



UNIVERSITAS INDONESIA

**APLIKASI TEKNOLOGI ELEKTROLISIS PLASMA PADA
PROSES PRODUKSI KLOR-ALKALI**

SKRIPSI

**FAKHRIAN ABQARI
0806316051**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**APLIKASI TEKNOLOGI ELEKTROLISIS PLASMA PADA PROSES
PRODUKSI KLOOR-ALKALI**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**FAKHRIAN ABQARI
0806316051**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Fakhrian Abqari

NPM : 0806316051

Tanda Tangan : 

Tanggal : 3 Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Makalah skripsi dengan judul:

APLIKASI TEKNOLOGI ELEKTROLISIS PLASMA PADA PROSES PRODUKSI KLOOR-ALKALI

OLEH:

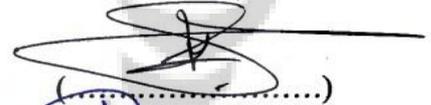
Fakhrian Abqari

0806316051

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, M.T.



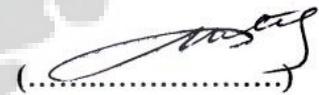
(.....)

Penguji 1 : Prof. Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc., Ph.D.(.....)



(.....)

Penguji 2 : Ir. Yuliusman, M.Eng.



(.....)

Penguji 3 : M. Ibadurrohman, S.T., M.T., M.Sc.Eng.



(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 03 Juli 2012

KATA PENGANTAR

Pertama-tama saya mengucapkan puji dan syukur kepada Allah SWT, karena atas rahmat dan karunia-Nya, saya dapat menyelesaikan makalah skripsi ini. Penulisan makalah skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa dalam pembuatan makalah skripsi ini saya banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Nelson Saksono, M.T. atas segala bimbingannya kepada saya hingga pada akhirnya saya dapat menyelesaikan makalah skripsi ini.
2. Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
3. Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA selaku kepala research group Intensifikasi Proses yang senantiasa memberikan masukan positif dan membangun dari awal saya berkuliah hingga hari ini.
4. Prof. Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc., Ph.D selaku pembimbing akademik saya.
5. Seluruh dosen dan staff Departemen Teknik Kimia UI yang telah memberikan wawasan dan juga ilmu yang bermanfaat dalam bidang Teknik Kimia.
6. Kedua orang tua saya, adik saya, serta calon rekan hidup saya, Pradita Sari, yang selalu memberikan kasih sayang, semangat, dan dukungan tiada hentinya hingga pada akhirnya saya dapat menyelesaikan makalah skripsi ini.
7. Seluruh rekan-rekan sejawat Teknik Kimia angkatan 2008, 2009, dan 2010 yang selalu memberikan canda tawa serta semangat dalam sehingga proses pengerjaan seminar ini menjadi lebih berwarna.

Akhir kata saya meminta maaf apabila dalam makalah seminar ini ada kata-kata yang kurang berkenan. Semoga makalah seminar ini memberikan manfaat bagi ilmu pengetahuan kedepannya.

Depok, 3 Juli 2012

Penulis

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

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

Nama : Fakhrian Abqari
NPM : 0806316051
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul: **APLIKASI TEKNOLOGI ELEKTROLISIS PLASMA PADA PROSES PRODUKSI KLOOR-ALKALI** beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia /memformatkan, 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 : 3 Juli 2012

Yang menyatakan



(Fakhrian Abqari)

ABSTRAK

Nama : Fakhrian Abqari
Departemen : Teknik Kimia
Judul : Aplikasi Teknologi Elektrolisis Plasma Pada Proses
Produksi Klor-Alkali

Sektor industri klor-alkali merupakan salah satu sektor industri penting dalam industri kimia. Akan tetapi, sektor industri klor-alkali merupakan salah satu sektor industri yang mengonsumsi energi listrik paling banyak dikarenakan proses produksinya menggunakan proses elektrolisis. Elektrolisis plasma merupakan metode yang dapat diterapkan dalam aplikasi produksi klor-alkali dan mampu mengurangi konsumsi hingga beberapa kali lipat. Dalam penelitian sebelumnya, dalam produksi hidrogen dari air, elektrolisis plasma mampu mengurangi energi jauh dibandingkan energi yang digunakan pada elektrolisis konvensional. Pada penelitian ini, teknologi elektrolisis plasma akan diaplikasikan pada elektrolisis klor-alkali. Penerapan teknologi elektrolisis plasma pada elektrolisis klor-alkali akan membentuk spesi aktif radikal dari NaCl dan H₂O yang akan membuat produktivitas proses akan meningkat. Produk yang dihasilkan akan diukur dan akan dibandingkan dengan hasil pada elektrolisis konvensional. Kemudian, konsumsi energi yang digunakan akan diukur dan akan dilihat efisiensinya.

Kata kunci: Elektrolisis Plasma, Produksi Klor-Alkali, Konsumsi Energi Listrik

ABSTRACT

Name : Fakhrian Abqari
Department : Chemical Engineering
Title : Application of Plasma Electrolysis Technology in Chlor
- Alkali Production Process

Chlor-alkali industry sector is one of the important industrial sectors in the chemical industry. However, the chlor-alkali industry is one of the industry sectors that consume the most electrical energy due to the production using the process of electrolysis. Plasma electrolysis is a method that can be applied in the production of chlor-alkali and can reduce energy consumption several times. In previous research, the production of hydrogen from water, plasma electrolysis can reduce much energy than the energy used in conventional electrolysis. In this study, plasma electrolysis technology will be applied to the chlor-alkali electrolysis. The application of plasma electrolysis technology in chlor-alkali electrolysis would form the active radical species of NaCl and H₂O which will increase the productivity. The resulting product will be measured and compared with results in conventional electrolysis. Then, the efficiency of energy consumption will be observed.

Keywords: Plasma Electrolysis, Chlor-Alkali Production, Electricity Consumption

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.2.1. Rumusan Masalah	3
1.2.2. Pendekatan.....	3
1.2.3. Hipotesis	4
1.2.4. Batasan Masalah.....	4
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Sistematika Penulisan	5
2. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Sektor Industri Klor-alkali	7
2.1.1. Proses Produksi Sektor Industri Klor-alkali.....	8
2.1.2. Bahan Baku dan Produk Sektor Industri Klor-Alkali.....	10
2.1.3. Konsumsi Energi Listrik Sektor Industri Klor-Alkali.....	11
2.2. Elektrolisis Konvensional Larutan NaCl	12
2.3. Elektrolisis Plasma.....	14
2.3.1. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kinerja Elektrolisis Plasma....	17
2.3.2. Pengukuran Produktivitas Elektrolisis Plasma Terhadap Faktor-faktor yang Mempengaruhi	22
3. METODOLOGI PENELITIAN	26
3.1. Diagram Alir Penelitian	26
3.2. Alat dan Bahan yang Digunakan.....	27
3.3. Rancang Bangun Peralatan Sistem Elektrolisis Plasma Klor-Alkali	27
3.3.1. Rangkaian Pembangkit Plasma	28
3.3.2. Peralatan Reaktor Elektrolisis Plasma.....	29
3.3.3. Peralatan Pengukuran Kandungan Produk	30
3.4. Preparasi Bahan.....	30
3.5. Uji Pendahuluan Peralatan Sistem Elektrolisis Plasma Klor-Alkali.....	31
3.6. Prosedur Penelitian.....	31
3.6.1. Pengujian Karakteristik Elektrolisis Plasma pada Larutan NaCl...	31
3.6.2. Pengukuran Laju Alir Produk Gas pada Proses Elektrolisis Plasma.....	32

3.6.3. Pengukuran Produktivitas Proses Elektrolisis dan Elektrolisis Plasma (Variasi Konsentrasi dan Tegangan).....	32
3.6.4. Pengukuran Produktivitas Proses Elektrolisis Plasma (Variasi Kedalaman Elektroda)	33
3.7. Hasil Uji Peralatan Sistem Produksi Klor-Alkali.....	34
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1. Elektrolisis Plasma.....	35
4.1.1. Fenomena Terbentuknya Plasma pada Proses Elektrolisis	35
4.1.2. Pengaruh Tegangan terhadap Arus Listrik pada Proses Elektrolisis Plasma	36
4.2. Produktivitas Proses.....	40
4.2.1. Laju Alir Volume Produk Gas	42
4.2.2. Produksi Gas Klor	44
4.2.2.1. Pengaruh Tegangan terhadap Produksi Gas Klor	44
4.2.2.2. Pengaruh Konsentrasi terhadap Produksi Gas Klor.....	45
4.2.2.3. Pengaruh Kedalaman Anoda terhadap Produksi Gas Klor ..	47
4.2.3. Pembentukan NaOH (<i>Caustic Soda</i>) dan Produk Samping	50
4.2.4. Efisiensi Energi	52
4.2.4.1. Pengaruh Tegangan dan Konsentrasi terhadap Efisiensi Energi.....	53
4.2.4.2. Perbandingan Elektrolisis Plasma dan Elektrolisis	54
5. PENUTUP.....	57
5.1. Kesimpulan	57
5.2. Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Bagan Produksi PT. Asahimas Chemical Indonesia	7
Gambar 2.2.	Proses Produksi Sektor Industri Klor-Alkali PT. Asahimas Chemical Indonesia	8
Gambar 2.3.	Skema Sel Membran Pretukaran Ion dalam Proses Elektrolisis Klor-Alkali	9
Gambar 2.4.	Pemanfaatan Klorin di Eropa pada Tahun 2009.....	10
Gambar 2.5.	Pemanfaatan Soda Api di Eropa pada Tahun 2009	11
Gambar 2.6.	Jumlah Penggunaan Listrik Sektor Industri Klor-Alkali.....	12
Gambar 2.7.	Grafik Hubungan Antara Temperatur, Arus dan Tegangan Terhadap Waktu dalam Larutan KOH 0,1 M dn Tegangan 200 Volt.....	15
Gambar 2.8.	Kurva I-V (media: NaCl; konduktivitas; $2,93 \text{ mS cm}^{-1}$).....	16
Gambar 2.9.	Efek Tegangan Terhadap Pembentukan Radikal $\bullet\text{OH}$ pada Grafik Waktu Terhadap Konsentrasi Radikal $\bullet\text{OH}$	17
Gambar 2.10.	Efek Tegangan Terhadap Pembentukan Radikal $\bullet\text{H}$ pada Grafik Waktu Terhadap Konsentrasi Radikal $\bullet\text{H}$	18
Gambar 2.11.	Efek Konduktivitas Larutan Terhadap Pembentukan Radikal $\bullet\text{OH}$ Pada Grafik Waktu Terhadap Konsentrasi Radikal $\bullet\text{OH}$	19
Gambar 2.12.	Efek Konduktivitas Larutan Terhadap Pembentukan Radikal $\bullet\text{H}$ Pada Grafik Waktu Terhadap Konsentrasi Radikal $\bullet\text{H}$	19
Gambar 2.13.	Variasi Tegangan Karakteristik dengan Konduktivitas pada Larutan Na_2SO_4	20
Gambar 2.14.	Variasi V_D dengan Konduktivitas Elektrolit	21
Gambar 2.15.	Grafik Pengaruh Temperatur pada W_r dalam Berbagai Konsentrasi pada Tegangan 200V	22
Gambar 2.16.	Efek Konduktivitas Terhadap W_r (Konsumsi Energi) Pada Larutan NaOH dan Metanol, $T = 337,15 \text{ K}$, Kemurnian 99,5%	24

Gambar 2.17. Efek Tegangan Terhadap $G(H_2)$ dalam Media Dielektrikum yang Berbeda. Konduktifitas = $11,55 \text{ ms cm}^{-1}$, $T=337,15 \text{ K}$, Kemurnian Metanol 99,5%	24
Gambar 2.18. Efek Tegangan Terhadap Konsumsi Energi dalam Media Dielektrikum yang Berbeda. Konduktifitas = $11,55 \text{ ms cm}^{-1}$, $T=337,15 \text{ K}$, Kemurnian Metanol 99,5%	25
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian.....	26
Gambar 3.2. Konfigurasi Alat Elektrolisis Plasma Penghasil Hidrogen.....	28
Gambar 4.1. Plasma di dalam Larutan NaCl 0,1 M: a) 100V; b) 200V; c) 300 V; d) 400 V	36
Gambar 4.2. Kurva Hubungan V terhadap I pada 800 ml Larutan NaCl 0,05 M dengan Temperatur 40 – 50°C.....	38
Gambar 4.3. Kurva Hubungan V terhadap I pada 800 ml Larutan NaCl 0,05 M; 0,1 M; dan 0,15 M dengan Temperatur 40 – 50°C	39
Gambar 4.4. Pengaruh Tegangan terhadap Laju Alir Produk Gas pada 800 ml Larutan NaCl 0,1 M dengan Temperatur 40 – 50°C	43
Gambar 4.5. Variasi Tegangan terhadap Produksi Klor pada 800 ml Larutan NaCl 0,05 M; 0,1 M; dan 0,15 M Selama 15 Menit dengan Temperatur 40 – 50°C	45
Gambar 4.6. Variasi Konsentrasi terhadap Produksi Gas Klor pada Tegangan 300 V; 350 V; dan 400 V Selama 15 Menit dengan Temperatur 40 – 50°C	46
Gambar 4.7. Pengaruh Kedalaman Anoda terhadap Daya Listrik pada 800 ml Larutan NaCl 0,1 M dan Tegangan 300 V Selama 5 menit dengan Temperatur 40 – 50°C	47
Gambar 4.8. Pengaruh Kedalaman Anoda terhadap Produksi Gas Klor pada 800 ml Larutan NaCl 0,1 M dan Tegangan 300 V Selama 5 menit dengan Temperatur 40 – 50°C.....	49
Gambar 4.9. Pengaruh Kedalaman Anoda terhadap Konsumsi Energi pada 800 ml Larutan NaCl 0,1 M dan Tegangan 300 V Selama 5 menit dengan Temperatur 40 – 50°C.....	50

Gambar 4.10. Pengaruh Tegangan terhadap pH Larutan Akhir pada 800 ml Larutan NaCl 0,05 M; 0,1 M; dan 0,15 M Selama 15 Menit dengan Temperatur 40 – 50°C.....	51
Gambar 4.11. Variasi Tegangan terhadap Konsumsi Energi pada 800 ml Larutan NaCl 0,05 M; 0,1 M; dan 0,15 M Selama 15 Menit dengan Temperatur 40 – 50°C.....	54
Gambar 4.12. Perbandingan Konsumsi Energi antara Elektrolisis dan Elektrolisis Plasma dalam kJ/mmol Cl ₂ pada 800 ml Larutan NaCl 0,1 M Selama 15 Menit (Elektrolisis = 50 V; Elektrolisis Plasma = 400 V).....	55



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Karakteristik <i>Brine Electrolysis</i>	14
Tabel 2.2.	Efek Komposisi Elektrolit dalam Elektrolisis Plasma dengan Kondisi Konduktivitas yang sama (5.00 mS/cm)	21



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Industri merupakan salah satu sektor yang menjadi penyokong perekonomian Indonesia. Salah satu jenis industri yang berperan adalah industri kimia. Industri kimia dapat tumbuh dan berkembang cukup sehat di negara ini dikarenakan permintaan dari masyarakat akan produk-produk kimia yang semakin meningkat. Hampir semua alat dan bahan yang digunakan dalam kehidupan menggunakan bahan yang berasal dari industri kimia tersebut. Dalam industri kimia, ada beberapa sektor produksi umum, salah satunya sektor produksi klor-alkali. Sektor ini merupakan sektor yang menghasilkan produk-produk seperti klor, hidrogen, soda api (*caustic soda*, $NaOH$), hipoklorit, serta turunan klor lainnya dari bahan baku $NaCl$ dan air. Klor (Cl_2) dan soda api ($NaOH$) merupakan dua dari sepuluh bahan kimia yang paling banyak diproduksi dan digunakan sebagai bahan baku pembuatan produk-produk yang biasa digunakan sehari-hari, seperti: obat-obatan, detergen, deodorant, plastik, herbisida, insektisida, disinfektan, dan lain-lain (Bommaraju dkk, 2010). Namun, sektor produksi klor-alkali merupakan pengguna listrik terbanyak dimana listrik digunakan sebagai bahan baku dan juga daya mesin yang digunakan. Penggunaan listrik tersebut tidak dapat digantikan dan merepresentasikan 70% dari harga penjualan (Santorelli dkk, 2009). Oleh karena itu, perlu dilakukan intensifikasi proses agar efisiensi dan produktivitas meningkat. Salah satu yang dapat dilakukan adalah menerapkan teknologi elektrolisis plasma dalam proses produksi sektor klor-alkali serta melihat kondisi optimum dalam proses produksi tersebut.

Pada pertengahan abad ke 19, klor, yang banyak digunakan pada industri tekstil dan kertas, diproduksi menggunakan mangan dioksida dengan asam klorida (Edinburgh, 1905). Karena mahalnya harga mangan, klor mulai diproduksi dengan menggunakan air garam (*brine*) melalui pendekatan hukum Faraday pada elektrolisis larutan (Cook and Watt, 1851; Stanley, 1853). Penelitian tersebut merupakan awal lahirnya proses produksi pada industri klor-alkali di dunia. Pada

proses produksi elektrolisis konvensional, NaCl dan air dalam proses elektrolisis akan menghasilkan soda api (NaOH), H₂, dan Cl₂, serta produk sampingan pada kondisi tertentu seperti NaClO, ion-ion klorat, dan lain-lain. Elektrolisis konvensional ini terkendala oleh konversi yang kecil dan konsumsi energi yang relatif besar dan alternatif yang dapat digunakan adalah dengan menggunakan teknologi elektrolisis plasma (Saksono dkk, 2010). Teknologi elektrolisis plasma diketahui dapat menghasilkan gas hidrogen delapan kali lebih banyak dari elektrolisis konvensional pada proses produksi hidrogen dengan menggunakan air (Mizunno dkk, 2003). Selain itu, semakin meningkatnya tegangan yang digunakan, maka plasma yang terbentuk akan semakin banyak, yang membuat produktivitas hidrogen meningkat dan konsumsi energi menurun (Saksono, 2010). Efektivitas elektrolisis plasma non-termal ini dipengaruhi oleh komposisi dan konsentrasi elektrolit yang digunakan dimana semakin besar nilai konduktivitas, maka tegangan yang dibutuhkan semakin kecil (Jin dkk, 2010).

Pada penelitian ini, proses produksi sector klor-alkali akan disimulasikan dalam skala laboratorium dengan mengaplikasikan teknologi elektrolisis plasma non-thermal pada elektrolisis larutan NaCl. Penelitian ini akan diawali dengan pembuatan reaktor elektrolisis plasma non-thermal berupa tabung dari bahan *acrylic* yang dilengkapi sepasang elektroda *stainless steel* dan grafit beserta sumber tegangan dari PLN sebagai pembangkit plasma (Saksono dkk, 2010). Penelitian ini menggunakan garam dapur (NaCl) sebagai bahan baku utama dan air distilat sebagai pelarutnya. Larutan NaCl akan dielektrolisis dengan menggunakan daya yang tinggi diawal sehingga terbentuk percikan plasma yang menyebabkan timbulnya spesi-spesi radikal yang membuat mekanisme reaksi tidak seperti biasanya, yaitu pengaktifan reaksi dengan pemanasan. Seperti mekanisme elektrolisis konvensional, elektrolisis plasma ini akan membentuk gas hidrogen (H₂) pada katoda, gas klor (Cl₂) pada anoda dan larutan yang ada akan membentuk soda api (*caustic soda*, NaOH) (Abdel-Aal dkk, 2010). Kemudian, gas klor akan diukur dengan menggunakan metode titrasi larutan iodin dan soda api yang dihasilkan akan diuji kadarnya dengan pH meter. Selain itu, konsumsi energi yang akan digunakan juga diukur dan dibandingkan dengan hasil elektrolisis konvensional. Dalam proses elektrolisis plasma ini, variabel yang akan

divariasikan adalah konsentrasi NaCl dan juga tegangan untuk mendapatkan kondisi konsentrasi NaCl dan tegangan optimum dalam produksi.

Penelitian ini akan menghasilkan sebuah metode baru (elektrolisis plasma) dalam proses produksi sektor klor-alkali dengan konsumsi energi listrik yang jauh lebih rendah. Pengurangan konsumsi energi listrik ini akan mengurangi biaya listrik yang digunakan serta dapat menghemat energi ditengah krisis energi seperti saat ini. Selain itu, dengan meningkatnya kuantitas produk, berarti kuantitas H₂ yang dihasilkan juga meningkat. Hidrogen yang dihasilkan, selain digunakan sebagai bahan baku sektor produksi lain, sebagian dari jumlah yang dihasilkan tersebut juga dapat dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit energi pada industri sehingga dapat menekan lebih banyak pemanfaatan listrik yang digunakan. Sehingga dari tinjauan ekonomi dan energi akan jauh lebih menguntungkan. Dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan teknologi plasma dalam proses elektrolisis pada sektor produksi klor-alkali dapat mendukung usaha pemerintah dalam melakukan penghematan energi listrik serta mampu meningkatkan pendapatan nasional dan mampu menguatkan keekonomian industri kimia nasional.

