



UNIVERSITAS INDONESIA

**SISTEM PRODUKSI HIDROGEN DARI AIR DENGAN
ELEKTROLISIS PLASMA NON-TERMAL DALAM
ELEKTROLIT K_2CO_3**

SKRIPSI

**OLEH :
BAGUS SYAIFUL UTOMO
0606076186**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**SISTEM PRODUKSI HIDROGEN DARI AIR DENGAN
ELEKTROLISIS PLASMA NON-TERMAL DALAM
ELEKTROLIT K_2CO_3**

SKRIPSI

**OLEH :
BAGUS SYAIFUL UTOMO
0606076186**

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 : Bagus Syaiful Utomo

NPM : 0606076186

Tanda Tangan :

Tanggal : 25 Juni 2010

LEMBAR PENGESAHAN

Makalah skripsi dengan judul:

**SISTEM PRODUKSI HIDROGEN DARI AIR DENGAN
ELEKTROLISIS PLASMA NON-TERMAL DALAM
ELEKTROLIT K_2CO_3**

OLEH :
Bagus Syaiful Utomo
0606076186

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Nelson Saksono, MT.



Penguji I : Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA



Penguji II : Ir. Eva Fathul Karamah, MT



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 02 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 Dari Air Dengan Elektrolisis Plasma Non-Termal Dalam Elektrolit K_2CO_3** ” 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. Allah SWT karena atas segala kehendak-Nya kami diberi kesabaran dan kemampuan untuk dapat menyelesaikan penelitian ini dan membuat laporannya.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku ketua Departemen Teknik Kimia FTUI
3. Keluargaku, Ibuku dan Ibu Dede dan Bapak Prof. Dr. Johny Wahyuadi, DEA atas segala perhatian, doa, dan dukungan moral & material.
4. Ir. Yuliusman M.Eng selaku kordinator skripsi Teknik Kimia FTUI
5. Teman-teman tim peneliti, Bondan A., Rizky F., dan Jainal A. atas kerjasama yang menyenangkan dalam melakukan pelenilaian bersama untuk membuat skripsi ini
6. Elmirasti Bilqis Adityawan atas segala dukungannya dan semangat yang membuat penulis menjadi lebih tersemangati dalam membuat makalah skripsi ini.
7. Mbak Tiwi, mang Ijal, mas Eko, dan mang Jajat atas bantuanya dalam melakukan pekerjaan di laboratorium.
8. A. Adep Dwiatmoko, Pusat Penelitian Kimia - Research Center for Chemistry Indonesian Institute of Sciences (LIPI) atas bantuanya mendownload jurnal ilmiah.
9. Achmad Fauzie, Institut Sel Fuel Universiti Kebangsaan Malaysia atas bantuanya mendownload jurnal ilmiah.
10. Wahyu Kusuma M., Multifunctional Polymer Laboratory Chem.Engineering Dept. National Cheng Kung Univesity (NCKU) Taiwan-ROC atas bantuanya mendownload jurnal.
11. Martina Yttria atas pinjaman laptonya ketika laptopku rusak.
12. Arif Sugiyanto atas pinjaman sepeda motornya untuk memudahkan transportasi.
13. 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 membangun untuk perbaikan makalah ini pada masa mendatang akan penulis terima dengan besar hati. Akhir kata, Penulis berharap makalah skripsi ini dapat berguna bagi yang membacanya dan semoga dapat menjadi masukan untuk pengembangan di masa yang akan datang.

