



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH TEGANGAN LISTRIK DAN KONSENTRASI TERHADAP
EFEKTIVITAS ELEKTROLISIS PLASMA PADA LARUTAN
ELEKTROLIT KOH - METANOL**

SKRIPSI

**IRYANDI ANGRIYAWAN
0706269874**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH TEGANGAN LISTRIK DAN KONSENTRASI TERHADAP
EFEKTIVITAS ELEKTROLISIS PLASMA PADA LARUTAN
ELEKTROLIT KOH - METANOL**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**IRYANDI ANGRIYAWAN
0706269874**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Iryandi Angriyawan

NPM : 0706269874

Tanda Tangan : 

Tanggal : 24 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Iryandi Angriyawan

NPM : 0706269874


Program Studi : Teknik Kimia

Judul Skripsi : Pengaruh Tegangan listrik Dan Konsentrasi Terhadap Efektifitas Elektrolisis Plasma Pada Larutan Elktrolit KOH - Metanol

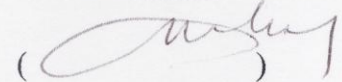
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Nelson Saksono, MT



Penguji : Ir. Yuliusman, M.Eng



Penguji : Ir. Eva Fathul Karamah, MT



Penguji : Prof. Dr. Ir. Slamet, MT



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 24 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan seminar dengan judul Pengaruh Tegangan listrik Dan Konsentrasi Terhadap Efektifitas Elektrolisis Plasma Pada Larutan Elektrolit KOH – Metanol dilakukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Bapak DR. Ir. Nelson Saksono, M.T., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
- (2) Bapak Prof. DR. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA., selaku kepala Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
- (3) Ibu DR. Ir. Dewi Tristantini, MT. selaku pembimbing akademis.
- (4) Bapak dan adik-adik tercinta yang telah memberikan doa, kasih sayang dan motivasi yang tak ternilai harganya kepada saya.
- (5) Tiwi, Mr. Ijal, Kang Jajat, Mas Eko, Mas Taufik, serta para karyawan DTK yang telah banyak membantu penelitian dari awal hingga akhir.
- (6) Mardiansyah selaku tim peneliti, Wilda, Hariri, Fitri, Alfi, Adit dan teman – teman Teknik Kimia 2007, atas bantuan, motivasi, dan semangatnya pada waktu penyusunan dan menyelesaikan skripsi ini.

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

Akhirnya semoga makalah skripsi ini dapat bermanfaat dan memberikan arti bagi semua pihak pada umumnya dan bagi saya sendiri pada khususnya.

Depok, 24 Juni 2011

Penulis

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

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

Nama : Iryandi Angriyawan
NPM : 0706269874
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

Pengaruh Tegangan listrik Dan Konsentrasi Terhadap Efektifitas Elektrolisis Plasma Pada Larutan Elektrolit KOH - Metanol

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 24 Juni 2011

Yang menyatakan



(Iryandi Angriyawan)

ABSTRAK

Nama : Iryandi Angriyawan
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Pengaruh Tegangan listrik Dan Konsentrasi Terhadap Efektifitas
Elektrolisis Plasma Pada Larutan Elktrolit KOH - Metanol

Gas hidrogen dapat diperoleh dari proses elektrolisis tetapi memerlukan energi listrik yang besar. Elektrolisis plasma adalah teknologi baru dalam meningkatkan produksi hidrogen sekaligus menekan kebutuhan listrik. Penelitian ini dilakukan untuk menguji pengaruh tegangan listrik operasi dan konsentrasi KOH dan metanol sebagai aditif dalam meningkatkan efektivitas proses elektrolisis plasma yang dinyatakan sebagai jumlah produk hidrogen per satuan energi listrik yang dikonsumsi, efektivitas proses ini dibandingkan dengan efektivitas elektrolisis Faraday dan elektrolisis plasma tanpa penambahan aditif. Hasil percobaan menunjukkan kenaikan konsentrasi KOH dan tegangan listrik menyebabkan kenaikan jumlah produk hidrogen. Proses elektrolisis plasma pada penelitian ini dapat meningkatkan efektivitas proses hingga 27 kali lipat lebih tinggi dibandingkan dengan elektrolisis Faraday .

Kata Kunci :

Elektrolisis Plasma Non- Termal, Produksi Hidrogen, KOH, Penambahan Aditif Metanol, Tegangan listrik Tinggi.

ABSTRACT

Name : Iryandi Angriyawan
Major : Teknik Kimia
Title : The Effect of Voltage and Concentration on The Effectiveness of KOH-
Methanol Solution Plasma Electrolysis

Hydrogen is commonly produced by electrolysis which consumes a great deal of energy. Plasma electrolysis is a new technology that can increase hydrogen productivity while lowering electrical energy needs. This research aimed to test the effect of voltage and KOH concentration and methanol as additive on increase the effectiveness of the plasma electrolysis process which is expressed as the number of products of hydrogen per unit of electrical energy consumed, the effectiveness of this process compared with the effectiveness of electrolysis Faraday. Results showed an increase of KOH concentration and the voltage causes an increase in the hydrogen product. Plasma electrolysis process in this research can improve the effectiveness of processes to 27 fold higher compared to Faraday electrolysis.

Keyword :

Non - Thermal Plasma Electrolysis, Hydrogen Production, KOH, Addition Methanol Additive, High Voltage.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Hidrogen.....	6
2.2 Produksi Hidrogen.....	7
2.2.1 Pemisahan Hidrogen dari Hidrokarbon.....	7
2.2.2 Elektrolisis.....	8
2.3 Kegunaan Hidrogen.....	12
2.4 Plasma.....	13
2.5 Jenis Plasma.....	14
2.5 Spesi Aktif Plasma Non-termal.....	16
2.6.1 Foton.....	16
2.6.2 Spesi Netral.....	17
2.7 Plasma Elektrolisis.....	18
2.7.1 Elektrolisi Plasma.....	21
2.7.2 Penggunaan Larutan Metanol Sebagai Zat Aditif Pada Elektrolisis Plasma.....	22
2.7.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Plasma Pijaran Elektrolisis.....	24

BAB III METODE PENELITIAN.....	29
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	29
3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian.....	30
3.3 Rancang Bangun Peralatan Sistem Produksi Hidrogen.....	30
3.3.1 Rangkaian Pembangkit Plasma.....	30
3.3.2 Peralatan Reaktor Plasma Elektrolisis.....	31
3.3.3 Peralatan Pemisahan dan Pemurnian.....	32
3.3.4 Peralatan Pengambilan Data.....	33
3.4 Preparasi Bahan.....	35
3.5 Uji Pendahuluan Peralatan Sistem Produksi Hidrogen.....	36
3.6 Prosedur Penelitian.....	36
3.6.1 Pengukuran Konduktivitas listrik Larutan.....	37
3.7 Prosedur Pengambilan Data Percobaan.....	37
3.7.1 Preparasi GC.....	38
3.8 Hasil Uji Peralatan Sistem Produksi Hidrogen.....	40
BAB IV PEMBAHASAN.....	41
4.1 Fenomena Pembentukan Plasma.....	41
4.2 Pengaruh Variabel-Variabel Operasi.....	46
4.2.1 Pengaruh Tegangan listrik Terhadap Produksi Hidrogen, Wr, dan G(H ₂).....	47
4.2.2 Pengaruh Konsentrasi Larutan KOH Terhadap Produksi Hidrogen, Wr, dan G(H ₂).....	49
4.2.3 Perbandingan Kinerja Elektrolisis Plasma Yang Menggunakan Larutan KOH Dengan elektrolisis Plasma Dengan Penambahan Aditif.....	50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	53
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran.....	53
DAFTAR REFERENSI.....	54
LAMPIRAN.....	56

DAFTAR TABEL

		Halaman
Tabel 2.1	Persamaan Reaksi dan Tahap Proses <i>Steam Reforming</i>	8
Tabel 2.2	Beberapa warna plasma yang timbul akibat adanya aliran gas tertentu	14
Tabel 2.3	Klasifikasi Plasma	15
Tabel 2.4	Energi-energi foton dalam spektrum elektromagnetik.....	16
Tabel 2.5	Komposisi gas hasil elektrolisis plasma dari larutan metanol	23
Tabel 4.1	Pengaruh tegangan listrik terhadap waktu pembentukan plasma.....	44
Tabel 4.2	Data konduktifitas larutan sebelum dan setelah proses elektrolisis plasma.....	50
Tabel 4.3	Data perbandingan kinerja antara elektrolisis plasma tanpa penambahan aditif dengan penambahan aditif pada KOH 0,05M dengan tegangan listrik 350 V.....	51

DAFTAR GAMBAR

		Halaman
Gambar 2.1	Kondisi Operasi Proses Elektrolisis.....	11
Gambar 2.2	Skema alat elektrolisis plasma.....	18
Gambar 2.3	Hubungan Parameter Arus Listrik, Produksi Hidrogen, dan Temperatur terhadap Waktu dalam Larutan KOH 0,1 M, Tegangan listrik 100 Volt	19
Gambar 2.4	Pengaruh tegangan listrik terhadap rasio H ₂ dan O ₂	20
Gambar 2.5	Pengaruh tegangan listrik pada G(H ₂). Konduktivitas listrik : 11,55 mS/cm, Suhu : 64 °C. Konsentrasi metanol : 99,5 %.....	22
Gambar 2.6	Pengaruh tegangan listrik pada konsumsi energi konduktivitas listrik: 11,55 mS/cm, suhu : 64 °C, konsentrasi metanol : 99,5 %.....	22
Gambar 2.7	Efek tegangan listrik terhadap pembentukan radikal •OH pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal •OH.....	23
Gambar 2.8	Efek tegangan listrik terhadap pembentukan radikal •H pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal •H.....	24
Gambar 2.9	Karakteristik umum kurva arus-tegangan listrik pada elektrolisis plasma.....	24
Gambar 2.10	Efek konduktivitas listrik larutan terhadap pembentukan radikal •OH pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal •OH.....	25
Gambar 2.11	Efek konduktivitas listrik larutan terhadap pembentukan radikal •H pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal •H.....	25
Gambar 2.12	Efek pH larutan terhadap pembentukan radikal •OH pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal •OH.....	26
Gambar 2.13	Efek pH larutan terhadap pembentukan radikal •H pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal •H.....	27
Gambar 2.14	Efek konsentrasi metanol pada G(H ₂) dan Wr.	

	Temperatur $337,18 \pm 0,5$ K, konduktivitas $11,55 \text{ mS cm}^{-1}$, perbedaan tegangan listrik 700 V, elektrolit NaOH.....	27
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian.....	30
Gambar 3. 2	Skema pemasangan dioda pada dioda bridge.....	32
Gambar 3. 3	Reaktor plasma elektrolisis	33
Gambar 3. 4	Sistem pemisahan dan pemurnian a). Kondenser ; b.) Absorber.....	34
Gambar 3. 5	Peralatan pengambilan data a). <i>Bubble soap flowmeter</i> dan <i>Hydrogen Analyzer</i> ; b). Slide Regulator dan <i>Power</i> <i>Analyzer</i>	35
Gambar 3. 6	Skema sistem produksi hidrogen dengan elektrolisis plasma.....	36
Gambar 4. 1	Warna plasma larutan KOH	43
Gambar 4. 2	Warna plasma dengan penambahan aditif	43
Gambar 4. 3	Sebelum proses elektrolisis	43
Gambar 4. 4	Proses elektrolisis berlangsung	43
Gambar 4. 5	Awal proses elektrolisis plasma	44
Gambar 4. 6	Proses elektrolisis plasma stabil	44
Gambar 4.7	Profil Arus-Tegangan listrik pada Elektrolisis Plasma...	46
Gambar 4. 8	Grafik Rasio Produktivitas Hidrogen, Produksi Hidrogen, dan W_r dalam Konsentrasi KOH 0,05 M + 5% metanol Sebagai Fungsi Tegangan listrik.....	50
Gambar 4. 9	Grafik Rasio Produktivitas Hidrogen, Produksi Hidrogen, dan W_r dalam Tegangan listrik 350 V Sebagai Fungsi Konsentrasi larutan KOH	51

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Data Penelitian Elektrolisis Plasma	56
Lampiran 2 Data Profil Tegangan listrik-Arus.....	58
Lampiran 3 Contoh Perhitungan Dari Data	60



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi menjadi komponen penting bagi kelangsungan hidup manusia karena hampir semua aktivitas kehidupan manusia sangat tergantung pada ketersediaan energi yang cukup. Dewasa ini dan beberapa tahun ke depan, manusia masih akan tergantung pada bahan bakar fosil karena bahan bakar fosil inilah yang mampu memenuhi kebutuhan energi manusia dalam skala besar. Sedangkan sumber energi alternatif atau terbarukan belum dapat memenuhi kebutuhan energi manusia dalam skala besar karena fluktuasi potensi dan tingkat keekonomian yang belum bisa bersaing dengan energi konvensional.

Menipisnya cadangan minyak dunia, naiknya suhu atmosfer dan terjadinya perubahan iklim yang ekstrim pada 100 tahun terakhir mendorong usaha mencari sumber energi terbarukan yang bersih dan ramah lingkungan. Penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi tak terbarukan utama saat ini telah menimbulkan masalah pencemaran dan peningkatan emisi CO₂ di atmosfer. Hidrogen merupakan salah satu alternatif energi pengganti bahan bakar fosil yang menjanjikan. Saat ini beberapa negara maju khususnya Amerika Serikat gencar melakukan pengembangan infrastruktur untuk penyediaan hidrogen sebagai bahan bakar *fuel cells* pada kendaraan bermotor (U.S. Department of Energy, 2007).

Salah satu bentuk energi alternatif sebagai pengganti bahan bakar fosil adalah hidrogen. Hidrogen menjadi perhatian serius para pengembang energi terbarukan di negara-negara maju selain karena lebih bersih dan ramah lingkungan karena pada penggunaannya hanya akan menghasilkan sisa berupa uap air serta memiliki kandungan energi per satuan massa sangat besar dibandingkan dengan bahan bakar lainnya (Kato, 2004).

Konversi bahan bakar fosil (metana, propana, butana, *gasoline*, *kerosine*) 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).

Pembentukan hidrogen dari air melalui proses elektrolisis sudah dikomersialisasikan sejak tahun 1890 dimana air dipecah menjadi O_2 dan H_2 menggunakan arus listrik. *Electrolizer* komersial saat ini mampu mencapai efisiensi sistem hingga 73 % dengan konsumsi energi sebesar 70,1–53,4 kWh/kg H_2 pada 1 atm dan 25 °C (Turner, et al, 2008). 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. Sementara jika listrik yang dibutuhkan untuk proses elektrolisis diambil dari pembakaran bahan bakar fosil, maka emisi yang dihasilkan menjadi lebih besar dibanding proses konvensional. Oleh sebab itu penggunaan energi terbarukan untuk menghasilkan listrik bagi proses elektrolisis harus diambil dari sumber energi terbarukan seperti energi matahari, angin, air, dsb.

Teknologi elektrolisis plasma adalah mirip dengan proses elektrolisis, namun dilakukan pada tegangan listrik yang cukup 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 dan mampu meningkatkan pembentukan hidrogen hingga 8 kali lipat dibanding proses elektrolisis biasa (Mizuno, et al, 2003). Penambahan metanol dalam air juga dapat meningkatkan produktivitas hidrogen pada reaksi elektrolisis plasma (Zong, et al, 2009).

Penguasaan teknologi produksi hidrogen yang ramah lingkungan dari sumber bahan alam terbarukan merupakan hal yang sangat penting mengingat kebutuhan energi yang bersumber dari hidrogen pada 20 tahun kedepan akan sangat besar. Teknologi plasma merupakan salah satu alternatif yang sangat menjanjikan disebabkan kemampuannya dalam mengkonversi bahan alam seperti

metanol menjadi hidrogen dengan tingkat produktivitas yang tinggi dan konsumsi energi yang rendah.

1.2 Perumusan Masalah

Hidrogen kedepannya akan sangat dibutuhkan sebagai energi alternatif dan proses industri. Berdasarkan latar belakang, yang menjadi permasalahan utama adalah bagaimana membuat reaktor elektrolisis plasma dengan produksi hidrogen yang dihasilkan pada kondisi optimum. Untuk memperoleh kondisi optimum tersebut maka reaktor dilengkapi sistem pendinginan kontinu. Pengaruh variabel proses seperti beda potensial tegangan listrik, konsentrasi KOH dan metanol akan menjadi kunci sukses untuk mendapatkan kondisi optimum operasi.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang dilakukan adalah:

1. Menguji kinerja dan efektifitas penyempurnaan reaktor elektrolisis plasma dalam memproduksi hidrogen.
2. Mendapatkan pengaruh variabel proses tegangan listrik, konsentrasi metanol, dan KOH terhadap kinerja dan produktivitas reaktor elektrolisis plasma.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini akan memberikan kontribusi signifikan bagi pengembangan teknologi produksi hidrogen berbasis teknologi plasma dari bahan baku terbarukan (air dan metanol) yang diharapkan memiliki *yield* dan produktivitas hidrogen yang tinggi, serta konsumsi energi yang jauh lebih rendah dibanding proses elektrolisis konvensional.

1.5 Batasan Masalah

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

1. Variabel bebas yang divariasikan meliputi tegangan listrik yang dialirkan ke sistem elektrolisis, konsentrasi metanol, dan larutan kalium hidroksida (KOH).
2. Plasma yang digunakan dalam penelitian ini adalah plasma jenis *glow discharge* atau plasma pancaran pijar.
3. Penelitian ini menggunakan penambahan aditif metanol.
4. Pengukuran persentase hidrogen yang dihasilkan dilakukan dengan hidrogen *analyzer* GNL-400F, pengukuran tegangan listrik, arus, konsumsi energi dilakukan dengan Lutron DW-6091 S/N: I 91844 dan pengukuran konsentrasi CO dan CO₂ dengan GC.

