



UNIVERSITAS INDONESIA

**PRODUKSI HIDROGEN MELALUI REAKTOR GANDA
ELEKTROLISIS PLASMA NON-TERMAL DALAM MEDIA
ELEKTROLIT LARUTAN KOH**

SKRIPSI

**JAINAL ABIDIN
0606076500**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PRODUKSI HIDROGEN MELALUI REAKTOR GANDA ELEKTROLISIS
PLASMA NON-TERMAL DALAM MEDIA ELEKTROLIT LARUTAN KOH**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**JAINAL ABIDIN
0606076500**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Jainal Abidin
NPM : 0606076500
Tanda Tangan :
Tanggal : 2 Juli 2010

LEMBAR PENGESAHAN

Makalah skripsi dengan judul:

**PRODUKSI HIDROGEN MELALUI REAKTOR GANDA ELEKTROLISIS
PLASMA NON-TERMAL DALAM MEDIA ELEKTROLIT LARUTAN KOH**

OLEH:

Jainal Abidin

0606076500

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Nelson Saksono, MT (.....)

Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA (.....)

Penguji 2 : Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc, Ph.D (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 02 Juli 2010

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi dengan judul Produksi Hidrogen Melalui Reaktor Ganda Elektrolisis Plasma Non-Termal dalam Media Elektrolit Larutan KOH dilakukan untuk mempublikasikan penelitian dan sebagai sumbangsih teknologi untuk masyarakat. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Orang tua dan keluarga tercinta yang selalu mensupport dan mengizinkan ananda untuk berkreasi di kampus tercinta ini.
- (2) Bapak Dr. Ir. Nelson Saksono, M.T selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
- (3) Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA., selaku kepala Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
- (4) Bapak Ir. Dijan Supramono, M.Si. selaku pembimbing akademis.
- (5) Bagus, Bondan, dan Rizki selaku tim penelitian sebagai pemberi motivasi dan semangat untuk merampungkan gelar sarjana ini.
- (6) Bapak “Professor” Mang Ijal yang selalu dicari ketika semester 8, Kang Jajat, dan Mba Tiwi yang dengan rutin mengingatkan untuk merapikan peralatan.
- (7) Keluarga dan teman-teman Teknik Kimia UI 2006, atas semangatnya pada waktu mengambil data dan menyelesaikan skripsi ini.

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

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

Depok, 22 Juni 2010

Penulis

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

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

Nama : Jainal Abidin
NPM : 0606076500
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**PRODUKSI HIDROGEN MELALUI REAKTOR GANDA ELEKTROLISIS
PLASMA NON-TERMAL DALAM MEDIA ELEKTROLIT LARUTAN KOH**

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 : 2 Juli 2010
Yang menyatakan

(Jainal Abidin)

ABSTRAK

Nama : Jainal Abidin
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Produksi Hidrogen Melalui Reaktor Ganda Elektrolisis
Plasma Non-Termal dalam Media Elektrolit Larutan KOH.

Hidrogen merupakan salah satu bahan baku pada industri kimia dan sebagai bahan bakar kendaraan bermotor. Gas hidrogen memiliki banyak keunggulan dibanding bahan bakar lainnya. Gas hidrogen banyak diperoleh dari proses elektrolisis yang memerlukan energi listrik yang besar. Elektrolisis plasma adalah teknologi baru dalam meningkatkan produktifitas hidrogen sekaligus menekan kebutuhan listrik. Penelitian ini menguji efektivitas proses elektrolisis plasma pada reaktor ganda yang dinyatakan sebagai jumlah produk hidrogen per konsumsi energi listrik dengan memvariasikan tegangan listrik dan konsentrasi larutan KOH. Efektivitas yang diperoleh dibandingkan dengan elektrolisis Faraday dan reaktor tunggal elektrolisis plasma. Hasil percobaan menunjukkan kenaikan konsentrasi dan tegangan menyebabkan kenaikan jumlah produk hidrogen. Proses elektrolisis plasma pada penelitian ini meningkatkan efektivitas proses hingga mencapai 15 kali reaktor tunggal (270,23 mmol/s), nilai $G(H_2)$ mencapai 7 kalinya (13,34 mol/mol), dengan konsumsi energi (W_r) namun tidak ada perbedaan signifikan dengan reaktor tunggal (764,8 kJ/L).

Kata kunci: produktifitas hidrogen, elektrolisis plasma, reaktor ganda.

ABSTRACT

Name : Jainal Abidin
Study Program : Chemical Engineering
Judul : Hydrogen Production By Double Reactor of Non-Thermal Electrolysis in Electrolyte Medium KOH Solution.

Hydrogen is one of chemical industry feedstock and also a fuel for automobile. Hydrogen have many advantages if compared with others fuel. Hydrogen is commonly produced by electrolysis which consumes a great deal of energy. Plasma electrolysis is a new technology which is able to improve hydrogen productivity and also suppress energy consumption. This research tested plasma electrolysis effectivity at double reactor which is stated as hydrogen product quantity per electrical energy consumption by varying electrical voltage and KOH solution concentration. Process effectivity was compared to Faraday electrolysis and single reactor effectivity. The result shows that the escalation in solution concentration and voltage can cause an increase in hydrogen product quantity. Plasma electrolysis in this research improved the effectivity 15 times compared with single reactor (270,23 mmol/s), G hydrogen reached 7 times (13,34 mol/mol), however energy consumption (W_r) not significantly different with single reactor (764,8 kJ/L).

Keywords: hydrogen productifity, plasma electrolysis, double reactor

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALSITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Hidrogen Secara Umum	5
2.1.1 Definisi Hidrogen	5
2.1.2 Kegunaan Hidrogen	5
2.1.3 Produksi Hidrogen	6
2.2 Plasma Secara Umum	8
2.2.1 Definisi Plasma	8
2.2.2 Cakupan Parameter Plasma	9
2.2.3. Contoh Plasma Industri Dan Kompersial	11
2.3 Spesi Aktif Plasma Non Termal	12
2.3.1 Foton	13
2.3.2 Spesi Netral	14
2.3.3 Partikel-Partikel Bermuatan	14
2.4 Elektrolisis Faraday	15
2.4.1 Elektrolisis Larutan Elektrolit	15
2.4.2 Aspek Kuantitatif	15
2.5 Elektrolisis Plasma Non Termal	17
2.5.1 Spesi Aktif Pada Elektrolisis Plasma Pijar	17
2.5.2 Perbandingan Kinerja Plasma Pada Proses Elektrolisis Plasma	17
2.5.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja CGDE	19
3. METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Diagram Alir Penelitian	25
3.2 Lokasi Penelitan	26
3.3 Peralatan	26
3.3.1 Komponen Utama Penyusun Reaktor	26
3.3.2 Komponen Pendukung Pembangkit Plasma	26
3.3.3 Komponen Pendukung Non Reaktor	27

3.4 Bahan Penelitian	27
3.5 Rancang Bangun Peralatan Sistem Produksi Hidrogen	27
3.5.1 Rangkaian Listrik Pembangkit Plasma	28
3.5.2 Reaktor Plasma Elektrolisis	29
3.5.3 Sistem Pemurnian	31
3.5.4 Pengukuran Produk Hidrogen	33
3.6 Preparasi Bahan	34
3.7 Uji Pendahuluan Sistem Rangkaian Elektrolisis Plasma	34
3.8 Prosedur Penelitian	36
3.9 Hasil Uji Peralatan Sistem Produksi Hidrogen	37
4. PEMBAHASAN	38
4.1 Aspek Kualitatif	38
4.2 Aspek Kuantitatif	40
4.2.1 Pengaruh Temperatur Terhadap Produktifitas, $G(H_2)$ & W_r	43
4.2.2 Pengaruh Tegangan Terhadap Produktifitas, $G(H_2)$ & W_r	47
4.3 Perbandingan Reaktor Tunggal Dengan Reaktor Ganda	49
5. KESIMPULAN	56
5.1 Kesimpulan	56
5.2 Saran	56
DAFTAR REFERENSI	58
LAMPIRAN	60

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1	Tabel perbandingan kinerja teknologi produksi hidrogen (Holladay et al, 2009) 7
Tabel 2.2	Beberapa warna plasma yang timbul akibat adanya aliran gas tertentu 9
Tabel 2.3	Perbedaan Glow Discharge Plasma dan Corona Discharge Plasma (Istadi, 2006) 11
Tabel 2.4	Klasifikasi Plasma [Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology; H. Huang a, L. Tang] 11
Tabel 2.5	Energi-energi foton dalam spektrum elektromagnetik (Roth, 2001) 13
Tabel 2.6	Perbandingan kinerja teknologi non-plasma untuk produksi hidrogen. 20

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Pengaruh tegangan pada G(H ₂). Konduktivitas: 11,55 mS/cm, Suhu: 64 °C. Konsentrasi metanol: 99,5 % (Zong, et al, 2009)	19
Gambar 2.2 Pengaruh tegangan pada konsumsi energi, Konduktivitas: 11,55 mS/cm, Suhu: 64 °C. Konsentrasi metanol: 99,5 % (Zong, et al, 2009)	19
Gambar 2.3 Efek tegangan terhadap pembentukan radikal OH• pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal OH• (GAO Jinzang, et al., 2008)	20
Gambar 2.4 Efek tegangan terhadap pembentukan radikal H• pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal H• (GAO Jinzang, et al., 2008)	21
Gambar 2.5 Efek konduktivitas larutan terhadap pembentukan radikal OH• pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal OH• (GAO Jinzang, et al., 2008)	22
Gambar 2.6 Efek konduktivitas larutan terhadap pembentukan radikal H• pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal H• (GAO Jinzang, et al., 2008)	22
Gambar 2.7 Efek pH larutan terhadap pembentukan radikal OH• pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal OH• (GAO Jinzang, et al., 2008)	22
Gambar 2.8 Efek pH larutan terhadap pembentukan radikal H• pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal H• (GAO Jinzang, et al., 2008)	23
Gambar 2.9 Efek konduktivitas larutan metanol terhadap G(H ₂) pada anoda dan katoda dalam media dielektrikum NaOH dan H ₂ SO ₄ T = 337,15 K, kemurnian 99,5% (Zong, et al.,2007)	23

Gambar 2.10	Efek konduktivitas terhadap W_r (konsumsi energi) pada larutan NaOH dan metanol, $T = 337,15 \text{ K}$, kemurnian 99,5% (Zong, et al.,2007)	24
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	25
Gambar 3.2	Rangkaian Listrik Pembangkit Plasma, Port Analyzer dan Slide Regulator	28
Gambar 3.3	Dioda: (a) Skema Dioda Bridge Pada Dioda Tegangan Rendah; (b) Dioda Tegangan Tinggi	29
Gambar 3.4	Reaktor Plasma Elektrolisis: (a) Housing Filter Sebagai Reaktor dan Lubang Pada Reaktor; (b) Komponen Dalam Reaktor	31
Gambar 3.5	(a) Ruang Katoda Sebagai Pemerangkap Hidrogen; (b) Kumparan Tembaga Sebagai Media Kontak Larutan Panas dengan Cairan Pendingin	31
Gambar 3.6	Sistem Pemurnian Aliran: (a) Steam Trapper; (b) Kondenser; (c) absorber	32
Gambar 3.7	Rangkaian Pengukur Hidrogen: (a) Flowmeter Gelembung; (b) Hidrogen Analyzer GNL-400F	33
Gambar 3.8	Sistem Rangkaian Elektrolisis Plasma Pijar Non Termal Modular	34
Gambar 4.1	Muat Rapat Plasma pada Molaritas Berbeda, Diukur pada Tegangan 200 V: (a) 0,15 M; (b) 0,10 M; (c) 0,05 M.	38
Gambar 4.2	Plasma Pada Medium Berbeda; (a) Gas, (b) Cair	40
Gambar 4.3	Grafik Hubungan Parameter Arus Listrik, Produktifitas Hidrogen, dan Temperatur terhadap Waktu dalam Larutan KOH 0,1 M, Tegangan 100 Volt.	41
Gambar 4.4	Grafik Pengaruh Temperatur pada Produktifitas Hidrogen dalam Berbagai Konsentrasi pada Tegangan 200 V	44
Gambar 4.5	Grafik Pengaruh Temperatur pada W_r dalam Berbagai Konsentrasi pada Tegangan 200 V	45
Gambar 4.6	Grafik Pengaruh Temperatur pada G Hidrogen dalam Berbagai Konsentrasi pada Tegangan 200 V	46

	Halaman
Gambar 4.7 Grafik Pengaruh Tegangan Terhadap Produktifitas Hidrogen, pada temperatur 85-90 °C	47
Gambar 4.8 Pengaruh Tegangan Terhadap Konsumsi Energi Per Liter Hidrogen, pada Rentang Temperatur 85-90 °C	48
Gambar 4.9 Pengaruh Tegangan Terhadap Nilai G Hidrogen, pada Rentang Temperatur 85-90 °C	49
Gambar 4.10 Pengaruh Tegangan Terhadap Konsumsi Energi, pada Molaritas 0,1 M	51
Gambar 4.11 Skema Koneksi Penghubung Gas Setelah Reaktor (Tanda Panah Menunjukkan Perpindahan)	51
Gambar 4.12 Pengaruh Tegangan Terhadap G Hidrogen, pada Molaritas 0,1 M	52
Gambar 4.13 Pengaruh Tegangan Terhadap Konsumsi Energi, pada Molaritas 0,1 M	54

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lamp.1	
Contoh Perhitungan Konsentrasi KOH, Laju Alir, Jumlah Mol H ₂ , Konsumsi Listrik dan Konduktivitas Larutan	59



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Konsumsi BBM dalam negeri sudah lama meningkat dengan angka yang tidak bisa bertahan terus (*non-sustainable*). Angka laju pertumbuhan konsumsi BBM mencapai sekitar 7% setahun, dengan pertumbuhannya 7% setahun terus menerus maka setiap 10 tahun konsumsinya meningkat dua kali. Angka konsumsi BBM sekarang adalah sekitar 60 juta kiloliter, atau ekuivalen dengan sekitar 1 juta barrel sehari. Produksi minyak bumi sekarang 1,1 juta barrel sehari (pacificlink.com/kolompakar/indonesia-sudah-menjadi-net-importer-minyakbumi.htm, diakses tanggal 6 Juni 2010), sehingga bisa dikatakan margin konsumsi dengan produksi hampir tidak ada jarak. Di lain pihak, produksi minyak bumi tidak naik begitu cepat. Bahkan, kecenderungan alamiah turun karena *depletion* (sumbernya habis). Cadangan minyak bumi di Indonesia yang sudah diketemukan tidak terlalu besar, yakni “hanya cukup untuk 15-20 tahun”.

Peraturan Presiden No. 5 tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional menyebutkan komposisi jenis energi di Indonesia pada tahun 2025 adalah batu bara 33%, gas alam 30%, minyak bumi 20%, dan energi terbarukan 17%. Termasuk dalam 17% ini ialah bahan bakar nabati sebesar 5%, panas bumi 5%, biomassa, nuklir, air, surya dan angin sebesar 5%, serta batu bara yang dicairkan sebanyak 2%. Angka tersebut menjadi tantangan tersendiri bagi energi terbarukan berupa hidrogen kedepannya, prosentase energi alternatif harus bisa mendapatkan proporsi besar berikutnya mengingat cadangan energi utama yang semakin menipis.

Di sisi lain pengurangan emisi gas karbon dioksida (CO₂) menjadi agenda yang sangat penting dalam hal isu *green environment*. Telah diketahui bersama bahwa salah satu efek pemanasan global yang saat ini dirasakan adalah perubahan iklim bumi yang signifikan, sehingga mendorong usaha mencari sumber energi terbarukan yang bersih dan ramah lingkungan. Hidrogen merupakan salah satu alternatif energi pengganti bahan bakar fosil yang menjanjikan.

Hidrogen sendiri memiliki nilai kalor pembakaran 2 kali lebih besar dibanding gas alam, *heating value* hidrogen adalah 51,53 btu/lb dan gas alam 21,3 btu/lb. Jika dibandingkan dengan elpiji, pada volume yang sama hidrogen memiliki massa yang lebih ringan dengan massa jenisnya adalah 0,083 gr/l, elpiji 0,59 gr/l.

keuntungan lain dari penggunaan hidrogen adalah harga suhu pembakarannya yang lebih tinggi (574 °C) dibanding elpiji (540 °C) dan bensin (257 °C). Dari segi kesehatan hidrogen bukan termasuk gas beracun seperti gas hidrokarbon. Sehingga untuk kedepannya hidrogen adalah sumber energi alternatif yang cukup menjanjikan.

Konversi bahan bakar fosil (metana, propana, butana, bensin, kerosin) menjadi hidrogen melalui proses *steam reforming*, *partial oxidation*, dan *autothermal reforming* adalah proses yang umum digunakan saat ini. *Steam reforming* memiliki produktivitas H₂ tertinggi namun menghasilkan emisi tertinggi pula. *Partial oxidation* memiliki produktivitas H₂ yang rendah sementara *autothermal reforming* untuk aplikasi komersialnya masih sangat terbatas. Penggunaan biomass dan air sebagai bahan baku produksi hidrogen merupakan topik penelitian yang menarik dan menjanjikan guna menjawab berbagai persoalan ketersediaan energi dan pencemaran udara saat ini (Holladay, et al. 2009).

Produksi hidrogen juga dapat dihasilkan dari berbagai proses gasifikasi, pirolisis, pencairan, hidrolisis dari biomassa. Proses biomassa bisa cukup menghasilkan hidrogen, tapi perhatiannya adalah efisiensi yang tidak lebih dari 60 %. Zat-zat hidup dan proses yang terjadi pada makhluk hidup juga memungkinkan terbentuknya gas hidrogen (Steinberg. 2004), namun gas hidrogen tersebut bukan merupakan produk utama dari proses hidup tersebut melainkan hanya produk samping, sehingga perlu dipertimbangkan pemanfaatan proses hidup untuk produksi hidrogen ini. Penggunaan biomassa dan air sebagai bahan baku produksi hidrogen merupakan topik penelitian yang menarik dan menjanjikan guna menjawab berbagai persoalan ketersediaan energi dan pencemaran udara saat ini .

Metode produksi hidrogen antara lain secara elektrolisis konvensional. Elektrolisis ini memecahkan ikatan air (H₂O) menjadi hidrogen dan oksigen melalui penggunaan energi listrik. Prinsip 'tradisional' ini diformulasikan oleh Michael Faraday pada tahun 1820 yang menyertakan jembatan elektrik melalui air antara dua elektroda. Setelah itu banyak peneliti yang mendemonstrasikan metode pertikel ini dengan menghasilkan gelembung gas melalui sel elektrokimia.

Electrolizer komersial saat ini memungkinkan efisiensi sistem hingga 73 % dengan konsumsi energi sebesar 70,1–53,4 kWh/kg H₂ pada 1 atm dan 25 °C (Kreuter., 1998). Biaya produksi hidrogen dari proses elektrolisis air jauh lebih mahal dibanding proses konvensional menggunakan hidrokarbon sebagai bahan baku, disebabkan kebutuhan listrik yang tinggi untuk proses ini. Teknologi

elektrolisis plasma adalah mirip dengan proses elektrolisis, namun dilakukan pada tegangan tinggi sehingga terbentuk bunga api listrik dan membangkitkan plasma pada larutan yang dielektrolisis. Plasma tersebut akan menghasilkan spesi-spesi reaktif dalam jumlah besar sehingga dapat meningkatkan pemutusan ikatan pada air sehingga meningkatkan pembentukan hidrogen hingga 8 kali lipat dibanding proses elektrolisis biasa (Mizuno, et al, 2003).

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, yang menjadi permasalahan utama adalah :

1. Bagaimana merancang sistem produksi hidrogen melalui proses elektrolisis plasma non-termal.
2. Bagaimana variabel proses memengaruhi kinerja dan produktivitas hidrogen yang dihasilkan.
3. Bagaimana rancangan sistem reaktor ganda memengaruhi produktivitas elektrolisis plasma non-termal dalam memproduksi hidrogen.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang dilakukan adalah:

1. Memperoleh rekayasa alat baru berupa reaktor plasma elektrolisis sistem ganda.
2. Menguji parameter-parameter yang mempengaruhi kinerja dan produktivitas hidrogen dalam memproduksi hidrogen.
3. Mempelajari perbandingan produktivitas penggunaan sistem reaktor terhadap parameter yang diujikan.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk pengembangan penelitian berikutnya dalam penggunaan skala dan mendapatkan produktivitas hidrogen yang tinggi.

1.5 Batasan Masalah

Dalam tulisan ini, pembahasan dilakukan dengan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Reaktor plasma elektrolisis digunakan dua buah dengan rangkaian seri dengan satu sistem sirkulasi pendingin dan rangkaian listrik paralel.