1.2. Perumusan Masalah

1.2.1. Rumusan Masalah

Bagaimana kinerja dan produktivitas elektrolisis plasma pada proses produksi klor-alkali merupakan masalah pertama yang hendak ditinjau dalam penelitian ini. Selain itu, variabel proses (tegangan dan konsentrasi NaCl) terhadap kinerja dan produktivitas elektrolisis plasma pada proses produksi klor-alkali ini akan dilihat pengaruhnya.

1.2.2. Pendekatan

Sampai saat ini, para peneliti yang melakukan penelitian dalam elektrolisis plasma masih terfokus dalam produksi hidrogen dari air. Beberapa larutan elektrolit kuat (seperti NaCl) ditambahkan untuk meningkatkan konduktivitas larutan sehingga produktivitas hidrogen meningkat. Dalam penelitian ini, NaCl digunakan sebagai bahan baku sektor produksi klor-alkali dan dengan

menggunakan elektrolisis plasma produk-produk utama seperti Cl_2 , NaOH , dan H_2 akan dilihat produktivitasnya.

1.2.3. Hipotesis

Penerapan teknologi elektrolisis plasma pada elektrolisis klor-alkali akan membentuk spesi aktif radikal dari NaCl dan H_2O yang akan membuat produktivitas pembentukan produk (Cl_2 , NaOH , dan H_2) akan meningkat. Disaat produktifitas meningkat, maka dalam jumlah produk yang sama, penggunaan energi listrik akan jauh berkurang.

1.2.4. Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi dengan:

1. Variabel bebas yang divariasikan meliputi tegangan listrik yang dialirkan menuju sistem elektrolisis plasma dan juga konsentrasi larutan NaCl yang digunakan.
2. Garam NaCl yang digunakan adalah garam NaCl teknis.
3. Elektrolisis plasma akan menggunakan metode yang telah dipublikasikan sebelumnya (Saksono dkk, 2010 dan Mizunno dkk, 2003) dengan rancangan desain reaktor menggunakan tabung akrilik dengan modifikasi grafit pada anoda dan *stainless steel* pada katoda.
4. Air yang digunakan adalah air aquadest.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini antara lain:

1. Melakukan pengujian kinerja dan produktivitas teknologi elektrolisis plasma pada proses produksi klor-alkali.
2. Mendapatkan pengaruh variabel proses (tegangan dan konsentrasi larutan NaCl) terhadap kinerja dan produktivitas elektrolisis plasma.

1.4. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam proposal penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB 1 : PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang masalah, perumusan masalah yang meliputi rumusan masalah, pendekatan, hipotesis, dan batasan masalah, tujuan penelitian, serta sistematika penulisan yang digunakan.

BAB 2 : TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang dasar-dasar konsep dalam penelitian yang meliputi pengertian sektor industri klor-alkali, proses produksi sektor industri klor-alkali, bahan baku dan produk sektor industri klor-alkali, konsumsi energi listrik sektor industri klor-alkali, elektrolisis konvensional larutan NaCl, elektrolisis plasma, faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja elektrolisis plasma, serta pengukuran efektifitas elektrolisis plasma terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi

BAB 3 : METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menginformasikan penjelasan tentang metodologi dan tahap-tahap penelitian yang akan dilakukan dari awal hingga akhir dan memuat bahan/alat yang digunakan, serta prosedur penelitian.

BAB 4 : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi pembahasan hasil penelitian yang meliputi pembahasan mengenai karakteristik tegangan dan arus listrik pada elektrolisis plasma dengan larutan NaCl yang merujuk pada penelitian-penelitian sebelumnya pada aplikasi produksi Hidrogen dengan media air ditambah larutan elektrolit. Selanjutnya, pembahasan yang dilakukan meliputi pembahasan mengenai produktivitas elektrolisis plasma dalam produksi gas Klor dan

juga perbandingan konsumsi energi antara elektrolisis dan elektrolisis plasma. Selain gas Klor, produksi NaOH juga dibahas sebagai produk samping yang dihasilkan di dalam larutan.

BAB 5 : PENUTUP

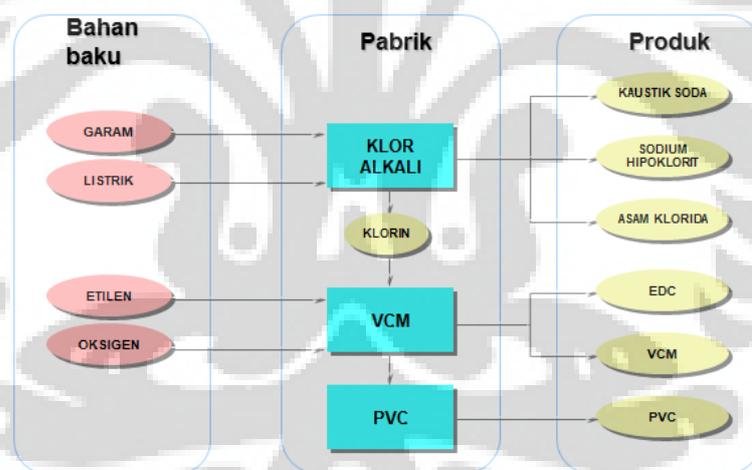
Bab ini berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan. Selain itu, bab ini juga dilengkapi oleh saran yang menjadi masukan untuk penelitian selanjutnya mengenai produksi Klor-Alkali dengan menggunakan elektrolisis plasma.



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sektor Industri Klor-Alkali

Sektor industri klor-alkali merupakan salah satu sektor industri penting pada industri kimia. Sektor industri ini merupakan salah satu sektor industri yang menjadi tumpuan sektor industri kimia lain karena produk yang dihasilkan dapat 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 (Euro Chlor Committee, 2009). Secara umum, peran dari sektor industri klor-alkali ini dapat digambarkan pada Gambar 2.1. di bawah ini.



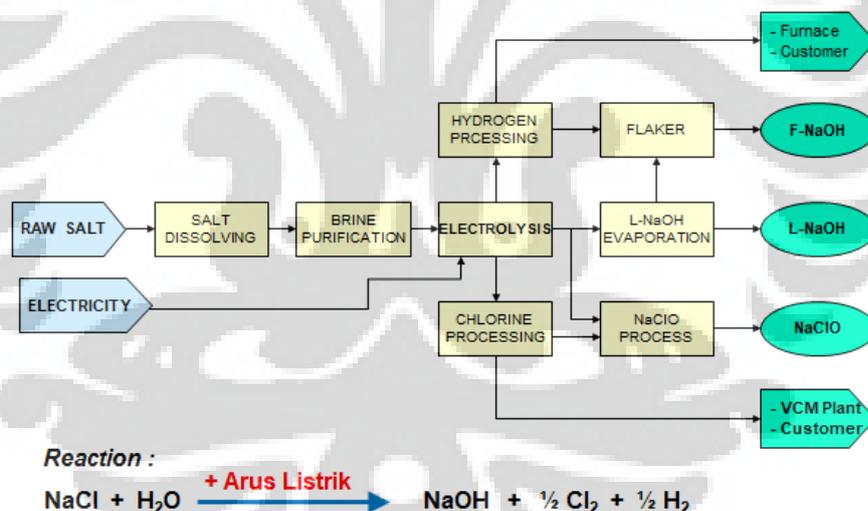
Gambar 2.1. Bagan Produksi PT. Asahimas Chemical Indonesia

Produksi klor-alkali memiliki laju pertumbuhan yang moderat sekitar 1-2% selama periode tahun 1990-an. Permintaan dunia akan klor diproyeksikan akan berkembang pada laju sekitar 2% pada tahun 2011 ini, sedangkan kapasitas klor akan berkembang hingga 54 juta MT pada 2010 dari 45 juta MT pada 2001 (Bommaraju dkk, 2011). Secara umum, dapat dikatakan bahwa sektor industri

klor-alkali merupakan salah satu sektor industri yang memiliki prospek yang cukup baik dimasa depan dan mampu mendukung perekonomian nasional.

2.1.1. Proses Produksi Sektor Industri Klor-Alkali

Secara umum, proses produksi sektor industri klor-alkali seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. di bawah ini (proses produksi pada PT. Asahimas Chemical Indonesia). Proses ini berawal dari pemurnian garam yang dipakai, hingga hanya akan menyisakan bahan baku utama yaitu NaCl dari pengotor-pengotor lain yang ada pada garam atau sumber lain yang mengandung garam (air laut, dan lain-lain). Inti dari proses ini adalah proses elektrolisis yang menghasilkan produk-produk utama seperti soda api, Cl_2 , dan H_2 , serta produk sampingan lain, yang kemudian diolah lebih lanjut menjadi produk jadi pada sektor industri lain.

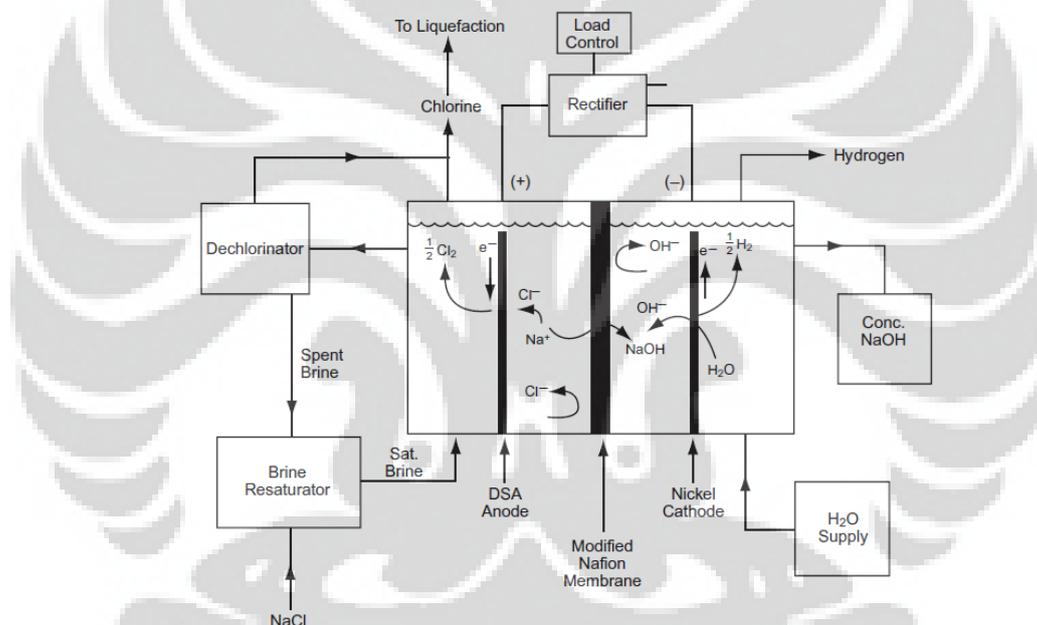


Gambar 2.2. Proses Produksi Sektor Industri Klor-Alkali PT. Asahimas Chemical Indonesia

Pada dasarnya, untuk memproduksi klor dan soda api adalah dengan mengalirkan arus listrik melalui *brine* (larutan garam – NaCl dalam air). Larutan garam tersebut terdisosiasi dan terrekombinasi oleh pertukaran elektron menjadi gas klor, soda api, dan hidrogen. Berdasarkan perhitungan reaksi kimia, klor, soda

api, dan hidrogen selalu dihasilkan dengan rasio 1,1 ton soda api dan 0,03 ton hidrogen per ton klor. Kombinasi produk ini biasa disebut dengan unit elektrokimia (*Electrochemical Unit, ECU*) (Euro Chlor Committee, 2009).

Dalam elektrolisis, ada tiga proses dasar dalam produksi klor dan caustic soda dari *brine* (garam): dengan menggunakan sel merkuri, sel diafragma, dan sel membran. Sel membran merupakan yang paling modern dari ketiga cara tersebut serta memiliki keuntungan bagi lingkungan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 2.3. Kedua cara lainnya mampu menghasilkan limbah berbahaya (yang mengandung merkuri atau asbestos).



Gambar 2.3. Skema Sel Membran Pertukaran Ion dalam Proses Elektrolisis Klor-Alkali (O'Brien, 2005)

Pada proses dengan menggunakan membran, klor pada anoda dan hidrogen pada katoda dibuat terpisah dengan memasang membran polimer selektif yang dapat dilewati oleh ion sodium yang menuju katoda dan bereaksi dengan ion hidroksil untuk membentuk kaustik soda (NaOH). Membran ini yang akan membuat selektifitas dari produk menjadi tinggi sehingga produk sampingan yang

tidak diinginkan (klorit, klorat, dan lain-lain) tidak terbentuk (Bommaraju dkk, 2011).

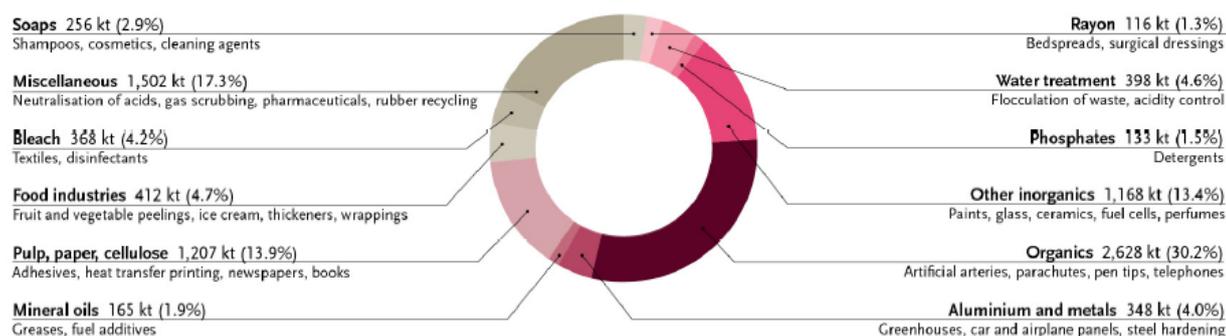
2.1.2. Bahan Baku dan Produk Sektor Industri Klor-Alkali

Bahan baku yang digunakan dalam sektor produksi klor-alkali hanya tiga, yaitu garam (NaCl), air, dan tenaga listrik. Garam yang digunakan dapat berupa kristal garam maupun garam yang berasal dari lautan. Sedangkan produk yang dihasilkan berupa soda api (NaOH), hidrogen (H₂), klor (Cl₂), serta produk sampingan seperti ion hipoklorit, klorat, dan lain sebagainya pada kondisi tertentu. Produksi sampingan seperti sodium klorat dan sodium hipoklorit ini dapat terbentuk saat lokasi antara anoda dan katoda tidak dipisahkan oleh pemisah atau diaphragma atau membran. Kedua produk ini terbentuk karena reaksi yang terjadi antara klor dan kaustik pada elektroda.

Klor dan soda api 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 asam klorida atau dapat pula digunakan sebagai bahan bakar produksi uap. Gambar 2.4. dan 2.5. berikut adalah diagram pemanfaatan klor dan klor-alkali pada tahun 2009.



Gambar 2.4. Pemanfaatan Klor di Eropa pada Tahun 2009 (Euro Chlor Comitee, 2009)

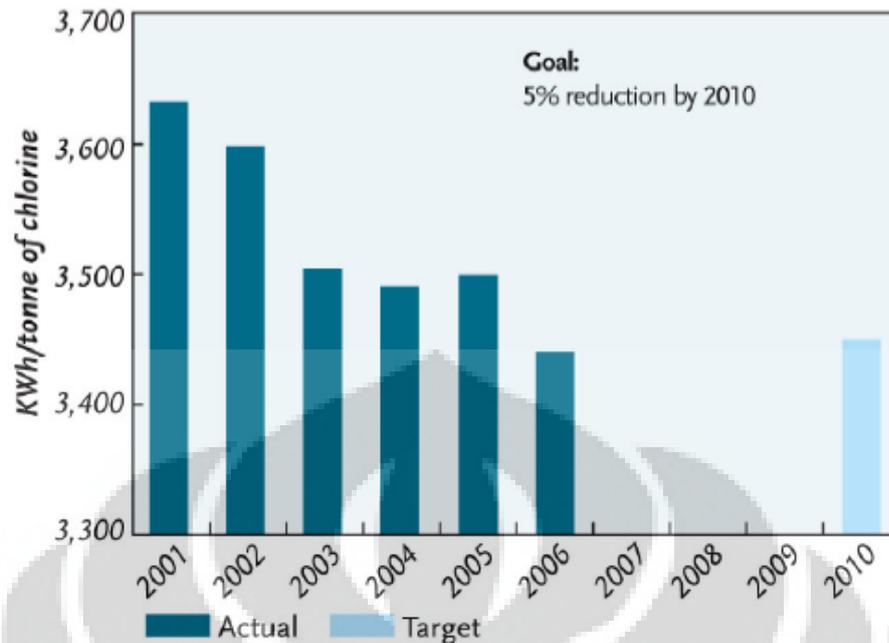


Gambar 2.5. Pemanfaatan Soda Api di Eropa pada Tahun 2009 (Euro Chlor Comitee, 2009)

Dari variasi pemanfaatan produk sektor industri klor-alkali tersebut, membuat sektor industri ini sebagai salah satu sektor industri yang mampu menyokong sebagian besar industri kimia di dunia.

2.1.3. Konsumsi Energi Listrik Sektor Industri Klor-Alkali

Listrik penting digunakan dalam produksi klor. Konsumsi energi rata-rata pada proses elektrolisis klor adalah sekitar 3,3 MWh per unit elektrokimia (ECU). Listrik tidak dapat digantikan dan merepresentasikan 70% dari harga penjualan. Sebagai bahan baku dalam produksi chlor-alkali, penggunaan listrik utama, yaitu pada reaksi elektrokimia, tidak dapat dikurangi. Penghematan energi yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan teknologi yang lebih efisien. Hal ini membuat harga produksi menjadi tinggi dan proses yang ada sangat boros energi di tengah kasus krisis energi global. Gambar 2.6. menunjukkan besarnya konsumsi energi listrik serta target pengurangan energi listrik yang sedang diupayakan dalam rangka mengoptimasi produksi yang lebih hemat energi.



Gambar 2.6. Jumlah Penggunaan Listrik Sektor Industri Klor-Alkali (Euro Chlor Committee, 2007)

Indikator penggunaan energi yaitu berdasarkan listrik dan uap yang digunakan. Energi listrik terdiri dari daya yang digunakan untuk elektrolisis (*transformer, rectifiers, dan cell*) dan daya mesin (pompa, kompresor, sentrifuge, dan utilitas). *Steam* digunakan dalam proses evaporasi kaustik soda dan juga untuk kepentingan utilitas minor.

Pada tahun 2006, industri mampu mencapai target 2010, yaitu pengurangan konsumsi energi dalam KWh per ton klor yang dihasilkan sebesar 5% dibandingkan dengan tahun 2001. Rata-rata energi yang dikonsumsi tahun lalu (2006) adalah sebesar 3,44 kWh/ton. (Euro Chlor Committee, 2007).

2.2. Elektrolisis Konvensional Larutan NaCl

Elektrolisis adalah metode pemisahan ikatan-ikatan senyawa dengan mengalirkan arus listrik pada ikatan senyawa tersebut. Senyawa ionik, seperti garam NaCl, terurai pada pelarut seperti air, dan membentuk ion-ion dalam larutan. Arus listrik dialirkan diantara dua elektroda inert dalam larutan. Elektroda bermuatan negatif disebut katoda dan elektroda bermuatan positif disebut anoda. Masing-masing elektroda mengikat ion-ion yang memiliki muatan yang berbeda.

sehingga ion bermuatan negatif akan menuju anoda dan ion yang bermuatan positif akan menuju katoda.

Michael Faraday disamping mengembangkan metode elektrolisis juga menerangkan hubungan kuantitatif antara jumlah arus listrik yang dilewatkan pada sel elektrolisis dengan jumlah zat yang dihasilkan pada elektroda. Michael Faraday merangkum hasil pengamatannya dalam dua hukum pada tahun 1833, yang berisi:

1. Jumlah zat yang dihasilkan di elektroda sebanding dengan jumlah arus listrik yang melalui sel.
2. Bila sejumlah tertentu arus listrik melalui sel, jumlah mol zat yang berubah pada elektroda adalah konstan, tidak bergantung pada jenis zat. Misalnya, kuantitas listrik yang diperlukan untuk mengendapkan 1 mol logam monovalen adalah 96485 Coulomb, tidak bergantung pada jenis logamnya.