Depok 2010

Penulis



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

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

Nama : Bagus Syaiful Utomo
NPM : 0606076186
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 DARI AIR DENGAN
ELEKTROLISIS PLASMA NON-TERMAL DALAM
ELEKTROLIT K_2CO_3**

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 : 24 Juni 2010

Yang Menyatakan

(Bagus Syaiful Utomo)

ABSTRAK

Nama : Bagus Syaiful Utomo
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : **Sistem Produksi Hidrogen Dari Air Dengan Elektrolisis Plasma Non-Termal Dalam Elektrolit K_2CO_3**

Teknologi produksi hidrogen melalui metode elektrolisis merupakan teknologi yang sudah berusia lebih dari 200 tahun. Metode elektrolisis ini hanya menyumbang 4% produksi hidrogen dunia saat ini. Hal ini dikarenakan elektrolisis dinilai tidak ekonomis, membutuhkan energi yang sangat besar untuk memecah air, padahal elektrolisis menghasilkan hidrogen paling murni diantara teknologi lain. Mekanisme elektrolisis bisa diubah dengan menggunakan listrik bertegangan tinggi tetapi arus rendah, dengan begitu akan terbentuk spesi metastabil yang bisa menghasilkan reaksi yang tidak bisa dicapai reaksi kimia biasa. Dalam skripsi ini dibahas elektrolisis plasma dengan K_2CO_3 sebagai pengarah reaksi sehingga dapat menghasilkan hidrogen lebih banyak dengan energi rendah. Efektivitas proses elektrolisis plasma ini dinyatakan sebagai jumlah produk hidrogen per konsumsi energi listrik yang digunakan dengan memvariasikan tegangan listrik dan konsentrasi larutan K_2CO_3 . Proses ini dapat menghasilkan hidrogen 8.7 kali lebih tinggi dibanding elektrolisis konvensional.

Kata Kunci: elektrolisis, elektrolisis plasma, energi terbarukan, hidrogen, K_2CO_3

ABSTRACT

Name : Bagus Syaiful utomo
Study Programme : Chemical Engineering
Title : **Hydrogen Production System from Water With Non-Thermal Plasma Electrolysis In The K_2CO_3 Electrolyte**

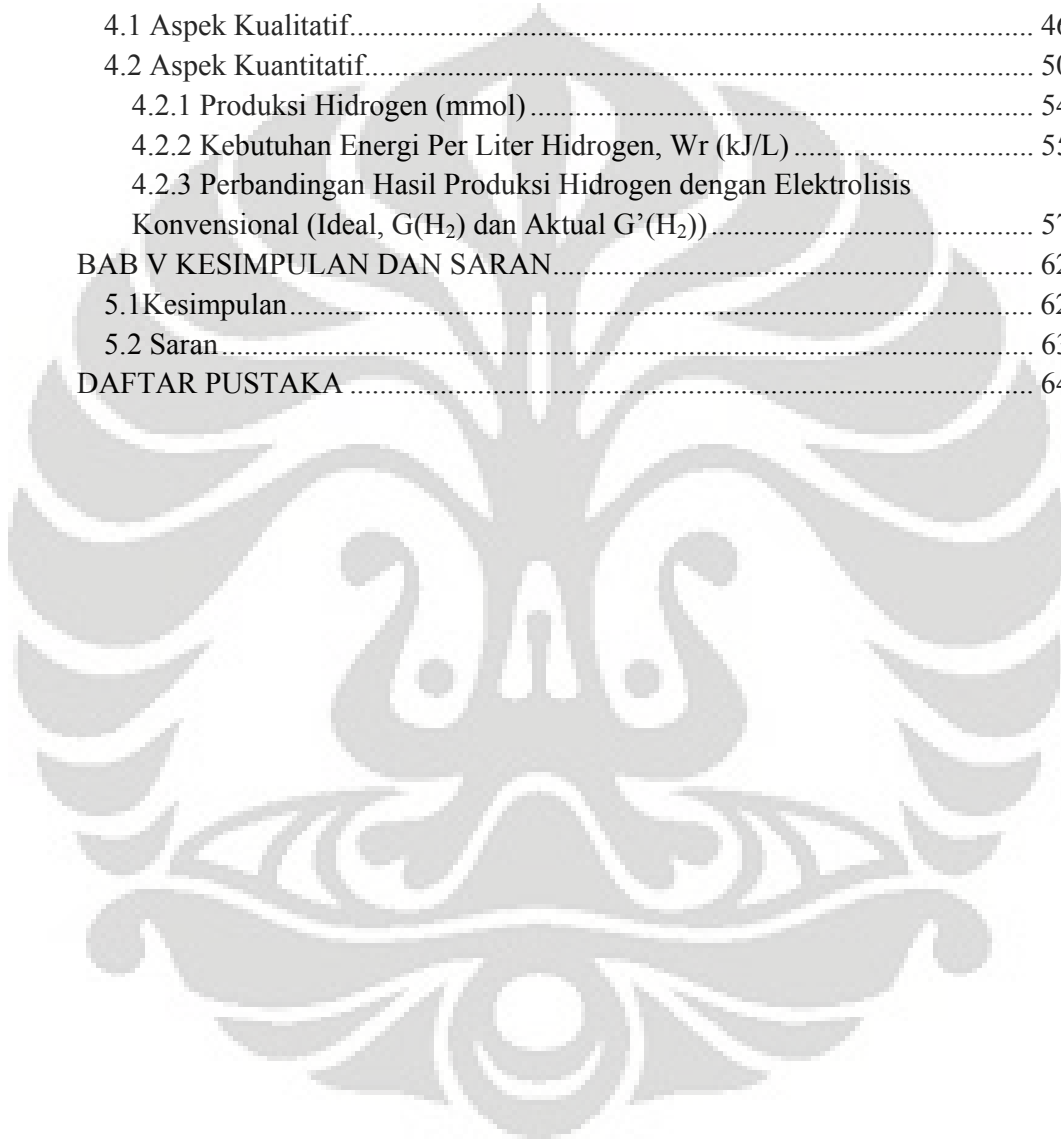
Hydrogen production technology via electrolysis method is the technology more than 200 years ago. This ethode only accounted for 4% hydrogen production today's world. This is because electrolysis is considered uneconomical, require enormous energy to split water, whereas electrolysis is the purest producer hydrogen among other technologies. Electrolysis mechanism can be changed by using high-voltage electricity, but low flows, so will form a metastable species which can produce a reaction that can not be achieved an ordinary chemical reaction. In this article discussed the plasma electrolytic reaction with K_2CO_2 as the referrer so that it can produce more hydrogen with low energy. The effectiveness of the plasma electrolytic process which is expressed as the amount of hydrogen perproduct used in electric energy consumption by varying the voltage and the concentration of K_2CO_2 solution. This process can produce 8.7 times more hydrogen than conventional electrolysis.