2. Variabel bebas yang divariasikan meliputi tegangan listrik, temperatur dan konsentrasi larutan kalium hidroksida (KOH).
3. Pengukuran prosentase hidrogen yang dihasilkan dilakukan dengan hidrogen *analyzer* GNL-400F, pengukuran tegangan, arus, konsumsi energi dilakukan dengan Lutron DW-6091 S/N: I 91844.
4. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses Departemen Teknik Kimia UI pada suhu dan tekanan atmosfer.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Berisi latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah serta sistematika penulisan yang digunakan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tentang konsep hidrogen, produksi hidrogen, pemisahan hidrogen dari hidrokarbon, elektrolisis, plasma, jenis plasma, spesi aktif plasma, elektrolisis faraday, elektrolisis plasma non-termal, dan faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja CGDE.

BAB III : 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 IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi hasil dari penelitian yang telah dilakukan berdasarkan prosedur yang tertera di Bab III. Dalam bab ini juga terdapat analisis dan pembahasan dari hasil penelitian yang telah diperoleh.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi rangkuman keseluruhan dari inti penelitian yang telah dilakukan, serta mengacu pada hasil yang telah diperoleh. Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil penelitian.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

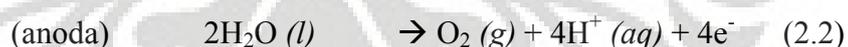
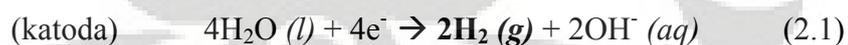
2.1 Hidrogen Secara Umum

Hidrogen mulai diperhatikan pada beberapa dasawarsa belakangan ini. Berbagai sifat dan karakteristik ada pada hidrogen. Keberadaannya yang melimpah di alam ini sebagian besar ada dalam bentuk senyawaan, terutama air. Belakangan mulai dilirik sebagai energi alternatif.

2.1.1 Definisi Hidrogen

Hidrogen (bahasa Latin: *hydrogenium*, dari bahasa Yunani: *hydro*: air, *genes*: membentuk) adalah unsur kimia pada tabel periodik yang memiliki simbol H dan nomor atom 1. Hidrogen pada suhu dan tekanan standar, tidak berwarna, tidak berbau, bersifat non-logam, bervalensi tunggal, dan merupakan gas diatomik yang sangat mudah terbakar. Dengan massa atom 1,00794 smu, hidrogen adalah unsur teringan di dunia. Hidrogen juga adalah unsur paling melimpah dengan persentase kira-kira 75% dari total massa unsur alam semesta. Hidrogen dapat dihasilkan dari air melalui proses elektrolisis, namun metode konvensional ini secara komersial lebih mahal daripada produksi hidrogen dari gas alam.

Stoikiometrik yang relevan dan persamaan elektrokimia pada elektrolisis air digambarkan sebagai berikut :



Secara lengkap proses elektrolisis diilustrasikan pada persamaan 2.3 dibawah ini.



Hidrogen sangat penting dalam reaksi asam basa yang mana banyak reaksi ini melibatkan pertukaran proton antar molekul terlarut.

2.1.2 Kegunaan Hidrogen

Sejumlah besar H₂ diperlukan dalam industri petrokimia dan kimia. Penggunaan terbesar H₂ adalah untuk memproses bahan bakar fosil dan dalam pembuatan ammonia. Konsumen utama dari H₂ di kilang petrokimia meliputi hidrodealkilasi, hidrodessulfurisasi, dan *hydrocracking*. H₂ memiliki beberapa kegunaan yang penting. H₂ digunakan sebagai bahan hidrogenasi, terutama dalam peningkatan kejenuhan dalam lemak tak jenuh dan minyak nabati (ditemukan di

margarin), dan dalam produksi metanol. Lemak tak jenuh ini juga merupakan sumber hidrogen pada pembuatan asam klorida. H₂ juga digunakan sebagai reduktor pada bijih logam.

Selain digunakan sebagai pereaksi, H₂ memiliki penerapan yang luas dalam bidang fisika dan teknik. Gas hidrogen ini digunakan sebagai gas tameng di metode pengelasan seperti pengelasan hidrogen atomik. H₂ digunakan sebagai pendingin rotor di generator pembangkit listrik karena hidrogen mempunyai konduktivitas termal yang paling tinggi di antara semua jenis gas. H₂ cair digunakan di riset kriogenik yang meliputi kajian superkonduktivitas.

Baru-baru ini hidrogen digunakan sebagai bahan campuran dengan nitrogen (kadang-kala disebut *forming gas*) sebagai gas perunut untuk pendeteksian kebocoran gas yang kecil. Aplikasi ini dapat ditemukan di bidang otomotif, kimia, pembangkit listrik, kedirgantaraan, dan industri telekomunikasi. Hidrogen adalah zat aditif (E949) yang diperbolehkan penggunaannya dalam ujicoba kebocoran bungkus makanan dan sebagai antioksidan.

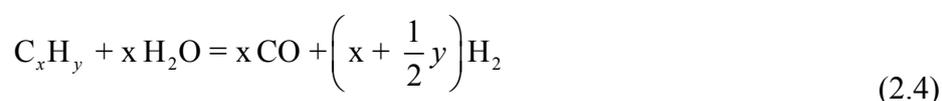
Isotop hidrogen yang lebih langka juga memiliki kegunaan tersendiri. Deuterium (hidrogen-2) digunakan dalam reaktor Candu sebagai kontroler untuk memperlambat neutron. Senyawa deuterium juga memiliki aplikasi dalam bidang kimia dan biologi dalam kajian reaksi efek isotop. Tritium (hidrogen-3) yang diproduksi oleh reaktor nuklir digunakan dalam produksi bom hidrogen, sebagai penanda isotopik dalam biosains, dan sebagai sumber radiasi di cat berpendar.

2.1.3 Produksi Hidrogen

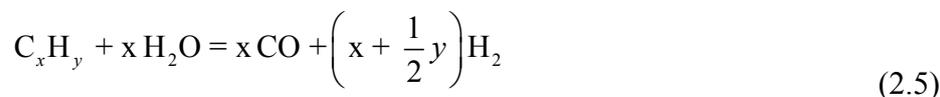
Teknologi untuk menghasilkan hidrogen maupun proses di industri yang dapat menghasilkan hidrogen, diantaranya adalah.

2.1.3.1 Pemisahan Hidrogen Dari Hidrokarbon

Teknologi *fuel processing* akan mengonversi hidrogen yang terkandung dalam material seperti bahan bakar, ammonia, atau metanol menjadi hidrogen *rich stream*. *Fuel processing* dari metana adalah metode yang lazim digunakan saat ini untuk menghasilkan hidrogen secara komersial. Pada proses pengolahan hidrokarbon, terdapat reaksi-reaksi kimia yang akan menghasilkan hidrogen. Sebagai contoh, pada proses *steam reforming* terjadi reaksi:



Pada reaksi 2.4 di atas, akan dihasilkan gas hidrogen sebagai produk dari proses *steam reforming*. Contoh lainnya yang dapat menghasilkan hidrogen dalam proses pengolahan hidrokarbon adalah pada proses *autothermal reforming*:



Tabel 2.1 di bawah merupakan perbandingan kinerja beberapa teknologi produksi hidrogen.

Tabel 2.1. Tabel perbandingan kinerja teknologi produksi hidrogen (Holladay et al, 2009)

Teknologi	Kelebihan	Kekurangan
<i>Steam reforming</i>	Tidak memerlukan oksigen Temperatur proses rendah Ratio gas CO/H ₂ paling besar	Emisi CO ₂ terbesar
<i>Autothermal reforming</i>	Temperatur proses yang lebih rendah dari POX <i>Low methane slip</i>	Membutuhkan udara atau oksigen Penggunaan secara komersial masih terbatas
<i>Partial oxidation</i>	Tidak memerlukan katalis Mengurangi kebutuhan desulfurisasi <i>Low methane slip</i>	Ratio H ₂ /CO rendah Membutuhkan temperatur proses yang tinggi

2.1.3.2 Elektrolisis Air

Elektrolisis adalah metode pemecahan molekul – molekul air menjadi atom – atom penyusunnya. 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. Ia merangkumkan hasil pengamatannya dalam dua hukum di tahun 1833.

Hukum elektrolisis Faraday:

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 di elektroda adalah konstan tidak bergantung jenis zat. Misalnya, kuantitas listrik yang diperlukan untuk mengendapkan 1 mol logam monovalen adalah 96485 C (Coulomb) tidak bergantung pada jenis logamnya.

C (Coulomb) adalah satuan muatan listrik, dan 1 C adalah muatan yang dihasilkan bila arus 1 A (Ampere) mengalir selama 1 s. Tetapan fundamental listrik adalah konstanta Faraday F, $9,65 \times 10^4$ C, yang didefinisikan sebagai kuantitas listrik yang

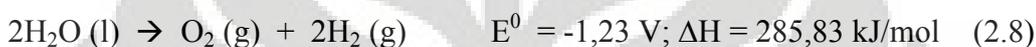
dibawa oleh 1 mol elektron. Bilangan ini dimungkinkan untuk menghitung kuantitas mol perubahan kimia yang disebabkan oleh aliran arus listrik yang tetap mengalir untuk rentang waktu tertentu.

Elektrolisis air adalah proses dekomposisi air (H_2O) menjadi oksigen (O_2) dan hidrogen (H_2) dengan menggunakan arus listrik yang mengalir melalui air.

Persamaan reaksinya adalah sebagai berikut:



Reaksi di atas dilakukan pada kondisi ruang (temperatur 25°C dan tekanan 1 atm). Kedua reaksi di atas dapat digabungkan menjadi:



Akan tetapi, elektrolisis air yang digunakan sebagai metode untuk menghasilkan hidrogen sampai saat ini mempunyai kelemahan yang cukup signifikan yaitu rendahnya konversi yang dihasilkan dari proses elektrolisis dan kebutuhan arus listrik yang tinggi saat operasi elektrolisis sedang berlangsung.

2.2 Plasma Secara Umum

Plasma mempunyai sifat tidak sama dengan padatan, cairan atau gas dan dianggap sebagai satu keadaan materi yang berbeda. Seperti gas, plasma tidak mempunyai bentuk dan volume terbatas kecuali dalam kotak tertutup, tetapi tidak sama dengan gas. Dalam pengaruh medan magnet, plasma mungkin membentuk struktur seperti kawat pijar, sinar dan lapisan ganda. Pada proses elektrolisis plasma ini, plasma berfungsi untuk membentuk spesi aktif pada larutan yang akhirnya dapat memecah ikatan hidrogen pada air dengan membentuk spesi radikal. Plasma menurunkan konsumsi arus listrik yang terpakai pada elektrolisis, sehingga menurunkan konsumsi energi yang digunakan.

2.2.1 Definisi Plasma

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

dengan atom atau molekul. Plasma juga dapat dikatakan sebagai atom yang kehilangan elektron karena beberapa atau semua elektron di orbit atom terluar telah terpisah dari atom atau molekul.

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

Plasma terbentuk akibat adanya perbedaan muatan listrik yang sangat tinggi antara elektrodanya dan mengalir melalui gas dan menghamburkan energi yang dimiliki oleh gas tersebut sehingga membuat gas menjadi cukup panas. Hal ini membuat partikel dalam gas ini akan bertumbukan dengan partikel disekitarnya tapi juga akan mempengaruhi medan magnetik disekitarnya. (Moustakas, et al., 2005)

Gas yang mengalir ini akan membuat plasma tampak berwarna. Tiap gas yang mengalir akan menghasilkan warna tersendiri. Tabel 2.2 berikut ini menunjukkan beberapa warna plasma yang ditimbulkan:

Tabel 2.2. Beberapa warna plasma yang timbul akibat adanya aliran gas tertentu

Gas yang mengalir	Warna plasma yang timbul
CF ₄	Biru
SF ₆	Biru putih
H ₂	Merah muda
O ₂	Kuning pucat
Ne	Merah bata
Ar	Merah tua
N ₂	Merah menuju kuning
CO ₂	Keputihan atau biru-putih yang cukup terang
Udara	Ungu kemerahmudaan dan makin cerah jika arus bertambah

Sumber: Barros, 2008; <http://www.plasma.de/en/glossary-entry-486.html>. (8 Mei 2010)

2.2.2 Cakupan Parameter Plasma

Jenis-jenis plasma yang digunakan dalam proses-proses industri meliputi plasma termal dan plasma non-termal dengan penjelasan sebagai berikut :

1. Plasma termal (plasma suhu tinggi): densitas energi tinggi, kesamaan suhu antara partikel berat (atom, molekul, ion) dan elektron. Karena mobilitas yang jauh lebih tinggi, energi yang diberikan kepada plasma ditangkap oleh elektron yang dipindahkan ke partikel-partikel berat dengan tumbukan elastis. Karena densitas jumlah elektron tinggi, dikaitkan dengan operasi pada tekanan atmosferik, frekuensi tumbukan elastis sangat tinggi dan kesetimbangan termal tercapai dengan cepat. Contoh plasma termal adalah plasma dari arus DC atau *radio frequency (RF) inductively coupled discharges* (Kogelschatz, 2004) .
2. Plasma non-termal (plasma dingin): densitas energi lebih rendah, terdapat perbedaan suhu besar antara elektron dan partikel yang lebih berat. Elektron dengan energi yang cukup bertumbukan dengan gas latar menghasilkan disosiasi, eksitasi dan ionisasi tingkat rendah tanpa peningkatan entalpi gas yang cukup besar. Hasilnya, suhu elektron melampaui suhu partikel-partikel berat hingga beberapa derajat perpangkatan dan karenanya memungkinkan untuk mempertahankan suhu keluaran (*discharge*) pada suhu yang jauh lebih rendah, bahkan pada suhu ruang. Plasma jenis ini menghasilkan spesi-spesi aktif yang lebih beragam, dan atau lebih besar energinya dibandingkan dengan spesi yang biasa dihasilkan pada reaktor kimia. Plasma jenis ini dihasilkan dalam berbagai jenis seperti pancaran pijar (*glow discharge*), *corona discharge*, dan *dielectric barrier discharge* yang mempunyai densitas energi berkisar antara 10^{-4} hingga puluhan watt per cm^{-3} . Secara singkat perbedaan glow discharge dan corona discharge plasma dijelaskan pada Tabel 2.3 dibawah ini.

Tabel 2.3. Perbedaan Glow Discharge Plasma dan Corona Discharge Plasma (Istadi, 2006)

Parameter	Glow Discharge	Corona Discharge
Tekanan (bar)	$<10^{-2}$	1
Medan listrik (kV/cm)	0,01	0,5-50
Energi Elektron (eV)	0,5-2	5
Temperatur elektron (K)	5000-20.000	50.000
Densitas elektron (cm^{-3})	10^8 - 10^{11}	10^{13}
Derajat ionisasi	10^{-6} - 10^{-5}	kecil

Plasma yang digunakan dalam "teknologi plasma" biasanya plasma dingin. Plasma secara umum dijelaskan pada Tabel 2.4 dibawah ini.

Tabel 2.4. Klasifikasi Plasma. (H. Huang a, L. Tang)

Plasma	Keadaan	Contoh
Plasma Temperatur Tinggi (Equilibrium Plasma)	$T_e=T_i=T_h$, $T_p=10^6 - 10^8$ K $n_e \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}$	<i>Laser fusion plasma</i>
Plasma Temperatur Rendah (Quasi-Equilibrium Plasma)	$T_e \approx T_i \approx T_h$, $T_p = 2 \times 10^3 - 3 \times 10^4$ K $n_e \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}$	<i>Arc plasma; atmospheric RF discharge</i>
Plasma Non Termal (Non Equilibrium Plasma)	$T_e \geq T_h$, $T_p \approx 3 \times 10^2 - 4 \times 10^2$ K $n_e \approx 10^{10} \text{ m}^{-3}$	<i>Corona Discharge</i>

Keterangan; T_e =Temperatur elektron, T_i =Temperatur ion, T_h =Temperatur netral, T_p =Temperatur plasma, n_e =densitas elektron

Plasma non-termal dikatakan sebagai plasma non-equilibrium karena suhu limbahnya berbeda jauh dengan suhu elektron. Oleh karena itu, plasma jenis ini lebih cocok digunakan mengingat suhu kerjanya berada tidak jauh dari temperatur ruang, selain itu plasma non-termal ini menghasilkan spesi-spesi radikal yang membuat mekanisme reaksi tidak seperti biasanya, yaitu pengaktifan reaksi dengan pemanasan.

2.2.3 Contoh Plasma Industri Dan Komersial

Pelepasan tekanan rendah:

- Plasma pelepasan pijar (*Glow Discharge Plasma*): plasma non-termal yang dibangkitkan oleh aplikasi dari DC atau medan elektrik frekuensi rendah RF (<100 kHz) ke celah antara dua elektroda logam. Mungkin plasma paling

umum; ini adalah jenis plasma yang dibangkitkan di dalam cahaya tabung neon.

- Plasma yang digabungkan secara kapasitas (*Capacity Coupled Plasma*): serupa dengan plasma pelepasan pijar, tetapi dibangkitkan dengan medan elektrik frekuensi tinggi RF sekitar 13,56 MHz. Ini berbeda dengan pelepasan pijar dalam arti bahwa sarung pelindung jauh lebih keras. Plasma jenis ini digunakan secara luas dalam mikro-fabrikasi dan industri rangkaian terintegrasi untuk penggoresan plasma serta deposisi lanjut uap kimia dengan plasma.
- Plasma yang digabungkan secara induktif (*Inductively Coupled Plasma*): serupa dengan CCP dan serupa dalam aplikasi tetapi elektroda terdiri dari satu kumparan terbungkus di sekitar volume pelepasan muatan yang secara induktif membangkitkan plasma.
- Plasma gelombang terpanasi (*Wave Heated Plasma*): serupa dengan CCP dan ICP dalam hal tipikal RF atau gelombang mikro, tetapi dipanaskan baik dengan cara elektrostatis ataupun elektromagnetik. Contoh adalah pelepasan *helicon*, resonansi elektron siklotron (*Electron Cyclotron Resonance*) dan resonansi ion siklotron (*Ion Cyclotron Resonance*). Hal ini secara khas memerlukan suatu medan magnet koaksial untuk propagasi gelombang.

Pelepasan tekanan atmosfer

- Pelepasan bunga api (*Arc Discharge*): plasma ini merupakan suatu pelepasan termal dari temperatur sangat tinggi ~ 10.000 K. Plasma ini dapat dibangkitkan menggunakan beragam sumber daya. Plasma ini umumnya digunakan dalam proses metalurgi. Sebagai contoh plasma ini digunakan untuk melelehkan batu berisi Al_2O_3 untuk menghasilkan aluminium.
- Pelepasan korona (*Corona Discharge*): plasma ini merupakan suatu pelepasan muatan non-termal yang dibangkitkan dari tegangan tinggi ke ujung elektroda tajam. Plasma ini umumnya digunakan dalam generator ozon dan partikel *precipitator*.
- Pelepasan muatan penghalang dielektrikum (*Dielectric Barrier Discharge*): merupakan pelepasan non-termal yang dibangkitkan oleh aplikasi dari tegangan tinggi melintasi celah kecil di mana suatu lapisan non-konduktif mencegah transisi pelepasan plasma ke suatu bunga api. Hal ini sering salah

sebut sebagai pelepasan korona dalam industri dan pada aplikasi serupa pada pelepasan korona. Plasma ini juga digunakan secara luas dalam penanganan jaringan kain.

2.3 Spesi Aktif Plasma Non Termal

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

2.3.1 Foton

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

Foton sinar tampak mempunyai energi yang lebih besar, berkisar antara 1,6 sampai 3,3 eV. Foton ini dapat memutuskan beberapa ikatan molekular, dan mengeksitasi atom-atom dengan resonansi pada spektrum tampak. Foton ultraviolet lebih tinggi energinya, berkisar dari 3,1 sampai 95 eV, dan dapat mengionisasi dan mengeksitasi atom-atom, menggantung molekul-molekul hidrokarbon panjang, dan memutus ikatan-ikatan molekular membentuk potongan-potongan molekular yang lebih kecil.

Tabel 2.5. Energi-energi foton dalam spektrum elektromagnetik (Roth, 2001)

Daerah Spektral	Kisaran panjang gelombang (nm)	Kisaran energi (eV)
Infra merah	$730 \leq \lambda \leq 10^6$	$0,00124 \leq E' \leq 1,70$
Tampak	$380 \leq \lambda \leq 730$	$1,59 \leq E' \leq 3,26$
Ultraviolet	$13 \leq \lambda \leq 397$	$3,12 \leq E' \leq 95,3$

Karena tidak bermuatan, foton tidak terpengaruh oleh medan listrik atau magnet yang dapat hadir dalam selubung, dan mencapai permukaan dengan energi aslinya.

Foton-foton ultraviolet dan tampak mempunyai energi yang cukup untuk memutuskan ikatan molekular atau atomik pada suatu permukaan dan untuk menghasilkan radikal bebas polimerik dan atau monomer. Foton-foton UV dengan energi yang cukup dapat mengubah keadaan molekular permukaan melalui proses-proses berikut ini:

1. *Disosiasi*, menghasilkan sebuah atom individual atau potongan molekular kecil dari molekul yang lebih besar, seperti polimer.
2. *Pemotongan*, memecah rantai molekular polimer; atau menghasilkan dua potongan molekular besar dari sebuah molekul induk.
3. *Pencabangan*, menghasilkan rantai-rantai sisi pada sebuah molekul besar atau polimer.
4. *Crosslinking*, yang menghasilkan matriks molekular dua atau tiga dimensi dengan membentuk ikatan-ikatan antara molekul-molekul atau polimer yang berdekatan.

