



UNIVERSITAS INDONESIA

**SISTEM PRODUKSI HIDROGEN DENGAN ELEKTROLISIS
PLASMA NONTERMAL DALAM MEDIA LARUTAN
GLISEROL-KOH**

SKRIPSI

OLEH :
BONDAN ARIAWAN
0606076192

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**SISTEM PRODUKSI HIDROGEN DENGAN ELEKTROLISIS
PLASMA NONTERMAL DALAM MEDIA LARUTAN
GLISEROL-KOH**

SKRIPSI

**OLEH :
BONDAN ARIAWAN**

0606076192

Diajukan sebagai salah satu syarat kelulusan

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Bondan Ariawan
NPM : 0606076192
Tanda Tangan :
Tanggal : 25 Juni 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Bondan Ariawan

NPM : 0606076192

Program Studi : Teknik Kimia

Judul : Sistem Produksi Hidrogen Dengan Elektrolisis
Plasma Nontermal Dalam Media Larutan Gliserol-
KOH

Telah berhasil dipertahankan di hadapan dewan penguji dan diterima sebagai sebagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Nelson Saksono, M.T. (.....)

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

Penguji : Ir. Yuliusman, M.Eng. (.....)

Ditetapkan di : Fakultas Teknik Universitas Indonesia

Tanggal : 9 Juli 2010

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas berkat rahmat dan hikmat-Nya penulis dapat menyelesaikan makalah skripsi ini. Makalah dengan judul **“Sistem Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Plasma NonTermal dalam Media Larutan Gliserol-KOH”** ini disusun untuk memenuhi tugas skripsi. Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Dr.Ir. Nelson Saksono, MT selaku pembimbing skripsi yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama proses penyusunan. Selain itu juga, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kedua orangtua atas dukungannya selama proses pembuatan skripsi ini
2. Ir. Praswasti P.D.K. Wulan, M.T. selaku pembimbing akademis
3. Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA selaku ketua grup riset Intensifikasi Proses
4. Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI.
5. Ir. Yuliusman M.Eng selaku kordinator skripsi Teknik Kimia FTUI
6. Teman-teman satu kelompok (Rizky, Jainal, Bagus) yang bekerjasama dengan penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.
7. Monika, Sarah, Linda, Fathur, Kevin, Ikhsan, Ekka, Farhan, dan Reza, teman-teman satu Laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses
8. Seluruh teman-teman Teknik Kimia 2006 atas dukungan dan semangatnya
9. Mbak Tiwi selaku laboran yang sabar dan baik hati
10. Mas Taufik yang ada di ruang baca
11. Kang Jajat dan Mang Ijal yang telah banyak membantu penyelesaian alat
12. Pihak- pihak lain yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu

Penulis sadar bahwa makalah skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan dan jauh dari sempurna. Oleh karena itu, segala saran dan kritik yang berguna untuk perbaikan makalah ini pada masa mendatang akan penulis terima dengan besar hati, Akhir kata, semoga skripsi ini dapat berguna bagi yang membacanya.

Depok 2010

Bondan Ariawan

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

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

Nama : Bondan Ariawan
NPM : 0606076192
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**SISTEM PRODUKSI HIDROGEN DENGAN ELEKTROLISIS PLASMA
NONTERMAL DALAM MEDIA LARUTAN GLISEROL-KOH**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan 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 : 25 Juni 2010

Yang Menyatakan

(Bondan Ariawan)

ABSTRAK

Nama : Bondan Ariawan
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : **Sistem Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Plasma NonTermal dalam Media Larutan Gliserol-KOH**

Hidrogen merupakan salah satu bahan baku pada industri kimia dan juga sebagai bahan bakar kendaraan. Gas hidrogen banyak diperoleh dari proses elektrolisis yang memerlukan energi listrik yang besar. Elektrolisis plasma adalah metode baru yang dapat meningkatkan produktivitas hidrogen sekaligus menekan kebutuhan energi listrik. Penelitian ini menguji keefektifan proses elektrolisis plasma yang dinyatakan sebagai jumlah produk hidrogen per energi listrik yang dikonsumsi dengan memvariasikan tegangan listrik dan konsentrasi larutan KOH-Gliserol. Selanjutnya, keefektifan proses ini dibandingkan dengan keefektifan elektrolisis Faraday. Hasil percobaan menunjukkan kenaikan konsentrasi dan tegangan menyebabkan kenaikan jumlah produk hidrogen. Proses elektrolisis plasma pada penelitian ini dapat meningkatkan keefektifan proses hingga 13,74 kali lipat lebih tinggi dibandingkan dengan elektrolisis Faraday.

Kata Kunci: hidrogen, plasma, elektrolisis, gliserol.

ABSTRACT

Name : Bondan Ariawan
Study Programme : Chemical Engineering
Title : **Hydrogen Production System Using NonThermal Plasma Electrolysis in Glycerol-KOH Medium**

Hydrogen is one of chemical industry feedstock and also automobile fuel. Hydrogen is commonly produced by electrolysis. Electrolysis however has several constraints especially to its large energy requirement. Plasma electrolysis is a breakthrough method not only to improve hydrogen productivity but also suppress the energy consumption. This research has been conducted to investigate the effectiveness of plasma electrolysis which is stated as hydrogen product quantity per energy consumption by varying the voltage and KOH-Glycerol concentration. Afterwards, the process effectiveness was then compared to which of Faraday electrolysis. The result of this research shows that the hydrogen quantity produced escalated up to 13 times higher.

Keywords: hydrogen, plasma, electrolysis, glycerol.

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penyajian.....	4
BAB 2	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Proses Produksi Hidrogen.....	5
2.2 Plasma.....	7
2.3 Pembangkitan Plasma.....	12
2.4 Elektrolisis Plasma.....	14
2.5 Gliserol.....	14
2.6 Pengaruh Kondisi Operasi.....	16
BAB 3	21
METODELOGI PENELITIAN	21
3.1 Studi Pustaka.....	21
3.2 Preparasi Bahan dan Peralatan.....	22
3.3 Uji Pendahuluan Reaktor Elektrolisis Plasma.....	30
3.4 Pengujian Variabel Proses.....	31

3.5	Analisis Jumlah Produk serta Konsumsi energi listrik	33
3.6	Analisis untuk Pengaruh Variabel Proses Elektrolisis Plasma	34
3.7	Kesimpulan	34
BAB 4	.....	35
PEMBAHASAN	.....	35
BAB 5	.....	46
KESIMPULAN	.....	46
DAFTAR PUSTAKA	.....	47
LAMPIRAN 1	.....	49
LAMPIRAN 2	.....	51



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Prinsip Dasar Reaktor Plasma DBD (Istadi, 2006).....	14
Gambar 2. 2 Struktur Gliserol (propane-1,2,3-triol) (Stehring, 2008).....	14
Gambar 2. 3 Diagram Alir proses pembuatan biodiesel (Tyson, 2003).....	15
Gambar 2. 4 Efek tegangan pada pembentukan radikal *OH (Jinzhang, <i>et al.</i> , 2006).....	17
Gambar 2. 5 Efek tegangan pada pembentukan radikal *H (Jinzhang, <i>et al.</i> , 2006).....	17
Gambar 2. 6 Efek pH pada pembentukan radikal *OH (Jinzhang, <i>et al.</i> , 2006).	18
Gambar 2. 7 Efek pH pada pembentukan radikal *H (Jinzhang, <i>et al.</i> , 2006) ...	18
Gambar 2. 8 Efek konduktivitas pada pembentukan radikal *OH (Jinzhang, <i>et al.</i> , 2006).....	19
Gambar 2. 9 Efek konduktivitas pada pembentukan radikal *H (Jinzhang, <i>et al.</i> , 2006).....	19
Gambar 2. 10 Efek konsentrasi pada pembentukan hidrogen (Zong, <i>et al.</i> , 2006)20	
Gambar 2. 11 Efek konsentrasi pada <i>yield</i> hidrogen (Zong, <i>et al.</i> , 2006)	20
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	21
Gambar 3. 2 Skema Rangkaian Diode Tegangan Tinggi.....	23
Gambar 3. 3 Bagian- bagian Reaktor Elektrolisis Plasma	24
Gambar 3. 4 Pipa Tembaga yang digantungkan pada Pipa PVC.....	24
Gambar 3. 5 Kondenser 1 dan Kondenser 2	25
Gambar 3. 6 Absorber Silika Gel.....	25
Gambar 3. 8 Flow Meter Gelembung Sabun	26
Gambar 3. 9 Hidrogen Analyzer	26
Gambar 3. 10 Pompa Peristaltik.....	27
Gambar 3. 11 Power Analyzer	28
Gambar 3. 12 Skema Konfigurasi Alat Elektrolisis Plasma	29
Gambar 3. 13 Rangkaian Alat Aktual di Laboratorium.....	29
Gambar 4. 1 Grafik hubungan antara temperatur, arus dan tegangan terhadap waktu dalam larutan KOH 0,1 M;Gliserol 1% dan tegangan 200 volt.....	36

Gambar 4. 2 Ukuran plasma pada dengan tegangan 200V dalam larutan KOH 0,1M dengan konsentrasi gliserol : (a) 1% ; (b) 3%	36
Gambar 4. 3 Grafik hubungan antara laju alir terhadap suhu dalam berbagai konsentrasi larutan pada tegangan 200 volt.....	38
Gambar 4. 4 Grafik hubungan antara Produksi H ₂ yang diperoleh terhadap tegangan pada berbagai konsentrasi pada rentang suhu 90-95C	38
Gambar 4. 5 Warna gliserol setelah elektrolisis dengan konsentrasi; kiri 1%; kanan 3%.....	40
Gambar 4. 6 Grafik hubungan antara Wr dengan suhu berbagai larutan pada tegangan 200V	41
Gambar 4. 7 Grafik hubungan antara Wr dengan tegangan pada berbagai larutan pada rentang suhu 90-95C	42
Gambar 4. 8 Grafik hubungan antara G(H ₂) dengan tegangan pada berbagai konsentrasi KOH pada suhu 90-95C	43
Gambar 4. 9 Grafik hubungan antara G(H ₂) dengan suhu pada berbagai konsentrasi KOH pada tegangan 200V.....	43
Gambar 4. 10 Grafik hubungan antara G'(H ₂) dengan suhu pada berbagai konsentrasi KOH pada tegangan 200V.....	44

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Produksi Hidrogen pada tegangan 300V larutan KOH 0,1 M Gliserol 3%.....	42
Tabel 4. 2 Perbandingan gas CO dan CO ₂ pada berbagai tegangan dan konsentrasi.....	45
Tabel 4. 3 Perbandingan Hasil Elektrolisis Plasma Larutan KOH-Gliserol dan KOH pada kondisi tegangan 200V dan suhu 90-95C	45



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama di dunia telah berbenturan dengan berbagai masalah. Masalah yang paling utama adalah semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil di dunia sementara kebutuhan akan bahan bakar semakin hari semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan perkembangan zaman. Masalah lain yang dihadapi oleh bahan bakar fosil adalah masalah dampak lingkungan berupa emisi karbon dioksida (CO₂). Karbon dioksida merupakan gas yang memiliki efek rumah kaca. Akumulasi CO₂ secara berlebihan di atmosfer bumi memicu terjadinya pemanasan global yang saat ini sedang berlangsung dan masih diupayakan penanggulangannya.

Pengembangan sumber energi baru terbarukan yang lebih ramah lingkungan merupakan solusi yang dianggap efektif dalam menyelesaikan masalah di atas. Salah satu bentuk energi terbarukan yang saat ini sedang dicoba untuk dikembangkan adalah *fuel cell* yang berbasis hidrogen. Penggunaan energi ini relatif lebih ramah lingkungan. Selain itu, sumber energi *fuel cell* adalah bahan yang terbarukan yaitu air.

Pembentukan hidrogen antara lain dapat dilakukan dengan proses steam reforming dari hidrokarbon. Proses ini banyak digunakan dalam pembentukan hidrogen di industri. Proses ini melibatkan konversi campuran gas yang terdiri dari uap air dan hidrokarbon ringan, gas alam, atau naphta (Saxena,2003).

Selain steam reforming, metode lain yang dapat digunakan untuk memproduksi hidrogen ialah pyrolisis dan elektrolisis. Proses elektrolisis adalah pemecahan molekul air menjadi hidrogen dan oksigen dengan bantuan energi listrik. Metodologi tertentu akan menghasilkan gelembung gas pada sel elektrokimia. Kemudian, *harvesting vessels* dari reaktor diambil untuk memperoleh hidrogen (Chaffin, et al., 2006).

Melalui proses elektrolisis tersebut, satu mol air dapat menghasilkan satu mol hidrogen dan setengah mol oksigen pada kondisi suhu 25 C dan tekanan 1 atm. Energi listrik yang diperlukan untuk proses ini dapat dihitung dengan persamaan energi bebas Gibbs. Untuk kondisi suhu 25C dan tekanan 1 atm,

konversi satu mol air menjadi hidrogen membutuhkan energi listrik sebesar 231,7 kJ (Chaffin, et al., 2006).

Konsumsi energi listrik yang sebesar itu membuat proses elektrolisis menjadi besar. Selain itu, tantangan lain yang dihadapi oleh pengembangan sumber energi ini adalah efisiensi proses dan keamanan (*safety*).

Oleh karena itu, diperkenalkan suatu teknologi baru untuk mengelektrolisis air menjadi hidrogen, yaitu teknologi elektrolisis plasma. Teknologi elektrolisis plasma mirip dengan proses elektrolisis, tetapi dilakukan pada tegangan yang cukup tinggi sehingga terbentuk bunga api listrik dan membangkitkan plasma pada larutan. Plasma sendiri merupakan aliran gas yang terionisasi menjadi ion-ion aktif, elektron, dan spesi- spesi netral tetapi secara keseluruhan bersifat netral. Plasma tersebut memiliki konduktivitas listrik yang relatif tinggi dan 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 (Mizuno, et al, 2003).

Penggunaan larutan gliserol dalam proses elektrolisis plasma adalah sebagai donor proton sekaligus media dielektrik sedemikian rupa sehingga laju konversi air menjadi hidrogen (dan oksigen) menjadi jauh lebih besar. Hal ini dapat meningkatkan efisiensi proses produksi hidrogen. Pemikiran ini didasarkan pada penelitian yang telah dilakukan oleh Zong et al. Yang menggunakan larutan metanol dan etanol sebagai media dielektrik.

Gliserol memiliki kemiripan dengan metanol dan etanol, yaitu sama- sama memiliki gugus OH. Perbedaannya, gliserol merupakan senyawa triol sehingga memiliki gugus OH lebih banyak dibandingkan dengan metanol dan etanol. Induksi plasma pada gugus-gugus hidroksil yang terikat dengan dua atom C-primer dan satu atom C-sekunder akan mempercepat terlepasnya proton yang terikat pada gugus -COH di satu sisi. Proton- proton inilah yang akan membentuk gas hidrogen.