Keywords: electrolysis, plasma electrolysis, renewable energy, hydrogen, K_2CO_3

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	6
1.5. Sistematika Penulisan.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Hidrogen.....	8
2.2.1Teknologi Produksi Hidrogen.....	9
2.2 Elektrolisis Air Konvensional	10
2.2 Definisi Plasma.....	14
2.3 Jenis Plasma	14
2.4 Spesi Aktif Plasma Non-termal	16
2.5 Jenis Plasma-Plasma Non-termal	17
2.6 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja CGDE.....	18
BAB III METODE PENELITIAN	29
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	29
3.2Bahan dan Peralatan Penelitian	30
3.3Rancang Bangun Sistem Produksi Hidrogen	30
3.3.1 Rangkaian Pembangkit Tegangan Tinggi.....	30
3.3.2 Peralatan Reaktor Elektrolisis Plasma	32
3.3.3 Sistem Pengendali Temperatur	35
3.3.4Sistem Pemisahan Uap Air Dari Hidrogen.....	36
3.3.5Sistem Pengukuran Produk Hidrogen dan Komponen Kelistrikan	37
3.4Preparasi Bahan	41
3.5Uji Pendahuluan Peralatan Sistem Produksi Hidrogen	41
3.6Prosedur Penelitian.....	42
3.6.1 Pengukuran Konduktivitas Larutan	43
3.7Hasil Uji Peralatan Sistem Produksi Hidrogen.	43