2.3.2 Spesi Netral

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

2.3.3 Partikel-Partikel Bermuatan

Plasma yang diionisasi secara parsial (hampir seluruhnya oleh ionisasi tumbukan elektron netral) menghasilkan partikel-partikel bermuatan yang dapat dipercepat pada permukaan lingkungan oleh selubung medan listrik. Ion-ion positif cenderung untuk membentur permukaan lingkungan dengan energi yang lebih tinggi daripada elektron atau ion-ion negatif. Partikel-partikel bermuatan yang dihasilkan

dari plasma diantaranya elektron yang dihasilkan dalam plasma oleh ionisasi tumbukan elektron netral, yang biasanya mempunyai suhu kinetika 1-10 eV. Elektron-elektron ini mencapai permukaan dalam jumlah yang sama dengan fluks ion jika permukaan tersebut adalah insulator. Ion-ion dapat positif atau negatif, namun hampir selalu positif dalam *discharge* pijar vakum dimana kemungkinan perlekatan kecil. Ion-ion positif dihasilkan oleh ionisasi dan pertukaran muatan. Ion-ion negatif dihasilkan dalam jumlah yang signifikan pada plasma tekanan atmosferik dengan perlekatan elektron. Proses ini tidak disukai pada kondisi vakum, karena pembentukan ion negatif adalah sebuah proses 3 badan. Ion-ion molekular dapat juga dihasilkan seperti potongan molekular bermuatan seperti OH^- , yang dapat mengalami reaksi kimia kuat dalam plasma atau pada permukaan.

2.4 Elektrolisis Faraday

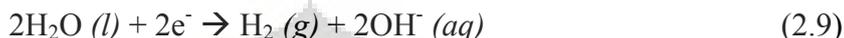
Dalam sel elektrolisis, energi listrik dapat mengubah energi kimia dalam bentuk reaksi redoks. Energi listrik tersebut berasal dari sumber arus searah, supaya muatan pada kutub-kutubnya tetap sehingga elektrolisis dapat berlangsung sesuai dengan yang diharapkan. Pada proses elektrolisis, jika sumber arus dihubungkan maka pada lintasan luar dari sel elektrolisis tersebut akan terjadi pergerakan aliran elektron dari kutub negatif yang dihubungkan dengan katoda menuju kutub positif. Sedangkan di dalam elektrolit akan terjadi pergerakan ion-ion negatif (anion) menuju anoda dan pergerakan ion-ion positif menuju katoda. Beda potensial listrik antara dua titik pada penghantar menyebabkan adanya perpindahan muatan dari titik satu ke titik lainnya. Satuan beda potensial listrik yaitu volt.

Pada elektrolisis digunakan arus DC karena arus tersebut membuat arah arus listrik menjadi konstan yang menyebabkan aliran menjadi searah. Searah dalam hal ini mengalir dari satu titik sumber (kutub positif) menuju kutub lainnya (negatif). DC dapat diperoleh dari suplai AC dengan penggunaan pengatur arus yang dikenal dengan *rectifier*, yang biasanya terdiri dari elemen elektronik atau elemen elektromekanikal yang kemudian membuat aliran dari arus listrik menjadi satu arah. Selain itu arus searah juga dibuat dari arus AC yang disearahkan dengan menggunakan *inverter* atau set motor generator.

2.4.1 Elektrolisis Larutan Elektrolit

Elektrolisis larutan elektrolit melibatkan reaksi yang lebih kompleks, hal ini dikarenakan adanya molekul air yang mempunyai kemampuan untuk tereduksi atau teroksidasi, akibatnya dalam elektrolisis larutan elektrolit terjadi persaingan untuk menentukan spesi (ion atau molekul) mana yang tereduksi dan yang teroksidasi.

Pada elektrolisis Faraday, pada katoda terjadi reduksi H₂O karena kation yang digunakan adalah Na⁺:



pada anoda terjadi reaksi oksidasi H₂O akan teroksidasi apabila anionnya adalah asam oksida (SO₄²⁻, NO₃⁻, OH⁻ dll). Sehingga yang terbentuk adalah senyawa oksigen.



Secara ilmiah pada proses elektrolisis konvensional di katoda akan dihasilkan gas hidrogen dan di anoda akan dihasilkan gas oksigen.

2.4.2 Aspek Kuantitatif

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.

Berdasarkan hasil eksperimennya, Michael Faraday menemukan beberapa kaidah perhitungan elektrolisis, yang dikenal dengan hukum Faraday.

Hukum Faraday I

"Massa zat yang terbentuk pada masing-masing elektroda sebanding dengan kuat arus/arus listrik yang mengalir pada elektrolisis tersebut".

Hukum Faraday II

"Massa dari macam-macam zat yang diendapkan pada masing-masing elektroda (terbentuk pada masing-masing elektroda) oleh sejumlah arus listrik yang sama banyaknya akan sebanding dengan berat ekuivalen masing-masing zat tersebut."

Arus listrik satu Faraday (1F) didefinisikan sebagai jumlah arus listrik yang terdiri dari 1 mol elektron.

Untuk menghitung jumlah zat-zat yang terbentuk di katoda dan anoda, hukum faraday dirumuskan sebagai berikut :

$$W = e \cdot F \quad (2.11)$$

W = massa hasil elektrolisis (gram)

e = massa ekuivalen hasil elektrolisis

F = jumlah arus listrik (Faraday)

Dengan 1 Faraday = 96500 Coulomb dan 1 Coulomb = 1 ampere x detik, maka rumus diatas dapat dijabarkan menjadi :

$$W = e \cdot i \cdot t / 96500 \quad (2.12)$$

i = kuat arus (ampere)

t = waktu lamanya elektrolisis (detik)

Dan berdasarkan hukum Faraday II diperoleh persamaan :

$$M_1 : m_2 = e_1 : e_2 \quad (2.13)$$

m = massa zat (gram)

e = berat ekivalen = $A_r/Valensi$

Sehingga Pada elektrolisis larutan KOH dengan elektroda inert, jika dialirkan listrik 10 ampere selama 600 detik. Volum gas hidrogen yang dihasilkan pada katoda dan volume gas oksigen yang terbentuk di anoda pada kondisi standar berdasarkan perhitungan Faraday adalah:

$$= \frac{\dots}{\dots} = \frac{10 \cdot 600}{96500} = 0,0622$$

Atau setara dengan 0,7464 liter gas hidrogen

Jadi berdasarkan hukum Faraday II akan diperoleh gas hidrogen sebesar 0,7464 liter atau setara dengan 0,3731 liter gas oksigen.

2.5 Elektrolisis Plasma Non Termal

Produksi gas hidrogen menggunakan metode elektrolisis plasma non-termal sudah mulai dikembangkan saat ini. Hal ini disebabkan produktivitas hidrogen yang dihasilkan jauh lebih besar dibanding proses elektrolisis konvensional. Mizuno (2003) dengan menggunakan air murni sebagai bahan baku pada suhu 80° C dan tegangan 230 V, mendapatkan efisiensi penggunaan energi listrik hingga 800 % dibanding kebutuhan energi listrik menurut hukum Faraday. Kondisi operasi seperti suhu larutan, tegangan dan kuat arus listrik akan sangat menentukan tingkat efektivitas proses ini.

Zong, et al. 2009, telah melakukan percobaan elektrolisis CGDE dengan larutan dielektrikum berupa metanol. Parameter-parameter yang mereka gunakan adalah $G(H_2)$ yaitu perbandingan mol hidrogen yang terbentuk dari elektrolisis plasma dengan mol hidrogen dari proses elektrolisis konvensional, dirumuskan dengan:

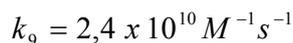
$$(H_2) / (H_2)_F = \frac{V_{gas} / 24}{Q / 2F} \text{ (mol/mol)} \quad (2.14)$$

Selain itu digunakan juga parameter energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan seberapa volum produk gas, dirumuskan dengan:

$$W_r = \frac{VQ}{V_{\text{gas}}} \text{kJ.L}^{-1} \quad (2.15)$$

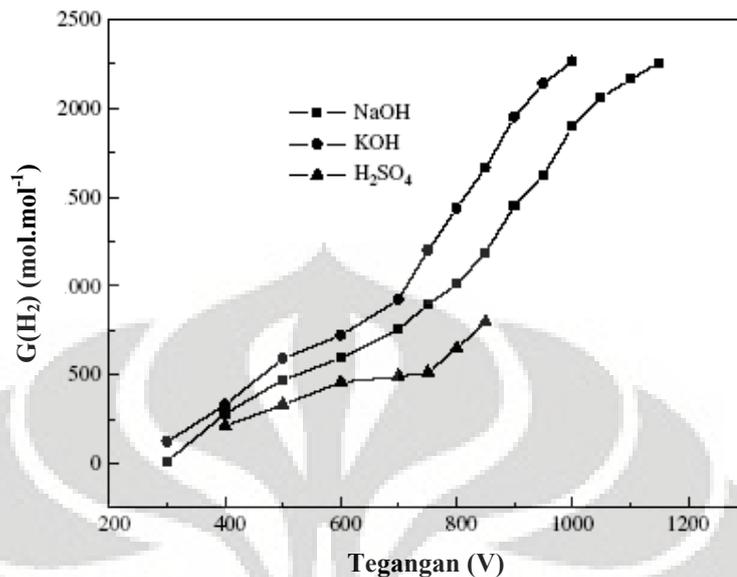
2.5.1 Spesi Aktif Pada Elektrolisis Plasma Pijar

Spesi-spesi aktif (*energetic species*) yang terbentuk sepanjang proses ini diantaranya H_2O_2 , $\text{OH}\bullet$, $\text{H}\bullet$, e^-_{aq} , $\text{HO}_2\bullet$ dapat menyebabkan perubahan kimia dalam larutan. GAO Jinzhang (2008) kemudian menemukan mekanisme reaksi pembentukan radikal-radikal tersebut seperti dituliskan di bawah:

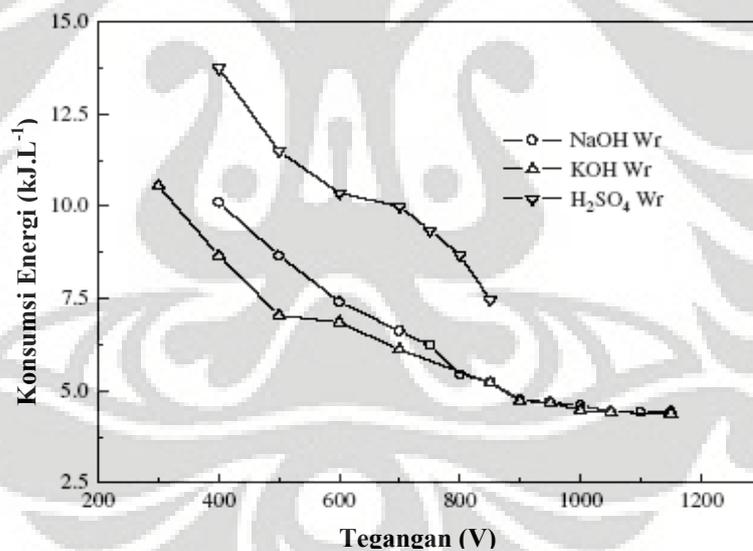


Zong (2009) menggunakan larutan metanol dan NaOH sebagai elektrolitnya mendapatkan rasio jumlah mol H_2 yang dihasilkan ($G(\text{H}_2)$) mencapai hingga 2300 kali lebih besar dibanding H_2 yang dihasilkan berdasarkan hukum Faraday seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Energi listrik yang dikonsumsi larutan sangat dipengaruhi oleh tegangan dan jenis elektrolitnya. Gambar 2.2 menunjukkan

konsumsi energi listrik menurun dengan meningkatnya tegangan dimana KOH dan H_2SO_4 lebih efektif menurunkan konsumsi energi dibanding NaOH.



Gambar 2.1. Pengaruh tegangan pada $G(H_2)$. Konduktivitas: 11,55 mS/cm, Suhu: 64 °C. Konsentrasi metanol: 99,5 % (Zong, et al, 2009)



Gambar 2.2. Pengaruh tegangan pada konsumsi energi, Konduktivitas: 11,55 mS/cm, Suhu: 64 °C. Konsentrasi metanol: 99,5 % (Zong, et al, 2009)

2.5.2 Perbandingan Kinerja Plasma Pada Proses Elektrolisis Plasma

Perbandingan kinerja berbagai teknologi plasma non-termal untuk konversi metanol menjadi hidrogen menunjukkan metode elektrolisis *glow discharge* memiliki keunggulan dibanding metode *dielectric barrier discharge* plasma dan *corona discharge* plasma dalam hal konsumsi energi, konsentrasi hidrogen dan emisi CO_2 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.6

Tabel 2.6. Perbandingan Kinerja Teknologi Non-Plasma untuk Produksi Hidrogen

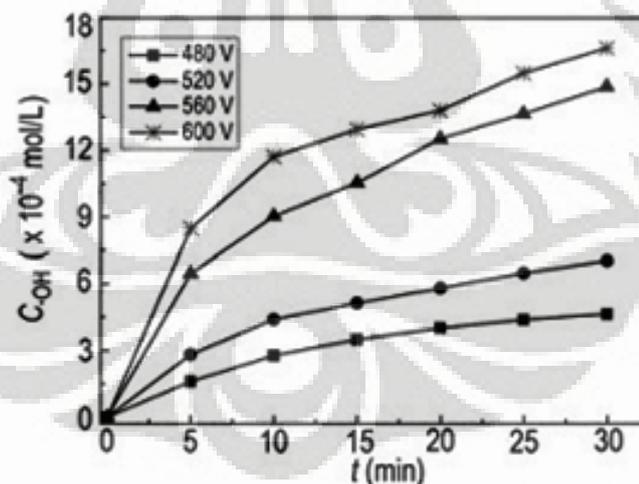
Teknologi plasma non termal	Konsumsi Energi (kJ/L)	Konsentrasi H ₂ (%)	Emisi CO ₂ /H ₂ (L/L)	Referensi
<i>Glow discharge</i>	4,26	89	0,041	Zong, et al. 2009
<i>Dielectric barrier discharge</i>	14	63,4	0,45	Kabashima, et al, 2003
<i>Corona discharge</i>	9	54,9	0,33	Liu, et al, 2003

2.5.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja CGDE

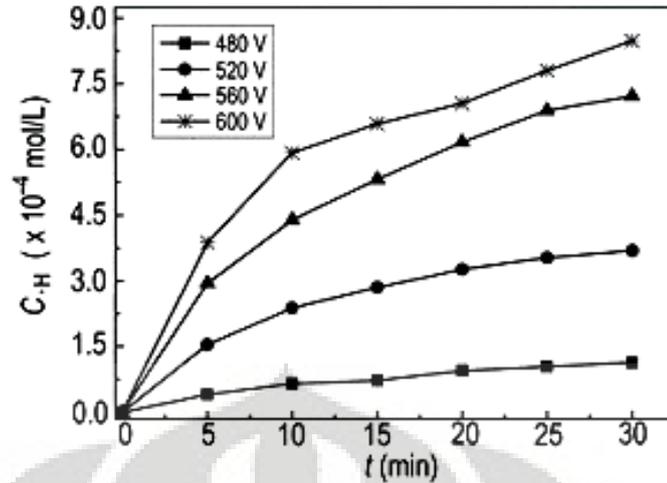
Dalam memproduksi hidrogen dari air dengan teknologi plasma, faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan radikal OH• dan H• yang sangat berperan dalam reaksi pembentukan hidrogen sangatlah penting, GAO Jinzang (2008) telah melakukan percobaan untuk mengetahui faktor-faktor tersebut. Hasil penelitiannya adalah sebagai berikut:

1. Efek Tegangan Listrik

Efek variasi tegangan listrik pada CGDE terhadap pembentukan radikal yang dihasilkan ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 2.3 dan 2.4 di bawah ini:



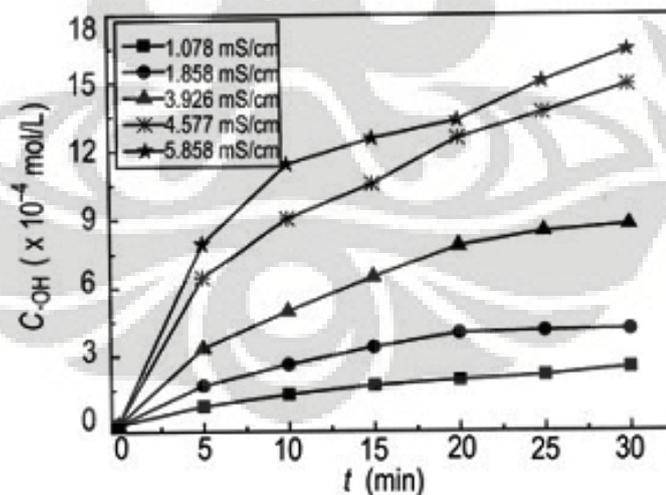
Gambar 2.3. Efek tegangan terhadap pembentukan radikal OH• pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal OH• (GAO Jinzang, et al., 2008)



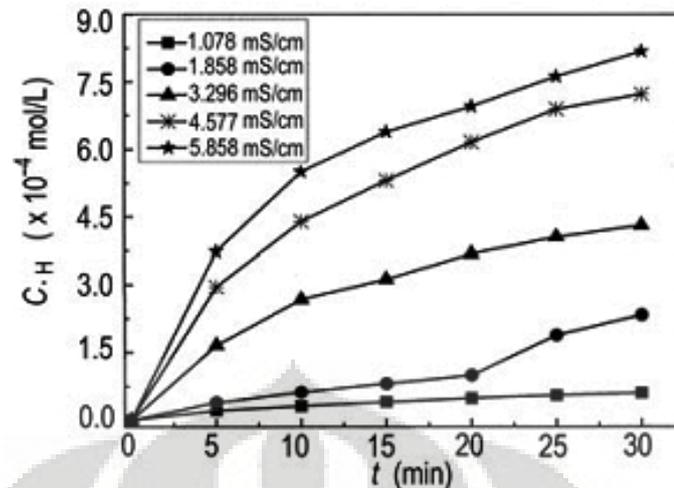
Gambar 2.4. Efek tegangan terhadap pembentukan radikal H• pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal H• (GAO Jinzang, et al., 2008)

Pada grafik Gambar 2.3 dan 2.4 bisa dilihat bahwa semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan untuk menghasilkan plasma, konsentrasi radikal OH• maupun H• yang terbentuk semakin tinggi pula. Hal ini disebabkan karena perbedaan tegangan yang tinggi energi untuk mengeksitasi elektron untuk menghasilkan radikal juga semakin tinggi, akibatnya semakin tinggi tegangan listrik yang dipakai pembentukan radikalnya pun juga semakin besar.

2. Efek Konduktivitas Larutan



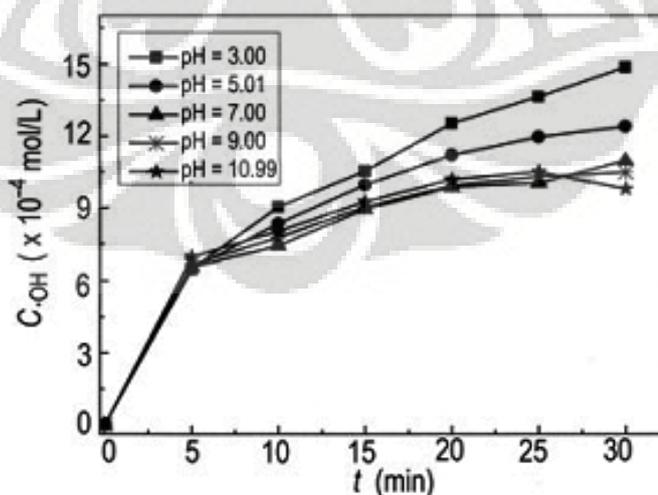
Gambar 2.5. Efek Konduktivitas Larutan terhadap Pembentukan Radikal OH• pada Grafik Waktu terhadap Konsentrasi Radikal OH• (GAO Jinzang, et al., 2008)



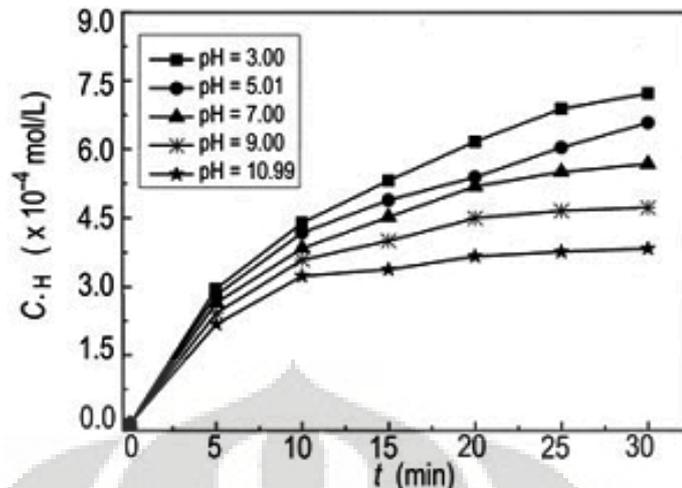
Gambar 2.6. Efek Konduktivitas Larutan Terhadap Pembentukan Radikal H• pada Grafik Waktu terhadap Konsentrasi Radikal H• (GAO Jinzang, et al., 2008)

Selain tegangan, konduktivitas larutan yang digunakan pun juga mempengaruhi pembentukan radikal OH• dan H•, 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 antara elektron dengan elektron pada molekul juga semakin besar, sehingga pembentukan radikal pun juga akan terjadi dengan lebih baik. Konduktivitas larutan bisa ditingkatkan dengan larutan elektrolit. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.5 dan Gambar 2.6.