Selain itu, gliserol sebagai hasil sampingan dari industri biodiesel juga akan memiliki kegunaan yang lebih luas sehingga menghasilkan nilai tambah bagi industri biodiesel. Beberapa aplikasi gliserol dalam industri antara lain, yaitu sebagai emulsifier, agen pelembut, *plasticizer*, dan *stabilizer* es krim; sebagai

pelembab kulit, pasta gigi, dan obat batuk; sebagai media pencegahan pada reaksi pembekuan sel darah merah, sperma, kornea, dan jaringan lainnya; sebagai tinta printing dan bahan aditif pada industri pelapis dan cat; sebagai bahan antibeku, sumber nutrisi dalam proses fermentasi, dan bahan baku untuk nitro gliserol.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, dirumuskan masalah sebagai berikut:

- i. Penelitian ini mengkaji bagaimana kinerja dan produktivitas reaktor *Plasma Electrolysis* dengan kondisi operasi yang sesuai sehingga dapat memberikan keberhasilan bagi proses elektrolisis plasma untuk menghasilkan gas hidrogen dengan media berupa larutan gliserol.
- ii. Seberapa besar konsumsi energi dan jumlah produk hidrogen.
- iii. Selain itu, dianalisis pula pengaruh variabel- variabel proses yang meliputi suhu, tegangan listrik, dan konsentrasi gliserol terhadap produktivitas hidrogen serta pengaruhnya terhadap plasma yang terbentuk.

1.3 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari produktivitas hidrogen dan konsumsi energi listrik yang terjadi selama proses elektrolisis plasma larutan KOH-Gliserol.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini merupakan suatu usaha untuk memanfaatkan larutan gliserol dan air untuk memproduksi Hidrogen dengan teknologi elektrolisis plasma. Dengan diterapkannya teknologi plasma, diharapkan produksi hidrogen dapat menjadi lebih ekonomis dan dapat menjadi suatu sumber energi alternatif baru.

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

1. Variabel bebas yang divariasikan meliputi tegangan listrik yang dialirkan ke sistem elektrolisis dan konsentrasi larutan gliserol.

2. Pengukuran gas hidrogen yang dihasilkan dilakukan dengan hidrogen analyzer GNL-400F.
3. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses Departemen Teknik Kimia UI pada suhu kamar dan tekanan atmosfer.
4. Pengukuran energi dan produk hidrogen dilakukan dalam rentang waktu operasi lima menit

1.5 Sistematika Penyajian

Tulisan ini terdiri atas 5 bab utama yaitu

I.5.1 Pendahuluan

Bab Pendahuluan mencakup latar belakang permasalahan, perumusan masalah, tujuan, dan kegunaan penelitian.

I. 5.2 Tinjauan Pustaka

Bab Tinjauan Pustaka merupakan bagian yang memuat landasan teori dan *state of the art* yang menjadi acuan untuk bagian metodologi penelitian dan pembahasan mengenai hasil penelitian.

I. 5.3 Metodologi Penelitian

Bab Metodologi Penelitian merupakan bagian yang memuat prosedur-prosedur dalam penelitian secara nyata.

1.5.4 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.

1.5.5 Penutup

Berisi rangkuman keseluruhan dari penelitian yang telah dikerjakan yang mengacu pada hasil yang diperoleh. Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari penelitian.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proses Produksi Hidrogen

Hidrogen selama ini lebih banyak digunakan dalam proses pengolahan minyak bumi dibandingkan sebagai sumber energi. Hidrogen antara lain digunakan dalam proses Hydrocracking dan Polimerisasi. Oleh karena itu, produksi hidrogen lebih banyak dilakukan dalam kilang minyak. Proses produksi hidrogen yang paling umum adalah *Steam Reforming*. Hidrogen dapat pula diproduksi dengan elektrolisis air, tetapi proses ini menghabiskan energi listrik dalam jumlah besar sehingga jarang digunakan

2.1.1 Steam Reforming

Metode produksi hidrogen yang banyak digunakan saat ini adalah proses *steam reforming of methane* (SRM). Mekanisme reaksinya adalah sebagai berikut :



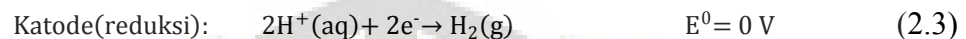
Proses ini memang menghasilkan hidrogen dalam jumlah yang jauh lebih banyak daripada proses fotokatalitik heterogen. Namun, karena menghasilkan senyawa CO melebihi toleransi yang diperkenankan untuk aplikasi *fuel cell* (10-20 ppm), proses ini membutuhkan unit tambahan untuk proses pemurnian (Takenaka, 2001). Selain itu, kebanyakan senyawa metana yang digunakan bersumber dari minyak bumi dan gas alam, yang merupakan sumber energi yang tidak terbarukan.

2.1.2 Elektrolisis

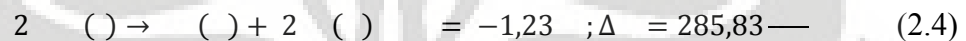
Elektrolisis merupakan peristiwa pemecahan molekul suatu senyawa elektrolit dengan bantuan energi listrik. Proses elektrolisis melibatkan anode, katoda, elektroda, dan larutan elektrolit. Katoda dan anoda yang digunakan biasanya berupa logam inert seperti Pt. Proses elektrolisis merupakan suatu proses

pemisahan yang cukup penting dalam industri dan ilmu pengetahuan tetapi jarang diaplikasikan.

Elektrolisis yang digunakan untuk memperoleh hidrogen ialah elektrolisis air. Dalam proses ini, air akan terpecah menjadi hidrogen pada katoda dan oksigen pada anoda. Persamaan reaksinya adalah sebagai berikut:



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



Melalui proses elektrolisis, idealnya satu mol air dapat menghasilkan satu mol hidrogen dan ½ mol oksigen pada 25C dan 1 atm. Perubahan entalpi (Δ) yang terjadi ialah 285,83 kJ sedangkan perubahan entropi (Δ) yang terjadi ialah 48,7 kJ. Energi yang diperlukan (disediakan oleh energi listrik dari luar sistem) untuk mengelektrolisis air hanya energi bebas Gibbs (Δ) saja sebab perubahan entropi dapat diperoleh dari lingkungan. Oleh karena itu, energi yang dibutuhkan menjadi:

$$\Delta = \Delta - \Delta \quad (2.5)$$

dengan,

$$\Delta = \text{Energi Bebas Gibbs (kJ)}$$

$$\Delta = \text{Perubahan entalpi sistem (kJ)}$$

$$\Delta = \text{Perubahan entropi (kJ)}$$

Sehingga energi listrik yang diperlukan untuk elektrolisis menjadi 231,7 kJ/mol H₂ produk. Oleh karena itu elektrolisis air untuk membentuk hidrogen memiliki beberapa kekurangan diantaranya adalah konsumsi energi listrik yang besar (Chaffin, *et al.*, 2006).

Keefektifan proses elektrolisis untuk memproduksi hidrogen dapat ditingkatkan dengan menaikkan konduktivitas larutan. Hal ini telah dibuktikan pula oleh Zong,*et al.* Konduktivitas air dapat ditingkatkan dengan penambahan elektrolit. Zat elektrolit tersebut akan terdisosiasi menjadi ion-ion. Ion negatif elektrolit akan bergerak ke arah anoda dan menetralkan ion-ion H^+ yang terbentuk di sana. Sebaliknya, ion-ion positif elektrolit akan bergerak cepat ke katoda dan menetralkan ion-ion OH^- yang terbentuk.

Seleksi larutan elektrolit dilakukan dengan melihat potensial elektrode ion-ion penyusunnya. Anion elektrolit yang memiliki potensial elektrode lebih rendah daripada potensial elektrode OH^- justru akan mengalami oksidasi. Sebaliknya, kation elektrolit yang memiliki potensial elektrode lebih tinggi daripada potensial elektrode H^+ justru yang akan mengalami reduksi.

2.2 Plasma

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 logam.

Plasma dapat dibuat dengan menambahkan energi pada gas. Energi yang dimaksud dapat berupa kalor atau energi listrik.

Peristiwa ionisasi merupakan salah satu parameter penting dalam pembentukan plasma. Istilah "kepadatan plasma" biasanya mengacu pada "kerapatan elektron", yaitu jumlah elektron bebas per unit volume. Derajat ionisasi plasma adalah jumlah atom yang telah kehilangan (atau mendapatkan) elektron, dan yang sebagian besar merupakan fungsi suhu. Gas yang terionisasi secara parsial (sekitar 1% partikel gas mengalami ionisasi) dapat mempunyai karakteristik plasma (misalnya memberikan reaksi terhadap medan magnet dan sangat konduktif secara listrik). Derajat ionisasi, α didefinisikan sebagai $\alpha = n_i / (n_i + n_a)$ dimana n_i adalah jumlah kerapatan ion dan n_a adalah jumlah kerapatan atom netral. Kerapatan elektron berhubungan dengan derajat ionisasi

oleh keadaan muatan rata-rata $\langle Z \rangle$ dari ion melalui $n_e = \langle Z \rangle n_i$ ni dimana n_e adalah jumlah kerapatan elektron.

Teknologi plasma melibatkan pembentukan bunga api listrik dengan melewatkan arus listrik melalui suatu gas dalam proses yang disebut pemutusan listrik (*electrical breakdown*). Karena tahanan listrik pada 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).

2.2.1 Bentuk umum Plasma

Berikut ini adalah berbagai bentuk plasma yang dikenal

2.2.1.1 Plasma buatan

Plasma jenis ini adalah plasma yang dibentuk oleh manusia untuk tujuan atau kepentingan tertentu. Plasma yang termasuk ke dalam jenis ini adalah lampu fluoresence, televisi plasma, fabrikasi semikonduktor, dan bunga api pada pengelasan.

2.2.1.2 Plasma terrestrial

Plasma jenis ini terdapat secara alami di bumi, misalnya petir dan aurora.

2.2.1.3 Plasma ruang angkasa

Plasma jenis ini misalnya bintang, area antar sistem galaksi, area antarplanet, dan angin matahari

2.2.2 Jenis- jenis Plasma dalam Industri

Di Industri terdapat beberapa jenis plasma antara lain

2.2.2.1 Plasma Termal atau Equilibrium

Plasma ini dibuat dengan memanaskan partikel netral dan elektron gas. Plasma jenis ini memiliki densitas energi tinggi, kesamaan suhu antara partikel berat, dan elektron. Karena mobilitas yang jauh lebih tinggi, energi yang

ditransfer kepada plasma ditangkap oleh elektron yang dipindahkan ke partikel-partikel berat dengan tumbukan elastis. Frekuensi tumbukan elastis yang terjadi sangat tinggi dan kesetimbangan termal tercapai dengan cepat berkat densitas jumlah elektron yang tinggi (Kogelschatz, 2004).

2.2.2.2 Plasma dingin atau non-Thermal atau non-equilibrium

Plasma jenis ini memiliki ciri yang berkebalikan dengan plasma termal. Plasma ini dibuat dengan hanya memanaskan elektron gas. Plasma ini suhunya jauh lebih rendah daripada plasma equilibrium. Plasma dingin memiliki densitas energi lebih rendah, 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. Keberadaan spesi-spesi aktif ini memungkinkan dilakukannya proses pada permukaan material yang tidak dapat dilakukan dengan cara lain atau tidak praktis atau tidak ekonomis jika dilakukan dengan metode lain. Plasma jenis ini dihasilkan dalam berbagai jenis *glow discharge*/ discharge pijar, discharge RF tekanan rendah dan corona discharge, yang mempunyai densitas energi berkisar antara 10^{-4} hingga puluhan watt per cm^{-3} (Roth, 2001; Istadi, 2006).

a. Foton

Foton dihasilkan dari discharge pijar dan plasma pancar (*arc/torch*) dalam spektrum panjang gelombang yang luas pada spektrum elektromagnetik seperti disarikan dalam Tabel 2.1. Dalam spektrum elektromagnetik infra merah, energi foton infra merah terlalu rendah untuk berinteraksi dengan gas kerja dan membangkitkan radiasi dari plasma. Foton jenis ini mengandung energi di bawah

1,7 eV dan kebanyakan mempunyai efek umum yang sama dengan dinding panas atau reaksi-reaksi kimia biasa.

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

Tabel 2. 1 Energi foton dalam spektrum elektromagnetik (Roth,2001)

Daerah Spektral	Kisaran panjang gelombang, λ (nm)	Kisaran energi, E' (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	$13 \leq \lambda \leq 397$	$3,12 \leq E' \leq 95,3$

Energi foton diberikan oleh rumus Planck berikut:

$$E = h\nu \text{ (J)} \quad (2.6)$$

$$\text{Atau } E' = \frac{E}{e} = \frac{h\nu}{e} \text{ (eV)} \quad (2.7)$$

dengan:

E = Energi foton (eV)

h = Konstanta Planck (eV.s)

ν = Frekuensi (Hz)

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. *Pemutusan*, memutus 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.

b. Spesi Netral

Melalui tumbukan elektron netral dan reaksi kimia dalam plasma, plasma dapat menghasilkan beberapa jenis spesi-spesi netral aktif yang mempunyai energi yang 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.

c. Partikel- Partikel Bermuatan

Plasma yang diionisasi secara parsial – hampir seluruhnya oleh ionisasi tumbukan elektron netral – menghasilkan partikel-partikel bermuatan yang dapat

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

2.3 Pembangkitan Plasma

Plasma termal dapat dihasilkan dengan berbagai metode termasuk: discharge listrik DC pada arus listrik hingga 1×10^5 A; arus AC atau bunga api transient; discharge RF atau microwave pada tekanan mendekati atmosferik, dan plasma yang diinduksi oleh laser.

Metode produksi plasma yang banyak digunakan dalam pengolahan limbah berbahaya diantaranya: pijar (*torch*) plasma DC (konfigurasi transfer dan non-transfer), dan peralatan (RF) plasma bergandengan secara induktif (*inductively coupled*).

Sebagian besar generator pijar plasma yang digunakan dalam pengolahan material menggunakan DC dibandingkan AC karena lebih sedikit suara dan kerlip yang dihasilkan, operasi lebih stabil, pengontrolan lebih baik, dua elektroda minimum, konsumsi elektroda lebih rendah, dan konsumsi energi lebih rendah.

Plasma non-Termal dihasilkan dalam berbagai jenis seperti pancaran pijar *glow discharge*, *gliding arc*, *corona discharge*, dan *dielectric barrier discharge*

yang mempunyai densitas energi berkisar antara 10^{-4} hingga puluhan watt-per- cm^{-3} .

2.3.1 Glow Discharge

Reaktor plasma glow discharge memiliki dua elektrode, yaitu ground dan primary. Konsep dari reaktor ini adalah memicu loncatan elektron dari primary electrode menuju ground electrode yang netral. Loncatan elektron tersebut akan menyebabkan ionisasi gas yang berada di antara kedua elektrode sehingga terjadi plasma. Tegangan listrik yang diperlukan untuk membuat plasma glow discharge ialah 100V hingga 1000V.

2.3.2 Gliding Arc

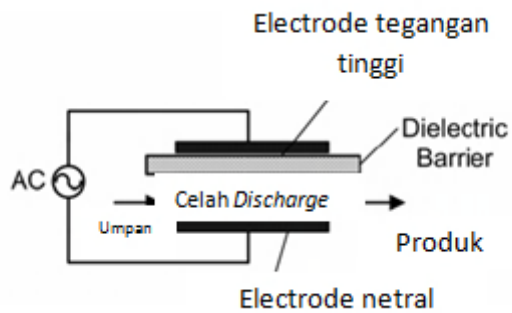
Reaktor plasma *gliding arc* memiliki dua elektrode divergen (positif dan negatif) di sepanjang reaktor. *Arc* (lengkungan) terbentuk ketika gas memasuki ruang antar elektrode dan tegangan tinggi diberikan. Gas menekan arc pada sepanjang reaktor hingga gas mencapai ujung reaktor dan arc menjadi non-aktif. Sementara itu, Arc lain akan terbentuk oleh gas di bagian depan reaktor.

