar 4.1 (a), nyala plasma terlihat belum menutupi keseluruhan elektroda yang terbenam, biarpun nyala plasma yang dihasilkan stabil (tidak mengalami nyala-mati). Nyala plasma pada tegangan 400 V terlihat sudah hampir menutupi elektroda secara penuh, dengan fluktuasi permukaan larutan yang lebih besar dibandingkan keadaan pada tegangan sebelumnya. Tegangan 500 V pada gambar (c) memberikan nyala plasma yang paling terang dengan nyala plasma menjalar ke arah atas elektroda. Pada keadaan ini, banyak jumlah spesi radikal yang terbentuk yang dapat meningkatkan produk reaksi keseluruhan.

Terbentuknya plasma merupakan tanda dari ionisasi gas pada daerah sekitar elektroda. Ionisasi gas Cl_2 percobaan ini memberikan warna kuning pada plasma. Lebih lanjut, fenomena plasma ini akan mengeksitasi elektron dan menghasilkan banyak spesi radikal. Mekanisme reaksi elektrolisis plasma yang

dikutip dari penelitian Gao, dkk. (2008) dan Jin, dkk. (2010) dijelaskan pada Pers. 4.1 hingga 4.10 berikut :



Tahap pertama dari pembentukan plasma ini adalah proses elektrolisis dimana arus listrik dihantarkan sepanjang larutan elektrolit yang mengandung ion-ion bebas seperti ion Cl^- dan K^+ . Ion-ion tersebut akan bergerak menuju masing-masing elektroda, ion negatif menuju anoda dan ion positif menuju katoda. Ion negatif yang terkumpul selanjutnya teroksidasi membentuk gas Cl_2 di anoda sedangkan ion positif K^+ akan bereaksi dengan OH^- yang dapat membentuk basa kuat KOH. Pada elektrolisis plasma, tingginya energi listrik yang diberikan akan menghasilkan panas yang cukup untuk membuat larutan ter vaporasi membentuk $\text{H}_2\text{O}_{\text{gas}}$ di daerah sekitar elektroda. Selubung gas yang terbentuk di sekitar elektroda kemudian menjadi daerah munculnya plasma yang ditandai dengan nyala api.

Proses utama pada pembentukan plasma ini adalah terionisasinya gas-gas yang terbentuk di sekitar elektroda. Pada proses ionisasi ini, elektron-elektron bebas akan tereksitasi sehingga memiliki tingkat energi yang lebih tinggi. Elektron-elektron berenergi tersebut dapat menyerang berbagai molekul untuk menghasilkan bermacam reaksi-reaksi. Reaksi pada proses elektrolisis plasma ini

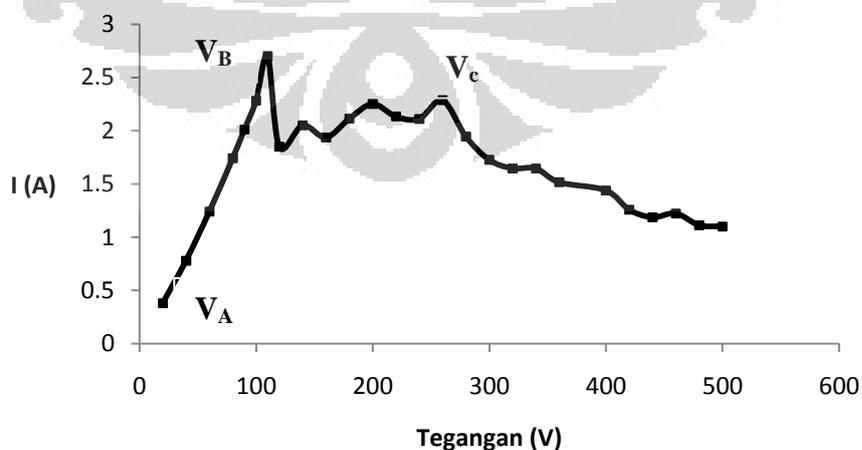
akan menghasilkan berbagai radikal seperti $\text{Cl}\cdot$ dan $\cdot\text{OH}$, dengan begitu proses elektrolisis plasma ini dapat memiliki efisiensi yang lebih besar.

Gas Cl_2 pada proses elektrolisis plasma terbentuk dari kombinasi dua molekul radikal $\text{Cl}\cdot$ (Pers. 4.7). Radikal $\text{Cl}\cdot$ untuk reaksi tersebut berasal dari dua macam mekanisme. Mekanisme pertama adalah pembentukan $\text{Cl}\cdot$ dari serangan plasma terhadap ion Cl^- yang juga menghasilkan elektron berenergi tinggi (Pers. 4.4). Mekanisme kedua adalah reaksi antara molekul radikal $\cdot\text{OH}$ dengan ion Cl^- (Pers. 4.5). Adanya dua jenis mekanisme ini membuat kemungkinan reaksi dari ion Cl^- meningkat dan berdampak positif terhadap produksi gas Cl_2 secara keseluruhan.

Hasil reaksi lain dari proses elektrolisis plasma ini gas H_2 dari kombinasi dua radikal $\text{H}\cdot$ (4.11). Radikal $\text{H}\cdot$ ini berasal dari penyerangan molekul $\text{H}_2\text{O}_{\text{gas}}$ oleh plasma (Pers. 4.5). Selain membentuk gas H_2 , radikal $\text{H}\cdot$ dapat juga bereaksi dengan radikal $\cdot\text{OH}$ untuk kembali membentuk molekul air (Pers. 4.12).

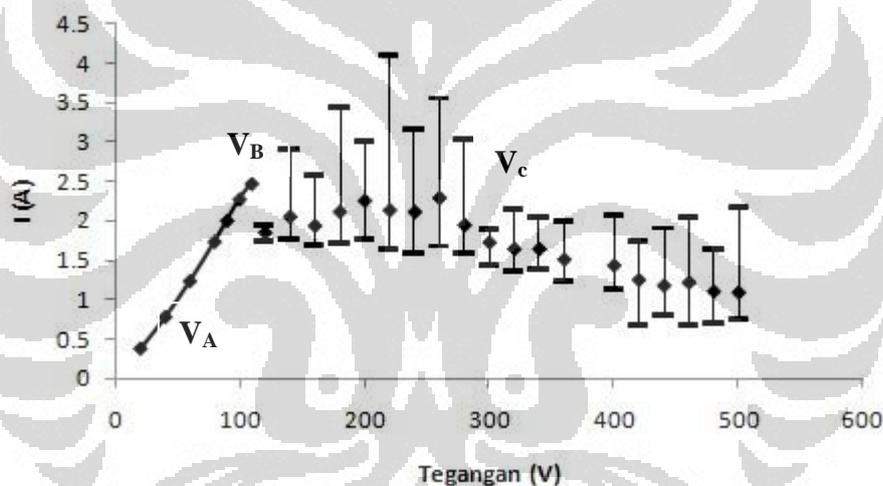
4.2 Hubungan Antara Tegangan dengan Arus

Proses elektrolisis plasma memiliki hubungan antara tegangan dan arus yang berbeda dengan proses elektrolisis. Pada proses elektrolisis, bertambahnya tegangan maka arus listrik akan terus meningkat (Mizuno, 2006), namun pada proses elektrolisis plasma terjadi penurunan arus listrik secara drastis seiring dengan penambahan tegangan yang diberikan.