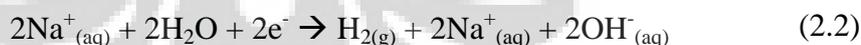
Pada elektrolisis larutan NaCl (*Brine Electrolysis*), prinsip dasar pada elektrolisis ini adalah sebagai berikut:

1. Ion klor (Cl^-) teroksidasi pada anoda untuk membentuk gas klor (Cl_2)
2. Pada katoda: jika merkuri digunakan, maka Na/Hg amalgam terbentuk dan kemudian (H_2). Ion hidroksil (OH^-) dapat terbentuk dengan menambahkan air sebagai dekomposer.

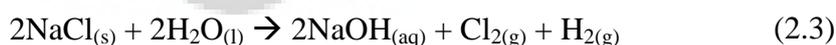
Reaksi pada anoda adalah (Santorelli, 2009) :



Reaksi pada katoda adalah:



Dan reaksi totalnya adalah:



Akan tetapi, elektrolisis NaCl (*Brine Electrolysis*) yang digunakan sebagai metode dalam sektor produksi klor-alkali sampai saat ini memiliki kelemahan yang cukup signifikan, yaitu rendahnya konversi yang dihasilkan dari proses

elektrolisis dan kebutuhan arus listrik yang tinggi saat operasi elektrolisis sedang berlangsung seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Karakteristik *Brine Electrolysis* (Abdel-Aal dkk, 2010)

Technology	Brine Electrolysis
Development sage	Commercial large scale unit
Cell voltage (V)	3,0 – 4,5
Decomposition voltage (V)	2,31
Current density (mA cm ⁻²)	-
Temperature (°C)	60 – 70
Cathode	Ti coated with Pt
Anode	-
Cell type	H ₂ /Cl ₂
Electrolyte	NaCl
Salinity level	35%
Chlorine current efficiency	95 – 97%
Main product(s)	Cl ₂ /NaOH
By-product	H ₂
Major advantages	Proven technology
Disadvantages	Low efficiency

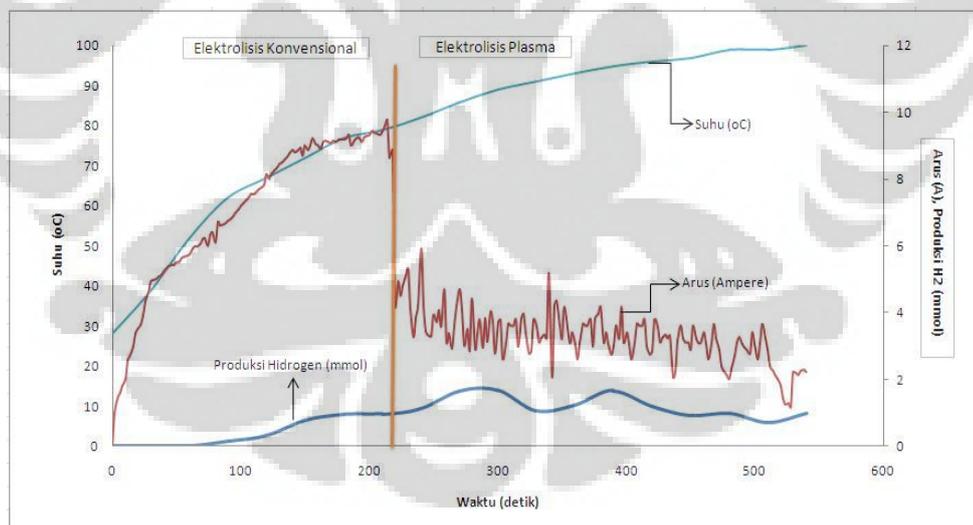
2.3. Elektrolisis Plasma

Plasma adalah gas yang terionisasi yang mengandung ion positif dan negatif, serta elektron sebanyak spesi netral (Yan dkk, 2006). 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 di sekitarnya dan juga akan mempengaruhi medan magnetik di sekitarnya (Moustakas dkk, 2005).

Elektrolisis plasma (*Contact Glow Discharge Electrolysis, CGDE*) adalah proses elektrokimia dimana plasma dihasilkan oleh arus DC antara elektroda dan permukaan elektrolit di sekitarnya (Yan dkk, 2006). Elektrolisis konvensional dikembangkan menjadi elektrolisis plasma (CGDE) ketika tegangan yang diberikan sangat tinggi. Salah satu kelebihan dari CGDE ini dibandingkan dengan elektrolisis konvensional adalah tingginya hasil produk kimia dibandingkan dengan hasil yang didapat berdasarkan hukum Faraday. Hasil yang didapat pada elektroda pijaran plasma (*glow discharge electrode*) beberapa kali lebih besar

dibandingkan nilai faraday yang dihasilkan dari elektrolisis konvensional seperti H_2 yang terbentuk pada anoda, dan Cl_2 yang terbentuk pada katoda. Dalam percobaan produksi hidrogen dengan menggunakan air (H_2O) murni pada suhu $80^\circ C$ dan tegangan 230V, Mizuno (2003) mendapatkan efisiensi penggunaan energi listrik hingga 800% dibandingkan kebutuhan energi listrik menurut hukum Faraday tersebut. Hasil yang dihasilkan oleh elektrolisis plasma ini terbagi kedalam dua wilayah reaksi yang terpisah, yaitu cairan dekat plasma dan plasma di sekitar elektroda, dan ini terjadi melalui disosiasi dari pelarut dan molekul terlarut dengan proses perpindahan energi yang tepat (Sengupta dkk, 1994). Terdapat banyak radikal, ion, dan spesi aktif lain yang dihasilkan melalui dampak disosiasi, eksitasi, dan ionisasi elektron.

Plasma elektrolisis akan terbentuk pada kondisi tegangan yang tinggi. Sebelum plasma terbentuk, arus akan meningkat dengan bertambahnya waktu. Setelah plasma mulai terbentuk, arus akan mengalami penurunan secara signifikan (Gambar 2.7).

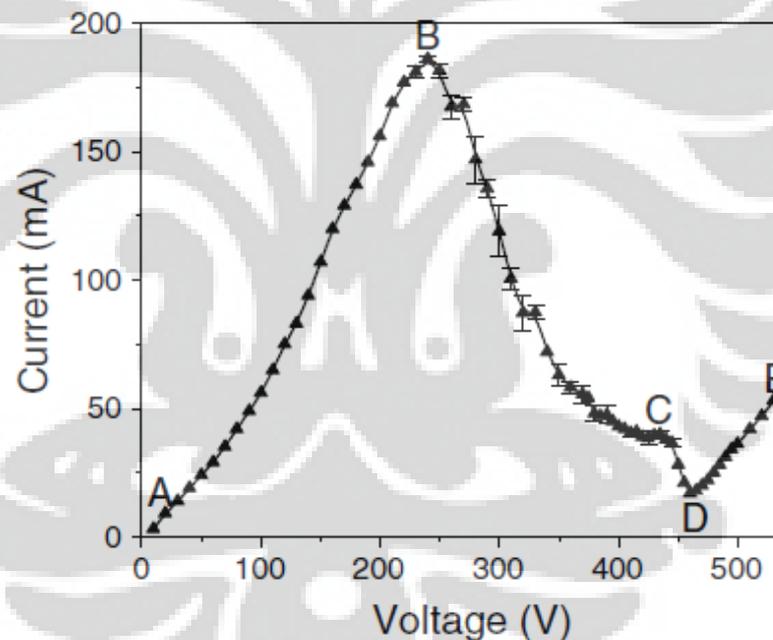


Gambar 2.7. Grafik Hubungan Antara Temperatur, Arus dan Tegangan Terhadap Waktu dalam Larutan KOH 0,1 M dan Tegangan 200 Volt (Saksono, 2010)

Untuk menjelaskan mekanisme terjadinya elektrolisis plasma, serangkaian penelitian telah dilakukan pada kondisi elektrolit yang berbeda untuk menguji karakteristik dari elektrolisis plasma ini. Gambar 2.8. mengilustrasikan tipe kurva

I – V dalam larutan NaCl. Dalam rata-rata karakteristik I – V, beberapa wilayah teridentifikasi (Jin dkk, 2010):

- a) $V_A < V < V_B$: wilayah ohm (*ohmic region*); berlangsungnya proses elektrolisis konvensional dengan gelembung-gelembung kecil gas meninggalkan anoda.
- b) $V_B < V < V_D$: wilayah berkurangnya arus (*limiting current region*)/ wilayah penjumlahan arus; gelembung-gelembung bergabung menuju anoda dan fraksi gelembung yang menutupi anoda semakin meningkat. V_B merupakan *breakdown voltage* dan V_D merupakan tegangan kritis/ *midpoint voltage* menurut referensi. Wilayah ini juga disebut dengan wilayah transisi. Wilayah transisi terbagi menjadi tiga bagian, seperti:



Gambar 2.8. Kurva I-V (Media: NaCl; Konduktivitas; 2.93 mS cm^{-1}) (Jin dkk, 2010)

- i) $V_B < V < V_C$: penurunan arus secara drastis terjadi. Uap-uap penyelubung mulai tampak dan menutupi permukaan anoda. Gelembung pada uap-uap penyelubung tersebut menjalani proses pembentukan dan meluas yang menyebabkan arus menjadi berosilasi dan perlahan mulai menjadi stabil.

ii) $V_C < V < V_D$: selubung uap yang rapat terbentuk di sekitar anoda dan secara progresif menutup permukaan anoda.

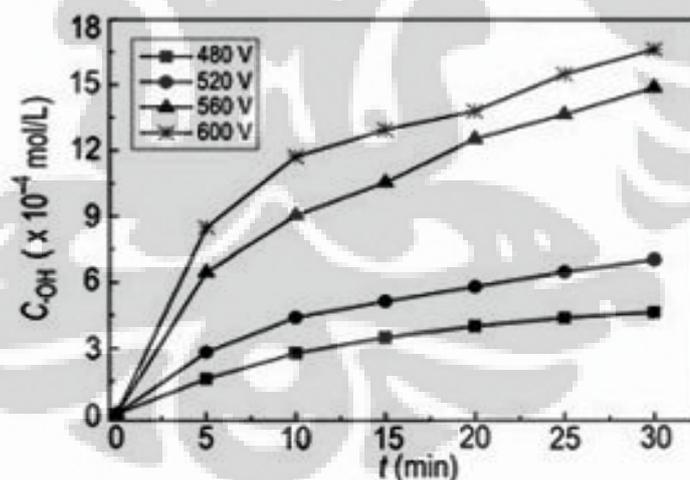
iii) $V > V_D$: area elektrolisis plasma; selubung uap menutupi semua area inti gelembung aktif anoda. Perpindahan arus terjadi melalui pijaran muatan (plasma). Arus mulai meningkat secara perlahan seiring dengan meningkatnya tegangan dan pijaran berwarna mulai tampak

2.3.1. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kinerja Elektrolisis Plasma (CGDE)

Dalam elektrolisis plasma, ada beberapa faktor yang mempengaruhi radikal-radikal aktif yang sangat berperan dalam mekanisme reaksi pembentukan Cl_2 , H_2 , dan NaOH . Hasil penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti adalah sebagai berikut:

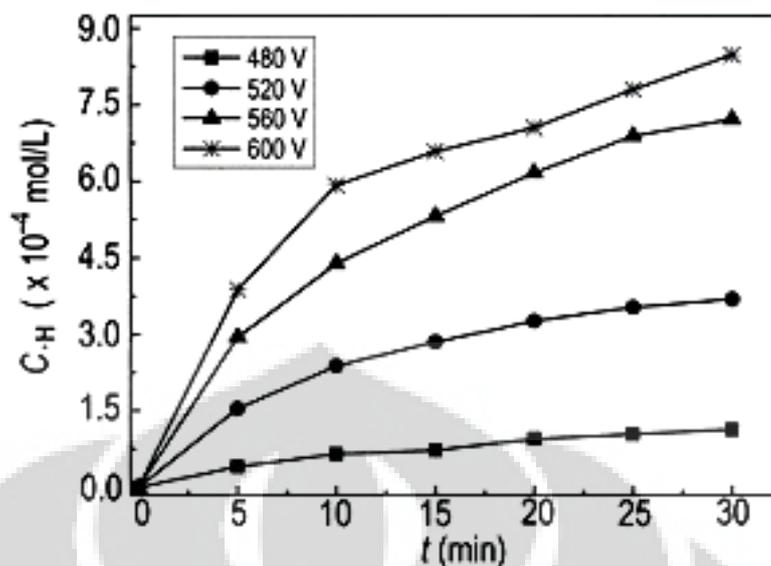
1. Efek Tegangan

Efek variasi tegangan listrik pada elektrolisis plasma (CGDE) terhadap pembentukan radikal aktif ditunjukkan oleh gambar berikut ini:



Gambar 2.9. Efek Tegangan Terhadap Pembentukan Radikal $\bullet\text{OH}$ pada Grafik Waktu

Terhadap Konsentrasi Radikal $\bullet\text{OH}$ (Gao dkk, 2008)

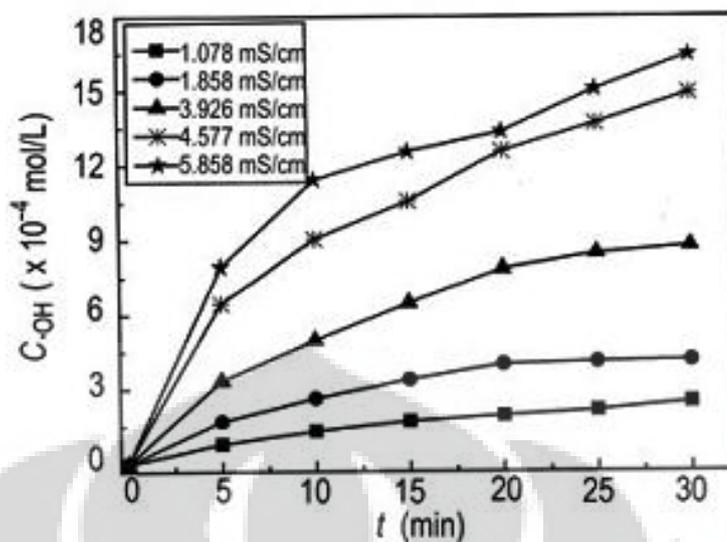


Gambar 2.10. Efek Tegangan Terhadap Pembentukan Radikal •H pada Grafik Waktu Terhadap Konsentrasi Radikal •H (Gao dkk, 2008)

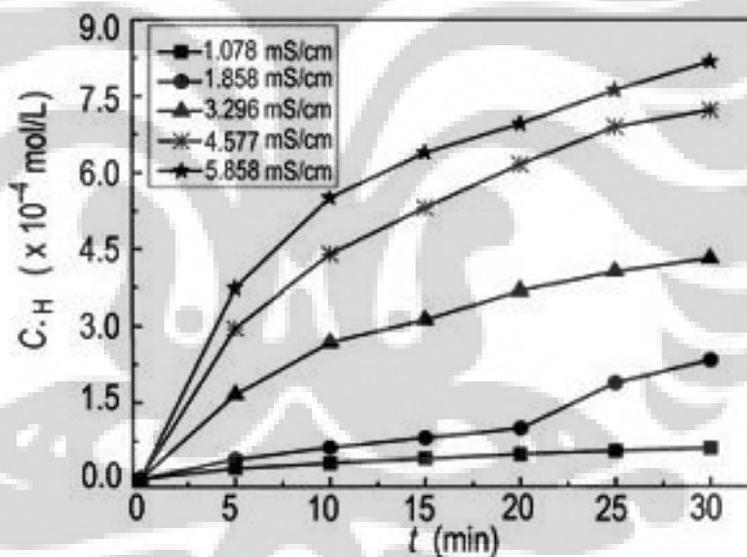
Pada grafik Gambar 2.9. dan 2.10. dapat dilihat bahwa semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan untuk menghasilkan plasma, konsentrasi radikal aktif yang terbentuk semakin tinggi pula. Hal ini diakibatkan karena dengan perbedaan tegangan yang tinggi, energi pengeksitasi elektron untuk menghasilkan radikal juga semakin tinggi. Akibatnya semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan, pembentukan radikalnya pun juga semakin besar.

2. Efek Konduktivitas

Selain tegangan, konduktivitas larutan yang digunakan pun juga mempengaruhi pembentukan radikal aktif dalam elektrolisis plasma. Gambar 2.11. dan Gambar 2.12. adalah grafik variasi konduktivitas larutan pada elektrolisis plasma terhadap pembentukan radikal aktif.



Gambar 2.11. Efek Konduktivitas Larutan Terhadap Pembentukan Radikal \bullet OH Pada Grafik Waktu Terhadap Konsentrasi Radikal \bullet OH (Gao et al, 2008)

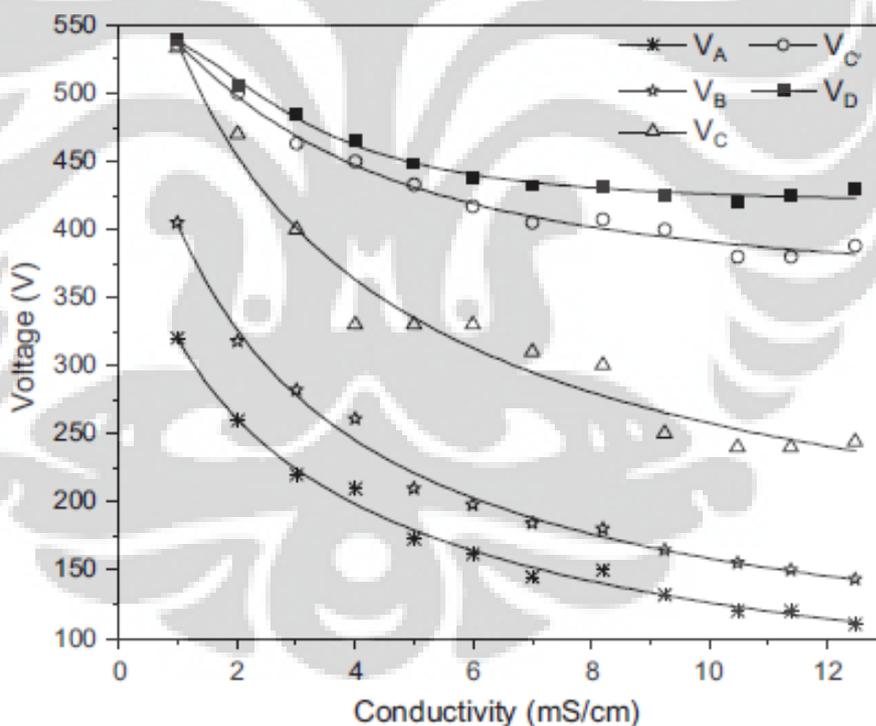


Gambar 2.12. Efek Konduktivitas Larutan Terhadap Pembentukan Radikal \bullet H Pada Grafik Waktu Terhadap Konsentrasi Radikal \bullet H (Gao dkk, 2008)

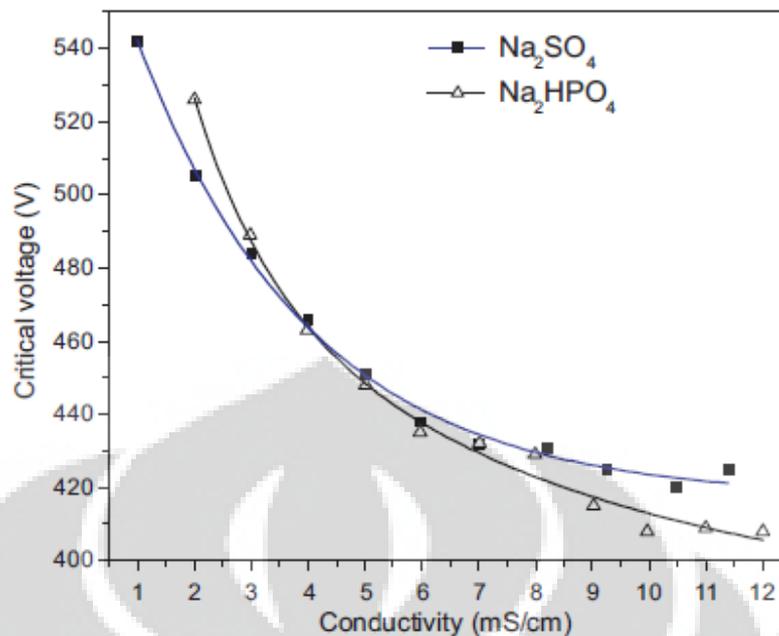
Dari gambar di atas terlihat bahwa semakin besar konduktivitas larutan, radikal yang terbentuk pun semakin besar pula. Hal ini dikarenakan dengan konduktivitas yang tinggi, elektron-elektron bisa bergerak dengan lebih mudah dibanding larutan yang konduktivitasnya rendah. akibatnya, peluang terjadinya tumbukan antar elektron juga semakin besar, sehingga

pembentukan radikal pun juga akan terjadi dengan lebih baik. Konduktivitas larutan ini dapat ditingkatkan oleh larutan elektrolit.