3. Efek pH larutan



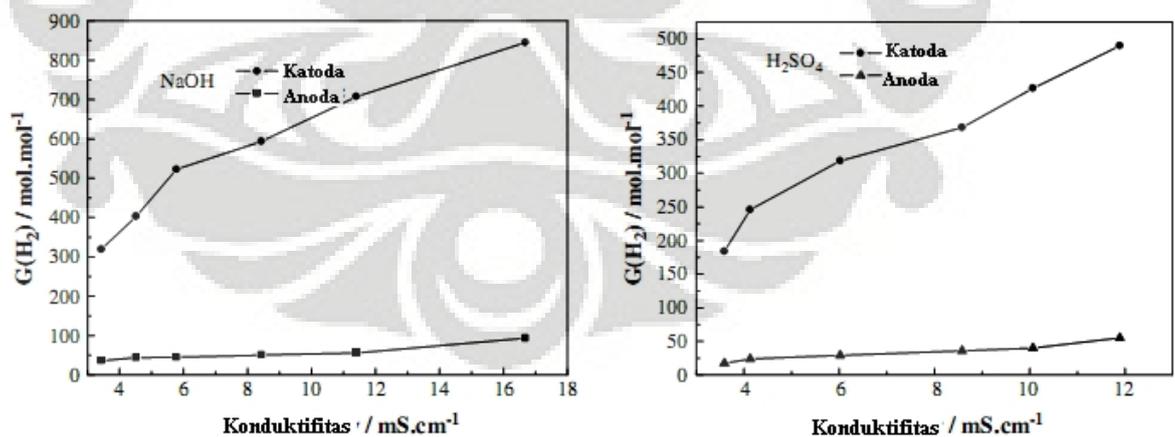
Gambar 2.7. Efek pH Larutan terhadap Pembentukan Radikal OH• pada Grafik Waktu terhadap Konsentrasi Radikal OH• (GAO Jinzang, et al., 2008)



Gambar 2.8. Efek pH Larutan Terhadap Pembentukan Radikal H• pada Grafik Waktu terhadap Konsentrasi Radikal H• (GAO Jinzang, et al., 2008)

Pada kedua grafik Gambar 2.7 dan 2.8 bisa dilihat bahwa pembentukan radikal OH• maupun H• paling tinggi terjadi ketika pH larutan sekitar 3. Yan ZC, et al. 2009, telah melakukan percobaan elektrolisis CGDE dengan larutan dielektrikum berupa metanol. Parameter-parameter yang mereka gunakan adalah $G(H_2)$ yaitu perbandingan mol hidrogen yang terbentuk dari elektrolisis plasma dengan mol hidrogen dari proses elektrolisis konvensional. Selain itu digunakan juga parameter energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan seberapa volum produk gas (W_r).

Berikut grafik hasil percobaanya:

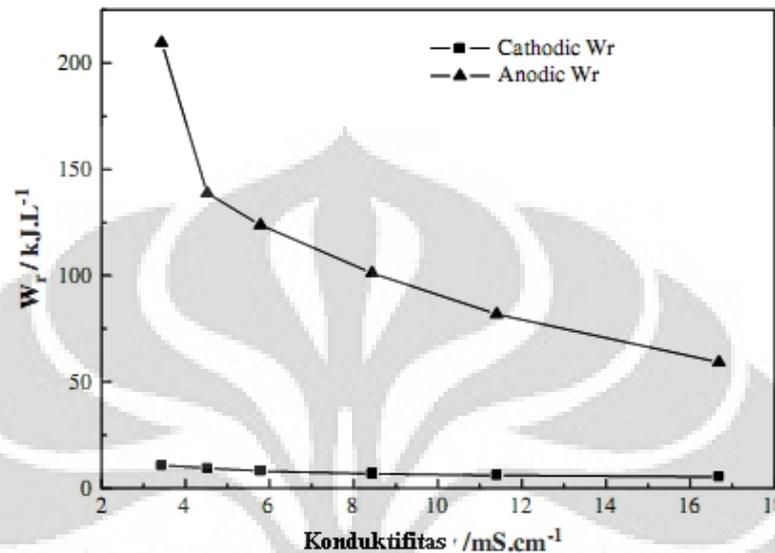


Gambar 2.9. Efek Konduktivitas Larutan Metanol terhadap $G(H_2)$ pada Anoda dan Katoda dalam NaOH dan H₂SO₄. T = 337,15 K, Kemurnian 99,5% (Zong, et al.,2007)

Pada grafik Gambar 2.9 $G(H_2)$ semakin bertambah seiring dengan bertambahnya konduktivitas larutan. Kenaikan $G(H_2)$ seiring dengan kenaikan konduktivitas

larutan dikarenakan pembentukan radikal $H\bullet$ yang semakin meningkat pula dengan kenaikan konduktivitas larutan (seperti pembahasan sebelumnya).

Pengaruh konduktivitas ternyata juga mempengaruhi konsumsi energi yang dibutuhkan untuk berjalanya reaksi. Grafik yang didapat sebagai berikut:



Gambar 2.10. Efek Konduktivitas terhadap W_r (Konsumsi Energi) pada Larutan NaOH dan Metanol, $T = 337,15 K$, Kemurnian 99,5% (Zong, et al.,2007)

Pada grafik Gambar 2.10 bisa disimpulkan bahwa semakin tinggi konduktivitas larutan yang dipakai konsumsi energi yang digunakan juga semakin kecil karena nilai W_r berbanding terbalik dengan jumlah H_2 yang dihasilkan, sementara semakin tinggi konduktivitas larutan produksi H_2 juga semakin bertambah. Sehingga proses elektrolisis nantinya sebaiknya dilakukan pada larutan yang berkonduktivitas tinggi. Tidak adanya kepastian konsumsi energi yang rendah dan konduktivitas larutan yang tinggi akan menghasilkan produk H_2 yang tinggi pula, sehingga diperlukan adanya pengujian berapa nilai optimal untuk produksi H_2 ini.

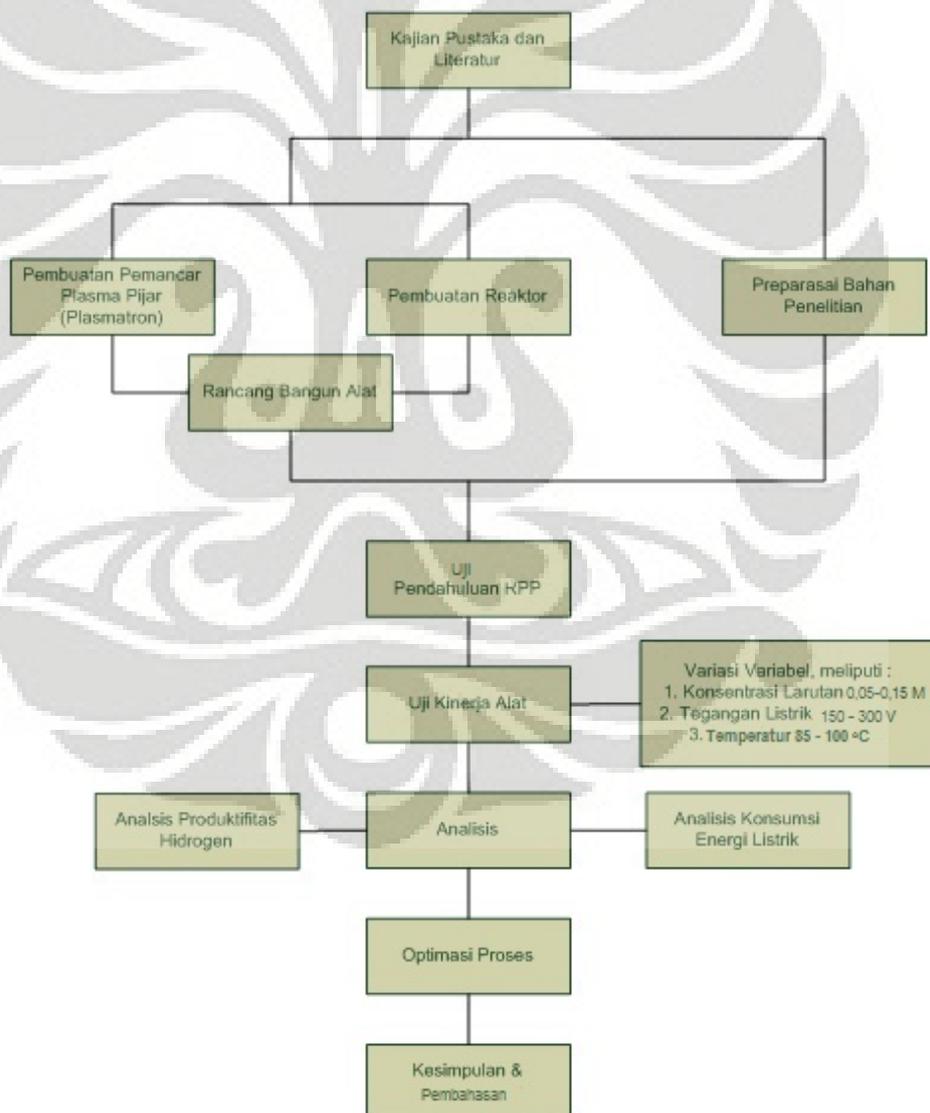
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Bagian ini membahas berbagai hal yang berhubungan dengan rancangan penelitian yang akan dilakukan, alat dan bahan yang dibutuhkan dalam melakukan penelitian, dan prosedur yang dilakukan untuk penelitian ini.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian diawali dengan tahap pengkajian mengenai teknologi plasma yang mulai berkembang beberapa tahun belakangan ini. Penelitian selanjutnya bersifat eksperimental yang dilakukan di laboratorium Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia. Sesuai dengan skema pada Gambar 3.1 di bawah ini :



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2 Lokasi Penelitian

Aktivitas utama riset ini dilakukan di Laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses, Laboratorium Dasar Proses Kimia, dan Laboratorium Dasar Proses dan Operasi Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok.

3.3 Peralatan

Reaktor plasma non termal terdiri dari komponen-komponen utama dan komponen tambahan sebagai komponen pendukung.

3.3.1 Komponen Utama Penyusun Reaktor

- a. Housing Filter sebagai wadah reaktor dengan diameter 8 cm dan tinggi 25 cm.
- b. Elektroda stainless steel dengan panjang 18 cm dan diameter 0,5 cm digunakan untuk anoda, logam di bagian atas reaktor.
- c. Elektroda wolfram dengan panjang 13 cm dan diameter 0,5 cm digunakan untuk katoda, logam di bagian bawah reaktor.
- d. Selubung jala stainless steel sebagai pelapis anoda dari korosi dengan lebar 4 cm dan panjang 7 cm, anoda dilapisi sepanjang 7 cm.
- e. Akrilik silinder sebagai penangkap gas hidrogen dan pembatas ruang anoda dengan katoda dengan diameter 5 cm dan tinggi 20 cm.
- f. Termometer
- g. Kumparan pipa tembaga sebagai pengontak aliran panas dari larutan dengan cairan pendingin di dalam wadah dengan diameter tembaga $\frac{1}{4}$ “, panjang 200 cm dan diameter kumparan 10 cm
- h. Wadah penampung cairan pendingin dan kumparan tembaga
- i. Pompa peristaltik laju alir rendah pemompa larutan reaktor menuju pendingin dan kembali ke reaktor

3.3.2 Komponen Pendukung Pembangkit Plasma

- a. Slide regulator dan steker sebagai pengatur arus listrik dan tegangan yang akan masuk ke reaktor kapasitas slide regulator 3 kVA
- b. Port Analyzer Lutron DW-6091 S/N: I 91844 sebagai pembaca arus listrik, tegangan dan konsumsi energi per satuan waktu (WHr)
- c. Dioda tegangan tinggi sebagai penyearah arus menjadi DC dengan spesifikasi 1000 V 25 A

- d. Transformator step-up sebagai pengubah tegangan listrik AC 200 V menjadi 300 V, digunakan hanya pada variabel tegangan 300 V.
- e. Kabel tegangan tinggi merah, hitam, biru dan capit buaya kecil
- f. Multitester

3.3.3 Komponen Pendukung Non Reaktor

- a. *Steam trapper* sebagai penangkap uap air yang keluar dari reaktor atau produk cair yang keluar bersama aliran gas dari reaktor, terbuat dari akrilik silinder dengan diameter 10 cm dan tinggi 20 cm dan blok pipa paralon dengan drat sebagai penutup kondenser dengan diameter 10 cm.
- b. Kondenser sebagai pengembun tahap dua setelah *steam trapper*, terbuat dari labu erlenmeyer 8 cm.
- c. Tabung absorber beserta silica gel sebagai pengering gas dari kandungan air dengan diameter 5 cm dan tinggi 25 cm.
- d. Flowmeter gelembung untuk mengukur flowrate pada kelajuan rendah.
- e. Hydrogen Analyzer GNL-400F sebagai pengukur prosentase hidrogen yang dihasilkan dari proses.
- f. Konduktimeter sebagai pengukur konduktivitas larutan
- g. Syringe sebagai pengambil sampel gas yang keluar setelah absorber untuk disuntikkan ke Hydrogen Analyzer
- h. Selang silikon $\frac{3}{4}$ " 20 cm, selang bening $\frac{1}{2}$ " 200 cm, selang filter air (putih keras) $\frac{1}{4}$ " 150cm.
- i. Nipple kuningan $\frac{3}{4}$ ", nipple plastik + drat $\frac{1}{2}$ " dan $\frac{3}{8}$ ".
- j. *Y junction* untuk penghubung keluaran 2 reaktor menuju satu *steam trapper*
- k. Lem silikon, cyanoacrilate, akrilik, dan lem epoksi merk Araldyte,

3.4 Bahan Penelitian

Adapun bahan-bahan yang digunakan pada reaktor plasma pancaran pijar ini terdiri dari :

- a. Air akuades (H_2O)
- b. Kalium hidroksida (KOH) sebagai zat elektrolit dalam larutan

3.5 Rancang Bangun Peralatan Sistem Produksi Hidrogen

Rancang bangun peralatan sistem produksi hidrogen meliputi rangkaian listrik pembangkit plasma, reaktor plasma elektrolisis, sistem pemurnian dan pengukuran produk hidrogen

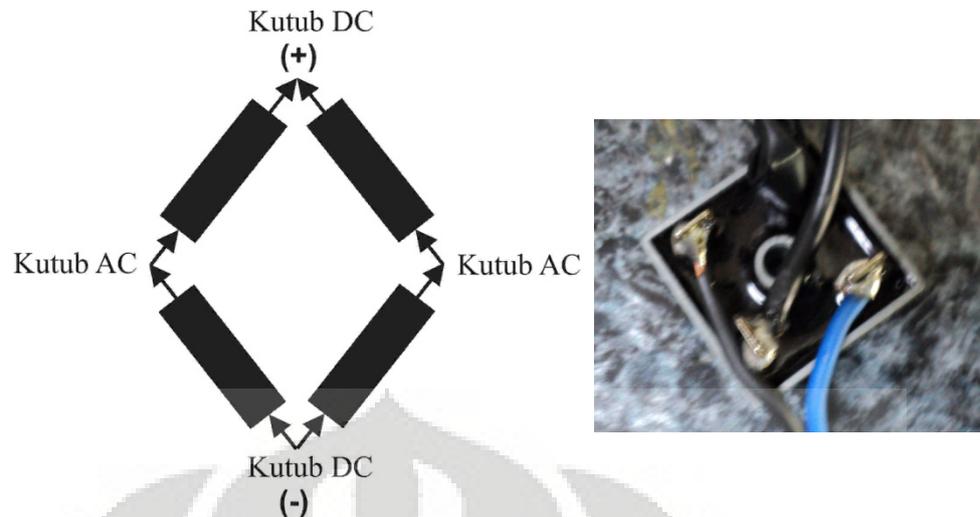
3.5.1 Rangkaian Listrik Pembangkit Plasma

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 watt dapat diamati pada alat ukur digital secara langsung.

- 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.
- b. Port Analyzer Lutron DW-6091 S/N: I 91844. Spesifikasi pembaca listrik digital ini adalah 500 V dan 10 A. Pada rangkaian pertama aliran listrik dari slide regulator menuju port analyzer untuk diidentifikasi tegangan, arus listrik, dan konsumsi energi. Slide regulator dan port analyzer seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2.
- c. Dioda tegangan tinggi, dengan spesifikasi 1000 V dan 25 A. Sebelumnya digunakan dioda bridge menggunakan dioda tegangan rendah 500 V dan 2 A, dioda bridge ini berfungsi untuk membuat arus listrik menjadi searah DC seperti yang dibutuhkan pada proses elektrolisis. Dioda tegangan tinggi dan skema dioda bridge seperti pada Gambar 3.3 yang dirangkai sebelum aliran listrik menuju reaktor.
- d. Pada variabel tegangan 300 V digunakan trafo setelah slide regulator, trafo yang digunakan punya spesifikasi 1000 Watt, sehingga untuk mengantisipasi melonjaknya watt di awal, digunakan dua buah trafo.



Gambar 3.2. Rangkaian Listrik Pembangkit Plasma, Port Analyzer dan Slide Regulator



Gambar 3.3. Dioda: (a) Skema Dioda Bridge pada Dioda Tegangan Rendah; (b) Dioda Tegangan Tinggi

3.5.2 Reaktor Plasma Elektrolisis

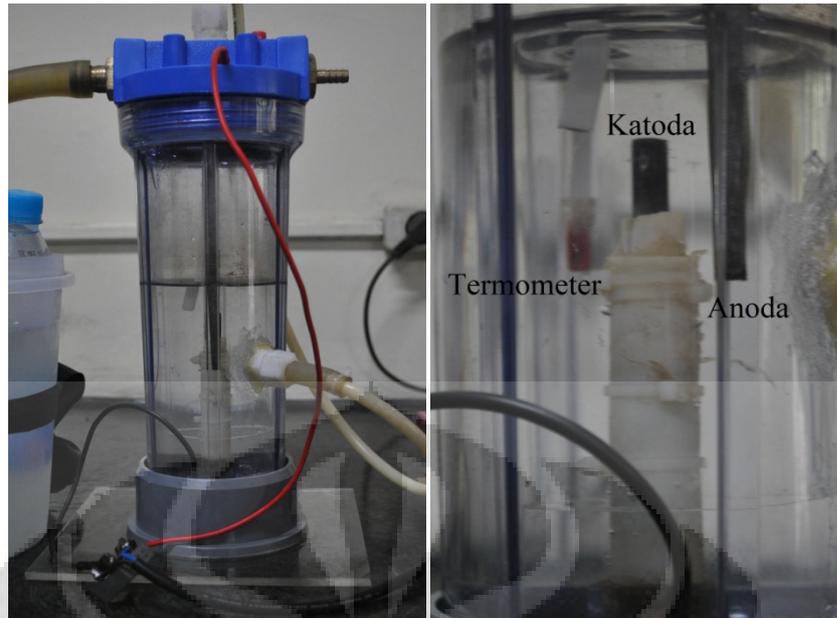
Pada pengandaan reaktor, reaktor dibuat menjadi dua buah sehingga komponen masing-masing reaktor dibuat menjadi dua buah dengan sirkulasi pendingin dibuat seri agar larutan dalam kedua reaktor menjadi homogen dan aliran listrik paralel. Komponen reaktor plasma elektrolisis terdiri atas komponen-komponen berikut:

- a. Housing filter dengan diameter 8 cm dan tinggi 25 cm. Reaktor dibuat dari tabung housing filter yang biasa digunakan pada proses filtrasi air dengan diameter 8 cm dan tinggi 25 cm, kapasitas larutan digunakan mencapai 1000 ml. Ada 2 buah lubang pada tutup housing digunakan sebagai sirkulasi gas hidrogen dan oksigen. Kemudian tutup housing dilubangi lagi sebanyak 3 lubang di bagian atas untuk lubang anoda, termometer, dan saluran sirkulasi larutan masuk.
- b. Akrilik silinder sebagai penangkap gas hidrogen dan pembatas ruang anoda dengan katoda dengan diameter 5 cm dan tinggi 20 cm. Di tempat ini hidrogen akan dihasilkan dan langsung terhubung dengan saluran keluar reaktor.
- c. Sepasang elektroda, anoda dan katoda. Untuk anoda digunakan elektroda stainless steel dengan panjang 18 cm dan diameter 0,5 cm. Housing filter dilubangi di bagian tepi berlawanan dengan lubang untuk termometer. Anoda stainless steel dibuat berdrat agar dapat diulir masuk ke lubang penutup housing filter, dengan drat logam muncul 0,5 cm pada

permukaan tutup housing. Di bagian ujung bawah anoda dilapisi dengan selubung jala stainless steel sepanjang 5 cm bertujuan untuk mengurangi korosi pada batang stainless steel.