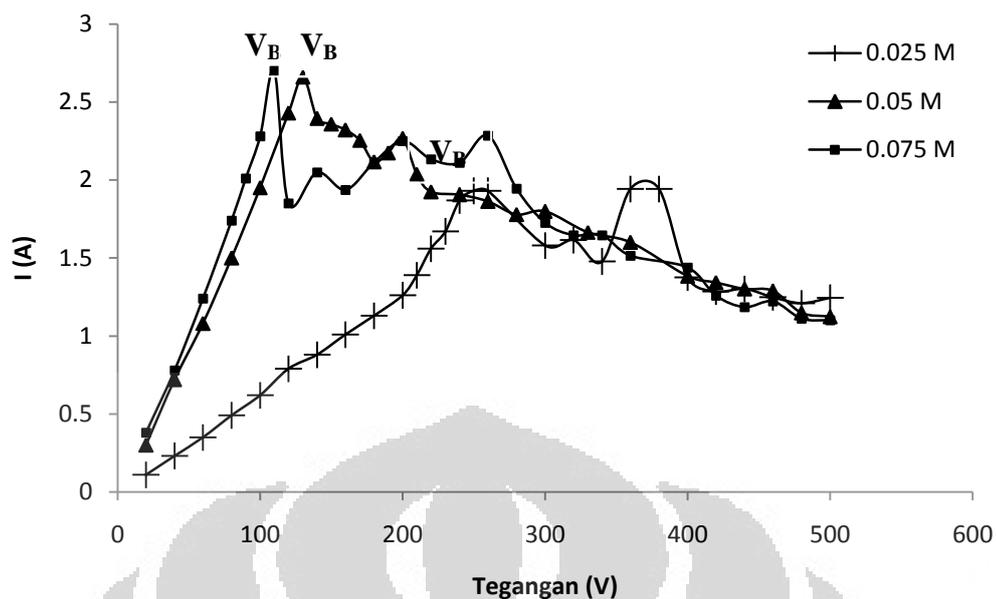
Gambar 4.2 Hubungan tegangan dan arus pada larutan 0,075 M KCl

Gambar 4.1 menjelaskan profil perubahan arus untuk larutan KCl dengan konsentrasi 0,075 M. Zona antara V_A dengan V_B merupakan zona proses elektrolisis dimana hubungan arus dan tegangan membentuk garis linear. V_B merupakan titik munculnya plasma dimana terjadi penurunan arus secara drastis. Setelah plasma muncul nilai arus berfluktuasi secara besar dan pada titik V_C fluktuasi arus berkurang secara signifikan. Titik V_C yang dihasilkan pada percobaan larutan KCl ini berbeda dibandingkan percobaan larutan lain seperti NaCl maupun Na_2CO_3 . Dari Gambar 4.1, V_C terlihat membentuk puncak kedua, sedangkan pada percobaan lain V_C biasa berada pada nilai arus yang jauh lebih rendah dibandingkan V_B . Pada daerah setelah V_C , nilai arus terus mengalami penurunan dengan bertambahnya nilai tegangan yang diberikan.



Gambar 4.3 Fluktuasi arus proses elektrolisis plasma. 0,075 M KCl

Gambar 4.3 menjelaskan fluktuasi arus sepanjang perubahan tegangan. Pada daerah V_A hingga V_B , fluktuasi arus sangat rendah karena proses yang terjadi masih berupa proses elektrolisis. Fluktuasi arus meningkat sangat besar setelah V_B dimana beda arus tertinggi dan terendah mencapai 2 ampere lebih. Pada daerah ini, plasma belum mencapai kestabilan. Adanya nilai ampere yang tinggi tersebut menandakan masih ada sedikit peran dari proses elektrolisis. Pada titik V_C , fluktuasi arus menurun secara drastis dan meningkat perlahan-lahan. Setelah melewati zona V_C , nyala plasma terlihat lebih stabil ditandai dengan nyala dan bunyi yang kontinyu.



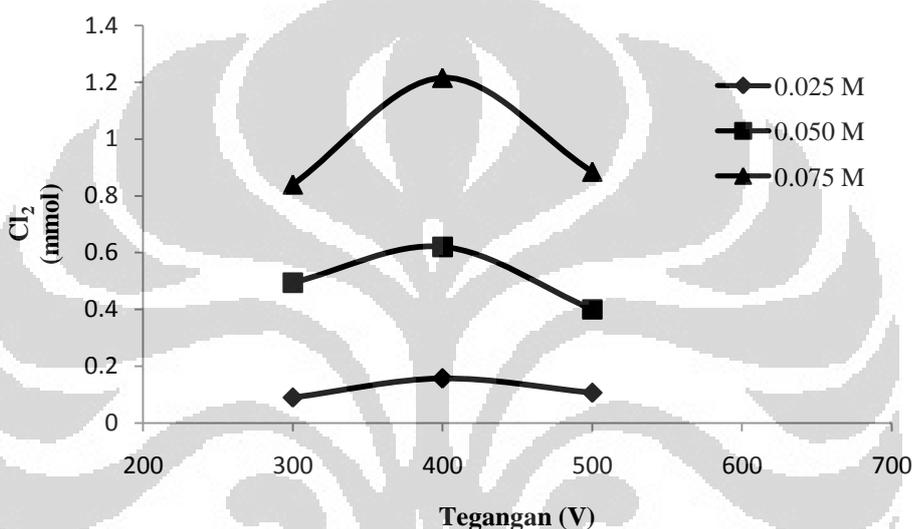
Gambar 4.4 Hubungan tegangan dan arus dalam pembentukan plasma pada variasi konsentrasi KCl

Letak dari tegangan V_B berbeda untuk setiap konsentrasi larutan, dimana semakin tinggi konsentrasi larutan maka V_B akan berada pada tegangan yang lebih rendah. Semakin besar konsentrasi juga akan memposisikan V_B pada nilai arus yang lebih besar. Hal ini berkaitan dengan prinsip pembentukan plasma dan konduktivitas yang dimiliki larutan. Sesuai penelitian dari Sengupta, dkk. (1996), plasma akan terjadi bila larutan mengalami penguapan akibat pemanasan Joule (*Joule Heating*) dari energi listrik yang dihasilkan *power supply*. Pemanasan ini terjadi saat proses elektrolisis berlangsung. Sesuai hukum konduktivitas termal, materi yang memiliki konduktivitas lebih tinggi akan mengalirkan panas secara lebih cepat pula, maka hal ini sesuai dengan grafik yang diberikan dimana larutan dengan konsentrasi yang lebih tinggi akan mengalirkan panas lebih cepat sehingga plasma dapat terbentuk pada tegangan yang lebih rendah.