3.7.1 Mol hidrogen yang dihasilkan.	43
3.7.2 W_r , kJ energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1 Liter hidrogen.	44
3.7.3 $G(H_2)$, perbandingan hasil elektrolisis plasma dengan elektrolisis Konvensional Ideal (teoritis)	44
3.7.4 $G'(H_2)$, Perbandingan Hasil Elektrolisis Plasma Dengan Elektrolisis Konvensional Aktual	45
BAB IV PEMBAHASAN	46
4.1 Aspek Kualitatif.....	46
4.2 Aspek Kuantitatif.....	50
4.2.1 Produksi Hidrogen (mmol)	54
4.2.2 Kebutuhan Energi Per Liter Hidrogen, W_r (kJ/L)	55
4.2.3 Perbandingan Hasil Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Konvensional (Ideal, $G(H_2)$ dan Aktual $G'(H_2)$).....	57
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	62
5.1 Kesimpulan.....	62
5.2 Saran.....	63
DAFTAR PUSTAKA	64



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Skema Ilustrasi Elektrolisis Sebagai Cara Menyimpan Energi Ke Hidrogen.....	4
Gambar 2.1 Efek tegangan terhadap pembentukan radikal *OH pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *OH (GAO Jinzang, et al., 2008)	18
Gambar 2.2 Efek tegangan terhadap pembentukan radikal *H pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *H (GAO Jinzang, et al., 2008).....	18
Gambar 2.3 Efek konduktivitas larutan terhadap pembentukan radikal *OH pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *OH (GAO Jinzang, et al., 2008).....	19
Gambar 2.4 Efek konduktivitas larutan terhadap pembentukan radikal *H pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *H (GAO Jinzang, et al., 2008).....	19
Gambar 2.5 Efek pH larutan terhadap pembentukan radikal *OH pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *OH (GAO Jinzang, et al., 2008)	20
Gambar 2.6 Efek pH larutan terhadap pembentukan radikal *H pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *H (GAO Jinzang, et al., 2008).....	20
Gambar 2.7 Efek konduktivitas 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%	21
Gambar 2.8 Efek konduktivitas terhadap W_r (konsumsi energi) pada larutan NaOH dan metanol, $T = 337,15 K$, kemurnian 99,5%	21
Gambar 2.9 Efek tegangan terhadap $G(H_2)$ dalam media dielektrikum yang berbeda. Konduktivitas = $11,55 mS cm^{-1}$, $T=337,15 K$, kemurnian metanol 99,5%.....	22
Gambar 2.10 Efek tegangan terhadap konsumsi energi dalam media dielektrikum yang berbeda. Konduktivitas = $11,55 mS cm^{-1}$, $T=337,15 K$, kemurnian metanol 99,5%	23
Gambar 2.11 Efek konsentrasi etanol terhadap $G(H_2)$. $T=303,15 K$, konduktivitas = $5,6 mS cm^{-1}$, $V = 1000V$	23
Gambar 2.12 Efek konsentrasi etanol terhadap konsumsi energi. $T=303,15 K$, konduktivitas = $5,6 mS cm^{-1}$, $V = 1000V$	24
Gambar 2.13 Komposisi produk elektrolisis plasma etanol, $T = 303,15 K$, $V = 1000V$, konduktivitas = $5,6 mS cm^{-1}$	24
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	28
Gambar 3.2 Rangkaian Pembangkit Tegangan Tinggi Elektrolisis Plasma	30
Gambar 3.3 slide <i>regulator</i>	30
Gambar 3.4 Trafo Tegangan Tinggi	30
Gambar 3.5 Dioda Bridge Tegangan Tinggi	31
Gambar 3.6 Reaktor Elektrolisis Plasma.....	32
Gambar 3.7 (a) Katoda Stainless Steel (b) Katoda Wolfram	33
Gambar 3.8 Konfigurasi Ruang Pemisah Katoda dan Anoda	34
Gambar 3.9 Pompa Peristaltik untuk Sirkulasi Larutan	35
Gambar 3.10 Koil Tembaga	36
Gambar 3.11 Kondenser 1	36
Gambar 3.12 Kondenser 2	36