Elektrolisis plasma masih merupakan proses elektrokimia dimana pijaran muatan (plasma) yang terbentuk akibat perpindahan ion. Hal ini membuktikan bahwa konduktivitas larutan memiliki pengaruh pada nilai karakteristik tegangan pada elektrolisis plasma. Berdasarkan Gambar 2.13. dan Gambar 2.14. di bawah ini, nilai V_A , V_B , V_C , V_C' , dan V_D menurun dengan meningkatnya konduktivitas larutan. Inkremen konduktivitas yang dihasilkan oleh densitas arus yang lebih tinggi pada tegangan dan disipasi daya yang sama menjadi relatif lebih tinggi. Dalam kondisi seperti ini, selubung uap dan plasma menjadi mudah untuk dibentuk.



Gambar 2.13. Variasi Tegangan Karakteristik dengan Konduktivitas pada Larutan Na_2SO_4 (Jin dkk, 2010)



Gambar 2.14. Variasi V_D dengan Konduktivitas Elektrolit (Jin dkk, 2010)

3. Efek Komposisi Elektrolit

Untuk melihat karakteristik reaktivitas kimia pada plasma, konsentrasi H_2O_2 ditentukan sebagai indikator waktu tinggal senyawa kimia. Konsentrasi H_2O_2 meningkat seiring dengan meningkatnya konduktivitas, dan kemudian dijaga pada nilai yang tetap. Tabel 2.2. menunjukkan jumlah konsentrasi H_2O_2 yang diproduksi pada elektrolit yang berbeda.

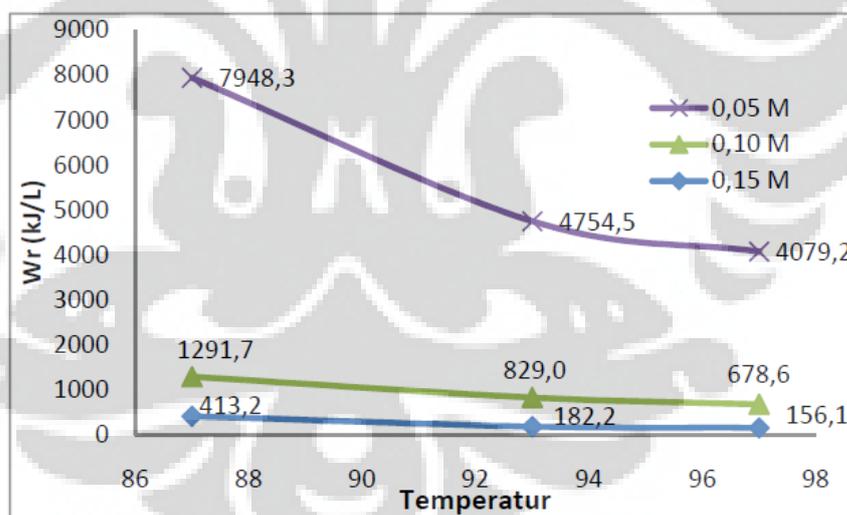
Table 2.2. Efek Komposisi Elektrolit dalam Elektrolisis Plasma dengan Kondisi Konduktivitas yang sama (5.00 mS/cm) (Jin dkk, 2010)

Electrolyte	V_D (V)	$C_{H_2O_2}$ (mg/L)
Na ₂ SO ₄	451	59.22
Na ₂ HPO ₄	451	60.65
Na ₂ CO ₃	456	47.87
NaHCO ₃	450	43.35
NaCl	450	22.56
NaAc	452	41.26
Na ₂ SO ₄ + Na ₂ HPO ₄	450	63.26
Na ₂ SO ₄ + CuSO ₄	452	64.01
Na ₂ SO ₄ + NaAc	453	64.66
Na ₂ SO ₄ + Na ₂ CO ₃	455	62.56
Na ₂ SO ₄ + NaHCO ₃	459	59.60
Na ₂ SO ₄ + H ₂ SO ₄	458	63.85
Na ₂ SO ₄ + NaOH	458	64.02
Na ₂ SO ₄ + NaCl	452	56.58
Na ₂ SO ₄ + CH ₃ OH	450	46.71

Pada larutan NaCl, konsentrasi H_2O_2 hanya sebesar 22,56 mg/L yang mana lebih rendah jika dibandingkan dengan Na_2SO_4 . Hal ini dikarenakan ketika elektrolisis plasma diterapkan pada larutan NaCl, Cl^- dapat dirubah menjadi radikal klor. Dua klor radikal akan bereaksi satu sama lain dan membentuk molekul Cl_2 . Selain Cl_2 , HClO juga terbentuk dalam reaksi yang mengonsumsi H_2O_2 di dalam anolit. Sehingga konsentrasi H_2O_2 dalam dalam NaCl lebih rendah dibandingkan dengan dalam Na_2SO_4 .

4. Efek Konsentrasi Larutan

Semakin meningkatnya konsentrasi larutan, maka akan menyebabkan bertambahnya konduktivitas larutan yang menambah aktifitas pembentukan radikal (Abidin, 2010) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.15. berikut ini.



Gambar 2.15. Grafik Pengaruh Temperatur pada W_r dalam Berbagai Konsentrasi pada Tegangan 200V (Abidin, 2010)

2.3.2. Pengukuran Produktivitas Elektrolisis Plasma Terhadap Faktor-Faktor yang Mempengaruhi

Produktivitas proses elektrolisis plasma dalam penelitian ini diukur dengan menggunakan parameter perbandingan produktivitas hidrogen pada proses

elektrolisis plasma dengan proses elektrolisis Faraday yang dinyatakan dengan $G(H_2)$. Elektrolisis Faraday adalah jumlah maksimum hidrogen yang dapat diproduksi melalui proses elektrolisis konvensional. $G(H_2)$ dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Yan dkk, 2009):

$$G(H_2) = \frac{V_{H_2}/22.4}{Q/2F} = \frac{V_{H_2} \cdot F}{11.2Q} \text{ mol. mol}^{-1} \quad (2.4)$$

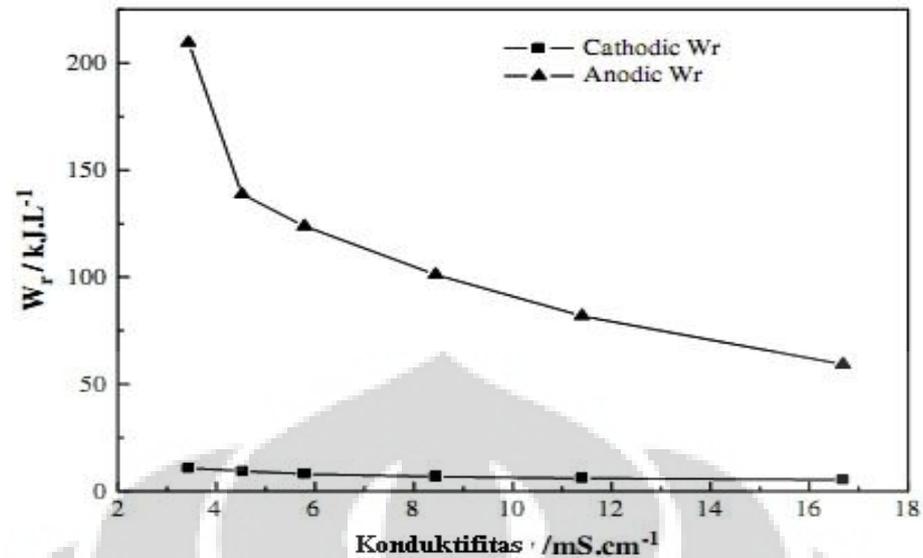
dimana Q , F , dan V_{H_2} adalah muatan elektrik (coulomb), konstanta Faraday, dan volum produk hidrogen.

Selain itu, Yan (2006) mendefinisikan Wr sebagai jumlah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan sejumlah volume hidrogen pada waktu yang ditentukan. Wr ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Wr = \frac{V \cdot Q}{n_{H_2}} \text{ kJ. mmol}^{-1} \quad (2.5)$$

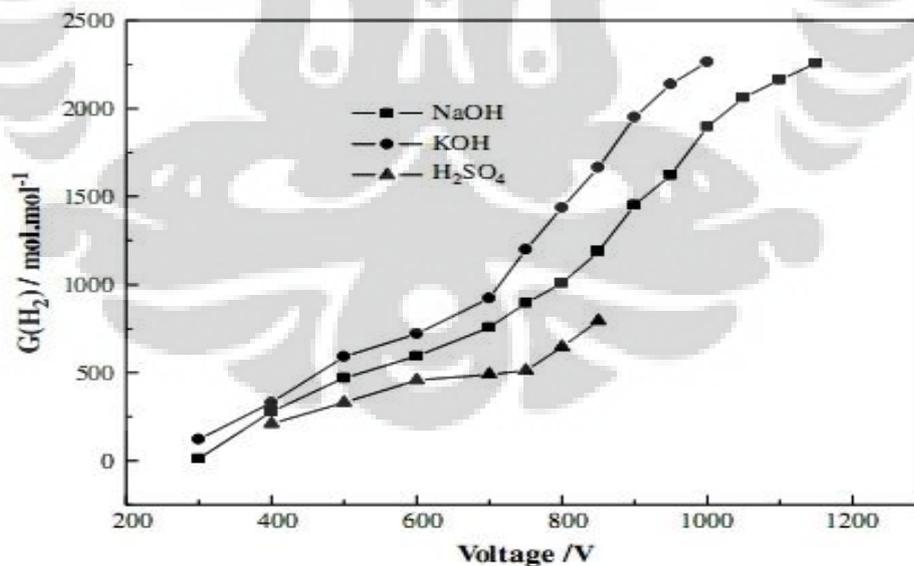
dengan V , Q , dan n adalah tegangan, muatan listrik, dan jumlah mol hidrogen. Selain hidrogen, $NaOH$ dan Cl_2 dapat diukur dengan menggunakan titrasi.

Hasil percobaan yang telah dilakukan oleh Yan dkk (2006) sebelumnya pada produksi hidrogen dengan elektrolisis air (H_2O) menunjukkan hasil bahwa $G(H_2)$ akan semakin bertambah seiring dengan bertambahnya konduktivitas larutan. Selain itu, konduktivitas juga mempengaruhi konsumsi energi yang dibutuhkan untuk berjalannya reaksi (Gambar 2.16.) yang menunjukkan bahwa semakin tinggi konduktivitas larutan yang dipakai, konsumsi energi yang digunakan juga semakin kecil karena nilai Wr berbanding terbalik dengan jumlah H_2 yang dihasilkan, sementara produksi H_2 juga semakin bertambah.



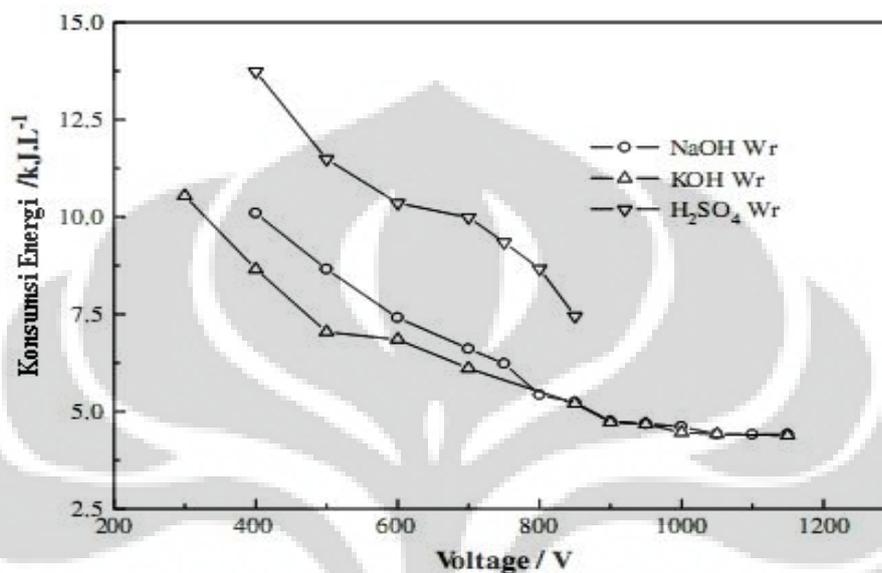
Gambar 2.16. Efek Konduktivitas Terhadap W_r (Konsumsi Energi) Pada Larutan NaOH dan Metanol, $T = 337,15 \text{ K}$, Kemurnian 99,5% (Yan dkk,2009)

Selain konduktivitas, besarnya tegangan yang diberikan di antara elektroda juga memberikan efek terhadap $G(\text{H}_2)$. Gambar 2.17. berikut adalah grafik yang diperoleh oleh Yan dkk (2008).



Gambar 2.17. Efek Tegangan Terhadap $G(\text{H}_2)$ dalam Media Dielektrikum yang Berbeda. Konduktivitas = $11,55 \text{ ms cm}^{-1}$, $T=337,15 \text{ K}$, Kemurnian Metanol 99,5% (Yan dkk, 2009)

Pada gambar di atas menunjukkan bahwa semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan, semakin besar pula $G(H_2)$ yang diperoleh. Besarnya tegangan ini juga mempengaruhi konsumsi energi pada reaksi seperti yang terlihat pada Gambar 2.18. di bawah ini.



Gambar 2.18. Efek Tegangan Terhadap Konsumsi Energi dalam Media Dielektrikum yang Berbeda. Konduktivitas = $11,55 \text{ ms cm}^{-1}$, $T=337,15 \text{ K}$, Kemurnian Metanol 99,5% (Yan dkk, 2009)

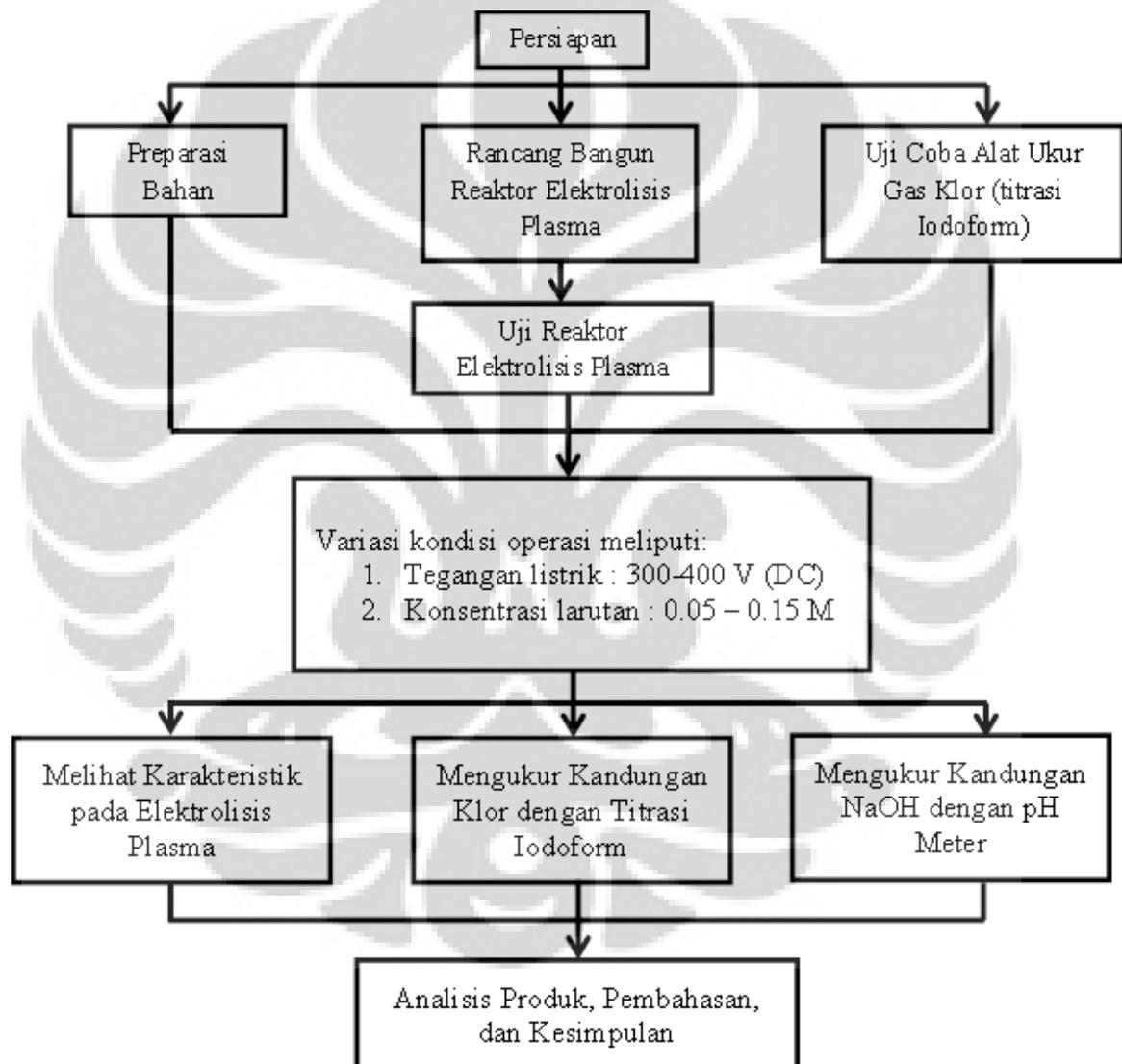
Pada gambar di atas menunjukkan bahwa semakin besar tegangan listrik yang digunakan, konsumsinya justru semakin kecil. Sehingga nantinya percobaan dilakukan pada tegangan listrik yang tinggi.

Proses elektrolisis NaCl dalam air dapat menerapkan metode elektrolisis plasma tersebut. Hal ini dapat dianalogikan dengan elektrolisis plasma H₂O dengan tambahan elektrolit NaCl. Pada proses elektrolisis plasma ini akan terbentuk produk-produk seperti Cl₂ dan NaOH yang merupakan produk utama dari proses ini. Berdasarkan penelitian sebelumnya pada elektrolisis plasma H₂O untuk produksi hidrogen, telah terbukti bahwa dengan menggunakan elektrolisis plasma energi listrik yang digunakan akan berkurang dan produksi produk akan meningkat. Hal ini yang akan terjadi pada elektrolisis plasma NaCl dalam air sehingga permasalahan pada sektor industri klor-alkali seperti penggunaan listrik yang besar dan efisiensi yang rendah dapat terselesaikan.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian akan dilakukan dalam skala laboratorium dimana diagram alir penelitian secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2. Alat dan Bahan yang Digunakan

Adapun bahan-bahan dan peralatan umum yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

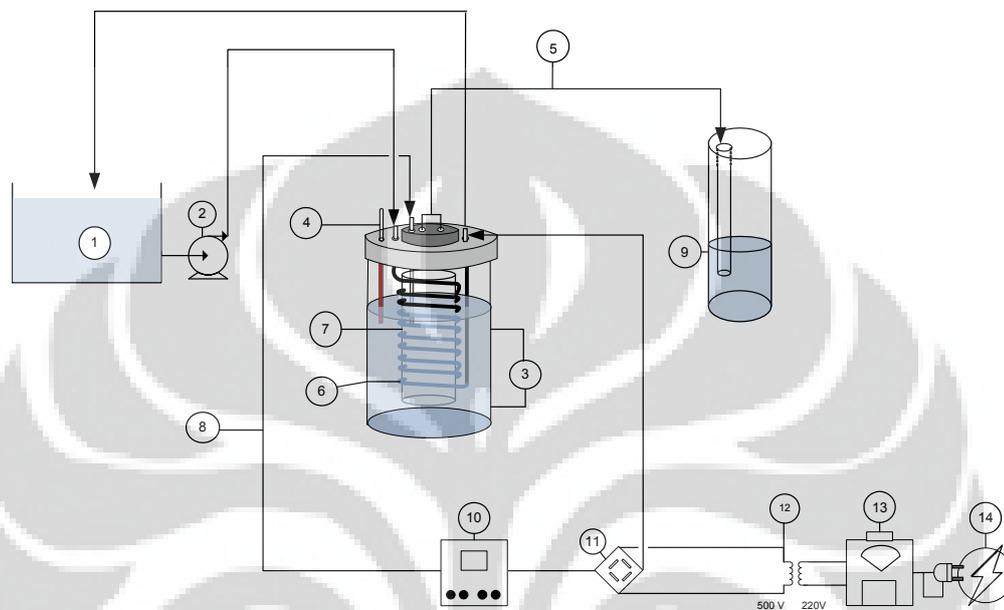
- a. Bahan
 1. Aquadest
 2. NaCl
 3. Kalium Iodida
 4. Larutan Standar Tio Sulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)
 5. Indikator kanji
 6. H_2SO_4

- b. Peralatan Umum
 1. Rangkaian reaktor elektrolisis plasma dengan elektroda grafit (anoda) dan stainless steel (katoda).
 2. Slide regulator AC (0 – 220 V) 3.000 VA
 3. Transformer 3 kVa; 220 V
 4. *Diode bridge* 1.000 V; 25 A
 5. Amperemeter Yuhua A830L
 6. pH meter
 7. Labu Erlenmeyer 500 ml
 8. Gelas ukur 1.000 mL
 9. Neraca analitik
 10. Spatula
 11. Labu semprot
 12. Corong
 13. Selang karet (silikon)
 14. Bubler (titrasi iodoform)

3.3. Rancang Bangun Peralatan Sistem Elektrolisis Plasma Klor-Alkali

Rancang bangun peralatan sistem elektrolisis plasma klor-alkali meliputi rangkaian pembangkit listrik sederhana (pembangkit plasma), reaktor elektrolisis plasma, serta peralatan pengukuran kandungan gas klor (titrasi iodoform) dan

NaOH (titrasi asam basa). Gambar 3.2. menunjukkan konfigurasi peralatan elektrolisis plasma yang meliputi rangkaian pembangkit listrik, peralatan reactor utama, dan peralatan pengukuran produk.