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, kegunaan hidrogen, plasma, jenis plasma, spesi aktif plasma, plasma elektrolisis, penggunaan larutan metanol sebagai zat aditif pada elektrolisis plasma, faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja elektrolisis pancaran pijar.

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 II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 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. Pada suhu dan tekanan standar, hidrogen tidak berwarna, tidak berbau, bersifat non-logam, bervalensi tunggal, dan merupakan gas diatomik yang sangat mudah terbakar. Dengan massa atom 1,00794 amu, hidrogen adalah unsur teringan di dunia.

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.

Hidrogen merupakan unsur paling melimpah di alam semesta, dan nomor tiga terbanyak di permukaan bumi. Tetapi gas hidrogen murni hampir tidak ada di permukaan bumi, karena gas hidrogen bereaksi dengan unsur lain membentuk persenyawaan yang lebih stabil. Kelimpahan persenyawaan hidrogen dalam bentuk air dan bahan bakar fosil, relatif tak terbatas jumlahnya. Karena hidrogen murni hampir tidak ada, maka hidrogen tidak bisa disebut sebagai sumber energi, tetapi sebagai *energy carrier* seperti halnya dengan listrik. *Energy carrier* merupakan media yang praktis untuk menyimpan, mentransfer, maupun menggunakan energi. Sebagai *energy carrier*, hidrogen harus mudah disimpan, mudah digunakan, dan mudah dikonversi menjadi berbagai bentuk energi.

Hidrogen alam tidak ada di permukaan bumi, sehingga hidrogen harus dibuat. Pada prinsipnya, hidrogen bisa diperoleh dengan memecah senyawa yang paling banyak mengandung unsur hidrogen. Sampai saat ini, produksi hidrogen skala komersial yang paling maju adalah produksi hidrogen berbasis bahan bakar fosil dan air. Untuk produksi hidrogen dengan bahan baku bahan bakar fosil,

steam reforming metana merupakan proses yang paling maju di dunia. Lebih dari 85% kebutuhan hidrogen dunia dipasok dengan sistem produksi *steam reforming* metana. Produksi hidrogen dengan bahan baku air yang sudah komersial adalah proses elektrolisis. Sayangnya, karena proses elektrolisis membutuhkan listrik dalam jumlah besar sebagai pemicu terjadinya reaksi, sehingga proses ini memberikan efisiensi termal total yang relatif rendah. Proses elektrolisis hanya bisa ekonomis jika tersedia listrik dalam jumlah besar dengan harga murah. Meskipun proses *steam reforming* sampai saat ini masih mendominasi, tetapi dimungkinkan akan tergeser oleh proses berbasis bahan baku air, karena beberapa alasan:

- a. Gas alam bukanlah bahan terbarukan sehingga ada batas keekonomian tertentu yang memungkinkan sebagai bahan baku, sementara air sebagai bahan baku relatif melimpah dan terbarukan
- b. Harga gas alam sebagai komoditi energi juga terus meningkat
- c. Tuntutan lingkungan, mengingat produksi berbasis bahan bakar fosil akan mengemisi CO₂ dalam jumlah cukup besar.

2.2 Produksi Hidrogen

Teknologi untuk menghasilkan hidrogen maupun proses di industri yang dapat menghasilkan hidrogen :

2.2.1 Pemisahan Hidrogen dari Hidrokarbon

Steam reforming merupakan proses termokimia yang umum dipakai pada industri yang memproduksi hidrogen. Proses *steam reforming* melibatkan reaksi metana (atau gas alam) dengan kukus pada suhu tinggi.

Ada 2 reaksi utama yang terjadi pada proses *steam reforming*. Yang pertama, reaksi *reforming* yang merupakan reaksi sangat endotermis yang terjadi pada suhu tinggi menggunakan katalisator. Reaksi kedua adalah *shift reaction*, merupakan reaksi eksotermis yang bertujuan untuk mengontrol kuantitas produk yang diinginkan. Kemudian dilanjutkan dengan proses penghilangan CO₂ dan pemurnian hidrogen. Persamaan reaksi dan tahapan proses dapat dilihat pada Tabel 2.1

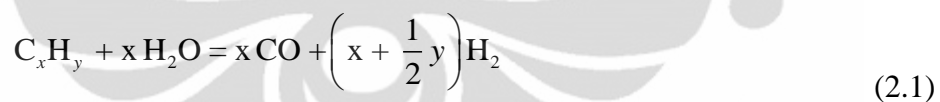
Tabel 2.1. Persamaan Reaksi dan Tahap Proses *Steam Reforming*

Tahap	Persamaan Reaksi	Nama Reaksi	ΔH (kJ/mol)
1	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	Reforming	- 206,20
2	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	Shift Reaction	41,20
3	Tahap pemisahan dan pemurnian produk		

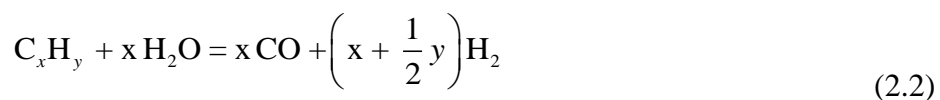
Sumber: Djati H Salimi, Ida N Finahari, 2008

Proses konvensional *steam reforming*, terjadi pada reaktor kimia yang disebut *reformer* pada suhu sekitar 800-900°C. Untuk mengoperasikan proses endotermis suhu tinggi, kebutuhan panas dipasok dengan membakar bahan bakar fosil sebagai sumber energi panas. Efisiensi termal proses *steam reforming* bisa mencapai 85%.

Teknologi *fuel processing* akan mengkonversi 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 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*:

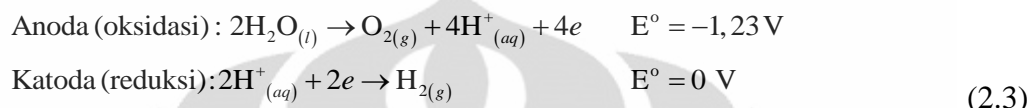


2.2.2 Elektrolisis

Elektrolisis air adalah proses dekomposisi air (H_2O) menjadi oksigen (O_2) dan hidrogen (H_2) dengan menggunakan arus listrik yang mengalir melalui air. Umpan masuk *electrolyzer* berupa ($\text{H}_2+\text{H}_2\text{O}$) dalam fase uap. Energi listrik dan

energi termal digunakan untuk memecahkan ikatan molekul H₂O menjadi molekul H₂ dan O²⁻. Selanjutnya ion-ion O²⁻ selanjutnya bermigrasi melewati membran elektrolit untuk mencapai sisi anoda sesuai prinsip fisika *electron-hole*. Setelah mencapai sisi anoda, ion-ion O²⁻ akan melepaskan electron dan membentuk molekul oksigen.

Persamaan reaksinya adalah sebagai berikut:



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



Besarnya energi bebas standar, entalpi, dan entropy masing-masing adalah $\Delta G = 1,23 \text{ V}$, $\Delta H = 285,83 \text{ kJ/mol}$, dan $\Delta S = 70,08 \text{ J/kmol}$. Energi bebas sebesar 1,23 V merupakan tegangan listrik bolak balik yang menyatakan tegangan listrik minimal yang diperlukan untuk dapat berlangsungnya reaksi. Total energi (ΔH) yang diperlukan agar reaksi dapat berlangsung dapat dipasok dengan energi listrik, energi panas, atau gabungan keduanya. Menurut termodinamika, ΔH bisa diperoleh dengan rumus

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.5)$$

Richard (2004) menyatakan bahwa ΔG dan $T\Delta S$ untuk elektrolisis merupakan fungsi suhu. Pada suhu semakin tinggi ΔG (yang disuplai dengan energi listrik) semakin berkurang sedangkan $T\Delta S$ (yang disuplai dengan energi termal) semakin bertambah. Sementara itu peningkatan densitas arus akan meningkatkan rugi-rugi tahanan listrik. Peningkatan densitas arus akan mengubah perimbangan energi masukan berupa energi kalor dan energi listrik.

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.

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 :

$$W = e \cdot F \quad (2.6)$$

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 :

$$W = e \cdot i \cdot t / 96500 \quad (2.7)$$

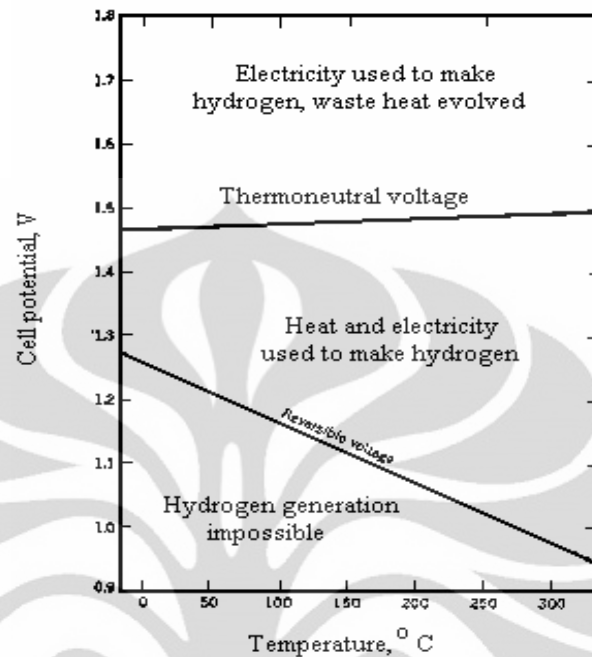
i = kuat arus (ampere)

t = waktu lamanya elektrolisis (detik)

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.

Pada Gambar 2.1 ditunjukkan hubungan antara suhu operasi proses elektrolisis dengan potensial listrik, semakin tinggi suhu operasi elektrolisis akan semakin kecil energi listrik yang dibutuhkan. Keterbatasan teknologi suhu tinggi menyebabkan proses elektrolisis yang mula-mula dikembangkan beroperasi pada suhu tidak terlalu tinggi (kurang dari 100°C), sehingga proses elektrolisis yang sudah komersial saat ini adalah proses dengan suhu rendah. Efisiensi termal proses elektrolisis biasanya sekitar 75%, tapi karena efisiensi termal konversi

panas ke listrik sangat rendah, sehingga total efisiensi proses ini menjadi sangat rendah hanya sekitar 25%.



Gambar 2.1 Kondisi Operasi Proses Elektrolisis (Djati H Salimi, Ida N Finahari, 2008)

Tegangan listrik kesetimbangan dari proses elektrolisis air secara teoritis adalah 1,23 volt. Namun, pada kenyataannya, proses elektrolisis ini memerlukan tegangan listrik yang jauh lebih besar dari tegangan listrik kesetimbangan tersebut. Hal ini terjadi karena pengukuran tegangan listrik kesetimbangan 1,23 volt tersebut adalah pada keadaan standar, serta pada proses nyatanya selalu terjadi overpotensial pada sistem. Overpotensial menyebabkan tegangan listrik kerja jauh lebih besar daripada tegangan listrik kesetimbangan. Ada 3 jenis overpotensial, yaitu:

1. Overpotensial Ohmik

Overpotensial Ohmik disebabkan adanya hambatan dalam rangkaian listrik dan dalam elektrolit yang digunakan dalam proses elektrolisis air. Nilai overpotensial ohmik sangat kecil dibanding nilai overpotensial lainnya.

2. Overpotensial Aktivasi

Overpotensial aktivasi adalah overpotensial yang dibutuhkan untuk mencapai energi aktivasi dari proses reaksi sehingga reaksi tersebut dapat

berjalan. Overpotensial ini dibutuhkan untuk memulai perpindahan elektron.

3. Overpotensial Konsentrasi

Overpotensial konsentrasi terjadi akibat ketidakseragaman profil konsentrasi elektrolit sehingga menyebabkan laju difusi menjadi lambat. Tegangan listrik kerja ditentukan dengan mengubah-ubah besar tegangan listrik sumber sehingga terjadi jumlah arus yang besarnya tidak berubah lagi walaupun tegangan listrik terus ditingkatkan. Tegangan listrik minimum saat arus mulai konstan inilah yang disebut tegangan listrik kerja.

Kebutuhan energi dalam proses elektrolisis air ditentukan dengan menghitung jumlah energi yang dibutuhkan dalam elektrolisis per jumlah mol gas H_2 yang dihasilkan. Semakin besar konsentrasi elektrolit, daya hantar akan meningkat, sehingga kebutuhan energi per volume gas H_2 yang dihasilkan akan semakin kecil.

2.3 Kegunaan Hidrogen

Sejumlah besar H_2 diperlukan dalam industri petrokimia dan kimia. Penggunaan terbesar H_2 adalah untuk memproses bahan bakar fosil dan dalam pembuatan ammonia. Konsumen utama dari H_2 di kilang petrokimia meliputi hidrodealkilasi, hidrodesulfurisasi, dan *hydrocracking*. H_2 memiliki beberapa kegunaan yang penting. H_2 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. H_2 juga digunakan sebagai reduktor pada bijih logam.

Selain digunakan sebagai pereaksi, H_2 memiliki penerapan yang luas dalam bidang fisika dan teknik. Gas hidrogen ini digunakan sebagai gas tameng di metode pengelasan seperti pengelasan hidrogen atomik. H_2 digunakan sebagai pendingin rotor di generator pembangkit listrik karena hidrogen mempunyai konduktivitas termal yang paling tinggi di antara semua jenis gas. H_2 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 uji coba 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.

2.4 Plasma

Plasma dapat dikategorikan sebagai bentuk keempat dalam klasifikasi material selain padat, cair, dan gas karena plasma memiliki bentuk seperti gas, namun plasma memiliki konduktivitas listrik yang cukup tinggi dalam daerah elektromagnetiknya sama seperti padatan dan cairan. 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.

Plasma adalah aliran gas terionisasi, yang merupakan campuran dari elektron, ion dan partikel netral, namun muatan keseluruhannya adalah netral dan dianggap sebagai bentuk ke-empat materi. Pada keadaan ini, gas mempunyai viskositas seperti liquid pada tekanan atmosferik dan muatan listrik bebas memberikan konduktivitas listrik relatif tinggi yang besarnya mendekati konduktivitas listrik logam. Tingkat ionisasi plasma adalah proporsi dari atom-atom yang kehilangan atau mendapatkan elektron, dan biasanya dikendalikan oleh suhu. 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). Gas yang mengalir ini akan membuat plasma tampak berwarna. Tiap gas yang mengalir akan menghasilkan warna tersendiri. Berikut ini merupakan beberapa warna plasma yang ditimbulkan dapat dilihat pada Tabel 2.2:

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 (pink)
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>.

2.5 Jenis Plasma

Jenis-jenis plasma yang digunakan dalam proses-proses industri meliputi plasma termal dan plasma non-termal dengan penjelasan sebagai berikut dan ditunjukkan pada Tabel 2.3:

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 elatis. Karena densitas jumlah elektron tinggi, dikaitkan dengan operasi pada tekanan atmosferik, frekuensi tumbukan elastis sangat tinggi dan kesetimbangan termal tercapai dengan cepat. Plasma termal membutuhkan listrik dengan tegangan listrik yang sangat tinggi (>1kW) dan menyebabkan kenaikan suhu yang sangat tinggi pula pada elektron dan spesi netral menjadi 5.000 – 10.000 K, sehingga diperlukan pendingin untuk mencegah elektroda menguap pada suhu setinggi itu (L. Bomberg, et.all., 1999). Contoh plasma

termal adalah plasma dari arus DC atau *radio frequency* (RF) inductively coupled discharges (Kogelschatz, 2004).

Tabel 2.3 Klasifikasi Plasma [Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology; 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, Contact Glow Discharge, DBD, Microwave plasma</i>

Keterangan; T_e =Temperatur electron, T_i =Temperatur ion, T_h =Temperatur neutral, T_p =Temperatur plasma, n_e =densitas elektron.

Sumber: Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology; Huang a, L. Tang

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 (*background*) 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} . (Roth, 2001). Pada plasma non-termal ini hanya elektron yang bersuhu tinggi ($>5000\text{K}$), sedangkan suhu *bulk* tidak naik secara signifikan (Yan ZC, et.al., 2006). Karena hanya elektron yang

terekitasi, sehingga energi dibutuhkan hanya beberapa ratus Watt daya listrik yang dibutuhkan (T. paulmier dan L. Fulcheri, 2005).

Plasma non-termal dikatakan sebagai plasma non-equilibrium karena suhu *bulk*-nya 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.

2.6 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).

2.6.1 Foton

Foton dihasilkan dalam spektrum panjang gelombang yang luas pada spektrum elektromagnetik seperti disarikan dalam Tabel 2.4. 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.

Tabel 2.4 Energi-energi foton dalam spektrum elektromagnetik

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	$13 \leq \lambda \leq 397$	$3,12 \leq E' \leq 95,3$

Sumber : Roth, 2001

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.

Karena tidak bermuatan, foton tidak terpengaruh oleh medan listrik atau magnet yang dapat hadir dalam selubung, dan mencapai permukaan dengan energi aslinya. Foton-foton ultraviolet dan tampak mempunyai energi yang cukup untuk memutus ikatan molekular atau atomik pada suatu permukaan, dan untuk menghasilkan radikal bebas polimerik dan atau monomer. 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. *Penggantungan*, 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.