Gambar 3.13 Absorber Silika Gel	37
Gambar 3.14 <i>flowmeter</i> gas	38
Gambar 3.15 Hydrogen Analyzer.....	38
Gambar 3.16 Syringe.....	39
Gambar 3.17 Power Analyzer	39
Gambar 3.18 Konfigurasi Alat Elektrolisis Plasma Penghasil Hidrogen.....	40
Gambar 3.19 Keseluruhan Peralatan Dan Pengukuran Sistem Produksi Hidrogen.....	41
Gambar 4.1 Proses Terbentuknya Plasma	46
Gambar 4.2 Perbandingan Penampakan Plasma Pada Komposisi Yang Berbeda.....	48
Gambar 4.3 Perbandingan Katoda Stainless Steel dengan Katoda Wolfram Karena Paparan Plasma	49
Gambar 4.4 Grafik Kondisi Operasi pada Tegangan 200 V dan Konsentrasi 0,1 M K_2CO_3	50
Gambar 4.5 Laju Alir Produksi Hidrogen	54
Gambar 4.6 W_r pada Berbagai Konsentrasi K_2CO_3 dan Voltase.....	56
Gambar 4.7 W_r pada berbagai konsentrasi K_2CO_3 dan temperature.....	56
Gambar 4.8 Perbandingan Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Plasma vs Elektrolisis konvensional ideal (teoritis) pada Berbagai Konsentrasi K_2CO_3 dan Tegangan Operasi	57
Gambar 4.9 Perbandingan Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Plasma vs Elektrolisis konvensional ideal (teoritis) pada Berbagai Konsentrasi K_2CO_3 dan Temperatur Operasi	58
Gambar 4.10 Perbandingan Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Plasma vs Elektrolisis Konvensional (aktual) pada Berbagai Konsentrasi K_2CO_3 dan Tegangan Operasi	60
Gambar 4.11 Perbandingan Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Plasma vs Elektrolisis Konvensional (aktual) pada Berbagai Konsentrasi K_2CO_3 dan Temperatur Operasi.....	60

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Klasifikasi Plasma	15
Tabel 2.2. Perbandingan kinerja teknologi non-plasma untuk produksi hidrogen	17
Tabel 4.1. Data Pengembang Elektrolisis konvensional ideal (Hukum Faraday)	59
Tabel 4.2. Perbandingan dua tipe elektrolizer komersial	61



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Hidrokarbon sebagai sumber energi memang sangat efisien. Jumlahnya sangat melimpah saat ini, memiliki nilai energi yang besar, dan juga bentuknya yang praktis, yaitu cair atau gas yang mudah dibawa kemana-mana dengan aman serta mudah dikonversi ke dalam bentuk energi yang lain membuatnya menjadi sumber energi utama dunia saat ini. Pembangkit listrik di Indonesia pun sebagian besar menggunakan hidrokarbon berupa solar dan batu bara sebagai sumber energinya.

Seiring dengan semakin banyaknya pengembangan dari pemakaian hidrokarbon sebagai sumber energi, muncullah berbagai masalah yang ditimbulkannya, seperti yang menjadi isu terbesar dalam abad ini, yaitu tentang pemanasan global yang membuat bumi semakin panas dan juga akan berdampak pada mencairnya es di kutub bumi yang dengan kata lain bisa memusnahkan pemakainya sendiri, manusia.

Selain pemanasan global, masalah lainnya juga timbul pada ketersediaan sumber energi hidrokarbon itu sendiri mengingat hidrokarbon merupakan sumber daya yang tidak terbarukan, sementara kebutuhan akan energi dunia semakin lama semakin bertambah, berlawanan arah, hal ini lah yang disebut dengan krisis energy dunia. Di Indonesia sendiri hal ini sudah terjadi sekitar tahun 2005. Selain itu harganya yang semakin tinggi membuatnya harus dicari pengganti yang bisa mengisi kekurangan-kekurangan tersebut.