2.3.3 Corona Discharge

Prinsip kerjanya mirip dengan Gliding Arc, tetapi pengoperasiannya berbeda. pada Corona Discharge, plasma dibangkitkan di antara elektroda di sepanjang reaktor. Plasma terjadi karena adanya getaran listrik yang meningkat dengan cepat (10 ns *rise time* dengan 100 ns getaran)..

2.3.4 Dielectric Barrier Discharge

Reaktor plasma DBD memiliki konfigurasi anular. Gas dialirkan ke dalam celah berukuran milimeter antara voltase tinggi yang dilapisi dengan bahan non-konduktif dengan *outer shell* yang menjadi *ground electrode*. Proses ini digunakan untuk membentuk hidrogen dan sintesis hidrokarbon (C2, C3, dan C4) dengan metana sebagai gas umpan.



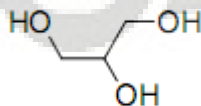
Gambar 2. 1 Prinsip Dasar Reaktor Plasma DBD (Istadi, 2006)

2.4 Elektrolisis Plasma

Produksi gas hidrogen menggunakan metode elektrolisis plasma non-termal sudah mulai dikembangkan baru-baru ini. Hal ini disebabkan produktivitas hidrogen yang dihasilkan jauh lebih besar dibanding proses elektrolisis konvensional. Mizuno (2003) dengan menggunakan air murni sebagai bahan baku pada suhu 80 °C dan tegangan 230 V, mendapatkan jumlah produk hidrogen hingga 8 kali lipat bila dibandingkan dengan jumlah produk hidrogen yang sesuai dengan kebutuhan energi listrik menurut hukum Faraday. Kondisi operasi seperti suhu larutan, tegangan dan kuat arus listrik akan sangat menentukan tingkat efektivitas proses ini.

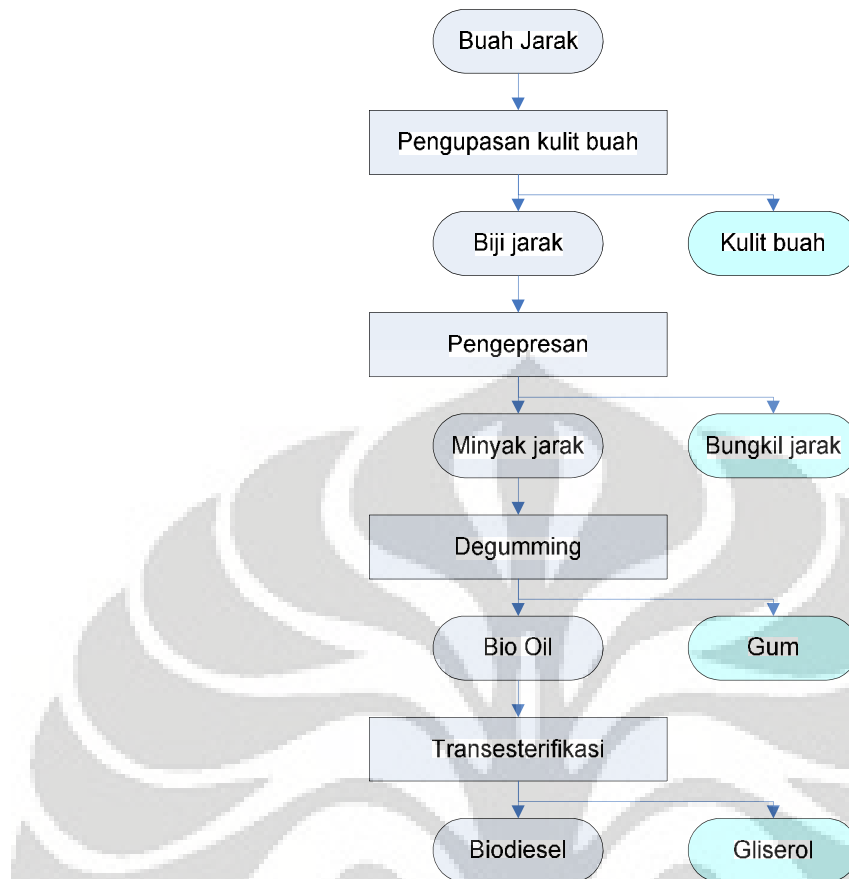
2.5 Gliserol

Gliserol merupakan hasil sampingan yang cukup besar yang dihasilkan dari proses pembuatan biodiesel. Hampir 10% crude gliserol (gliserin kasar) dihasilkan pada setiap proses pembuatan biodiesel. Gliserol merupakan senyawa triol dengan struktur sebagai berikut:



Gambar 2. 2 Struktur Gliserol (propane-1,2,3-triol) (Stehring, 2008)

Gliserol merupakan produk samping dari proses transesterifikasi pada pembuatan biodiesel yang dapat ditunjukkan dalam diagram alir sebagai berikut:

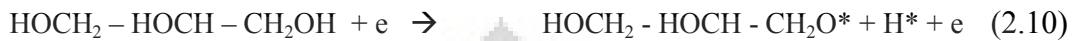


Gambar 2. 3 Diagram Alir proses pembuatan biodiesel (Tyson, 2003)

Seperti yang terlihat di atas, gliserol memiliki tiga gugus OH. Pemecahan ikatan antara hidrogen dengan atom-atom penyusun gliserol yang lain yang tepat dapat membuat gliserol menjadi *feedstock* bagi produksi gas hidrogen.

Secara teoretis, molekul gliserol memiliki gugus fungsional $-OH$ (hidroksil) tiga kali lebih banyak dibandingkan dengan molekul air. Induksi plasma pada gugus-gugus hidroksil yang terikat dengan atom-atom C-primer (2 buah) dan C-sekunder (1 buah) akan mempercepat terlepasnya proton yang terikat pada gugus $-COH$ di satu sisi, dan ion-ion karbonil ($-CO^-$) di sisi lain. Selanjutnya, ion-ion karbonil tersebut akan terhidrasi dengan molekul-molekul pelarutnya (yaitu air) yang kemudian akan tereksitasi untuk membebaskan 1 buah proton yang dimilikinya. Proton-proton yang dibebaskan dalam rangkaian reaksi tersebut, selanjutnya akan membentuk molekul hidrogen dengan bantuan elektron-elektron yang berada di sekitar elektroda.

Induksi plasma pada molekul-molekul air dan gliserol akan mengakibatkan terjadinya serangkaian reaksi kimia yang dipicu oleh spesi-spesi aktif yang dihasilkan plasma, sebagai berikut (Marshall, 2008):

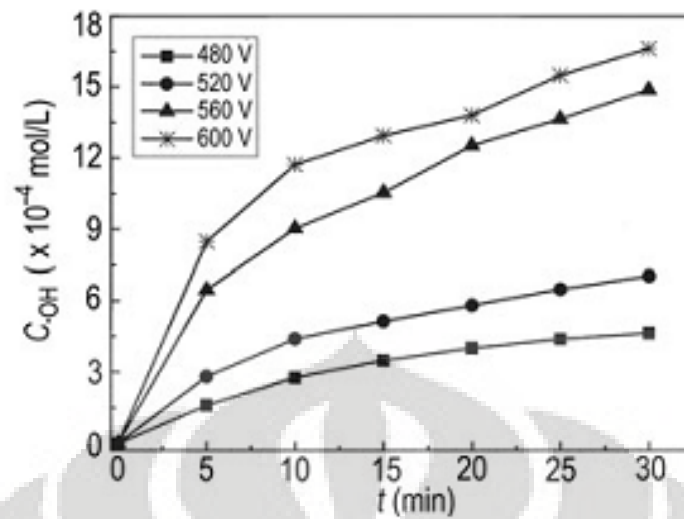


2.6 Pengaruh Kondisi Operasi

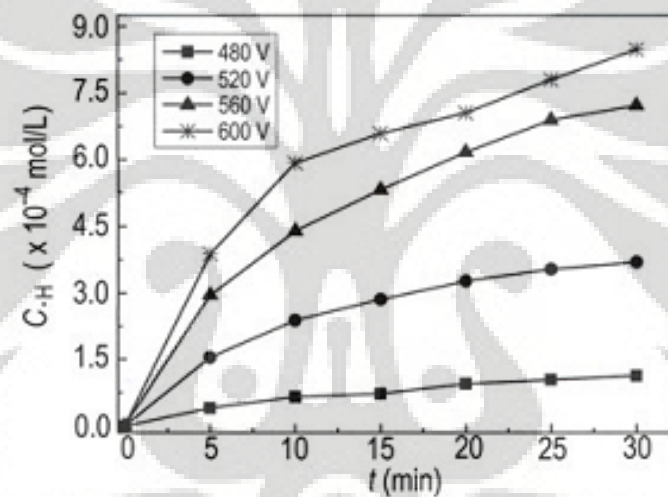
Kondisi operasi pada proses elektrolisis plasma ini dikaitkan dengan tegangan listrik, konduktivitas larutan, pH larutan, dan konsentrasi zat terlarut dalam air. Namun pada bagian metodologi dan pembahasan, variabel proses yang digunakan hanya tegangan listrik dan konsentrasi zat terlarut (dalam hal ini gliserol).

2.6.1 Tegangan Listrik

Efek tegangan dan arus listrik yang digunakan dalam proses elektrolisis plasma berhubungan langsung dengan pembentukan spesi-spesi aktif dari molekul larutan gliserol. Spesi aktif yang dimaksud terutama berupa radikal hidrogen dan radikal hidroksil. Selain itu tegangan yang digunakan juga berperan dalam pembentukan dan kestabilan keadaan plasma. Jinzhang et, al. telah mempublikasikan hasil penelitiannya mengenai efek tegangan yang hasilnya dapat terlihat pada gambar berikut:



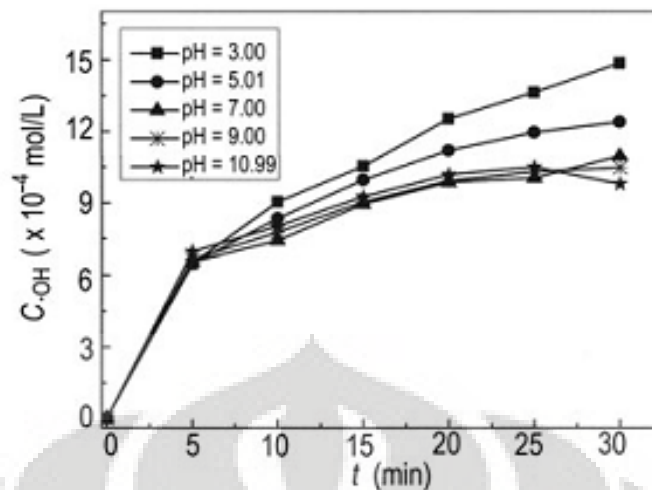
Gambar 2. 4 Efek tegangan pada pembentukkan radikal *OH (Jinzhang, *et al.*, 2006)



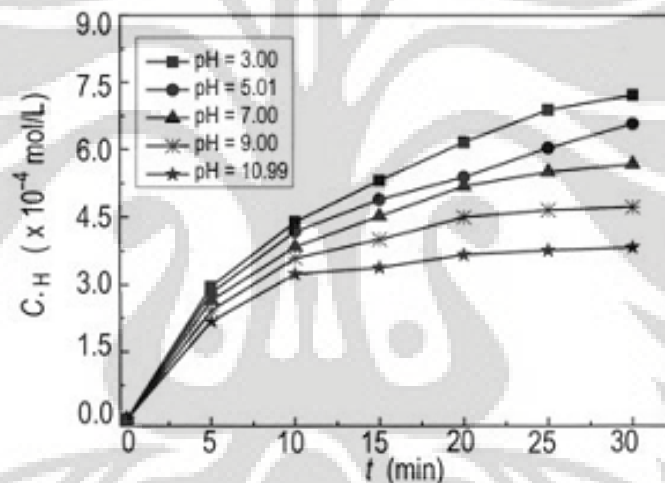
Gambar 2. 5 Efek tegangan pada pembentukkan radikal *H (Jinzhang, *et al.*, 2006)

2.6.2 pH Larutan

Keasaman larutan dapat mempengaruhi proses pemecahan molekul larutan menjadi hidrogen dan produk- produk sampingannya. Derajat keasaman hingga tingkat tertentu dapat meningkatkan produksi spesi aktif dalam larutan seperti yang terlihat pada Gambar 2.6 dan Gambar 2.7 berikut:



Gambar 2. 6 Efek pH pada pembentukkan radikal *OH (Jinzhang, *et al.*, 2006)



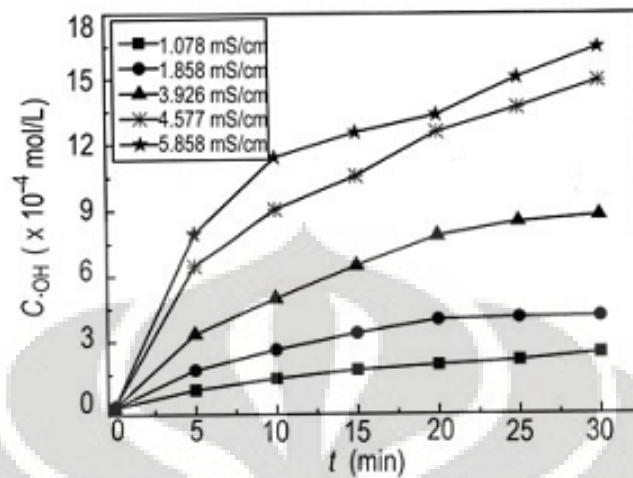
Gambar 2. 7 Efek pH pada pembentukkan radikal *H (Jinzhang, *et al.*, 2006)

Dari gambar di atas, dapat disimpulkan bahwa produksi radikal hidrogen maksimum terjadi pada kondisi pH larutan adalah tiga. Hal ini membuktikan bahwa keasaman dapat meningkatkan pembentukan radikal hidrogen yang kemudian memungkinkan untuk memproduksi gas hidrogen.

