UNIVERSITAS INDONESIA

RANCANG BANGUN SISTEM PRODUKSI HIDROGEN MELALUI PROSES ELEKTROLISIS PLASMA NON-TERMAL

SKRIPSI

CHRISTINA NATALIA
0706200200

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
DESEMBER 2009

UNIVERSITAS INDONESIA

RANCANG BANGUN SISTEM PRODUKSI HIDROGEN MELALUI PROSES ELEKTROLISIS PLASMA NON-TERMAL

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

CHRISTINA NATALIA
0706200200

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
DESEMBER 2009

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,

dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk

telah saya nyatakan dengan benar.

Nama	**: Christina Natalia**
NPM	**: 0706200200**
Tanda Tangan	**: .....**
Tanggal	**: 29 Desember 2009**

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh	:	
Nama	:	Christina Natalia
NPM	:	0706200200
Program Studi	:	Teknik Kimia
Judul skripsi	:	Rancang Bangun Sistem Produksi Hidrogen melalui Proses Elektrolisis Plasma Non-Termal

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing	: Dr. Ir. Nelson Saksono, MT.	(.....)
Penguji	: Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA	(.....)
Penguji	: Ir. Eva Fathul Karamah, MT.	(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 29 Desember 2009

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan YME, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi dengan judul Rancang Bangun Sistem Produksi Hidrogen Melalui Proses Elektrolisis Plasma Non-Termal 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 dan Bapak Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA 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 Tania Surya Utami, ST., MT. selaku pembimbing akademis.
(4) Keluarga dan teman – teman Ekstensi Teknik Kimia 2007, atas semangatnya pada waktu mengambil data 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.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu dan semoga makalah skripsi ini membawa manfaat bagi penegmbangan ilmu.

.

Depok, 29 Desember 2009

Penulis

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama	: Christina Natalia
NPM	: 0706200200
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:

RANCANG BANGUN SISTEM PRODUKSI HIDROGEN MELALUI PROSES ELEKTROLISIS PLASMA NON-TERMAL

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 29 Desember 2009
Yang Menyatakan

(Christina Natalia)

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

ABSTRAK

Nama : Christina Natalia
Program studi : Teknik Kimia
Judul : Rancang Bangun Sistem Produksi Hidrogen Melalui Proses Elektrolisis Plasma Non-Termal

Pada penelitian ini dilakukan rancang bangun sistem produksi hidrogen melalui elektrolisis plasma pancaran pijar dengan perubahan variabel proses seperti suhu, tegangan, dan konsentrasi KOH. Selama proses elektrolisis, akan terbentuk spesi-spesi aktif yang akan meningkatkan produksi gas hidrogen. Rasio jumlah mol H_2 yang dihasilkan ($G(H_2)$) meningkat dengan meningkatnya tegangan dan konsentrasi KOH. Hal yang sebaliknya terjadi pada jumlah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan sejumlah volum hidrogen pada waktu tertentu (W_r). Pada tegangan 70 volt DC dan konsentrasi KOH 0,08 M, 0,14 M, dan 0,20 M nilai $G(H_2)$ masing-masing adalah 1,11 $mol.mol^{-1}$;1,20 $mol.mol^{-1}$ dan 1,23 $mol.mol^{-1}$ sedangkan nilai Wr adalah 550 kJ/L; 514,54 kJ/L dan 504,19 kJ/L.

Kata kunci:
Plasma non-termal, elektrolisis plasma pancaran pijar , produksi gas hidrogen

ABSTRACT

Name : Christina Natalia
Study Program : Chemical Engineering
Title : Hydrogen Production Systems Design Through Plasma Non-Thermal Electrolysis Process

This paper performed the system design of hydrogen production via glow discharge plasma electrolysis by changing the process variables such as temperature, voltage, and the concentration of KOH. During the electrolysis process, energetic species will form and increase the production of hydrogen. The mole number of hydrogen divided by the Faradaic stipulated yield by passing the given electricity between the two electrodes, G (H_2), increases with increasing voltage and concentration of KOH. The opposite occurs in the power depleted divided by the hydrogen volume (Wr). At 70 V DC and the concentration of KOH 0,08 M, 0,14 M, and 0,20 M the value G (H_2), respectively, are 1,11 $mol.mol^{-1}$; 1,20 $mol.mol^{-1}$ and 1,23 $mol.mol^{-1}$ while the value of Wr is 550 kJ/L; 514,54 kJ/L and 504,19 kJ/L.

Keywords:
Plasma Non-thermal, glow discharge plasma electrolysis, hydrogen production

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL…….	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS……..	ii
HALAMAN PENGESAHAN……...	iii
KATA PENGANTAR……..	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK……...	vi
DAFTAR ISI……	vii
DAFTAR TABEL……	ix
DAFTAR GAMBAR……...	x
DAFTAR LAMPIRAN……	xii
1. PENDAHULUAN…..……	1
1.1 Latar Belakang…….....	1
1.2 Perumusan Masalah…….....	2
1.3 Tujuan Penelitian……..	2
1.4 Manfaat Penelitian…….....	3
1.5 Batasan Masalah……	3
1.6 Sistematika Penulisan……	4
2. TINJAUAN PUSTAKA…….	5
2.1 Hidrogen……	5
2.2 Produksi Hidrogen…….	6
2.2.1 Pemisahan Hidrogen dari Hidrokarbon……	6
2.2.2 Elektrolisis……	6
2.3 Plasma……	8
2.4 Jenis Plasma……...	9
2.5 Spesi Aktif Plasma Non-termal.....	11
2.5.1 Foton	11
2.5.2 Spesi Netral	12
2.5.3 Partikel-partikel bermuatan	12
2.6 Plasma Elektrolisis…….	13
2.5.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi CGDE…..……..	16
3. METODE PENELITIAN……	25
3.1 Diagram Alir Penelitian…….	25
3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian……..…..	26
3.3 Rancang Bangun Peralatan Sistem Produksi Hidrogen.....	26
3.2.1 Rangkaian Pembangkit Plasma.....	26
3.2.2 Peralatan Reaktor Plasma Elektrolisis.....	26
3.2.3 Peralatan Pemisahan dan Pengukuran Produk Gas Hidrogen.....	28
3.3 Preparasi Bahan.....	29

Universitas Indonesia
Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

Halaman

3.4 Uji Pendahuluan Peralatan Sistem Produksi Hidrogen..... 29
3.5 Prosedur Penelitian..... 30
3.5.1 Pengukuran Konduktivitas Larutan..... 30
3.6 Hasil Uji Peralatan Sistem Produksi Hidrogen..... 31

4. PEMBAHASAN..... 32

5. KESIMPULAN DAN SARAN..... 39
5.1 Kesimpulan..... 39
5.2 Saran..... 40

DAFTAR REFERENSI..... 41
LAMPIRAN..... 43

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

DAFTAR TABEL

		Halaman
Tabel 2.1	Tabel perbandingan kinerja teknologi produksi hidrogen.....	6
Tabel 2.2	Beberapa warna plasma yang timbul akibat adanya aliran gas tertentu……	9
Tabel 2.3	Klasifikasi Plasma.....	10
Tabel 2.4	Energi-energi foton dalam spektrum elektromagnetik……..	11
Tabel 2.5	Komposisi gas hasil elektrolisis plasma non-termal dari larutan metanol ……..……	15
Tabel 2.6	Perbandingan kinerja teknologi non-plasma untuk produksi hidrogen…….	16

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

DAFTAR GAMBAR

		Halaman
Gambar 2.1.	Skematisasi sistem elektrolisis plasma non-termal	8
Gambar 2.2.	Pengaruh tegangan pada G(H_2),konduktivitas: 11,55 mS/cm, suhu : 64 ^oC, konsentrasi metanol: 99,5 %.....	15
Gambar 2.3.	Pengaruh tegangan pada konsumsi energi konduktivitas: 11,55 mS/cm, suhu : 64 ^oC, konsentrasi metanol : 99,5 %	15
Gambar 2.4.	Efek tegangan terhadap pembentukan radikal *OH pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *OH.....	17
Gambar 2.5.	Efek tegangan terhadap pembentukan radikal *H pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *H……	17
Gambar 2.6.	Efek konduktivitas larutan terhadap pembentukan radikal *OH pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *OH……	18
Gambar 2.7.	Efek konduktivitas larutan terhadap pembentukan radikal *H pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *H….	18
Gambar 2.8.	Efek pH larutan terhadap pembentukan radikal *OH pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *OH…….	19
Gambar 2.9.	Efek pH larutan terhadap pembentukan radikal *H pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *H……	19
Gambar 2.10.	Efek konduktifitas larutan metanol terhadap G(H_2) pada anoda dan katoda dalam media dielektrikum NaOH dan H_2SO_4, T = 337,15 K, kemurnian 99,5%.....	20
Gambar 2.11.	Efek konduktifitas terhadap Wr (konsumsi energi) pada larutan NaOH dan metanol,. T = 337,15 K, kemurnian 99,5%.....	20
Gambar 2.12.	Efek tegangan terhadap G(H_2) dalam media dielektrikum yang berbeda, konduktifitas = 11,55 mS/cm, T=337,15 K, kemurnian metanol 99,5%.....	21

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

Halaman

Gambar 2.13. Efek tegangan terhadap konsumsi energi dalam media dielektrikum yang berbeda, konduktifitas = 11,55 mS/cm, T=337,15 K, kemurnian metanol 99,5%..... 22

Gambar 2.14. Efek konsentrasi etanol terhadap $G(H_2)$. T=303,15 K, konduktifitas = 5,6 mS cm^{-1}, V = 1000V..... 22

Gambar 2.15. Efek konsentrasi etanol terhadap konsumsi energi. T=303,15 K, konduktifitas = 5,6 mS cm^{-1}, V = 1000V..... 23

Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian..... 25

Gambar 3.2. Rangkaian peralatan reaktor elektrolisis plasma: (a) reaktor dan pendingin; (b) rangkaian eletroda, termometer dan kaca pemisah pada bagian dalam reaktor..... 27

Gambar 3.3. Peralatan pemisahan, pemurnian dan pengukuran produk gas hidrogen..... 28

Gambar 3.4. Keseluruhan peralatan dan pengukuran sistem produksi hidrogen..... 29

Gambar 4.1. Grafik hubungan antara temperatur, arus dan tegangan terhadap waktu dalam larutan KOH 0,14 M dan tegangan 70 volt……. 32

Gambar 4.2. Ukuran plasma pada larutan KOH 0,2 M dengan tegangan : (a) 70 V; (b) 90 V; (c) 110 V..... 33

Gambar 4.3. Grafik hubungan antara laju alir terhadap suhu dalam berbagai konsentrasi KOH pada tegangan 70 volt…… 35

Gambar 4.4. Grafik hubungan antara $\%H_2$ yang diperoleh terhadap tegangan pada berbagai konsentrasi KOH……. 35

Gambar 4.5. Grafik hubungan antara laju alir dengan tegangan pada berbagai konsentrasi larutan KOH..... 36

Gambar 4.6. Grafik hubungan antara $G(H_2)$ dengan suhu pada berbagai tegangan dengan konsentrai KOH 0,20 M…….. 37

Gambar 4.7. Grafik hubungan antara Wr dengan temperatur pada berbagai tegangan (larutan KOH 0,08 M)..... 38

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

DAFTAR LAMPIRAN

		Halaman
Lamp.1	Contoh Perhitungan Konsentrasi KOH, Laju Alir, Jumlah Mol H_2, Konsumsi Listrik dan Konduktivitas Larutan.....	36
Lamp.2	Grafik Variasi, Tegangan, Konsentrasi KOH dan Suhu……..……....	40
Lamp.3	Data-data Variasi Tegangan, Konsentrasi KOH dan Suhu.....	53

Universitas Indonesia
Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Setiap tahun, konsumsi energi di Indonesia meningkat rata-rata sebesar 7% seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk, kegiatan ekonomi dan perkembangan industri. Komposisi pemakaian jenis energi di Indonesia terdiri atas minyak bumi 51,66%, gas alam 28,57%, batu bara 15,34%, tenaga air 3,11% dan panas bumi 1,32% (www.kompas.com/bahanbakarhidrogen. Diakses tanggal 14 April 2009). Dari data tersebut terlihat bahwa minyak bumi masih mendominasi pemakaian jenis energi di Indonesia.

Penggunaan minyak bumi sebagai sumber energi, perlahan namun pasti dapat merusak lapisan atmosfer dan berdampak negatif terhadap kesehatan manusia. Menurut penelitian, sumber polusi terbesar di dunia dihasilkan oleh gas buang kendaraan bermotor, yang menggunakan minyak bumi sebagai bahan bakarnya. Minyak bumi adalah salah satu contoh hidrokarbon. Oleh karena itu, perlu dilakukan diversifikasi penggunaan energi guna menghemat pemakaian energi fosil dan demi memenuhi kebutuhan energi di masa depan.

Peraturan Presiden No. 5 tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional menyebutkan komposisi jenis energi di Indonesia pada tahun 2025 adalah batu bara 33%, gas alam 30%, minyak bumi 20%, dan energi terbarukan 17%. Termasuk dalam 17% ini ialah bahan bakar nabati sebesar 5%, panas bumi 5%, biomassa, nuklir, air, surya dan angin sebesar 5%, serta batu bara yang dicairkan sebanyak 2% (www.kompas.com/bahanbakarhidrogen. Diakses tanggal 14 April 2009). Dari hal di atas dapat dilihat bahwa hidrogen belum menjadi prioritas pemerintah Indonesia dalam mengembangkan energi terbarukan.

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 H_2 tertinggi namun menghasilkan emisi tertinggi pula. *Partial oxidation* memiliki produktivitas H_2 yang rendah sementara *autothermal reforming* untuk aplikasi komersialnya masih sangat terbatas. Penggunaan biomass dan air sebagai bahan baku produksi hidrogen merupakan

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

topik penelitian yang menarik dan menjanjikan guna menjawab berbagai persoalan ketersediaan energi dan pencemaran udara saat ini (Holladay, et al. 2009).

Elektrolisis air terkendala oleh konversi air yang kecil dan konsumsi energi yang relatif besar. Elektrolisis air menggunakan teknologi plasma merupakan salah satu solusi dari persoalan tersebut. Teknologi plasma diketahui dapat menghasilkan gas hidrogen delapan kali lebih banyak dari elektrolisis konvensional (Mizuno,et al. 2003). Penerapan metode-metode proses plasma memberikan kontribusi penting pada : pengurangan emisi karbondioksida dan pemanasan global; pengurangan konsumsi energi; peningkatan efisiensi penggunaan energi; pengurangan polusi dan kontaminan lingkungan. Jenis plasma yang digunakan dalam penelitian adalah plasma non-termal.

Penelitian ini diawali dengan pembuatan reaktor elektrolisis plasma non-termal berupa tabung dari bahan arcylic yang dilengkapi sepasang elektroda *stainless steel* beserta sumber tegangan yang bersumber dari PLN sebagai pembangkit plasma. Reaktor batch ini dilengkapi dengan air pendingin guna mengendalikan suhu air. Penggunaan KOH (dalam jumlah sedikit) adalah untuk meningkatkan konduktivitas air. Produk yang dihasilkan dari reaktor akan dilewatkan pada kondenser untuk pemisahan produk hidrogen dari uap air dan senyawa lain yang mudah terkondensasi

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana rancang bangun sistem produksi hidrogen melalui proses elektrolisis plasma non-termal?
2. Bagaimana kinerja dan produktivitas plasma non-termal dalam memproduksi hidrogen?
3. Bagaimana pengaruh variabel proses terhadap kinerja dan produktivitas plasma non-termal dalam memproduksi hidrogen?

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mendapatkan suatu *prototype* untuk sistem produksi hidrogen melalui proses elektrolisis plasma non-termal yang dapat beroperasi dengan tenaga listrik (PLN).
2. Menguji kinerja dan produktivitas plasma non-termal dalam memproduksi hidrogen.
3. Mendapatkan pengaruh variabel proses seperti tegangan, suhu, dan konsentrasi KOH terhadap kinerja dan produktivitas plasma non-termal .

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk pengembangan penelitian berikutnya seperti menemukan kondisi optimum proses dan mendapatkan produktivitas hidrogen yang tinggi.

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, temperatur dan konsentrasi larutan kalium hidroksida (KOH).
2. Plasma yang digunakan dalam penelitian ini adalah plasma jenis *glow discharge* atau plasma pancaran pijar.
3. Pengukuran gas hidrogen yang dihasilkan dilakukan dengan hidrogen *analyzer* GNL-400F.
4. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses Departemen Teknik Kimia UI pada suhu dan tekanan atmosfer.