- d. Elektroda katoda, katoda muncul dari bagian bawah reaktor. Tempat ini yang nantinya akan menghasilkan plasma di bagian ujung atas logam wolfram ini. Housing filter dilubangi tepat di bagian tengah reaktor. Dipilih wolfram karena punya ketahanan panas pada tegangan tinggi hingga tegangan lebih dari 1000 volt. Panjang katoda wolfram 13 cm dan diameter sama dengan anoda. Wolfram dibuat berdrat dengan logam muncul dibagian bawah 0,5 cm mirip seperti anoda untuk penghubung dengan rangkaian listrik, selain itu bagian yang kontak dengan cairan hanya 1 cm pada bagian atas, bagian bawah dilapisi dengan selang silikon.
- e. Termometer untuk mengukur suhu larutan. Lubang untuk termometer dibuat pada tutup housing filter berlawanan dengan lubang untuk anoda.
- f. Sirkulasi pendingin reaktor berupa kumparan tembaga yang berada di luar reaktor dengan diameter tembaga $\frac{1}{4}$ “, panjang 200 cm dan diameter kumparan 10 cm. Pada reaktor pertama larutan keluar tepat pada ketinggian ujung termometer, lubang keluaran pada reaktor pertama ini dibuat dengan jarak 8 cm dari dasar reaktor. Sistem sirkulasi menuju kumparan pada wadah pendingin setelah itu menuju pompa lalu masuk ke kepala reaktor tepat ditengah-tengah reaktor kedua menuju ruang katoda. Seperti pada reaktor pertama, reaktor kedua juga dilubangi dan aliran larutan menuju ke kepala reaktor pertama
- g. Pompa peristaltik diletakkan setelah sistem pendingin dengan tujuan mencegah kerusakan pada selang silikon apabila diletakkan tepat setelah keluar reaktor, karena aliran setelah reaktor pertama cukup panas.

Agar aliran larutan dapat tersalur dari reaktor kedua menuju reaktor pertama dimanfaatkan gaya gravitasi untuk mengalirkan aliran tersebut, sehingga otomatis reaktor kedua posisinya lebih tinggi dari reaktor pertama. Gambar 3.4 dan 3.5 berikut adalah gambar sistem dari bagian reaktor elektrolisis:



Gambar 3.4. Reaktor Plasma Elektrolisis: (a) Housing Filter Sebagai Reaktor dan Lubang Pada Reaktor; (b) Komponen Dalam Reaktor



Gambar 3.5. (a) Ruang Katoda Sebagai Pemerangkap Hidrogen; (b) Kumputan Tembaga Sebagai Media Kontak Larutan Panas dengan Cairan Pendingin

3.5.3 Sistem Pemurnian

Proses pemanasan yang muncul pada reaktor elektrolisis plasma menaikkan temperatur reaktor dan menyebabkan cairan yang ada di dalam reaktor mudah menguap, uap air yang terbentuk cukup tinggi sehingga menyulitkan untuk pengukuran laju alir karena aliran hampir didominasi oleh air, selain itu kandungan uap air yang tinggi akan merusak alat pengukur prosentase, hidrogen analyzer.

Oleh karena itu setelah proses elektrolisis, aliran memasuki rangkaian penghilang air yang terdiri dari *steam trapper*, kondenser, dan absorber.

- a. *Steam trapper* terbuat dari akrilik silinder dengan diameter 10 cm dan tinggi 20 cm, bagian tutup terbuat dari bahan PVC blok pipa paralon dengan diameter 10 cm. Tutup dibuat berdrat agar bisa dibuka dan ditutup untuk membuang uap yang terkondensasi. *Steam trapper* dibuat dua lubang dengan satu sisi masukan lubang pada tutup berasal dari keluaran reaktor. Lubang lainnya dibuat lebih kecil sebagai keluaran dari *steam trapper* menuju kondenser.
- b. Kondenser digunakan untuk mengembunkan uap air yang masih terbawa setelah *steam trapper*. Kondenser terbuat dari labu erlenmeyer dengan diameter 8 cm. Terdapat dua lubang, masukan yang berasal dari *steam trapper* dan keluaran menuju absorber.
- c. Absorber adalah proses pemurnian kandungan gas terakhir dari sistem pemurnian. Apabila masih ada uap air yang terikut setelah pengembunan maka absorber bekerja untuk menyerap (mengabsorb) uap air dengan menggunakan komponen utama *silica gel*. Tinggi absorber ini adalah 20 cm dengan diameter 5 cm.

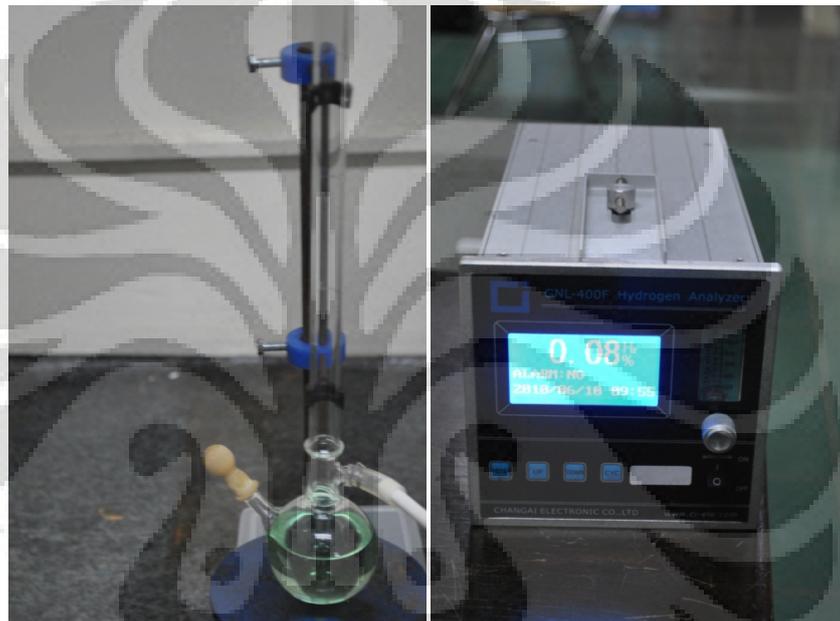
Sistem pemurnian pada elektrolisis plasma ditampilkan pada Gambar 3.6 dibawah ini.



Gambar 3.6. Sistem Pemurnian Aliran: (a) *Steam Trapper*; (b) Kondenser; (c) Absorber

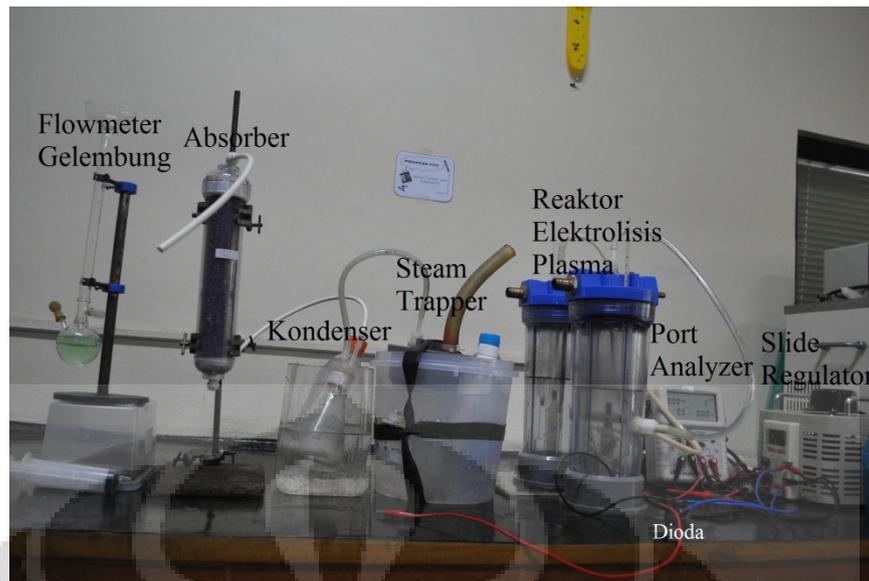
3.5.4 Pengukuran Produk Hidrogen

Perhitungan produk hidrogen meliputi laju alir dan konsentrasi. Laju alir pembentukan hidrogen diukur dengan flowmeter gelembung, sedangkan untuk prosentase diukur dengan hidrogen analyzer GNL-400F, perkalian keduanya akan mendapatkan laju alir hidrogen murni. Baik flowmeter gelembung ataupun hidrogen analyzer diukur secara terpisah, tidak bisa dirangkaikan secara seri. Perhitungan flowrate terlebih dahulu setelah itu perhitungan prosentase. Adapun peralatannya seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7 dibawah ini.



Gambar 3.7. Rangkaian Pengukur Hidrogen: (a) Flowmeter Gelembung; (b) Hidrogen Analyzer GNL-400F

Secara keseluruhan rangkaian sistem produksi hidrogen dari reaktor plasma pancaran pijar ditunjukkan pada gambar 3.8 di bawah ini.



Gambar 3.8. Sistem Rangkaian Elektrolisis Plasma Pijar Non-Termal Modular (Ganda)

3.6 Preparasi Bahan

Larutan elektrolit KOH:

- a. Membuat larutan KOH 2,5 M dengan melarutkan 70 gram KOH padatan kemudian dilarutkan dalam labu takar 500 mL dengan akuades.
- b. Membuat larutan KOH 0,05 M, 0,1 M, 0,15 M masing-masing bervolume 2000 mL dengan mengencerkan larutan KOH 2,5 M sebanyak 120 mL, 80 mL dan 40 mL dengan akuades. Larutan elektrolit tersebut bertujuan meningkatkan konduktivitas larutan. Sebelum dan sesudah elektrolisis sampel larutan diambil untuk mengetahui tingkat konduktivitas larutan. Konduktivitas larutan diukur dengan menggunakan konduktometer yang sudah dikalibrasi sebelumnya.

3.7 Uji Pendahuluan Sistem Rangkaian Elektrolisis Plasma

Sebelum pengambilan data dilakukan, rangkaian alat terlebih dahulu diujikan dengan memastikan bahwa seluruh komponen tidak mengalami *malfunction* dan rangkaian berada dalam keadaan siap bekerja. Untuk aliran listrik caranya yaitu dengan :

- a. Menguji aliran listrik dengan multimeter terlebih dahulu, untuk melihat jumlah kuat arus (ampere) yang terkandung dalam aliran listrik pada tegangan 150, 200, dan 300 V.

- b. Menguji dioda yang digunakan bahwa pemasangannya tepat dan kapasitas dioda cukup untuk digunakan pada percobaan dengan menggunakan multimeter.
- c. Memastikan tidak ada hubungan pendek pada rangkaian kabel yang digunakan dengan memisahkan kumpulan kabel yang berdekatan dan menutup sambungan dengan selotip kabel.
- d. Memastikan bahwa pemasangan elektroda tepat dengan anoda (kabel hitam) berada di bawah reaktor dan katoda (kabel merah) disambungkan di bagian atas reaktor.

Untuk pengujian kebocoran dan kesiapan *running* pada rangkaian reaktor dan setelahnya juga dilakukan uji pendahuluan.

- a. Pada reaktor dilakukan dengan pengecekan langsung pada sambungan-sambungan masuk dan keluar reaktor.
- b. Memastikan bahwa ruang katoda tidak longgar karena apabila longgar akan menyebabkan hidrogen yang terbentuk akan terkontak langsung dengan ruang katoda dan hidrogen akan bereaksi kembali membentuk air.
- c. Memeriksa kembali bahwa housing filter sudah menggunakan gelang karet penyekat saat ditutup.
- d. Cairan pendingin sudah diganti dan cairan benar-benar dingin dan siap untuk digunakan.
- e. Memastikan aliran larutan antara reaktor pertama telah tersirkulasi menuju reaktor kedua dan seterusnya.
- f. Memastikan keluaran reaktor pertama telah terhubung ke *steam trapper* begitu juga dengan reaktor kedua dan memastikan bahwa Y junction mempunyai ketinggian yang tetap terhadap reaktor dan *steam trapper*.
- g. Memastikan bahwa di dalam steam trapper benar-benar bersih dari cairan yang terkondensasi, karena apabila terdapat cairan akan mengganggu kinerja aliran hidrogen dari reaktor. Begitu juga dengan kondenser.
- h. Pada absorber dilakukan pengecekan warna, apabila warnanya sudah berubah menjadi lebih tua maka *silica gel* sudah jenuh dengan kandungan air.

- i. Memastikan bahwa flowmeter gelembung sudah terbasahi dinding kacanya agar gelembung yang terbentuk tidak pecah di perjalanan.
- j. Untuk hidrogen analyzer dan port analyzer perlu dilakukan *preheating*, hidrogen analyzer selama 360 detik dan port analyzer selama 30 detik setelah dinyalakan.
- k. Untuk seluruh rangkaian, uji kebocoran dilakukan dengan menyedot saluran setelah absorber dengan *syringe*, apabila level permukaan cairan pada ruang katoda naik maka rangkaian telah kedap dan siap untuk dijalankan.

3.8 Prosedur Penelitian

Untuk pengambilan data pada penelitian ada langkah-langkah yang harus dilakukan, di antaranya:

1. Melakukan uji pendahuluan terlebih dahulu.
2. Sampel larutan KOH 0,05 M diambil dan dipisahkan dari larutan uji coba.
3. Sedikit demi sedikit larutan KOH 0,05 M sebanyak 1800 mL dimasukkan ke dalam reaktor pertama.
4. Pompa dinyalakan dan diatur hingga larutan tersalurkan dari reaktor 1 menuju reaktor 2, dari reaktor 2 ketinggian diatur hingga larutan bisa secara gravitasi tersalur ke reaktor 1.
5. Regulator tegangan dinyalakan mencapai angka 150 V pada pembacaan port analyzer, pada saat yang bersamaan waktu hitung dimulai.
6. Mencatat temperatur dan waktu saat mulai muncul plasma.
7. Pada rentang temperatur 80-85 °C laju alir dan prosentase hidrogen diukur, diambil minimal 3 data.
8. Pada port analyzer pembacaan tegangan diganti menuju pembacaan WHr, data WHr diambil per satuan waktu pada rentang 80-85 °C.
9. Pada rentang temperatur 85-90 °C laju alir dan prosentase hidrogen diukur, diambil minimal 3 data.
10. Mengambil data WHr per satuan waktu pada rentang 80-85 °C.
11. Pada rentang temperatur 90-95 °C laju alir dan prosentase hidrogen diukur, diambil minimal 3 data.
12. Mengambil data WHr per satuan waktu pada rentang 90-95 °C.

13. Pada rentang temperatur 95-100 °C laju alir dan prosentase hidrogen diukur, diambil minimal 3 data.
14. Mengambil data WHr per satuan waktu pada rentang 95-100 °C.
15. Regulator tegangan diturunkan hingga tegangan 0 V, lalu dimatikan
16. Port analyzer, pompa, dan hidrogen analyzer dimatikan.
17. Sampel larutan KOH 0,05 M diambil dari reaktor.
18. Mengukur konduktivitas sampel larutan sebelum dan sesudah yang telah dipisahkan dengan konduktometer.

Prosedur yang sama juga dilakukan untuk larutan KOH 0,1 M dan 0,15 M dan variabel pada langkah ke-5 juga diubah sesuai variabel uji pada tegangan 200 V dan 300 V.

3.9 Hasil Uji Peralatan Sistem Produksi Hidrogen

Variabel proses yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi parameter temperatur (T), konsentrasi (prosentase) KOH (M), dan tegangan (V) terhadap kinerja proses elektrolisis plasma.

Variabel-variabel bebas dalam penelitian ini meliputi tegangan, temperatur dan konsentrasi KOH. Variabel terikatnya adalah jumlah mol hidrogen dalam bentuk perbandingan dengan produk hasil elektrolisis dengan hukum Faraday dan juga besarnya konsumsi energi listrik yang digunakan dalam proses.

Kinerja proses elektrolisis plasma meliputi:

- Konsumsi energi listrik : yaitu jumlah energi listrik (C) yang digunakan selama 30 detik produksi hidrogen dan dirumuskan sebagai berikut :

$$Q (C) = A (\text{ampere}) \times 30 (\text{detik}) \quad (3.1)$$

- Perbandingan jumlah mol produk H₂ proses elektrolisis plasma (H₂) terhadap jumlah produk H₂ teoritis berdasarkan rumus elektrolisis Faraday (H₂)_F yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$(H_2) / (H_2)_F = \frac{V_{gas} / 24}{Q / 2F} (\text{mol/mol}) \quad (3.2)$$

Gas berada dalam kondisi ruang sehingga digunakan V/24

Dimana Q = Coulomb (A.sec)

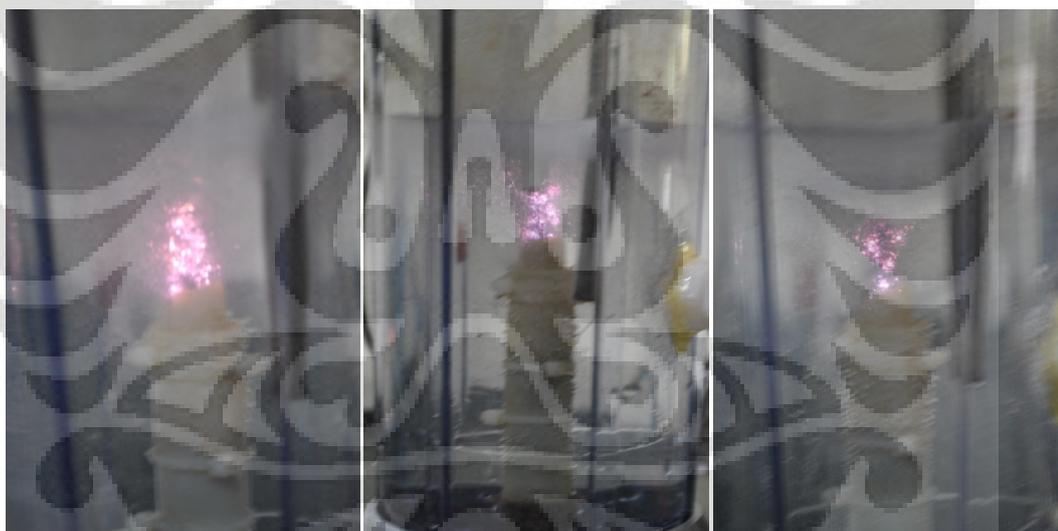
F = Konstanta Faraday (96500 C/mol)

BAB 4 PEMBAHASAN

Produksi hidrogen dengan menggunakan metode elektrolisis plasma non termal merupakan kombinasi dari elektrolisis Faraday dan proses pembentukan plasma pada tegangan tinggi. Pada pembahasan mengenai penelitian ini terdapat aspek yang dibahas, diantaranya adalah aspek kualitatif dan kuantitatif.

4.1 Aspek Kualitatif

Pada elektrolisis plasma, plasma terbentuk pada jarak terdekat elektroda. Pijaran plasma yang dihasilkan dominan berwarna ungu seperti pada Gambar 4.1. Mizuno (2003) menyebutkan bahwa warna plasma yang terbentuk adalah ungu dikarenakan adanya eksitasi elektron dari ion kalium. Warna ion kalium saat terbakar berwarna ungu. Warna ungu ini juga menandakan bahwa ketika terjadinya plasma terjadinya konsumsi (reaksi) kalium yang berasal KOH.



Gambar 4.1. Muat Rapat Plasma pada Molaritas Berbeda, Diukur pada Tegangan 200 V:
(a) 0,15 M; (b) 0,10 M; (c) 0,05 M.