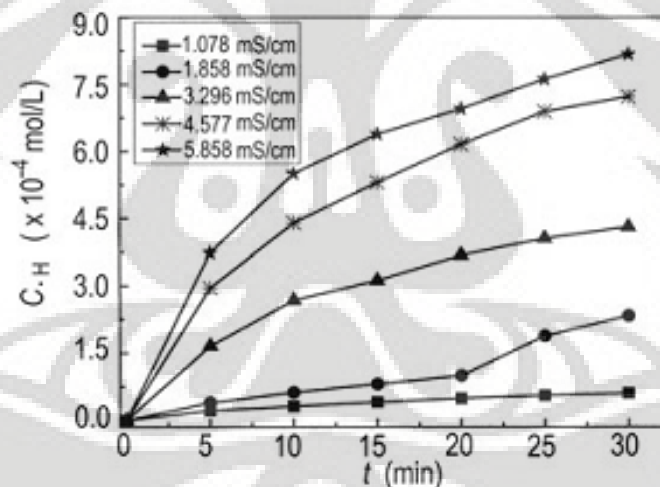
2.6.3 Konduktivitas

Konduktivitas memegang peranan dalam kemampuan larutan untuk menyerap energi listrik yang nantinya dapat memutuskan ikatan dalam senyawa-senyawa larutan. Jinzhang, *et al.* menyajikan hasil penelitiannya dalam

mengamati efek konduktivitas pada pembentukan radikal hidroksil dan radikal hidrogen pada gambar berikut:



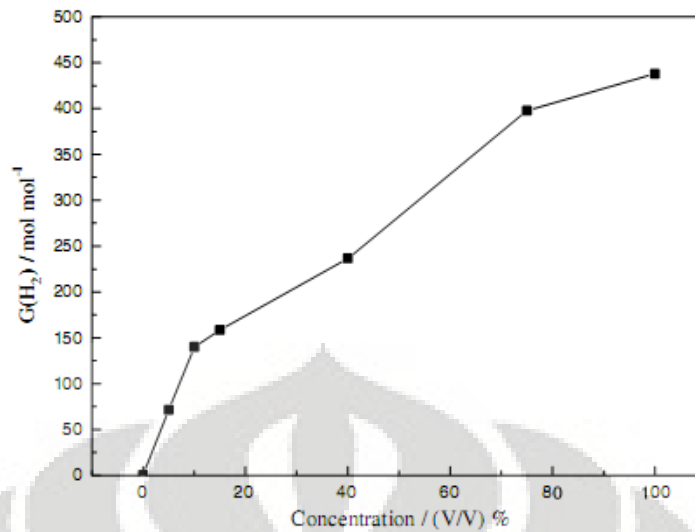
Gambar 2. 8 Efek konduktivitas pada pembentukan radikal *OH (Jinzhang, *et al.*, 2006)



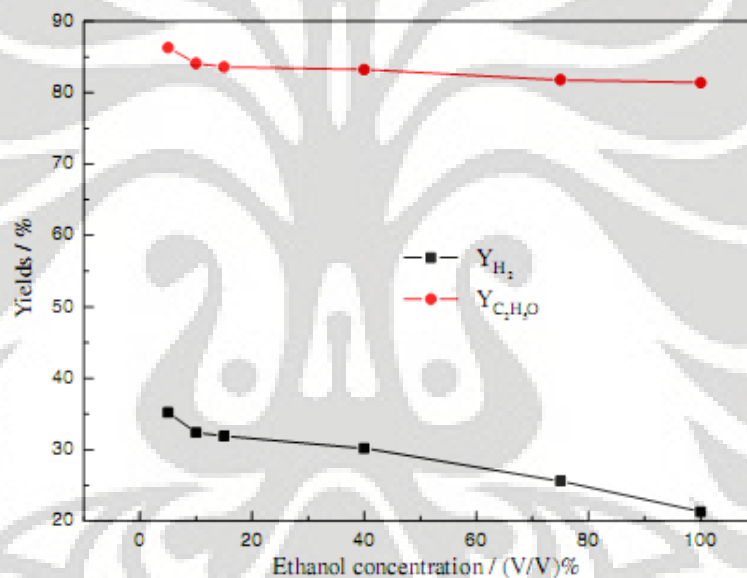
Gambar 2. 9 Efek konduktivitas pada pembentukan radikal *H (Jinzhang, *et al.*, 2006)

2.6.4 Konsentrasi gliserol

Pengamatan pengaruh konsentrasi gliserol mengacu pada hasil pengamatan yang telah dilakukan oleh Zong et, al. yang melakukan elektrolisis plasma non-thermal hidrogen dalam media etanol. Gliserol dalam kasus ini memiliki kemiripan dengan etanol, yaitu sama- sama memiliki gugus hidroksil. Gliserol memiliki gugus hidroksil tiga kali lebih banyak dibandingkan dengan etanol pada kuantitas yang sama. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat gambar berikut:



Gambar 2. 10 Efek konsentrasi pada pembentukan hidrogen (Zong, *et al.*, 2006)



Gambar 2. 11 Efek konsentrasi pada *yield* hidrogen (Zong, *et al.*, 2006)

Semakin tinggi konsentrasi etanol semakin tinggi produk hidrogen yang dihasilkan. Namun terjadi pula pembentukan produk samping yang meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi sehingga *yield* hidrogen menurun.

BAB 3 METODELOGI PENELITIAN

Penelitian bersifat riset eksperimental dengan data berupa data primer kuantitatif. Berikut ini merupakan diagram alir penelitian:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.1 Studi Pustaka

Tahapan ini merupakan awal dari langkah awal dari keseluruhan kegiatan penelitian. Pada tahap ini dilakukan kajian pustaka mengenai teknologi plasma, jenis- jenis plasma, mekanisme elektrolisis, dan segala ihwal lain yang dapat mendukung dasar pemikiran dan pemahaman untuk tahapan penelitian selanjutnya.

3.2 Preparasi Bahan dan Peralatan

Dalam tahapan ini dilakukan persiapan alat dan bahan yang digunakan untuk penelitian.

3.2.3. Peralatan Percobaan

Berikut ini adalah komponen- komponen peralatan percobaan, yaitu:

3.2.3.1 Pembangkit Plasma

Peralatan yang dirancang adalah sistem reaktor plasma non-termal tipe. Perancangan reaktor plasma dilakukan untuk mendapatkan desain reaktor plasma yang akan digunakan untuk eksperimen. Alat ini terdiri dari plasmatron dan reaktor plasma. Material yang akan digunakan untuk membuat reaktor adalah acrylic. Acrylic dipilih karena mempunyai ketahanan panas yang cukup tinggi dan mempermudah pengamatan secara visual karena tidak memiliki warna. Kemudian plasmatron yang dibuat merupakan plasmatron sederhana yang dirakit menggunakan sirkuit elektronik diode tegangan tinggi.

3.2.3.2 Prosedur Pembuatan Reaktor Plasma

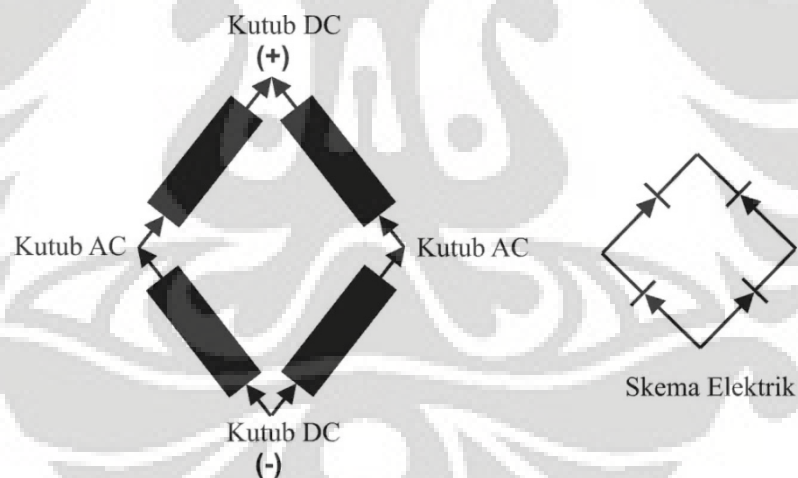
Alat dan Bahan :

1. Diode tegangan tinggi
2. Kabel tegangan tinggi dan kabel sirkuit
3. Caput buaya
4. Acrylic
5. Solder
6. Timah dan minyak solder
7. Trafo 12V DC
8. Slide Regulator 2 kVA
9. PCB (*printed circuit board*)
10. Spidol
11. Kipas angin 12V
12. Pisau acrylic
13. Lem acrylic

14. Terminal
15. Selongsong kabel
16. Spacer
17. Mini drill
18. Cutter
19. Stopwatch
20. Napple
21. Lem silikon
22. Pompa peristaltik
23. Selang silikon

3.2.3.3 Prosedur Merakit Plasmatron

1. Menghubungkan slide regulator dengan diode tegangan tinggi
2. Diode yang digunakan adalah diode dengan tegangan maksimum 1000 V dan arus 5 A. Skema perangkaian adalah sebagai berikut:

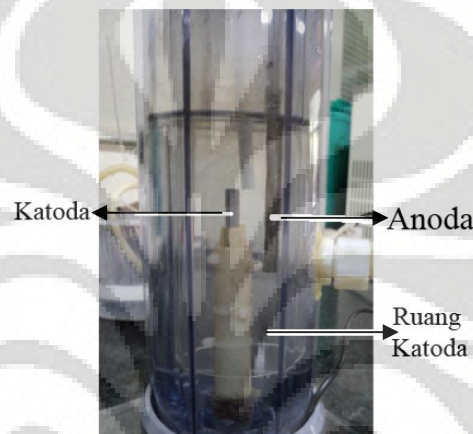


Gambar 3. 2 Skema Rangkaian Diode Tegangan Tinggi

3. Kutub positif DC dihubungkan ke anoda reaktor sedangkan kutub negatifnya ke katoda reaktor
4. Kutub- kutub AC dihubungkan ke slide regulator
5. Menguji rangkaian dengan menggunakan multitester

3.2.3.4 Reaktor elektrolisis plasma terdiri dari komponen-komponen utama sebagai berikut :

- Tabung acrylic dengan Diameter 6 cm dan tinggi 16 cm
- Sepasang Elektroda dengan katoda berbentuk silinder dengan diameter 0,5 cm terbuat dari wolfram dan anoda berupa selubung jala terbuat dari *stainless steel*. Ruang katode yang akan banyak menghasilkan hidrogen akan dipisahkan dengan ruang anode.



Gambar 3. 3 Bagian- bagian Reaktor Elektrolisis Plasma

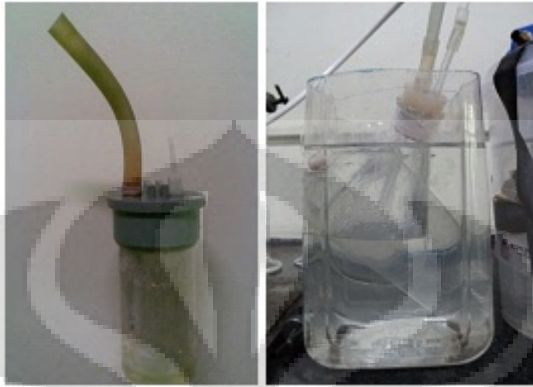
- Pendingin larutan berupa sistem sirkulasi dan alat termometer guna menjaga suhu larutan pada harga yang ditentukan. Larutan dilewatkan ke pipa tembaga yang dibuat melingkar- lingkaran yang dimasukkan ke dalam air pendingin untuk menjaga/ mendinginkan suhunya. Pompa peristaltik digunakan untuk mengakomodasi hal ini sekaligus mengatur laju alir sirkulasi. Agar suhu tidak menjadi lebih rendah daripada yang diinginkan, laju alir sirkulasi diperkecil dan pipa tembaga diangkat dari dalam air pendingin.



Gambar 3. 4 Pipa Tembaga yang digantungkan pada Pipa PVC

Komponen pendukung terdiri dari :

- Kondenser yang bertujuan menangkap uap air, atau produk-produk cair yang terbawa bersama aliran produk gas dari ruang katoda dari reaktor plasma. Pendinginan dilakukan menggunakan air es dengan suhu cairan pendingin mencapai nol derajat Celcius.



Gambar 3. 5 Kondenser 1 dan Kondenser 2

- Silika gel untuk menangkap sisa- sisa uap air yang lolos dari kondenser.



Gambar 3. 6 Absorber Silika Gel

- Pengukur laju alir (*Flow meter* gelembung sabun kapasitas 15 ml) dipasang pada aliran keluar dari condenser untuk mengukur jumlah gas yang dihasilkan dari ruang katoda maupun anoda.



Gambar 3. 7 Flow Meter Gelembung Sabun

- Hidrogen Analyzer tipe GNL-400F untuk menganalisis produk H_2 yang terbentuk.



Gambar 3. 8 Hidrogen Analyzer

i. Prosedur Pemakaian Hidrogen Analyzer

Prosedur ini terdiri atas:

❖ Preparasi Hidrogen Analyzer

Sebelum menghubungkan alat ini ke sumber listrik, perlu dicari kutub “U” pada steker listrik dengan bantuan test-pen. Jika test-pen menyala saat ditusukkan ke dalam salah satu lubang steker, itulah kutub “U”. Setelah itu barulah menghubungkan alat dengan sumber listrik dengan tanda “U” pada *power outlet* alat masuk pada kutub “U”. Tombol “ON” ditekan untuk mengaktifkan alat *hidrogen analyzer*. Alat akan melakukan pemanasan otomatis selama enam menit kemudian baru dapat digunakan.

❖ Prosedur mengalirkan gas Flushing

Hal ini dilakukan untuk membersihkan hidrogen analyzer dari pengotor-pengotor yang masih tersisa di dalam alat. Gas flushing yang digunakan adalah udara. Dengan menggunakan injektor (suntikan) udara dimasukkan ke inlet gas.

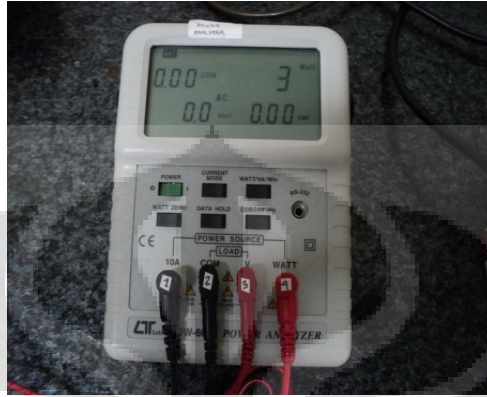
- ❖ Prosedur penggunaan
 1. Sampel gas hidrogen disuntikkan pada bagian belakang alat yang bertuliskan “Gas Inlet”
 2. Konsentrasi hidrogen yang tertinggi dicatat
 3. Alat di-*flushing* untuk membersihkan sisa- sisa sampel sehingga tidak mengganggu pengambilan data yang berikutnya
- ❖ Prosedur mematikan Hidrogen Analyzer:
 1. Melakukan flushing
 2. Menekan tombol OFF
 3. Melepaskan sumber listrik
- Pompa peristaltik



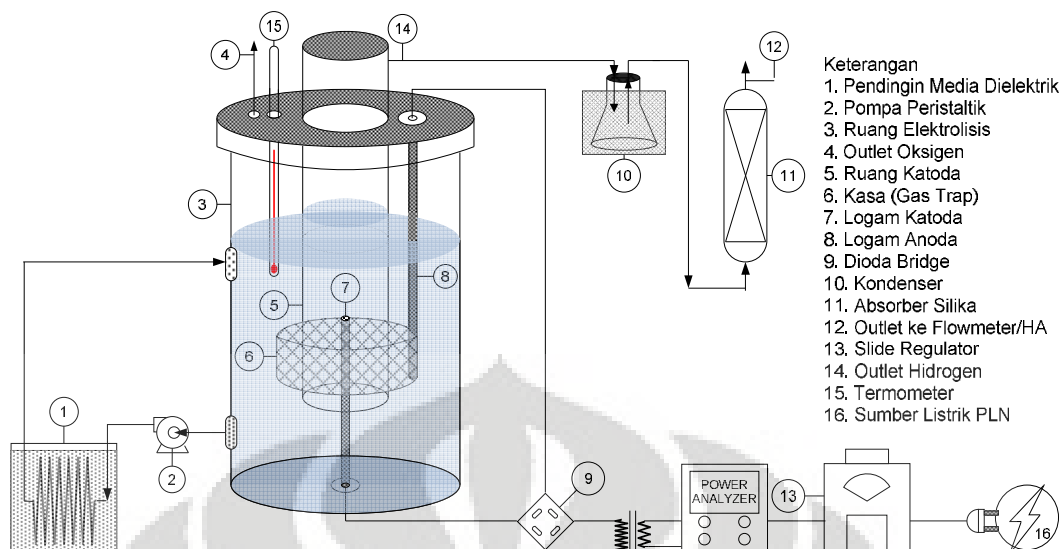
Gambar 3. 9 Pompa Peristaltik

- Trafo untuk menaikkan tegangan dengan kapasitas 1000 Watt
- Power Analyzer tipe DW-6091 untuk mengukur konsumsi energi listrik. Alat ini dapat membaca kuat arus hingga maksimal 10A. Jika arus yang mengalir di alat lebih dari 10A, alat ini dapat rusak.
- ❖ Prosedur pemakaian power analyzer
 1. Alat dipastikan terhubung dengan peralatan reaktor plasma
 2. Alat dinyalakan dan akan memulai proses *start-up* selama 30 detik
 3. Setelah selesai, tombol “WATT ZERO” ditekan untuk mengkalibrasi bacaan data daya listrik pada alat
 4. Menekan tombol “MODE” untuk mengubah modus alat ke modus pengukuran watt-hour jika proses elektrolisis plasma telah berlangsung

5. Nilai watt-hour akan terbaca pada alat sesuai dengan waktu operasi
6. Menekan tombol “HOLD” untuk menghentikan perubahan angka pada bacaan watt-hour jika batas waktu operasi tercapai sehingga data pada saat itu dapat dicatat.