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

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

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tentang konsep hidrogen, produksi hidrogen, pemisahan hidrogen dari hidrokarbon, elektrolisis, plasma, jenis plasma, plasma elektrolisis, faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja CGDE.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

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

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

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

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

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

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

BAB 2
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 juga adalah unsur paling melimpah dengan persentase kira-kira 75% dari total massa unsur alam semesta. Kebanyakan bintang dibentuk oleh hidrogen dalam keadaan plasma. Senyawa hidrogen relatif langka dan jarang dijumpai secara alami di bumi, dan biasanya dihasilkan secara industri dari berbagai senyawa hidrokarbon seperti metana. Hidrogen juga dapat dihasilkan dari air melalui proses elektrolisis, namun proses ini secara komersial lebih mahal daripada produksi hidrogen dari gas alam.

Isotop hidrogen yang paling banyak dijumpai di alam adalah protium, yang inti atomnya hanya mempunyai proton tunggal dan tanpa neutron. Senyawa ionik hidrogen dapat bermuatan positif (kation) ataupun negatif (anion). Hidrogen dapat membentuk senyawa dengan kebanyakan unsur dan dapat dijumpai dalam air dan senyawa-senyawa organik. Hidrogen sangat penting dalam reaksi asam basa yang mana banyak reaksi ini melibatkan pertukaran proton antar molekul terlarut. Oleh karena hidrogen merupakan satu-satunya atom netral yang persamaan Schrödingernya dapat diselesaikan secara analitik, kajian pada energetika dan ikatan atom hidrogen memainkan peran yang sangat penting dalam perkembangan mekanika kuantum.

(http://id.wikipedia.org/wiki/hydrogen. Diakses: 12 April 2009)

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

2.2 Produksi Hidrogen

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

2.2.1 Pemisahan Hidrogen dari Hidrokarbon

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:

$$C_xH_y + x\,H_2O = x\,CO + \left(x + \frac{1}{2}y\right)H_2 \qquad (2.1)$$

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*:

$$C_xH_y + x\,H_2O = x\,CO + \left(x + \frac{1}{2}y\right)H_2 \qquad (2.2)$$

Tabel di bawah merupakan perbandingan kinerja beberapa teknologi produksi hidrogen.

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

Teknologi	Kelebihan	Kerugian
Steam reforming	Tidak memerlukan oksigen Temperatur proses rendah Ratio gas CO/H_2 paling besar	Emisi CO_2 terbesar
Autothermal reforming	Temperatur proses yang lebih rendah dari POX *Low methane slip*	Membutuhkan udara atau oksigen Penggunaan secara komersial masih terbatas
Partial oxidation	Tdak memerlukan katalis Mengurangi kebutuhan desulfurisasi *Low methane slip*	Ratio H_2/CO rendah Membutuhkan temperatur proses yang tinggi

2.2.2 Elektrolisis

Elektrolisis adalah metode pemecahan molekul – molekul air menjadi atom – atom penyusunnya. Michael Faraday disamping mengembangkan metode

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

elektrolisis, juga menerangkan hubungan kuantitatif antara jumlah arus listrik yang dilewatkan pada sel elektrolisis dengan jumlah zat yang dihasilkan pada elektroda. Ia merangkumkan hasil pengamatannya dalam dua hukum di tahun 1833.

Hukum elektrolisis Faraday:

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

C (Coulomb) adalah satuan muatan listrik, dan 1 C adalah muatan yang dihasilkan bila arus 1 A (Ampere) mengalir selama 1 s. Tetapan fundamental listrik adalah konstanta Faraday F, 9,65 $x10^4$ C, yang didefinisikan sebagai kuantitas listrik yang dibawa oleh 1 mol elektron. Bilangan ini dimungkinkan untuk menghitung kuantitas mol perubahan kimia yang disebabkan oleh aliran arus listrik yang tetap mengalir untuk rentang waktu tertentu.

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

$$\begin{aligned} &\text{Anoda (oksidasi)}: 2H_2O_{(l)} \rightarrow O_{2(g)} + 4H^+_{(aq)} + 4e \qquad E^o = -1,23\,V \\ &\text{Katoda (reduksi)}: 2H^+_{(aq)} + 2e \rightarrow H_{2(g)} \qquad\qquad\qquad\quad E^o = 0\ V \end{aligned} \tag{2.3}$$

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

$$2H_2O_{(l)} \rightarrow O_{2(g)} + 2H_{2(g)} \qquad E^o = -1,23\ V\,;\Delta H = 285,83\,kJ/mol \tag{2.4}$$

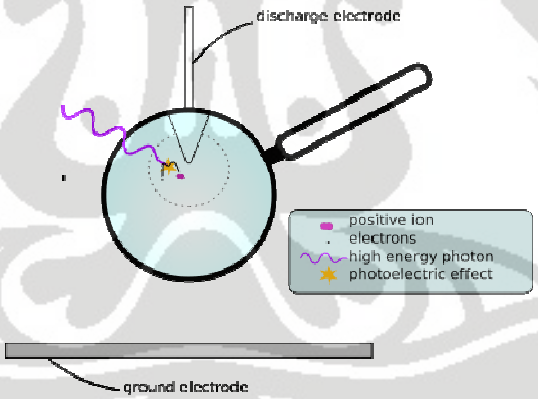
Akan tetapi, elektrolisis air yang digunakan sebagai metode untuk menghasilkan hidrogen sampai saat ini mempunyai kelemahan yang cukup signifikan yaitu rendahnya konversi yang dihasilkan dari proses elektrolisis dan kebutuhan arus listrik yang tinggi saat operasi elektrolisis sedang berlangsung.

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

2.3 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 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 sehinga sangat konduktif dan terpengaruh dengan medan magnet.

Plasma terbentuk akibat adanya perbedaan muatan listrik yang sangat tinggi antara elektrodanya dan mengalir melalui gas dan menghamburkan energi yang dimiliki oleh gas tersebut sehingga membuat gas menjadi cukup panas. Hal ini membuat partikel dalam gas ini akan bertumbukan dengan partikel disekitarnya tapi juga akan mempengaruhi medan magnetik disekitarnya. (Moustakas, et al., 2005) seperti dapat ditunjukkan pada Gambar 2.1 di bawah.



Gambar 2.1. Skematisasi sistem elektrolisis plasma non-termal

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:

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

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.

2.4 Jenis Plasma

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

1. Plasma termal (plasma suhu tinggi): densitas energi tinggi, kesamaan suhu antara partikel berat (atom, molekul, ion) dan elektron. Karena mobilitas yang jauh lebih tinggi, energi yang diberikan kepada plasma ditangkap oleh elektron yang dipindahkan ke partikel-partikel berat dengan tumbukan 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 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).
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

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

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 (>5000K), sedangkan suhu *bulk* tidak naik secara signifikan (Yan ZC, et.al., 2006). Karena hanya elektron yang tereksitasi, sehingga energi dibutuhkan hanya beberapa ratus Watt daya listrik yang dibutuhkan (T. paulmier dan L. Fulcheri, 2005).

Tabel 2.3 Klasifikasi Plasma (H. Huang , L. Tang, 2007)

Plasma	Keadaan	Contoh
Plasma Temperatur Tinggi (Equilibrium Plasma)	Te=Ti=Th, Tp=10^6– 10^8 K ne ≥ 10^{20} m^{-3}	*Laser fusion plasma*
Plasma Temperatur Rendah (Quasi-Equilibrium Plasma)	Te≈Ti≈Th, Tp= $2x10^3$ – $3x10^4$ K ne ≥ 10^{20} m^{-3}	*Arc plasma; atmospheric RF discharge*
Plasma Non Termal (Non-Equilibrium Plasma)	Te≥Th, Tp ≈ $3x10^2$ – $4x10^2$ K ne ≈ 10^{10} m^{-3}	*Corona Discharge, Contact Glow Discharge, DBD, Microwave plasma*

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

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.

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

2.5 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).

2.5.1 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.

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

Tabel 2.4 Energi-energi foton dalam spektrum elektromagnetik (Roth, 2001)

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

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

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

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. *Pengguntingan*, 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.

2.5.2 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.

2.5.3 Partikel-partikel bermuatan

Plasma yang diionisasi secara parsial; hampir seluruhnya oleh ionisasi tumbukan elektron netral – menghasilkan partikel-partikel bermuatan yang dapat dipercepat pada permukaan lingkungan oleh selubung medan listrik. Ion-ion positif cenderung untuk membentur permukaan lingkungan dengan energi yang

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

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

2.6 Plasma Elektrolisis

Dalam beberapa tahun terakhir, aplikasi bidang plasma pijaran elektrolisis (*contact glow discharge electrolysis*,CGDE) dengan cepat berkembang. Plasma pijaran elektrolisis merupakan proses elektrokimia dimana plasma dihasilkan oleh arus DC antara elektroda dan permukaan elektrolit sekitarnya. Elektrolisis konvensional dikembangkan menjadi CGDE ketika tegangan yang diberikan cukup tinggi dalam larutan. 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 ^oC dan tegangan 230 V, mendapatkan efisiensi penggunaan energi listrik hingga 800 % dibanding kebutuhan energi listrik menurut hukum Faraday. Kondisi operasi seperti suhu larutan, tegangan dan kuat arus listrik akan sangat menentukan tingkat efektivitas proses ini.

Spesi-spesi aktif (*energetic species*) yang terbentuk sepanjang proses ini diantaranya $H_2O_2, \bullet OH, \bullet H, e_{aq}^-, HO_2\bullet$ dapat menyebabkan perubahan kimia dalam larutan. GAO Jinzhang (2008) kemudian menemukan mekanisme reaksi pembentukan radikal-radikal tersebut seperti dituliskan di bawah:

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

$$H_2O_{gas} \rightarrow H_2O^+_{gas} + e^-_{aq} \quad (2.5)$$

$$H_2O_{gas} \rightarrow \bullet OH + \bullet H \quad (2.6)$$

$$H_2O_{gas} \rightarrow \frac{1}{2}H_2O_2 + \frac{1}{2}H_2 \quad (2.7)$$

$$H_2O^+_{gas} + H_2O \rightarrow \bullet OH + H_3O^+ \quad (2.8)$$

$$k_4 = 1{,}6\ x\ 10^{12}\ M^{-1}s^{-1}$$

$$\bullet OH + \bullet OH \rightarrow H_2O_2 \quad (2.9)$$

$$k_5 = 4{,}0\ x\ 10^{9}\ M^{-1}s^{-1}$$

$$\bullet H + \bullet H \rightarrow H_2 \quad (2.10)$$

$$k_6 = 1{,}0\ x\ 10^{10}\ M^{-1}s^{-1}$$

$$\bullet OH + H_2O_2 \rightarrow HO^{\bullet}_2 + H_2O \quad (2.11)$$

$$k_7 = 2{,}7\ x\ 10^{7}\ M^{-1}s^{-1}$$

$$\bullet OH + HO_2\bullet \rightarrow O_2 + H_2O \quad (2.12)$$

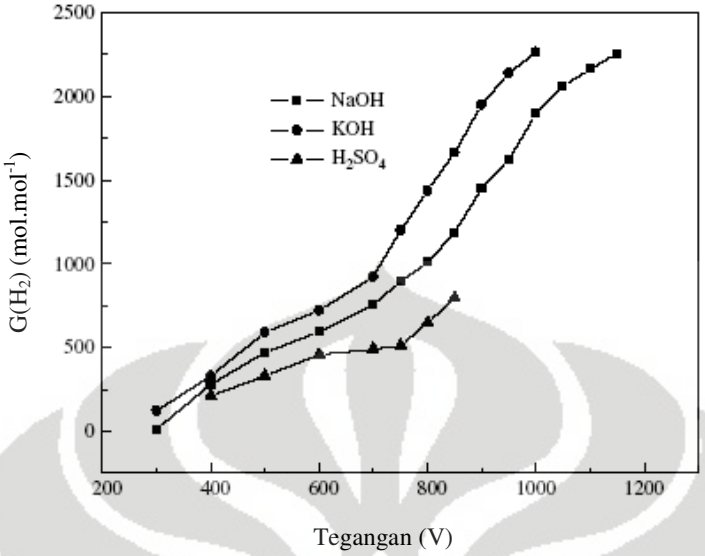
$$k_8 = 1{,}0\ x\ 10^{10}\ M^{-1}s^{-1}$$

$$\bullet OH + \bullet H \rightarrow H_2O \quad (2.13)$$

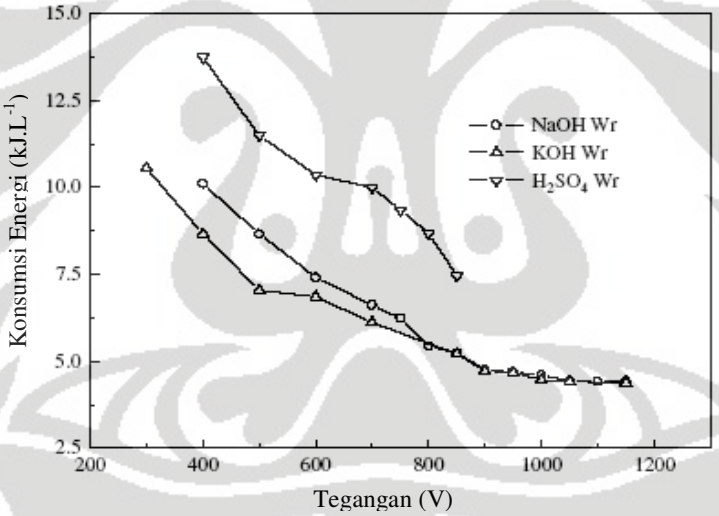
$$k_9 = 2{,}4\ x\ 10^{10}\ M^{-1}s^{-1}$$

Zong (2009) 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 Gambar 2.1. Energi listrik yang dikonsumsi larutan sangat dipengaruhi oleh tegangan dan jenis elektrolitnya. Gambar 2.2 menunjukkan konsumsi energi listrik menurun dengan meningkatnya tegangan dimana KOH dan H_2SO_4 lebih efektif menurunkan konsumsi energi dibanding NaOH. Komposisi gas yang dihasilkan dari proses elektrolisis plasma ini dipengaruhi oleh komposisi metanol dalam larutan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009



Gambar 2.2. Pengaruh tegangan pada $G(H_2)$. Konduktivitas: 11,55 mS/cm, Suhu: 64 ^oC. Konsentrasi metanol: 99,5 % (Zong, et al, 2009)



Gambar 2.3. Pengaruh tegangan pada konsumsi energi, Konduktivitas: 11,55 mS/cm, Suhu: 64 ^oC. Konsentrasi metanol: 99,5 % (Zong, et al, 2009)

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

Tabel 2.5 Komposisi gas hasil elektrolisis plasma non-termal dari larutan metanol (Zong, et al, 2009)

Methanol (mol%)	H_2 (mol%)	CO (mol%)	CH_4 (mol%)	C_2H_6 (mol%)	C_3H_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

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

Tabel 2.6 Perbandingan kinerja teknologi non-plasma untuk produksi hidrogen

Teknologi plasma non-termal	**Konsumsi Energi (kJ/L)**	**Konsentrasi H_2 (%)**	**Emisi CO_2/H_2 (L/L)**	**Referensi**
Glow discharge	4,26	89	0,041	Zong, et al. 2009
Dielectric barrier discharge	14	63,4	0,45	Kabashima, et al., 2003
Corona discharge	9	54,9	0,33	Liu, et al., 2003

Hidrogen adalah bahan bakar yang ranah 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 non-termal akan dilakukan dalam penelitian ini.