Bisa dibayangkan suatu keadaan ketika kebutuhan akan energi begitu tinggi, tetapi tidak terpenuhi oleh minyak atau gas alam yang jumlahnya sudah kritis. Oleh karena itu, diperlukan sumber energi baru yang jumlahnya melimpah, bisa diperbaharui dan juga tidak berbahaya terhadap lingkungan, yang bisa menjawab semua itu adalah sumber energi hidrogen dari air. Bahan baku yang begitu melimpah, air, membuat bahan bakar hidrogen sebagai sumber energi yang menjanjikan, pemakaian hidrogen sebagai bahan bakar menghasilkan emisi nol

karena berupa air kembali yang bisa dimanfaatkan untuk dipisahkan menjadi hidrogen dan oksigen kembali, hal ini merupakan sebuah siklus air.

Biofuel pun yang akhir-akhir ini diisukan sebagai alternatif pengganti dari minyak bumi juga memiliki masalah yaitu adanya emisi gas karbon yang bisa menyebabkan pemanasan global juga, meskipun efeknya bisa dikurangi dengan adanya penanaman tanaman untuk memproduksi biofuel itu sendiri. Selain itu, Biofuel memiliki keterbatasan yaitu adanya ketentuan yang berbeda akan penggunaan kadarnya untuk mesin di berbagai negara, selain itu juga dibutuhkan teknologi mesin yang berbeda untuk menghasilkan operasi yang optimum, sehingga diperlukan alternatif lain yang bisa mengatasi kendala ini, yaitu bahan bakar universal, hidrogen (Holladay, et al. 2009).

Hal yang dibahas dalam skripsi ini bukanlah bagaimana menjadikan hidrogen sebagai sumber energi, tetapi membahas bagaimana membentuk hidrogen dalam jumlah besar dari air. Sampai saat ini, hidrogen paling banyak diproduksi dengan menggunakan tiga cara, yaitu SR (*Steam Reforming*), ATR (*Autothermal Reforming*), dan POX (*Partial Oxidation*). SR memiliki konversi yang paling besar akan tetapi memiliki emisi gas yang paling besar juga, ATR bisa bekerja pada temperatur yang rendah akan tetapi membutuhkan oksigen, konversinya pun tidak terlalu besar, sedangkan POX memiliki toleransi sulfur yang tinggi dan tidak memerlukan katalis, tetapi membutuhkan temperatur reaksi yang tinggi dan konversi yang terkecil.

SR, ATR, dan POX ketiganya merupakan teknik menghasilkan hidrogen dengan pemecahan unsur-unsur pembentuk hidrokarbon minyak atau gas bumi. Hal ini dilakukan karena dalam minyak atau gas bumi terdapat hidrogen yang banyak terikat didalamnya. Akan tetapi, ketiga teknik ini memiliki kekurangan yaitu karena minyak atau gas bumi merupakan sumber energi tak terbarukan sehingga tidak akan bisa bertahan lama di masa mendatang. Oleh karena itu, dibutuhkan proses yang strategis, kebutuhan energinya kecil, rendah emisi, konversinya yang tinggi, dan yang paling penting *renewable* sehingga bisa bertahan lama.

Konsep *renewable* diterapkan pada produksi hidrogen dengan cara elektrolisis air. Langkahnya tepat namun caranya masih kurang menjanjikan.

Masalah yang ada dalam teknik ini adalah begitu rendahnya konversi, sehingga membutuhkan energi dalam jumlah yang besar untuk bisa memproduksi hidrogen. Oleh karena itu, perbaikan mekanisme perlu dilakukan untuk menaikkan konversi produksi hidrogen dari air ini, yaitu dengan menggunakan teknologi plasma. Dengan teknologi ini efisiensi bisa dinaikkan hingga mencapai 800 % dibandingkan dengan kebutuhan elektrolisis air konvensional, (Mizuno, 2003). Bahkan mol hidrogen yang dihasilkan bisa mencapai 2300 kali lebih besar dibanding dengan elektrolisis air konvensional (Yan ZC, 2009).