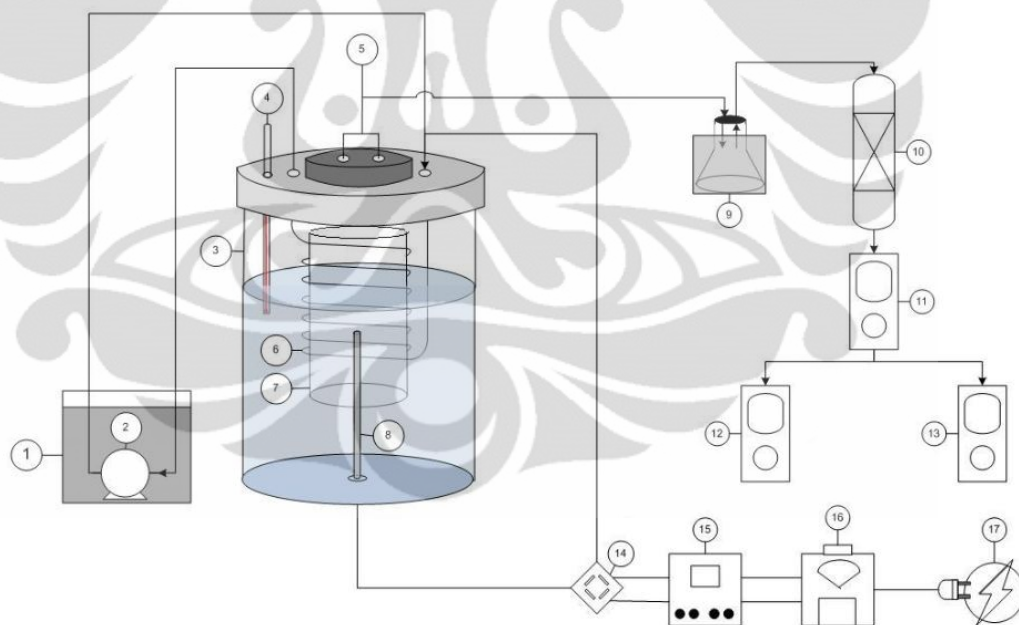
2.6.2 Spesi Netral

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 *cross-linking* 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.

2.7 Plasma Elektrolisis

Dalam beberapa tahun terakhir, aplikasi bidang plasma pijaran elektrolisis dengan cepat berkembang. Plasma pijaran elektrolisis merupakan proses elektrokimia yang menghasilkan plasma oleh arus DC antara elektroda dan permukaan elektrolit sekitarnya. Elektrolisis konvensional dikembangkan menjadi plasma pijaran elektrolisis ketika tegangan listrik yang diberikan cukup tinggi dalam larutan.



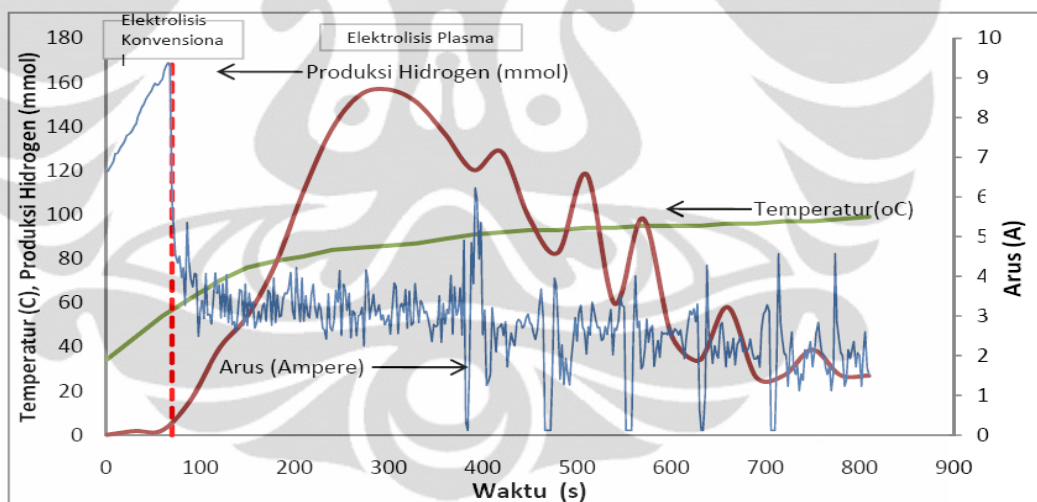
Keterangan :

- | | |
|---|---------------------------|
| 1. Wadah Pendingin | 10. Absorber Silika |
| 2. Pompa | 11. Bubble Soap Flowmeter |
| 3. Ruang Elektrolisis | 12. Hidrogen Analyzer |
| 4. Thermometer | 13. Kromatografi Gas |
| 5. Outlet Hidrogen dan Oksigen (H ₂ dan O ₂) | 14. Dioda Bridge |
| 6. Coil (sekaligus sebagai Anoda) | 15. Power Analyzer |
| 7. Logam Anoda | 16. Slide Regulator |
| 8. Logam Katoda | 17. Sumber Listrik PLN |
| 9. Kondenser | |

Gambar 2.2 Skema alat elektrolisis plasma (Nelson S, et al, 2009)

Hasil yang diperoleh dari elektrolisis ini adalah pijaran cahaya di elektroda, gas hidrogen pada katoda dan gas oksigen pada anoda. 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 listrik 230 V, mendapatkan efisiensi penggunaan energi listrik hingga 800 % dibanding kebutuhan energi listrik menurut hukum Faraday. Skema alat yang telah dikembangkan di laboratorium intensifikasi produk departemen teknik kimia Universitas Indonesia dapat dilihat pada Gambar 2.2.

Kondisi operasi seperti suhu larutan, tegangan listrik dan kuat arus listrik akan sangat menentukan tingkat efektivitas proses ini, hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.3. Sebelum plasma terbentuk arus akan meningkat dengan bertambahnya waktu, setelah plasma mulai terbentuk arus akan mengalami penurunan secara signifikan (Jaenal, 2010).

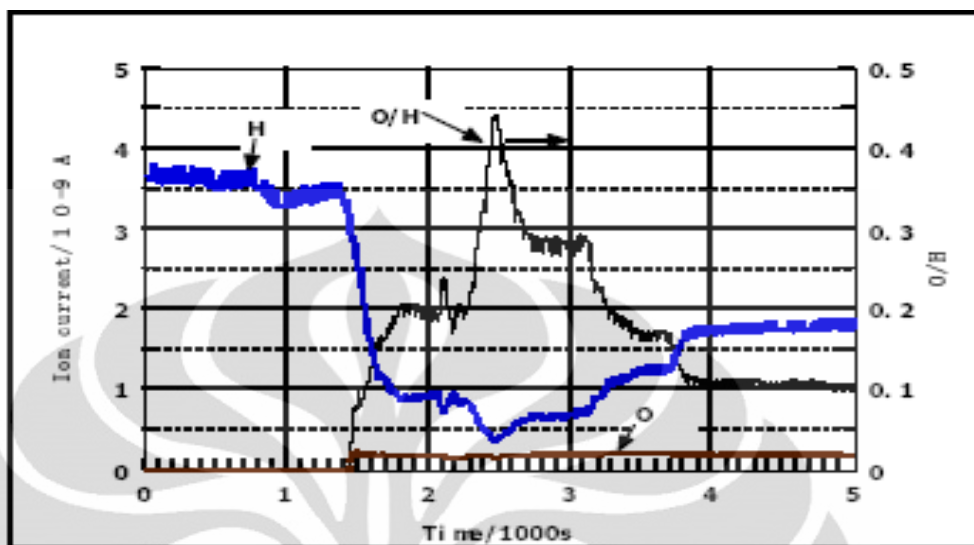


Gambar 2.3 Hubungan Parameter Arus Listrik, Produksi Hidrogen, dan Temperatur terhadap Waktu dalam Larutan KOH 0,1 M, Tegangan listrik 100 Volt (Nelson S, 2010)

Mizuno (2003) perubahan tegangan listrik akan mempengaruhi rasio H_2 dan O_2 , bila tegangan listrik dinaikkan maka akan bertambah pula rasio H_2 dan O_2 seiring dengan bertambahnya waktu hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.4.

Hidrogen adalah bahan bakar yang ramah lingkungan. Produksi hidrogen dari air ini menarik dan menjadi suatu alternatif pilihan untuk energi karena

hampir sebagian besar bumi ditutupi oleh air. Teknologi produksi hidrogen dengan elektrolisis plasma akan dilakukan dalam penelitian. ini.



Gambar 2.4. Pengaruh tegangan listrik terhadap rasio H₂ dan O₂ (Mizuno, et al, 2003)

2.7.1 Elektrolisis Plasma

Produksi gas hidrogen menggunakan metode elektrolisis plasma 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 listrik 230 V, mendapatkan efisiensi penggunaan energi listrik hingga 800 % dibanding kebutuhan energi listrik menurut hukum Faraday. Kondisi operasi seperti suhu larutan, tegangan listrik dan kuat arus listrik akan sangat menentukan tingkat efektivitas proses ini.

Stoikiometrik yang relevan dan persamaan elektrokimia pada elektrolisis plasma air di gambarkan sebagai berikut (Chaffin, et al, 2006):



Secara lengkap proses elektrolisis diilustrasikan pada skema dibawah ini.



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:

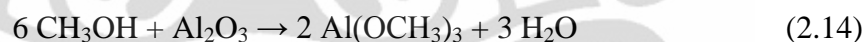
$$G(H_2) = \frac{V_{gas}/22,4}{Q/2F} = \frac{V_{gas} \cdot F}{11,2Q} \text{ mol. mol}^{-1} \quad (2.12)$$

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

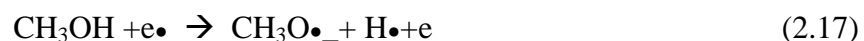
$$W_r = \frac{VQ}{V_{gas}} \text{ kJ.L}^{-1} \quad (2.13)$$

2.7.2 Penggunaan Larutan Metanol Sebagai Zat Aditif Pada Elektrolisis Plasma

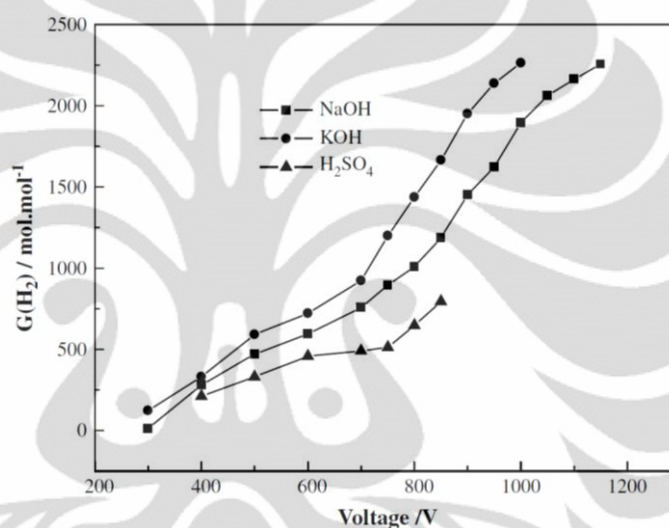
Metanol digunakan secara terbatas dalam mesin pembakaran dalam, dikarenakan metanol tidak mudah terbakar dibandingkan dengan bensin. Metanol campuran merupakan bahan bakar dalam model radio kontrol. Salah satu kelemahan metanol sebagai bahan bakar adalah sifat korosi terhadap beberapa logam, termasuk aluminium. Metanol, merupakan asam lemah, menyerang lapisan oksida yang biasanya melindungi aluminium dari korosi:



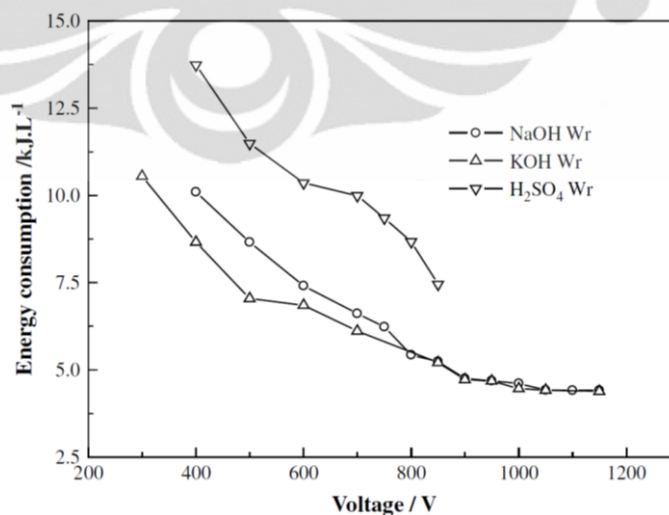
Zong, et al. 2008, telah melakukan percobaan plasma pijaran elektrolisis dengan larutan dielektrikum berupa metanol. Mekanisme dari metanol yang terdisosiasi dapat digambarkan sebagai berikut :



Zong (2008) menggunakan larutan metanol dan NaOH sebagai elektrolitnya mendapatkan rasio jumlah mol H_2 yang dihasilkan ($G(H_2)$) mencapai hingga 2300 kali lebih besar dibanding H_2 yang dihasilkan berdasarkan hukum Faraday seperti yang ditunjukkan pada grafik Gambar 2.5. Pada grafik Gambar 2.6 menunjukkan bahwa konsumsi energi listrik menurun dengan meningkatnya tegangan listrik dimana KOH dan H_2SO_4 lebih efektif menurunkan konsumsi energi dibanding NaOH. Komposisi gas yang dihasilkan dari proses elektrolisis plasma ini dipengaruhi oleh komposisi metanol dalam larutan seperti pada Tabel 2.5.



Gambar 2.5. Pengaruh tegangan listrik pada $G(H_2)$. Konduktivitas listrik : 11,55 mS/cm, Suhu : 64 °C. Konsentrasi metanol : 99,5 % (Zong, et al, 2009)



Gambar 2.6 Pengaruh tegangan listrik pada konsumsi energi ,Konduktivitas listrik : 11,55 mS/cm, Suhu : 64 °C. Konsentrasi metanol : 99,5 % (Zong, et al, 2009)

Tabel 2.5 Komposisi gas hasil elektrolisis plasma dari larutan metanol

Metanol (% mol)	H ₂ (% mol)	CO (% mol)	CH ₄ (% mol)	C ₂ H ₆ (% mol)	C ₃ H ₈ (% mol)	CO ₂ (% mol)	O ₂ (% mol)
100	87,03	5,99	1,66	5,08	0,24	0,00	0,00
70	88,71	5,62	1,45	4,08	0,14	0,00	0,00
40	88,99	7,03	1,01	1,94	0,26	0,77	0,00
20	88,82	7,61	0,87	1,10	0,15	1,35	0,00
10	86,86	8,54	0,72	0,78	0,04	3,06	0,00
5	88,74	6,41	0,49	0,57	0,00	3,79	0,00
0	69,40	0	0	0	0	0	30,60

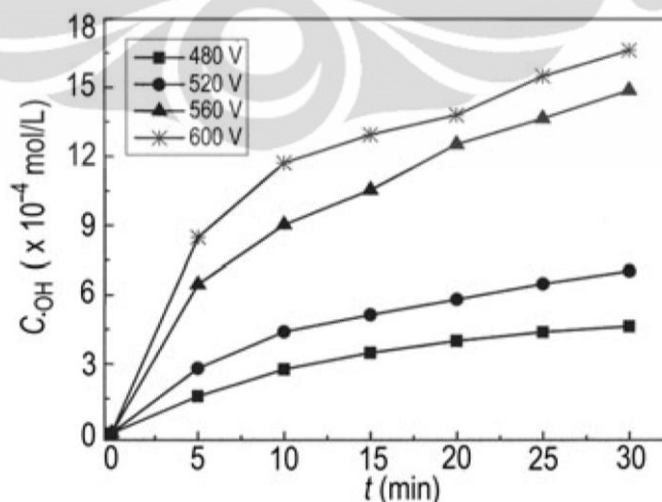
Sumber: Zong, et al, 2008

2.7.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Elektrolisis Plasma Pijar

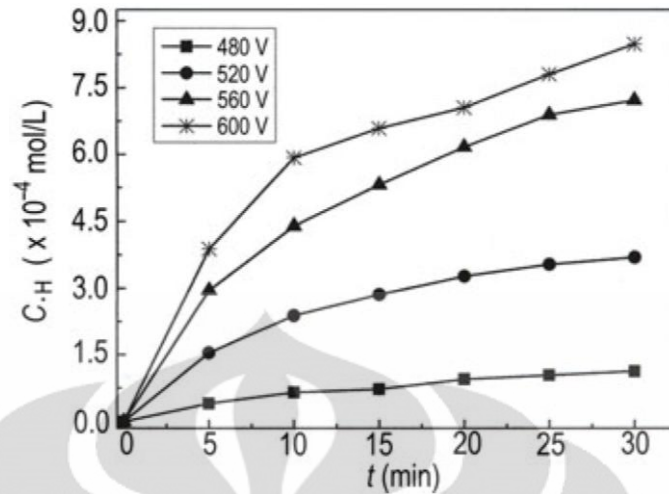
Dalam memproduksi hidrogen dari air dengan teknologi plasma, faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan radikal $\bullet\text{OH}$ dan $\bullet\text{H}$ yang sangat berperan dalam reaksi pembentukan hidrogen sangatlah penting, GAO Jinzang (2008) telah melakukan percobaan untuk mengetahui faktor-faktor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

1. Efek tegangan listrik

Efek variasi tegangan listrik pada plasma pijaran elektrolisis terhadap pembentukan radikal yang dihasilkan ditunjukkan oleh grafik Gambar 2.7 dan Gambar 2.8 di bawah ini:

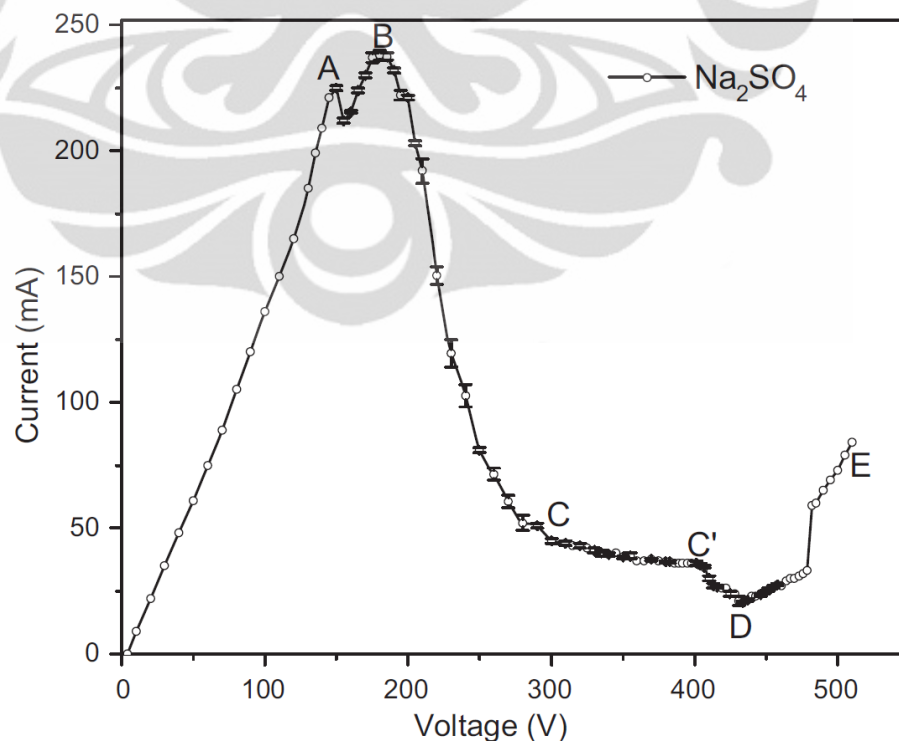


Gambar 2.7 Efek tegangan listrik terhadap pembentukan radikal $\bullet\text{OH}$ pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal $\bullet\text{OH}$ (GAO Jinzang, et al., 2008)



Gambar 2.8 Efek tegangan listrik terhadap pembentukan radikal $\bullet\text{H}$ pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal $\bullet\text{H}$ (GAO Jinzang, et al., 2008)

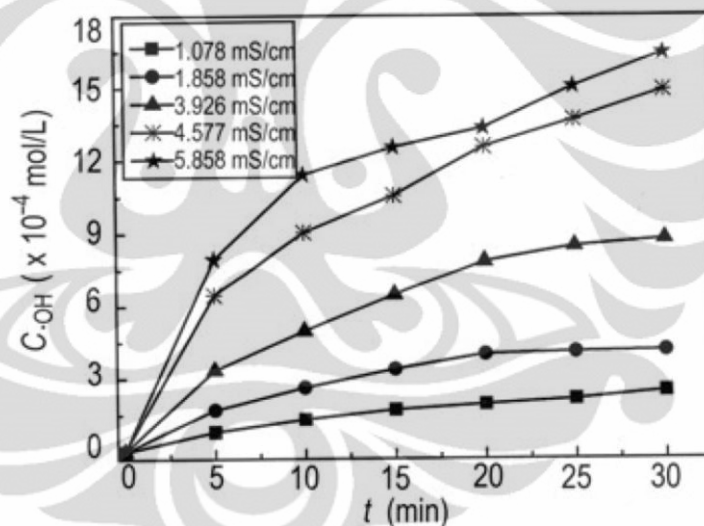
Pada grafik Gambar 2.7 dan 2.8, bisa dilihat bahwa semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan untuk menghasilkan plasma, konsentrasi radikal $\bullet\text{OH}$ maupun $\bullet\text{H}$ yang terbentuk semakin tinggi pula. Hal ini diakibatkan karena dengan perbedaan tegangan listrik yang tinggi, energi untuk mengeksitasi elektron untuk menghasilkan radikal juga semakin tinggi, akibatnya semakin tinggi tegangan listrik yang dipakai, pembentukan radikalnya pun juga semakin besar.



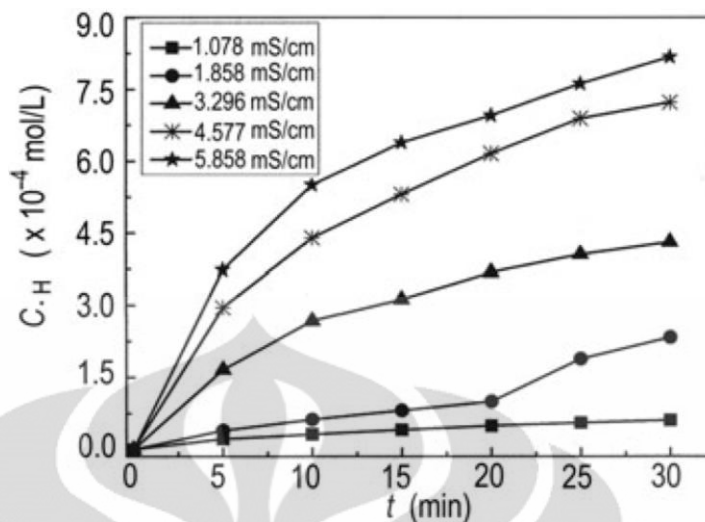
Gambar 2.9 Karakteristik umum kurva arus-tegangan listrik pada elektrolisis plasma (Xinlong Jin, 2010)

Karakteristik umum kurva arus-tegangan listrik ditunjukkan Gambar 2.9. pada grafik ini terlihat jika tegangan listrik dinaikkan maka arus akan naik secara linear sampai titik A kemudian turun secara perlahan sebelum akhirnya akan naik kembali sampai titik B dan kemudian akan turun secara signifikan. Fasa dari A ke B adalah wilayah penjenjahan arus Arus mengalami penurunan karena pada saat itu plasma mulai terbentuk yang menyebabkan arus turun secara drastis sampai titik tertentu. Penurunan arus juga berarti penurunan konsumsi energi karena persamaan energi berbanding lurus dengan arus tetapi juga berbanding lurus dengan tegangan listrik. Jadi, titik terendah arus ini (titik D) adalah tegangan listrik optimum elektrolisis plasma

2. Efek konduktifitas larutan



Gambar 2.10 Efek konduktivitas listrik larutan terhadap pembentukan radikal $\bullet\text{OH}$ pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal $\bullet\text{OH}$ (GAO Jinzang, et al., 2008)

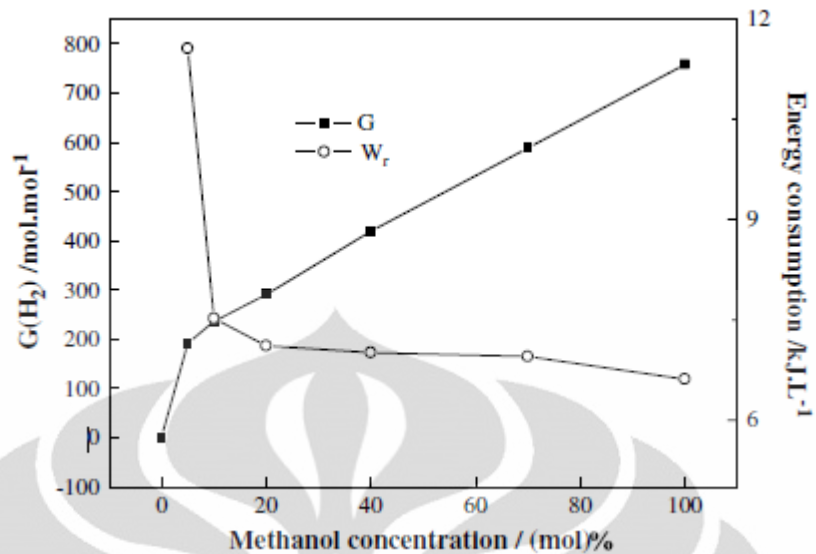


Gambar 2.11 Efek konduktivitas listrik larutan terhadap pembentukan radikal $\bullet\text{H}$ pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal $\bullet\text{H}$ (GAO Jinzang, et al., 2008)

Pada kedua grafik Gambar 2.10 dan 2.11 konduktivitas listrik larutan yang digunakan juga mempengaruhi pembentukan radikal $\bullet\text{OH}$ dan $\bullet\text{H}$, semakin besar konduktivitas listrik larutan, radikal yang terbentuk pun semakin besar pula. Hal ini dikarenakan dengan konduktivitas listrik yang tinggi, elektron-elektron bisa bergerak dengan lebih mudah dibanding larutan yang konduktivitasnya rendah. Akibatnya, peluang/probabilitas terjadinya tumbukan antara elektron dengan elektron pada molekul juga semakin besar, sehingga pembentukan radikal pun juga akan terjadi dengan lebih baik. Konduktivitas listrik larutan bisa ditingkatkan dengan larutan elektrolit.

3. Efek konsentrasi aditif (metanol)

Jika konsentrasi larutan metanol meningkat, konsentrasi air yang melingkupi gas meningkat. Kemudian kemungkinan molekul air keluar terurai meningkat pada lingkupan plasma.



Gambar 2.14. Efek konsentrasi metanol pada $G(H_2)$ dan W_r . Temperatur $337,18 \pm 0,5$ K, konduktivitas $11,55 \text{ mS cm}^{-1}$, perbedaan tegangan listrik 700 V, elektrolit NaOH (Zong et al, 2009)

Penguraian molekul air akan memberikan lebih banyak atom hidrogen untuk memproduksi hidrogen. Jadi konsentrasi hidrogen meningkat dengan peningkatan konsentrasi metanol dapat dilihat pada grafik Gambar 2.14. Atom H dihasilkan oleh proses penguraian air, terekombinasi dengan yang lainnya dan membentuk gas hidrogen. Kenaikan $G(H_2)$ meningkat tajam sampai konsentrasi methanol sebesar 5% mol. Setelah itu kenaikan $G(H_2)$ naik dengan kemiringan lebih landai. Jadi pada 5% mol adalah titik optimum jika ingin menggunakan methanol sebagai aditif.

Berdasarkan hasil-hasil percobaan para peneliti sebelumnya, bisa diambil garis besar yaitu elektrolisis plasma akan efektif jika menggunakan tegangan listrik tinggi, karena konsumsi energi menjadi lebih kecil dan konsentrasi hidrogen yang diperoleh juga lebih besar. Konsentrasi larutan dielektrik juga memberikan kontribusi dalam produksi hidrogen. Selain itu, keasamaan larutan ternyata juga memberikan pengaruh terhadap produksi hidrogen, yaitu pada pH sekitar 3, produksi hidrogen maksimum. Terakhir pengaruh konduktivitas listrik larutan, semakin besar konduktivitas listrik larutan, produksi hidrogen juga semakin baik.

Dengan menggunakan larutan dielektrikum KOH, kemungkinan produksi hidrogen bisa ditingkatkan, hal ini dikarenakan KOH dapat menyebarkan muatan

listrik karena fungsinya sebagai zat dielektrikum, sehingga proses pemecahan air menjadi radikal-radikal yang selanjutnya bereaksi lanjut menghasilkan hidrogen dan oksigen menjadi optimal. Selain itu kalium tidak terurai selama proses elektrolisis dengan plasma ini, berbeda dengan natrium (Ph.M. Kanarev. et al., 2003), sehingga peran KOH dalam meningkatkan konduktivitas listrik larutan tidak hilang selama reaksi. Selain itu juga lebih ekonomis penggunaannya. Jaenal (2010) kalium terkonsumsi mempengaruhi warna plasma yang terbentuk yang kemudian muncul lagi di akhir reaksi. Berikut merupakan 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^-

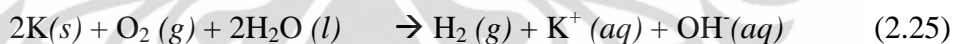


Elektron diserap oleh ion kalium membentuk logam kalium

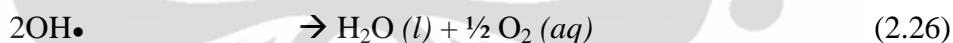


Jaenal (2010) Logam ataupun ion kalium menjadi medium pembentukan plasma.

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

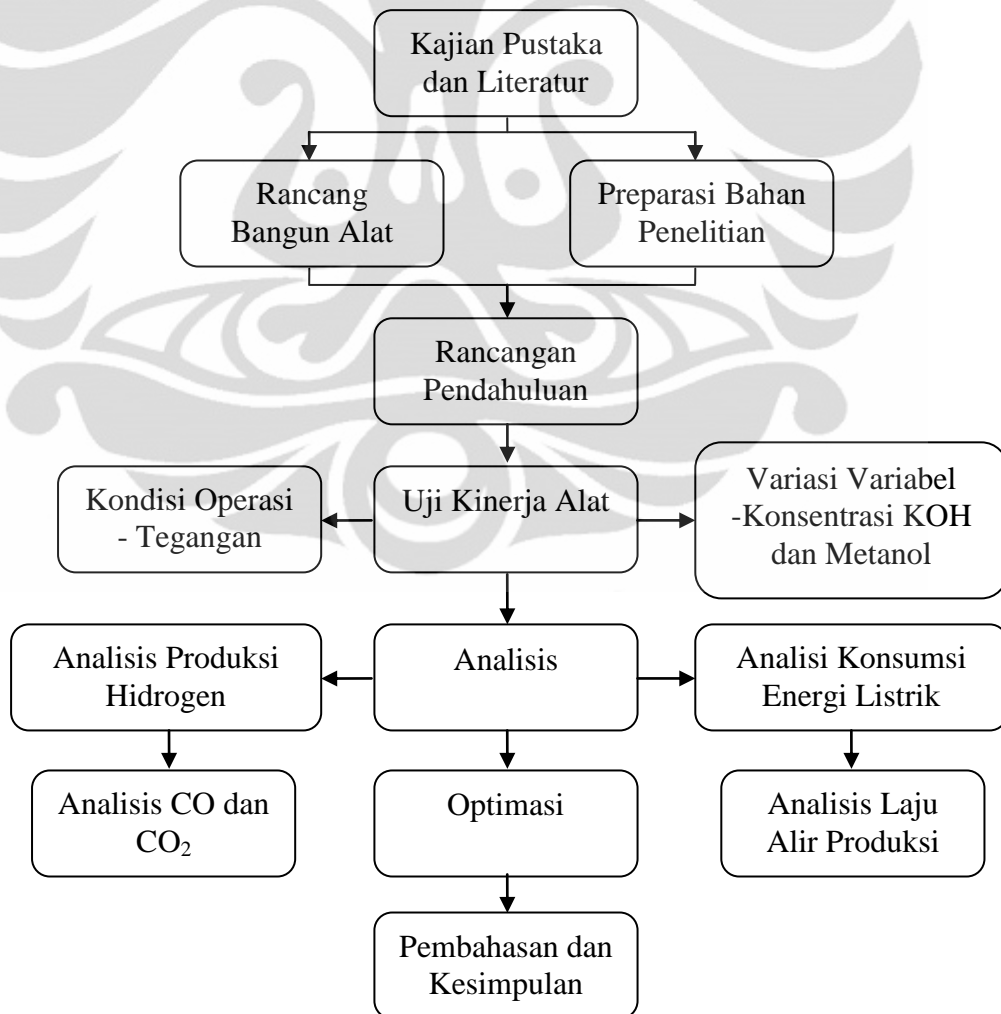


BAB III METODE PENELITIAN

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

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan dalam skala laboratorium dimana diagram alir penelitian secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut ini:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Metanol
- KOH
- Aquadest

Peralatan umum yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

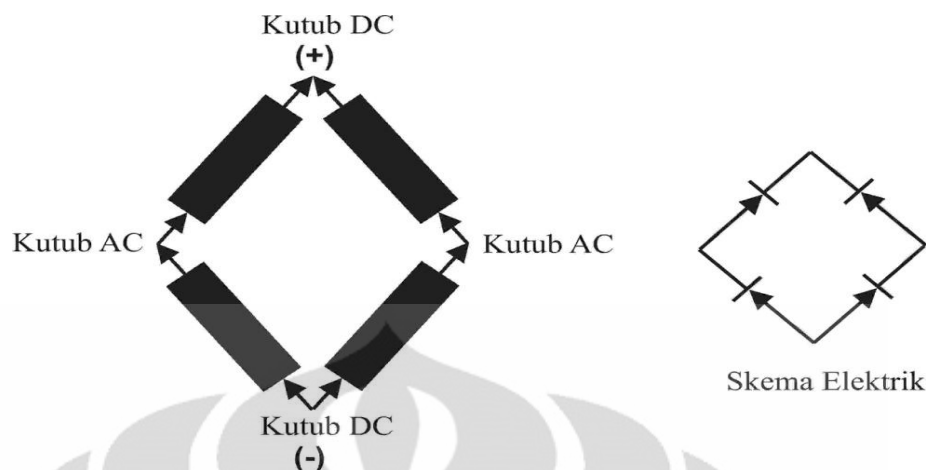
- Reaktor plasma elektrolisis
- Gelas piala 500 mL dan 50 mL
- Gelas ukur 1000 mL
- Neraca analitik
- Spatula
- Labu semprot
- Labu takar 1000 mL
- Corong
- *Syringe*

3.3 Rancang Bangun Peralatan Sistem Produksi Hidrogen

Rancang bangun peralatan sistem produksi hidrogen meliputi rangkaian pembangkit plasma, reaktor plasma elektrolisis dan peralatan pemisahan/pemurnian serta pengukuran produk hidrogen.

3.3.1 Rangkaian Pembangkit Plasma

Sumber pembangkit plasma berupa rangkaian pembangkit plasma sederhana, yaitu rangkaian listrik (DC) tegangan listrik tinggi yang disusun dari komponen-komponen listrik seperti dioda dan regulator tegangan listrik. Dioda yang digunakan adalah Dioda tegangan listrik tinggi hingga 1000 Volt dengan kapasitas Arus mencapai 10 Ampere. Dioda ini dibuat berlapis dengan perangkaian disusun seperti Gambar 3.2. Pengamatan arus, tegangan listrik dan daya listrik watt dapat diamati pada alat ukur digital secara langsung.