Adanya penurunan nilai arus pada proses elektrolisis plasma ini akan memberikan keuntungan dari segi efisiensi energi proses. Sesuai dengan hubungan daya, tegangan, dan arus ($W=V.I$), penurunan arus (A) akan berdampak pada turunnya daya (watt) yang dibutuhkan keseluruhan. Apabila digabungkan dengan peningkatan produk hasil reaksi yang diberikan, maka proses elektrolisis plasma jelas dapat memberikan efisiensi proses yang sangat baik.

4.3 Produksi gas Cl_2 dalam Proses Elektrolisis Plasma

Produk reaksi yang dianalisis pada percobaan ini adalah gas Cl_2 sebagai produk utama dari elektrolisis plasma larutan KCl. Gambar 4.5 memperlihatkan hubungan produksi gas Cl_2 pada tiga konsentrasi berbeda, yaitu 300, 400, dan 500 V. Dari tiga variasi tegangan, jumlah produksi gas Cl_2 paling besar berada pada tegangan 400 V dan konsentrasi larutan 0.075 M.



Gambar 4.5 Hubungan antara konsentrasi dan tegangan terhadap produksi gas Cl_2 pada larutan KCl selama 15 menit

Hasil produksi proses elektrolisis plasma dipengaruhi berbagai hal, salah satunya tegangan dan konsentrasi. Peningkatan konsentrasi larutan selalu membuat produksi gas Cl_2 semakin besar. Penambahan konsentrasi sebesar 0,025 M terlihat memberikan peningkatan nilai produksi gas klor yang serupa untuk setiap tegangan. Sebagai contoh untuk tegangan 300 V, penambahan konsentrasi sebesar 0,025 M dari konsentrasi 0,025 M menuju 0,05 M (dilakukan dengan menambahkan garam 2 kali lebih banyak) memberikan peningkatan produksi gas klor sebesar 0,4 mmol. Hal yang serupa juga terlihat pada penambahan 0,025 M selanjutnya (0,05 M ke 0,075 M) yang memberikan peningkatan produksi gas klor sebesar 0,35 mmol. Namun demikian, produksi awal gas klor pada konsentrasi 0,025 M tidak memberikan hasil yang memuaskan dengan hasil produksi sekitar

0.1 mmol saja (nilai produksi yang diharapkan adalah sekitar 0,3 mmol jika dibandingkan dengan peningkatan produksi gas pada setiap penambahan 0,025 M). Dengan begitu produksi gas Cl_2 diperkirakan dapat ditingkatkan dengan terus menambah konsentrasi garam di dalam larutan, namun hal yang perlu diperhatikan adalah resiko bahaya dari panas yang ditimbulkan pada konsentrasi larutan yang lebih tinggi.

Konsentrasi larutan lebih tinggi dapat meningkatkan jumlah radikal yang dapat dihasilkan. Pada konsentrasi larutan yang lebih tinggi, densitas ion Cl^- akan meningkat. Tingginya densitas ion berarti semakin besar kemungkinan ion Cl^- yang dapat diserang plasma untuk membentuk radikal $\text{Cl}\cdot$. Jumlah radikal yang semakin banyak inilah yang kemudian meningkatkan jumlah Cl_2 terbentuk sesuai dengan mekanisme pada persamaan 4.10.

Secara teori, peningkatan tegangan akan memberikan produk reaksi yang lebih besar. Hal tersebut dibuktikan pada berbagai penelitian seperti pada penelitian Sengupta (1993) dan Jin (2009). Pada tegangan yang lebih tinggi, terdapat peningkatan jumlah energi yang diberikan untuk mengeksitasi elektron. Semakin banyak jumlah elektron tereksitasi akan meningkatkan jumlah radikal dan selanjutnya meningkatkan jumlah produk reaksi.

Namun demikian, tegangan 500 V memberikan penurunan jumlah produksi gas klor. Penurunan tersebut berlaku untuk ketiga variasi konsentrasi yang dilakukan. Hal tersebut dikarenakan terbentuknya produk samping pada larutan.

Tabel 4.1 Jumlah produksi gas total untuk 3 variasi tegangan

Tegangan	Laju Produksi Total Gas (ml/s)
300 V	2,34
400 V	3,73
500 V	16,94

Asumsi mengenai pembentukan reaksi samping pada larutan didasari jumlah produksi gas reaksi secara keseluruhan. Seperti terlihat pada Tabel 4.1, kondisi tegangan 500 V memberikan jumlah produksi gas yang paling besar, bahkan terdapat peningkatan yang signifikan yaitu jumlah produksi gas sebesar 4

kali antara tegangan 400 V dan tegangan 500 V. Hal ini memberikan kemungkinan bahwa pada tegangan 500 V spesi radikal terbentuk memang berjumlah lebih banyak, namun banyak terbentuk reaksi samping. Kemungkinan banyaknya gas yang terbentuk adalah uap air dan sedikit gas hidrogen. Reaksi samping yang melibatkan gas Cl_2 adalah pembentukan hipoklorit dan klorat pada Pers. 4.11 dan 4.12 berikut

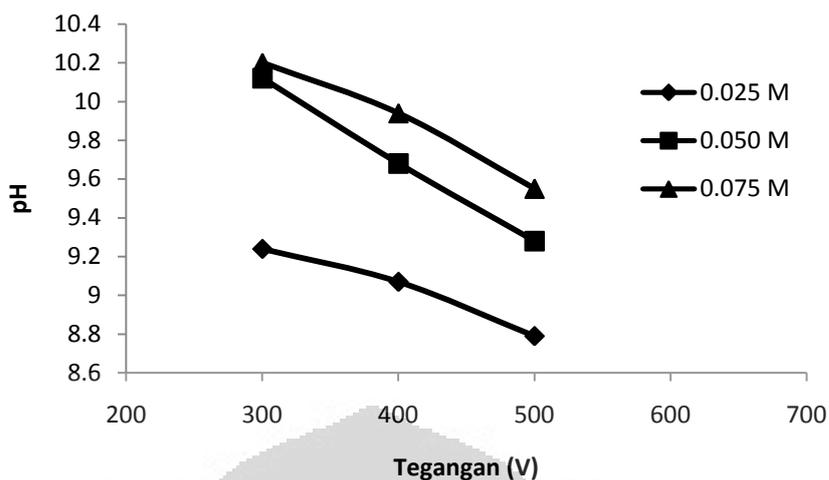


Semakin tinggi tegangan maka suhu di sekitar plasma akan semakin tinggi. Diketahui suhu pada daerah dekat dengan permukaan larutan di sekitar plasma dapat mencapai lebih dari 100°C . pada kondisi tegangan 500 V, suhu yang tercatat pada ruang anoda sebesar $60 \pm 5^\circ\text{C}$, sedangkan suhu kondisi 300 V dan 400 V adalah $50 \pm 5^\circ\text{C}$. Kondisi suhu yang tinggi tersebut dapat memfasilitasi terbentuknya ion klorat secara lebih cepat (Patnaik, 2002). Hal ini dapat mengurangi jumlah gas klor seperti data tegangan 500 V. Hal ini mungkin dapat dihindari dengan menggunakan membran ion selektif yang memisahkan antara ruang anoda dan katoda sehingga ion Cl^- tidak bertemu dengan ion hidroksil yang terbentuk pada ruang anoda. Dengan alternatif reaksi ion Cl^- yang lebih sedikit, maka produksi gas klor secara keseluruhan dapat ditingkatkan.