- | | |
|--|-----------------------------|
| 1. Air Pendingin | 8. Anoda |
| 2. Pompa | 9. <i>Bubler</i> Larutan KI |
| 3. Larutan NaCl | 10. Amperemeter |
| 4. Termometer | 11. <i>Diode Bridge</i> |
| 5. Produk Gas Klor | 12. Transformer |
| 6. Katoda (Koil Pendingin) | 13. Slide Regulator |
| 7. Pembatas Akrilik (<i>Barrier</i>) | 14. Sumber Listrik |

Gambar 3.2. Konfigurasi Alat Elektrolisis Plasma

3.3.1. Rangkaian Pembangkit Plasma

Sumber pembangkit plasma berupa rangkaian pembangkit plasma non-termal sederhana, yaitu rangkaian listrik DC tegangan tinggi yang disusun dari komponen-komponen listrik seperti dioda dan regulator tegangan. Pengamatan arus, tegangan, dan daya listrik dapat diamati pada alat ukur digital secara langsung. Adapun peralatan yang digunakan antara lain:

- a. Slide regulator dengan spesifikasi 3 kVA. Aliran listrik yang digunakan adalah aliran listrik PLN dengan keluaran slide regulator dibagi menjadi keluaran yang dibuat secara paralel. Satu bagian menuju port analyzer satu bagian langsung menuju dioda penyearah.
- c. Amperemeter Yuhua A830L yang digunakan untuk mengukur arus listrik yang mengalir.
- d. Dioda tegangan tinggi, dengan spesifikasi 1.000 V dan 25 A. *Diode bridge* ini berfungsi untuk membuat arus listrik menjadi searah DC seperti yang dibutuhkan pada proses elektrolisis.
- e. Transformer 3 kVa; 220 V yang digunakan untuk menaikkan tegangan hingga dua kali (transformer step up).

3.3.2. Peralatan Reaktor Elektrolisis Plasma

Secara umum, peralatan reaktor elektrolisis plasma terdiri dari beberapa jenis alat yang berhubungan langsung dengan rangkaian listrik pembangkit plasma dan juga alat pengukuran. Berikut ini adalah peralatan utama dalam reaktor elektrolisis plasma.

- a. *Housing Filter* sebagai wadah reaktor dengan diameter 8 cm dan tinggi 25 cm. Reaktor ini memiliki dua buah lubang pada penutupnya. Salah satu lubang ditutup oleh untuk menghindari terjadinya kebocoran dan lubang yang lain disambungkan dengan selang silikon menuju labu Erlenmeyer yang berisi larutan KI.
- b. Elektroda stainless steel dengan panjang 100 cm dan diameter 0,5 cm digunakan untuk katoda yang dibuat menjadi spiral didalam reaktor dan juga sebagai aliran pendingin untuk reaktor.
- c. Elektroda grafit dengan panjang 5 cm dan diameter 0,5 cm digunakan untuk anoda yang dipasang menggantung hingga permukaan larutan.
- d. Akrilik silinder sebagai penangkap gas klor dan pembatas ruang anoda dengan katoda dengan diameter 5 cm dan tinggi 20 cm.
- e. Termometer yang digunakan untuk mengontrol temperatur didalam larutan agar penguapan dapat diminimalisasi dengan mengalirkan aliran pendingin.

- f. Wadah penampung air pendingin
- g. Pompa peristaltik laju alir rendah pemompa larutan reaktor menuju pendingin dan kembali ke reactor.
- h. Selang Silikon untuk menghantarkan gas produk menuju labu Erlenmeyer yang berisi larutan KI.

3.3.3. Peralatan Pengukuran Kandungan Produk

Pengukuran kandungan produk menggunakan 2 cara yang berbeda untuk tiga produk yang dihasilkan. Untuk gas klor, pengukuran dilakukan dengan menggunakan bubbler untuk kemudian dititrasi. Pada saat gas produk dialirkan menuju larutan KI, maka larutan di dalam labu Erlenmeyer akan berubah warna menjadi orange yang menunjukkan adanya gas klor di aliran gas produk. Metode ini dinamakan dengan titrasi iodoform. Adapun reaksi yang terjadi antara lain:



Sedangkan untuk mengukur NaOH menggunakan pH meter untuk melihat derajat keasaman pada larutan. pH yang tinggi menunjukkan bahwa terbentuknya NaOH yang bersifat basa di dalam larutan.

3.4. Preparasi Bahan

Larutan elektrolit NaCl:

- a) Membuat larutan NaCl 1 M dengan melarutkan 28,25 g NaCl padatan kemudian dilarutkan ke dalam labu takar 500 mL dengan aquadest.
- b) Membuat larutan NaCl 0,05 M, 0,1 M, dan 0,15 masing-masing bervolume 800 mL dengan mengencerkan larutan NaCl 1 M sebanyak 40 mL, 80 mL, dan 120 mL dengan aquades. Larutan ini yang akan menjadi bahan baku dalam elektrolisis plasma klor-alkali.

Larutan Penitrasi Iodoform:

- a) Menyiapkan larutan KI 2%. Larutan KI dibuat dengan melarutkan 20 g padatan KI dalam 1 liter akuades. Larutan KI ini selanjutnya dimasukan

kedalam labu Erlenmeyer sebanyak 200 ml yang akan menangkap gas klor. Larutan KI akan berubah menjadi orange saat gas klor mulai bereaksi dengan KI.

- b) Menyiapkan larutan H_2SO_4 4 N. Larutan ini digunakan untuk membuat suasana larutan yang akan dititrasi menjadi asam.
- c) Menyiapkan indikator kanji sebagai indikator titrasi. Setelah ditetesi oleh indikator kanji, maka larutan yang semula berwarna orange akan berubah menjadi biru tua. Setelah titrasi dilakukan, warna biru tua akan perlahan-lahan menjadi bening yang menandakan akhir dari titrasi.
- d) Menyiapkan larutan tiosulfat dengan konsentrasi 0,005 M. Larutan tiosulfat digunakan untuk menitrasi larutan KI yang sudah bereaksi dengan gas klor dan ditambahkan indikator kanji hingga warna larutan menjadi bening kembali.

3.5. Uji Pendahuluan Peralatan Sistem Elektrolisis Plasma Klor-Alkali

Sebelum mengambil data penelitian, dilakukan uji kebocoran pada peralatan sistem produksi hidrogen dengan menggunakan metode air sabun. Caranya adalah dengan mengalirkan udara dari kompresor ke dalam reaktor, kemudian meneteskan air sabun pada area yang berpotensi mengalami kebocoran. Untuk rangkaian pembangkit plasma, dilakukan pengujian tegangan yang keluar dari dioda dan pembentukan plasma di udara. Uji pendahuluan dilakukan pada larutan NaCl dengan konsentrasi 0,01 M pada tegangan 400 V AC selama 10 menit. Pengujian dilakukan untuk mengetahui proses elektrolisis yang terjadi di dalam peralatan sistem produksi klor-alkali.

Selain itu, alat titrasi iodoform juga dicoba, dengan mengalirkan gas yang terbentuk dari hasil uji coba tersebut dan memperhatikan perubahan yang terjadi (perubahan warna). Jika perubahan warna terjadi, maka metode ini dapat dilakukan untuk mengukur kandungan gas klor.

3.6. Prosedur Penelitian

3.6.1. Pengujian Karakteristik Elektrolisis Plasma pada Larutan NaCl

- a) Mengukur konduktivitas larutan NaCl 0,05 M.

- b) Memasukan larutan NaCl 0,05 M kedalam reaktor elektrolisis plasma dan mengontrol suhu larutan dengan menggunakan termometer pada rentang 40 – 50°C.
- c) Menyalakan regulator tegangan, dan mengatur tegangan mulai dari 10 V hingga 400 V DC, kemudian mencatat arus yang dihasilkan.
- d) Mengulangi prosedur untuk konsentrasi 0,1 M dan 0,15 M.

3.6.2. Pengukuran Laju Alir Produk Gas pada Proses Elektrolisis Plasma

- a) Menyiapkan rangkaian pembangkit plasma yang terdiri dari slide regulator, transformer, dan serangkaian *diode bridge* yang dihubungkan pada elektroda di dalam reaktor.
- b) Menyiapkan larutan sebesar 0,1 M dan memasukannya ke dalam reaktor sebanyak 800 ml.
- c) Menyiapkan *bubble soap flow meter* untuk mengukur laju alir gas.
- d) Mengatur tegangan dengan variasi 300, 350, dan 400 V DC.
- e) Menyalakan aliran pendingin dan menjaga temperatur pada rentang 40 – 50°C.
- f) Mengukur arus pada masing-masing tegangan.
- g) Mematikan regulator tegangan dan aliran pendingin.

3.6.3. Pengukuran Produktivitas Proses Elektrolisis dan Elektrolisis Plasma (Variasi Konsentrasi dan Tegangan)

- a) Menyiapkan rangkaian pembangkit plasma yang terdiri dari slide regulator, transformer, dan serangkaian *diode bridge* yang dihubungkan pada elektroda di dalam reaktor.
- b) Menyiapkan larutan sebesar 0,05 M dan memasukannya ke dalam reaktor sebanyak 800 ml.
- c) Menyiapkan larutan KI di dalam labu Erlenmeyer 500 ml sebanyak 200 ml.
- d) Mengatur tegangan dengan variasi 300, 350, dan 400 V DC untuk elektrolisis plasma dan 50 V DC untuk elektrolisis.

- e) Menyalakan aliran pendingin dan menjaga temperatur pada rentang 40 – 50°C.
- f) Mengukur arus pada masing-masing tegangan.
- g) Menyalakan stopwatch dan mengukur produk selama 15 menit.
- h) Mengukur konsentrasi larutan Cl_2 pada masing-masing tegangan tersebut dengan menggunakan titrasi iodoform.
- i) Mengukur konsentrasi NaOH pada saat kondisi masing percobaan dengan mengambil 50 mL larutan pada reaktor elektrolisis plasma dan diukur dengan menggunakan pH meter.
- j) Ulangi untuk konsentrasi NaCl 0,1M dan 0,15M.
- k) Mematikan regulator tegangan dan aliran pendingin.

3.6.4. Pengukuran Produktivitas Proses Elektrolisis Plasma (Variasi Kedalaman Elektroda)

- a) Menyiapkan rangkaian pembangkit plasma yang terdiri dari slide regulator, transformer, dan serangkaian *diode bridge* yang dihubungkan pada elektroda di dalam reaktor.
- b) Menyiapkan larutan sebesar 0,1 M dan memasukannya ke dalam reaktor sebanyak 800 ml.
- c) Menyiapkan larutan KI di dalam labu Erlenmeyer 500 ml sebanyak 200 ml.
- d) Mengatur ketinggian anoda pada permukaan larutan.
- e) Mengatur tegangan pada 400 V DC.
- f) Menyalakan aliran pendingin dan menjaga temperatur pada rentang 40 – 50°C.
- g) Mengukur arus pada masing-masing tegangan.
- h) Menyalakan stopwatch dan mengukur produk selama 5 menit.
- i) Mengukur konsentrasi larutan Cl_2 pada masing-masing tegangan tersebut dengan menggunakan titrasi iodoform.
- j) Ulangi untuk kedalaman 1 cm dan 2 cm.
- k) Mematikan regulator tegangan dan aliran pendingin.

3.7. Hasil Uji Peralatan Sistem Produksi Klor-Alkali

Variabel-variabel bebas dalam penelitian ini meliputi tegangan dan konsentrasi larutan NaCl. Variabel terikatnya adalah arus, jumlah mol Cl₂ dalam bentuk perbandingan dengan produk hasil elektrolisis, pH larutan akhir sebagai indikasi terbentuknya NaOH, dan juga besarnya konsumsi energi listrik yang digunakan dalam proses dalam basis produksi gas klor.

1. Konsumsi energi listrik : yaitu jumlah energi listrik (C) yang digunakan selama t detik produksi hidrogen dan dirumuskan sebagai berikut :

$$W (J) = V(\text{volt}) \times I \text{ rata - rata } (\text{ampere}) \times t (\text{sekon}) \quad (3.3)$$

2. Jumlah konsentrasi Cl₂ menggunakan prinsip titrasi asam basa:

$$Ma.Va.a = Mb.Vb.b \quad (3.4)$$

3. Perhitungan efisiensi klor (Cl₂) dengan elektrolisis plasma terhadap proses elektrolisis yang dirumuskan:

$$\eta_{Cl_2} = \frac{(n Cl_2)_{elektrolisis\ plasma} \left(\frac{mol}{mol}\right)}{(n Cl_2)_{Elektrolisis}} \quad (3.5)$$

4. Perhitungan energi yang dikonsumsi selama proses elektrolisis plasma berlangsung (Wr) dilakukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$Wr \left(\frac{kJoule}{mmol}\right) = \frac{Energi (kJ)}{Jumlah\ mol\ Cl_2 (mmol)} \quad (3.6)$$

BAB 4

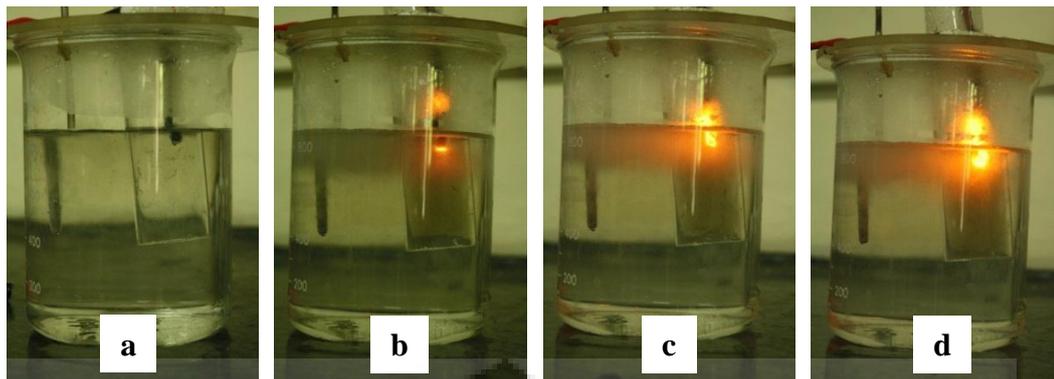
HASIL DAN PEMBAHASAN

Aplikasi teknologi elektrolisis plasma pada proses produksi klor-alkali dapat menjadi salah satu alternatif bagi produksi gas klor yang banyak dimanfaatkan dalam industri kimia. Teknologi elektrolisis plasma ini menggunakan prinsip dasar elektrolisis dengan tegangan tinggi yang menyebabkan terbentuknya plasma akibat adanya perbedaan muatan listrik yang sangat tinggi antara elektrodanya. Mekanisme pembentukan plasma diawali oleh proses elektrolisis. Pada saat keadaan gas di dalam larutan mulai menjenuh, muatan yang mengalir akan melalui media gas yang terbentuk dimana akan menghamburkan energi yang dimilikinya sehingga membuat gas tersebut menjadi panas. Hal ini akan membuat partikel di dalam gas ini bertumbukan dan selanjutnya membentuk spesi aktif di dalam larutan yang membuat proses elektrolisis menjadi lebih efisien.

4.1. Elektrolisis Plasma

4.1.1. Fenomena Terbentuknya Plasma pada Proses Elektrolisis

Elektrolisis plasma terjadi dengan terbentuknya plasma pada anoda. Plasma yang terbentuk berwarna kuning kecokelatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Warna kuning kecokelatan ini berasal dari ion Cl^- yang terdapat di dalam larutan NaCl . Warna ini juga menandakan bahwa ketika terbentuknya plasma, maka terjadi konsumsi (reaksi) klor yang berasal dari NaCl .



Gambar 4.1. Plasma di dalam Larutan NaCl 0,1 M: a) 100V; b) 200V; c) 300 V; d) 400 V

Dari gambar di atas, dapat dilihat bahwa semakin besarnya tegangan, maka semakin besar pijaran plasma yang terbentuk. Plasma terbentuk akibat adanya perbedaan muatan listrik yang sangat tinggi antara elektrodanya dan mengalir melalui gas dimana kemudian akan menghamburkan energi yang dimiliki oleh gas tersebut sehingga membuat gas menjadi cukup panas (*Joule Heating Effect*). Hal ini membuat partikel dalam gas ini akan bertumbukan dengan partikel di sekitarnya dan elektron-elektron yang ada pada ion-ion akan tereksitasi karenanya (Moustakas dkk, 2005).

Pada tegangan yang rendah (elektrolisis) gas yang terbentuk dapat dikatakan cukup kecil. Semakin tingginya tegangan akan memicu semakin banyak terbentuknya gas. Dengan banyaknya gas yang terbentuk, maka muatan yang melalui media larutan akan bertumbukan dengan gas-gas tersebut dan plasma akan muncul sebagai akibat dari hamburan energi dan eksitasi elektron klor. Dengan semakin tingginya tegangan, maka muatan listrik yang dihasilkan semakin besar sehingga hamburan energinya pun semakin besar. Semakin besarnya hamburan energi akan membuat pijaran plasma akan semakin besar.

4.1.2. Pengaruh Tegangan terhadap Arus Listrik pada Proses Elektrolisis Plasma

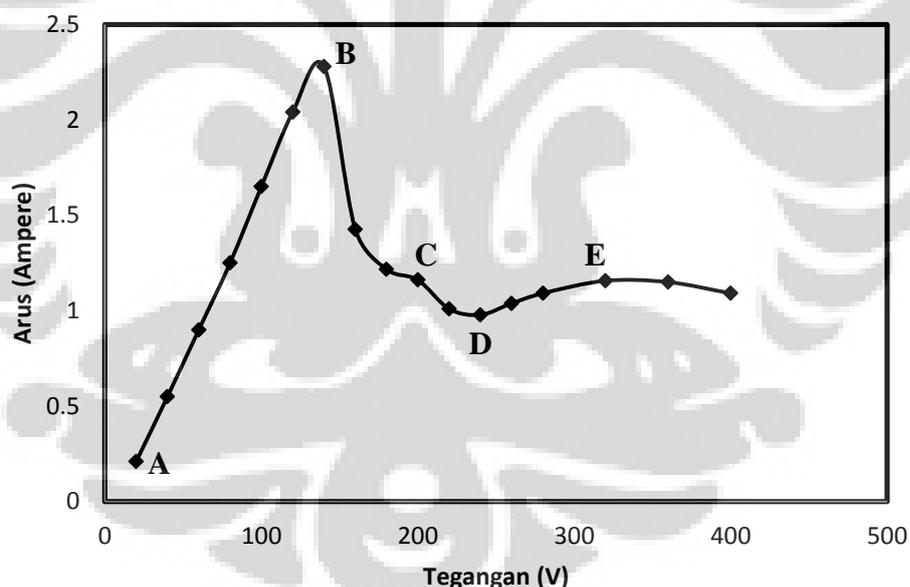
Kurva hubungan antara arus dan tegangan dilakukan pada tiga kondisi, yaitu 0,05 M; 0,1 M; dan 0,15 M larutan NaCl dengan temperatur operasi sekitar 40-50°C. Elektroda yang digunakan adalah grafit pada anoda (elektroda positif) dan juga *stainless steel* pada katoda (elektroda negatif).