Reaksi dari perubahan kalium dalam larutan seperti pada reaksi berikut:

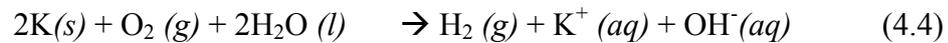
Pada katoda terbentuk ion OH^- yang segera terurai menjadi radikal $\text{OH}\cdot$ dan e^-



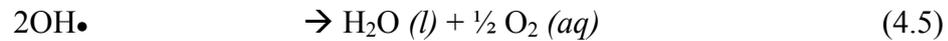
Elektron diserap oleh ion kalium membentuk logam kalium



Logam ataupun ion kalium menjadi medium pembentukan plasma. Terjadi pembakaran (reaksi) logam kalium yang menghasilkan warna ungu yang segera hasil reaksinya terlarut kembali membentuk ion kalium



Di akhir reaksi radikal hidroksil membentuk air dan oksigen



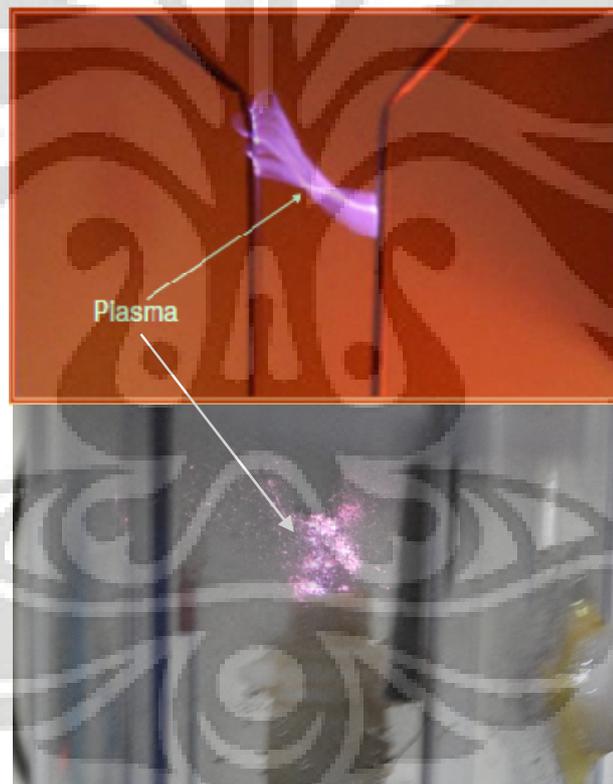
Sehingga dapat diberikan kesimpulan sementara bahwa kalium terkonsumsi mempengaruhi warna plasma yang terbentuk yang kemudian muncul lagi di akhir reaksi.

Warna pijaran plasma dipengaruhi oleh larutan elektrolit yang dipergunakan. Semakin besar tegangan yang diberikan akan semakin besar pijaran yang dihasilkan pada konsentrasi yang sama. Semakin tinggi molaritas larutan, konduktivitas juga semakin tinggi yang akan membuat pijaran plasma semakin besar pada tegangan yang sama. Pada Gambar 4.1 di atas uji dilakukan pada tegangan sama 200 V, variabel pembedanya adalah molaritas dari larutan tersebut. Pijaran plasma tersebut akan meningkat seiring bertambahnya konsentrasi KOH. Penggunaan larutan elektrolit KOH, dapat menyebarkan muatan listrik karena fungsinya sebagai zat elektrolit, sehingga proses pemecahan air menjadi radikal-radikal yang selanjutnya bereaksi lanjut menghasilkan hidrogen dan oksigen menjadi optimal. Selain itu juga Zong, et al (2009) menyebutkan bahwa KOH punya nilai $G(H_2)$ dan W_r paling kecil dibandingkan dengan senyawa elektrolit lain.

Pada umumnya plasma teraktifkan pada medium gas, ini dikarenakan plasma adalah bentuk keempat dari materi setelah padat, cair dan gas (Bismo, 2009). Untuk bisa berubah menjadi bentuk keempat materi ini, fase gas adalah fase termudah untuk membentuk plasma, tapi tidak menutup kemungkinan bahwa fase cair bisa menghasilkan plasma. Terlihat berdasarkan penglihatan seolah-olah plasma muncul secara langsung dari cairan. Berdasarkan informasi mengenai bentuk keempat materi tersebut diketahui bahwa plasma akan lebih mudah terbentuk apabila berasal dari fase gas yang terionisasi. Gas yang terbentuk pada reaktor elektrolisis plasma antara lain hidrogen, oksigen dan uap air.

Apabila plasma terbentuk pada fase gas, gas dengan seketika terionisasi, menyebabkan lintasan udara menjadi konduktif sehingga arus listrik mengalir. Sedangkan pembentukan plasma pada kondisi cair berbeda. Berdasarkan hasil analisis diperoleh apabila pada fase gas plasma terbentuk antar kedua kutub listrik

tersebut, pada fase cair plasma tidak berpindah dari kutub negatif menuju kutub positif, melainkan plasma berpindah dari kutub negatif ke perwakilan kutub positif yang dalam hal ini adalah ion-ion kation. Adanya pembatas berupa kaca kuarsa menghalangi plasma menerobos materi tersebut. Kutub-kutub hanya membuat beda potensial antarnya. Pada pembentukan plasma dalam cairan ini yang mentransfer elektron sesungguhnya adalah larutan. Elektron jenuh karena tegangan yang tinggi pada katoda ini melompat menuju ion positif pada ion hidrogen. Peristiwa melompatnya elektron dari katoda melompat menuju ion positif ini menyebabkan banyaknya terjadi loncatan bunga api pada larutan. Secara visual plasma tidak terkutub ke satu sisi saja seperti pada kondisi mediumnya adalah gas murni, melainkan plasma seperti buih acak sejalan dengan terbentuknya buih pada katoda. Gambar 4.2 menunjukkan fenomena perbedaan plasma pada medium gas dan cairan.



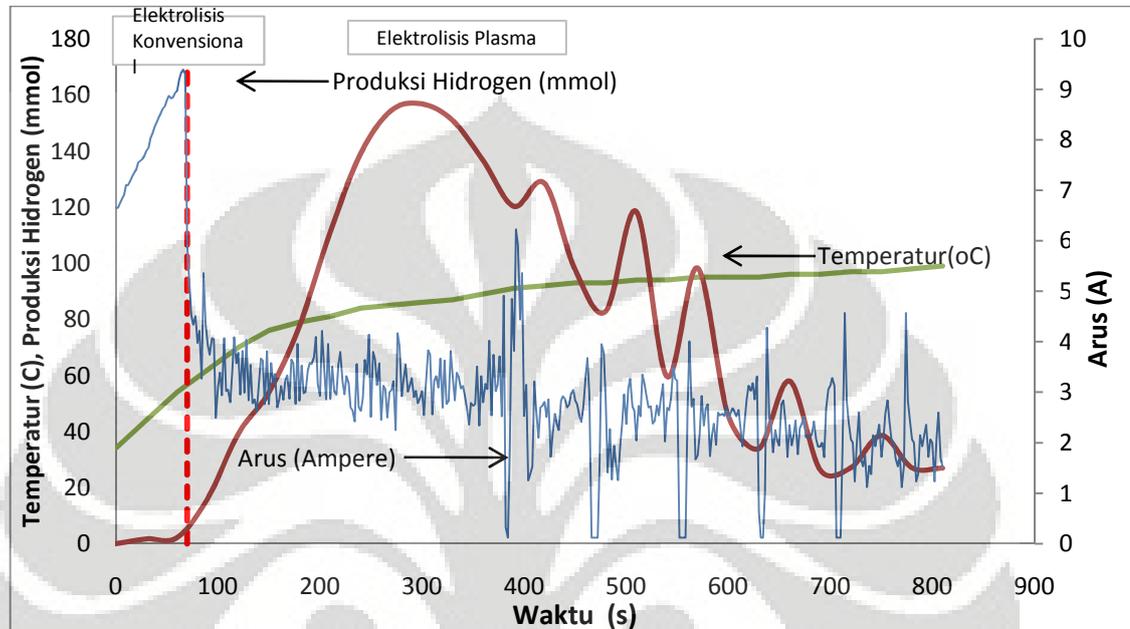
Gambar 4.2. Plasma Pada Medium Berbeda; (a) Gas, (b) Cair

4.2 Aspek Kuantitatif

Elektrolisis plasma melibatkan berbagai beberapa parameter, parameter tersebut dibedakan menjadi parameter langsung pada pengamatan dan parameter tak langsung berdasarkan perhitungan. Parameter langsung yang didapatkan dari pengamatan diantaranya tegangan (V), arus listrik (I), laju alir hidrogen (Q), waktu proses (t), konduktivitas (C) dan temperatur (T). Parameter tak langsung berdasarkan

pengolahan adalah nilai perbandingan elektrolisis Faraday dengan elektrolisis plasma ($G(H_2)$), konsumsi listrik (W_r), volume gas (V).

Grafik 4.3 di bawah ini menjelaskan bagaimana produksi hidrogen dengan menggunakan proses elektrolisis plasma terbentuk pada konsentrasi 0,1 M dan tegangan 200 Volt AC.



Gambar 4.3. Grafik Hubungan Parameter Arus Listrik, Produktifitas Hidrogen, dan Temperatur terhadap Waktu dalam Larutan KOH 0,1 M, Tegangan 100 Volt

Arus listrik fluktuatif saat mulai terbentuk plasma, pada temperatur 57°C dan detik 70 ke atas. 70 detik sebelum terjadinya plasma arus listrik cenderung mengalami kenaikan dari kuat arus 6,65 A hingga 9,3 A, ketika mulai terbentuk plasma arus listrik seketika drop menjadi 5,94 A. Hal ini disebabkan oleh aktifitas pembentukan plasma.

Arus listrik didefinisikan sebagai jumlah elektron yang dialirkan dalam suatu tahanan listrik. Elektrolisis Faraday membutuhkan arus listrik yang besar karena seluruh bagain cairan dari elektrolisis tersebut mengalirkan dan membutuhkan listrik untuk mengonversi menjadi zat kimia. Kuat arus yang digunakan oleh larutan menjadi meningkat ketika larutan diperbesar jumlahnya yang berefek pada meningkatnya nilai W (gr), sesuai dengan hukum pertama Faraday: "*Massa zat yang terbentuk pada masing-masing elektroda sebanding dengan arus listrik yang mengalir pada elektrolisis tersebut*", yang diformulasikan menjadi:

$$= \frac{\cdot}{\cdot} \quad (4.6)$$

W menggambarkan jumlah massa yang terkonversi. Apabila nilai resistansi (R) berbanding terbalik dengan molaritas, maka apabila molaritas diperbesar akan menyebabkan arus listrik yang mengalir semakin besar ($i = V/R$) dan nilai W semakin besar pula

Berdasarkan analisis ketika terjadinya plasma pada proses elektrolisis plasma, resistansi mengalami peningkatan yang signifikan ketika mulai terbentuknya plasma. Kesimpulan pertama diperoleh ketika terbentuk plasma dalam cairan terdapat empat jenis materi; padat, cair, gas, dan plasma. Elektron mengalami banyak lintasan perpindahan yang menyebabkan tahanan meningkat. Hal ini diperkuat ketika telah dilakukan elektrolisis plasma, sampel larutan diukur resistansinya dan mengalami peningkatan dibanding sebelum elektrolisis plasma. Peningkatan tahanan yang signifikan ketika terjadinya plasma akan mempengaruhi arus yang mengalir. Hubungan arus dengan resistansi seperti pada persamaan 4.7 dibawah ini.

$$V = i \cdot R \quad (4.7)$$

Sehingga dapat diketahui bahwa meningkatnya tahanan yang signifikan menyebabkan arus yang mengalir mengalami penurunan pula, apabila tegangan dijaga konstan.

Selain itu tahanan listrik total (R) pada larutan juga mengalami kenaikan linear dengan kenaikan temperatur. Resistansi berdasarkan persamaan 4.3 sebanding dengan selisih temperatur. Jumlah perubahan resistansi (tahanan listrik) dapat dihitung dengan *temperature coefficient of resistivity* (en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistance. Diakses pada tanggal 14 Juni 2010) pada persamaan 4.8 dibawah ini.

$$R = R_0 \cdot [\alpha(T-T_0)+1] \quad (4.8)$$

Dengan α adalah persentase perubahan resistivitas per unit temperatur. Berdasarkan persamaan 4.2 dan 4.3 dapat dibuat korelasi bahwa ketika temperatur mengalami kenaikan eksponensial tiap detiknya, resistansi akan mengikuti kurva temperatur sehingga juga mengalami kenaikan eksponensial. Hal ini yang menjelaskan mengapa kurva arus listrik saat pertama kali muncul plasma memiliki gradien menurun halus hingga 100 °C.

Konsumsi arus listrik mengalami penurunan ketika mencapai waktu 400 detik berjalan, hal ini ditandai dengan tidak stabilnya level cairan di dalam reaktor sehingga arus listrik mengalami drop seketika dan peristiwa ini terjadi 5 kali selama percobaan dengan waktu drop rata-rata 3 detik. Peristiwa dropnya level cairan dalam reaktor ini dikarenakan reaktor mencapai temperatur 90 °C dan pemanasan menjadi tidak teratur di dalam reaktor. Setelah mengalami drop, arus listrik sedikit mengalami kenaikan dan menjadi tidak stabil dibanding sebelumnya.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.3 terlihat pula produktifitas hidrogen keluaran reaktor meningkat secara signifikan pada rentang temperatur 85-90 °C dan terlihat menurun hingga mencapai temperatur 100 °C. Ketika plasma terbentuk pada temperatur 80-85 °C atau 85-90 °C kecenderungan gas yang terbentuk masih didominasi hidrogen, dan laju alir pun cukup stabil karena tidak terganggunya level cairan karena timbul gelembung banyak karena panas pendidihan. Hal itu tidak ditemukan pada rentang temperatur 90-95 °C sehingga produktifitas cenderung mengalami penurunan.

Pada percobaan ini aliran listrik dipecah menjadi 2 bagian setelah slide regulator. Pada kondisi tegangan 200 volt, watt tertinggi mencapai 1860 Watt dan ini kondisi terakhir pada elektrolisis Faraday yang setelah itu berubah seketika menjadi elektrolisis plasma setelah arus listrik mengalami penurunan.

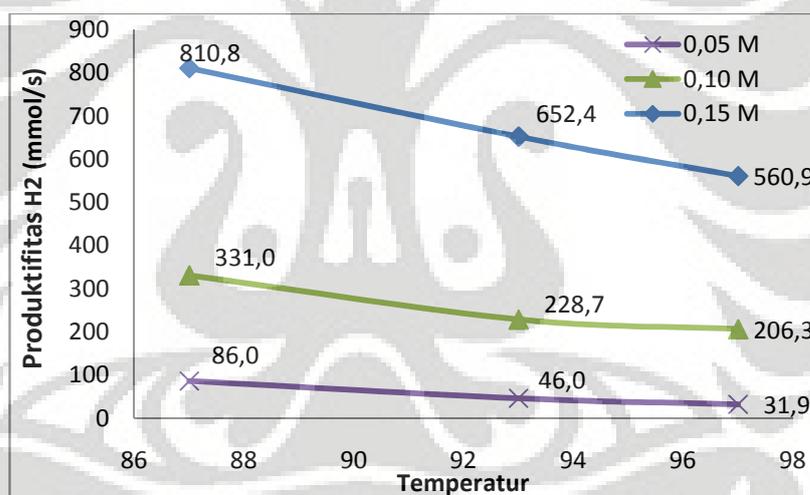
Pada elektrolisis plasma berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, perbandingan elektrolisis plasma dengan Faraday ($G(H_2)$) mencapai 41 kalinya (pada tegangan 300 V, molaritas 01 M, dan suhu 85-90 °C). Hal ini disebabkan oleh aktifitas radikal yang terbentuk karena proses pembentukan plasma pada elektrolisis ini. Aktifitas radikal ini berdasarkan literatur pada bab sebelumnya (halaman 16 dan 17) berasal dari plasma, pada proses 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.

Elektrolisis Faraday menyesuaikan dengan hukum Faraday seperti pada persamaan 4.1 sehingga pada waktu 150 s dan kuat arus 1,82 akan menghasilkan hidrogen sebanyak 0,028 liter. Tapi pada elektrolisis plasma secara signifikan dengan rentang waktu yang sama dan kuat arus yang sama pula dihasilkan jumlah

hidrogen sebanyak 1,29 liter, dengan perbandingan mol dihasilkan sebanding dengan 38 kalinya.

4.2.1 Pengaruh Temperatur Terhadap Produktifitas, $G(H_2)$, dan W_r

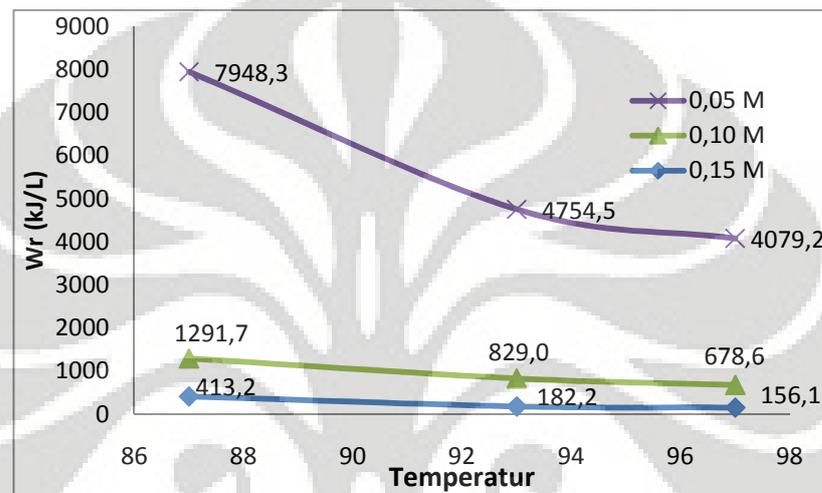
Jinzang, et al (2008) menyebutkan bahwa bertambahnya konsentrasi akan menyebabkan bertambahnya konduktivitas larutan yang menambah aktifitas pembentukan radikal. Gambar 4.4, 4.5, dan 4.6 menunjukkan perbandingan pengaruh konsentrasi larutan terhadap produktifitas dan $G(H_2)$. Berdasarkan pengamatan yang telah dilakukan, ketika dilakukan peningkatan molaritas maka akan turut mempengaruhi peningkatan produktifitas dan $G(H_2)$. Tapi dari banyak literatur, tidak ada yang menjelaskan pengaruh kenaikan temperatur terhadap proses dengan sangat detail. Kebanyakan para peneliti meneliti pada temperatur yang tetap, sehingga jarang yang menjelaskan pengaruh temperatur secara detail.



Gambar 4.4. Grafik Pengaruh Temperatur pada Produktifitas Hidrogen dalam Berbagai Konsentrasi pada Tegangan 200 V

Pada Gambar 4.4 di atas seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya molaritas membuat produktifitas hidrogen lebih besar. Produksi hidrogen pada tiap kenaikan temperatur hampir tidak mengalami perubahan yang signifikan seperti pengaruh tegangan. Adapun kecenderungan mengalami penurunan sedikit dikarenakan perubahan komposisi pada aliran gas. Pengukuran dilakukan pada rentang 85-90 °C, 90-95 °C, dan 95-100 °C. Pada kondisi 0,1 M 150 V dan 200 V dilakukan penelitian pada temperatur 80-85 °C. Pada tiga rentang temperatur tersebut kecenderungan produktifitas hidrogen menurun, hal ini disebabkan karena pengaruh kandungan gas

yang dihasilkan pada elektrolisis plasma ini. Mulai dari rentang 90-95 °C dan 95-100 °C, elektrolisis plasma terganggu dengan hadirnya uap air yang berlebih pada aliran gas keluaran. Uap air terikut pada aliran gas keluaran dan seketika mengembun ketika aliran memasuki *steam trapper* dan kondenser. Ketika uap air muncul level larutan pada reaktor mengalami gangguan karena gelembung dari uap air dan pada saat air mengalami kondensasi, volume menjadi turun seketika sehingga memaksa udara luar masuk melalui celah terbuka pada ujung aliran. Kondisi ganda ini yang menjadi alasan mengapa laju alir produksi sedikit mengalami penurunan.



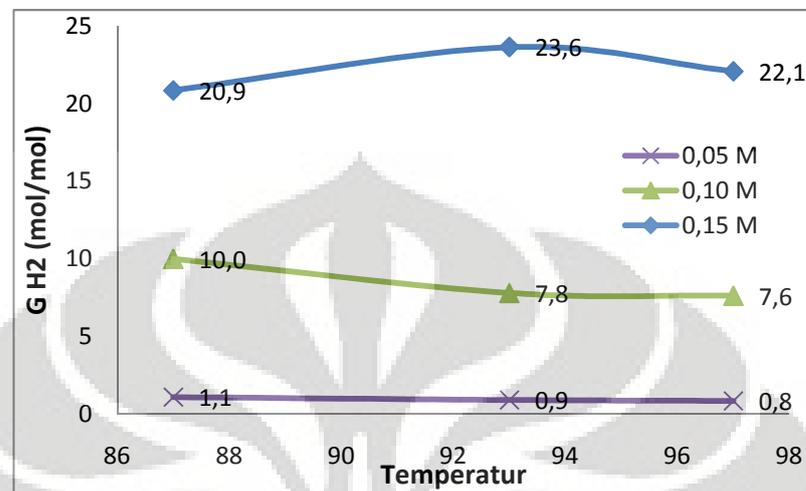
Gambar 4.5. Grafik Pengaruh Temperatur pada W_r dalam Berbagai Konsentrasi pada Tegangan 200 V

Konsumsi energi sedikit mengalami penurunan pada tiap kenaikan temperatur. Tapi pada molaritas 0,05 M penurunan energi mengalami penurunan yang cukup signifikan jika dibandingkan dengan molaritas lainnya, seperti yang terlihat pada Gambar 4.5 di atas. Penurunan energi ini terkait dengan penurunan konsumsi ampere pada larutan. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya tiap kenaikan eksponensial temperatur menyebabkan resistansi mengalami kenaikan eksponensial pula, yang hasilnya menyebabkan arus listrik mengalir mengalami penurunan eksponensial. Arus listrik mempengaruhi W_r dari proses, sehingga W_r berdasarkan temperatur mengalami penurunan perlahan.