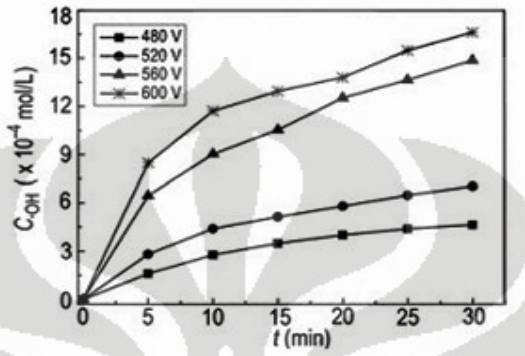
2.5.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja CGDE

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

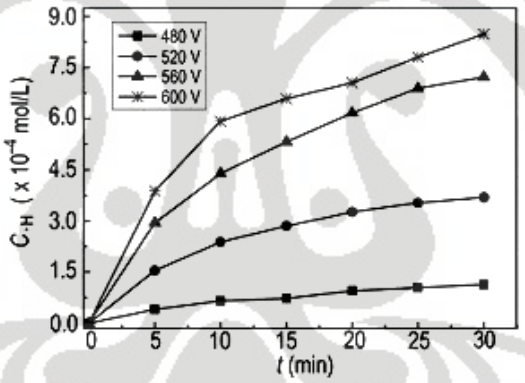
Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

1. Efek tegangan listrik

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



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

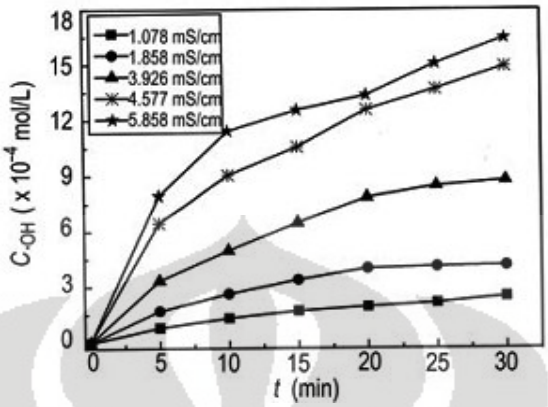


Gambar 2.5. Efek tegangan terhadap pembentukan radikal *H pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *H (GAO Jinzang, et al., 2008)

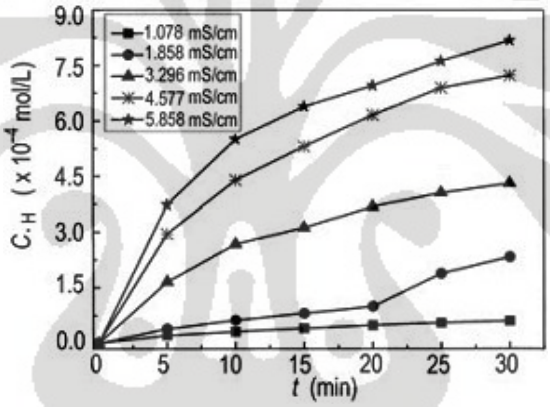
Pada grafik Gambar 2.4 dan 2.5, bisa dilihat bahwa semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan untuk menghasilkan plasma, konsentrasi radikal *OH maupun *H yang terbentuk semakin tinggi pula. Hal ini diakibatkan karena dengan perbedaan tegangan yang tinggi, energi untuk mengeksitasi elektron untuk menghasilkan radikal juga semakin tinggi, akibatnya semakin tinggi tegangan listrik yang dipakai, pembentukan radikalnya pun juga semakin besar.

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

2. Efek konduktifitas larutan



Gambar 2.6. Efek konduktivitas larutan terhadap pembentukan radikal *OH pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *OH (GAO Jinzang, et al., 2008)

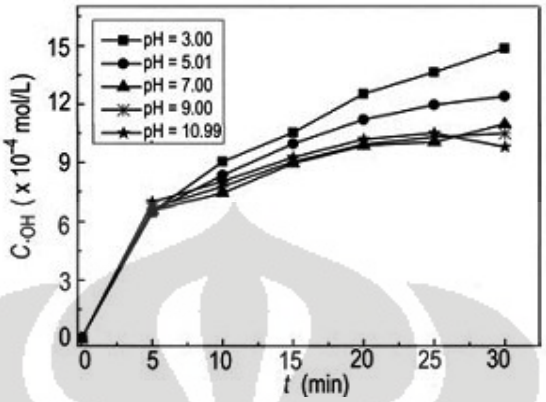


Gambar 2.7. Efek konduktivitas larutan terhadap pembentukan radikal *H pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *H (GAO Jinzang, et al., 2008)

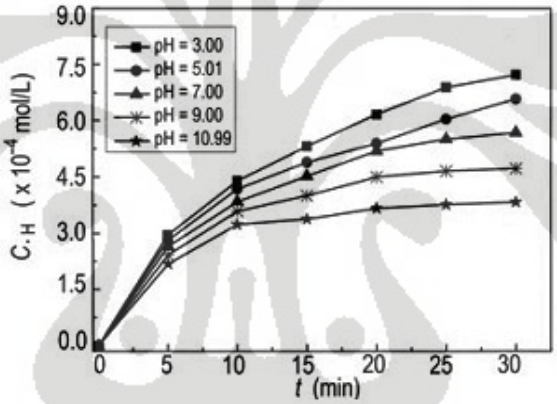
Selain tegangan, konduktivitas larutan yang digunakan pun juga mempengaruhi pembentukan radikal *OH dan *H, semakin besar konduktivitas larutan, radikal yang terbentuk pun semakin besar pula. Hal ini dikarenakan dengan konduktivitas yang tinggi, elektron-elektron bisa bergerak dengan lebih mudah dibanding larutan yang konduktivitasnya rendah. Akibatnya, peluang/probabilitas terjadinya tumbukan antara elektron dengan elektron pada molekul juga semakin besar, sehingga pembentukan radikal pun juga akan terjadi dengan lebih baik. Konduktivitas larutan bisa ditingkatkan dengan larutan elektrolit. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.6 dan Gambar 2.7.

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

3. Efek pH larutan



Gambar 2.8. Efek pH larutan terhadap pembentukan radikal *OH pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *OH (GAO Jinzang, et al., 2008)

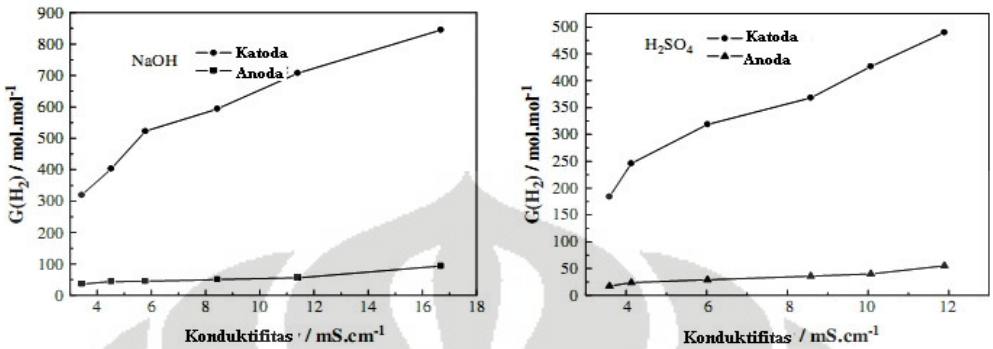


Gambar 2.9. Efek pH larutan terhadap pembentukan radikal *H pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *H (GAO Jinzang, et al., 2008)

Pada kedua grafik Gambar 2.8 dan 2.9, bisa dilihat bahwa pembentukan radikal *OH maupun *H paling tinggi terjadi ketika pH larutan sekitar 3. Yan ZC, et al. 2009, telah melakukan percobaan elektrolisis CGDE dengan larutan dielektrikum berupa metanol. Parameter-parameter yang mereka gunakan adalah $G(H_2)$ yaitu perbandingan mol hidrogen yang terbentuk dari elektrolisis plasma dengan mol hidrogen dari proses elektrolisis konvensional. Selain itu digunakan juga parameter energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan seberapa volum produk gas (Wr).

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

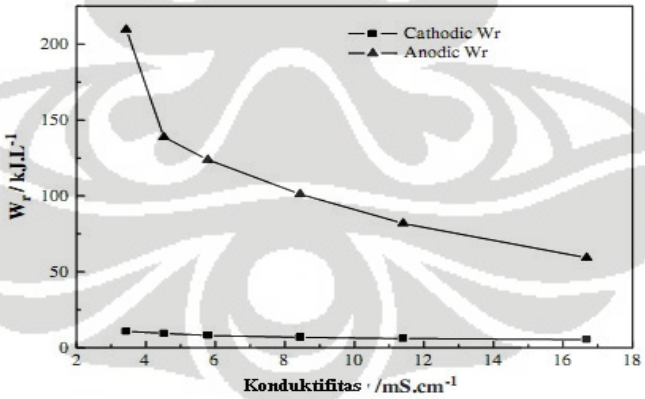
Berikut grafik hasil percobaanya:



Gambar 2.10. Efek konduktifitas larutan metanol terhadap $G(H_2)$ pada anoda dan katoda dalam media dielektrikum NaOH dan H_2SO_4. T = 337,15 K, kemurnian 99,5% (Zong, et al.,2007)

Pada grafik Gambar 2.10, $G(H_2)$ semakin bertambah seiring dengan bertambahnya konduktivitas larutan. Kenaikan $G(H_2)$ seiring dengan kenaikan konduktivitas larutan dikarenakan pembentukan radikal *H yang semakin meningkat pula dengan kenaikan konduktivitas larutan (seperti pembahasan sebelumnya).

Pengaruh konduktifitas ternyata juga mempengaruhi konsumsi energi yang dibutuhkan untuk berjalanya reaksi, grafik yang didapat sebagai berikut:



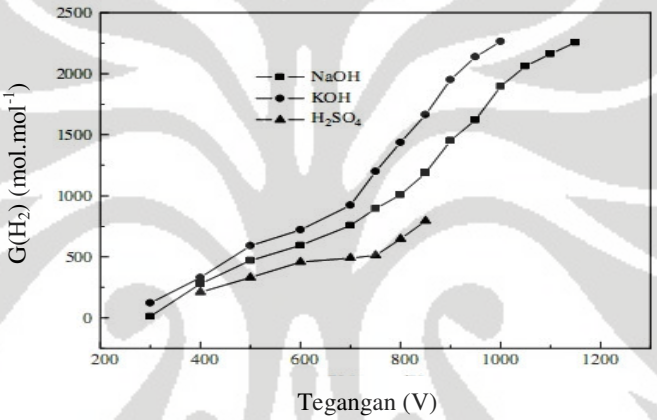
Gambar 2.11. Efek konduktifitas terhadap W_r (konsumsi energi) pada larutan NaOH dan metanol,. T = 337,15 K, kemurnian 99,5% (Zong, et al.,2007)

Pada grafik Gambar 2.11, bisa disimpulkan bahwa semakin tinggi konduktivitas larutan yang dipakai, konsumsi energi yang digunakan juga semakin kecil karena nilai W_r berbanding terbalik dengan jumlah H_2 yang

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

dihasilkan, sementara semakin tinggi konduktivitas larutan prosuksi H_2 juga semakin bertambah. Sehingga proses elektrolisis nantinya sebaiknya dilakukan pada larutan yang berkonduktivitas tinggi pula. Tidak adanya kepastian konsumsi energi yang rendah dan konduktivitas larutan yang tinggi akan menghasilkan produk H_2 yang tinggi pula, sehingga diperlukan adanya pengujian berapa nilai optimal untuk produksi H_2 ini.

Selain konduktifitas, besarnya tegangan yang diberikan di antara elektroda juga memberikan efek terhadap $G(H_2)$. Berikut grafik yang diperoleh Yan ZC (2009) tentang hal ini:

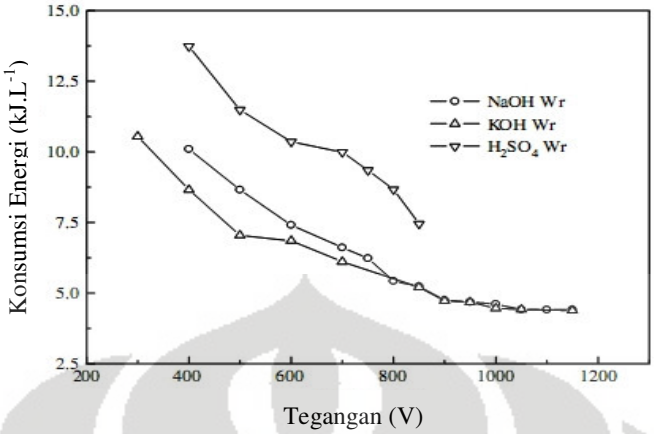


Gambar 2.12. Efek tegangan terhadap $G(H_2)$ dalam media dielektrikum yang berbeda. Konduktifitas = 11,55 mS cm^{-1}, T=337,15 K, kemurnian metanol 99,5% (Zong, et al.,2007)

Grafik Gambar 2.11 menunjukkan semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan, semakin besar pula $G(H_2)$ yang diperoleh. Selain itu grafik di atas juga memberikan informasi bahwa larutan elektrolit KOH memberikan kontribusi terbaik pada semua tegangan listrik yang diberikan.

Besarnya tegangan yang di pakai juga mempengaruhi konsumsi energi pada reaksi seperti terlihat pada Gambar 2.13 .

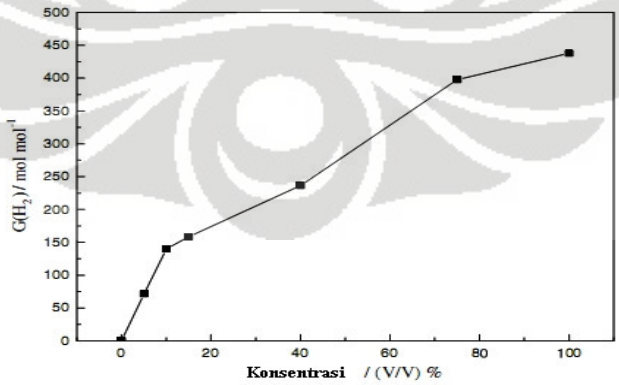
Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009



Gambar 2.13. Efek tegangan terhadap konsumsi energi dalam media dielektrikum yang berbeda. Konduktifitas = 11,55 mS cm^{-1}, T=337,15 K, kemurnian metanol 99,5% (Zong, et al.,2007)

Grafik Gambar 2.13 menunjukkan bahwa semakin besar tegangan listrik yang digunakan, konsumsi energinya justru semakin kecil, sehingga nantinya percobaan elektrolisis sebaiknya digunakan pada tegangan listrik yang tinggi. Pada grafik juga ditunjukkan pengaruh larutan elektrolit yang digunakan, dan KOH memberikan kontribusi terbaik pada berbagai tegangan listrik yang digunakan. Sehingga, larutan elektrolit yang cocok digunakan dalam percobaan nantinya adalah larutan KOH.

Pada jurnal yang lain, Yan ZC (2008), juga melakukan CGDE pada larutan etanol, hasil yang didapatkan tidak jauh berbeda. Variasi yang digunakan adalah konsentrasi etanol terhadap yield H_2 yang diperoleh, berikut grafiknya:



Gambar 2.14. Efek konsentrasi etanol terhadap G(H_2). T=303,15 K, konduktifitas = 5,6 mS cm^{-1}, V = 1000V (Zongcheng, et al., 2008)

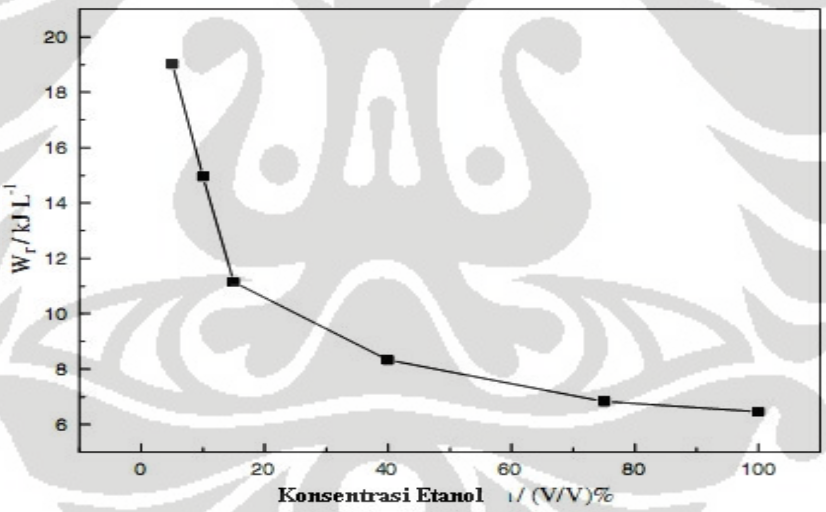
Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

Grafik Gambar 2.14 menunjukkan bahwa $G(H_2)$ semakin tinggi jika konsentrasi etanol yang digunakan semakin besar. Hal ini karena pembentukan radikal *OH dari etanol akan semakin besar jika konsentrasinya juga besar, radikal *OH ini lah yang nantinya akan mengakibatkan pembentukan radikal-radikal lain termasuk juga radikal *H yang akan membentuk H_2 pada akhirnya. Serta pengaruhnya terhadap konsumsi energi.

Zongcheng (2008) mendefinisikan $G(H_2)$ sebagai jumlah mol hidrogen yang dihasilkan dengan teknik ini dibandingkan dengan mol hidrogen yang dihasilkan dari elektrolisis biasa berdasar hukum Faraday dengan energi listrik yang sama. Rumus $G(H_2)$ ini diturunkan sebagai berikut:

$$G(H_2) = \frac{Vgas / 22.4}{Q / 2F} = \frac{Vgas.F}{11.2Q} mol.mol^{-1} \quad (2.14)$$

Q, F, dan V_{gas} secara berturut-turut merupakan notasi dari muatan listrik, konstanta Faraday, dan volume hidrogen.