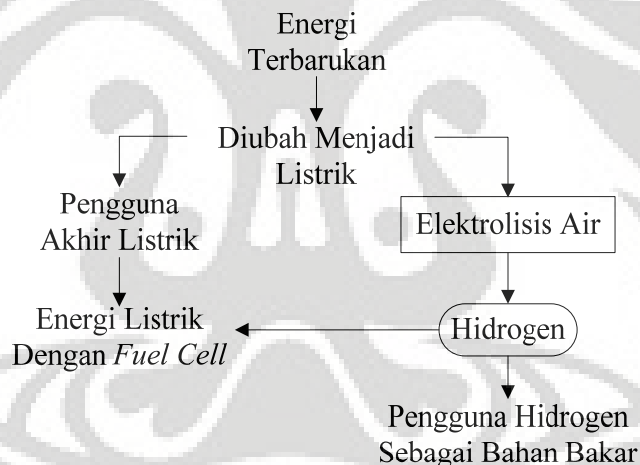
Elektrolisis air dengan alkali merupakan satu diantara cara untuk menghasilkan hidrogen yang paling mudah, menawarkan keuntungan dan kemudahan. Tantangannya untuk penggunaan yang luas dari elektrolisis adalah berkaitan dengan konsumsi energi, biaya dan perawatan untuk meningkatkan reliabilitas, ketahanan, dan keamanan proses. Hidrogen terutama digunakan untuk kilang minyak (Mueller-Langer F, et al. 2007), produksi amoniak, dan untuk pemurnian logam seperti nikel, tungsten, molybdenum, tembaga, seng, uranium, dan timbal (Eliaz N, et al.2000).

Sejumlah lebih dari 50 juta metrik ton hidrogen digunakan di seluruh dunia selama tahun 2006 (Richards M, 2007). Skala konsumsi hidrogen yang begitu besar harus diimbangi dengan skala produksi hidrogen untuk mengatasinya. Seperti produksi hidrogen didominasi oleh proses *reforming* dari gas alam dan gasifikasi batu bara dan *coke* dari kilang minyak, serta gasifikasi dan *reforming* dari *heavyoil* meskipun teknologi elektrolisis telah dikenal sejak 200 tahun yang lalu dan memiliki keunggulan dalam menghasilkan hidrogen dengan kemurnian yang sangat tinggi. Aplikasi elektrolisis sering terbatas oleh keadaan yang membuat produksi hidrogen untuk skala besar karena *plant* yang dibangun kebanyakan tidak memungkinkan untuk menjadi ekonomis atau bahkan tidak memungkinkan untuk dibangun. Elektrolisis hanya mewakili 4% dari produksi hidrogen dunia (Dunn S, 2002).

Dengan semakin meningkatnya harga bahan bakar minyak, produksi, dan ketersediaannya, serta kesadaran akibat pemanasan global dan perubahan iklim yang menyalahkan manusia mengemisikan CO₂ yang berasosiasi dengan penggunaan bahan bakar fosil, hidrogen menjadi sangat populer karena beberapa

alasan bahwa hidrogen dianggap sebagai bahan bakar yang bersih dan ramah lingkungan, mengemisikan hampir tidak ada kecuali air yang malah dapat digunakan kembali. Hidrogen dapat dihasilkan dari berbagai sumber energi, dimana sumber energi terbarukan lebih menarik untuk diubah menjadi listrik dan kemudian digunakan untuk menghasilkan hidrogen mengingat produksi energi terbarukan seperti dari energi matahari, energi angin, energi gelombang laut, dll. yang semakin meningkat pengembangannya. Hidrogen dapat diubah menjadi energi kembali dengan *fuel cell* yang juga teknologinya semakin matang. Bersama ketiga keuntungan diatas akan dapat dihasilkan solusi untuk penyediaan energi berkelanjutan yang akan bertahan dalam jangka waktu lama, dan hal ini sering dinamakan dengan "*hydrogen economy*" (Bockris, 2007).