Gambar 3.2 Skema pemasangan dioda pada dioda bridge

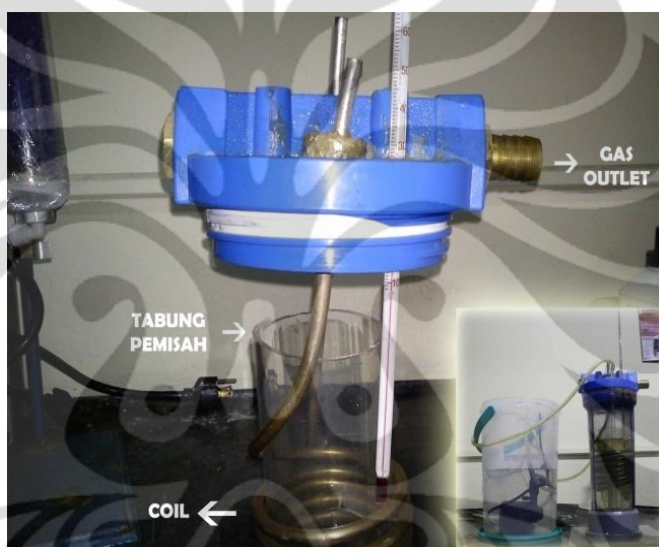
3.3.2 Peralatan Reaktor Plasma Elektrolisis

Komponen reaktor plasma elektrolisis terdiri dari komponen-komponen berikut:

- a. Housing filter terbuat dari fiber 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 900 ml. Ada 1 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 dan termometer,.
- b. Sepasang elektroda yaitu katoda berbentuk silinder dengan diameter atas 5 mm dan panjang 13 mm terbuat dari *stainless steel* dari bagian dasar reaktor dengan permukaan yang terbuka panjangnya adalah 2 cm, pelapis katoda bisa digunakan selang silikon karena cukup dapat menahan panas yang terbentuk dan anoda berupa coil (yang sekaligus sebagai media pendingin) yang terbuat dari *stainless steel* tipe SS 316 G dengan diameter $\frac{1}{4}$ ” dan panjang 2 meter.
- c. Akrilik berbentuk silinder sebagai pemisah antara produk katoda dan produk anoda yang memiliki diameter 4 cm dan tinggi 10 cm, ruang katode yang banyak menghasilkan hidrogen akan dipisahkan dengan ruang anode yang banyak menghasilkan oksigen pada fasa cair agar plasma dapat terbentuk.

- d. Sistem pendinginan reaktor berupa coil yang memiliki diameter 6 cm dan tinggi 20 cm. Coil tersebut terbuat dari *stainless steel* tipe SS 316 G (digunakan juga sebagai anoda) dengan diameter $\frac{1}{4}$ ” dan panjang 2 meter. Coil tersebut terhubung dengan media pendingin (menggunakan selang yang terbuat dari silikon) berupa wadah yang berisi air yang disirkulasikan dengan menggunakan pompa sentrifugal.
- e. Termometer untuk mengukur suhu larutan.

Komponen reaktor elektrolisis plasma secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 3.3 dibawah ini.



Gambar 3.3 Reaktor plasma elektrolisis

3.3.3 Peralatan Pemisahan dan Pemurnian

Jumlah uap air yang terbentuk cukup tinggi pada proses elektrolisis plasma, terutama pada suhu diatas $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hal ini akan berpengaruh terhadap perhitungan volumetrik produk H_2 . Selain itu kandungan uap air pada aliran produk dapat merusak alat hidrogen *analyzer*. Untuk itu proses pemisahan uap air dilakukan dua tahap yaitu pada kondenser dan absorber. Kondenser yang digunakan adalah housing filter yang terbuat dari fiber yang dimensinya sama dengan reaktor. Aliran gas yang keluar dari reaktor akan masuk kedalam kondenser yang berisi batu es melalui pipa paralon yang memiliki diameter $\frac{3}{4}$ ” dan panjang 10 cm, sehingga aliran gas yang mengandung air tersebut akan mengalami

kondensasi akibat adanya sistem *direct cooling*. Sedangkan adsorber yang digunakan adalah silica gel. Adsorber digunakan untuk menarik uap air yang masih terbawa oleh aliran gas yang belum terkondensasi pada kondenser. adsorber dengan diameter 5 cm dan tinggi 25 cm. Aliran masuk dari bagian bawah dan keluar di bagian atas adsorber. Gambar 3.4 menunjukkan peralatan pemisahan dan pemurnian pada proses elektrolisis plasma dalam penelitian ini.



Gambar 3.4 Sistem pemisahan dan pemurnian a.) Kondenser ; b.) Adsorber

3.3.4. Peralatan Pengambilan Data

Peralatan yang digunakan dalam pengambilan data pada penelitian ini meliputi:

a. Pengambilan data produksi hidrogen

Peralatan yang digunakan untuk mengambil data produksi hydrogen adalah *Bubble soap flowmeter* digunakan untuk mengukur laju alir produk yang dihasilkan reaktor dan *Hydrogen Analyzer* untuk mengukur komposisi dari gas hidrogen yang digunakan adalah model GNL-400F. Alat ini mampu mengukur sampel yang mengandung hidrogen hingga 50 % komposisi volume dengan laju alir maksimal sebesar 400 ml/s.

b. Pengambilan data konsumsi listrik

Peralatan yang digunakan adalah *Power Analyzer* yang digunakan adalah model Lutron DW-6091. Alat ini mampu melakukan pengukuran tegangan listrik, arus, daya, dan konsumsi energi sekaligus

dalam 1 alat sehingga praktis dalam penggunaan. Sedangkan slide regulator ini berfungsi sebagai variabel data dari berbagai kondisi voltase yang diinginkan. Slide regulator standar di pasaran mencapai tegangan listrik 250 V. slide regulator digunakan dengan menyesuaikan voltase pada *display Power Analyzer* hal ini disebabkan tegangan listrik yang terbaca pada *Power Analyzer* adalah kondisi aktual pada penelitian ini.

c. Pengambilan data komposisi produk gas lain

Peralatan yang digunakan untuk mengetahui secara kualitatif maupun kuantitatif pada produk gas yang lain adalah kromatografi gas (GC) dengan model AG 6890 N *Agilent Technology* dengan detektor TCD (*Thermal Conductivity Detector*) untuk analisis gas CO₂ dan FID (*Flame Ionization Detector*) untuk analisis hidrokarbon.

Gambar 3.5 menunjukkan peralatan pengambilan data produksi hidrogen, data konsumsi listrik dan, data komposisi produk gas lain.

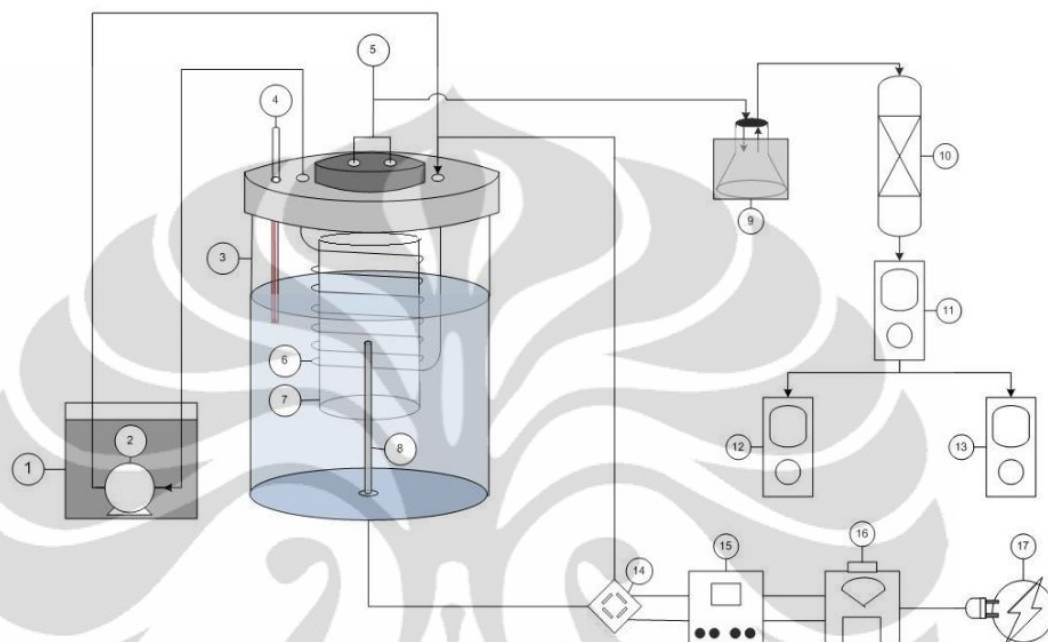


Gambar 3.5 Peralatan pengambilan data a). *Bubble soap flowmeter* dan *Hydrogen Analyzer* ; b). *Slide Regulator* dan *Power Analyzer*

Perhitungan komposisi hidrogen untuk laju volumetrik gas dibawah 400 ml/menit memerlukan faktor koreksi sebagai akibat adanya difusi udara luar yang masuk melalui keluaran alat hidrogen *analyzer*. Selain itu pengukuran pada menit-menit awal proses elektrolisis plasma diabaikan, mengingat gas yang keluar saat itu masih berupa udara (oksigen dan

nitrogen) yang memang sudah ada pada ruang kondenser dan absorber sebelum proses dilakukan.

Dari komponen – komponen sistem di atas, akan dirangkai menurut skema pada Gambar 3.6.



Keterangan :

- | | | |
|---|---------------------------|------------------------|
| 1. Wadah Pendingin | 7. Logam Anoda | 14. Dioda Bridge |
| 2. Pompa | 8. Logam Katoda | 15. Power Analyzer |
| 3. Ruang Elektrolisis | 9. Kondenser | 16. Slide Regulator |
| 4. Thermometer | 10. Absorber Silika | 17. Sumber Listrik PLN |
| 5. Outlet Hidrogen dan Oksigen (H ₂ dan O ₂) | 11. Bubble Soap Flowmeter | |
| 6. Coil (sekaligus sebagai Anoda) | 12. Hidrogen Analyzer | |
| | 13. Kromatografi Gas | |

Gambar 3.6 Skema sistem produksi hidrogen dengan elektrolisis plasma

3.4 Preparasi Bahan

Larutan elektrolit KOH:

- Membuat larutan KOH 1 M dengan melarutkan 56 gram KOH padatan kemudian dilarutkan dalam labu takar 1000 mL dengan aquadest.
- Membuat larutan KOH 0,01 M, 0,02 M, 0,05 M masing-masing bervolume 1000 mL dengan mengencerkan larutan KOH 1 M sebanyak 10 mL, 20 mL dan 50 mL dengan aquades. Larutan elektrolit tersebut bertujuan meningkatkan konduktivitas listrik larutan. Konduktivitas listrik larutan

diukur dengan menggunakan konduktometer yang sudah dikalibrasi sebelumnya.

Larutan elektrolit KOH dengan penambahan larutan metanol:

- Membuat larutan metanol 2%, 5% (v/v) masing-masing 1000 mL dengan mengencerkan larutan metanol 99,5 % (v/v) sebanyak 20 dan 50 mL dengan larutan elektrolit KOH. Larutan elektrolit tersebut bertujuan meningkatkan konduktivitas listrik larutan dan meningkatkan spesi aktif OH^- dan H^+ . Konduktivitas listrik larutan diukur dengan menggunakan konduktometer yang sudah dikalibrasi sebelumnya.

3.5 Uji Pendahuluan Peralatan Sistem Produksi Hidrogen

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

3.6 Prosedur Penelitian

1. Hidrogen *analyzer* GNL-400F dinyalakan (proses *preheating* selama 5 menit).
2. *Power analyzer* dinyalakan.
3. Larutan KOH 0,01 M diukur konduktivitasnya.
4. Larutan KOH 0,01 M sebanyak 1000 mL dimasukkan dalam reaktor. Temperatur larutan diukur dengan termometer.
5. Regulator tegangan listrik dinyalakan, diputar sampai tegangan listrik 200 volt AC. Stopwatch dinyalakan.
6. Setelah terbentuk plasma dan arus telah turun maka tegangan listrik dinaikkan hingga tegangan listrik 250 V
7. Setelah temperatur larutan mencapai $85\text{ }^{\circ}\text{C}$, daya, laju alir, konsentrasi H_2 . Diambil datanya. (Rentang suhu pengambilan data $85\text{-}90\text{ }^{\circ}\text{C}$).

8. Aliran pendingin dinyalakan.(jika rentang suhu melebihi pada saat pengambilan data).
9. Tegangan listrik dinaikkan hingga 300 V.
10. Prosedur 7 dan 8 dilakukan kembali.
11. Tegangan listrik dinaikkan hingga 350 V.
12. Prosedur 7 dan 8 dilakukan kembali.
13. Regulator tegangan listrik dimatikan.
14. Hidrogen *analyzer* dan aliran pendingin dimatikan.
15. Larutan KOH diukur konduktivitasnya.

Prosedur yang sama juga dilakukan untuk larutan KOH 0,02 M dan 0,05 M dengan variasi penambahan larutan metanol 2% dan 5% (%v). Pada penambahan larutan metanol diambil sampel untuk diketahui komposisi CO dan CO₂ dengan menggunakan kromatografi gas.

3.6.1 Pengukuran Konduktivitas listrik Larutan

1. Konduktometer dinyalakan.
2. Setelah *ready*, larutan standar diukur.
3. Elektroda dibilas dengan aquadest.
4. Setelah *ready*, diukur konduktivitas listrik larutan KOH 0,01 M, dicatat.
5. Elektroda dibilas dengan aquadest.
6. Konduktometer dimatikan.

Prosedur yang sama juga dilakukan untuk larutan KOH 0,02 dan 0,05 M dengan variasi penambahan larutan metanol 2% dan 5% (%v).

3.7 Prosedur Pengambilan Data Percobaan

Data utama yang akan didapatkan dari percobaan ini adalah data kandungan hasil elektrolisis yaitu gas hidrogen dan gas oksigen berdasarkan sejumlah variabel bebas yang telah dibahas pada bagian pengujian variabel, energi yang dikonsumsi diukur dengan alat *power analyzer*, gas hidrogen yang dihasilkan diukur dengan hidrogen *analyzer* diperoleh komposisi hidrogen tersebut dan laju alir gas diukur dengan *buble soap analyzer*, sedangkan pengukuran konsentrasi dari hasil gas hidrokarbon, N₂ dan CO₂ keluaran reaktor dengan menggunakan

GC. Berikut prosedur pengoperasian GC dalam rangka pengambilan data percobaan sampel.

3.7.1 Preparasi GC

Memanaskan GC kurang lebih 1 hari untuk GC yang sudah lama tidak dipakai dan kurang lebih 15 menit untuk GC yang sering dipakai untuk menstabilkan dan memanaskan agar kotoran-kotorannya terbawa.

Prosedur mengalirkan gas Argon

- Pastikan tekanan input dan output di regulator berada pada angka 0 dan tidak ada kebocoran pada sambungan-sambungannya.
- Buka valve utama dari kencang menjadi kendur, sehingga tekanan akan langsung naik.
- Buka valve regulator dari kendur menjadi kencang sehingga tekanan akan naik perlahan-lahan.

Prosedur membuka tabung gas:

1. Pastikan tekanan input dan output di regulator, jarum pressure gauge menunjukkan 0 dan valve dalam keadaan tertutup (posisi valve longgar)
2. Buka valve induk di tabung dengan memutar ke arah kiri (arah kebalikan jarum jam) dan Mutt tekanan gas, yang rnenunjukkan 'ekanan dalam tabung.
3. Buka valve regulator perlahan-lahan ke arah kanan (searah jarum jam), lalu atur tekanan gas yang diinginkan.
4. Pastikan instalasi gas baikdari tabung sampai perpipaan tidak bocor (cek kebocoran menggunakan pipa sabun).
5. Untuk gas-gas yang beracun dan mudah terbakar (CO , H_2 , CH_4), langkah 4 harus dilakukan terlebih dahulu sebelum langkah 1 menggunakan gas inert N_2 .

Prosedur Menutup Gas

1. Tutup valve induk di tabung dengan memutar ke arah kanan (searah jarum jam) tunggu hingga tekanan gas di pressure gauge menunjukkan 0.

2. Tutup valve diregulator pelan-pelan ke arah kiri (arah kebalikan jarum jam) sampai valve longgar dan tunggu tekanan gas dipressure gauge sampai menunjukkan simbol 0.

Prosedur Menyalakan GC

1. Pastikan tekanan primary 600 kPa, *carrier gas* \pm 150.
2. Mengatur suhu menjadi 130— 100— 100.
3. Menunggu hingga stabil (lampu berkedip-kedip).
4. Menyalakan current 6 mA.

Prosedur menyalakan chromatopac:

1. Menghubungkan chromatopac dengan GC, tekan: shift down bersamadengan I,N,I ,lalu tekan enter,akan muncul initialize.
2. Mengatur tinta di sebelah kiri, tekan: shift down bersama dengan plot, lalu tekan enter, untuk mengatur gunakan "*coarse*" kemudian tekan kembali shift down bersama dengan plot,lalu tekan enter.
3. Input attenuasi. Jika attenuasi kecil maka segala impurities akan terlihat "peak"nya, schingga digunakan attenuasi yang agak besar, tekan: attn bersama dengan angka 7, lalu tekan enter.
4. Mengatur kecepatan kertas, tekan: speed bersama dengan angka 10, lalu tekan enter.
5. Mengatur stop time,tekan: stop time bersama dengan angka 5 lalu tekan enter,
6. Untuk inelihat parameter-parameter yang ada, tekan: shift down bersama dengan print dan width. lalu tekan enter.
7. Mengetahui apakah GC sudah stabil (garis lurus), tekan: shift bersama dengan plot, lalu tekan enter. Kestabilan juga dapat dilihat dari tekan: print bersama ctrl dan width secara bersamaan. Nilai yang keluar harus lebih besar dari 100, jika belum mencapai, maka coarse atau fine diputar untuk mendapatkan hash yang diinginkan.