Gambar 2.15. Efek konsentrasi etanol terhadap konsumsi energi. T=303,15 K, konduktifitas = 5,6 mS cm^{-1}, V = 1000V (Zongcheng, et al., 2008)

Konsumsi energi yang semakin rendah dengan naiknya konsentrasi etanol disebabkan karena dengan konsumsi etanol yang semakin tinggi, semakin tinggi pula H_2 yang diproduksi dan akibatnya konsumsi energi yang diperlukan untuk menghasilkan produk yang sama akan lebih rendah antara larutan dengan

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

konsentrasi etanol yang tinggi dibanding yang berkonsentrasi rendah. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.15.

Zongcheng (2008) mendefinisikan W_r sebagai jumlah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan sejumlah volum hidrogen pada waktu yang ditentukan. W_r ini dirumuskan sebagai berikut:

$$Wr = \frac{V.Q}{V_{gas}} kJ.L^{-1} \qquad (2.15)$$

V, Q, dan V_{gas} berturut-turut merupakan tegangan plasmatron, muatan listrik, dan volum gas hidrogen. Ketiga data ini sudah bisa didapatkan dari langkah-langkah sebelumnya.

Berdasarkan hasil-hasil percobaan para peneliti sebelumnya, bisa diambil garis besar yaitu elektrolisis plasma akan efektif jika menggunakan tegangan tinggi, karena konsumsi energi menjadi lebih kecil dan konsentrasi hidrogen yang diperoleh juga lebih besar. Konsentrasi larutan dielektrikum 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 larutan, semakin besar konduktivitas 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 larutan tidak hilang selama reaksi. Selain itu juga lebih ekonomis penggunaannya.

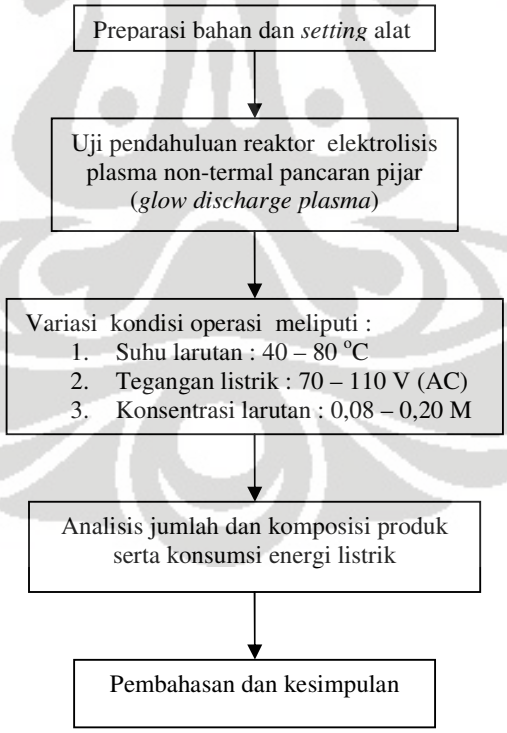
Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

BAB 3
METODOLOGI PENELITIAN

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

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- KOH
- Aquadest

Peralatan umum yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Gelas piala 600 mL dan 50 mL
- Gelas ukur 100 mL
- Neraca analitik
- Spatula
- Labu semprot
- Labu takar 500 mL
- Corong
- *Syringe*

3.2 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.

3.2.1 Rangkaian Pembangkit Plasma

Sumber pembangkit plasma berupa rangkaian pembangkit plasma non-termal sederhana, yaitu rangkaian listrik (DC) tegangan tinggi yang disusun dari komponen-komponen listrik seperti dioda dan regulator tegangan. Pengamatan arus, tegangan dan daya listrik watt dapat diamati pada alat ukur digital secara langsung.

3.2.2 Peralatan Reaktor Plasma Elektrolisis

Komponen reaktor plasma elektrolisis terdiri dari komponen-komponen berikut:

a. Tabung acrylic dengan diameter 10 cm dan tinggi 17 cm dengan kapasitas 1000 mL.

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

b. Karet teflon penutup tabung dengan 4 lubang. Pembuatan lubang dengan menggunakan bor.
c. Sepasang elektroda dimana katoda berbentuk silinder dengan diameter atas 3 mm dan diameter bawah 6 mm terbuat dari *stainless steel* tipe SS 304 G dan anoda berupa selubung jala terbuat dari *stainless steel* tipe SS 316 G dibuat dalam bentuk tabung tanpa dua tutup dengan diameter 6 cm dan tinggi 5 cm.
d. Kaca kuarsa berbentuk silinder sebagai pemisah antara produk katoda dan produk anoda yang memiliki diameter 5 cm dan tinggi 12 cm, dimana ruang katode yang banyak menghasilkan hidrogen akan dipisahkan dengan ruang anode yang banyak menghasilkan oksigen.
e. Termometer untuk mengukur suhu larutan.

Berikut adalah Gambar rangkaian reaktor plasma elektrolisis:

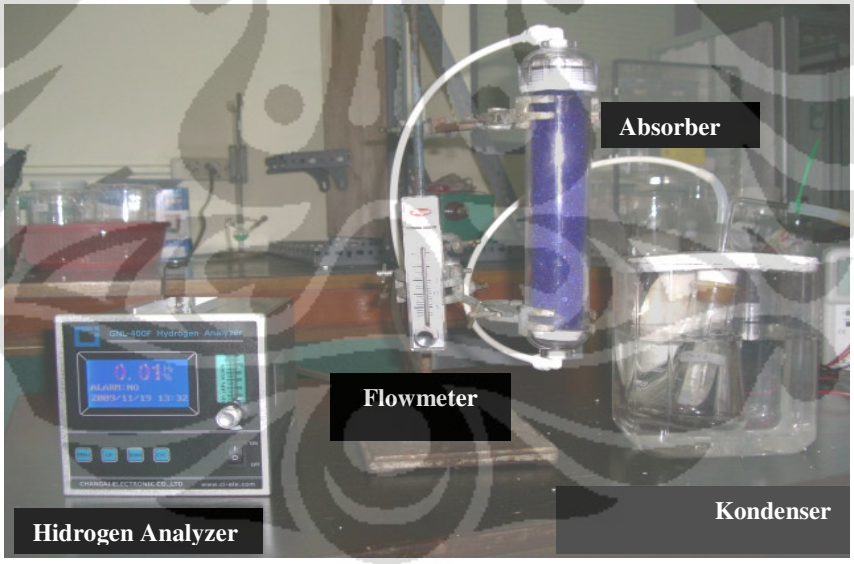
Gambar 3.2. Rangkaian peralatan reaktor elektrolisis plasma: (a) reaktor dan pendingin; (b) rangkaian eletroda, termometer dan kaca pemisah pada bagian dalam reaktor.

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

3.2.3 Peralatan Pemisahan dan Pengukuran Produk Gas Hidrogen

Jumlah uap air yang terbentuk cukup tinggi pada proses elektrolisis plasma, terutama pada suhu diatas 60 ^{o}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. Adsorber yang digunakan adalah silica gel. 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.

Gambar 3.3 menunjukkan peralatan pemisahan dan pemurnian hasil rancang bangun yang telah dilakukan.



Gambar 3.3. Peralatan pemisahan, pemurnian dan pengukuran produk gas hidrogen

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

Berikut adalah Gambar keseluruhan peralatan dan pengukuran sistem produksi hidrogen:

Gambar 3.4. Keseluruhan peralatan dan pengukuran sistem produksi hidrogen

3.3 Preparasi Bahan

Larutan elektrolit KOH:

- Membuat larutan KOH 1 M dengan melarutkan 28 gram KOH padatan kemudian dilarutkan dalam labu takar 500 mL dengan aquadest.
- Membuat larutan KOH 0,08 M, 0,14 M, 0,20 M masing-masing bervolume 600 mL dengan mengencerkan larutan KOH 1 M sebanyak 476 mL, 84 mL dan 119 mL dengan aquades Larutan elektrolit tersebut bertujuan meningkatkan konduktivitas larutan. Konduktivitas larutan diukur dengan menggunakan konduktometer yang sudah dikalibrasi sebelumnya.

3.4 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 rekator, kemudian meneteskan air sabun ke area yang berpotensi mengalami kebocoran. Untuk rangkaian pembangkit plasma, dilakukan pengujian tegangan yang keluar dari dioda dan pembentukan plasma di udara.

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

Uji pendahuluan dilakukan pada larutan KOH dengan konduktivitas 17,3 mS/cm pada tegangan 180 V AC selama 10 menit. Pengujian dilakukan untuk mengetahui proses elektrolisis yang terjadi di dalam peralatan sistem produksi hidrogen dan konduktivitas akhir larutan setelah proses elektrolisis. Jika konduktivitasnya konstan, ini berarti bahwa larutan elektrolit yang digunakan, KOH, tidak bereaksi dengan larutan uji yang dipakai.

3.5 Prosedur Penelitian

1. Hidrogen *analyzer* GNL-400F dinyalakan (proses *preheating* selama 5 menit).
2. Larutan KOH 0,08 M diukur konduktivitasnya.
3. Larutan KOH 0,08 M sebanyak 600 mL dimasukkan dalam reaktor. Temperatur larutan diukur dengan termometer.
4. Regulator tegangan dinyalakan, diputar sampai tegangan 140 volt AC. Stopwatch dinyalakan lalu arus diukur.
5. Aliran pendingin dinyalakan.
6. Setelah temperatur larutan mencapai 45 ^{0}C, laju alir dan konsentrasi H_2 diukur.
7. Setelah temperatur larutan mencapai 60 ^{0}C, laju alir dan konsentrasi H_2 diukur.
8. Setelah temperatur larutan mencapai 75 ^{0}C, laju alir dan konsentrasi H_2 diukur.
9. Regulator tegangan dimatikan.
10. Hidrogen *analyzer* dan aliran pendingin dimatikan.
11. Larutan KOH diukur konduktivitasnya.

Prosedur yang sama juga dilakukan untuk larutan KOH 0,14 M dan 0,20 M.

3.5.1 Pengukuran Konduktivitas Larutan

1. Konduktometer dinyalakan.
2. Setelah *ready*, larutan standar diukur.
3. Elektroda dibilas dengan aquadest.
4. Setelah *ready*, diukur konduktivitas larutan KOH 0,08 M dicatat.
5. Elektroda dibilas dengan aquadest.

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

6. Konduktometer dimatikan.

Prosedur yang sama juga dilakukan untuk larutan KOH 0,14 M dan 0,20 M.

3.6 Hasil Uji Peralatan Sistem Produksi Hidrogen.

Variabel proses yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi parameter suhu, konsentrasi KOH dan tegangan terhadap kinerja proses elektrolisis plasma.

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

Kinerja proses elektrolisis plasma meliputi:

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

$$Q\,(C) = A\,(ampere)\;x\;30\,(\det ik) \qquad (3.1)$$

- Perbandingan jumlah mol produk H_2 proses elektrolisis plasma (H_2) terhadap jumlah produk H_2 toeritis berdasarkan rumus elektrolisis Faraday $(H_2)_F$ yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$(H_2)\Big/(H_2)_F = \frac{V_{gas}/22{,}4}{Q/2F}\,(mol/mol) \qquad (3.2)$$

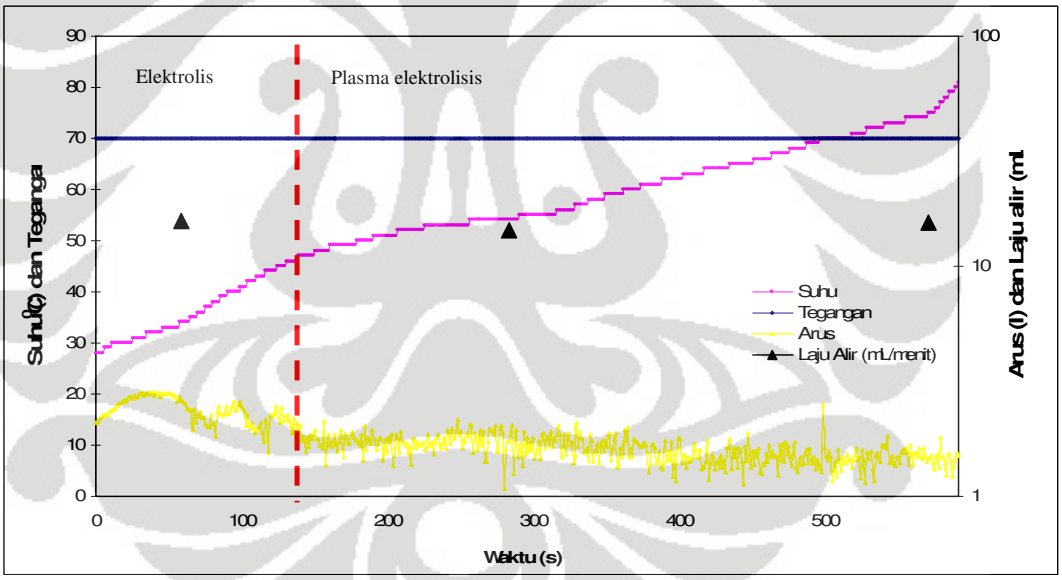
Dimana Q = Coulomb (A.sec)

F = Konstanta faraday (96500 C/mol)

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

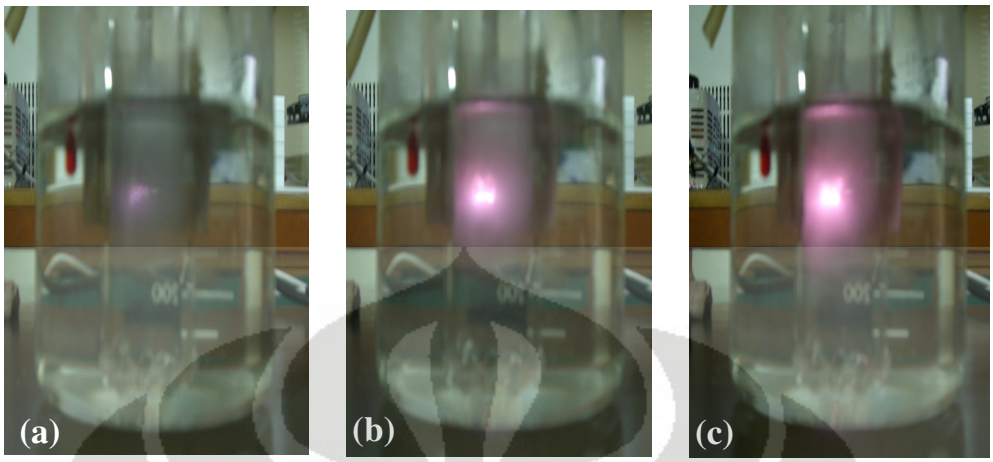
BAB 4
PEMBAHASAN

Reaksi elektrolisis plasma pada reaktor merupakan kombinasi reaksi elektrolisis dan plasma dimana terbentuk 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 0,14 M pada tegangan 70 volt DC. Pada awal penelitian, arus listrik terus naik hingga 2,83 A. Naiknya temperatur, menyebabkan arus listrik turun karena tahanan akan naik. Pada temperatur 50 ^{0}C, pijaran plasma mulai terbentuk. Hal ini ditandai dengan tidak stabilnya arus listrik yang terlihat pada jarum ampermeter dan bunyi guruh yang terdengar dari slide regulator. Konsumsi arus listrik terus turun hingga akhir percobaan seperti terlihat pada grafik di bawah namun laju alir produk cenderung stabil seperti terlihat pada grafik.



Gambar 4.1. Grafik hubungan antara temperatur, arus dan tegangan terhadap waktu dalam larutan KOH 0,14 M dan tegangan 70 volt

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009



Gambar 4.2. Ukuran plasma pada larutan KOH 0,2 M dengan tegangan : (a) 70 V ; (b) 90 V; (c) 110 V

Konsumsi daya listrik yang mencapai 200 – 700 Watt pada proses elektrolisis plasma ini menyebabkan suhu larutan cepat meningkat. Jika dilakukan tanpa pendinginan maka suhu larutan meningkat dari 30 ^{o}C menjadi 80 ^{o}C hanya dalam waktu kurang dari 10 menit.

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

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. Penggunaan larutan dielektrikum 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 juga, KOH lebih ekonomis.