Dari hasil data yang diperoleh, konsentrasi optimal adalah konsentrasi larutan yang paling besar, sedangkan tegangan optimal untuk pembentukan gas klor adalah 400 V dengan mempertimbangkan kemungkinan pembentukan reaksi samping pada tegangan yang lebih tinggi.

4.4 Hubungan Tegangan dengan pH Larutan

Nilai pH larutan terukur setelah dilakukan proses elektrolisis plasma selama 15 menit berada pada keadaan basa untuk semua variasi yang dilakukan. Nilai pH yang basa menandakan adanya pembentukan KOH di dalam larutan yang berfungsi sebagai basa kuat. KOH pada reaksi elektrolisis plasma ini merupakan salah satu produk utama proses disamping Cl_2 dan H_2 .



Gambar 4.6 Pengaruh tegangan dan konsentrasi KCl terhadap kondisi pH selama 15 menit

Dapat dilihat pada Gambar 4.6 nilai pH selalu menurun seiring bertambahnya tegangan. Turunnya pH larutan dikarenakan adanya produk reaksi samping berupa asam lemah HClO dan asam kuat HClO₃ dan HCl. Reaksi yang terjadi adalah sebagai persamaan 4.13 dan 4.14 berikut:

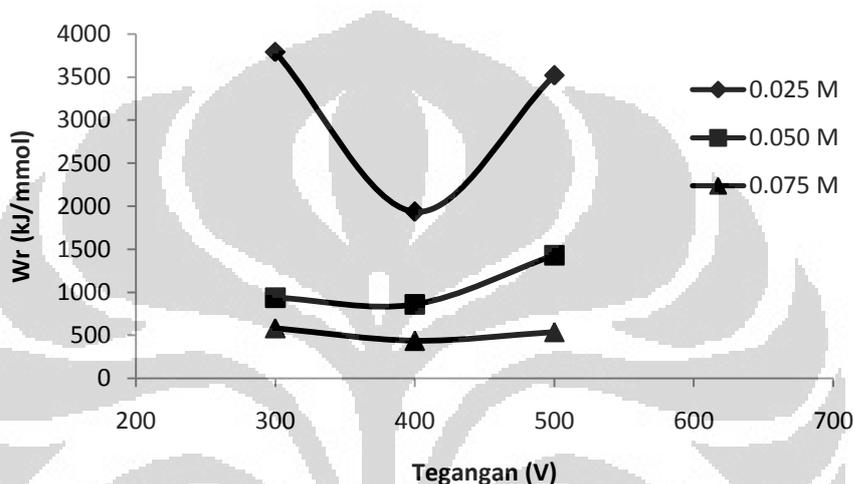


Laju reaksi pembentukan asam kuat (Pers. 4.14), akan bertambah dengan peningkatan suhu larutan. Suhu tinggi pada tegangan 500V akan memfasilitasi Cl₂ lebih banyak bereaksi dengan air disamping keluar sebagai gas. Walaupun demikian, kondisi larutan pada keadaan basa menandakan bahwa laju produksi KOH masih lebih besar dibandingkan laju pembentukan produk samping asam di dalam larutan.

Gambar 4.6 memperlihatkan semakin besar konsentrasi larutan maka pH yang terukur semakin basa. Pada tegangan yang sama, kondisi pH selalu lebih basa untuk konsentrasi yang lebih tinggi. Khusus pada konsentrasi 0,025 M, nilai pH jauh lebih rendah dibandingkan kondisi 0,075 M dan 0,05 M. Hal ini dapat mengindikasikan bahwa produksi basa kuat KOH pada konsentrasi 0,025 M relatif jauh lebih sedikit dibandingkan produksi basa pada konsentrasi 0,05 M dan 0,075 M.

4.5 Konsumsi Energi per Satuan Produk (W_r)

Perhitungan efisiensi proses dilakukan dengan membandingkan konsumsi energi dengan jumlah gas Cl_2 dihasilkan. Besar konsumsi energi (W_r) ditentukan dengan mengalikan nilai arus listrik dan tegangan. Nilai efisiensi diberikan dalam kJ/mmol dimana semakin kecil nilai diperoleh maka semakin baik dan efisien proses yang dilakukan.



Gambar 4.7 Data konsumsi energi untuk produksi gas Cl_2 selama 15 menit.

Efisiensi energi paling tinggi berada pada konsentrasi tertinggi 0,075 M dan tegangan 400 V. Konsentrasi larutan yang lebih tinggi dapat memberikan efisiensi energi yang lebih baik pula, hal ini dominan dipengaruhi oleh tingginya produksi gas biarpun memiliki besar tegangan yang sama.

Nilai efisiensi pada konsentrasi 0,025 M relatif rendah dibandingkan dua konsentrasi lainnya. Sebagai perbandingan, besar efisiensi energi konsentrasi 0,025 M pada tegangan 400 V (1934 kJ/mmol) adalah 4 kali lebih besar dari nilai efisiensi konsentrasi 0,075 M (437 kJ/mmol). Hal tersebut mengindikasikan bahwa untuk meningkatkan efisiensi proses elektrolisis plasma, larutan dengan konsentrasi lebih tinggi lebih diutamakan.

Tegangan yang memberikan efisiensi paling baik adalah sebesar 400 V ditandai dengan nilai kJ/mmol yang lebih rendah. Pada konsentrasi 0,025 M, perubahan tegangan memberikan efek signifikan terhadap efisiensi dengan jarak nilai efisiensi terendah dan tertinggi mencapai 1800 kJ/mmol, sedangkan pada

konsentrasi 0,075 M jarak nilai efisiensi tertinggi dan terendah hanya sebesar 140 kJ/mmol.