Pada molaritas 0,05 M terlihat pada awal elektrolisis plasma pada rentang suhu awal membutuhkan energi besar. Ini tidak terlepas dari elektrolisis Faraday yang terjadi pada molaritas tersebut. Dengan tegangan 200 V dan molaritas 0,05 jika dibandingkan dengan molaritas lain terlihat diawal bahwa konsumsi energi besar,

karena pengaruh elektrolisis Faraday. Semakin naik temperatur, konsumsi energi turun karena tahanan menurun.

Pengaruh temperatur terhadap perbandingan $G(H_2)$ dapat dilihat pada gambar 4.6 di bawah ini.



Gambar 4.6. Grafik Pengaruh Temperatur pada $G(H_2)$ dalam Berbagai Konsentrasi pada Tegangan 200 V

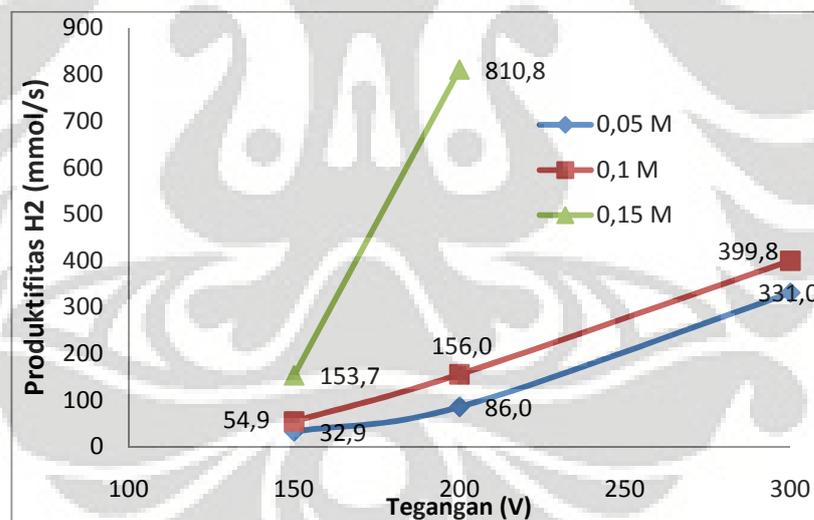
Pada gambar 4.6 di atas terlihat bahwa $G(H_2)$ tidak mengalami perubahan yang signifikan tiap kenaikan temperatur. Hubungan $G(H_2)$ adalah terkait dengan produktifitas hidrogen dari elektrolisis plasma dengan arus listrik yang dikonsumsi sebagai nilai jumlah Faraday pada kondisi tersebut. Terlihat pada grafik tersebut bahwa tidak ada efek yang signifikan dari kenaikan temperatur pada nilai $G(H_2)$ yang dihasilkan. Pada molaritas 0,15 $G(H_2)$ kenaikan temperatur hampir datar, pada konsentrasi 0,10 M mengalami penurunan sedikit, dan pada 0,05 terlihat $G(H_2)$ yang menanjak walaupun turun pada rentang temperatur terakhir. Pengaruh temperatur tidak terlalu signifikan terhadap nilai $G(H_2)$ ini, walaupun terlihat sedikit menurun gradiennya. Dikarenakan dua hal yang terjadi bersamaan ketika konsumsi energi mengalami penurunan sedikit, produksi hidrogen juga tidak mengalami kenaikan yang signifikan pada pengaruh temperatur ini. Berbeda pada pengaruh tegangan seperti terlihat pada Gambar 4.7, 4.8 dan 4.9. Sehingga terlihat pada gambar 4.6 di atas penurunan dari nilai $G(H_2)$ tidak terlalu signifikan terhadap kenaikan temperatur.

Daya hantar listrik atau diekspresikan sebagai konduktivitas larutan sebanding dengan molaritas larutan. Semakin tinggi konduktivitas larutan tersebut daya hantar semakin besar yang berarti mempermudah transfer arus pada larutan.

Molaritas KOH mempengaruhi kinerja proses sehingga membuat peningkatan nilai pada beberapa perbandingan variabel yang diperoleh pada elektrolisis plasma ini. Molaritas KOH membuat kerapatan elektron pada larutan menjadi lebih besar sehingga aktifitas plasma menjadi lebih besar dan secara langsung mempengaruhi peningkatan produktifitas hidrogen yang dihasilkan dan juga mempengaruhi nilai $G(H_2)$.

4.2.2 Pengaruh Tegangan Terhadap Produktifitas, $G(H_2)$, dan W_r

Tegangan listrik yang digunakan mempengaruhi densitas dari plasma yang dihasilkan. Tegangan listrik didefinisikan sebagai beda potensial antar kedua kutub-kutub listrik, semakin jauh jarak beda potensial ini, akan menyebabkan muatan dikedua ujung anoda dan katoda semakin penuh dengan elektron, tegangan merepresentasikan nilai kuatnya elektron saat melintas pada arus listrik. Kuatnya elektron ini mempengaruhi pembentukan plasma, sehingga plasma yang dihasilkan dalam elektrolisis plasma ini juga dipengaruhi erat dari tegangan yang diberikan ke aliran. Gambar 4.7 menunjukkan pengaruh tegangan terhadap produktifitas hidrogen yang diperoleh.



Gambar 4.7. Grafik Pengaruh Tegangan Terhadap Produktifitas Hidrogen, pada temperatur 85-90 °C

Semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan untuk menghasilkan plasma, konsentrasi radikal $OH\bullet$ maupun $H\bullet$ yang terbentuk semakin tinggi pula. Hal ini diakibatkan karena dengan perbedaan tegangan yang tinggi, energi untuk mengeksitasi elektron untuk menghasilkan radikal juga semakin tinggi, akibatnya semakin tinggi tegangan listrik yang dipakai, pembentukan radikalnya pun juga semakin besar (GAO Jinzang, et al., 2008). Radikal yang dihasilkan dalam proses

elektrolisis plasma ini berasal dari kuatnya tegangan antar kedua kutub sehingga memaksa elektron untuk melompat dari kutub negatif ke kutub (ion larutan) positif.

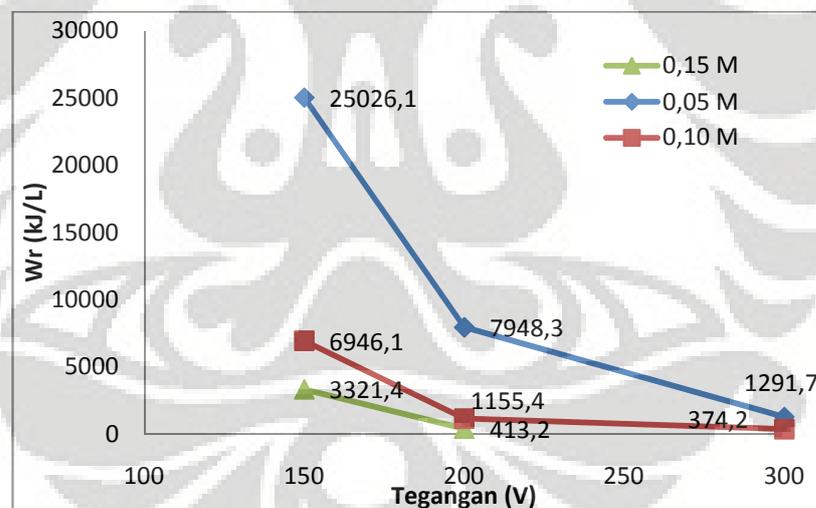
Kondisi plasma yang menghadapi hanya zat tertentu dalam cairan, dalam hal ini adalah ion OH^- , H^+ , K^+ , H_2O , membuat plasma tidak punya cara lain selain memaksa elektron tertransfer ke semua ion tersebut, yang mengakibatkan terbentuknya radikal kuat, diantaranya adalah radikal hidroksil ($\text{OH}\bullet$) dan radikal hidrogen ($\text{H}\bullet$). Seperti pada persamaan 4.4.



Reaksi radikal adalah reaksi bebas yang dapat menyerang senyawa apapun. Efek dari terbentuknya radikal hidroksil ini membentuk senyawa hidrogen tanpa bantuan elektron dari arus listrik yang ditransfer. Dalam hal ini senyawa radikal hidrogen yang terbentuk saling menyerang, seperti pada persamaan 4.5 dibawah ini.

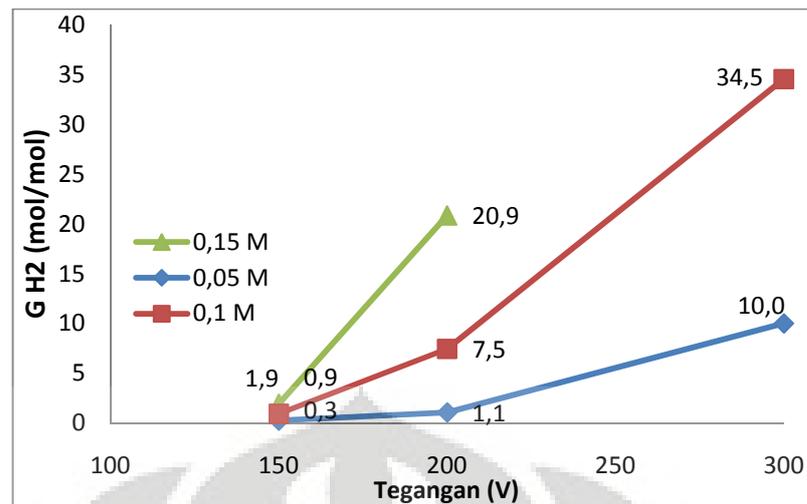


Sedikitnya elektron yang ditransfer menyebabkan arus listrik yang mengalir menjadi sedikit sehingga W_r yang dikonsumsi semakin kecil sejalan dengan peningkatan tegangan, seperti pada gambar 4.8 dibawah ini.



Gambar 4.8. Pengaruh Tegangan Terhadap Konsumsi Energi Per Liter Hidrogen, pada Rentang Temperatur 85-90 °C

Namun sebaliknya yang terjadi pada kuantitas hidrogen yang dihasilkan. Plasma membuat senyawa radikal menjadi banyak dan melimpah pada saat yang bersamaan hidrogen terus dihasilkan setiap plasma muncul senyawa radikal juga bereaksi membentuk hidrogen, begitu seterusnya sehingga peluang terbentuknya hidrogen menjadi semakin besar. Seperti pada percobaan yang telah dilakukan yang disajikan pada gambar 4.9.



Gambar 4.9. Pengaruh Tegangan Terhadap Nilai $G(H_2)$, pada Rentang Temperatur 85-90 °C

Sehingga secara sederhana dapat dijelaskan bahwa pengaruh tegangan memainkan peranan penting dalam proses pembentukan hidrogen pada elektrolisis plasma. Tegangan mempengaruhi penurunan arus listrik yang dibutuhkan yang menyebabkan menurunkan konsumsi energi listrik yang digunakan. Pada kondisi itu pula tegangan menyebabkan beda potensial yang jauh sehingga menyebabkan loncatan plasma semakin kuat yang berakibat pada rapatnya densitas plasma yang dihasilkan. Muat rapat plasma yang tinggi menyebabkan reaksi radikal pembentuk hidrogen menjadi semakin banyak pada kondisi arus listrik yang menurun. Molaritas dalam persepsi tegangan diibaratkan sebagai rapat atau renggangnya ion saat elektron tereksitasi melompat dari kutub negatif katoda, menuju ion-ion dalam larutan. Semakin rapat ion tersebut dan semakin besar beda potensial yang diberikan ke larutan, peluang elektron tereksitasi, melompat, dan membentuk senyawa radikal yang akhirnya meningkatkan pembentukan hidrogen akan semakin besar.

4.3 Perbandingan Reaktor Tunggal Dengan Reaktor Ganda

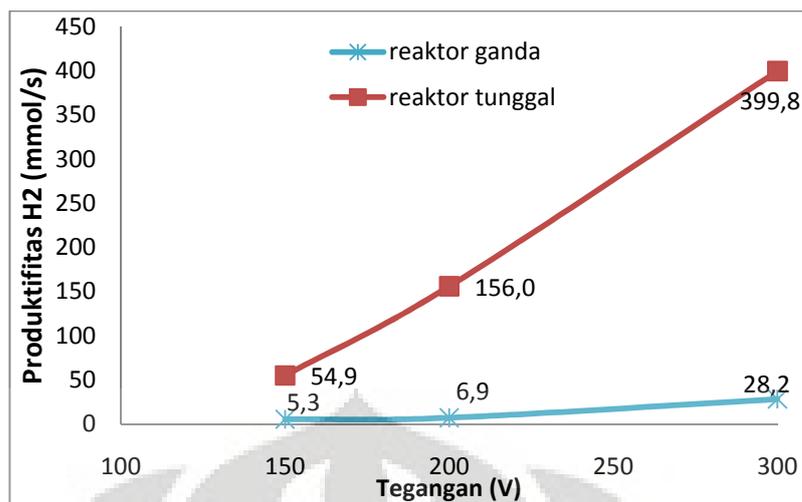
Reaktor tunggal adalah bentuk dasar yang menjadi prototype dari reaktor elektrolisis pada penelitian ini. Sedangkan reaktor ganda adalah bentuk duplikasi dari reaktor tersebut. Penelitian telah dilakukan dan dilakukan perbandingan dari kedua model reaktor tersebut. Hasil penelitian yang dibandingkan adalah produktifitas, konsumsi energi dan $G(H_2)$ berdasarkan kenaikan tegangan yang diujikan.

Produktifitas hidrogen mengalami peningkatan tiap kenaikan tegangan yang diberikan, seperti pada pembahasan yang telah disampaikan sebelumnya. Pada reaktor tunggal seperti pada Gambar 4.10 produktifitas hidrogen mengalami

peningkatan yang signifikan pada tegangan 300 volt, hal itu juga ditegaskan dengan meningkatnya produktifitas pada reaktor ganda.

Perbandingan nilai produktifitas pada reaktor tunggal dan ganda berbeda-beda di setiap nilai tegangan yang diberikan. Perbedaan ini disebabkan dari efek elektrolisis yang berlangsung. Perbandingan produktifitas pada tegangan 150 V adalah 10 kalinya, pada tegangan 200 V mencapai 22 kalinya dan pada tegangan 300 V adalah 14 kalinya. Rata-rata perbandingan produktifitas pada reaktor tunggal dengan ganda adalah 15 kalinya. Walaupun reaktor ganda hanya merupakan duplikasi dari reaktor tunggal, yang secara logika ketika ditambah reaktor jumlah mol yang diperoleh hanyalah dua kalinya. Tapi berdasarkan data pengamatan yang diperoleh kelipatan molnya bisa mencapai 15 kalinya, hal ini tidak terlepas dari berbagai parameter yang mengalami peningkatan. Parameter yang dimaksud adalah laju alir, prosentase, dan tegangan yang diberikan pada larutan, serta aspek teknis lainnya yang berkaitan dengan desain reaktor ganda.

Laju alir yang meningkat menyebabkan kondisi aliran gas yang dihasilkan menjadi stabil, sehingga mempengaruhi level cairan dalam ruang katoda. Selain itu proses aliran gas balik yang tersedot masuk karena proses kondensasi pun menjadi berkurang aktifitasnya. Semakin cepat aliran gas yang keluar, akan menyebabkan aliran gas yang terkondensasi menjadi lebih stabil karena tidak terlalu fluktuatif, level cairan pun bisa berbagi tekanan ke reaktor lainnya ketika terjadinya kenaikan level yang tinggi secara tiba-tiba atau penurunan. Ini sangat berbeda sekali apabila dibandingkan dengan reaktor tunggal dimana aliran dari ruang katoda hanya ada satu dan langsung tertuju ke *steam trapper*, berbeda dengan reaktor ganda yang bercabang dua dimana semua cabang aliran gas dan tekanan dalam reaktor menjadi terkoneksi. Koneksi yang dimaksud bisa dilihat pada gambar 4.11.



Gambar 4.10. Pengaruh Tegangan Terhadap Konsumsi Energi, pada Molaritas 0,1 M



Gambar 4.11. Skema Koneksi Penghubung Gas Setelah Reaktor
(Tanda Panah Menunjukkan Perpindahan)

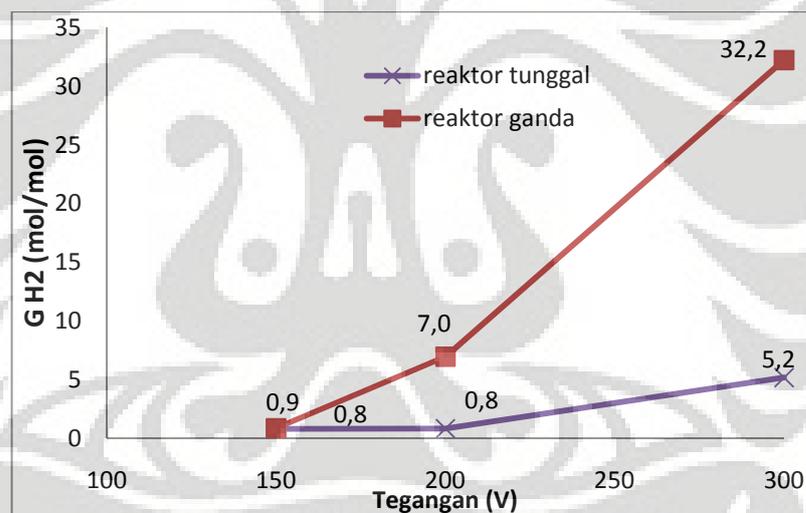
Pada koneksi tersebut, sesuai dengan konsep aliran gas bahwa mengalir dari tekanan tinggi ke tekanan rendah, apabila pada reaktor 1 tekanan gas tiba-tiba tinggi aliran dapat distabilkan dengan membagi tekanan ke dua jalur koneksi yang lain, begitu juga pada reaktor 2. Sehingga suplai aliran gas yang masuk ke *steam trapper* menjadi lebih stabil dibanding pada reaktor tunggal.

Aliran gas balik yang masuk kembali ketika flowmeter dilepaskan saat akan diuji komposisi juga dapat diantisipasi dengan tetap mengalirkan gas keluar absorber. Ini juga berbeda signifikan pada reaktor tunggal, dimana pada reaktor tunggal apabila terjadi kondensasi di *steam trapper* dan kondenser terjadi pengurangan volume yang tiba-tiba dari uap air yang terembunkan, fenomena itulah yang menyebabkan aliran udara luar tersedot masuk pada ujung aliran sistem yang

terbuka. Sehingga menyebabkan tidak stabilnya aliran dan komposisi gas yang tiba-tiba menurun seketika. Hal ini yang tidak dialami oleh reaktor ganda, dimana aliran gas yang turun tiba-tiba bisa diantisipasi dari terus berproduksinya reaktor yang lain sehingga fluktuatifnya aliran dan komposisi menjadi berkurang. Boleh dikatakan semakin kuat aliran gas, akan menyebabkan prosentase hidrogen juga semakin besar sehingga jumlah mol yang dihasilkan tiap detiknya pun menjadi besar. Berkebalikan dengan itu semua, semakin rendah aliran dan komposisi hidrogen jumlah mol yang dihasilkan semakin menurun.

Penjelasan diatas dapat menjelaskan mengapa grafik reaktor ganda pada gambar 4.10 memberikan perbandingan hingga mencapai rata-rata 15 kalinya dibanding reaktor ganda pada pengukuran molaritas, temperatur dan tegangan yang sama.

Nilai perbandingan antara reaktor tunggal dengan reaktor ganda pada nilai $G(H_2)$ yang dihasilkan pun berbeda. Grafik perbedaan antara reaktor tunggal dan ganda berdasarkan nilai $G(H_2)$ ditampilkan pada Gambar 4.12 dibawah ini.