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:

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

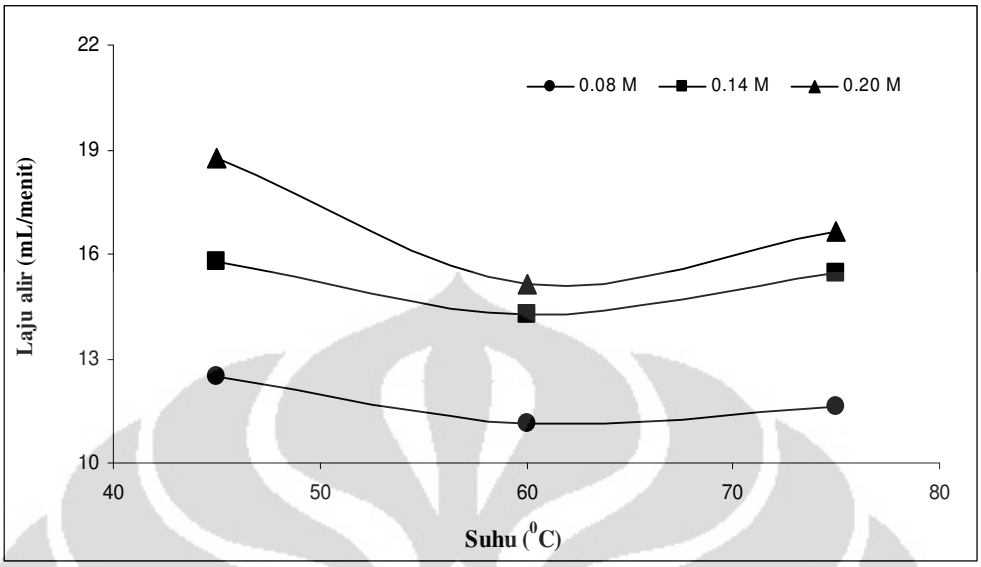
$$2H_2O_{(l)} \rightarrow O_{2(g)} + 2H_{2(g)} \qquad E^o = -1,23\ V\ ; \Delta H = 285,83\,kJ/mol$$

sedangkan pada elektrolisis plasma akan terbentuk radikal *OH, *H maupun $*HO_2$ yang akan meningkatkan produksi gas hidrogen (telah dijelaskan pada BAB 2).

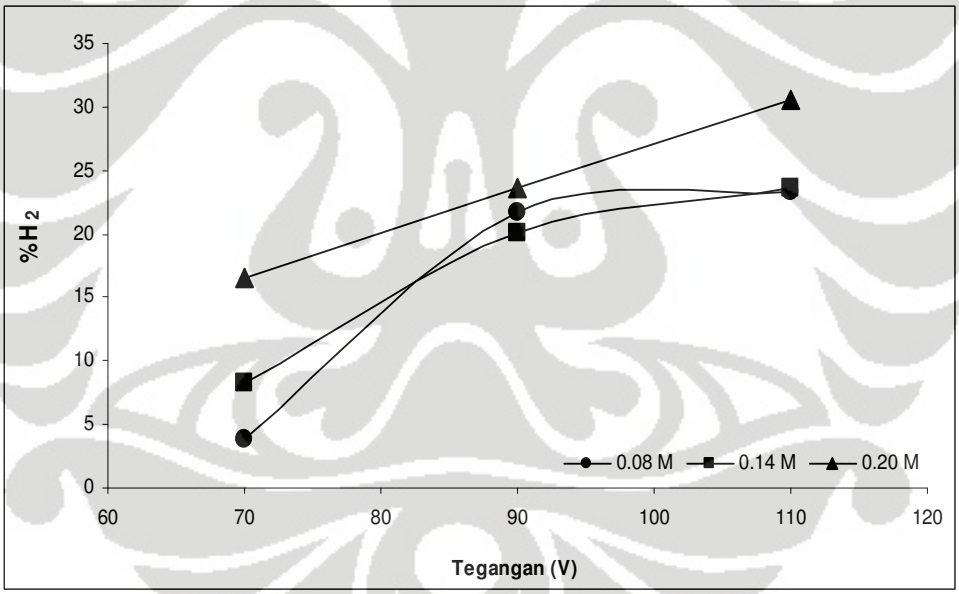
Pada awal percobaan, terdapat udara (gas nitrogen dan oksigen) di dalam reaktor sedangkan konsentrasi hidrogen masih kecil, sehinga terjadi difusi dari udara luar. Besarnya ruang (kondenser dan absorber) yang harus diisi oleh hidrogen juga menyebabkan laju alir produk menjadi kecil. Selain itu, hidrogen *analyzer* GNL-400F hanya dapat menganalisa gas dengan laju alir 350 – 450 mL/menit. Hal inilah yang menyebabkan laju alir keluaran gas hidrogen pada mulanya akan turun kemudian naik dengan bertambahnya gas hidrogen di dalam reaktor. Fenomena ini dapat dilihat pada Gambar 4.3.

Variasi larutan KOH dengan berbagai konsentrasi dilakukan untuk menyelidiki pengaruh konsentrasi KOH pada proses produksi hidrogen. Bertambahnya konsentrasi KOH menyebabkan semakin besarnya konduktivitas larutan, sehingga radikal yang terbentuk pun semakin besar pula (GAO Jinzang, et al., 2008). Hal ini dikarenakan dengan konduktivitas 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. Dari Gambar 4.3 terlihat bahwa larutan dengan konsentrasi KOH 0,20 M memiliki laju alir terbesar.

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009



Gambar 4.3. Grafik hubungan antara laju alir terhadap suhu dalam berbagai konsentrasi KOH pada tegangan 70 volt

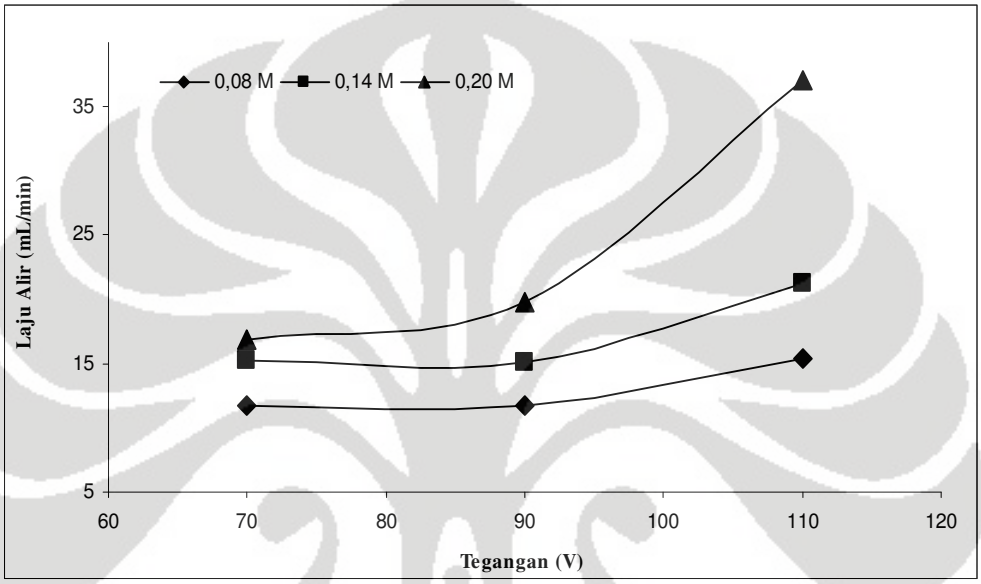


Gambar 4.4. Grafik hubungan antara $\%H_2$ yang diperoleh terhadap tegangan pada berbagai konsentrasi KOH

Semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan untuk menghasilkan plasma, konsentrasi radikal *OH maupun *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

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

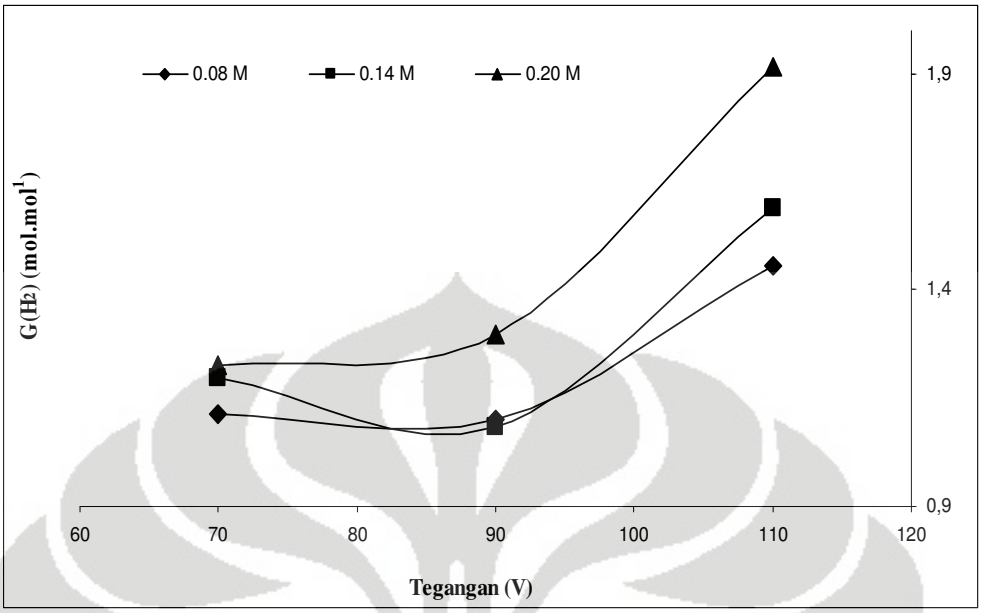
semakin tinggi tegangan listrik yang dipakai, pembentukan radikalnya pun juga semakin besar (GAO Jinzang, et al., 2008). Hal ini dapat terlihat pada Gambar 4.4. Dari grafik dapat terlihat bahwa larutan dengan konsentrasi KOH 0,20 M memiliki $\%H_2$ terbesar. Hal serupa juga terjadi pada laju alir. Kedua hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Grafik hubungan antara laju alir dengan tegangan pada berbagai konsentrasi larutan KOH

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.

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

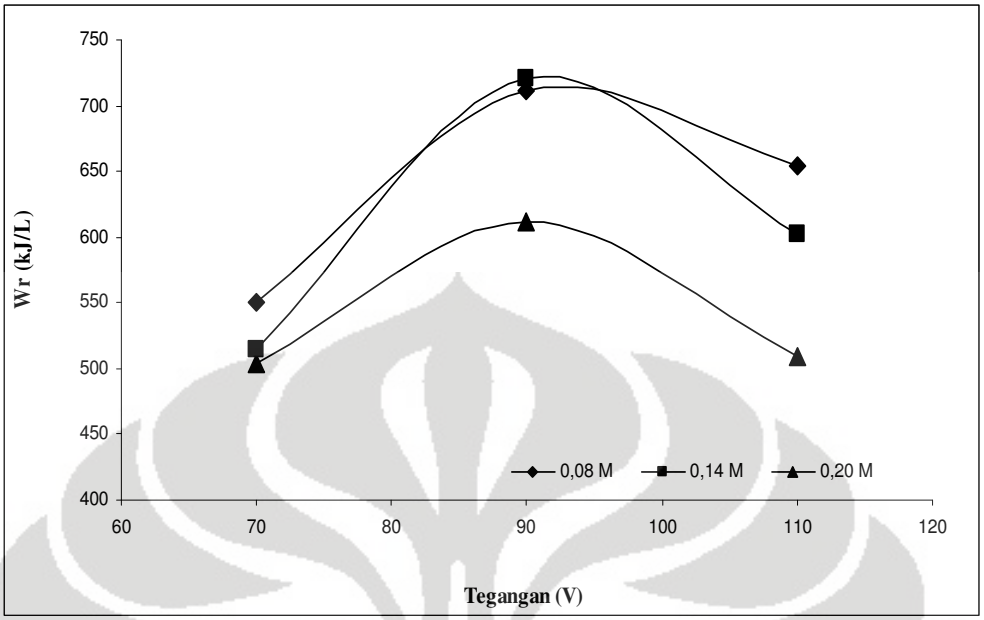


Gambar 4.6. Grafik hubungan antara $G(H_2)$ dengan tegangan pada berbagai konsentrai KOH

Sebagai contoh untuk larutan KOH 0,20 M, jika tegangan 70 volt, hidrogen yang dihasilkan sebesar 1,23 $mol.mol^{-1}$. Dari grafik, nilai $G(H_2)$ terbesar diperoleh saat konsentrasi larutan KOH sebesar 0,20 M. Pada grafik, nilai $G(H_2)$ semakin bertambah seiring dengan bertambahnya konduktivitas larutan. Penambahan KOH ke dalam air akan meningkatkan konduktivitas larutan. Untuk larutan KOH 0,08 M, konduktivitasnya adalah 47,98 mS/cm. Konduktivitas larutan akan meningkat dengan meningkatnya konsentrasi KOH. Kenaikan $G(H_2)$ sebanding dengan kenaikan konduktivitas larutan dikarenakan pembentukan radikal *H yang semakin meningkat pula dengan kenaikan konduktivitas larutan (seperti pembahasan sebelumnya).

Nilai Wr menurun dengan meningkatnya tegangan yang diberikan, seperti pada Gambar berikut.

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009



Gambar 4.7. Grafik hubungan antara Wr dengan temperatur pada berbagai tegangan (larutan KOH 0,08 M)

Hasilnya dengan jelas menunjukkan bahwa produksi hidrogen dengan GDPE adalah teknik penghematan energi. Variasi Wr dengan tegangan yang diberikan menyiratkan bahwa efisiensi energi tinggi elektron untuk menguraikan molekul air meningkat dengan kenaikan tegangan. Naiknya temperatur menyebabkan produktivitas hidrogen meningkat, karena dengan naiknya temperatur hambatan akan naik sehingga arus turun. Berkurangnya konsumsi arus listrik akan meningkatkan efisiensi. Tegangan tidak dapat ditingkatkan tanpa batasan karena ada kemungkinan elektroda akan meleleh.

Gambar 4.7 juga menunjukkan bahwa terjadi *breakdown voltage* pada tegangan 90 Volt. *Breakdown voltage* adalah tegangan minimal yang dibutuhkan agar plasma elektrolisis dapat berlangsung. Saat tegangan 110 Volt, konsumsi energinya justru menurun karena laju alir gas hidrogen semakin besar, sehingga nantinya percobaan elektrolisis sebaiknya digunakan pada tegangan listrik yang tinggi.

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

BAB 5
KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Rancang bangun yang dibuat mampu menghasilkan suatu *prototype* sistem produksi hidrogen melalui proses elektrolisis plasma non-termal yang beroperasi dengan listrik PLN.
2. Rancang bangun sistem produksi hidrogen yang dibuat mampu menghasilkan gas hidrogen lebih besar dibandingkan proses elektrolisis Faraday (dalam jumlah mol) walaupun masih beroperasi pada tegangan rendah seperti yang terlihat pada tabel berikut:

Konsentrasi	Tegangan (V)	G (H_2) (mol.mol^{-1})
0,08 M	70	1.11
	90	1.10
	110	1.46
0,14 M	70	1.20
	90	1.08
	110	1.59
0,20 M	70	1.23
	90	1.30
	110	1.92

3. Jumlah mol hidrogen, kebutuhan energi listrik, laju alir dan komposisi hidrogen dipengaruhi oleh tegangan, temperatur dan konsentrasi KOH.
4. Jumlah mol hidrogen, laju alir dan komposisi hidrogen akan meningkat dengan naiknya tegangan, temperatur dan konsentrasi KOH.
5. Kebutuhan energi listrik akan naik pada tegangan 90 Volt dan turun pada tegangan 110 Volt untuk tiap konsentrasi KOH. Hal ini terjadi disebabkan *breakdown voltage*.
6. Konsumsi arus listrik akan turun dengan meningkatnya temperatur.

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

5.2 Saran

Saran terkait dengan hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan perbaikan pada reaktor rancang bangun yaitu mengurangi volume ruang antara reaktor dengan hidrogen *analyzer* sehngga tidak terjadi difusi udara luar ataupun penurunan tekanan.
2. Perlu dilakukan pengukuran pada tegangan di atas 200 Volt DC dengan konsentrasi KOH yang rendah (kurang dari 0,08 M).

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

DAFTAR REFERENSI

Barros, Sam. (3 Maret 2008). *Power Labs Plasma Globes Page*. http://www.powerlabs.org/plasmaglobe.htm. Diakses 8 Maret 2009.

GAO Jinzhang, et al., (2008). Analysis of Energetic Species Caused by Contact Glow Discharge Electrolysis in Aqueous Solution. Plasma Science and Technology, Vol.10, No.1.

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.

Herring S., 2004, *High Temperature Electrolysis*, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Gaithersburg.

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

Huang, H., dan L. Tang. (2007). Treatment Of Organic Waste Using Thermal Plasma Pyrolysis Technology. *Energy Conversion and Management*, 48, 1331-1337.

Kabashima H, Einaga H, Futamura S. (2003). "Hydrogen generation from water, methane, and methanol with nonthermal plasma". IEEE Transactions on Industry Applications; 39(2):340–5.

Kogelschatz, U. (2004). " Atmospheric-pressure plasma technology", Plasma Phys. Controlled Fusion 46 B63–B75.