Dari kurva hubungan V terhadap I , dapat dilihat bahwa ada beberapa wilayah yang teridentifikasi. Karakteristik ini telah diidentifikasi oleh Jin dkk (2010) dengan mengklasifikasikan kurva tersebut. Wilayah pertama adalah wilayah dimana berlangsungnya elektrolisis konvensional (A-B). Wilayah ini ditunjukkan oleh semakin meningkatnya arus saat tegangan dinaikan. Jin dkk (2010) menyatakan bahwa wilayah ini disebut juga dengan wilayah ohm (*ohmic region*). Pada wilayah ini, terbentuk gelembung-gelembung gas kecil karena proses elektrolisis yang berlangsung.

Wilayah selanjutnya adalah wilayah dimana plasma mulai terbentuk, yang ditunjukkan dengan menurunnya arus secara fluktuatif (B-C). Plasma yang terbentuk disebabkan oleh adanya hamburan energi akibat tumbukan antara muatan listrik yang mengalir dengan gas yang mengalami penjumlahan. Hamburan energi dapat membuat temperatur pada sistem menjadi lebih panas akibat efek pemanasan Joule. Dengan meningkatnya temperatur, maka hambatan listrik yang akan menjadi semakin besar sehingga arus yang mengalir menjadi berfluktuasi dan semakin menurun. Wilayah ini disebut pula sebagai wilayah berkurangnya arus (*limiting current region*) atau disebut pula wilayah penjumlahan arus. Tegangan di titik B (V_B) merupakan *breakdown voltage* dari keseluruhan rangkaian wilayah. *Breakdown voltage* merupakan tegangan yang memberikan arus maksimum (tertinggi) sebelum selanjutnya berfluktuasi karena terbentuknya plasma di dalam larutan. Pada wilayah ini, gelembung-gelembung yang terbentuk bergabung menuju anoda dan fraksi gelembung yang menutupi anoda semakin meningkat.

Setelah arus menurun secara fluktuatif, wilayah selanjutnya merupakan tahap dimana selubung gas menutupi anoda yang menyebabkan arus semakin menurun (C-D). Wilayah ini selanjutnya diakhiri dengan wilayah elektrolisis plasma (D-E), dimana plasma mulai terbentuk secara stabil. Arus pada wilayah ini akan sampai pada titik terendahnya untuk selanjutnya naik secara perlahan. Tegangan dengan arus terendah (V_D) disebut pula dengan *midpoint voltage* atau disebut pula dengan tegangan kritis.

Gambar 4.2. di dibawah ini merupakan kurva hubungan V terhadap I pada kondisi larutan NaCl 0,05 M dengan konduktivitas sebesar 5,32 mS. Dari percobaan dihasilkan sebuah karakteristik kurva hubungan V dan I yang serupa dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang menggunakan konstituen elektrolit yang berbeda. Hasil menunjukan bahwa pada tegangan rendah (zona elektrolisis), semakin tinggi tegangan maka arus nya semakin besar. Tegangan balik (*breakdown voltage*, V_B) diperoleh sebesar 140 V dengan arus tertinggi sebesar 2,28 A. Setelah plasma mulai terbentuk, arus mulai menurun secara fluktuatif hingga mencapai titik terendahnya yaitu pada tegangan 260 V. Tegangan ini yang disebut pula dengan tegangan titik tengah (*midpoint voltage*). Setelah arus terus menurun hingga titik minimumnya seiring dengan meningkatnya tegangan, arus akan perlahan naik kembali dan berada pada titik yang tidak jauh berbeda (wilayah E) yaitu berada di kisaran nilai 1,1 – 1,5 A.

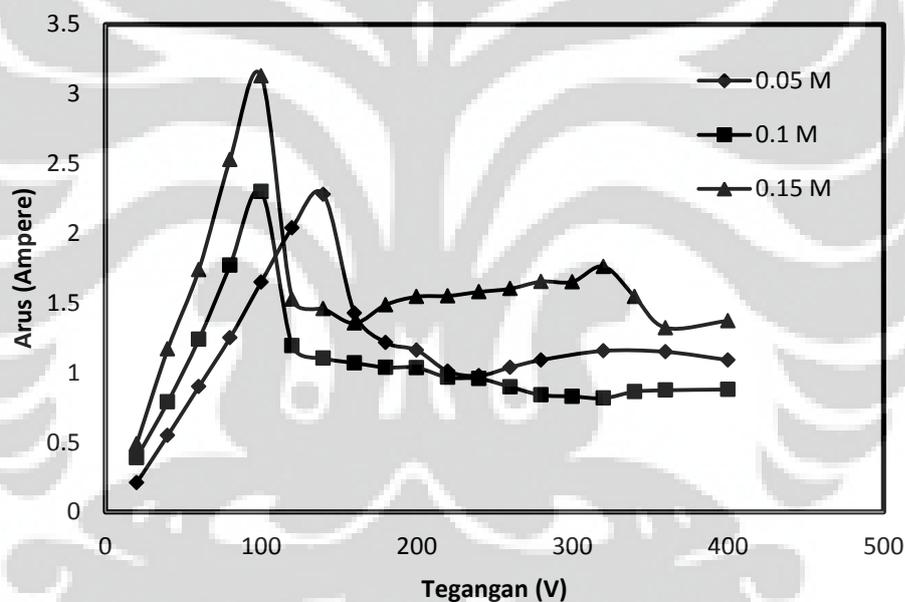


Gambar 4.2. Kurva Hubungan V terhadap I pada 800 ml Larutan NaCl 0,05 M dengan Temperatur 40 – 50°C

Pada konsentrasi 0,1 M diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada grafik 4.3. Konduktivitas untuk larutan NaCl sebesar 0,1 M yaitu 9,94 mS. Tegangan balik (*breakdown voltage*, V_B) yaitu sebesar 100 V dengan arus tertinggi sebesar

2,1 A. Sedangkan tegangan titik balik (*midpoint voltage*, V_D) sebesar 320 V dengan arus terendahnya sebesar 0,81 A. Setelah arus menurun, kemudian arus akan perlahan naik kembali dengan nilai yang tidak jauh berbeda yaitu berada di kisaran 0,86 – 0,88 A.

Seperti halnya kondisi-kondisi yang lain, pada kondisi 0,15 M dihasilkan karakteristik yang serupa. Tegangan balik (*breakdown voltage*, V_B) berada pada 100 V dengan arus tertingginya adalah 3,13 A. Sedangkan tegangan titik tengah (*midpoint voltage*, V_D) berada pada 280 V dengan arus terendahnya 1,65 A. Setelah mencapai tegangan titik tengah, arus akan perlahan naik kembali secara perlahan.



Gambar 4.3. Kurva Hubungan V terhadap I pada 800 ml Larutan NaCl 0,05 M; 0,1 M; dan 0,15 M dengan Temperatur 40 – 50°C

Berdasarkan hasil yang diperoleh untuk masing-masing konsentrasi, ada beberapa hal yang dapat disimpulkan sementara. Dari ketiga variasi, didapat bahwa semakin tinggi konsentrasi yang diikuti oleh semakin tingginya konduktivitas larutan, maka kemiringan grafik dari titik A ke B semakin tinggi pula. Hal ini dikarenakan tingginya konduktivitas membuat elektron-elektron

dapat bergerak dengan lebih mudah yang mengakibatkan arus yang dihasilkan semakin tinggi untuk tegangan yang sama.

Untuk tegangan baliknya (*breakdown voltage*, V_B), diperoleh hubungan bahwa semakin tinggi konduktivitas larutan, maka semakin rendah tegangan baliknya. Hal ini serupa dengan yang diuji oleh Jin dkk (2010) yang menunjukkan bahwa semakin tinggi konduktivitas, maka tegangan baliknya semakin rendah. Dengan semakin tingginya konduktivitas yang membuat densitas arusnya semakin besar pula pada tegangan yang sama, akan membuat disipasi energi pada anoda akan semakin tinggi. Hal ini akan memicu lebih banyak gelembung gas, dan percikan plasma dalam larutan akan lebih mudah terbentuk. Dari grafik di atas didapat V_B untuk konsentrasi 0,05 M lebih besar dibandingkan dengan V_B konsentrasi 0,1 M dan 0,15 M. Namun, V_B untuk 0,1 M sama dengan V_B untuk 0,15 M dengan arus tertinggi pada V_B 0,15 M lebih tinggi dibandingkan V_B 0,1 M.

Karakteristik tegangan titik balik (*midpoint voltage*, V_D) dari ketiga variasi, diperoleh hasil yang nilai V_D tertinggi ada pada 0,1 M. Antara V_D 0,1 M dan 0,15 M, terjadi penurunan seperti yang ditunjukkan pada penelitian sebelumnya. Namun, V_D pada 0,05 M berada di antara V_D variasi konsentrasi yang lain. Hal ini dapat terjadi karena fluktuasi arus yang memungkinkan terjadinya penyimpangan nilai arus. Meskipun demikian, tetap dapat kita lihat hubungan yang sesuai antara hasil yang diperoleh dengan data-data pada penelitian sebelumnya.

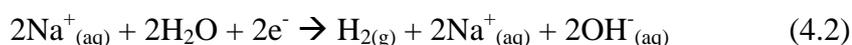
4.2. Produktivitas Proses

Mekanisme penguraian NaCl menjadi gas klor yang selama ini dilakukan adalah dengan menggunakan metode elektrolisis. Pada elektrolisis, mekanisme reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut (Santorelli, 2009):

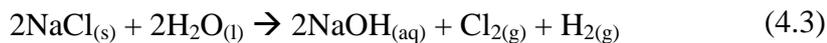
- a. Reaksi pada Anoda



- b. Reaksi pada Katoda



c. Reaksi Total



Pada elektrolisis plasma larutan NaCl, ada dua reaksi utama yang terjadi, yaitu penguraian air dan juga NaCl. Pada mekanisme penguraian air melalui elektrolisis plasma, maka akan terbentuk radikal-radikal OH dan juga H yang akan bereaksi dengan komponen Cl dari penguraian NaCl. Pada penguraian air melalui proses elektrolisis, maka mekanisme yang terjadi antara lain (Abdel-Aal, 2010):

a. Reaksi pada katoda



b. Reaksi pada anoda



Karena adanya mekanisme reaksi plasma, maka akan terbentuk spesi H_2O dalam fasa gas karena efek pemanasan Joule yang selanjutnya memicu pembentukan radikal seperti yang dinyatakan oleh Gao (2008) seperti sebagai berikut:

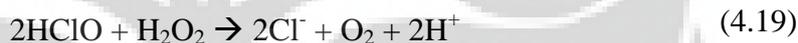
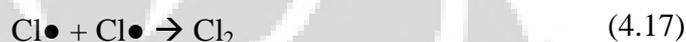


Selanjutnya mekanisme pembentukan spesi aktif radikal seperti sebagai berikut (Chaffin, 2006; Jin, 2010):





Pada penguraian senyawa NaCl, Cl^- yang terbentuk akan berubah menjadi klor radikal akibat adanya eksitasi elektron dan juga reaksi dengan OH radikal. Dua klor radikal akan bereaksi satu sama lain dan membentuk suatu senyawa klor (Cl_2). Menurut penelitian yang dilakukan oleh Jin dkk (2010), mekanisme pembentukan spesi aktif radikal klor adalah sebagai berikut:

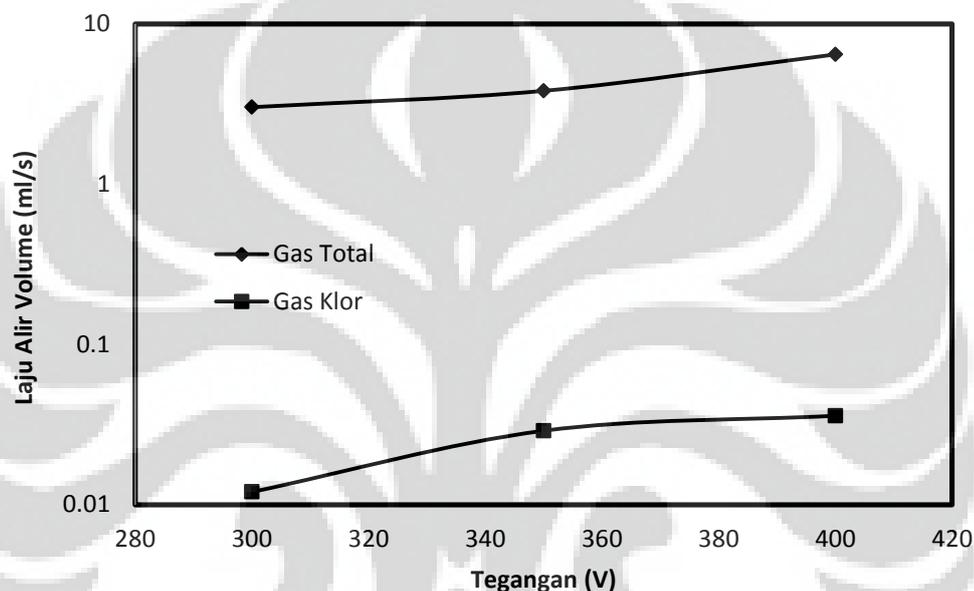


Selain membentuk gas klor, terdapat pula reaksi yang menghasilkan produk samping seperti asam Hipoklorit. Pada mekanisme reaksi di atas, HClO yang terbentuk dalam reaksi kemudian bereaksi dengan H_2O_2 menghasilkan H^+ dan juga 2Cl^- . Dari ion-ion klor yang terbentuk tersebut selanjutnya juga akan membentuk senyawa klor (Cl_2). Sehingga dapat dikatakan bahwa mekanisme pembentukan senyawa klor terjadi atas dua cara, yaitu hasil bereaksinya dua komponen klor radikal dan juga dua ion klor seperti layaknya mekanisme reaksi elektrolisis.

4.2.1. Laju Alir Volume Produk Gas

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terlihat bahwa laju alir gas akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya tegangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Pada kondisi tegangan 300 V, diperoleh laju alir volume sebesar 3,00 ml/s. Saat tegangan dinaikan menjadi 350 V, laju alir volume gas yang diproduksi juga ikut meningkat yaitu sebesar 3,82 ml/s. Begitu juga saat tegangan dinaikan menjadi 400 V, laju alir volume terus meningkat sebesar 6,45 ml/s. Peningkatan produktivitas laju alir volume gas disebabkan oleh semakin

tinggi tegangan listrik yang digunakan untuk menghasilkan plasma. Hal ini menyebabkan konsentrasi radikal aktif yang terbentuk semakin tinggi pula. Hal ini diakibatkan karena dengan perbedaan tegangan yang tinggi, energi pengekstipasi elektron untuk menghasilkan radikal juga semakin tinggi. Akibatnya semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan, pembentukan radikalnya pun juga semakin besar.



Gambar 4.4. Pengaruh Tegangan terhadap Laju Alir Produk Gas pada 800 ml Larutan NaCl 0,1 M dengan Temperatur 40 – 50°C

Dengan konfigurasi yang digunakan pada penelitian ini, diperoleh produk gas keluaran bervariasi. Dari Gambar 4.4. di atas terlihat bahwa gas klor hanya sebagian kecil dari produk gas total yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan terbentuknya produk samping lain yang berupa gas seperti O_2 dan H_2 serta uap air akibat temperatur yang tinggi pada zona di sekitar plasma terbentuk.

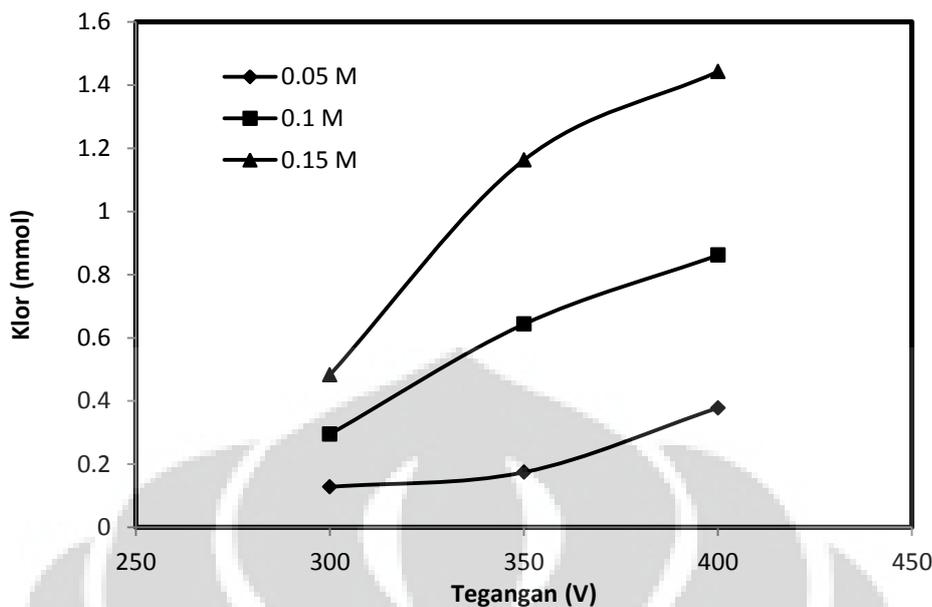
Pengukuran laju alir total yang dilakukan dapat juga terjadi sedikit penyimpangan. Hal ini dapat dikarenakan laju alir yang terukur merupakan laju alir akumulasi dari produk gas yang terjebak di dalam *bubble soap flowmeter* akibat terlalu kecilnya produk gas yang dihasilkan sehingga butuh sejumlah gas yang telah terakumulasi untuk dapat mendorong *bubble* pada *flowmeter*.

4.2.2. Produksi Gas Klor

Hasil produk dari sistem elektrolisis plasma terdiri dari berbagai macam produk, baik yang berupa produk gas dan juga produk cair. Dalam produksi klor-alkali, produk utama yang diharapkan adalah gas klor yang memiliki banyak fungsi di industri kimia. Sistem produksi dengan menggunakan elektrolisis plasma telah terbukti dapat meningkatkan produktivitas dan juga mengurangi konsumsi energi listrik. Pada penelitian ini, produk gas yang dihasilkan selanjutnya dialirkan ke dalam larutan yang berisi KI 2% dalam suasana yang asam (pH sekitar 2 – 4) melalui penambahan H_2SO_4 pekat. Selanjutnya, larutan KI yang sudah berubah warna menjadi orange tersebut (sebagai bukti bahwa adanya gas klor pada produk gas), ditambahkan larutan kanji sebagai indikator dan dititrasi dengan menggunakan larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,005 M. Berikut ini adalah penjelasan dari masing-masing parameter yang mempengaruhi produktivitas gas klor.

4.2.2.1. Pengaruh Tegangan terhadap Produksi Gas Klor

Seperti yang telah dijelaskan pada bagian laju alir produk gas, terlihat bahwa tegangan memiliki pengaruh terhadap pembentukan gas pada mekanisme elektrolisis plasma. Semakin meningkatnya tegangan membuat semakin meningkatnya produktivitas produk yang dihasilkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5. Pada kondisi konsentrasi 0,05 M dengan temperatur dijaga pada rentang 40 – 50°C selama 15 menit, terlihat bahwa klor yang dihasilkan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya tegangan. Pada kondisi 300 V, produksi klor sebesar 0,13 mmol. Saat tegangan dinaikan menjadi 350 V, klor yang terbentuk sebesar 0,17 mmol dan saat tegangan mencapai 400 V, klor yang terbentuk sebesar 0,38 mmol atau sekitar tiga kali lipat dari produksi klor pada tegangan 300 V. Hal ini juga terjadi pada kondisi konsentrasi sebesar 0,1 M dan 0,15 M dimana produksi klor untuk masing-masing tegangan sebesar 0,30 mmol; 0,64 mmol; dan 0,86 mmol untuk konsentrasi 0,1 M sedangkan 0,48 mmol; 1,16 mmol; dan 1,44 mmol untuk konsentrasi 0,15 M.