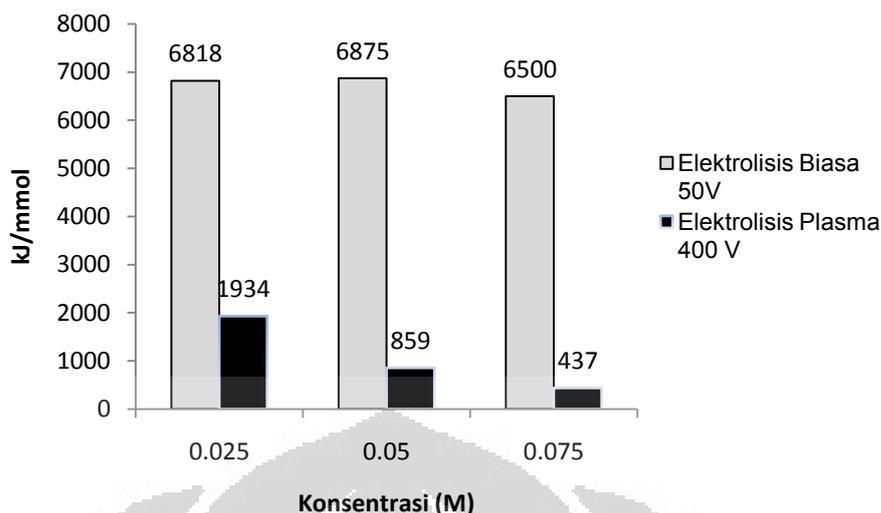
Sesuai dengan rumus perhitungan daya ($W = V \cdot I$) semakin besar tegangan (V) diberikan, maka semakin besar daya listrik (W). Hal ini akan mengakibatkan energi total yang dibutuhkan akan semakin besar juga. Hal demikian tidak berlaku sepenuhnya pada proses elektrolisis plasma dimana saat bertambahnya tegangan, nilai arus mengalami penurunan (Gambar 4.7).

Efisiensi pada tegangan 500 V lebih rendah daripada kondisi tegangan 400 V. Hal ini disebabkan oleh adanya pembentukan reaksi samping dari gas Cl_2 seperti hipoklorit dan perklorat. Namun apabila selektivitas proses dapat ditingkatkan, maka mungkin saja kondisi operasi 500 V dapat memberikan efisiensi yang lebih baik.

4.6 Perbandingan Proses Elektrolisis dengan Elektrolisis Plasma

Percobaan ini dilakukan dengan membandingkan efisiensi energi pada kedua jenis proses. Proses elektrolisis dilakukan pada tegangan 50 V untuk mendapatkan kuantitas produk yang cukup untuk dianalisis karena pada tegangan yang lebih rendah, nilai produksi gas akan menurun sehingga analisis titrasi lebih sulit dilakukan. Pada tegangan 50 V dipastikan proses yang terjadi masih berupa proses elektrolisis (Gambar 4.1). Data tegangan 400 V diambil untuk proses elektrolisis plasma karena memiliki efisiensi terbaik dari tiga variasi tegangan yang dicobakan.

Secara visual kedua proses tersebut memiliki perbedaan besar. Dari kondisi elektroda, proses elektrolisis hanya menghasilkan gelembung-gelembung gas pada elektroda, sedangkan proses elektrolisis plasma menghasilkan nyala plasma berwarna kuning kecoklatan. Kondisi permukaan larutan proses elektrolisis plasma berfluktuasi sedangkan kondisi permukaan larutan pada proses elektrolisis relatif tenang.



Gambar 4.8 Perbandingan efisiensi energi elektrolisis plasma (400 V) dan elektrolisis (50 V) selama 15 menit.

Gambar 4.8 memperlihatkan proses elektrolisis plasma memiliki efisiensi yang lebih baik untuk ketiga konsentrasi yang diberikan. Pada konsentrasi 0,075 M, efisiensi energi proses elektrolisis plasma mencapai hingga 13 kali lebih baik dibandingkan proses elektrolisis. Pada proses elektrolisis, perubahan konsentrasi tidak terlalu memberikan efek besar terhadap efisiensi energi, terlihat dari data konsentrasi 0,025 M dan 0,05 M yang memberikan hasil nyaris sama. Pada proses elektrolisis plasma, peningkatan konsentrasi memberikan efek positif dimana perbandingan efisiensi antara konsentrasi terendah dan tertinggi mencapai 4 kali lebih baik.

Tabel 4.2 Perbandingan elektrolisis plasma dengan elektrolisis pada konsentrasi 0,075 M

	Elektrolisis	Elektrolisis plasma
Tegangan (Volt)	50	400
Arus (Ampere)	2,68	1,02
Produksi Cl ₂ (mmol)	0,022	0,885

Proses elektrolisis plasma memiliki efisiensi energi yang lebih baik karena produksi gas Cl₂ yang lebih besar (lihat Tabel 4.2). Besar arus proses elektrolisis plasma juga lebih rendah biarpun tegangan yang diberikan 8 kali lebih besar. dapat disimpulkan bahwa biarpun berada pada tegangan tinggi, proses elektrolisis

plasma dapat mengungguli efisiensi proses elektrolisis karena dapat menghasilkan produksi gas yang jauh lebih baik.

4.7 Pengaruh Kedalaman Elektroda

Data yang diukur dari percobaan ini adalah besar arus listrik dan banyaknya produksi gas klor sebagai produk utama dalam waktu 5 menit. Tiga macam ketinggian yang divariasikan adalah keadaan elektroda persis di permukaan larutan, elektroda yang dicelupkan sedalam 1 cm pada larutan, dan elektroda yang dicelupkan sedalam 2 cm.

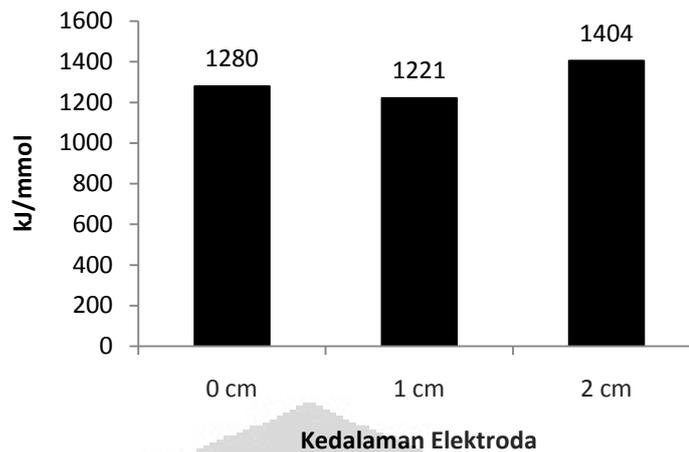
Dari hasil yang diperoleh, kedalaman elektroda berpengaruh secara langsung terhadap jumlah produksi gas. Semakin dalam elektroda dicelupkan ke dalam larutan, maka jumlah produksi gas pada bubbler semakin besar (Tabel 4.3). intensitas nyala plasma juga bertambah disertai kenaikan fluktuasi permukaan larutan pada kedalaman elektroda lebih dalam.