Liu CJ, Liu XZ, , Baldur E. (2003). "Hydrogen production from methanol using corona discharges". Chinese Chemical Letters, 14(6):631–3

Mizuno, T., T. Akimoto, and T. Ohmori. (2003), "*Confirmation of anomalous hydrogen generation by plasma electrolysis",* in 4th Meeting of Japan CF Research Society. Iwate, Japan: Iwate University

Moustakas, et al,. (2005). Demonstration Plasma Gasification-Vitrification System For Effective Hazardous Waste Treatment. *Journal of Hazardous Materials*, B 123, 120-126.

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

Ph.M. Kanarev and *Tadahiko* Mizuno (2003), "*Cold Fusion by Plasma Electrolysis of Water*", Krasnodar.

R.B. Biniwale, A. Mizuno, M. Ichikawa, Applied Catalysis A: General 276 (2004) 169–177.

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

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

Yan ZC, L. Chen, H. Wang, Xuebao Huagong/Journal of Chemical Industry and Engineering (China) 57 (2006) 1432–1437.

Yan Zongcheng, Li Cheng dan Honglin Wang. Hydrogen generation by glow discharge plasma electrolysis of ethanol solutions. Journal of Physics 41 155205 (7pp).

Zong Cheng Yan, Li, C., Wang Hong Lin W H., (2009). " Hydrogen generation by glow discharge plasma electrolysis of methanol solutions". International journal of hydrogen energy, vol 34 pp : 48 – 55

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

Pembuatan Larutan KOH 1,0 M

Berat KOH yang ditimbang = 28,0262 gram

Berat molekul KOH = 56 gr/mol

Volume larutan = 0,5 L

Molaritas larutan = $\dfrac{\dfrac{28,0262 \ \ gram}{56 \ \ gr \ / \ mol}}{0,500 \ \ L} = 1,009 \ \dfrac{mol}{L}$

Larutan KOH 0,08 M

Pembuatan larutan KOH 0,08 M

Dengan rumus pengenceran:

$$V_1.M_1 = V_2.M_2$$

$$(V_1)(1,009 \ mol/L) = (600 \ mL)(0,08 \ mol/L)$$

$$V_1 = 476 \ mL$$

Jadi besarnya volume larutan KOH 1,0 M yang harus diambil adalah 476 mL.

Contoh Perhitungan laju alir larutan KOH 0,08 M (T = 45 ^{0}C)

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

$$Q = \frac{25mL}{120 \det ik} x \frac{60 \det ik}{1menit}$$

$$Q = 12.50 \ mL / menit$$

Contoh Perhitungan G(H_2) (T = 45 ^{0}C)

$$G(H_2) = \frac{V_{gas} / 22.4}{Q / 2F} = \frac{V_{gas} F}{11.2Q}$$

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

$$G(H_2) = 0,97 \ mol.mol^{-1}$$

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

Contoh Perhitungan Wr (T = 45 ^{0}C)

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

$$W_r = \frac{(70)volt\,.\,(1{,}85)ampere\,.\,(120)\,\det ik}{(0{,}025)L}$$

$$W_r = 621{,}6\ kJ\,/\,L$$

Contoh Perhitungan Konduktivitas Larutan KOH 0,08 M

Larutan KOH 0,08 M = $\frac{1584}{1413}\ x\ 18{,}94 = 21{,}23\ mS/cm$

Larutan KOH 0,14 M

Pembuatan larutan KOH 0,14 M

Dengan rumus pengenceran:

$$V_1.M_1 = V_2.M_2$$

$$(V_1)(1{,}009\ mol/L) = (600\ mL)(0{,}14\ mol/L)$$

$$V_1 = 84\ mL$$

Contoh Perhitungan laju alir larutan KOH 0,14 M (T = 45 ^{0}C)

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

$$Q = \frac{0{,}025\ mL}{95\ \det ik}\ x\ \frac{60\,\det ik}{1\ menit}$$

$$Q = 15{,}79\ mL/menit$$

Contoh Perhitungan G(H_2) (T = 45 ^{0}C)

$$G(H_2) = \frac{V_{gas}/22.4}{Q/2F} = \frac{V_{gas}F}{11.2Q}$$

$$G(H_2) = \frac{(0{,}025)L\,.\,(96500)C/mol}{(11{,}2)mol/L\,.\,(2{,}18)ampere\,.\,(95)\,\det ik}$$

$$G(H_2) = 15{,}79\ mol.mol^{-1}$$

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

Contoh Perhitungan W_r (T = 45 ^{0}C)

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

$$W_r = \frac{(70) volt\ .\ (2{,}18) ampere\ .(95)\ \det ik}{0{,}025\ L}$$

$$W_r = 579{,}88\ kJ\ /\ L$$

Contoh Perhitungan Konduktivitas Larutan KOH 0,14 M

Larutan 0,14 M = $\frac{1584}{1413}\ x\ 29{,}0 = 32{,}51\ mS/cm$

Larutan KOH 0,20 M

Pembuatan larutan 0,20 M

Dengan rumus pengenceran:

$$V_1.M_1 = V_2.M_2$$

$$(V_1)(1{,}009\ mol/L) = (600\ mL)(0{,}20\ mol/L)$$

$$V_1 = 119\ mL$$

Contoh Perhitungan Laju Alir Larutan(T = 45 ^{0}C)

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

$$Q = \frac{25\ mL}{80\ \det ik}\ x\ \frac{60\ \det ik}{1\ menit}$$

$$Q = 18.75\ mL\ /\ menit$$

Contoh Perhitungan G(H_2) (T = 45 ^{0}C)

$$G(H_2) = \frac{V_{gas}\ /\ 22.4}{Q\ /\ 2F} = \frac{V_{gas} F}{11.2Q}$$

$$G(H_2) = \frac{(0{,}025) L\ .\ (96500) C\ /\ mol}{(11{,}2) L/mol\ .\ (2{,}51) ampere\ .(80)\ \det ik}$$

$$G(H_2) = 1{,}07\ mol.mol^{-1}$$

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

Contoh Perhitungan W_r

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

$$W_r = \frac{(70)volt\ .(2{,}51)ampere\ (80)\,\det ik}{0{,}025\ L}$$

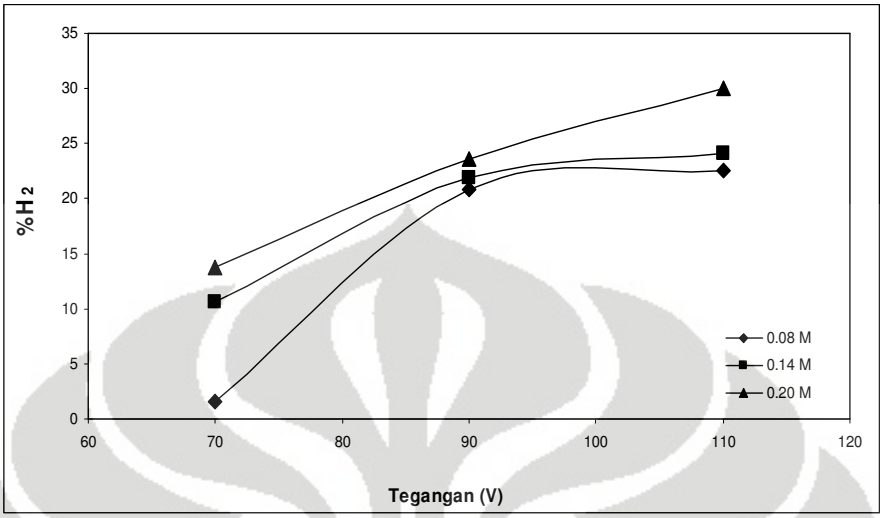
$$W_r = 562{,}24\ kJ\ /\ L$$

Perhitungan Konduktivitas Larutan

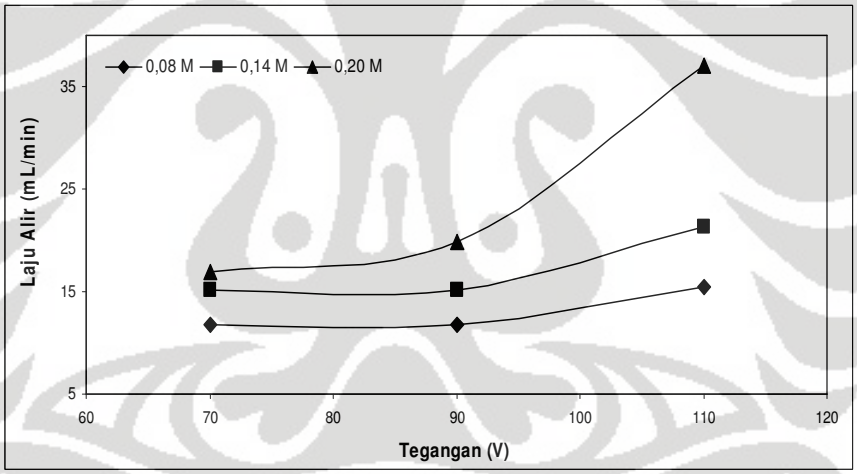
Larutan 0,20 M = $\frac{1584}{1413}\ x\ 42{,}8 = 47{,}98\ mS/cm$

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

Variasi Tegangan dan Variasi Konsentrasi



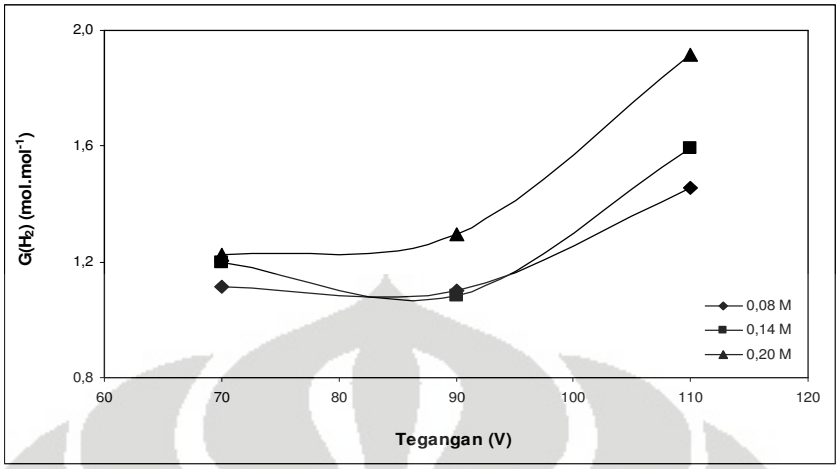
Gambar 1. Grafik komposisi hidrogen (%H_2) terhadap tegangan pada berbagai konsentrasi KOH



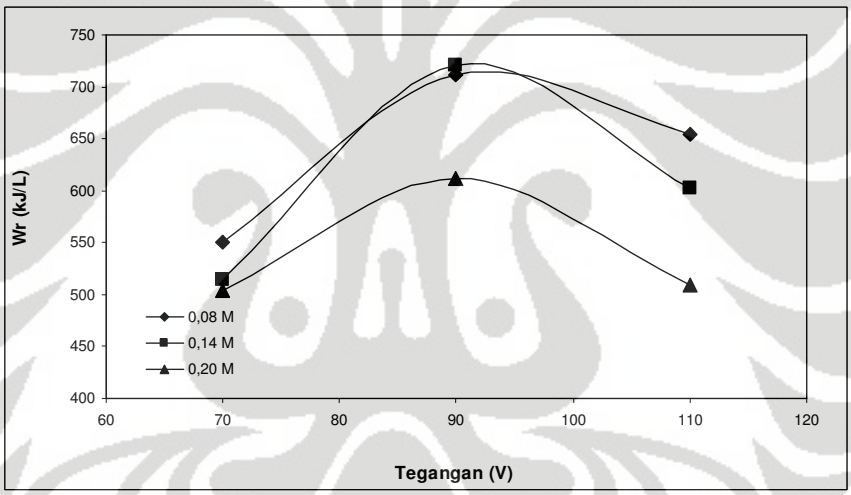
Gambar 2. Grafik laju alir terhadap tegangan pada berbagai konsentrasi KOH

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

(lanjutan)



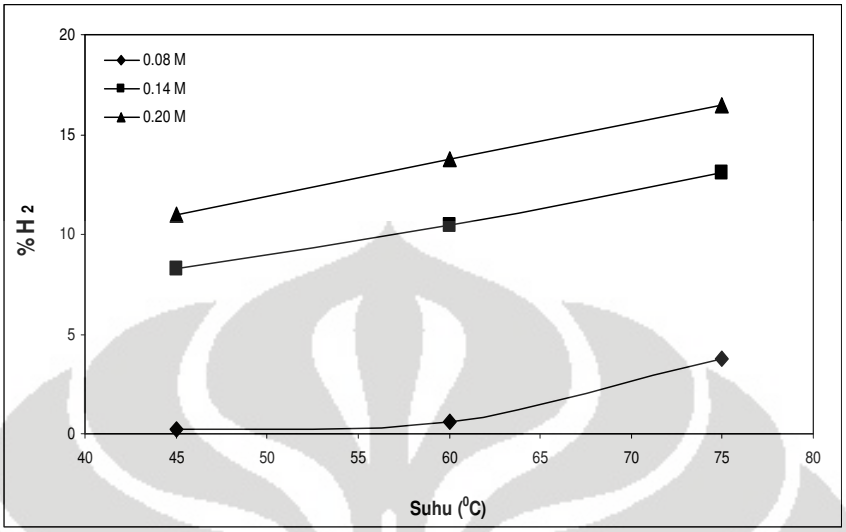
Gambar 3. Grafik perbandingan jumlah mol ($G(H_2)$) terhadap tegangan pada berbagai konsentrasi KOH



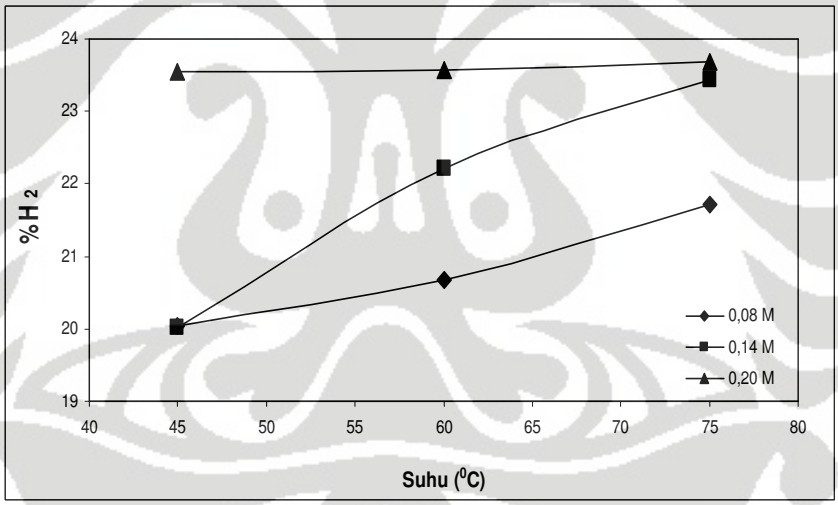
Gambar 4. Grafik konsumsi energi (Wr) terhadap tegangan pada berbagai konsentrasi KOH

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

Variasi Suhu dan Variasi Konsentrasi

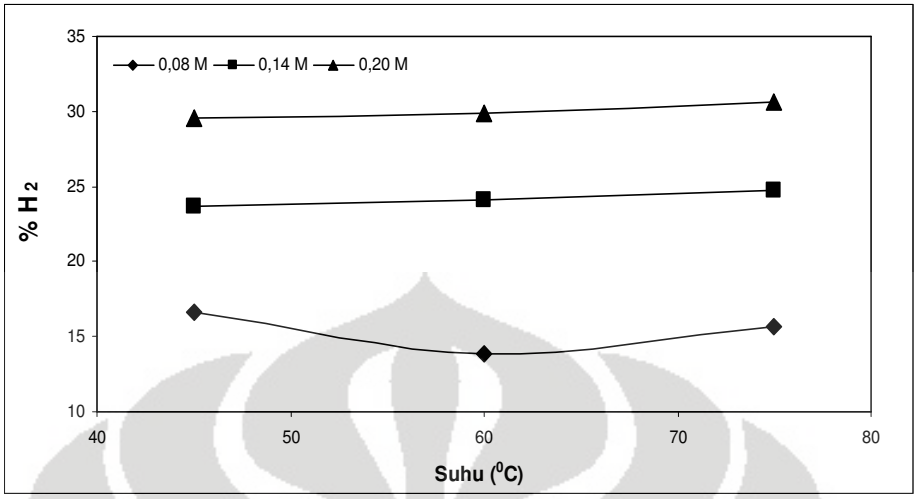


Gambar 5. Komposisi hidrogen (%H_2) terhadap temperatur pada berbagai konsentrasi KOH