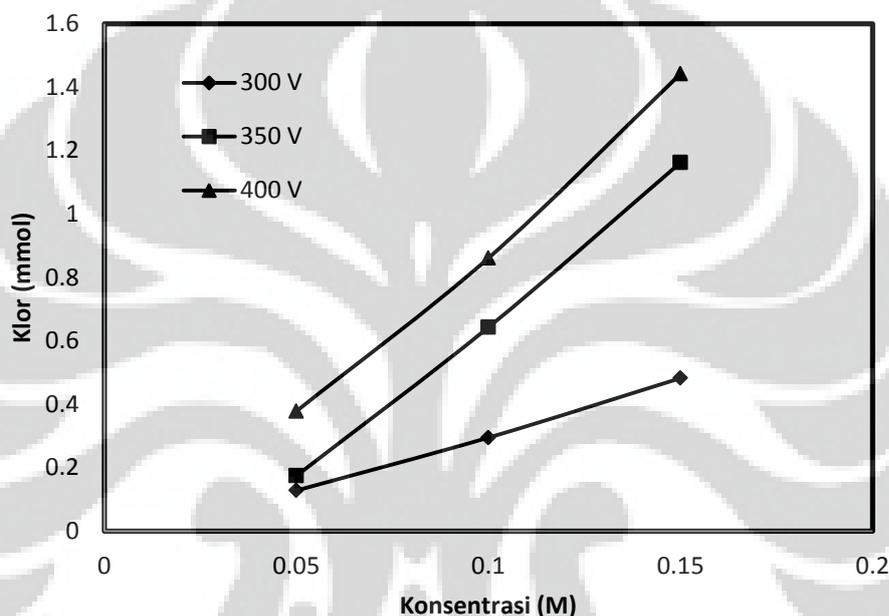
Gambar 4.5. Variasi Tegangan terhadap Produksi Klor pada 800 ml Larutan NaCl 0,05 M; 0,1 M; dan 0,15 M Selama 15 Menit dengan Temperatur 40 – 50°C

Pada tegangan yang relatif rendah, gas klor yang dihasilkan paling sedikit dibandingkan dengan tegangan yang lebih tinggi lainnya. Hal ini dikarenakan dalam kondisi tegangan yang rendah, kandungan klor yang terdapat didalam larutan baru terdekomposisi dari NaCl. Dengan semakin tingginya tegangan pada elektrolisis plasma, maka jumlah ion klor yang terdekomposisi semakin banyak yang membuat lebih banyak elektron yang tereksitasi dari ion klor dan membentuk radikal klor. Semakin banyaknya radikal klor yang terbentuk memicu semakin banyaknya gas klor yang dihasilkan.

4.2.2.2. Pengaruh Konsentrasi terhadap Produksi Gas Klor

Selain tegangan, konsentrasi larutan NaCl juga sangat berpengaruh pada produktivitas gas klor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Pada tegangan 300 V, semakin tinggi konsentrasi, maka akan semakin banyak gas klor yang terbentuk. Pada konsentrasi 0,05 M, produksi klor sebesar 0,13 mmol. Saat konsentrasi dinaikan hingga 0,1 M, klor yang terbentuk mencapai 0,30 mmol atau hampir mencapai 3 kali produksi klor 0,05 M. Begitu juga pada konsentrasi 0,15 M, klor yang terbentuk sebesar 0,48 atau empat kali lipat lebih besar dibandingkan konsentrasi 0,05 M. Hal ini juga terjadi pada kondisi tegangan yang

lain, dimana semakin tingginya konsentrasi maka semakin tinggi pula jumlah produk gas klor yang dihasilkan. Pada tegangan 350 V, produksi klor mencapai 0,17 mmol untuk konsentrasi 0,05 M; 0,64 mmol untuk konsentrasi 0,1 M; dan 1,16 mmol untuk konsentrasi 0,15 M. Sedangkan pada tegangan 400 V, Produksi klor mencapai 0,38 mmol untuk konsentrasi 0,05 M; 0,86 mmol untuk konsentrasi 0,1 M; dan 1,44 mmol untuk konsentrasi 0,15 M.



Gambar 4.6. Variasi Konsentrasi terhadap Produksi Gas Klor pada Tegangan 300 V; 350 V; dan 400 V Selama 15 Menit dengan Temperatur 40 – 50°C

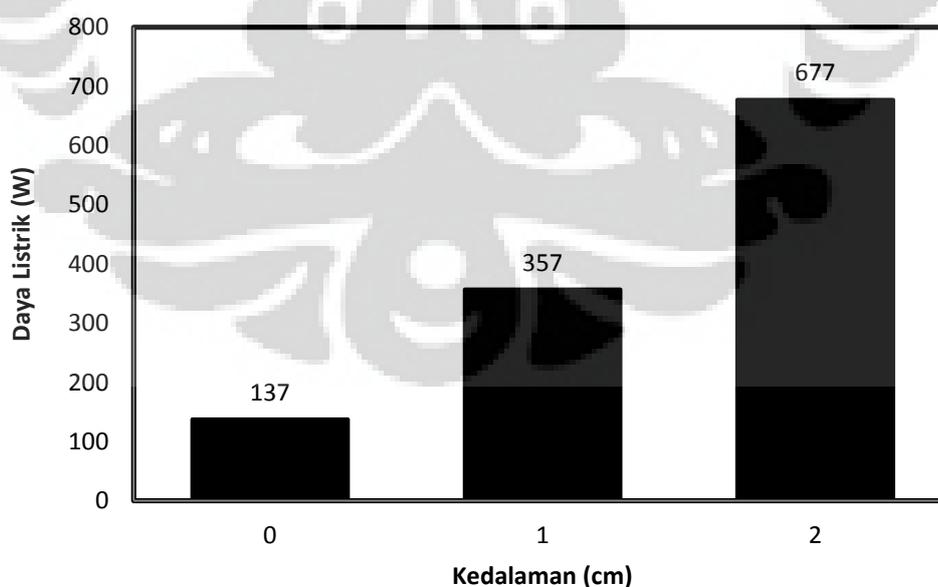
Konsentrasi yang semakin tinggi membuat jumlah klor yang ada di dalam larutan semakin banyak. Dengan banyaknya klor yang ada di larutan, maka saat terbentuknya plasma, jumlah spesi aktif radikal klor pun menjadi semakin banyak. Radikal klor ini selanjutnya akan bereaksi membentuk gas klor dan membuat produksinya semakin meningkat dengan semakin meningkatnya konsentrasi.

Selain ditinjau dari jumlah klor, konsentrasi juga erat kaitannya dengan konduktivitas larutan. Semakin tinggi konsentrasi larutan, maka semakin tinggi konduktivitasnya. Konduktivitas yang semakin tinggi ini menyebabkan semakin tinggi pula produktivitas produk klor yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan dengan konduktivitas yang tinggi, elektron-elektron bisa bergerak dengan lebih mudah

dibanding larutan yang konduktivitasnya lebih rendah. Akibatnya, peluang terjadinya tumbukan antar elektron juga semakin besar, sehingga pembentukan radikal pun juga akan terjadi dengan lebih baik. Pembentukan radikal aktif ini membuat pembentukan gas klor (Cl_2) semakin cepat sehingga dalam rentang waktu yang sama (15 menit) dihasilkan produk klor yang semakin banyak.

4.2.2.3. Pengaruh Kedalaman Anoda terhadap Produksi Gas Klor

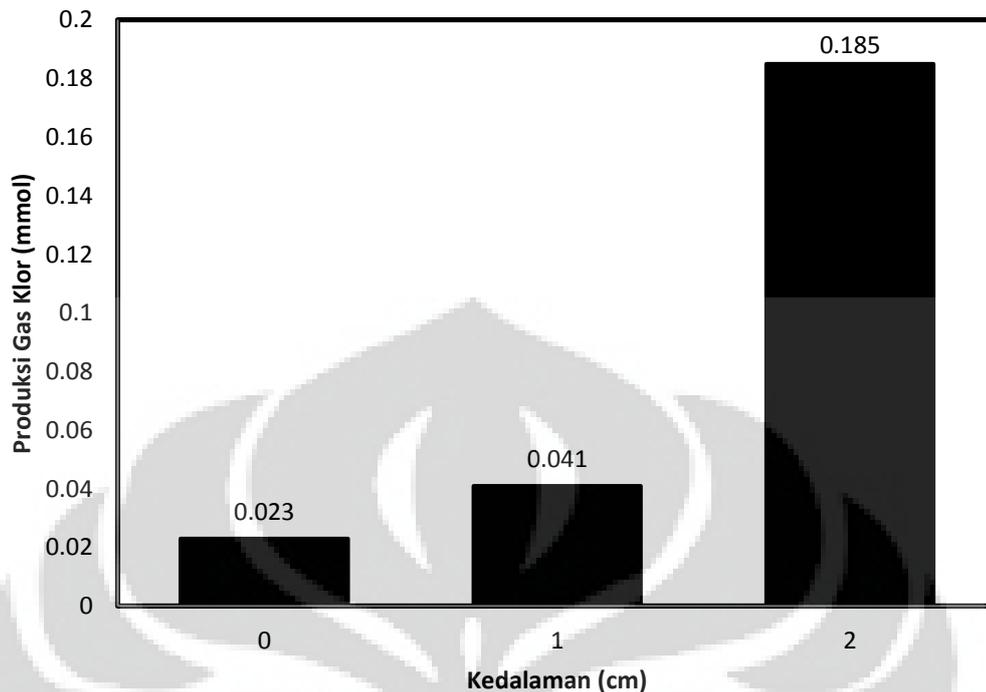
Salah satu yang menjadi variabel dalam penelitian ini adalah dengan melihat pengaruh kedalaman anoda terhadap produksi gas klor. Dalam pengujian ini, kedalaman anoda diatur menjadi tiga variasi, yaitu di permukaan larutan, 1 cm di bawah permukaan larutan, dan 2 cm di bawah permukaan. Dari hasil penelitian yang dilakukan, semakin dalam anoda di larutan, maka arus listrik yang digunakan semakin besar. Besarnya arus saat anoda berada di permukaan larutan adalah sekitar 0,46 A. Sedangkan untuk kedalaman 1 cm besarnya arus adalah sekitar 1,19 A dan saat kedalamannya 2 cm besarnya arus adalah 2,26 A. Jika arus-arus tersebut dikalikan dengan tegangan yang diberikan (yaitu 300 V), maka akan diperoleh daya listrik yang dikonsumsi seperti Gambar 4.7. berikut ini.



Gambar 4.7. Pengaruh Kedalaman Anoda terhadap Daya Listrik pada 800 ml Larutan NaCl 0,1 M dan Tegangan 300 V Selama 5 menit dengan Temperatur 40 – 50°C

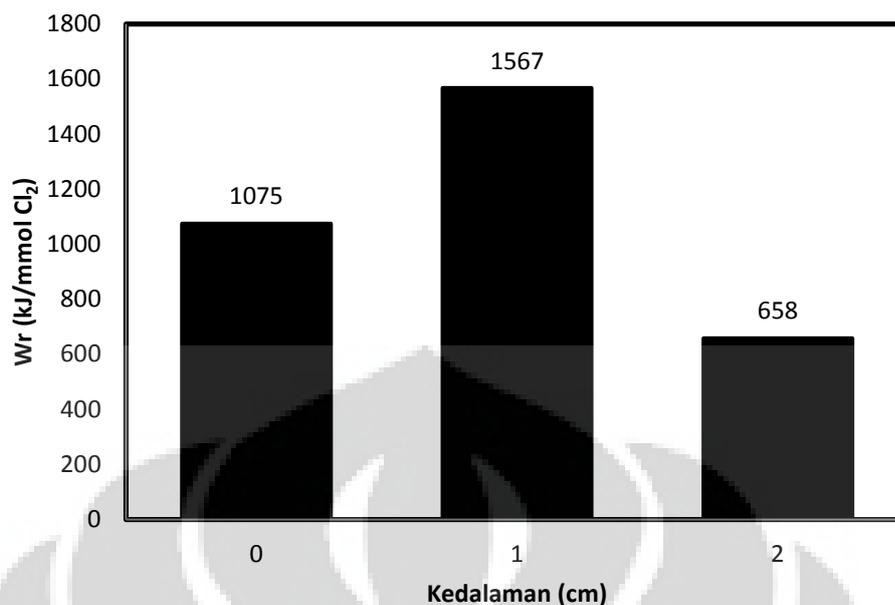
Arus yang semakin besar disebabkan oleh semakin luasnya permukaan anoda untuk mengalirkan arus listrik. Selain itu, dengan luasnya permukaan tersebut membuat terbentuknya beberapa zona pada anoda, yaitu zona elektrolisis plasma dan zona elektrolisis. Karena adanya zona elektrolisis, membuat arus listrik menjadi besar. Zona ini dapat diminimalisasi dengan memperkecil luas permukaan pada tempat dimana plasma terbentuk (anoda). Dalam penelitian yang dilakukan oleh Sengupta (1994), dinyatakan bahwa pada elektroda yang lebih pendek dan lebih kecil, maka densitas arus akan menjadi lebih besar. Densitas arus yang semakin besar ini membuat semakin meningkatnya rugi hambatan listrik yang berubah menjadi energi kalor (*Joule Heating Effect*) dan menghasilkan lebih banyak uap per luas permukaan elektroda. Uap-uap yang terbentuk ini akan menyelubungi anoda dan karena adanya eksitasi elektron akibat adanya perbedaan potensial yang besar menyebabkan plasma terbentuk. Plasma yang terbentuk ini membuat arus listrik menjadi kecil dan berfluktuasi.

Selain mempengaruhi arus listrik, kedalaman anoda di dalam larutan juga mempengaruhi jumlah gas klor yang dihasilkan. Pengujian ini dilakukan dengan mengukur gas klor yang dilarutkan kedalam larutan KI selama 5 menit. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa semakin dalam anoda, maka jumlah gas Klor yang dihasilkan semakin banyak. Untuk anoda di permukaan larutan diperoleh banyaknya gas klor yang dihasilkan adalah sebesar 0,023 mmol. Sedangkan pada kedalaman anoda 1 cm dan 2 cm, gas klor yang dihasilkan 0,041 dan 0,185 mmol seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8. Kedalaman ini akan berpengaruh pada produksi selubung uap pada permukaan anoda. Dengan semakin luas permukaan anoda yang terselubungi uap, maka akan memicu pijaran plasma lebih besar. Hal ini akan membuat lebih banyak senyawa yang terdekomposisi menjadi spesi aktif radikal maupun ion yang selanjutnya akan membentuk produk, dimana dalam hal ini gas klor. Meskipun demikian, dengan luas permukaan yang lebih besar, ada beberapa zona yang mengalami proses elektrolisis. Hal ini yang membuat arus listriknya menjadi besar meskipun produk yang dihasilkan juga semakin banyak.



Gambar 4.8. Pengaruh Kedalaman Anoda terhadap Produksi Gas Klor pada 800 ml Larutan NaCl 0,1 M dan Tegangan 300 V Selama 5 menit dengan Temperatur 40 – 50°C

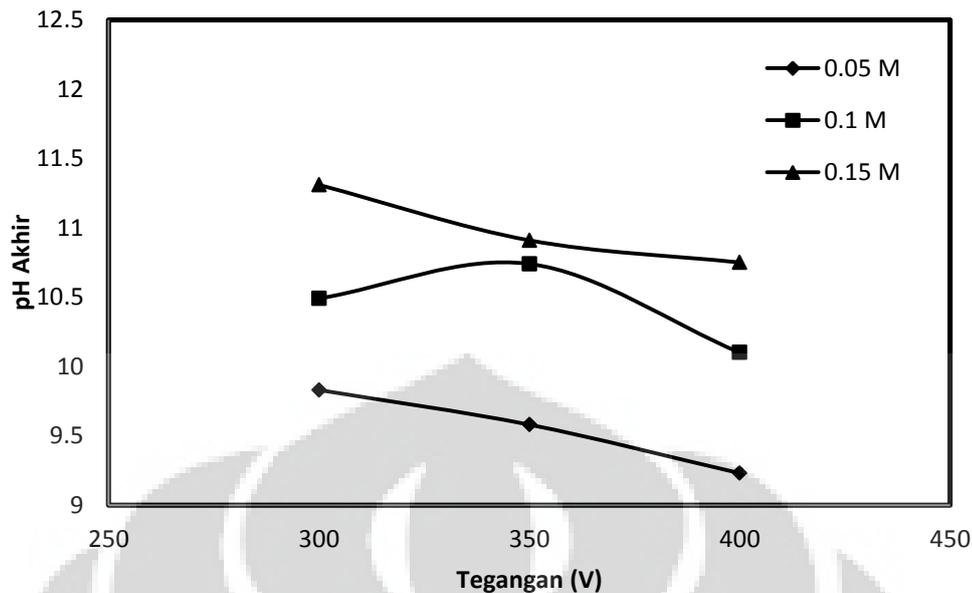
Jika dilihat dari konsumsi energinya seperti pada Gambar 4.9., maka akan terlihat bahwa semakin besarnya arus bukan berarti yang paling tidak efisien. Dari hasil penelitian ini, diperoleh bahwa dengan konsumsi energi paling besar (kedalaman 2 cm) menghasilkan efisiensi yang paling baik. Hal ini dikarenakan produk yang dihasilkan jauh lebih besar dibandingkan dengan kedalaman yang lain. Sehingga dapat dikatakan bahwa untuk menentukan kondisi terbaik dimana menghasilkan efisiensi konsumsi energi paling baik, perlu melihat kedua aspek seperti konsumsi energy ($W = V.I.t$) dan juga jumlah produk yang dihasilkan.



Gambar 4.9. Pengaruh Kedalaman Anoda terhadap Konsumsi Energi pada 800 ml Larutan NaCl 0,1 M dan Tegangan 300 V Selama 5 menit dengan Temperatur 40 – 50°C

4.2.3. Pembentukan NaOH (*Caustic Soda*) dan Produk Samping

Selain gas klor sebagai produk utama dalam produksi klor-alkali, NaOH juga menjadi produk samping yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan kimia di industri. Dalam penelitian ini, NaOH diidentifikasi dengan melihat pH larutan akhir setelah proses elektrolisis plasma dilakukan. Berdasarkan Gambar 4.10., diperoleh hasil bahwa semakin besar tegangan maka pH larutan yang dihasilkan semakin menurun. Disisi lain, semakin tinggi konsentrasi larutan NaCl, maka semakin tinggi pula pH larutan akhir yang dihasilkan. Pada konsentrasi 0,05 M, pH pada masing-masing tegangan 300 V, 350 V, dan 400 V antara lain 9,83; 9,58; dan 9,23. Pada konsentrasi 0,1 M diperoleh pH 10,49; 10,74; dan 10,1 dan pada konsentrasi 0,15 M diperoleh pH sebesar 11,31; 10,91; dan 10,75 untuk masing-masing tegangannya.



Gambar 4.10. Pengaruh Tegangan terhadap pH Larutan Akhir pada 800 ml Larutan NaCl 0,05 M; 0,1 M; dan 0,15 M Selama 15 Menit dengan Temperatur 40 – 50°C

Caustic soda (NaOH) dapat terbentuk karena adanya reaksi antara ion OH^- dengan ion Na^+ melalui suatu mekanisme reaksi pada katoda. Setelah terdekomposisi dari senyawa NaCl pada anoda karena plasma, ion Na^+ berpindah menuju katoda (elektroda negatif) bersama dengan ion-ion lain. Setelah tiba di katoda, ion-ion Na^+ ini selanjutnya bereaksi dengan ion hidroksil (OH^-) yang terdapat di dalam larutan membentuk suatu senyawa baru, yaitu NaOH. Terbentuknya senyawa NaOH ini akan membuat pH di dalam larutan menjadi tinggi dikarenakan sifat NaOH yang basa kuat. Oleh karena itu, setelah proses elektrolisis plasma berlangsung dalam rentang waktu tertentu, pH di larutan menjadi tinggi dibandingkan pH awal larutan yang berada di kisaran 6 – 7.

Semakin menurunnya pH larutan akhir pada penelitian ini dikarenakan adanya reaksi samping yang dapat membentuk produk-produk lain seperti hipoklorit, klorat, dan lain-lain. Adapun mekanisme reaksi pembentukan produk samping antara lain sebagai berikut (Abdel-Aal, 2010):





Pembentukan reaksi samping tersebut dapat terjadi melalui reaksi ionik dan juga reaksi spesi aktif radikal. Reaksi ionik terjadi saat bereaksinya dua ion membentuk suatu senyawa baru. Sedangkan reaksi radikal merupakan suatu reaksi pembentukan senyawa dengan melalui pembentukan spesi aktif radikal. Dengan terbentuknya produk samping di atas dapat membuat pH larutan berkurang karena adanya senyawa-senyawa yang asam seperti hipoklorit, klorat, dan lain-lain. Selain itu, penurunan pH dapat pula terjadi karena adanya reaksi samping antara NaOH dan Cl₂ yang menyebabkan jumlah NaOH semakin berkurang, begitu pula dengan pH nya. Reaksi samping ini terjadi karena tidak adanya pemisah antara anoda dan katoda. Reaksi samping berlangsung saat ion-ion bebas berada di dalam larutan dan memicu terjadinya reaksi pembentukan produk samping. Dengan begitu, produksi gas klor menjadi sedikit dan selektivitas produknya menjadi berkurang.