Gambar 4.12. Pengaruh Tegangan Terhadap G Hidrogen, pada Molaritas 0,1 M

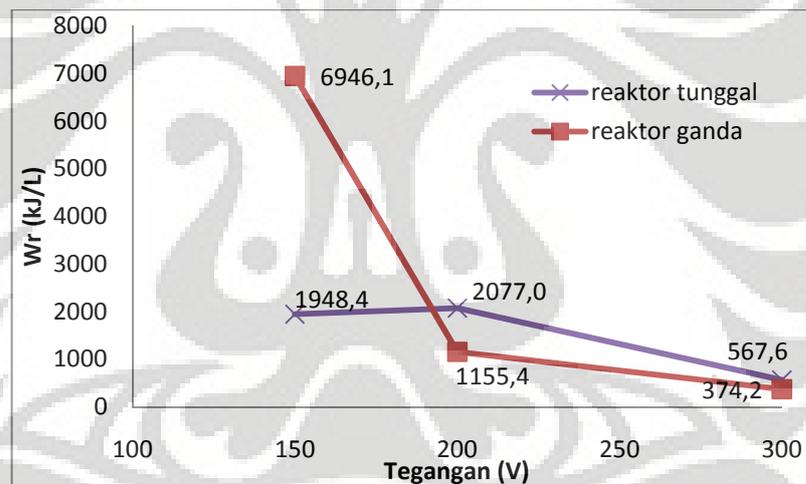
Pada gambar 4.12 di atas terlihat bahwa $G(H_2)$ meningkat secara signifikan pada tegangan 300 volt. Pada reaktor tunggal peningkatan pada tegangan 200 menjadi 300 volt menyebabkan peningkatan $G(H_2)$ menjadi 6 kalinya begitu juga pada reaktor ganda peningkatan signifikan terjadi pada tegangan 200 menjadi 300 volt, pada reaktor ganda perbandingan nilai $G(H_2)$ mencapai 5 kalinya. Sedangkan perbandingan pada reaktor tunggal dengan ganda pada nilai $G(H_2)$ ini mengalami perbedaan signifikan pada tegangan 300 volt yang mencapai 6 kalinya, pada tegangan 200 volt perbandingan reaktor ganda dengan tunggal adalah 9 kalinya, dan hampir tidak ada perbedaan pada tegangan 150 volt.

Hampir tidak adanya perbedaan pada tegangan 150 volt ini disebabkan karena pada tegangan 150 volt ini plasma belum terlihat secara signifikan. Aktifitas plasma tidak stabil, ditandai dengan turun naik arus listrik yang cukup fluktuatif. Ketika arus listrik mengalami peningkatan pada saat yang bersamaan plasma menghilang dan dalam larutan yang terjadi adalah proses elektrolisis Faraday. Elektrolisis Faraday turun naik seiring dengan elektrolisis plasma sehingga nilai $G(H_2)$ tidak bisa mencapai angka 1. Perbandingan antara reaktor tunggal dan ganda juga tidak ada perbedaan dikarenakan pada reaktor ganda kedua reaktor mengalami ketidakstabilan arus listrik yang dikonsumsi kedua reaktor. Seperti yang dijelaskan sebelumnya, semakin cepat laju alir akan menyebabkan mol hidrogen yang diproduksi semakin cepat berkebalikan apabila laju alir lambat. Hubungan laju alir dan nilai $G(H_2)$ cukup erat, dimana nilai $G(H_2)$ mencakup mol yang diproduksi dan arus listrik yang dikonsumsi. Arus listrik yang besar pada tegangan 150 V menyebabkan nilai perbandingan $G(H_2)$ reaktor ganda dengan tunggal menjadi kecil.

Pada tegangan 200 V dan 300 V perbandingan $G(H_2)$ pada reaktor ganda dengan tunggal mencapai nilai 6 kalinya dan 5 kalinya. Hal ini dikarenakan sudah stabilnya plasma yang muncul ditandai dengan menurunnya arus listrik pada ampere yang rendah. Ketika arus listrik stabil, plasma pun menjadi terstabilkan dan produktifitas hidrogen meningkat. Seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.8 dan 4.9 semakin meningkatnya hidrogen akan menyebabkan konsumsi hidrogen menurun, hal itu yang menyebabkan nilai $G(H_2)$ melonjak signifikan. Reaktor ganda terbukti menstabilkan laju alir gas yang muncul, level permukaan reaktor dan kuat arus listrik yang digunakan.

Perbandingan konsumsi energi yang digunakan pada reaktor tunggal dan ganda secara umum mengalami penurunan pada kenaikan tegangan yang diberikan. Ditunjukkan pada Gambar 4.13 dibawah ini bahwa konsumsi energi mengalami penurunan, kecuali pada reaktor tunggal yang meningkat sedikit saat tegangan 150 V menjadi 200 V dari 1948,4 kJ/L menjadi 2077,0 kJ/L setelah itu mengalami penurunan pada tegangan 300 V menjadi 567 kJ/L. Terlihat pada grafik tersebut perbedaan yang cukup mencolok dimana kecenderungan dari reaktor ganda adalah mengalami penurunan, terutama pada kondisi 150 V menuju 200 V. Penurunan yang signifikan pada kondisi 200 V ini terkait erat dengan analisis sebelumnya, dimana pada kondisi 150 V arus yang digunakan besar untuk menghasilkan hidrogen, arus yang besar disebabkan pula oleh tidak stabilnya aktifitas plasma pada tegangan 150.

Arus berbanding lurus dengan energi yang dikonsumsi, sehingga arus besar membutuhkan energi besar sementara nilai $G(H_2)$ pada tegangan 150 V tidak dapat melampaui besarnya elektrolisis Faraday dengan nilai $G(H_2)$ dibawah 1. Oleh karena itu konsumsi energi menjadi sangatlah besar diawal. Ketika mencapai tegangan 200 V kondisi plasma, larutan dan laju alir hidrogen menjadi lebih stabil dan nilai $G(H_2)$ dapat melampaui nilai 1. Dengan laju alir yang meningkat besar dan nilai $G(H_2)$ yang juga meningkat berkebalikan dengan nilai arus listrik yang semakin menurun menyebabkan konsumsi energi tiap liter hidrogen mengalami penurunan yang signifikan dari 6946,1 kJ/L menjadi 1155,4 kJ/L bahkan nilai ini berada dibawah elektrolisis plasma pada reaktor tunggal yang nilai W_r -nya adalah 2077,0 kJ/L. Penurunan konsumsi energi tidak memperlihatkan gradien yang signifikan pada tegangan 300 V karena pada saat itu plasma sudah mulai terbentuk dan aliran sudah mulai stabil, tapi tetap pada grafik 300 V ini kedua reaktor tunggal dan ganda menunjukkan nilai penurunan.



Gambar 4.13. Pengaruh Tegangan Terhadap Konsumsi Energi, pada Molaritas 0,1 M

Menurunnya nilai W_r secara signifikan pada tegangan setelah 150 V di reaktor ganda, bahkan angkanya melewati nilai W_r pada reaktor tunggal membuktikan bahwa energi yang dikonsumsi pada tegangan dan plasma yang sudah stabil lebih menunjukkan hasil yang signifikan pada reaktor ganda. Reaktor ganda seperti yang sudah dijelaskan di awal mempunyai nilai mol yang besar dan $G(H_2)$ yang besar pula sementara energi yang dibutuhkan semakin rendah. Secara logika reaktor yang diperbanyak jumlahnya akan menyebabkan konsumsi energi meningkat pula. Hasil penelitian berkata lain bahwa energi yang dibutuhkan justru mengalami penurunan, sekali lagi hal ini tidak terlepas dari analisis sebelumnya dimana semakin

cepat laju alir akan memperbesar nilai produktifitas (mol) dan perbandingan ($G(H_2)$) dari hidrogen yang dihasilkan.

Pada Gambar 4.12 reaktor ganda perbandingan kenaikan nilai $G(H_2)$ menjadi 8 kalinya, sedangkan pada reaktor tunggal hampir tidak ada kenaikan nilai $G(H_2)$ yang signifikan. Seperti yang ditunjukkan pada persamaan 3.2 pada bab sebelumnya, bahwa nilai $G(H_2)$ terkait dengan kuat arus listrik. Semakin tinggi $G(H_2)$ maka nilai arus yang digunakan menjadi kecil atau volume gas yang dihasilkan besar. Arus listrik inilah yang menjadi penjelasan pada Gambar 4.13 dimana nilai W_r pada reaktor ganda sedikit dibawah W_r pada reaktor tunggal, dikarenakan efektivitas reaktor berupa laju alir yang stabil, tidak adanya udara yang masuk kembali (*back pressure*) sehingga tidak tersedotnya udara luar, dan juga arus listrik yang menurun yang menyebabkan nilai G besar dan W_r menjadi kecil.

Secara keseluruhan jika coba dibandingkan dengan hasil penelitian yang telah dipublikasikan oleh Zong (2009) seperti pada Gambar 2.1 diperoleh nilai adalah 125 mol/mol. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini pada tegangan yang sama, 300 V, mencapai angka $G(H_2)$ 32,23 mol/mol nilai $G(H_2)$ pada penelitian ini apabila dibandingkan dengan penelitian tersebut hanya mencapai 25% dari hasil yang diteliti oleh Zong. Hal ini tidak lepas dari aspek teknis yang terkait dengan penelitian.

BAB 5

KESIMPULAN

Pada bab 5 ini dijelaskan mengenai kesimpulan yang didapat dari keseluruhan penelitian dan saran untuk penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

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

1. Rancang bangun yang dibuat mampu menghasilkan suatu prototype sistem produksi hidrogen melalui elektrolisis plasma non-termal dengan pengandaan reaktor.
2. Pijaran plasma meningkat dengan bertambahnya molaritas KOH dan tegangan yang diberikan ke larutan.
3. Peningkatan tegangan meningkatkan produktifitas hidrogen dan $G(H_2)$ serta menurunkan konsumsi energi (W_r).
4. Pengandaan reaktor menghasilkan laju alir gas yang terbentuk semakin cepat yang menyebabkan level cairan pada ruang katoda dan aliran gas terkondensasi menjadi lebih stabil dan tidak fluktuatif.
5. Pada reaktor ganda semakin kuat aliran gas menyebabkan laju alir gas menjadi stabil sehingga jumlah mol yang dihasilkan lebih besar, $G(H_2)$ meningkat dan konsumsi energi (W_r) tidak berbeda signifikan dengan reaktor tunggal.

5.2 Saran

Setelah dilakukan penelitian dan pembahasan terdapat saran untuk mengembangkan teknologi ini lebih lanjut.

1. Diameter reaktor diperbesar agar level cairan dalam reaktor lebih stabil.
2. Sistem pendinginan pada reaktor ganda tidak cukup untuk menahan proses pada temperatur tertentu, baik apabila digunakan pendinginan untuk dapat menahan agar temperatur stabil.
3. Baik apabila digunakan pembatas arus pada rangkaian pembangkit plasma, hal ini untuk mengamankan peralatan yang kapasitas arusnya rendah juga untuk menekan konsumsi energi.

4. Perlu dilakukan analisis komposisi pada aliran gas secara keseluruhan untuk mengetahui senyawa apa saja yang terbentuk pada proses elektrolisis plasma.
5. Pada rangkaian analisis, baik apabila semua peralatan terhubung online dengan menempatkan flowmeter digital sebelum hidrogen analyzer.



DAFTAR REFERENSI

- Barros, Sam.** (3 Maret 2008). Power Labs Plasma Globes Page. <http://www.powerlabs.org/plasmaglobe.htm>. Diakses 8 Mei 2010.
- Chaffin, John H.**, Stephen M. Bobbio, Hillary, Inyang, Life Kaanagara (2006). Hydrogen Production by Plasma Electrolysis. ASCE: 0733-9402
- Chung, D.Y.**, Y. Aoki., F. Senftle., T. Mizuno. (2005). Experimental Study of Glow Discharge in Light Water With W Electrodes, Department of Physics, Howard University, Washington, D.C.
- GAO Jinzhang**, et al., (2008). Analysis of Energetic Species Caused by Contact Glow Discharge Electrolysis in Aqueous Solution. Plasma Science and Technology, Vol.10, No.1.
- Gunawan, Budi.** (26 Mei 2010). Indonesia sudah menjadi net importer minyak bumi. <http://www.pacificlink.com/kolompakar/indonesia-sudah-menjadi-net-importer-minyakbumi.htm>. diakses tanggal 6 Juni 2010).
- Gomez, E., D.** Amutha Rani., C.R. Cheeseman., D. Deegan., M. Wise., A.R. Boccaccini. (2009). "Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review", Journal of Hazardous Materials 161. 614–626.
- Holladay, J.D.**, J. Hu, D.L. King, Y. Wang. (2009). "An Overview of Hydrogen Production Technologies", Catalysis Today 139 (2009) 244–260.
- Huang, H.**, dan L. Tang. (2007). Treatment Of Organic Waste Using Thermal Plasma Pyrolysis Technology. Energy Conversion and Management, 48, 1331-1337.
- Istadi.** (2006). "Aplikasi Teknologi Hibrid Katalis-Plasma dalam Pengembangan Reaktor Masa Depan", Chemical Reaction engineering & Catalysis, (CREC) Teknik Kimia Universitas Diponegoro. Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis.
- Kabashima H**, Einaga H, Futamura S. (2003). Hydrogen Generation from Water, Methane, and Methanol with Nonthermal Plasma. IEEE Transactions on Industry Applications; 39(2):340–5.
- Kanarev, Ph.M.**, Tadahiko Mizuno (2003). Cold Fusion by Plasma Electrolysis of Water. Journal of New Energy: 151-156.
- Kogelschatz, U.** (2004). Atmospheric-Pressure Plasma Technology, Plasma Phys. Controlled Fusion 46 B63–B75.

- Kreuter W, Hofmann H** (1998). Electrolysis: The Important Energy Transformer in a World of Sustainable Energy. *Int J Hydrogen Energy* 23:661–666
- LeRoy, RL.,** Bowen CT, LeRoy DJ (1980). The Thermodynamics of Aqueous Water Electrolysis. *J Electrochem Soc* 127:1954–1962
- Liu XZ,** Liu CJ, Baldur E. (2003). Hydrogen Production from Methanol Using Corona Discharges. *Chinese Chemical Letters*, 14(6):631–3.
- Lund, Henning.,** Ole Hammerich. (1991). *Organic Electrochemistry*. New York: Marcel Dekker.
- Mizuno, T.,** T. Akimoto, and T. Ohmori. (2003). “Confirmation of Anomalous Hydrogen Generation By Plasma Electrolysis”, in 4th Meeting of Japan CF Research Society. Iwate, Japan: Iwate University.
- Moustakas.,** C.R. Cheeseman. (2005). Demonstration Plasma Gasification-Vitrification System For Effective Hazardous Waste Treatment. *Journal of Hazardous Materials*, B 123, 120-126.
- Roth, J.R.** (2001). “Applications to Nonthermal Plasma Processing”, *Industrial Plasma Engineering* vol :2, IOP Publsh Philadelphia.
- Susanta, K S G.,** Rajeshwar S, Ashok K S. (2008). A Study on the Origin of Non-faradaic Behavior of Anodic Contact Glow Discharge Electrolysis. [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 1998, 145(7): 2209-2213.
- Steinberg, M.** (2004). A Highly Efficient ombined Cycle Fossil and Biomass Fuel Power Generation and Hydrogen Production Plant with Zero CO₂ Emission, *American Society of Mechanical Engineers, Fuel Cell Science, Engineering and Technology*, pp. 401–408.
- William, Geoffrey Arnold.** Wikipedia.com. Electrical Resistance. http://www.en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistance. Diakses pada tanggal 14 Juni 2010.
- Yan Zong-cheng.,** Chen Li., Wang Hong-lin. (2006). Experimental Study of Plasma Under-liquid Electrolysis in Hydrogen Generation. *The Chinese Journal of Process Engineering*, vol 6 No.3.
- Zong Cheng Yan.,** Li, C., Wang Hong Lin W H. (2009). “Hydrogen Generation by Glow Discharge Plasma Electrolysis of Methanol Solutions. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol 34 pp : 48 – 55.

LAMPIRAN

Pembuatan Larutan KOH 2,5 M

Berat KOH yang ditimbang = 70,0124 gram

Berat molekul KOH = 56 gr/mol

Volume larutan = 0,5 L

$$\text{Molaritas larutan} = \frac{\frac{70,0124 \text{ gram}}{56 \text{ gr/mol}}}{0,500 \text{ L}} = 2,500 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

Larutan KOH 0,08 M

Pembuatan larutan KOH 0,08 M

Dengan rumus pengenceran:

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

$$(V_1)(2,500 \text{ mol/L}) = (2000 \text{ mL})(0,05 \text{ mol/L})$$

$$V_1 = 40 \text{ mL}$$

Jadi besarnya volume larutan KOH 1,0 M yang harus diambil adalah 40 mL.

Contoh Perhitungan laju alir larutan KOH 0,05 M, 300 V

(t) waktu selama 15 ml = 0,813 detik

$$Q = \frac{V_{\text{gas}}}{\text{Waktu}}$$

$$Q = \frac{15 \text{ mL}}{0,813 \text{ detik}}$$

$$Q = 18,705 \text{ mL/detik}$$

Contoh Perhitungan G(H₂)

$$G(H_2) = \frac{V_{\text{gas}} / 24}{Q / 2F} = \frac{V_{\text{gas}} F}{12Q}$$

$$G(H_2) = \frac{(0,4765) \text{ L} \cdot (96500) \text{ C/mol}}{(12) \text{ mol/L} \cdot (6,84) \text{ ampere} \cdot (60) \text{ detik}}$$

$$G(H_2) = 9,37 \text{ mol.mol}^{-1}$$

Contoh Perhitungan W_r 300 V, 0,05 M

VQ adalah nilai WHr diperoleh,

$$WHr = 171 \text{ J}$$

$$W_r = \frac{VQ}{V_{gas}}$$

$$W_r = \frac{171 \text{ J}}{(0,4756) \text{ L}}$$

$$W_r = 0,3588 \text{ kJ/L}$$

$$W_r \text{ 1 jam} = 0,3588 \times 3600 = 1291,68 \text{ kJ/L}$$

Contoh Perhitungan Konduktivitas Larutan KOH 0,08 M

$$\text{Larutan KOH 0,08 M} = \frac{1584}{1413} \times 9,49 = 10,64 \text{ mS/cm}$$

Larutan KOH 0,10 M

Pembuatan larutan KOH 0,10 M

Dengan rumus pengenceran:

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

$$(V_1)(2,500 \text{ mol/L}) = (2000 \text{ mL})(0,1 \text{ mol/L})$$

$$V_1 = 80 \text{ mL}$$

Contoh Perhitungan laju alir larutan KOH 0,10 M, 300 V

(t) waktu selama 15 ml = 0,747 detik

$$Q = \frac{V_{gas}}{\text{Waktu}}$$

$$Q = \frac{15 \text{ mL}}{0,7467 \text{ detik}}$$

$$Q = 20,08 \text{ mL/detik}$$

Contoh Perhitungan $G(H_2)$ ($T = 45^\circ \text{C}$)

$$G(H_2) = \frac{V_{gas} / 24}{Q / 2F} = \frac{V_{gas} F}{12Q}$$

$$G(H_2) = \frac{(0,575) \text{ L} \cdot (96500) \text{ C/mol}}{(12) \text{ mol/L} \cdot (2,39) \text{ ampere} \cdot (60) \text{ detik}}$$

$$G(H_2) = 32,23 \text{ mol.mol}^{-1}$$

Contoh Perhitungan W_r 0,10 M, 300 V

VQ adalah nilai WHr diperoleh,

$$WHr = 59,83 \text{ J}$$

$$W_r = \frac{VQ}{V_{gas}}$$

$$W_r = \frac{59,83 \text{ J}}{0,575 \text{ L}}$$

$$W_r = 0,103 \text{ kJ / L}$$

$$W_r \text{ 1 jam} = 0,103 \times 3600 = 370,8 \text{ kJ/L}$$

Contoh Perhitungan Konduktivitas Larutan KOH 0,10 M

$$\text{Larutan 0,10 M} = \frac{1584}{1413} \times 15,2 = 17,04 \text{ mS/cm}$$

Larutan KOH 0,15 M

Pembuatan larutan 0,15 M

Dengan rumus pengenceran:

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

$$(V_1)(2,500 \text{ mol/L}) = (2000 \text{ mL})(0,15 \text{ mol/L})$$

$$V_1 = 120 \text{ mL}$$

Contoh Perhitungan Laju Alir Larutan 0,15 M, 200 V,

(t) waktu selama 15 ml = 0,267 detik

$$Q = \frac{V_{gas}}{\text{Waktu}}$$

$$Q = \frac{15 \text{ mL}}{0,267 \text{ detik}}$$

$$Q = 57,87 \text{ mL / detik}$$

Contoh Perhitungan $G(H_2)$ ($T = 45^\circ C$)

$$G(H_2) = \frac{V_{gas} / 24}{Q / 2F} = \frac{V_{gas} F}{12Q}$$

$$G(H_2) = \frac{(1,167)L \cdot (96500)C / mol}{(12)L / mol \cdot (8,04)ampere \cdot (80) detik}$$

$$G(H_2) = 19,462 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Contoh Perhitungan W_r

VQ adalah nilai WHr diperoleh,

$$WHr = 134 \text{ J}$$

$$W_r = \frac{VQ}{V_{gas}}$$

$$W_r = \frac{134J}{1,167 L}$$

$$W_r = 0,115 \text{ kJ} / L$$

$$Wr \text{ 1 jam} = 0,115 \times 3600 = 414 \text{ kJ/L}$$

Perhitungan Konduktivitas Larutan

$$\text{Larutan } 0,15 \text{ M} = \frac{1584}{1413} \times 27,48 = 30,10 \text{ mS/cm}$$