Gambar 3. 10 Power Analyzer



Gambar 3. 11 Skema Konfigurasi Alat Elektrolisis Plasma



Gambar 3. 12 Rangkaian Alat Aktual di Laboratorium

3.2.3.5 Metode Pengukuran Kuantitas Gas Hidrogen

Seperti yang terlihat pada gambar Skema Konfigurasi Alat, katoda dipisahkan dengan sebuah ruang berupa selubung kaca yang memanjang hingga melebihi ujung bawah katoda. Gas keluaran dari katode yang merupakan gas

campuran antara hidrogen dan gas- gas lain hasil reaksi samping serta uap air akan terperangkap dalam selubung tersebut dan akan naik ke permukaan elektrolit.

Setelah itu, gas akan melewati ruang pengkondensasi (kondenser). Uap air akan mengalami kondensasi dan menetes ke dalam ruang kondenser sedangkan hidrogen akan terus naik dan mengalir menuju *silika gel*. Uap air yang tersisa akan diserap oleh silika gel.

Kemudian keluaran keluaran silika gel akan masuk ke *flow meter* gelembung sabun untuk diukur laju alirnya. Setelah pengukuran laju alir selesai, barulah dilakukan pengukuran konsentrasi hidrogen dengan menggunakan hidrogen analyzer.

3.2.4. Bahan

Bahan- bahan yang digunakan berupa larutan yang dielektrolisis sebagai berikut:

3.2.4.1 Larutan gliserol :

Larutan gliserol dibuat dengan melarutkan gliserol dengan air demin dengan konsentrasi 1 hingga 3 % massa. Gliserol yang digunakan berasal dari produk samping produksi biodisel dengan kemurnian $\pm 87\%$.

3.2.4.2 Larutan Elektrolit KOH :

Penambahan KOH pada larutan gliserol yang bertujuan meningkatkan konduktivitas larutan. KOH bervariasi konsentrasinya mulai dari 0,05 – 0,1 M. Efek lain dari penambahan KOH adalah larutan menjadi basa.

3.3 Uji Pendahuluan Reaktor Elektrolisis Plasma

Uji pendahuluan mencakup uji kinerja reaktor untuk mengantisipasi gangguan yang mungkin akan ditemui pada tahapan selanjutnya. Uji ini bertujuan untuk memahami kinerja reaktor secara nyata dan batasan- batasan yang dimiliki oleh reaktor. Uji ini terdiri atas uji awal laju alir volumetrik hidrogen, stabilitas suhu, dan perilaku plasma, serta kebocoran sistem.

3.4 Pengujian Variabel Proses

Variabel proses dalam penelitian melingkupi:

3.4.1 Variabel Bebas

Variabel bebas yang dipilih dalam penelitian ini menjadi dasar dalam optimalisasi proses produksi hidrogen dengan metode elektrolisis plasma non-termal. Variabel- variabel tersebut adalah tegangan listrik, konsentrasi gliserol, dan konsentrasi KOH.

3.4.1.1 Tegangan Listrik

Efek tegangan dan arus listrik yang digunakan dalam proses elektrolisis plasma berhubungan langsung dengan pembentukan spesi- spesi aktif dari molekul larutan gliserol. Spesi aktif yang dimaksud terutama berupa radikal hidrogen dan radikal hidroksil. Selain itu tegangan yang digunakan juga berperan dalam pembentukan dan kestabilan keadaan plasma. Jinzhang et, al. telah mempublikasikan hasil penelitiannya mengenai efek tegangan yang hasilnya kenaikan tegangan menyebabkan kenaikan produksi spesi- spesi aktif dari molekul larutan gliserol.

3.4.1.2 Konsentrasi gliserol

Pengamatan pengaruh konsentrasi gliserol mengacu pada hasil pengamatan yang telah dilakukan oleh Zong et, al. yang melakukan elektrolisis plasma non-thermal hidrogen dalam media dielektrik berupa etanol. Gliserol dalam kasus ini memiliki kemiripan dengan etanol, yaitu sama- sama memiliki gugus hidroksil. Gliserol memiliki gugus hidroksil tiga kali lebih banyak dibandingkan dengan etanol pada kuantitas yang sama. Semakin tinggi konsentrasi etanol semakin tinggi produk hidrogen yang dihasilkan. Namun terjadi pula pembentukan produk samping yang meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi sehingga *yield* hidrogen menurun.

3.4.1.3 Prosedur Pengamatan

Pengujian variabel proses meliputi tegangan listrik, dan konsentrasi gliserol. Prosedur yang dilakukan ialah:

1. Variasi tegangan listrik dalam Gliserol 1%
 - a. Mempersiapkan alat *Plasma Electrolysis* dan peralatan pendukungnya
 - b. Menyiapkan larutan Gliserol dengan konsentrasi 1% volume sebanyak 1 liter
 - c. Menambahkan KOH ke dalam larutan sebagai aditif untuk meningkatkan konduktivitas. Konsentrasi KOH adalah 0,1 M. Mulai mengaktifkan reaktor dengan tegangan masukan 150V
 - d. Mencatat produksi gas hidrogen yang terbentuk dan konsumsi energi listrik dengan power analyzer untuk rentang suhu tertentu setiap 5 menit sekali. Produksi gas yang dicatat berupa laju alir volumetrik hidrogen sedangkan energi dalam satuan watt-hr. Rentang suhu untuk pencatatan data adalah:
 - 85-90C
 - 90-95C
 - 95-100C
 - e. Untuk menjaga kestabilan suhu, pipa sirkulasi dimasukkan ke dalam medium pendingin dan sirkulasi larutan diatur dengan mengubah-ubah kecepatan pompa peristaltik .
 - f. Mengulangi prosedur percobaan b s.d. e untuk tegangan masukan 200V dan 300V
 - g. Membuat larutan gliserol 1% dengan aditif KOH sebesar 0,1M lalu mengulangi prosedur d dan e dengan tegangan masukan 150 dan 200 V.
2. Variasi tegangan listrik dalam gliserol 3%
 - a. Mempersiapkan reaktor *Plasma Electrolysis*
 - b. Menyiapkan larutan gliserol 3% volume sebanyak satu liter
 - c. Menambahkan KOH ke dalam larutan sebagai aditif untuk meningkatkan konduktivitas. Konsentrasi KOH yang digunakan adalah 0,1 M.
 - d. Mulai mengaktifkan reaktor dengan tegangan masukan 150V

- e. Mencatat produksi gas hidrogen yang terbentuk dan konsumsi energi listrik selama rentang suhu tertentu setiap 5 menit sekali. Produksi yang dicatat berupa laju alir volumetrik hidrogen.
- f. Mengulangi prosedur percobaan b s.d. e untuk tegangan masukan 200V
- g. Membuat larutan gliserol 3% dengan aditif KOH sebesar 0,1M lalu mengulangi prosedur d dan e dengan tegangan masukan 150, 200 V, dan 300V. Larutan diganti dengan yang baru untuk setiap perlakuan tegangan.

Selain itu dilakukan juga pengujian konduktivitas larutan. Prosedurnya adalah:

- Prosedur Operasi Konduktometer
 1. Menghidupkan alat
 2. Mengkalibrasi alat dengan larutan kalibrasi
 3. Nilai konduktivitas larutan kalibrasi terbaca dibagi dengan nilai konduktivitas sebenarnya. Hasilnya dimasukkan sebagai angka kalibrasi
 4. Konduktometer siap digunakan
 5. Konduktivitas larutan diukur pada saat sebelum dan sesudah elektrolisis

3.4.2 Variabel Terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah kuantitas produksi gas hidrogen dan produk sampingan lain serta konsumsi energi listrik selama proses.

3.5 Analisis Jumlah Produk serta Konsumsi energi listrik

Jumlah produk berupa gas hidrogen didata untuk dibandingkan dengan produksi gas hidrogen dari proses elektrolisis konvensional yang telah dikerjakan oleh peneliti sebelumnya.

Untuk setiap variabel proses, dihitung efisiensi produksi hidrogen. Efisiensi produksi hidrogen dihitung dengan persamaan (3.1)

$$= \frac{\text{---}}{\text{---}} \quad (3.1)$$

Dengan V_{H_2} merupakan volume hidrogen yang dihasilkan sedangkan Q adalah arus rata-rata dikalikan waktu dalam basis yang sama.

Selain itu, sebagai pembanding dengan elektrolisis ideal, efisiensi produksi dihitung pula dengan persamaan (3.2),

$$\eta = \frac{V_{H_2}}{V_{H_2, ideal}} \quad (3.2)$$

Dengan i adalah arus rata-rata dan t adalah basis waktu. Arus rata-rata, i dapat dicari dengan persamaan (3.3),

$$i = \frac{Q}{t} \quad (3.3)$$

Dengan P merupakan daya listrik yang dikonsumsi dan V merupakan tegangan listrik operasi.

Nilai P diperoleh dengan membagi konsumsi energi (satuan Whr) dengan basis waktu operasi. Nilai konsumsi energi merupakan energi listrik yang dipakai selama 5 menit dalam satuan watt-hour yang diperoleh dari Power Analyzer.

3.6 Analisis untuk Pengaruh Variabel Proses Elektrolisis Plasma

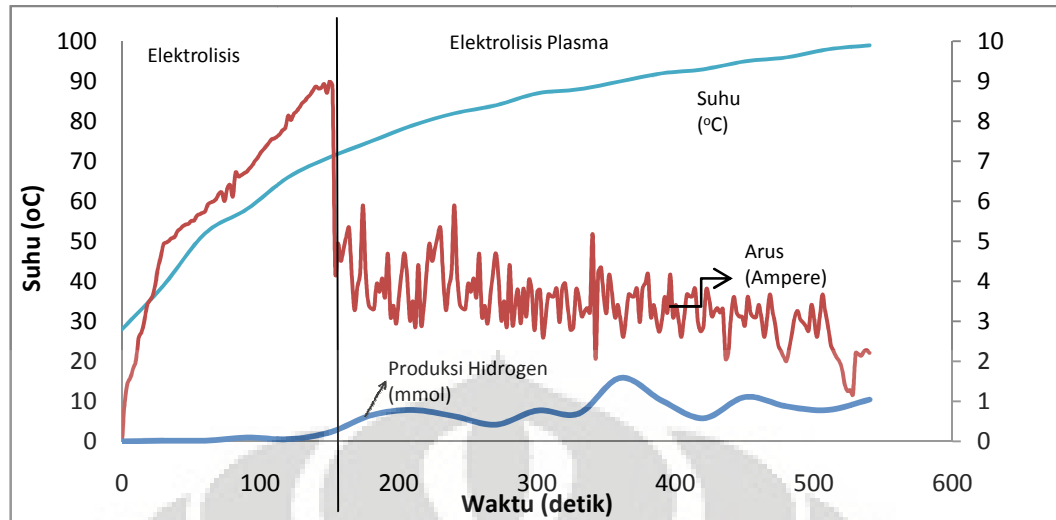
Tahapan ini merupakan analisis berdasarkan data empiris untuk melihat dan mengkaji pengaruh variabel proses pada reaktor berdasarkan prosedur yang telah dilakukan. Parameter proses yang dijadikan acuan adalah laju produksi gas hidrogen yang tinggi sehingga menghasilkan gas hidrogen dalam kuantitas besar tetapi diiringi dengan konsumsi energi listrik yang relatif rendah.

3.7 Kesimpulan

Penyimpulan yang merupakan tahapan akhir penelitian bertujuan untuk merangkum segala pokok-pokok analisis dan pembahasan yang berhubungan dengan batasan permasalahan dalam penelitian.

BAB 4 PEMBAHASAN

Reaksi elektrolisis plasma pada reaktor merupakan kombinasi reaksi elektrolisis dan plasma. Terjadi pembentukan gas oksigen pada anoda dan hidrogen pada katoda. Grafik di bawah menjelaskan bagaimana produksi hidrogen dengan elektrolisis plasma non-termal terbentuk dengan konsentrasi KOH sebesar 0,1 M dan gliserol sebanyak 1% pada tegangan 200 volt DC. Pada awal penelitian, arus listrik terus naik hingga mendekati 10 A. Adanya panas yang terjadi akibat daya disipasi menyebabkan kenaikan suhu larutan. Kenaikan suhu larutan menyebabkan terjadinya peningkatan jumlah gas (gelembung), terutama pada katoda. Pada temperatur 60 °C, pijaran plasma mulai terbentuk. Saat itu terjadi *electrical breakdown* yaitu elektron yang terdapat di katoda mencari lintasan energi baru sehingga dapat mengalami loncatan ke fasa gas larutan dan nampak sebagai kilatan cahaya. Hal ini ditandai pula dengan turunnya arus listrik dan kemudian menjadi tidak stabil disertai bunyi guruh yang terdengar dari reaktor. Arus listrik menjadi turun karena elektron tidak lagi mengalir melalui media larutan konduktif tetapi meloncat ke fasa gas membentuk plasma. Namun karena pada katoda sistem yang terjadi adalah dua fasa (gas sebagai gelembung dan larutan), loncatan elektron tersebut menjadi lebih sulit daripada ketika sistem satu fasa (gas). Inilah yang dapat menyebabkan arus listrik mengalami fluktuasi. Seperti terlihat pada Grafik 4.1 berikut, laju alir produk cenderung meningkat sampai batas tertentu seperti kemudian menurun. Hal ini menunjukkan adanya kondisi operasi optimum.

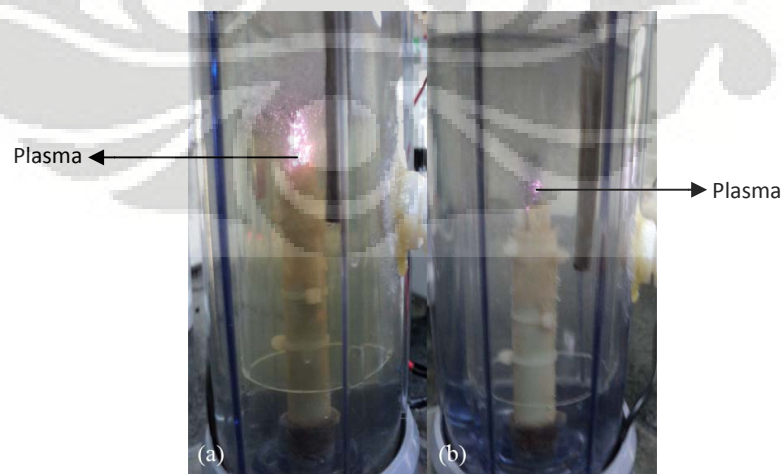


Gambar 4. 1 Grafik hubungan antara temperatur, arus dan tegangan terhadap waktu dalam larutan KOH 0,1 M; Gliserol 1% dan tegangan 200 volt

Konsumsi daya listrik yang mencapai 700 – 1500 Watt pada proses elektrolisis plasma ini menyebabkan suhu larutan meningkat. Jika dilakukan tanpa pendinginan maka suhu larutan meningkat dari 70 °C menjadi 100 °C hanya dalam waktu kurang dari 5 menit.