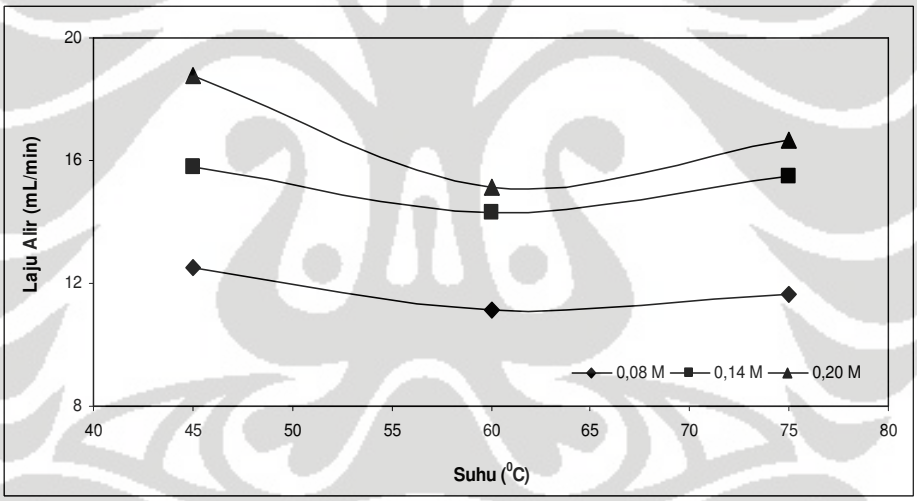


Gambar 6. Grafik komposisi hidrogen (%H_2) terhadap suhu pada berbagai konsentrasi KOH

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

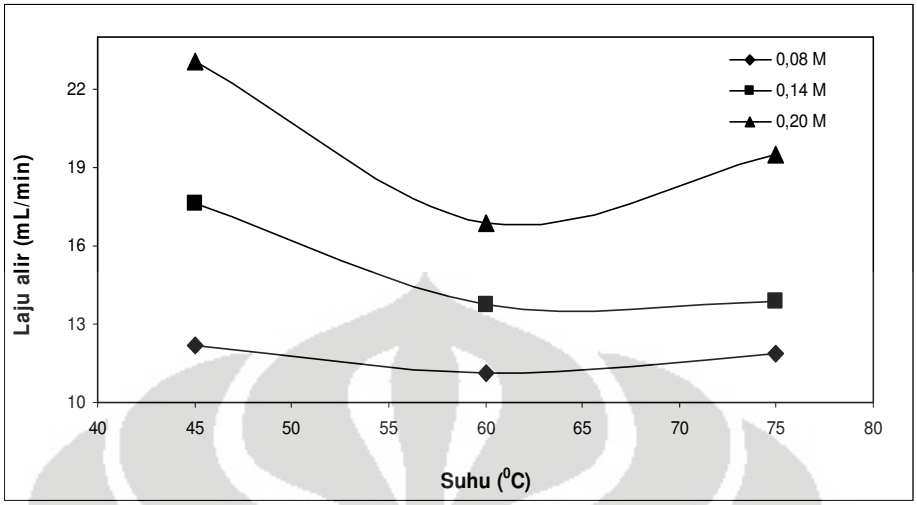


Gambar 7. Grafik komposisi hidrogen (%H_2) terhadap temperatur pada berbagai konsentrasi KOH

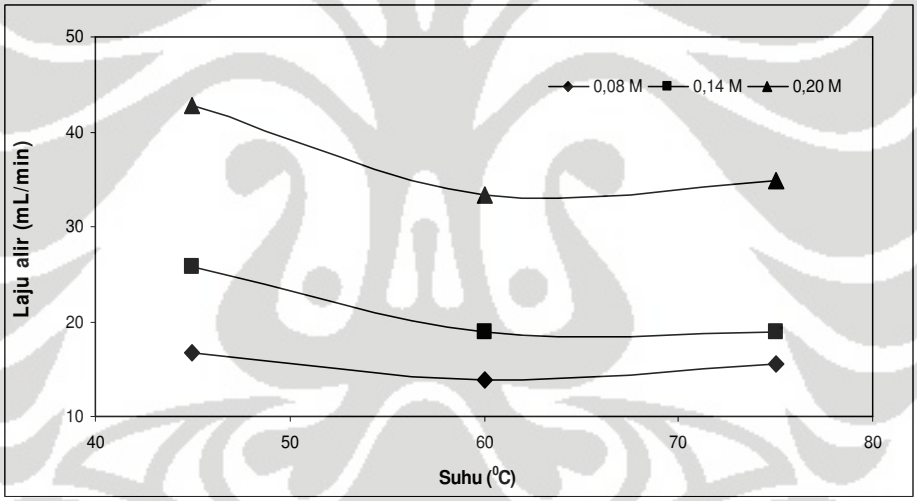


Gambar 8. Grafik laju alir terhadap temperatur pada berbagai konsentrasi KOH pada tegangan 70 volt

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

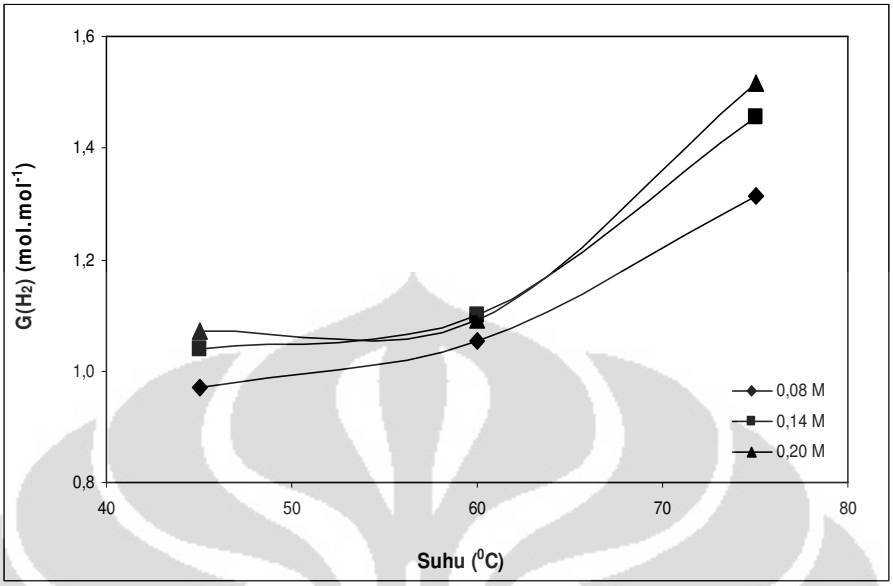


Gambar 9. Grafik laju alir terhadap suhu pada berbagai konsentrasi KOH pada tegangan 90 volt

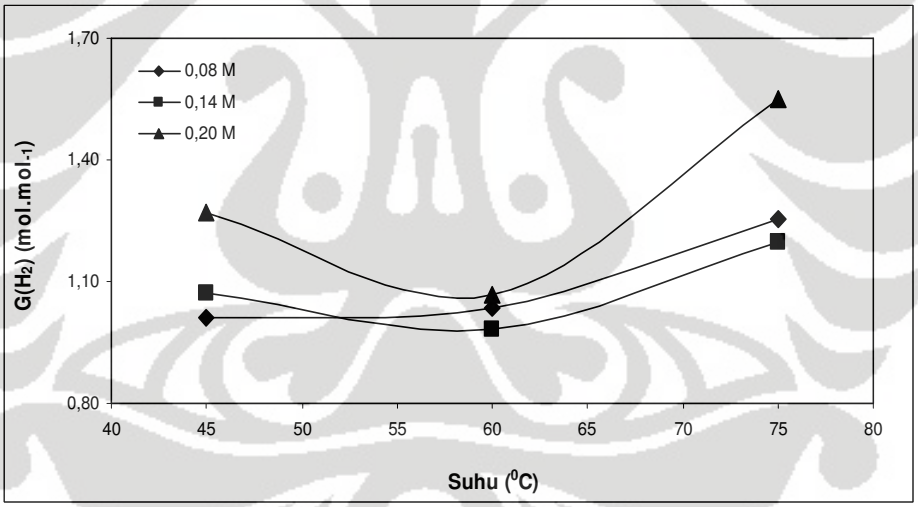


Gambar 10. Grafik laju alir terhadap suhu pada berbagai konsentrasi pada tegangan 110 volt

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

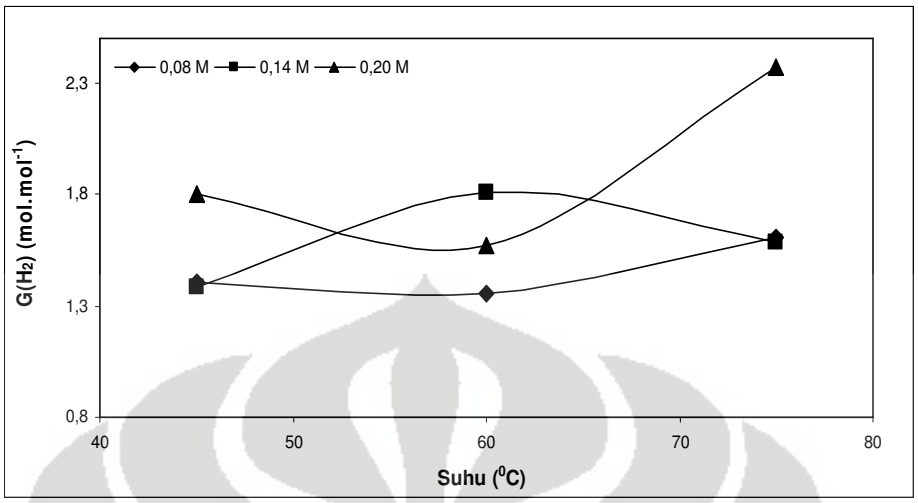


Gambar 11. Grafik perbandingan mol hidrogen ($G(H_2)$) terhadap temperatur pada berbagai konsentrasi pada tegangan 70 volt

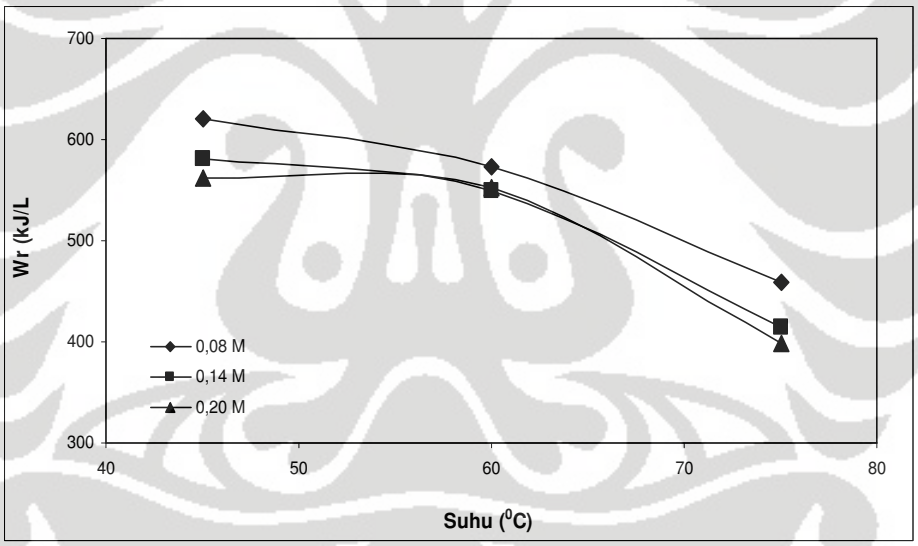


Gambar 12. Grafik perbandingan jumlah mol terhadap suhu pada berbagai konsentrasi pada tegangan 90 volt

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

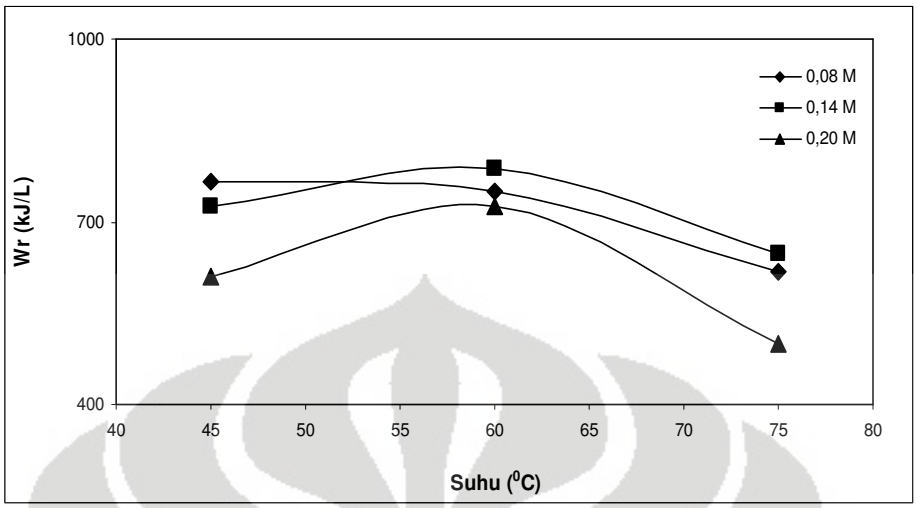


Gambar 13. Grafik perbandingan jumlah mol terhadap suhu pada berbagai konsentrasi pada tegangan 110 volt

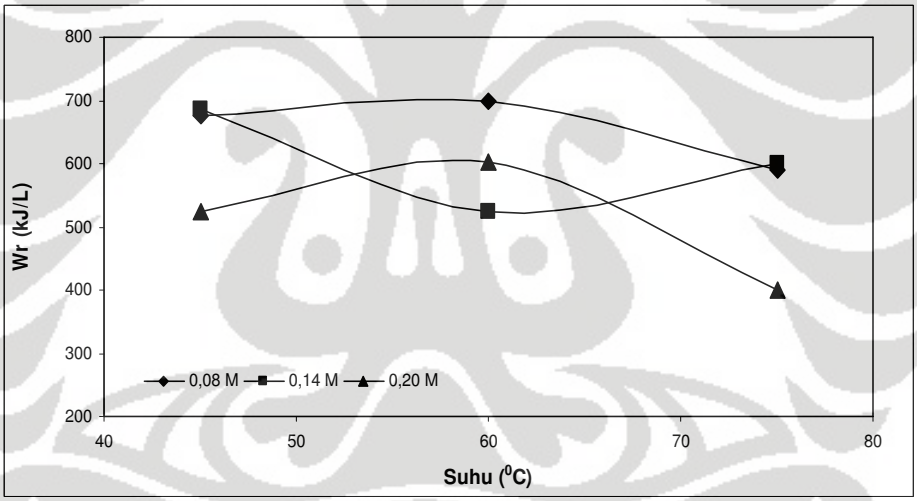


Gambar 14. Grafik konsumsi energi (Wr) terhadap temperatur pada berbagai konsentrasi pada tegangan 70 volt

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009



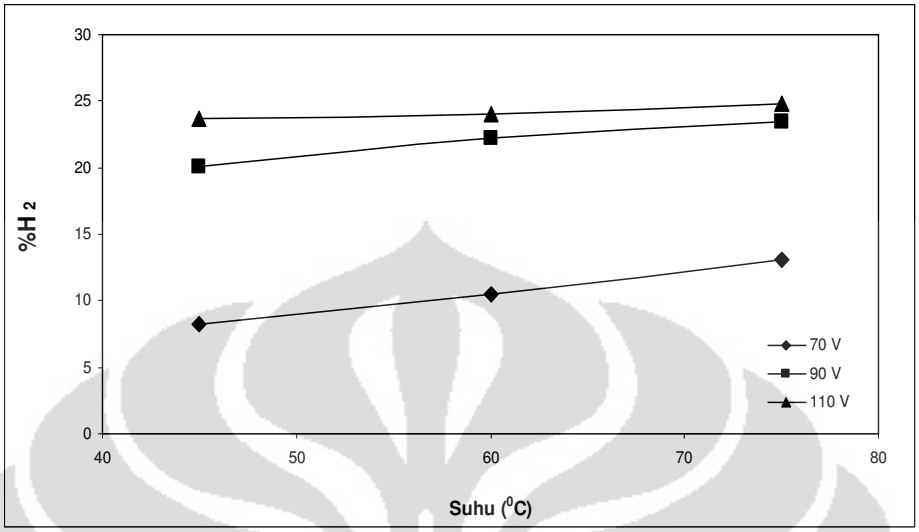
Gambar 15. Grafik konsumsi energi (Wr) terhadap temperatur pada berbagai konsentrasi pada tegangan 90 volt