Prosedur mematikan GC:

1. Mematikan *current*.
2. Menurunkan temperatur menjadi 30-30-30 kemudian GC dibuka agar pendinginan terjadi lebih cepat.
3. Setelah suhu kolom menjadi 80 (pada indikator) kemudian GC baru dapat dimatikan.

Prosedur mematikan aliran gas sesuai dengan prosedur menutup gas.

3.8 Hasil Uji Peralatan Sistem Produksi Hidrogen.

Variabel proses yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi parameter suhu, tegangan listrik, konsentrasi KOH dan konsentrasi metanol dan metanol (yang digunakan sebagai aditif) terhadap kinerja proses elektrolisis plasma.

Variabel-variabel bebas dalam penelitian ini meliputi suhu, tegangan listrik, konsentrasi KOH dan konsentrasi metanol dan metanol (yang digunakan sebagai aditif). Variabel terikatnya adalah besarnya konsumsi energi listrik yang digunakan dalam proses, laju produksi hidrogen, dan jumlah mol hidrogen dalam bentuk perbandingan dengan produk hasil elektrolisis dengan hukum Faraday.

Kinerja proses elektrolisis plasma meliputi:

- Konsumsi energi listrik : yaitu jumlah energi listrik (C) yang digunakan selama 300 detik produksi hidrogen dan dirumuskan sebagai berikut :

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{P}{V} = \frac{\text{whr}}{\text{volt}} \quad (3.1)$$

Dimana P = kebutuhan energi selama 1 jam (Whr)

$$Q \text{ (C)} = I \text{ (ampere)} \times 300 \text{ (detik)}$$

$$W_r = \frac{VQ}{V_{\text{gas}}} \text{ kJ.L}^{-1} \quad (3.2)$$

Dimana VQ = P selama proses elektrolisis berlangsung

$$V_{\text{gas}} = \text{laju alir gas hidrogen}$$

- Laju alir produksi gas hidrogen

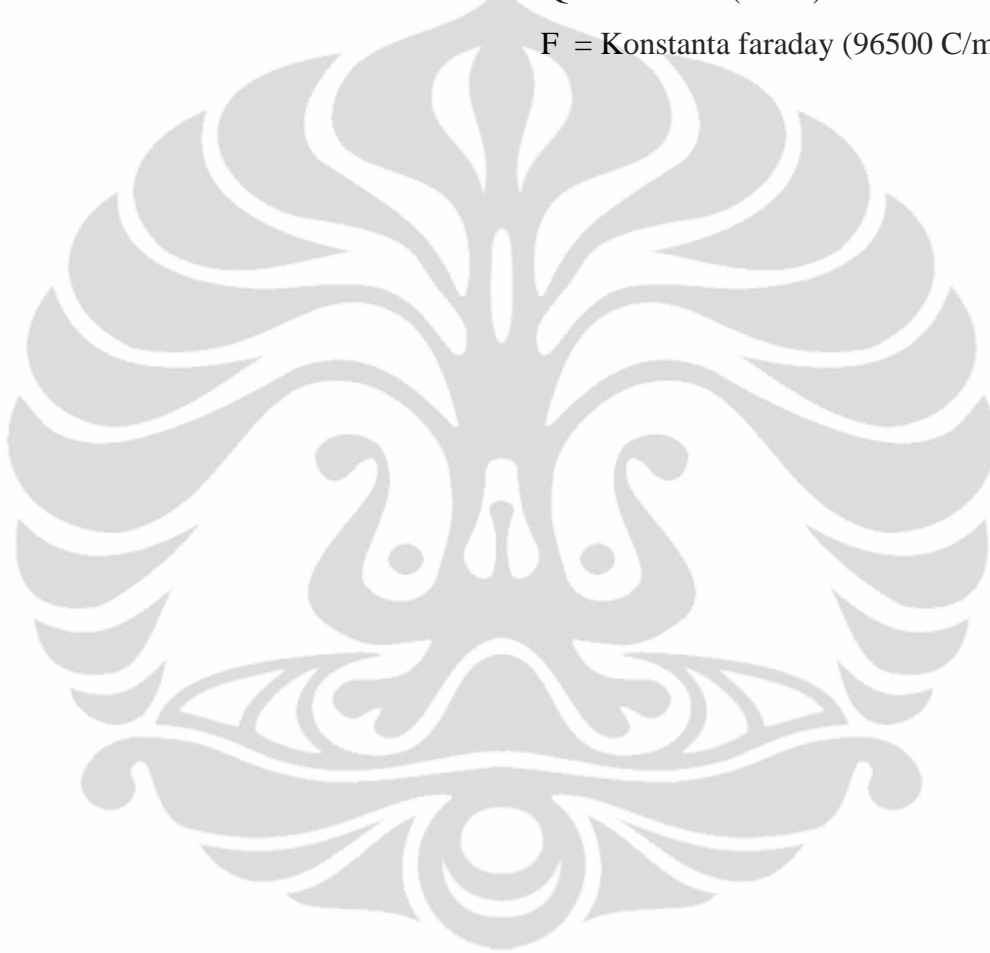
$$\text{laju produksi H}_2 \text{ (mmol/menit)} = \frac{\text{jumlah mol Hidrogen}}{\text{waktu proses elektrolisis plasma}} \quad (3.3)$$

- 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 :

$$(H_2)/(H_2)_F = \frac{V_{gas}/22,4}{Q/2F} \quad (\text{mol/mol}) \quad (3.4)$$

Dimana Q = Coulomb (A.sec)

F = Konstanta faraday (96500 C/mol)



BAB 4 PEMBAHASAN

Pada bagian pembahasan ini akan dibahas segala fenomena yang terjadi pada larutan di dalam reaktor sejak awal (sebelum terbentuk plasma) hingga plasma yang dihasilkan stabil. Pengaruh variabel proses meliputi tegangan listrik, konsentrasi larutan KOH serta penambahan aditif metanol terhadap konsumsi listrik, produktivitas hidrogen yang dihasilkan, dan nilai rasio antara elektrolisis Faraday dengan elektrolisis plasma. Pada bab ini juga dibahas mengenai perbandingan kinerja elektrolisis plasma terhadap elektrolisis Faraday dan komposisi produk gas yang dihasilkan pada elektrolisis plasma dengan penambahan aditif.

4.1 Fenomena Pembentukan Plasma

Fenomena terbentuknya plasma pada proses elektrolisis plasma karena dilakukan pada tegangan listrik tinggi pada suhu tertentu sehingga menyebabkan loncatan listrik (bunga api listrik) akibat adanya elektron yang tereksitasi pada larutan yang mempunyai konduktivitas listrik cukup tinggi. 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). Penggunaan tabung katoda pada penelitian ini adalah sebagai penghubung antara fasa *liquid* dan fasa gas di daerah terbentuknya plasma yaitu disekeliling katoda dan juga sebagai media sirkulasi antara cairan yang ada didaerah anoda dengan cairan yang ada didaerah katoda agar plasma yang terbentuk menjadi lebih stabil. Pijaran plasma yang dihasilkan dominan berwarna ungu jika menggunakan larutan KOH 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. Sedangkan warna yang plasma yang terbentuk jika menggunakan larutan KOH dengan penambahan aditif yaitu larutan metanol adalah biru seperti pada Gambar 4.2. Hal ini disebabkan adanya ion hidrokarbon dimana atom karbon bila tereksitasi akan memancarkan warna biru-putih (Barros, 2008).



Gambar 4.1. Warna plasma larutan KOH



Gambar 4.2. Warna plasma dengan penambahan aditif

Proses elektrolisis Faraday berlangsung hingga suhu mendekati 66°C (pada tegangan listrik 150 V). Pada suhu 64°C pada tegangan listrik awal 150 V, mulai terbentuk bunga api plasma pada katoda di dalam ruang katoda. Saat plasma mulai terbentuk pada katoda, diiringi dengan turunnya arus secara tiba – tiba.. Setelah plasma terbentuk, arus menjadi tidak stabil dengan kecenderungan menurun. Hal ini terjadi karena pada saat plasma muncul, terbentuk 2 fasa di dalam reaktor yaitu fasa larutan (bersifat konduktif) dan gas. Kemunculan plasma kemudian akan membuat konduktivitas listrik larutan menjadi lebih kecil dan akibatnya arus yang melewati larutan akan menurun. Arus yang turun menyebabkan konsumsi energi juga menurun karena daya listrik berbanding lurus dengan arus dan tegangan listrik.

Arus yang turun pada saat plasma muncul, juga dapat dijelaskan menggunakan teori peningkatan tahanan larutan saat suhu larutan semakin tinggi. Dari persamaan 4.1 berikut ini :

$$R = R_0 \times e^{\alpha \Delta T} \quad (4.1)$$

Dimana R, tahanan listrik, R_0 , tahanan listrik mula-mula, α , konduktivitas listrik listrik, dan ΔT , adalah perubahan suhu, dari persamaan 4.1 dapat diketahui hubungan antara tahanan dengan suhu media yang dilalui listrik. Terlihat bahwa resistensi listrik berbanding lurus dengan suhu (secara eksponensial). Semakin besar suhu, maka tahanan listrik akan semakin besar.

Karakteristik fenomena elektrolisis plasma dari awal (sebelum elektrolisis) sampai elektrolisis plasma berjalan stabil dapat dilihat pada Gambar 4.3 sampai Gambar 4.6 berikut ini:



Gambar 4.3. Sebelum proses elektrolisis



Gambar 4.4. Proses elektrolisis berlangsung



Gambar 4.5. Awal proses elektrolisis plasma



Gambar 4.6. Proses elektrolisis plasma stabil

Pada awal (sebelum proses elektrolisis) pada Gambar 4.3 terlihat larutan KOH yang digunakan masih jernih. Produksi hidrogen juga berbeda pada saat sebelum dan sesudah terbentuk plasma. Pada saat sebelum terbentuk plasma (proses elektrolisis), hidrogen yang diproduksi cenderung kecil dan stabil ditandai dengan adanya gelembung disekitar katoda dan larutan KOH. Secara visual terlihat keruh yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Sedangkan pada saat sesudah terbentuk plasma (awal elektrolisis plasma), sudah mulai terbentuk plasma berwarna ungu kemerahan dan larutan KOH secara visual tampak keruh ditunjukkan pada Gambar 4.5. Hal tersebut mengindikasikan bahwa larutan yang dipakai sudah mulai jenuh oleh gas H_2 dan O_2 yang terbentuk. Laju alir yang dihasilkan akan semakin besar dan tidak stabil. Ketidakstabilan juga dipengaruhi oleh besar kecilnya wujud plasma. Semakin besar wujud plasma, maka produksi hidrogen akan semakin besar. Pada kondisi plasma yang besar, pembentukan radikal – radikal $\bullet OH$, $\bullet H$, dan $\bullet OH_2$ semakin intensif sehingga produksi gas hidrogen pun semakin besar yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. besar kecilnya wujud plasma dipengaruhi oleh tegangan listrik dan konsentrasi larutan yang akan di bahas pada subbab 4.2.

Kemunculan plasma juga diiringi suara gemuruh yang muncul dari reaktor yang disebabkan oleh terbentuknya fasa gas di dalam reaktor ditunjukkan pada

Gambar 4.5 dan Gambar 4.6. Munculnya suara gemuruh ini tidak dipermasalahkan selama arus tidak melebihi 10 A (spesifikasi *power analyzer* hanya mampu digunakan hingga arus 10 Ampere) dan daya tidak melebihi 3000 Watt (slide regulator yang digunakan memiliki spesifikasi untuk daya maksimal 3000 Watt). Terbentuknya plasma sangat dipengaruhi oleh tegangan listrik yang digunakan pada proses elektrolisis plasma, pengaruh tegangan listrik terhadap waktu pembentukan plasma dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Pengaruh tegangan listrik terhadap waktu pembentukan plasma

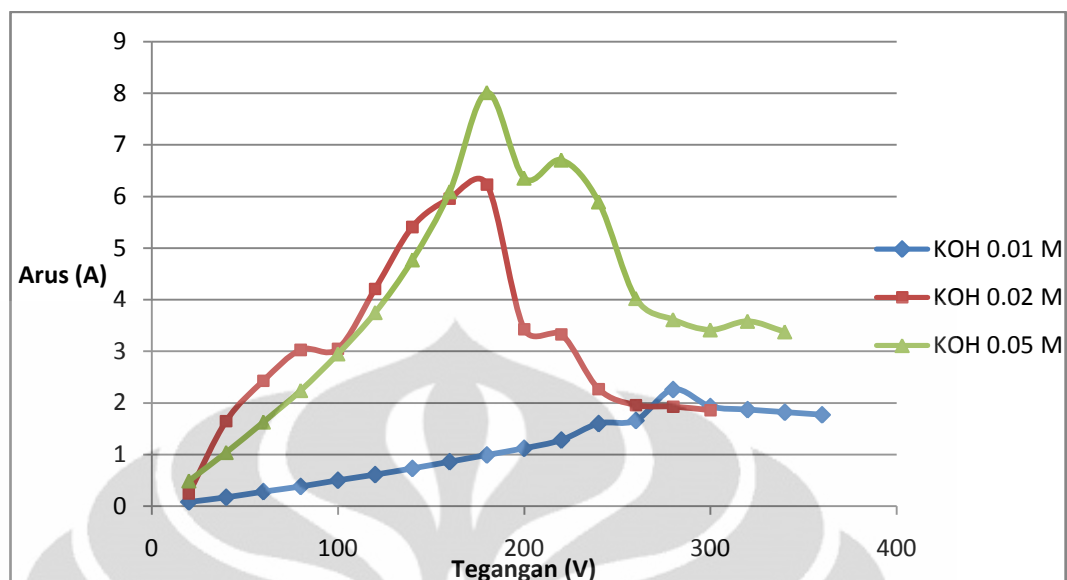
Tegangan listrik (V)	Bentuk plasma	Waktu (detik)	Suhu (°C)
150	kecil	67	66
180	sedang	39	51
225	Cukup besar	31	50
240	besar	24	49

Pada Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan maka akan semakin sedikit waktu yang dibutuhkan untuk pembentukan plasma, hal ini disebabkan tegangan listrik yang tinggi akan memicu proses penjenahan ikatan molekul air (H_2O). Pada tegangan listrik 240 V waktu yang dibutuhkan untuk pembentukan plasma adalah 24 detik artinya sebelum waktu tersebut berlangsung proses elektrolisis faraday yang ditandai adanya gelembung di sekitar katoda artinya terjadi penjenahan ikatan molekul H_2O ditunjukkan pada Gambar 4.3. Tabel 4.1 juga menunjukkan hubungan suhu sesaat terbentuknya plasma dengan tegangan listrik, semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan untuk proses elektrolisis plasma maka suhu pada saat terbentuknya plasma juga semakin rendah. Sementara tegangan listrik juga mempengaruhi bentuk plasma yaitu semakin besar tegangan listrik yang digunakan pada penelitian ini maka akan semakin banyak elektron yang mengalami eksitasi (loncatan listrik) sehingga akan mempengaruhi bentuk plasma menjadi semakin besar. Pada Tabel 4.1 menunjukkan pada tegangan listrik 240 V plasma terbentuk paling besar

Ketika plasma mulai terbentuk maka arus yang terbaca pada *power analyzer* akan turun secara gradual sampai mencapai angka tertentu. Penurunan arus ini dapat dijadikan indikasi awal bahwa plasma sudah mulai terbentuk. Pada Gambar 4.7 dapat dilihat profil arus terhadap tegangan listrik ketika terjadi proses

elektrolisis plasma. Sebelum mencapai tegangan listrik minimum untuk terbentuk plasma maka arus akan terus naik dengan kenaikan tegangan listrik. Sampai pada titik tertentu arus akan turun ditandai dengan bunyi plasma dan diikuti dengan pijaran plasma pada katoda. Jika terus dinaikkan maka arus akan turun sampai pada titik tertentu akan stabil (penurunan yang terjadi tidak signifikan). Ketika arus sudah mulai stabil maka dapat diindikasikan bahwa plasma yang terbentuk sudah stabil dan data dapat di ambil.

Pada Gambar 4.7 juga terlihat bahwa semakin besar konsentrasi larutan yang digunakan maka arus listrik maksimum sebelum terbentuk plasma semakin besar. Pada percobaan tahun sebelumnya digunakan konsentrasi KOH yang cukup besar yaitu hingga 0,15 M yang menyebabkan arus maksimum sebelum terbentuk plasma akan melebihi 10 A. Kendala yang terjadi adalah peralatan dalam percobaan (*Trafo, Power Analyzer, dan Slide Regulator*) arus yang digunakan tidak boleh melebihi 10 A sehingga harus dilakukan pengendalian arus sebelum terbentuk plasma. Ketika plasma mulai terbentuk arus akan turun secara drastis sehingga peralatan akan cukup aman walaupun pada tegangan listrik yang tinggi. Tetapi seringkali plasma yang terbentuk tidak stabil sehingga ketika plasma tiba-tiba mati arus akan naik jauh melebihi batas kemampuan peralatan yang menyebabkan rusaknya peralatan dan resiko bahaya ledakan atau kebakaran. Dengan menurunkan konsentrasi KOH tegangan listrik yang digunakan juga dapat ditingkatkan. Ketika konsentrasi KOH cukup besar (di atas 0,05 M) tegangan listrik maksimum yang dapat dicapai dan sistem dalam keadaan stabil adalah 300 V. Dengan menurunkan konsentrasi hingga 0,05 M reaktor ini dapat berjalan stabil sampai tegangan listrik 350 V. Karena tegangan listrik merupakan variabel penting dalam percobaan ini maka kenaikan tegangan listrik tersebut sangat berarti untuk menaikkan $G(H_2)$. Pada percobaan tahun sebelumnya $G(H_2)$ tertinggi yang didapat adalah 21,80 untuk KOH 0,1 M + etanol 10% sedangkan pada percobaan ini didapat $G(H_2)$ sebesar 27,29 untuk KOH 0,05 + 5% metanol.