Tabel 4.3 Kondisi arus dan produksi gas klor untuk variasi kedalaman elektroda

Kedalaman elektroda	Arus (A)	Produksi gas Cl ₂ (mmol) selama 15 menit
0 cm	0.352	0.033
1 cm	1.12	0.11
2 cm	1.795	0.135

Nilai arus pada Tabel 4.3 menunjukkan peningkatan untuk kedalaman elektroda semakin rendah. Nilai arus 1,795 ampere pada kedalaman 2 cm menunjukkan adanya pengaruh dari proses elektrolisis biasa pada elektroda. Adanya proses elektrolisis ini membuat proses elektrolisis plasma tidak optimal ditunjukkan dengan penurunan efisiensi pada Gambar 4.9.

Pada Gambar 4.9 disajikan perbandingan efisiensi proses dalam kJ/mmol pada tiga ketinggian elektroda yang berbeda. Kedalaman elektroda 1 cm memiliki efisiensi paling baik dengan nilai konsumsi energi kJ/mmol paling rendah diantara dua variasi kedalaman yang lain.



Gambar 4.9 Variasi kedalaman elektroda terhadap efisiensi proses gas Cl_2 5 menit percobaan.

Kedalaman elektroda yang terlalu dekat ke permukaan maupun terlalu dalam di larutan memiliki kelemahan masing-masing. Pada keadaan elektroda di permukaan, nilai arus hanya sepertiga nilai pada kondisi kedalaman elektroda 1 cm, namun memiliki produksi gas rendah sehingga efisiensi keseluruhan pada kedalaman tersebut kalah dibandingkan variasi kedua. Pada kondisi kedalaman elektroda 2 cm, dikhawatirkan adanya reaksi samping. Gas Cl_2 yang terbentuk dapat menuju fasa gas maupun fasa liquid. Pada fasa liquid, ion Cl_2 dapat bereaksi dengan basa ataupun air membentuk reaksi samping (Pers. 4.11, 4.12). Kedalaman elektroda yang terlalu dalam dapat memfasilitasi reaksi Cl_2 pada fasa liquid lebih baik dibandingkan variasi kedalaman lain yang lebih rendah.

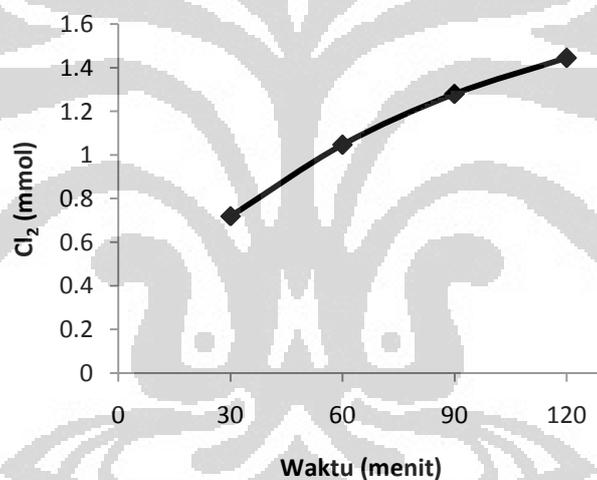


Variasi kedalaman elektroda memberikan perubahan efisiensi yang relatif tidak signifikan. Dari ketiga variasi kedalaman elektroda, nilai efisiensi hanya berubah sebesar 183 kJ/mmol, sedangkan untuk perubahan konsentrasi 0,025 M, efisiensi proses dapat berubah hingga lebih dari 2000 kJ/mol. Karena nilai tersebut, variasi kedalaman elektroda lebih baik dilakukan untuk mencari kondisi optimum plasma dari segi kestabilan dan keamanan dibandingkan untuk mengejar efisiensi konsumsi energi.

4.8 Pengaruh Waktu Terhadap Proses Elektrolisis Plasma

Percobaan ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh waktu proses terhadap jumlah produksi gas klor yang dihasilkan. Reaktor yang digunakan adalah reaktor *batch* dengan 800 ml larutan dimana tidak ada pergantian larutan selama proses. Percobaan dilakukan dalam waktu kurun 2 jam dan jumlah produk gas dianalisis setiap 30 menit.

Gambar 4.10 menunjukkan penurunan jumlah produksi gas klor dalam kurun waktu 2 jam. Penurunan produksi terlihat paling tajam pada waktu 60 menit. Setelah 60 menit, jumlah produksi gas klor menurun seperti membentuk garis linear yang relatif landai.



Gambar 4.10 Uji stabilitas larutan KCl 0,05 M 400 V selama 2 jam

Adanya penurunan produksi gas klor pada proses ini kemungkinan disebabkan oleh beberapa hal, diantaranya adalah tingkat kejenuhan larutan dan keberadaan senyawa lain di dalam larutan. Larutan yang digunakan adalah KCl sebesar 0,05 M dimana jumlah tersebut akan berkurang seiring waktu proses. Berkurangnya garam KCl membuat jumlah ion Cl⁻ ikut berkurang. Kemungkinan lain adalah adanya pembentukan senyawa lain seperti KClO, KClO₂, KClO₃, dll. Produk reaksi tersebut merupakan senyawa berwujud cair yang dapat mengganggu proses elektrolisis larutan KCl. Lebih lanjut, faktor tidak meratanya distribusi ion

K^+ dan Cl^- di seluruh larutan juga dapat menurunkan produktivitas. Maka dari itu, dalam percobaan dengan disain reaktor ini, semua pengambilan data dilakukan tidak lebih dari 15 menit untuk mendapatkan hasil produksi gas klor yang lebih optimal.

4.9 Perbandingan KCl dan NaCl sebagai larutan proses Klor alkali

Bagian ini bertujuan untuk membandingkan hasil produksi proses klor alkali antara dua larutan yang berbeda, yaitu kalium klorida dan natrium klorida. Data elektrolisis plasma menggunakan larutan NaCl diambil dari percobaan yang dilakukan oleh Fakhrian (2012). Perbandingan kedua larutan adalah sebagai berikut

Tabel 4.4 Perbandingan larutan KCl dan NaCl dalam proses elektrolisis plasma

	KCl	NaCl	Rasio
Konduktansi larutan 0,05 M	6,69 mS/cm	5,55 mS/cm	1,20
Efisiensi energi proses pada 400 V 0,05 M	859 kJ/mmol	988 kJ/mmol	1,15
Harga per 2012 (www.merck.com)	5,32 USD/kg	4,11 USD/kg	1,29

Percobaan Jin, dkk. (2010) menunjukkan konduktivitas memegang peranan penting terhadap nilai produktivitas proses. Nilai konduktansi larutan KCl lebih besar 1,2 kali dibandingkan larutan NaCl. Lebih lanjut, larutan KCl memberikan efisiensi proses 1,15 kali lebih baik dibandingkan larutan NaCl. Nilai rasio kedua parameter yang berdekatan tersebut menunjukkan bahwa besar produktivitas tergantung nilai konduktansi yang dimiliki, terlepas dari jenis kedua larutan tersebut. Hal demikian menjadikan faktor pertimbangan pemilihan jenis larutan untuk proses klor-alkali lebih tergantung terhadap ketersediaan dan harga bahan.