4.2.4. Konsumsi Energi

Setelah melihat bagaimana pengaruh tegangan dan konsentrasi terhadap produksi gas klor, selanjutnya adalah melihat seberapa besar konsumsi energi per satuan klor yang dihasilkan dengan menggunakan elektrolisis plasma. Konsumsi energi dalam penelitian ini dinyatakan dengan W_r dimana:

$$W_r = \frac{\text{Konsumsi Energi Listrik (kJ)}}{\text{Jumlah Produksi Gas Klor (mmol)}} = \frac{V \cdot I \cdot t}{n \text{ Cl}_2} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mmol}} \right) \quad (4.25)$$

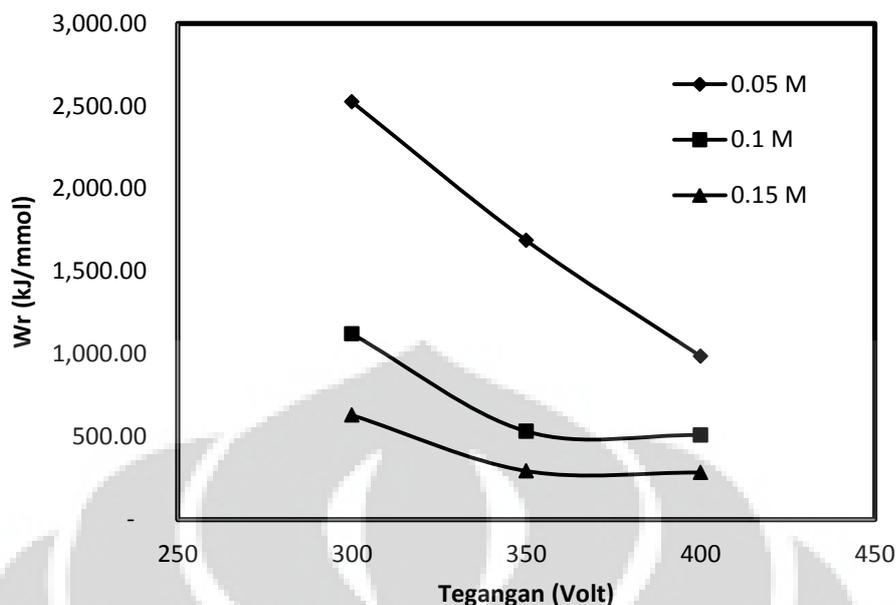
Dari perhitungan di atas didapatkan sebuah perbandingan antara konsumsi energi listrik dan juga jumlah gas klor yang dihasilkan. Dari hasil penelitian ini, diperoleh hubungan konsumsi energi terhadap konsentrasi larutan

dan tegangan. Selain itu, hipotesis di awal yang menyatakan bahwa penerapan teknologi elektrolisis plasma lebih efisien dibandingkan proses elektrolisis juga akan dibuktikan.

4.2.4.1. Pengaruh Tegangan dan Konsentrasi terhadap Konsumsi Energi

Besarnya konsumsi energi menjadi permasalahan utama dalam proses produksi klor-alkali. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dengan menggunakan metode elektrolisis plasma, diperoleh bahwa semakin tingginya tegangan, maka diperoleh efisiensi yang semakin baik (konsumsi energi per mmol produk gas klor semakin menurun) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11. Pada konsentrasi 0,05 M, besarnya konsumsi energi per produk gas klor yang dihasilkan untuk masing-masing tegangan 300 V, 350 V, dan 400 V berturut-turut adalah 2.525 kJ/mmol Cl₂, 1.687 kJ/mmol Cl₂, dan 987 kJ/mmol Cl₂. Untuk konsentrasi 0,1 M diperoleh konsumsi energi sebesar 1.122 kJ/mmol Cl₂, 533 kJ/mmol Cl₂, dan 510 kJ/mmol Cl₂ untuk masing-masing tegangannya. Sedangkan untuk konsentrasi larutan sebesar 0,15 M diperoleh konsumsi energi sebesar 631 kJ/mmol Cl₂, 293 kJ/mmol Cl₂, dan 284 kJ/mmol Cl₂ untuk tegangan 300 V, 350 V, dan 400 V.

Dari hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa dengan semakin tingginya tegangan, maka konsumsi energinya semakin menurun. Hal ini disebabkan oleh dengan semakin tingginya tegangan, maka energi yang dihasilkan untuk mengeksitasi elektron semakin besar. Hal ini membuat lebih banyak terbentuknya spesi aktif radikal yang membuat reaksi pembentukan produk gas klor semakin cepat.



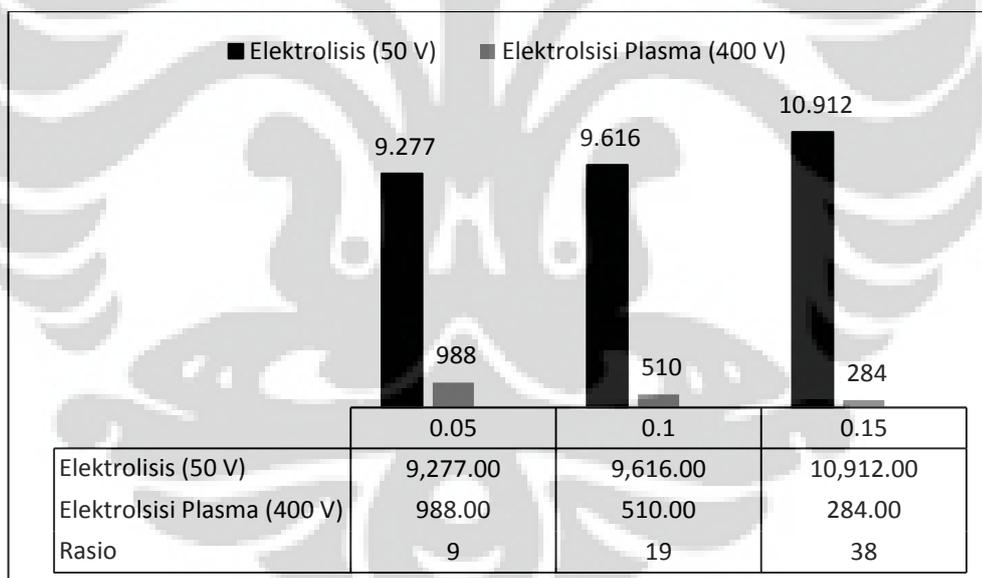
Gambar 4.11. Variasi Tegangan terhadap Konsumsi Energi pada 800 ml Larutan NaCl 0,05 M; 0,1 M; dan 0,15 M Selama 15 Menit dengan Temperatur 40 – 50°C

Selain variasi tegangan, dari Gambar 4.11. di atas juga dapat diperoleh bahwa semakin tingginya konsentrasi, maka konsumsi energi yang dihasilkan semakin rendah. Dengan semakin tingginya konsentrasi, maka jumlah klor yang terkandung di dalam larutan juga semakin banyak. Banyaknya jumlah klor ini akan membuat potensi pembentukan radikal klor akibat eksitasi elektron ion klor semakin banyak sehingga produk gas klor yang dihasilkan pun semakin banyak. Selain jumlah klor, dengan semakin tingginya konsentrasi menyebabkan konduktivitas larutan semakin tinggi pula. Konduktivitas yang tinggi membuat migrasi ion semakin cepat sehingga kemungkinan terjadinya tumbukan antara molekul-molekul yang ada di dalam larutan juga semakin meningkat. Hal ini akan membuat semakin cepatnya mekanisme reaksi yang berujung pada semakin banyaknya produk gas klor yang di hasilkan.

4.2.4.2. Perbandingan Elektrolisis Plasma dengan Elektrolisis

Pada elektrolisis plasma berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat dilihat bahwa konsumsi energi yang dihasilkan jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan hasil elektrolisis dengan menggunakan sistem konfigurasi

alat yang sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12. Tegangan yang dijadikan parameter uji untuk reaksi elektrolisis adalah 50 V sedangkan untuk reaksi elektrolisis plasma sebesar 400 V. Dari hasil penelitian yang diperoleh, pada konsentrasi 0,05 M dihasilkan besarnya konsumsi energi untuk elektrolisis sebesar 9.277 kJ/mmol Cl₂ sedangkan untuk elektrolisis plasma sebesar 988 kJ/mmol Cl₂. Dari hasil ini dapat dinyatakan bahwa elektrolisis plasma hampir 9 kali lebih efisien dibandingkan elektrolisis. Untuk konsentrasi 0,1 M diperoleh hasil konsumsi sebesar 9.616 kJ/mmol Cl₂ untuk elektrolisis dan 510 kJ/mmol Cl₂ untuk elektrolisis plasma. Dari hasil ini diperoleh bahwa efisiensi elektrolisis plasma hampir 19 kali lebih besar dibandingkan dengan elektrolisis. Sedangkan untuk konsentrasi 0,15 M diperoleh nilai 10.912 kJ/mmol Cl₂ untuk elektrolisis dan 284 kJ/mmol Cl₂ untuk elektrolisis plasma. Dari hasil ini diperoleh efisiensi elektrolisis plasma hampir 38 kali lebih tinggi dibandingkan dengan elektrolisis.



Gambar 4.12. Perbandingan Konsumsi Energi antara Elektrolisis dan Elektrolisis Plasma dalam kJ/mmol Cl₂ pada 800 ml Larutan NaCl 0,1 M Selama 15 Menit (Elektrolisis = 50 V; Elektrolisis Plasma = 400 V)

Dari hasil yang diperoleh dapat dikatakan bahwa penerapan elektrolisis plasma pada proses produksi Klor-Alkali dapat meningkatkan efisiensi hingga hampir 40 kali lebih tinggi dibandingkan dengan elektrolisis. Hal ini disebabkan

oleh aktifitas radikal yang terbentuk karena proses pembentukan plasma pada elektrolisis ini. Pada proses elektrolisis plasma terdapat spesi aktif foton yang mampu melakukan *crosslinking* dengan cara menghasilkan matriks molekular dua atau tiga dimensi dengan membentuk ikatan-ikatan antara molekul-molekul atau polimer yang berdekatan. Matriks molekular dua atau tiga dimensi yang dimaksud adalah senyawa radikal yang akan bereaksi dengan radikal lain dengan membentuk ikatan antar molekul berdekatan. Dengan terbentuknya spesi aktif radikal tersebut, akan membuat mekanisme pembentukan suatu senyawa menjadi lebih cepat sehingga jumlah produk yang dihasilkan pun lebih banyak.

Dari penelitian ini terbukti bahwa dengan menggunakan konfigurasi reaktor yang sama, elektrolisis plasma jauh lebih efisien dibandingkan elektrolisis. Pada proses produksi gas klor di industri klor-alkali, rata-rata energi minimum yang digunakan sebesar 1.686,32 kWh/ton Cl₂ atau setara dengan 0,431 kJ/mmol Cl₂ pada kondisi elektrolisis dengan tegangan sebesar 3 – 5 V dengan menggunakan membrane selektif (Srinivasan, 2006). Nilai konsumsi energi per mmol produk tersebut merupakan nilai minimum yang ada pada industri klor-alkali, dimana nilai aktualnya dapat jauh lebih besar dibandingkan dengan nilai minimumnya. Dari hasil penelitian ini, nilai konsumsi energi yang paling kecil adalah sebesar 284,51 kJ/mmol Cl₂, dimana masih jauh lebih tinggi dibandingkan dengan konsumsi energi yang digunakan pada industri. Namun, konfigurasi yang digunakan pada penelitian kali ini belum dapat dikatakan optimal mengingat tidak adanya pemisah di antara anoda dan katoda yang dapat menyebabkan reaksi samping sehingga produksi gas klor menjadi cukup rendah. Oleh karena itu, salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengoptimalkan produksi gas klor adalah dengan menggunakan konfigurasi reaktor semirip mungkin dengan konfigurasi yang ada pada industri dan menerapkan teknologi elektrolisis plasma. Dengan demikian, produksi gas klor dapat meningkat dan efisiensi energi dapat jauh lebih rendah dibandingkan dengan efisiensi energi pada sektor klor-alkali yang mana menggunakan metode elektrolisis.

BAB 5 PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini antara lain:

1. Aplikasi teknologi elektrolisis plasma terbukti dapat diterapkan pada proses produksi klor-alkali.
2. Plasma yang terbentuk berwarna kuning kecokelatan yang berasal dari ion Cl^- yang terdapat di dalam larutan NaCl .
3. Semakin tingginya tegangan, maka semakin besar pijaran plasma yang terbentuk akibat adanya perbedaan muatan listrik yang sangat tinggi antara elektrodanya sehingga dapat menghamburkan energi yang menyebabkan timbulnya plasma.
4. Semakin tingginya tegangan maka semakin meningkat produksi gas klor yang dihasilkan akibat konsentrasi radikal aktif yang terbentuk semakin tinggi.
5. Semakin tinggi konsentrasi maka semakin tinggi pula jumlah gas klor yang diproduksi.
6. Efisiensi energi terbaik yang dihasilkan adalah sebesar 284,51 kJ/mmol Cl_2 yang mana 38 kali lebih baik dibandingkan dengan elektrolisis pada konfigurasi reaktor yang sama.
7. Semakin besar luas permukaan elektroda di dalam larutan, maka arus listrik yang dihasilkan semakin besar, sedangkan produk gas klor yang dihasilkan semakin banyak.
8. Semakin tinggi tegangan, maka pH larutan akhir semakin menurun. Di sisi lain, semakin tinggi konsentrasi larutan NaCl , maka semakin tinggi pH larutan akhir yang dihasilkan yang menunjukkan adanya NaOH yang terbentuk di dalam larutan.
9. Semakin menurunnya pH larutan akhir dikarenakan adanya reaksi samping yang dapat membentuk produk-produk lain seperti ion hipoklorit, klorat, dan lain-lain.

5.2. Saran

Penelitian yang dilakukan kali ini masih dapat dioptimalisasi untuk meningkatkan produktivitas gas klor yang dihasilkan. Berikut saran yang penulis berikan untuk penelitian selanjutnya.

1. Rancang bangun reactor plasma untuk produksi Klor-Alkali dapat dimaksimalkan dengan memasang membran selektif (*Proton Exchange Membrane*) yang memisahkan katoda dan anoda. Membrane selektif ini bertujuan agar ion Na^+ dapat berpindah dari anoda menuju katoda melalui membrane selektif sedangkan ion OH^- tetap berada di ruang katoda. Hal ini dapat mengoptimalkan produk NaOH yang dihasilkan sehingga produk samping akibat reaksi antara OH^- dengan komponen klor dapat dihindari. Dengan semakin sedikitnya reaksi samping, maka produksi gas Klor dapat meningkat.
2. Metode pengikatan gas klor dengan larutan KI masih kurang optimal karena penggunaan sistem yang terbuka. Hal ini dapat menyebabkan adanya sebagian gas klor yang lepas dan tidak tertangkap oleh KI. Penggunaan sistem *bubbler* yang tertutup dapat menghindari adanya gas klor yang lepas. Sehingga produktivitas gas klor dapat terukur maksimal.
3. Variasi variabel proses perlu diperbanyak untuk melihat pola-pola produksi gas klor dan efisiensi energi untuk mendapatkan kondisi proses terbaik. Salah satu yang dapat dilakukan adalah dengan meningkatkan tegangan (tegangan >500 V) dengan konsentrasi yang rendah. Pada penelitian produksi hidrogen dengan menggunakan elektrolisis plasma, terbukti bahwa semakin tinggi tegangan maka diperoleh efisiensi energi yang lebih baik. Hal ini dapat pula terjadi pada penerapan teknologi elektrolisis plasma pada proses produksi klor-alkali.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Aal, H. K., Sultan, S.M. & Hussein, I. A. 1993. Parametric Study for Saline Water Electrolysis - part i : Hydrogen Production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 18 (6), 485-489.
- Abdel-Aal, H. K., Sultan, S. M. & Hussein, I. A. 1993. Parametric Study for Saline Water Electrolysis - part ii: Chlorine Evolution, Selectivity, and Determination. *International Journal of Hydrogen Energy*, 18(7), 545-551.
- Abdel-Aal, H. K., Zohdy, K. M. & Kareem, M. A. 2010. Hydrogen Production Using Sea Water Electrolysis. *the Open Fuel Cells Journal*, 3, 1-7.
- Abidin, J. 2010. *Produksi Hidrogen Melalui Reaktor Ganda Elektrolisis Plasma Non-Thermal dalam Media Elektrolit Larutan KOH*. Sarjana, Universitas Indonesia.
- Bommaraju, T., Orosz, P. J. & Sokol, E. A. *Brine Electrolysis* [Online]. Available: <http://electrochem.cwru.edu/encycl> [Accessed 23rd February 2011].
- Chaffin, J.H., Bobio, S.M., Inyang, H., 2006. Hydrogen production by Plasma Electrolysis. *Journal of Energy Engineering*. ASCE 132 : 3 pp: 104-108.
- Chandrand, R. R. & Chin, D. T. 1986. Reactor Analysis of Chlor-Alkali Membrane Cell. *Electrochimica Acta*, 31(1), 39 - 50.
- Chen, C. P. & Tilak, B. V. 1997. Determination of the Chlorine Current Efficiency of Mercury Chlor-Alkali Cells. *Journal of Applied Electrochemistry*, 27, 1300 - 1303.
- Gao, J. Z., Wang, A. X., Fu, Y., Wu, J. L., Ma, D. P., Guo, X., Li, Y. & Yang, W. 2008. Analysis of Energetic Species Caused by Contact Glow Discharge Electrolysis in Aqueous Solution. *Plasma Science and Technology*, Vol. 10, No. 1, Feb. 2008.
- Gilliatt, B. S. & Mesland, J.-M. 2002. THE EUROPEAN CHLOR-ALKALI INDUSTRY - On the Move Towards Sustainable Development. In: CHLOR, E. (ed.). Brussels.

- Jalali, A. A., Mohammadi, F. & Ashrafizadeh, S. N. 2009. Effects of Process Conditions on Cell Voltage, Current Efficiency and Voltage Balance of a Chlor-Alkali Membrane Cell. *Desalination*, 237, 126–139.
- Jin, X. L., Wang, X. Y., Zhang, H. M., Xia, Q., Wei, D. B. & Yue, J. J. 2010. Influence of Solution Conductivity on Contact Glow Discharge Electrolysis. *Plasma Chem Plasma Process*, 30, 429 – 436.
- Kogelschatz, U. 2004. Atmospheric-Pressure Plasma Technology, *Plasma Phys. Controlled Fusion*, 46, B63 - B75.
- Mizuno, T., Akimoto, T., Azumi, K., Ohmori, T., Aoki, Y. & Takahashi, A. 2005. Hydrogen Evolution by Plasma Electrolysis in Aqueous Solution. *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 44, No. 1A, 2005, 396 – 401.
- Moustakas & R., C. C. 2005. Demonstration Plasma Gasification- Vitrification System For Effective Hazardous Waste Treatment. *Journal of Hazardous Materials*, B123, 120 - 126.
- O'brien, T. F., Bommaraju, T. V. & Hine, F. 2005. History of the Chlor-Alkali Industry. *Handbook of Chlor Alkali*. Springer.
- Commitee, E. C. 2007. THE EUROPEAN CHLOR-ALKALI INDUSTRY. In: CHLOR, E. (ed.) *Steps towards sustainable development*. Brussels.
- Committee, E. C. 2010. An Electricity Intensive Sector Exposed to Carbon Leakage. In: CHLOR, E. (ed.) *The European Chlor-Alkali industry*. Brussels: Celfic.
- Saksono, N., Ariawan, B. & Bismo, S. 2010. *Hydrogen Productions System Using Non-Thermal Plasma Electrolysis In Glycerol-KOH Solution*. S1, Universitas Indonesia.
- Santorelli, R. & Schervan, A. 2009. Energy Production From Hydrogen Co-Generated In Chlor-Alkali Plants By The Means Of Pem Fuel Cells Systems. *Nuvera Fuel Cells Europe*, Via XXV Aprile 2, 2009.

- Sengupta, S. K. & Singh, O. P. 1994. Contact glow discharge electrolysis: a study of its chemical yields in aqueous inert-type electrolytes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 369, 113-120.
- Srinivasan, S. 2006. Fuel Cells: from Fundamental to Applications. *Springer Science + Business Media*, Chapter 3, 104 – 121.
- Yan, Z. C., Li, C. & Lin, W. H. 2006. Experimental Study of Plasma Under-liquid Electrolysis in Hydrogen Generation. *The Chinese Journal of Process Engineering*, Vol.6 No.3.
- Yan, Z. C., Li, C. & Lin, W. H. 2008. Hydrogen generation by glow discharge plasma electrolysis of ethanol solutions. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41 155205 (7pp).
- Yan, Z. C., Li, C. & Lin, W. H. 2009. Hydrogen generation by glow discharge plasma electrolysis of methanol solutions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 48 - 55.