Gambar 4.7. Profil Arus-Tegangan listrik pada Elektrolisis Plasma

4.2 Pengaruh Variabel-Variabel Operasi

Variabel-variabel operasi meliputi tegangan listrik (V) dan konsentrasi larutan akan diketahui pengaruhnya dalam penelitian ini. Data – data yang digunakan dalam pembahasan pengaruh variabel-variabel operasi ini antara lain nilai produksi hidrogen (mmol/menit), konsumsi listrik selama proses elektrolisis plasma berlangsung (Whr), dan rasio antara elektrolisis plasma dengan elektrolisis faraday G (mol/mol). Data data tersebut diklasifikasikan kedalam dua bagian yaitu *data primer* (data yang diperoleh melalui pengamatan/terukur oleh alat dalam setiap percobaan) dan *data sekunder* (data yang diperoleh melalui perhitungan/pengolahan dari *data primer*). Dalam percobaan ini diperoleh data tegangan listrik (V), konsumsi energi (Wr), laju alir hidrogen (Q), komposisi hidrogen (%mol), konduktivitas listrik (C), waktu proses (t), dan suhu operasi (T) yang termasuk kedalam data primer sementara arus rata-rata (I), daya (P), produksi hidrogen, dan nilai rasio antara elektrolisis Faraday dengan elektrolisis plasma (G(H₂)). Adapun untuk data selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 1.

Pada saat reaktor baru menyala, yang terjadi adalah proses elektrolisis biasa (tanpa plasma) dengan laju alir gas kecil dan persentase hidrogen yang dihasilkan juga kecil. Besarnya ruang (kondenser dan absorber) yang harus diisi oleh hidrogen juga menyebabkan laju alir produk mulanya kecil. Selain itu, hidrogen

analyzer GNL-400F hanya dapat menganalisa gas dengan laju alir 350 – 450 mL/menit. Hal inilah yang menyebabkan produksi gas hidrogen pada mulanya akan rendah kemudian naik dengan bertambahnya gas hidrogen di dalam reaktor.

Pada aspek kuantitatif ini akan dibahas hubungan antara produksi hidrogen, konsumsi listrik, dan rasio produktivitas hidrogen (plasma dengan faraday) terhadap tegangan listrik, dan konsentrasi larutan KOH serta pengaruh penambahan aditif.

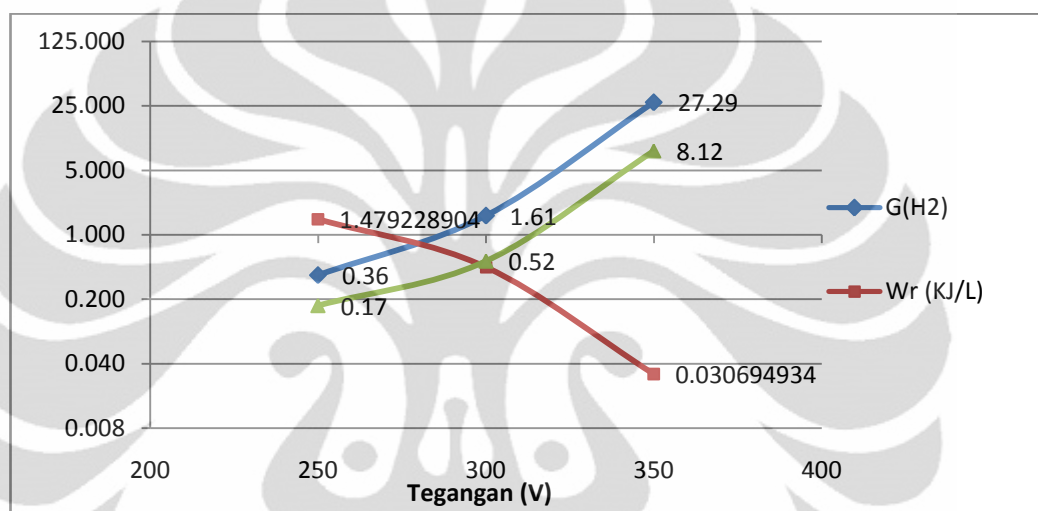
Pada awal pengambilan data, jumlah gas hidrogen yang dihasilkan belum signifikan. Hal ini terjadi karena laju alir gas produk pun masih kecil. Laju alir gas produk yang kecil, akan menyebabkan udara dari luar berdifusi ke dalam gas produk. Difusi ini tentu saja akan menurunkan jumlah gas hidrogen yang diperoleh. Peristiwa difusi ini akan berkurang seiring dengan bertambahnya laju alir gas produk sehingga dapat mendorong udara yang telah berdifusi dan udara yang masih terperangkap dalam rangkaian pembangkit elektrolisis plasma) dengan gas produk keluar dari saluran.

4.2.1 Pengaruh Tegangan listrik Terhadap Produksi Hidrogen, W_r , dan $G(H_2)$

Pada Gambar 4.7 terdapat grafik yang menunjukkan hubungan antara produksi hidrogen (mmol/menit), W_r (konsumsi energi tiap volume H_2 (KJ/L)), dan $G(H_2)$ dengan tegangan listrik pada percobaan. Adapun $G(H_2)$ sendiri adalah perbandingan produktivitas hidrogen pada elektrolisis plasma dengan produktivitas hidrogen pada elektrolisis faraday. Jika nilai $G(H_2)$ lebih besar dari 1, artinya produktivitas elektrolisis plasma lebih baik daripada elektrolisis faraday, sedangkan jika kurang dari 1, artinya produktivitas elektrolisis faraday lebih baik daripada elektrolisis plasma. Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung $G(H_2)$ dapat dilihat pada Lampiran 3.

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 di kedua ujung anoda dan katoda semakin penuh dengan elektron, tegangan listrik 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 listrik yang diberikan ke aliran. Peningkatan tegangan listrik akan berpengaruh pada peningkatan kerapatan elektron maka proses eksitasi akan bertambah sehingga akan lebih banyak gas hidrogen yang dihasilkan pada dekomposisi air (Zongcheng Yan, et al) dan dinyatakan juga oleh Mizuno (2005) perubahan tegangan listrik akan mempengaruhi rasio H_2 dan O_2 , bila tegangan listrik dinaikkan maka akan bertambah pula rasio H_2 dan O_2 seiring dengan bertambahnya waktu.



Gambar 4.8. Grafik Rasio Produktivitas Hidrogen, Produksi Hidrogen, dan Wr dalam Konsentrasi KOH 0,05 M + 5% metanol Sebagai Fungsi Tegangan listrik

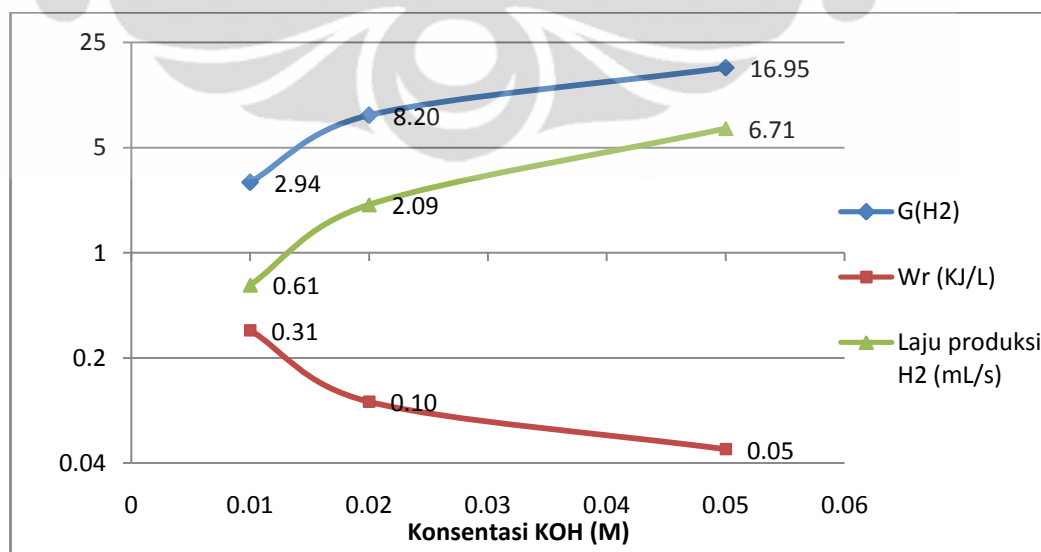
Gambar 4.8 menunjukkan bahwa semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan dalam percobaan maka akan semakin tinggi nilai rasio $G(H_2)$ dan produksi hidrogen yang diperoleh, artinya nilai $G(H_2)$ dan produksi hidrogen berbanding lurus dengan besarnya tegangan listrik. Selain itu juga tegangan listrik juga sangat mempengaruhi parameter lain yaitu konsumsi energi. Semakin tinggi tegangan listrik maka akan semakin menurunkan konsumsi energi listrik (KJ/L), artinya konsumsi energi listrik berbanding terbalik dengan besarnya tegangan listrik. Hal ini disebabkan akibat semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan maka akan semakin banyak ion yang mengalami eksitasi sehingga menurunkan arus listrik. Penurunan arus tersebut diiringi dengan peningkatan laju produksi sehingga konsumsi energi listrik akan mengalami penurunan sehingga peningkatan $G(H_2)$ akan terjadi secara drastis. Jadi peran tegangan listrik pada percobaan ini sangat krusial dalam peningkatan efektifitas dalam memproduksi

hidrogen dibandingkan faktor lain. Kondisi operasi dibatasi hingga tegangan listrik 350 V dengan memperkecil konsentrasi KOH yang digunakan untuk faktor keamanan. Jika konsentrasi KOH yang digunakan lebih besar dari 0,05 M maka rangkaian reaktor elektrolisis plasma akan menjadi tidak stabil pada tegangan listrik 350 V.

4.2.2 Pengaruh Konsentrasi Larutan KOH Terhadap Produksi Hidrogen, W_r , dan $G(H_2)$

Bertambahnya konsentrasi akan menyebabkan bertambahnya konduktifitas listrik larutan yang menambah aktifitas pembentukan radikal (Jinzang, et al 2008).

Dari grafik Gambar 4.9, dapat dilihat bahwa semakin tinggi konsentrasi KOH maka meningkatkan nilai $G(H_2)$. Hal ini terjadi karena konsentrasi KOH yang semakin besar tentu diiringi pula dengan membesarnya wujud plasma. Plasma yang semakin membesar akan menyebabkan kenaikan produksi radikal $\bullet H$ yang kemudian akan menyebabkan kenaikan produksi hidrogen (seperti yang telah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya). Sehingga dengan bertambahnya konsentrasi larutan akan menyebabkan kenaikan produktivitas dari hidrogen. Sedangkan pada konsumsi energi listrik semakin besar konsentrasi larutan yang digunakan maka akan menurunkan konsumsi energi listrik akibat besarnya laju produksi hidrogen lebih besar daripada peningkatan daya (W_{hr}).



Gambar 4.9. Grafik Rasio Produktivitas Hidrogen, Produksi Hidrogen, dan W_r dalam Tegangan listrik 350 V Sebagai Fungsi Konsentrasi larutan KOH

Pengaruh konsentrasi akan sebanding dengan konduktifitas listrik larutan, semakin besar konduktifitas listrik suatu larutan mengindikasikan konsentrasi yang digunakan juga tinggi. Pengaruh konduktifitas listrik larutan sebelum dan setelah proses elektrolisis plasma dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data konduktifitas listrik larutan sebelum dan setelah proses elektrolisis plasma

Jenis Larutan	Konduktifitas listrik mS/cm	
	Sebelum proses elektrolisis	Setelah proses elektrolisis
KOH 0,01 M	2,07	2,30
KOH 0,02 M	3,84	4,22
KOH 0,05 M	12,52	13,48

Berdasarkan Tabel 4.2 dijelaskan bahwa konduktifitas listrik larutan akan meningkat setelah proses elektrolisis plasma hal ini disebabkan karena pada saat elektrolisis plasma berlangsung air yang digunakan akan mengalami pemutusan rantai untuk membentuk H_2 dan O_2 dan sebagian menguap menjadi uap air karena pengaruh suhu sehingga volum pelarut (H_2O) berkurang sedangkan KOH cenderung tetap sehingga konsentrasi KOH meningkat dan konduktifitas listrik juga meningkat.

4.2.3 Perbandingan Kinerja Elektrolisis Plasma Yang Menggunakan Larutan KOH Dengan Elektrolisis Plasma Dengan Penambahan Aditif

Elektrolisis plasma yang menggunakan larutan KOH adalah larutan yang digunakan sebagai dasar dari percobaan ini. Hal ini karena kalium tidak terurai selama proses elektrolisis plasma ini, berbeda dengan natrium (Ph. M. Kanarev. et al., 2003) sehingga peran KOH dalam meningkatkan konduktifitas listrik larutan tidak hilang selama reaksi. Sedangkan penambahan aditif dalam percobaan ini larutan metanol ditujukan untuk meningkatkan produksi hidrogen karena larutan tersebut berfungsi menyumbangkan spesi-spesi aktif $H\bullet$ dan $OH\bullet$ yang nantinya akan mendorong pemutusan ikatan dalam dekomposisi air. Zongcheng, et al (2008) Teknologi elektrolisis plasma dengan menggunakan larutan metanol menghasilkan efisiensi yang tinggi untuk memproduksi hidrogen dengan emisi gas CO & CO_2 yang rendah. Pada Tabel 4.3 menunjukkan perbandingan antara elektrolisis plasma tanpa penambahan aditif dan dengan penambahan aditif.

Tabel 4.3. Data perbandingan kinerja antara elektrolisis plasma tanpa penambahan aditif dengan penambahan aditif pada KOH 0,05M dengan tegangan listrik 350 V

Jenis Larutan	Hanya KOH	KOH + 2% metanol	KOH + 5% metanol
Produksi Hidrogen (mmol/menit)	15,66	16,88	21,76
Konsumsi Energi (KJ/L)	0,056	0,045	0,031
G _{H₂} (mol/mol)	14,76	18,65	27,29
Konsentrasi CO (%mol)	-	0,113	0,274
Konsentrasi CO ₂ (%mol)	-	-	0,079

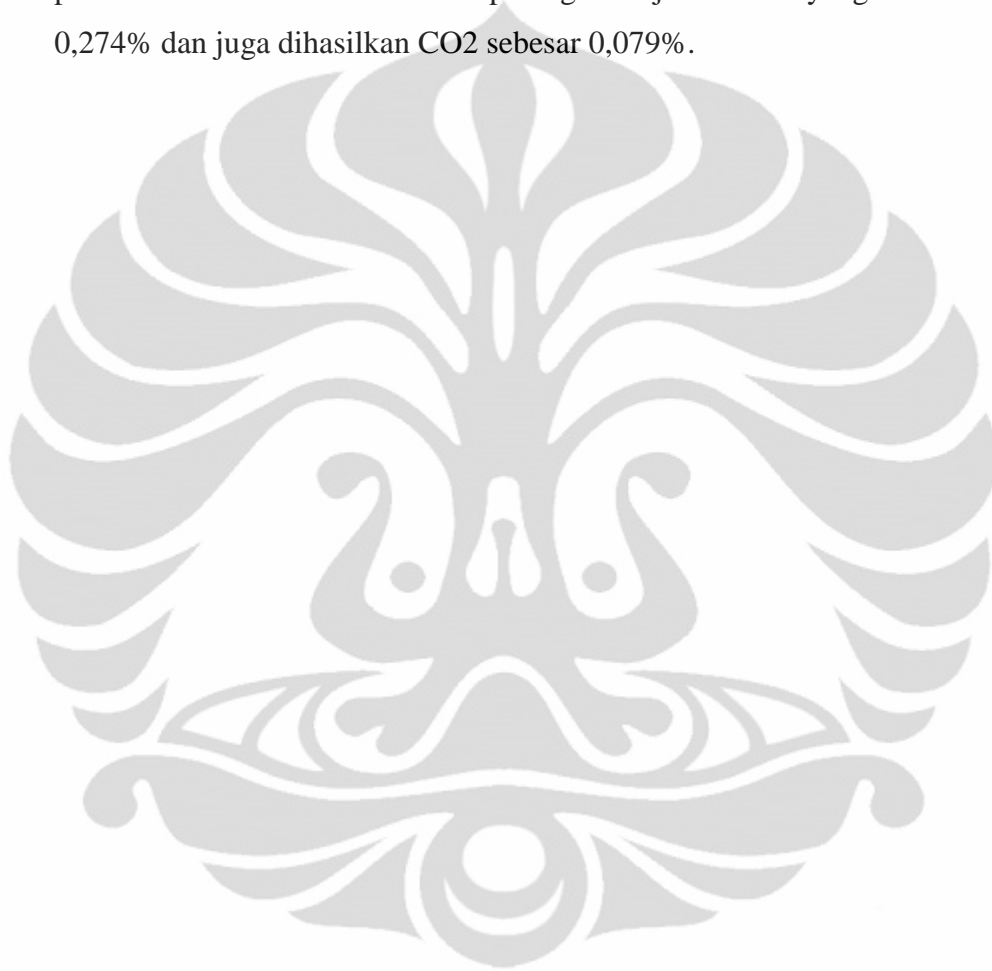
Metanol berfungsi sebagai inisiator dalam pembentukan radikal aktif sehingga energi aktivasi untuk pemutusan ikatan H₂O menjadi lebih rendah. Berdasarkan data elektrolisis aktual pada Tabel 4.3, terlihat bahwa data hasil percobaan dengan penambahan aditif (metanol 5% (%v)) lebih besar sampai 1.6 kali dari elektrolisis plasma tanpa penambahan aditif. Terlihat, produksi hidrogen dan besarnya nilai G(H₂) pada elektrolisis tanpa penambahan aditif (hanya larutan KOH 0,05 M) mendapatkan hasil berturut-turut yaitu 17,98 (mmol/menit) dan 16,95 (mol/mol) sedangkan pada elektrolisis plasma dengan penambahan aditif metanol 5% (%v) diperoleh hasil berturut-turut sebesar 21,76 (mmol/menit) dan 27,29 (mol/mol).