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan hasil penelitian yang telah dilakukan diperoleh kesimpulan dan saran sebagai berikut:

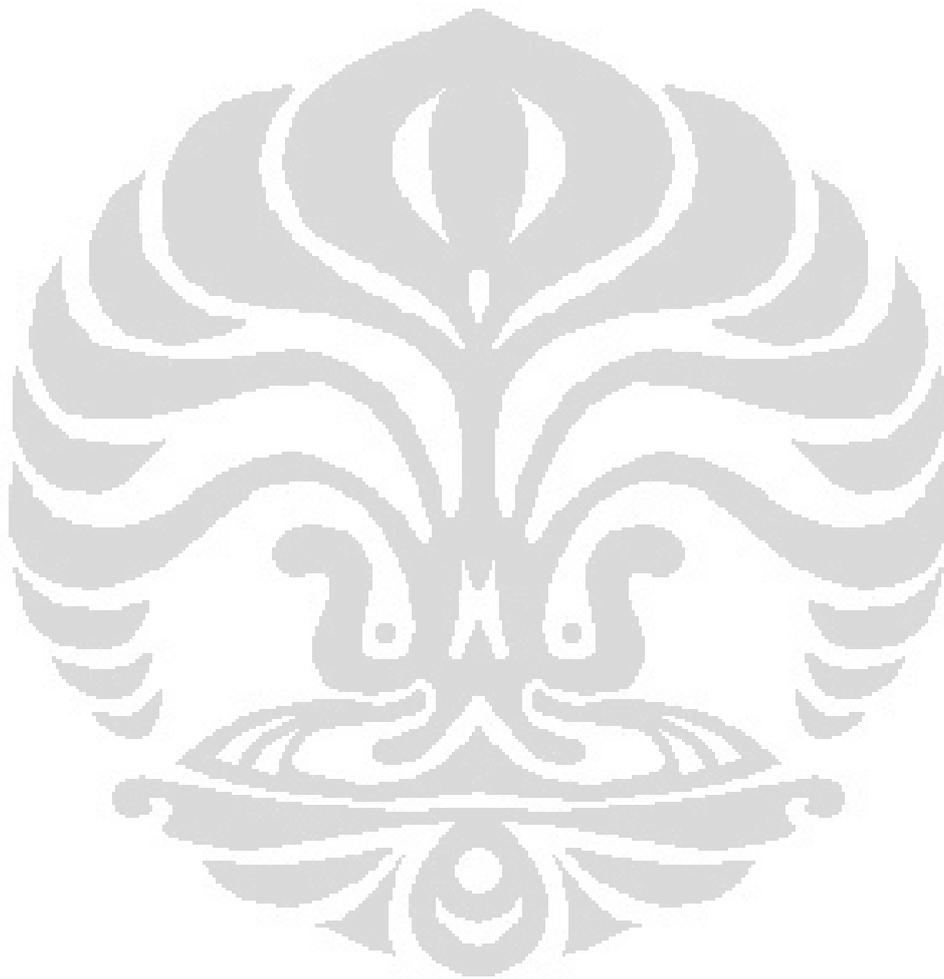
5.1 Kesimpulan

1. Proses elektrolisis plasma dapat diaplikasikan pada proses produksi klor alkali menggunakan larutan kalium klorida.
2. Konsentrasi larutan semakin tinggi akan meningkatkan produktivitas dan efisiensi proses.
3. Tegangan sebesar 400 V merupakan tegangan optimal terhadap jumlah dan efisiensi produksi gas Cl_2
4. Nilai pH larutan meningkat pada konsentrasi yang lebih tinggi sebagai tanda meningkatnya produksi KOH namun semakin menurun dengan meningkatnya tegangan.
5. Proses elektrolisis plasma dapat meningkatkan efisiensi energi hingga 13 kali dibandingkan proses elektrolisis pada konsentrasi yang sama.
6. Larutan KCl dan NaCl dengan konduktansi yang sama akan memberikan nilai efisiensi produktivitas yang serupa.

5.2 Saran

1. Reaksi samping yang terjadi masih tinggi, penggunaan membran perlu dipertimbangkan agar ion hidroksil tidak bertemu dengan ion klor dalam larutan.
2. Metode analisis gas klor perlu dikembangkan, metode bubbler yang dipakai diperkirakan belum dapat menangkap seluruh gas klor yang terbentuk dari reaktor
3. Penggunaan elektroda yang lebih kecil perlu dipertimbangkan agar mampu mengakomodasi reaksi pada konsentrasi dan tegangan yang lebih tinggi tanpa menimbulkan masalah panas pada reaktor.

4. Perlu dilakukan analisis komposisi pada aliran gas dan larutan secara keseluruhan untuk mengetahui senyawa apa saja yang terbentuk pada proses elektrolisis plasma.



DAFTAR REFERENSI

- Abdel-Aal, H.K., Zohdy, K.M., and Kareem, M.A. (2010). Hydrogen production using sea water electrolysis. *Open Fuel Cells Journal*. Egypt: Higher Technological Institute, Tenth of Ramadan City.
- Drobyshevski, E.M., Zhukov, B.G., Reznikov, B. I. and Rozov, S. I. (1994). Emission from and the equilibrium composition of a plasma of a pulsed diaphragm discharge in electrolytes. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 47. Pp.255-262.
- Gao, J., dkk., (2008). Analysis of energetic species caused by contact glow discharge electrolysis in aqueous solution. *Plasma Science and Technology Journal*, Vol.10, No.1.
- Jin, X.L., Wang, Y.X. and Zhang H.M. (2010). Influence of solution conductivity on contact glow discharge electrolysis. *Plasma Chem Plasma Process* 2010 30: 429-436. LLC : Springer Science Business Media.
- Jin, X.L., Wang, Y.X. and Zhang H.M. (2010). The effect of electrolyte constituents on contact glow discharge electrolysis. *Plasma Chem Plasma Process* 2010 30: 429-436. LLC : Springer Science Business Media.
- Khopkar, S.M. (2005). *Basic concept of analytical chemistry*. New Age International Ltd.
- Kogelschatz, U. (2004). Atmospheric-pressure plasma technology, *Plasma Phys. Controlled Fusion Journal*. 46 B63–B75.
- Kunaifi. (2008). *Atasi biaya listrik industri dengan program energi manajemen*. <http://kunaifi.wordpress.com/2008/08/10/atasi-biaya-listrik-industri-dengan-program-energi-managemen> (Diakses 21-6-2011)
- Mizuno, T., T. Akimoto, dan T. Ohmori. (2005). Hydrogen evolution by plasma electrolysis in aqueous solution. *Japanese Journal of Applied Physics* 44: 396-401.
- Moustakas, dkk. (2005). Demonstration plasma gasification-vitrification system for effective hazardous waste treatment. *Journal of Hazardous Materials*, B 123, Pp. 120-126.
- Patnaik, Pradyot. (2002) *Handbook of inorganic chemicals*. McGraw-Hill