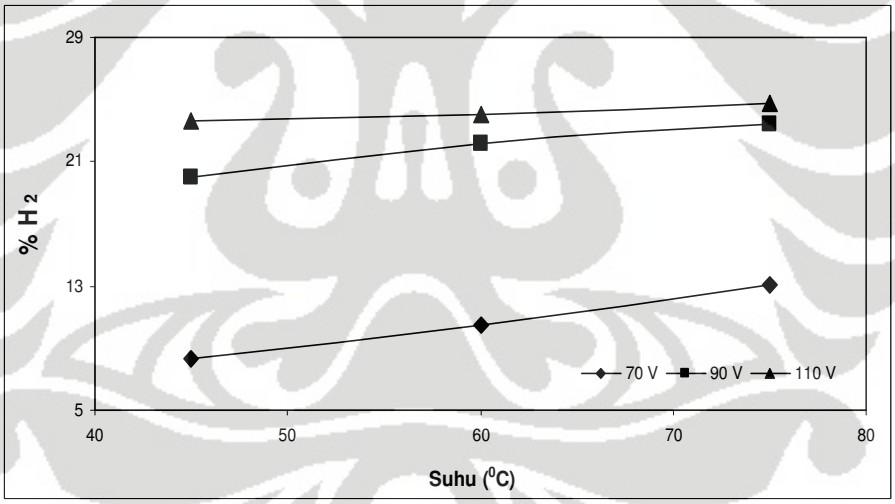
Gambar 16. Grafik konsumsi energi (Wr) terhadap temperatur pada berbagai konsentrasi pada tegangan 110 volt

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

Variasi Temperatur dan Variasi Tegangan

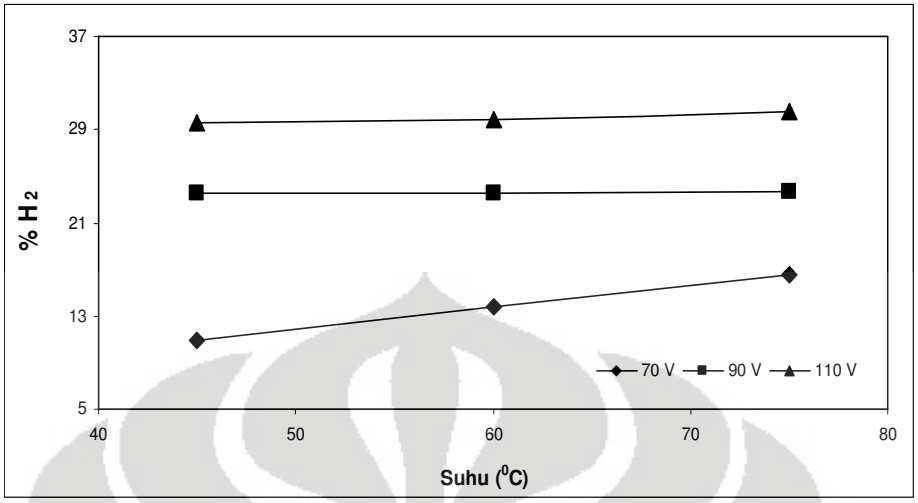


Gambar 17. Grafik komposisi hidrogen (%H_2) terhadap tegangan pada konsentrasi KOH 0,08 M

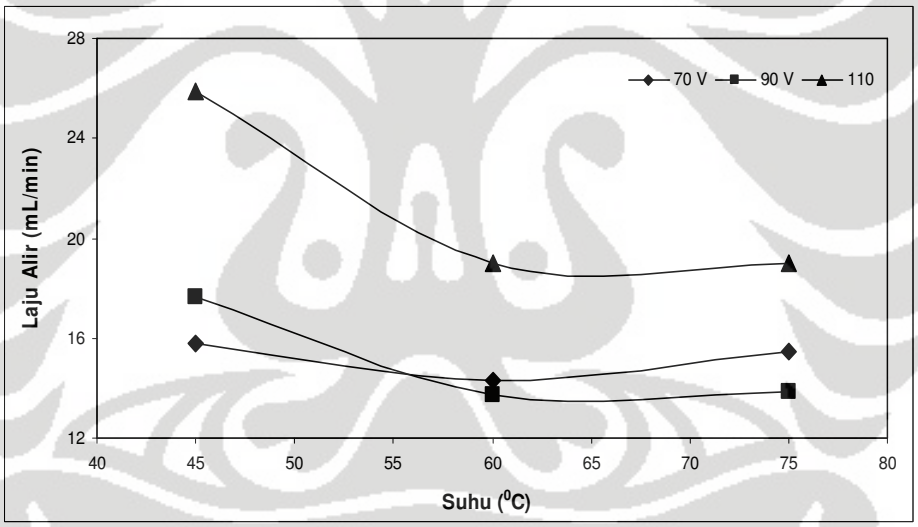


Gambar 18. Grafik komposisi hidrogen (%H_2) terhadap tegangan pada konsentrasi KOH 0,14 M

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

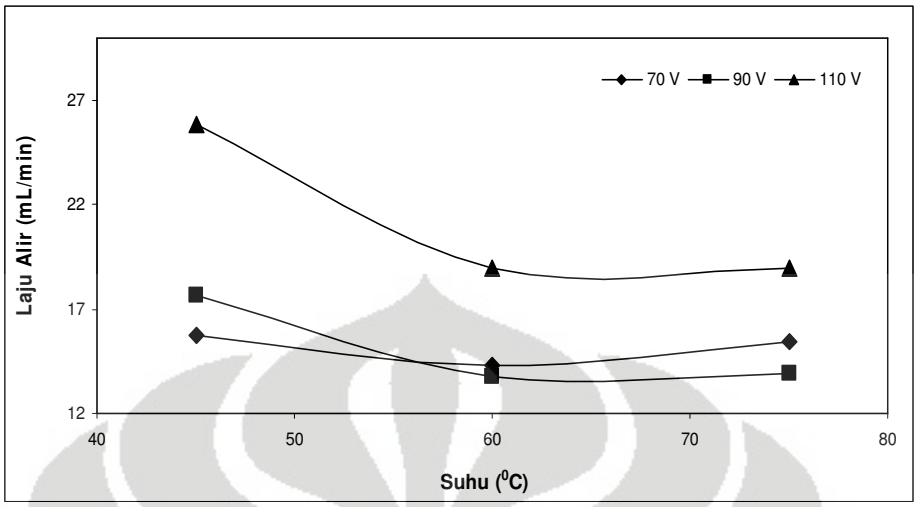


Gambar 19. Grafik komposisi hidrogen (%H_2) terhadap tegangan pada konsentrasi KOH 0,20 M

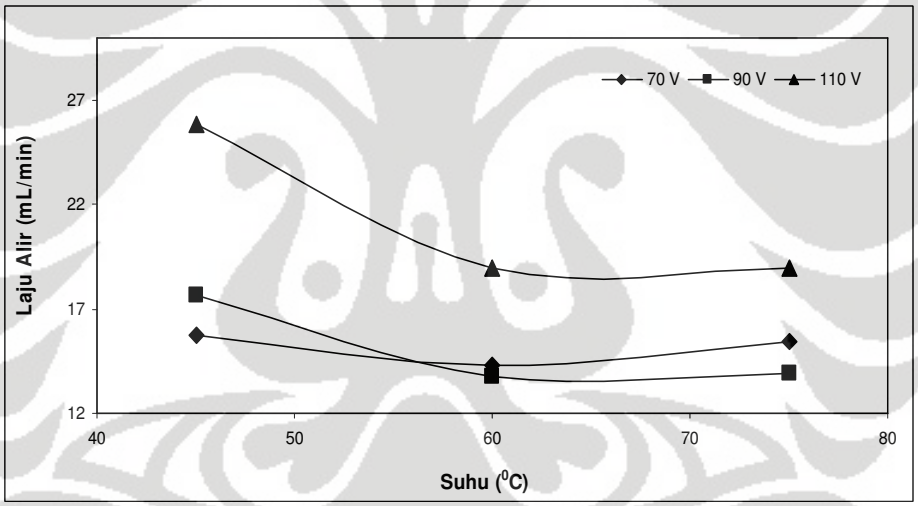


Gambar 20. Grafik laju alir terhadap temperatur pada konsentrasi KOH 0,08 M

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

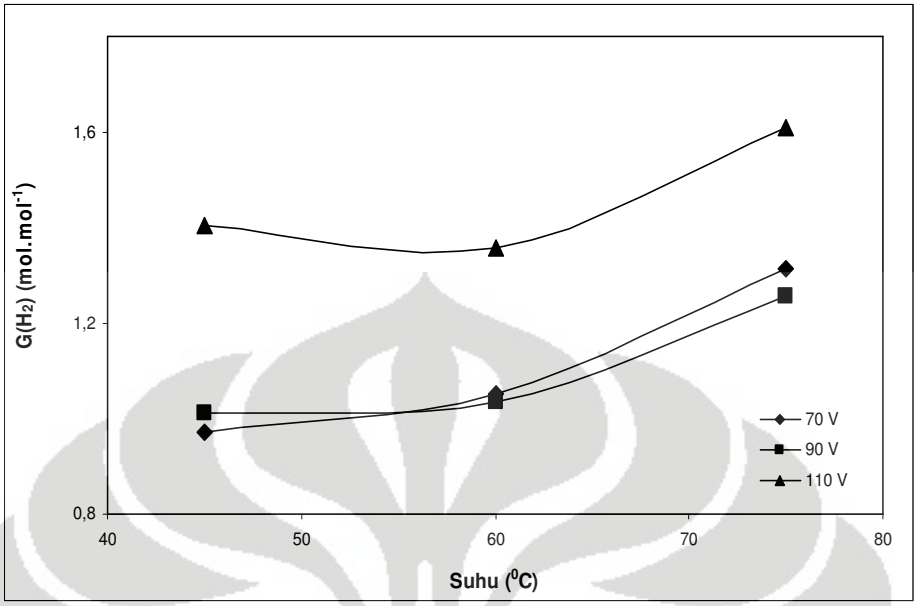


Gambar 21. Grafik laju alir terhadap suhu pada konsentrasi KOH 0,14 M

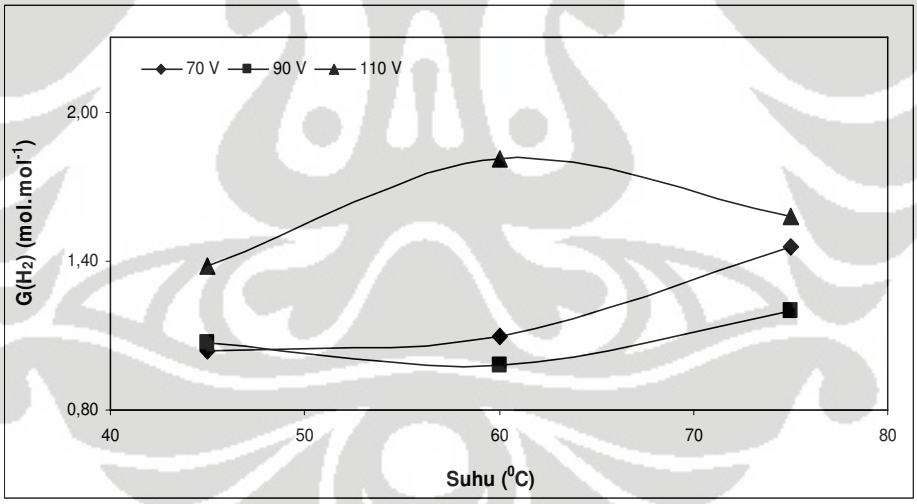


Gambar 22. Grafik laju alir terhadap suhu pada konsentrasi KOH 0,20 M

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

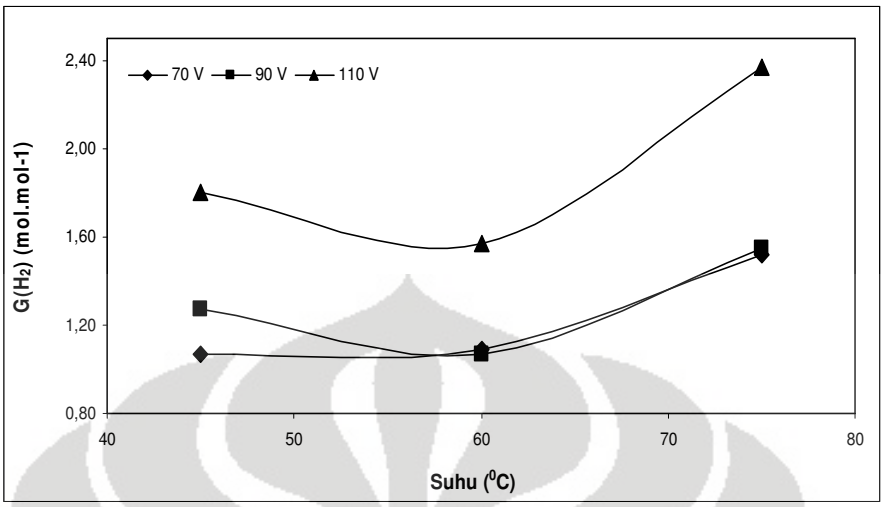


Gambar 23. Grafik perbandingan mol hidrogen ($G(H_2)$) terhadap suhu pada konsentrasi KOH 0,08 M

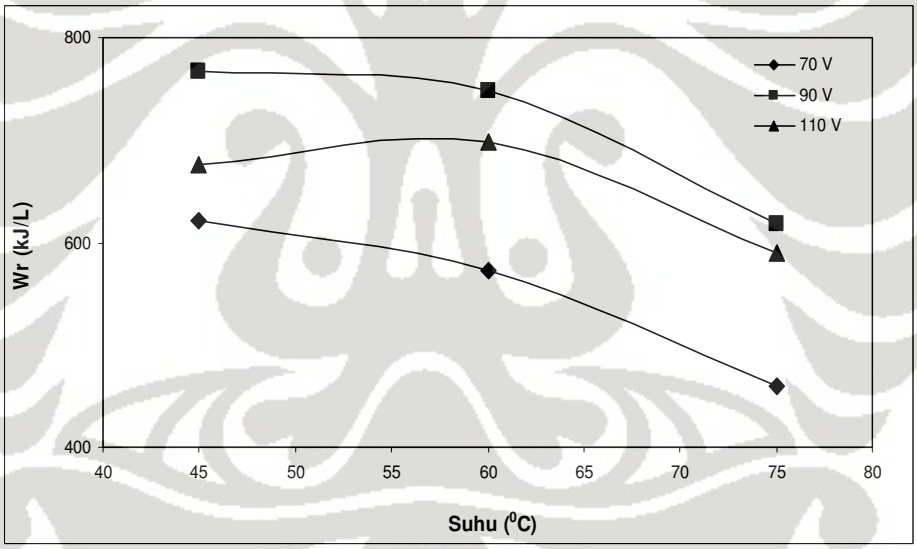


Gambar 24. Grafik perbandingan mol hidrogen ($G(H_2)$) terhadap suhu pada konsentrasi KOH 0,14 M

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009



Gambar 25. Grafik perbandingan mol hidrogen ($G(H_2)$) terhadap suhu pada konsentrasi KOH 0,20 M



Gambar 26. Grafik perbandingan konsumsi energi (Wr) terhadap suhu pada konsentrasi KOH 0,08 M

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009

Konsentrasi KOH	Tegangan (volt)	T (^{0}C)	V gas (L)	F (C/mol)	Arus (I)	G(H_2) (mol.mol^{-1})	Wr (kJ/L)
	70	45	0,025	96500	1,85	0,97	621,00
	70	60	0,025	96500	1,51	1,05	572,58
	70	75	0,025	96500	1,27	1,31	458,85
	90	45	0,025	96500	1,73	1,01	767,22
0.08 M	90	60	0,025	96500	1,54	1,04	748,60
	90	75	0,025	96500	1,36	1,26	617,70
	110	45	0,025	96500	1,71	1,40	675,56
	110	60	0,025	96500	1,47	1,36	698,00
	110	75	0,025	96500	1,39	1,61	589,21
	70	45	0,025	96500	2,18	1,04	580,63
	70	60	0,025	96500	1,87	1,10	548,71
	70	75	0,025	96500	1,53	1,46	414,28
	90	45	0,025	96500	2,37	1,07	724,91
0.14 M	90	60	0,025	96500	2,01	0,98	788,66
	90	75	0,025	96500	1,67	1,20	647,97
	110	45	0,025	96500	2,69	1,38	685,51
	110	60	0,025	96500	1,51	1,81	523,17
	110	75	0,025	96500	1,72	1,58	599,20
	70	45	0,025	96500	2,51	1,07	562,57
	70	60	0,025	96500	1,99	1,09	552,10
	70	75	0,025	96500	1,58	1,52	397,90
	90	45	0,025	96500	2,61	1,27	609,59
0.20 M	90	60	0,025	96500	2,27	1,07	726,02
	90	75	0,025	96500	1,80	1,55	499,88
	110	45	0,025	96500	3,41	1,80	525,18
	110	60	0,025	96500	3,04	1,57	602,76
	110	75	0,025	96500	2,11	2,37	400,13

Rancang bangun..., Christina Natalia, FTUI, 2009