Plasma akan terbentuk pada jarak terdekat elektroda. Pijaran plasma yang dihasilkan berwarna putih-ungu. Warna pijaran plasma dipengaruhi oleh larutan yang dipergunakan. Semakin besar tegangan yang diberikan akan semakin besar pijaran yang dihasilkan pada konsentrasi yang sama.

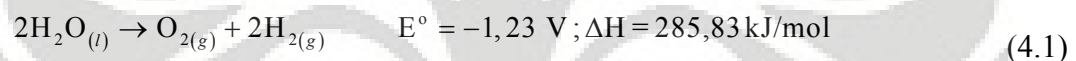
Namun penambahan konsentrasi gliserol mengecilkan pijaran plasma yang terjadi seperti yang terlihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Ukuran plasma pada dengan tegangan 200V dalam larutan KOH 0,1M dengan konsentrasi gliserol : (a) 1% ; (b) 3%

Jika arus listrik turun maka tahanan akan meningkat. Tahanan listrik sepanjang sistem, menghasilkan sejumlah panas dalam jumlah yang signifikan, yang mengambil elektron dari molekul-molekul gas menghasilkan suatu aliran gas yang terionisasi, atau plasma. Pijaran plasma tersebut akan meningkat seiring bertambahnya konsentrasi KOH (Feryansyah, 2010) tetapi menurun jika konsentrasi gliserol ditambahkan pada konsentrasi KOH yang tetap. Penggunaan larutan KOH dapat menyebarkan muatan listrik sehingga proses pemecahan air menjadi radikal-radikal menjadi optimal. Gliserol di lain pihak memiliki ketahanan molekul yang lebih stabil pada ikatan C-C dan C-O. Hal ini mengurangi konduktivitas larutan yang mempengaruhi penyebaran muatan listrik dalam larutan secara keseluruhan sehingga menghambat terjadinya plasma.

Produk gas hasil elektrolisis air secara konvensional adalah gas hidrogen dan oksigen dimana gas hidrogen yang dihasilkan dua kali lebih besar dibandingkan gas oksigen sesuai dengan reaksi kimia berikut (Chaffin, 2006):



Pada elektrolisis larutan gliserol, reaksi yang terjadi adalah seperti yang ditunjukkan pada reaksi (4.2) dan (4.3) seperti berikut (Marshall, 2008).

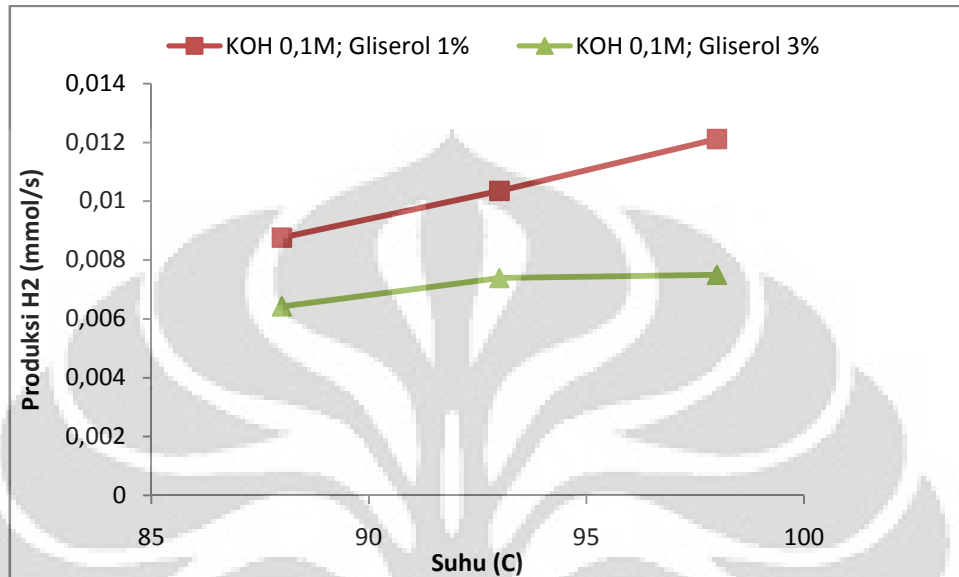


Sehingga idealnya, satu mol gliserol mampu menghasilkan 7 mol hidrogen.

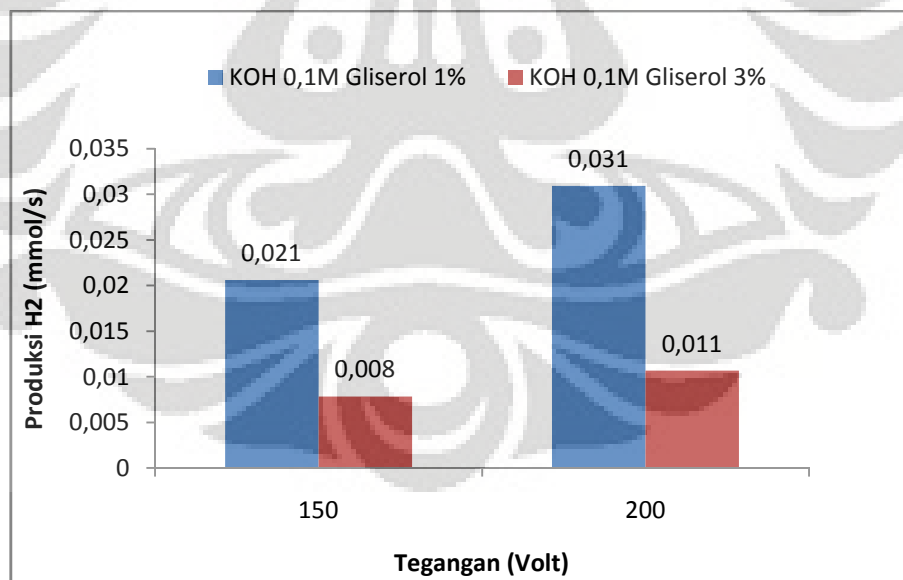
Pada awal percobaan, terdapat udara (gas nitrogen dan oksigen) di dalam reaktor sedangkan produk hidrogen masih sedikit sehingga terjadi difusi dari udara luar. Besarnya ruang kondenser dan absorber yang harus diisi oleh hidrogen juga memicu terjadinya difusi dan menyebabkan laju alir produk menjadi kecil. Hal inilah yang menyebabkan laju alir keluaran gas hidrogen pada mulanya akan turun kemudian naik dengan bertambahnya gas hidrogen di dalam reaktor.

Variasi konsentrasi gliserol dilakukan untuk menyelidiki pengaruh konsentrasi gliserol pada proses produksi hidrogen. Penambahan KOH dilakukan untuk menambah besarnya konduktivitas larutan, sehingga radikal yang terbentuk pun semakin besar pula (GAO Jinzang, et al., 2008). Tanpa adanya KOH, plasma tidak terbentuk. Hal ini karena dengan konduktivitas yang tinggi, elektron-elektron bisa bergerak dengan lebih mudah dibanding larutan yang

konduktivitasnya rendah. Akibatnya, peluang terjadinya tumbukan antara elektron dengan elektron pada molekul juga semakin besar, sehingga pembentukan radikal pun juga akan terjadi dengan lebih baik.



Gambar 4. 3 Grafik hubungan antara laju alir terhadap suhu dalam berbagai konsentrasi larutan pada tegangan 200 volt



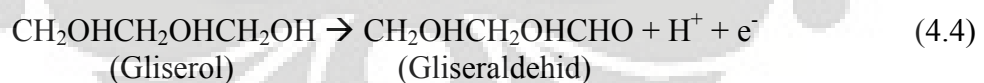
Gambar 4. 4 Grafik hubungan antara Produksi H₂ yang diperoleh terhadap tegangan pada berbagai konsentrasi pada rentang suhu 90-95C

Kenaikan suhu operasi tidak terlalu berpengaruh pada produksi hidrogen yang terjadi selama reaksi berlangsung. Fenomena ini terlihat pada gambar 4.3. Kenaikan suhu larutan tidak menyebabkan kenaikan pembentukan zat-zat radikal yang signifikan. Hal ini disebabkan karena kenaikan suhu tidak mengubah konduktivitas larutan secara keseluruhan sehingga intensitas plasma relatif stabil sekalipun diiringi kenaikan suhu.

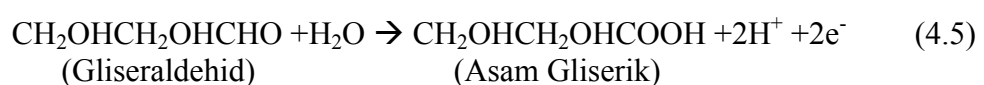
Adanya kecenderungan kenaikan produk hidrogen saat suhu naik dapat disebabkan oleh lamanya waktu operasi elektrolisis plasma telah berlangsung karena pengamatan dilakukan secara kontinu. Semakin lama, hidrogen yang terbentuk semakin meningkat dan dapat mengurangi efek difusi udara luar.

Di lain pihak, semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan untuk menghasilkan plasma, konsentrasi radikal $\cdot\text{OH}$ maupun $\cdot\text{H}$ yang terbentuk semakin tinggi pula. Hal ini diakibatkan karena dengan perbedaan tegangan yang tinggi, energi untuk mengeksitasi elektron untuk menghasilkan radikal juga semakin tinggi, akibatnya semakin tinggi tegangan listrik yang dipakai, pembentukan radikalnya pun juga semakin besar (Gao Jinzang, et al., 2008). Hal ini dapat terlihat pada Gambar 4.4.

Kenaikan konsentrasi gliserol ternyata justru menurunkan produktivitas H_2 secara keseluruhan. Hal ini diperlihatkan pada Gambar 4.3. Hal ini karena mekanisme reaksi samping gliserol dalam elektrolisis. Gliserol mengalami oksidasi pada anoda membebaskan radikal bebas hidrogen pada salah satu gugusnya dan membentuk gliseraldehid.



Gliseraldehid ini akan teroksidasi lebih lanjut oleh plasma membentuk asam gliserik atau terpecah menjadi asam format dan glikolaldehid. Namun hasil oksidasi pertamalah yang lebih dominan pada kondisi basa (Stehring, dkk., 2005).



Asam gliserik menyebabkan larutan menjadi berwarna kekuningan dan berbau tajam. Jika proses elektrolisis dilanjutkan, warna kuning akan semakin pekat menjadi hingga menjadi kecoklatan. Kenaikan konsentrasi juga menyebabkan peningkatan intensitas warna seperti yang terlihat pada Gambar 4.5. Pembentukan asam gliserik akan mengurangi konsentrasi air sebab gliseraldehid mengikat molekul air atau H₂O saat membentuk asam gliserik sehingga menghambat reaksi pembentukan hidrogen dari dekomposisi air. Selain itu asam gliserik memiliki kestabilan yang cukup tinggi sehingga sulit teroksidasi (Stehring, dkk. 2005). Hal ini semakin memperkecil kemungkinan terbentuknya radikal-radikal bebas hidrogen yang diharapkan membentuk gas hidrogen.

Gambar 4. 5 Warna gliserol setelah elektrolisis dengan konsentrasi; kiri 1%; kanan 3%

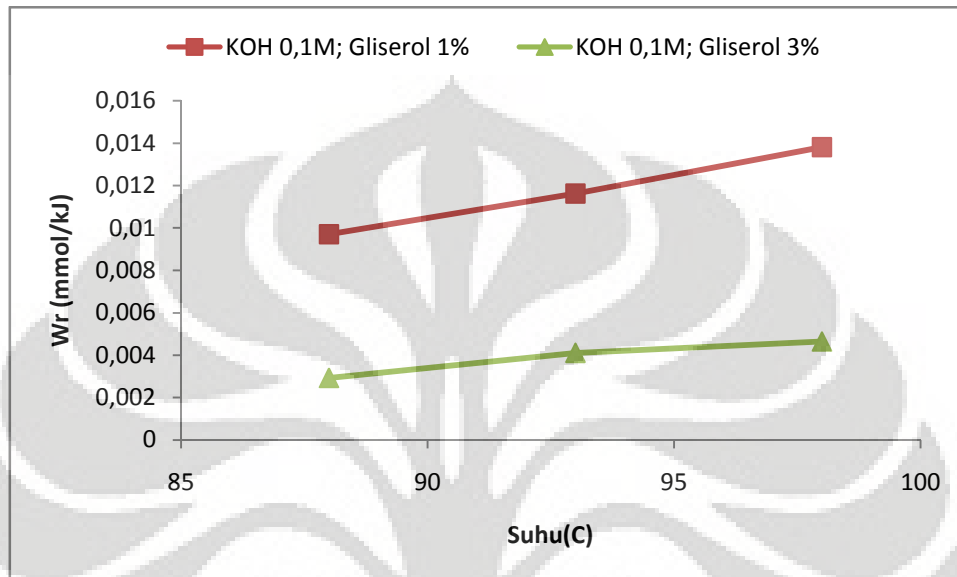
Perilaku konsumsi energi listrik, W_t , terhadap suhu juga relatif stagnan. Hal ini terlihat pada gambar 4.6. Kenaikan suhu tidak terlalu mempengaruhi konsumsi energi sebab kenaikan suhu tidak banyak mempengaruhi sifat-sifat elektrik dari larutan yang dielektrolisis seperti tahanan atau konduktivitas secara spontan.

Dari gambar 4.6 terlihat pula bahwa larutan dengan konsentrasi gliserol paling besar memerlukan energi yang lebih tinggi dibandingkan dua larutan lainnya. Larutan dengan konsentrasi gliserol tiga kali lipat dari yang lainnya memiliki tahanan listrik yang jauh lebih tinggi sebab konduktivitasnya juga rendah. Karena tahanan listriknya yang tinggi, maka densitas plasma berkurang. Hal ini mengakibatkan kuat arus listrik di dalam larutan tetap tinggi. Energi listrik merupakan fungsi dari tegangan dan kuat arus dengan,

$$W = V I t \quad (4.6)$$

Dengan W adalah energi listrik, V adalah tegangan, I adalah kuat arus, dan t adalah waktu operasi. Oleh karena itu semakin besar arus listrik, konsumsi energi listrik semakin tinggi pula.