- Saksono, N., Ariawan, B. and Bismo, S. (2010). Hydrogen productions system using non-thermal plasma electrolysis in glycerol-koh solution. *Jurnal Skripsi Perpustakaan Universitas Indonesia*
- Sengupta, S.K and Singh, O.P. (1990). Contact glow discharge electrolysis: a study of its onset and location. *Journal Electroanal. Chem.*, 301. Pp.189-197.
- Sengupta, S.K and Singh, O.P. (1996). Origin in the fight of the theory of hydrodynamic instabilities in local solvent vaporisation by joule heating during electrolysis. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 427 23-27
- Sengupta, S.K and Singh, O.P. (1993). Contact glow discharge electrolysis: a study of its chemical yields in aqueous inert-type electrolytes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 369. 113-120
- Sirdeshmukh, D.B. dan Sirdeshmukh, L. (2001). *Alkali Halides: A Handbook of Physical Properties 1st ed.*. Springer Publisher
- Tegge, G. and Tegge, G. (2006). *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. 5th rev. edition.* Weinheim.
- Underwood, A.L. and Day, R.A. (1991). *Quantitative analysis, 6th ed.* Prentice Hall International.
- Yan, Z.C., Li, C. and Wang, H. (2006). Experimental study of plasma under-liquid electrolysis in hydrogen generation. *The Chinese Journal of Process Engineering*, p6.

LAMPIRAN A

A. Metode Perhitungan

Pembuatan Larutan KCl 0,025 M

Berat KCl yang ditimbang = 1,872 gram

Berat molekul KCl = 74,9 gr/mol

Volume larutan = 1 L

$$\text{Molaritas larutan} = \frac{\frac{1,872 \text{ gram}}{74,9 \text{ gr/mol}}}{1L} = 0,025 \frac{\text{mol}}{L}$$

Pembuatan Larutan KCl 0,05 M

Berat KCl yang ditimbang = 3,745 gram

Berat molekul KCl = 74,9 gr/mol

Volume larutan = 1 L

$$\text{Molaritas larutan} = \frac{\frac{3,745 \text{ gram}}{74,9 \text{ gr/mol}}}{1L} = 0,05 \frac{\text{mol}}{L}$$

Pembuatan Larutan KCl 0,075 M

Berat KCl yang ditimbang = 5,617 gram

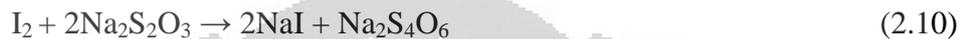
Berat molekul KCl = 74,9 gr/mol

Volume larutan = 1 L

$$\text{Molaritas larutan} = \frac{5,617 \text{ gram}}{\frac{74,9 \text{ gr/mol}}{1L}} = 0,075 \frac{\text{mol}}{L}$$

Perhitungan Jumlah gas Cl₂

Titran yang digunakan: 0,005 M Na₂SO₃



Rumus dasar titrasi

$$n_1 = n_2$$

$$V_1 \cdot M_1 = V_2 \cdot M_2$$

Karena Cl₂ dan Na₂S₂O₃ memiliki perbandingan stoikiometris 1:2, maka

$$2 \times n_{\text{Cl}_2} = (\text{volum titran})(0,005 \text{ M})$$

$$\text{mol Cl}_2 = 0,0025 \times \text{volum titran}$$

contoh perhitungan pada tegangan 500 V dan 0,075 M, dan volume titran yang didapatkan adalah 354 ml

$$\text{mol Cl}_2 = 0,0025 \times \text{volum titran}$$

$$= 0,001 \times 354 \text{ ml}$$

$$= 0,883 \text{ mmol}$$

Perhitungan Konsumsi Energi dalam kJ/mmol

Daya (watt) = Arus (ampere) x Tegangan (volt)

Energi (joule) = daya (watt) x waktu (detik)

Energi / satuan produk (kJ/mmol) = arus x tegangan x waktu / satuan produk

$$= \frac{I \times V \times t}{1000 \times \text{mmol}}$$

contoh perhitungan pada tegangan 500 V dan 0,075 M, didapatkan data

produksi $\text{Cl}_2 = 0,885 \text{ mmol}$

tegangan = 500 V

arus rata-rata = 1,062 A

waktu percobaan = 15 menit

$$\begin{aligned} \text{Energi / satuan produk (kJ/mmol)} &= \frac{I \times V \times t}{\text{mmol}} \\ &= \frac{1,062 \times 500 \times 900}{0,885 \times 1000} \\ &= 540 \text{ kJ/mmol} \end{aligned}$$

LAMPIRAN B

Data Penelitian

Uji Produksi Gas Cl₂ Pada Variasi Tegangan Dan Konsentrasi

Konsentrasi (M)	Voltase (V)	jumlah titran (ml)	mmol Cl ₂	Cl ₂ maks (mol)	pH	Ampere	Daya (Watt)	Daya/mmol	Usaha (kJ)	kJ/mmol
0,025	300	36	0,09	0,01	9,24	1,264	379	4213	341	3792
	400	62,67	0,156	0,01	9,07	0,842	336	2149	303	1934
	500	42,67	0,106	0,01	8,79	0,834	417	3909	375	3518
0,05	300	197,6	0,494	0,02	10,12	1,715	514	1041	463	937
	400	248	0,62	0,02	9,68	1,481	592	955	533	859
	500	160	0,4	0,02	9,28	1,272	636	1590	572	1431
0,075	300	336	0,84	0,03	10,2	1,813	543	647	489	582
	400	486	1,215	0,03	9,94	1,475	590	485	531	437
	500	354	0,885	0,03	9,55	1,062	531	600	477	540

Uji Stabilitas Plasma selama 2 jam

Waktu (menit)	Konsentrasi (M)	Voltase (V)	jumlah titran (ml) per 100 ml sample	mmol Cl ₂	Ampere	Daya (Watt)	Daya/mmol	Usaha (kJ)	kJ/mmol
30	0,05	400	288	0,72	0,925	370	513	666	925
60			130,67	0,326675	0,925	370	1132	1332	4077
90			93,3	0,23325	0,925	370	1586	1998	8565
120			66	0,165	0,925	370	2242	2664	16145

Pengaruh Kedalaman Elektroda

Kedalaman	Waktu (menit)	Konsentrasi (M)	Voltase (V)	jumlah titran (ml)	mmol Cl ₂	Ampere	Daya (Watt)	Daya/mmol	Usaha (kJ)	kJ/mmol
0 cm	5	0,05	400	13,2	0,033	0,352	140,8	4266	42	1280
1 cm	5	0,05	400	44	0,11	1,12	448	4072	134	1221
2 cm	5	0,05	400	61,33	0,153	1,795	718	4682	215	1404