Penambahan metanol akan mempengaruhi kinerja proses sehingga membuat peningkatan nilai produksi dan G(H₂). Nilai G(H₂) terbaik pada penelitian ini adalah pada elektrolisis plasma dengan menggunakan larutan KOH 0,05 M dengan penambahan metanol 5% (%v) dan pada tegangan listrik 350 V yang besarnya mencapai 27,29.

Elektrolisis plasma dengan menggunakan penambahan larutan metanol selain menghasilkan produk berupa gas hidrogen dan oksigen juga menghasilkan produk lain. Hal tersebut disebabkan oleh mekanisme dekomposisi dari penambahan larutan metanol tersebut tidak hanya melibatkan radikal H• dan OH• tetapi juga melibatkan radikal lain yang dapat dilihat pada Persamaan 2.9 sampai 2.15 pada Bab 2 untuk mekanisme dekomposisi metanol pada elektrolisis plasma ion positif yang paling banyak dihasilkan pada ionisasi molekul metanol pada percobaan tersebut adalah H⁺, CH₃CH₂OH⁺, CH₃CH₂⁺, CH₂ CH₂OH⁺, CH₃OH⁺, CH₂OH⁺ (Zongcheng, et al 2008). Produk dan komposisi gas yang

dihasilkan dari proses elektrolisis plasma ini dipengaruhi oleh komposisi penambahan aditif (larutan metanol) dalam larutan.

Tabel 4.3 menunjukkan bahwa dihasilkan produk gas lain selain H_2 dan O_2 yaitu hidrokarbon CO dan CO_2 . Pada penambahan metanol 2 % dihasilkan gas CO sebesar 0,113% dan tidak terdeteksi adanya CO_2 sedangkan pada penambahan metanol 5% terlihat peningkatan jumlah CO yang dihasilkan sebesar 0,274% dan juga dihasilkan CO_2 sebesar 0,079%.



BAB 5

KESIMPULAN

Pada Bab 5 ini, akan dijelaskan kesimpulan dan saran dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

5.1 Kesimpulan

1. Munculnya plasma selalu diawali dengan proses penjenuhan gas, sedangkan bentuk dan wujud plasma dipengaruhi oleh tegangan listrik, konsentrasi dan jenis larutan elektrolit yang digunakan.
2. Produktivitas hidrogen dan konsumsi energi listrik akan meningkat seiring dengan meningkatnya tegangan listrik dan konsentrasi larutan KOH.
3. Semakin tinggi konsentrasi elektrolit yang digunakan maka arus maksimum sebelum terbentuk plasma akan semakin besar.
4. Nilai $G(H_2)$ tertinggi yaitu pada elektrolisis plasma dengan menggunakan larutan 0,05 M KOH dengan penambahan larutan metanol 5% pada tegangan listrik 350 V sebesar 27,29 (mol/mol).
5. Penambahan larutan metanol akan meningkatkan produktivitas dan nilai $G(H_2)$ sampai 1,6 kali.
6. Elektrolisis plasma dengan penambahan larutan metanol akan menghasilkan produk samping berupa emisi gas CO dan CO₂ dalam kadar rendah.

5.2. Saran

1. Pada rangkaian, baik apabila *flowmeter* yang digunakan digital dan rangkaian terpasang secara online.
2. Perbaiki peralatan yang digunakan agar bisa dilakukan elektrolisis pada tegangan listrik yang jauh lebih tinggi.

DAFTAR REFERENSI

Steinberg, Michael. (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.

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, Jamelyn D., J. Hu, D.L. King, Y. Wang. (2009). “An overview of hydrogen production technologies”, Catalysis Today 139 (2009) 244–260.

Saksono, Nelson., Bagus, S U., Setidjo Bismo., (2010) ” Rancang bangun sistem produksi hidrogen melalui porses elektrolisis plasma non-termal” Proceeding Seminar rekayasa proses, UNDIP, Semarang.

Saksono, Nelson., Jaenal Abidin., Setidjo Bismo., (2010) ”Hydrogen production system design through plasma non-termal electrolysis process” International Seminar on Fundamental & Application Of Chemical Engineering, Bali.

Mizuno, Tadahiko., 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.

Kanarev, Phillip M. and Tadahiko Mizuno (2003), “*Cold Fusion by Plasma Electrolysis of Water*”, Krasnodar.

Chaffin, John H., Sthepen M. Bobbio, Hillary, Inyang, Life Kaanagbara (2006). “*Hydrogen Production By Plasma Electrolysis*”. ASCE: 0733-9402.

Yan, Zongcheng., Li, C., Wang Hong Lin W H., (2006). “Experimental Study of Plasma Under-liquid Electrolysis in Hydrogen Generation”. College of Chemical and Energy Engineering, South China University of Technology, Guangzhou.

Yan, Zongcheng., Li, C., Wang Hong Lin W H., (2008). “ Hydrogen generation by glow discharge plasma electrolysis of methanol solutions”. International journal of hydrogen energy, vol 34 pp : 48 – 55.

Yan, Zongcheng., Li, C., Wang Hong Lin W H., (2008). “ Hydrogen generation by glow discharge plasma electrolysis of ethanol solutions”. College of Chemical and Energy Engineering, South China University of Technology, Guangzhou.

Paulmier, T. L. Fulcheri, Chemical Engineering Journal 106 (2005) 59–71.

Roth, J.R. (2001). “Applications to Nonthermal Plasma Processing”, Industrial Plasma Engineering vol :2, IOP Publsh Philadelphia.

Kogelschatz, Ulrich. (2004). Atmospheric-Pressure Plasma Technology, Plasma Phys. Controlled Fusion 46 B63–B75.

Barros, Sam. (3 Maret 2008). Power Labs Plasma Globes Page. <http://www.powerlabs.org/plasmaglobe.htm>. Diakses 8 Mei 2010.

Salimy, D.H., Ida N Finahari., (2008) “Perbandingan produksi hidrogen dengan energi nuklir proses elektrolisis dan *steam reforming*” Seminar nasional IV, Yogyakarta.

Li, Juan., Andrei Kazakov., Frederick L. Dryer., (2004) “Experimental and numerical studies of ethanol decomposition reaction” Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Princeton University

Lampiran 1. Data Penelitian Elektrolisis Plasma

KOH 0,01 M

Tegangan listrik (V)	Laju alir (mL/s)	Komposisi (%)	WHR (5 menit)	laju produksi H ₂ (mL/s)	laju produksi H ₂ (mmol/min)	I	G(H ₂)	Wr
300	1,581	13,893	46,900	0,220	0,588	1,876	1,009	0,711602
350	5,543	18,557	48,150	1,029	2,755	1,650857143	5,369	0,156031
375	3,676	16,580	55,827	0,610	1,633	1,786472727	2,940	0,305288

KOH 0,02 M

Tegangan listrik (V)	Laju alir (mL/s)	Komposisi (%)	WHR (5 menit)	laju produksi H ₂ (mL/s)	laju produksi H ₂ (mmol/min)	I	G(H ₂)	Wr
250	1,956	19,550	56,000	0,382	1,024	2,987	1,103	0,488102
300	3,036	21,327	58,075	0,648	1,735	2,323	2,402	0,298938
350	7,463	27,970	64,000	2,087	5,591	2,194	8,196	0,102205

KOH 0,05 M

Tegangan listrik (V)	Laju alir (mL/s)	Komposisi (%)	WHR (5 menit)	laju produksi H ₂ (mL/s)	laju produksi H ₂ (mmol/min)	I	G(H ₂)	Wr
225	1,859	17,850	55,350	0,332	0,889	2,952	0,968	0,556084
300	6,981	26,110	71,867	1,823	4,882	2,875	5,463	0,13143
350	16,129	36,240	99,500	5,845	15,657	3,411	14,763	0,056742

KOH 0,05 M + 2% Metanol

Tegangan listrik (V)	Laju alir (mL/s)	Komposisi (%)	WHR (5 menit)	laju produksi H ₂ (mL/s)	laju produksi H ₂ (mmol/min)	I	G(H ₂)	Wr
250	2,660	10,170	47,585	0,270	0,724	2,538	0,918	0,586429
300	2,889	18,083	54,900	0,522	1,399	2,196	2,049	0,350364
350	16,129	39,083	84,950	6,304	16,885	2,913	18,648	0,044921

KOH 0,05 + 5% Metanol

Tegangan listrik (V)	Laju alir (mL/s)	Komposisi (%)	WHR (5 menit)	laju produksi H ₂ (mL/s)	laju produksi H ₂ (mmol/min)	I	G(H ₂)	Wr
250	1,617	10,518	75,450	0,170	0,455	4,024	0,364	1,479229
300	3,066	16,848	68,900	0,516	1,383	2,756	1,615	0,444679
350	21,053	38,584	74,800	8,123	21,758	2,565	27,290	0,030695

Lampiran 2. Data Profil Tegangan listrik-Arus

KOH 0,01 M

V	A
20	0,08
40	0,17
60	0,28
80	0,38
100	0,5
120	0,61
140	0,73
160	0,86
180	0,99
200	1,12
220	1,28
240	1,6
260	1,66
280	2,26
300	1,93
320	1,87
340	1,82

KOH 0,05 M

V	A
20	0,49
40	1,04
60	1,63
80	2,24
100	2,95
120	3,75
140	4,77
160	6,09
180	8,01
200	6,35
220	6,70
240	5,89
260	4,02
280	3,61
300	3,41
320	3,58
340	3,38

KOH 0,02 M

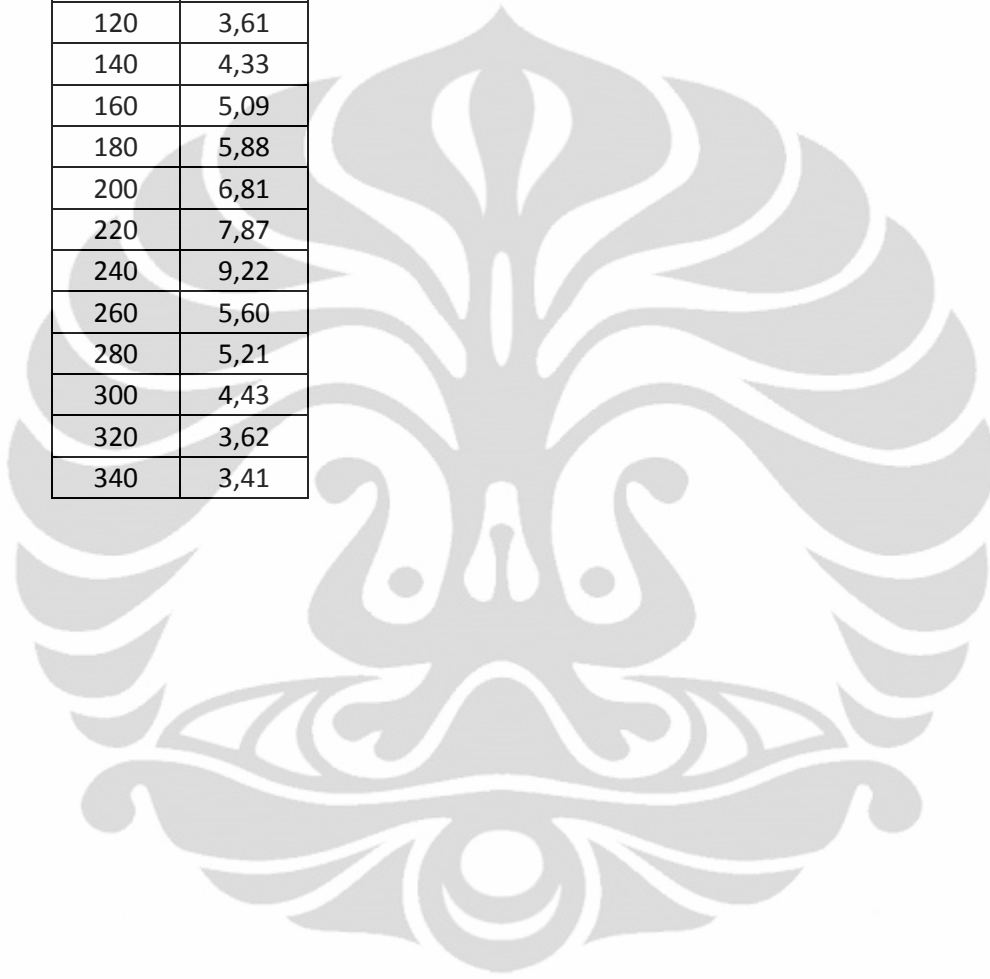
V	A
20	0,25
40	1,65
60	2,43
80	3,03
100	3,05
120	4,21
140	5,41
160	5,96
180	6,23
200	3,43
220	3,33
240	2,27
260	1,96
280	1,93
300	1,86
320	1,86
340	1,85

KOH 0,05 M + 2% Metanol

V	A
20	0,32
40	0,73
60	1,12
80	1,58
100	2,02
120	2,50
140	3,05
160	3,64
180	4,44
200	5,23
220	6,60
240	7,62
260	5,16
280	4,84
300	4,32
320	4,11
340	3,64

KOH 0,05 M + 5% Metanol

V	A
20	0,47
40	1,07
60	1,65
80	2,29
100	2,94
120	3,61
140	4,33
160	5,09
180	5,88
200	6,81
220	7,87
240	9,22
260	5,60
280	5,21
300	4,43
320	3,62
340	3,41



Lampiran 3. Contoh Perhitungan Dari Data

Pembuatan Larutan KOH 1,0 M

Berat KOH yang ditimbang = 56,0184 gram

Berat molekul KOH = 56 gr/mol

Volume larutan = 1 L

$$\text{Molaritas larutan} = \frac{\frac{56,0184 \text{ gram}}{56 \text{ gr / mol}}}{1 \text{ L}} = 1,0003 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

Pembuatan Larutan Uji

- **Larutan KOH 0,05 M**

Pembuatan larutan KOH 0,05 M

Dengan rumus pengenceran:

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

$$(V_1)(1 \text{ mol/L}) = (1000 \text{ mL})(0,05 \text{ mol/L})$$

$$V_1 = 50 \text{ mL}$$

Jadi besarnya volume larutan KOH 1 M yang harus diambil adalah 50 mL.

- **Larutan KOH 0,1 M**

Pembuatan larutan KOH 0,1 M

Dengan rumus pengenceran:

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

$$(V_1)(1 \text{ mol/L}) = (1000 \text{ mL})(0,1 \text{ mol/L})$$

$$V_1 = 100 \text{ mL}$$

Jadi besarnya volume larutan KOH 1 M yang harus diambil adalah 100 mL

- **Larutan KOH 0,15 M**

Pembuatan larutan KOH 0,1 M

Dengan rumus pengenceran:

$$V_1.M_1 = V_2.M_2$$

$$(V_1)(1 \text{ mol/L}) = (1000 \text{ mL})(0,15 \text{ mol/L})$$

$$V_1 = 150 \text{ mL}$$

Jadi besarnya volume larutan KOH 1 M yang harus diambil adalah 150 mL

Contoh Perhitungan laju alir larutan KOH 0,10 M, 300 V, 80-85°C

(t) waktu selama 15 ml = 2,93 detik

$$V_{gas} = \frac{V}{Waktu}$$

$$V_{gas} = \frac{15 \text{ mL}}{2,93 \text{ det ik}}$$

$$V_{gas} = 5,12 \text{ mL/det ik}$$

Contoh Perhitungan laju produksi H₂ (mmol/menit) KOH 0,10 M, 300 V, 80-85°C

$$\begin{aligned} \text{laju produksi H}_2 \text{ (mmol/menit)} &= \frac{\text{jumla h mol Hidrogen}}{\text{waktu proses elektrolisis plasma}} \\ &= \frac{5,12 \times 0,3771}{22,4 \times 60} = 5,17 \text{ mmol/menit} \end{aligned}$$

Contoh Perhitungan G(H₂) KOH 0,10 M, 300 V, 80-85°C

$$G(H_2) = \frac{V_{gas} / 22,4}{Q / 2F} = \frac{V_{gas} F}{11,2Q}$$

$$G(H_2) = \frac{(1,93 \text{ mL/s}) \times 300 \text{ det ik} / 1000 \text{ L} \cdot (96500) \text{ C/mol}}{(11,2) \text{ mol/L} \cdot (3,78) \text{ Amperex} 300 \text{ det ik}}$$

$$G(H_2) = 4,4 \text{ mol.mol}^{-1}$$

Contoh Perhitungan Konduktivitas listrik Larutan KOH 0,10 M

$$\text{Larutan 0,10 M} = \frac{1,310}{1,413} \times 18,28 = 16,95 \text{ mS/cm}$$

Contoh Perhitungan W_r 0,10 M, 300 V

VQ adalah nilai WHr diperoleh,

$$\text{WHr} = 94,46 \text{ J}$$

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

$$W_r = \frac{94,46/1000KJ}{1,93/1000 \text{ L} / s \times 300s}$$

$$W_r = 0,16 \text{ kJ} / \text{L}$$