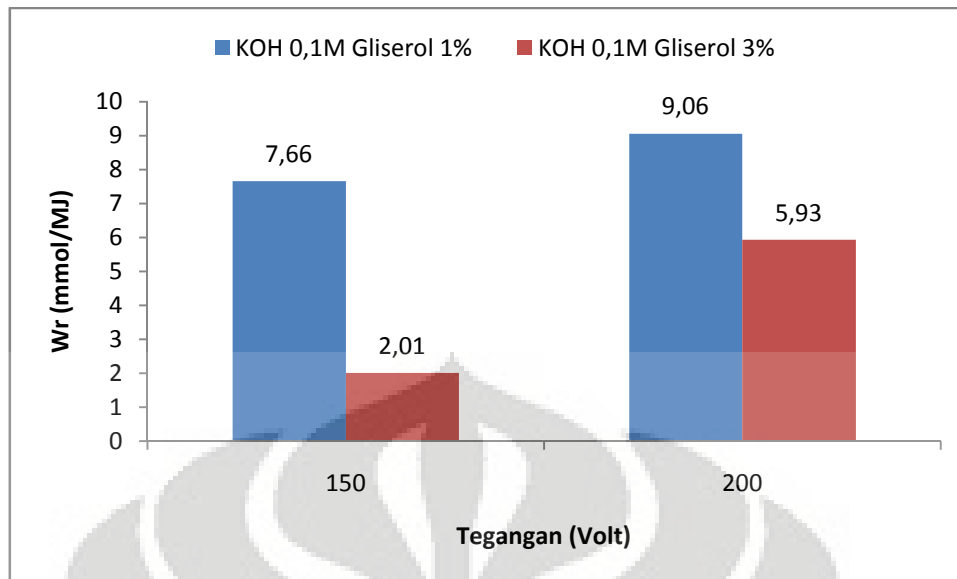
Seperti yang telah dibahas sebelumnya, peningkatan suhu tidak terlalu mempengaruhi produksi hidrogen maupun konsumsi energi. Fenomena ini diperkuat pula dengan data produksi hidrogen untuk setiap satuan energi listrik yang tersaji pada gambar berikut 4.6



Gambar 4. 6 Grafik hubungan antara W_r dengan suhu berbagai larutan pada tegangan 200V

Peningkatan produk memang terjadi, tetapi tidak signifikan. Selain itu suhu maksimum yang dapat dicapai oleh larutan adalah sekitar 105C. Namun pada suhu tersebut akan terjadi peningkatan produk uap air yang tidak diinginkan.

Konsumsi energi listrik cenderung menurun seiring dengan kenaikan tegangan operasi seperti yang terlihat pada gambar 4.7 yang memperlihatkan jumlah produk hidrogen per satuan energi. Kenaikan tegangan listrik akan meningkatkan rapat elektron. Meningkatnya kerapatan elektron mempermudah terjadinya proses eksitasi sehingga semakin banyak zat- zat radikal yang terbentuk. Akibatnya produk gas hidrogen yang terbentuk pun mengalami kenaikan. Hal ini berarti bahwa semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan, kinerja reaktor akan semakin efisien. Kebutuhan energi untuk membentuk plasma yang merupakan awal dari terbentuknya zat- zat radikal pembentuk hidrogen semakin berkurang seiring dengan kenaikan tegangan.



Gambar 4. 7 Grafik hubungan antara W_r dengan tegangan pada berbagai larutan pada rentang suhu 90-95C

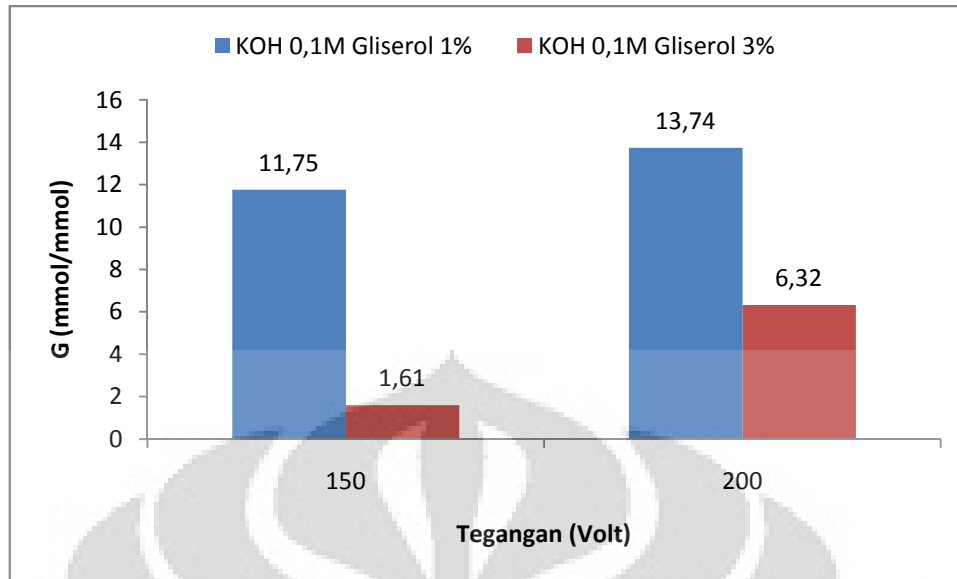
Jika tegangan dinaikkan lagi hingga 300V, plasma baru mulai terbentuk pada kisaran suhu 95-100C. Perilaku pada tegangan tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Produksi Hidrogen pada tegangan 300V larutan KOH 0,1 M Gliserol 3%

Produksi H_2 (mmol/s)	W_r (mmol/MJ)	G (mol/mol)
0,01	9,56	10,01

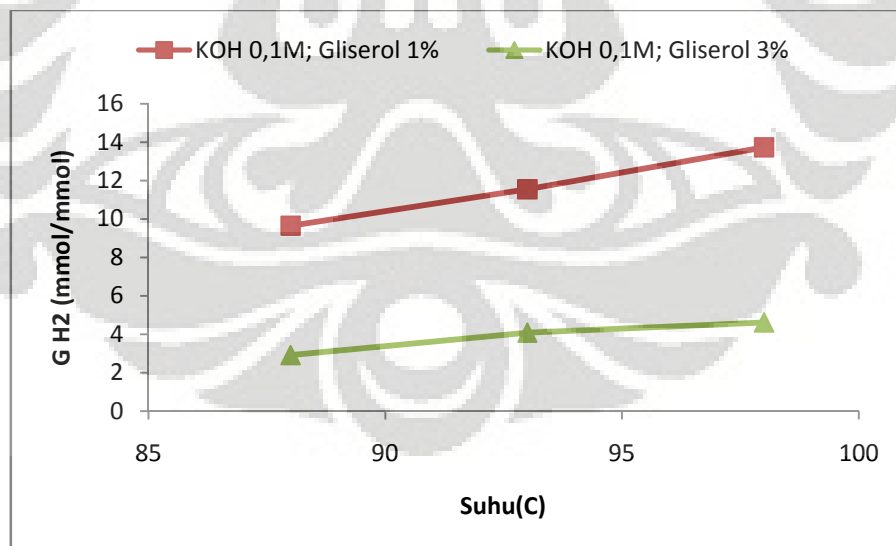
Terlihat bahwa pada tegangan 300V, nilai W_r meningkat dibandingkan dengan pada 200V. Ini berarti produktivitas hidrogen per konsumsi energi masih dapat terus meningkat jika tegangan masukan maksimum 300V.

Densitas plasma pancaran pijar berkaitan erat dengan tegangan. Peningkatan tegangan meningkatkan kerapatan elektron dan dengan demikian meningkatkan proses eksitasi sehingga lebih banyak gas yang hidrogen yang dihasilkan sebagai hasil dekomposisi air (Zongcheng Yan, et al. 2008). Perbandingan jumlah mol hidrogen ($G(H_2)$) dengan teknik ini dibandingkan dengan mol hidrogen yang dihasilkan dari elektrolisis biasa berdasarkan hukum Faraday meningkat dengan naiknya tegangan seperti terlihat pada grafik berikut.



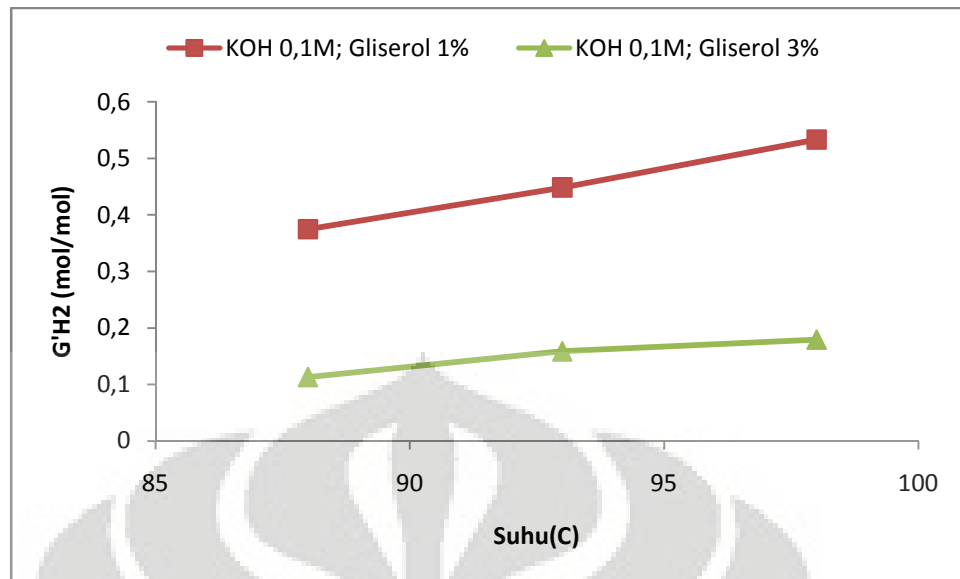
Gambar 4. 8 Grafik hubungan antara $G(H_2)$ dengan tegangan pada berbagai konsentrasi KOH pada suhu 90-95C

Sedangkan sebagai fungsi suhu, sama seperti sebelumnya, tidak terjadi perubahan yang signifikan untuk fungsi suhu. Perbandingan jumlah mol hidrogen elektrolisis plasma dengan elektrolisis nonplasma cenderung tidak mengalami banyak perubahan seiring dengan kenaikan suhu operasi.



Gambar 4. 9 Grafik hubungan antara $G(H_2)$ dengan suhu pada berbagai konsentrasi KOH pada tegangan 200V

Namun jika dibandingkan dengan hasil elektrolisis teoritis ideal yang dihitung dengan Persamaan 3.2, ternyata nilai perbandingan mol kurang dari satu.



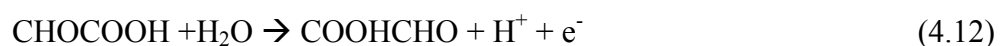
Gambar 4. 10 Grafik hubungan antara $G'(H_2)$ dengan suhu pada berbagai konsentrasi KOH pada tegangan 200V

Produk hidrogen dari elektrolisis yang dihitung dengan persamaan Faraday tentunya terjadi pada kondisi ideal dengan efisiensi proses 100%. Hal ini tentunya sulit dicapai pada kondisi aktual. Oleh karena itu hasil proses yang dikaji adalah yang dibandingkan dengan kondisi elektrolisis aktual dan ternyata hasilnya sudah menunjukkan peningkatan. Jika kondisi ideal dapat dicapai, mungkin saja nilai G'_{H_2} akan lebih besar lagi, bahkan mungkin lebih dari satu.

Adapun kemungkinan hasil gas reaksi sampingan pada katoda adalah CO dan CO₂. Kedua gas tersebut terbentuk akibat perengkahan asam gliserik. Asam gliserik terputus ikatan C primernya dan melepaskan CO atau CO₂. Pembentukan CO dan CO₂ adalah mekanisme radikal seperti yang ditunjukkan reaksi- reaksi berikut:



Namun air yang terbentuk dapat diikat kembali oleh CHOCOOH seperti dalam reaksi 4.12



Namun produksi gas CO maupun CO₂ cenderung tidak mengalami perubahan baik saat tegangan operasi atau konsentrasi larutan diubah. Menurut Stehring et.al, jumlah produk CO maupun CO₂ dapat diabaikan karena jauh lebih kecil daripada produk utama katoda (hidrogen) dan anoda (oksigen) dan reaksi samping di atas memerlukan energi yang cukup besar. Hal ini juga terjadi pada penelitian ini. Jumlah CO dan CO₂ sangat kecil dan dapat diabaikan

Tabel 4. 2 Perbandingan gas CO dan CO₂ pada berbagai tegangan dan konsentrasi

Gas	Jumlah (mmol dalam basis 5 menit)			
	Gliserol 1% 150V	Gliserol 1% 200V	Gliserol 3% 150V	Gliserol 3% 200V
CO ₂	0,2	0,225	0,2125	0,225
CO	0,05	0,05	0,0625	0,05

Dengan demikian, metode elektrolisis plasma pada penelitian ini terbukti mampu meningkatkan efektivitas elektrolisis Faraday. Produk hidrogen yang didapatkan dengan metode elektrolisis plasma larutan KOH-Gliserol ini dapat mencapai 13 kali lipat lebih besar daripada elektrolisis tanpa plasma. Jika hasil ini dibandingkan dengan elektrolisis plasma larutan KOH tanpa gliserol, hasilnya memang lebih rendah seperti terlihat pada tabel 4.1 berikut

Tabel 4. 3 Perbandingan Hasil Elektrolisis Plasma Larutan KOH-Gliserol dan KOH pada kondisi tegangan 200V dan suhu 90-95C

Larutan	Produk H ₂ (mmol/s)	G (mmol/MJ)	G (mmol/mmol)
KOH 0,1 M;Gliserol 1%	0,031	12,39	13,74
KOH 0,1 M	0,046	16,04	20,39

BAB 5 KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Proses elektrolisis plasma mampu memberikan produktivitas hidrogen yang lebih baik daripada elektrolisis non-plasma. Hal ini terbukti dengan nilai G yang lebih besar dari satu.

Gliserol memberikan efek penurunan konduktivitas yang signifikan pada sistem larutan. Hal ini dapat dilihat pada fenomena plasma yang cenderung berkurang pijarnya saat konsentrasi gliserol dinaikkan.

Penambahan gliserol secara umum justru menurunkan produktivitas hidrogen. Hal ini terjadi karena gliserol teroksidasi dalam plasma mengikat air sedangkan air sendiri juga dibutuhkan sebagai bahan baku hidrogen. Selain itu, gliserol juga melepaskan gas- gas CO dan CO₂ walaupun dalam jumlah yang relatif kecil atau dapat diabaikan dibandingkan dengan produksi hidrogen.

Peningkatan tegangan operasi menyebabkan densitas plasma menjadi meningkat sehingga eksitasi elektron menjadi lebih baik. Hal ini mengakibatkan bertambahnya pembentukan radikal hidrogen. Maka terjadi penambahan kuantitas hidrogen seiring dengan penambahan tegangan operasi.

Dari segi konsumsi energi, kenaikan konsentrasi gliserol menaikkan konsumsi energi. Konsumsi energi menjadi meningkat sebab konduktivitas larutan menurun sehingga perlu energi lebih besar untuk menghantarkan elektron dalam larutan dan menghasilkan pijaran plasma. Namun dengan peningkatan tegangan operasi, konsumsi energi dapat menurun. Hal ini karena peningkatan tegangan operasi dapat meningkatkan rapat elektron sehingga mempermudah pembentukan plasma sehingga dapat menurunkan arus listrik yang mengalir ke dalam larutan sehingga energi listrik dapat turun.

5.2 Saran

Untuk menyempurnakan penyelesaian masalah dalam skripsi ini, dapat dilakukan hal- hal untuk meningkatkan performa alat seperti peningkatan efisiensi sirkulasi pendingin. Selain itu perlu dilakukan juga uji liquid yang lebih mendalam untuk memastikan kandungannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Chaffin**, John H., Stephen M. Bobbio, Hilary I. Inyang³, Life Kaanagbara. (2006), “*Hydrogen Production by Plasma Electrolysis*”, Journal of Energy Eng. Vol. 132, No. 3.
- Gao** Jinzhang, Wang Aixiang, Fu Yan, Wu Jianlin, Ma Dongping, Guo Xiao, LiYan, Yang Wu. (2008). *Analysis of Energetic Species Caused by Contact Glow Discharge Electrolysis in Aqueous Solution*, Plasma Science and Technology. Vol. 10, No. 1.
- Feryansyah, Rizky.** (2010). *Sistem Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Plasma Nontermal dalam Larutan KOH*. Skripsi Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
- 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.
- Istadi.** (2006). “*Aplikasi Teknologi Hibrid Katalisis-Plasma Dalam Pengembangan Reaktor Kimia Masa Depan*”, Bulletin of Chem. Reaction Eng. & Catal.
- Jinzhang, Gao et, al.** (2008), “*Analysis of Energetic Species Caused by Contact Glow Discharge Electrolysis in Aqueous Solution*”, Plasma Science and Technology, Vol.10.
- Marshall, A.T., R.G. Haverkamp.** (2008) “*Production of hydrogen by the electrochemical reforming of glycerol–water solutions in a PEM electrolysis cell*”, International Journal of Hydrogen Energy 33. 4649-4654
- Mizuno, T., T. Akimoto, and T. Ohmori.** (2003), “*Confirmation of anomalous hydrogen generation by plasma electrolysis*”, in 4th Meeting of Japan CF Research Society. Iwate, Japan: Iwate University.
- Kogelschatz, U.** (2004). “*Atmospheric-pressure plasma technology*”, Plasma Phys. Controlled Fusion 46 B63–B75.
- Rivai, Andy.** (2008), *Penggunaan Plasma non-Thermal dalam Insinerator Limbah Padat*. Seminar Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.

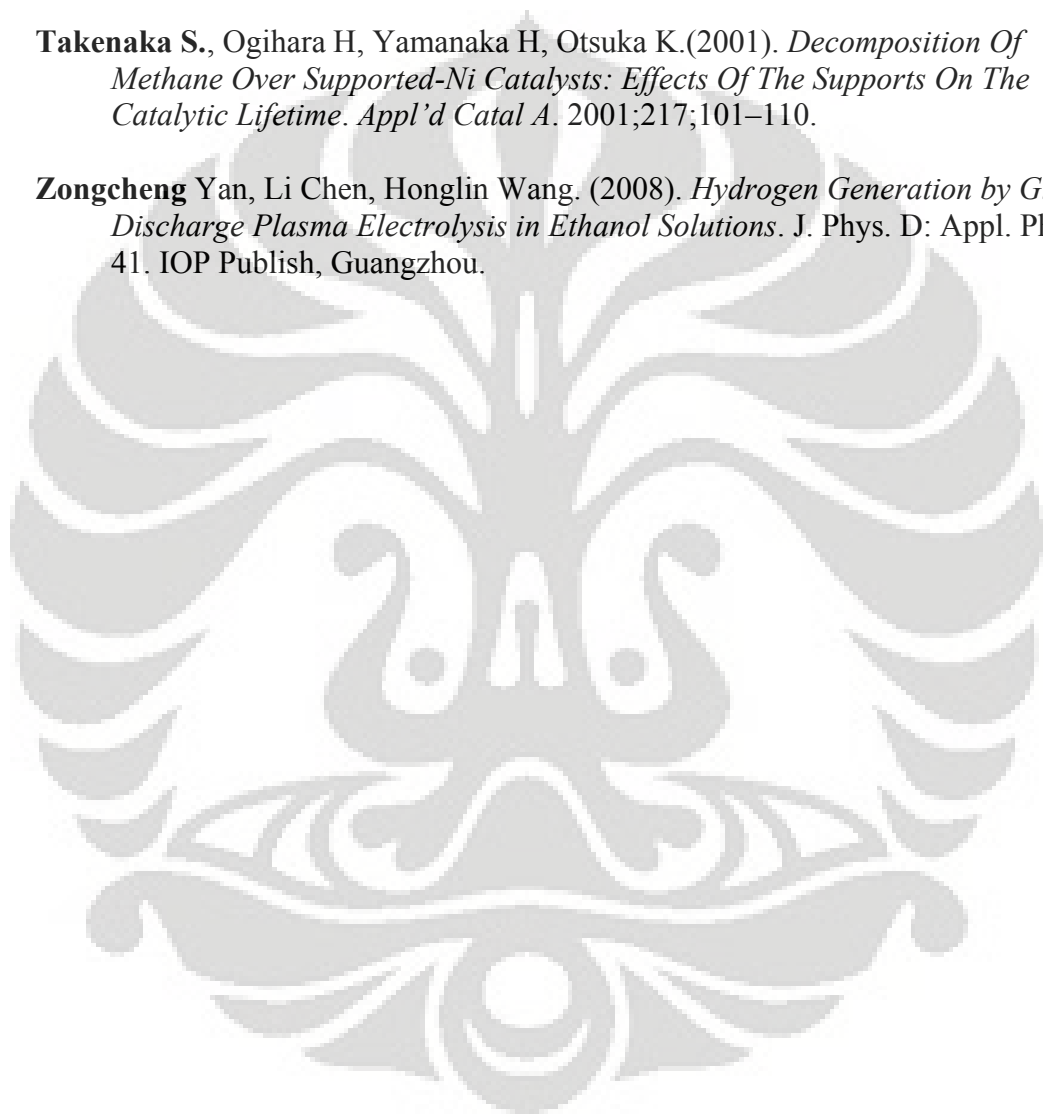
Roth, J.R ., (2001). “*Applications to Nonthermal Plasma Processing*”, Industrial Plasma Engineering vol :2, IOP Publish Philadelphia.

Saxena, S. K. _2003_. “*Hydrogen production by chemically reacting species.*” *Int. J. Hydrogen Energy*, 28, 49–53.

Stehring, Peter, Susanne Lux, Thomas Hilber, Peter Letonia, Matthaus Siebenhofer. (2008). *Oxidation of Glycerol on Diamond Coated Electrodes.*

Takenaka S., Ogihara H, Yamanaka H, Otsuka K.(2001). *Decomposition Of Methane Over Supported-Ni Catalysts: Effects Of The Supports On The Catalytic Lifetime.* *Appl'd Catal A.* 2001;217;101–110.

Zongcheng Yan, Li Chen, Honglin Wang. (2008). *Hydrogen Generation by Glow Discharge Plasma Electrolysis in Ethanol Solutions.* *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41. IOP Publish, Guangzhou.



LAMPIRAN 1

Metode Perhitungan

Pembuatan Larutan Induk KOH 2,5 M

Berat KOH yang ditimbang = 140 gram

Berat molekul KOH = 56 gr/mol

Volume larutan = 1 L

$$\text{Molaritas larutan} = \frac{\frac{140 \text{ gram}}{56 \text{ gr/mol}}}{1 \text{ L}} = 2,5 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

Pembuatan Larutan Uji

- **Larutan KOH 0,05 M 1 liter**

Pembuatan larutan KOH 0,05 M

Dengan rumus pengenceran:

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

$$(V_1)(2,5 \text{ mol/L}) = (1000 \text{ mL})(0,05 \text{ mol/L})$$

$$V_1 = 20 \text{ mL}$$

Jadi besarnya volume larutan KOH 2,5 M yang harus diambil adalah 20 mL.

- **Larutan KOH 0,1 M 1 liter**

Pembuatan larutan KOH 0,1 M

Dengan rumus pengenceran:

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

$$(V_1)(2,5 \text{ mol/L}) = (1000 \text{ mL})(0,1 \text{ mol/L})$$

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

- **Larutan Gliserol 1% 1 liter**

Pembuatan larutan gliserol 1% menggunakan larutan induk gliserin 87%

Dengan rumus pengenceran:

$$V_1 \cdot \%_1 = V_2 \cdot \%_2$$

$$(V_1)(87\%) = (1000 \text{ mL})(1\%)$$

$$V_1 = 11,35 \text{ mL}$$

Jadi jika ingin membuat larutan gliserol 1 % dalam 0,05 M KOH, diambil 11,35 ml gliserin 87% kemudian ditambahkan larutan 0,05 M KOH hingga volum larutan mencapai 1 liter.

- Larutan Gliserol 3% 1 liter
Untuk membuat larutan gliserol 3%, diambil 3 X 11,35 ml gliserin 87% kemudian ditambahkan pelarut hingga volum larutan mencapai 1 liter

Contoh Perhitungan laju alir produk

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

$$Q = \frac{10mL}{4detik}$$

$$Q = 2,5 mL / detik$$

Contoh Perhitungan $G'(H_2)$ ($T = 25^\circ C$)

$$G(H_2) = \frac{V_{gasH_2} / 24}{Q / 2F} = \frac{LajuAlir Produk (ml / s) \cdot Komposisi(\%) \cdot waktu(s) \cdot F}{11.2 \cdot I \cdot t}$$

$$G(H_2) = \frac{(0,025)L \cdot (96500)C / mol}{(11,2)mol / L \cdot (1,85)ampere \cdot (120)detik}$$

$$G(H_2) = 0,95 mol \cdot mol^{-1}$$

Contoh Perhitungan W_r ($T = 25^\circ C$)

$$W_r = \frac{VQ}{V_{gasH_2}}$$

$$W_r = \frac{(150)volt \cdot (2,85)ampere \cdot (300)detik}{(0,025)L}$$

$$W_r = 513 kJ / L$$

LAMPIRAN 2
DATA PERCOBAAN

Gliserol 1 %
 KOH 0,1 M
 Voltage 200 V
 Plasma pertama 82 C
 Konduktivitas
 Awal 14,92 mS
 Konduktivitas
 Akhir 14,89 mS

Suhu (C)	Tq (s)	Q (ml/s)	Volt (V)	Arus (A)	%H ₂	CO (ppm)	%CO ₂	Q H ₂ (ml/s)	watt-5min	watt-hr
85-90	4,1	1,557298	201,1	2,3	12,6	2300	1,2	0,196219512	75,2	902,4
	2,8		204,3	3,7						
	3		204,8	2,8						
90-95	1,6	3,27381	201,1	2,3	22,68	2251	2,4	0,7425	220,9	2650,8
	1,6		204,3	3,7						
	1,4		204,8	2,8						
95-100	5,8	1,275011	201,3	2,7	21,275	2217	2,4	0,271258514	73,071429	876,8571
	2,7		204,3	2,66						
	4,5		204,8	2,8						

Gliserol	1	%
KOH	0,1	M
Voltage	150	V
Plasma pertama	82	C
Konduktivitas Awal	14,92	mS
Konduktivitas Akhir	9,42	mS

Suhu (C)	Tq (s)	Q (ml/s)	Volt (V)	Arus (A)	%H2	CO (ppm)	%CO2	Q H2 (ml/s)	watt-5min	watt-hr
80-85	2,7	2,089715	152	3,8	13,72	2323	0,8	0,286708902	130	1560
	2,8		151	3,4						
	1,9		151	3,6						
85-90	3,1	2,59319	151	3,3	13,1	2455	1,3	0,339707885	132	1584
	1,2		151	3,7						
	2,5		151	2,8						
90-95	1,2	3,412698	151	3,3	14,48	2224	0,4	0,49415873	116,66667	1400
	1,4		151	3,7						
	2		151	2,8						
95-100	0,6	4,869281	152	3,1	19,24	2400	1,6	0,936849673	92	1104
	1,7		152	3						
	1,5		152	3,2						

Gliserol	1	%
KOH	0,15	M
Voltage	150	V
Plasma pertama	82	C
Konduktivitas Awal	23,5	mS
Konduktivitas Akhir	27,6	mS

Suhu (C)	Tq (s)	Q (ml/s)	Volt (V)	Arus (A)	%H2	CO (ppm)	%CO2	Q H2 (ml/s)	watt-5min	watt-hr
80-85	3,8	1,318226	152	3,8	10,78	2423	3	0,142104776	90	1080
	4		151	3,4						
	3,6		151	3,6						
85-90	5,9	0,877914	151	3,3	25	2300	3,1	0,21947846	90	1080
	5,5		151	3,7						
	5,7		151	2,8						
90-95	3,4	1,462418	151	3,3	14,48	2420	1,4	0,21175817	95	1140
	4		151	3,7						
	3		151	2,8						
95-100	4,8	0,883808	152	3,1	19,24	2455	1,6	0,17004458	97	1164
	5		152	3						
	8,2		152	3,2						

Gliserol	1 %
KOH	0,15 M
Voltage	200 V
Plasma pertama	75 C
Konduktivitas Awal	23,5 mS
Konduktivitas Akhir	22,9 mS

Suhu (C)	Tq (s)	Q (ml/s)	Volt (V)	Arus (A)	%H2	CO (ppm)	%CO2	Q H2 (ml/s)	watt-5min	watt-hr
80-85	4,5	1,12037	204	3,8	38,8	2300	3,8	0,434703704	340	4080
	4		205	3,4						
	5		201	3,6						
85-90	4,2	1,001401	205	3,3	39,07	2431	5	0,391247199	200	2400
	6		206	3,7						
	5,1		202	2,8						
90-95	5,4	0,898659	204	3,3	39,4	2266	4,9	0,354071521	170	2040
	5,7		204	3,7						
	5,6		204	2,8						
95-100	6,2	0,826215	204	3,1	41,56	2309	1,6	0,34337512	190	2280
	5,4		204	3						
	6,7		204	3,2						

Gliserol	3 %
KOH	0,1 M
Voltage	150 V
Plasma pertama	78 C
Konduktivitas Awal	13,4 mS
Konduktivitas Akhir	14,3 mS

Suhu (C)	Tq (s)	Q (ml/s)	Volt (V)	Arus (A)	%H2	CO (ppm)	%CO2	Q H2 (ml/s)	watt-5min	watt-hr
80-85	1,9	1,849087	152	3,8	6,07	2100	2,4	0,112239573	350	4200
	2,7		151	3,4						
	4,7		151	3,6						
85-90	4,2	1,001401	151	3,3	6,88	2156	3	0,068896359	360	4320
	6		151	3,7						
	5,1		151	2,8						
90-95	5,4	0,898659	151	3,3	20,94	2300	2,2	0,188179128	325	3900
	5,7		151	3,7						
	5,6		151	2,8						
95-100	6,2	0,826215	152	3,1	21,88	2412	2,6	0,180775929	340	4080
	5,4		152	3						
	6,7		152	3,2						

Gliserol	3 %
KOH	0,1 M
Voltage	200 V
Plasma pertama	78 C
Konduktivitas Awal	13,4 mS
Konduktivitas Akhir	12,6 mS

Suhu (C)	Tq (s)	Q (ml/s)	Volt (V)	Arus (A)	%H2	CO (ppm)	%CO2	Q H2 (ml/s)	watt-5min	watt-hr
80-85	2,5	1,804784	204	3,8	18,68	2280	1	0,337133642	201	2412
	3,2		205	3,4						
	2,7		201	3,6						
85-90	4,2	1,001401	205	3,3	14,37	2108	1,2	0,143901261	183	2196
	6		206	3,7						
	5,1		202	2,8						
90-95	5,4	0,898659	204	3,3	18,42	2009	1	0,16553293	150	1800
	5,7		204	3,7						
	5,6		204	2,8						
95-100	5,6	0,826215	204	3,1	19,01	2004	1,5	0,133433787	107	1284
	5,4		204	3						
	6,0		204	3,2						

Gliserol	3 %
KOH	0,1 M
Voltage	300 V
Plasma pertama	96 C
Konduktivitas Awal	13,4 mS
Konduktivitas Akhir	12,6 mS

Suhu (C)	Tq (s)	Q (ml/s)	Volt (V)	Arus (A)	%H2	CO (ppm)	%CO2	Q H2 (ml/s)	watt-5min	watt-hr
98-100	1,96	7,657335	300	3,1	41,33	2466	2,666667	3,164776544	126,5	1518
	1,15		300	3						
	1,09		300	2,8						