Skema posisi elektrolisis dalam rantai rencana penyedia sumber energi terbarukan dapat dilihat pada Gambar 1.1 di bawah ini:



Gambar 1.1 Skema Ilustrasi Elektrolisis Sebagai Cara Menyimpan Energi Ke Hidrogen (Kai Zeng, 2010)

Semakin meningkatnya pengembangan tentang energi berkelanjutan memunculkan banyak sumber energi baru yang terbarukan dan dengan proses yang lebih baik kedepannya. Semakin banyaknya energi yang dihasilkan akan membutuhkan distribusi yang baik, dan hidrogen dapat menjadi media "penyimpan energi" yang sangat baik. Energi yang berlebih dari penggunaan sumber energi terbarukan bisa diubah menjadi energi listrik yang kemudian dengan elektrolisis

dapat menghasilkan hidrogen dari air. Hidrogen yang dihasilkan dapat disimpan untuk selanjutnya digunakan kembali sebagai bahan bakar gas secara langsung atau diubah menjadi energi listrik kembali dengan menggunakan *fuel cell*. Sehingga, dengan begitu energi dapat dipindahkan dari area terpencil sekalipun yang banyak mengandung sumber energi angin misalnya atau gelombang air laut.

Penggunaan hidrogen diharapkan menjadi media “penyimpan energi” dari berbagai macam sumber energi terbarukan. Energi terbarukan yang produksinya tidak menentu bisa disimpan energinya dalam bentuk hidrogen ketika tidak dibutuhkan dalam suatu waktu atau jumlahnya berlebih, sangat menarik.

1.2 Perumusan Masalah

Ruang lingkup masalah yang akan dicoba untuk diselesaikan pada skripsi ini diantaranya:

1. Bagaimana membuat rancang bangun reaktor elektrolisis plasma pijar non-termal beserta pembangkit tegangan tingginya.
2. Bagaimana pengaruh perubahan variabel-variabel tegangan listrik yang dialirkan ke sistem elektrolisis, konsentrasi K_2CO_3 terhadap produksi hidrogen dan konsumsi energi listriknya.
3. Perbandingan produktivitas dengan elektrolisis konvensional, apakah lebih baik atau sama saja, atau justru lebih buruk.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk membuat rancang bangun reaktor elektrolisis plasma beserta pembangkit tegangan tingginya.
2. Untuk mengetahui pengaruh perubahan variabel-variabel tegangan listrik yang dialirkan ke sistem elektrolisis, konsentrasi larutan K_2CO_3 sebagai elektrolit pendukung produksi hidrogen dan konsumsi energi listriknya.
3. Membandingkan produktivitas elektrolisis plasma dengan elektrolisis konvensional, apakah lebih baik atau sama saja, atau justru lebih buruk. Sehingga didapat reaktor dan proses yang optimal dalam menghasilkan hidrogen melalui elektrolisis.

1.4 Batasan Masalah

Dalam makalah skripsi ini, batasan–batasan masalah yang dipergunakan adalah :

1. Pemisahan hidrogen dari air menggunakan dielektrikum berupa kaca atau akrilik dan elektrolit K_2CO_3 melalui elektrolisis plasma pancaran pijar non-termal.
2. Variabel bebas yang divariasikan: tegangan listrik yang dialirkan ke sistem elektrolisis dan konsentrasi larutan.
3. Plasma yang digunakan dalam penelitian ini adalah plasma jenis pancaran pijar.
4. Pengukuran gas hidrogen yang dihasilkan dilakukan dengan *flowmeter* gas gelembung sabun dan mengukur komposisinya dengan *hydrogen analyzer* GNL-400F.
5. Pengukuran data kelistrikan dengan *power analyzer* Lutron DW-6901.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam makalah skripsi ini dilakukan dengan membagi tulisan menjadi lima bab, yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Meliputi latar belakang penelitian dan penulisan, perumusan masalah yang dibahas, tujuan dilakukannya penelitian, ruang lingkup penelitian, serta sistematika penulisan seminar ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tinjauan pustaka yang menjadi dasar penelitian yang meliputi pengertian hidrogen, metode produksi hidrogen, pengertian proses elektrolisis, mekanisme dasar elektrolisis, pengertian plasma, karakterisasi plasma, perbedaan dan mekanisme proses elektrolisis plasma dari elektrolisis konvensional, pengaruh variabel – variabel operasi terhadap hidrogen yang dihasilkan.

BAB III METODE PENELITIAN

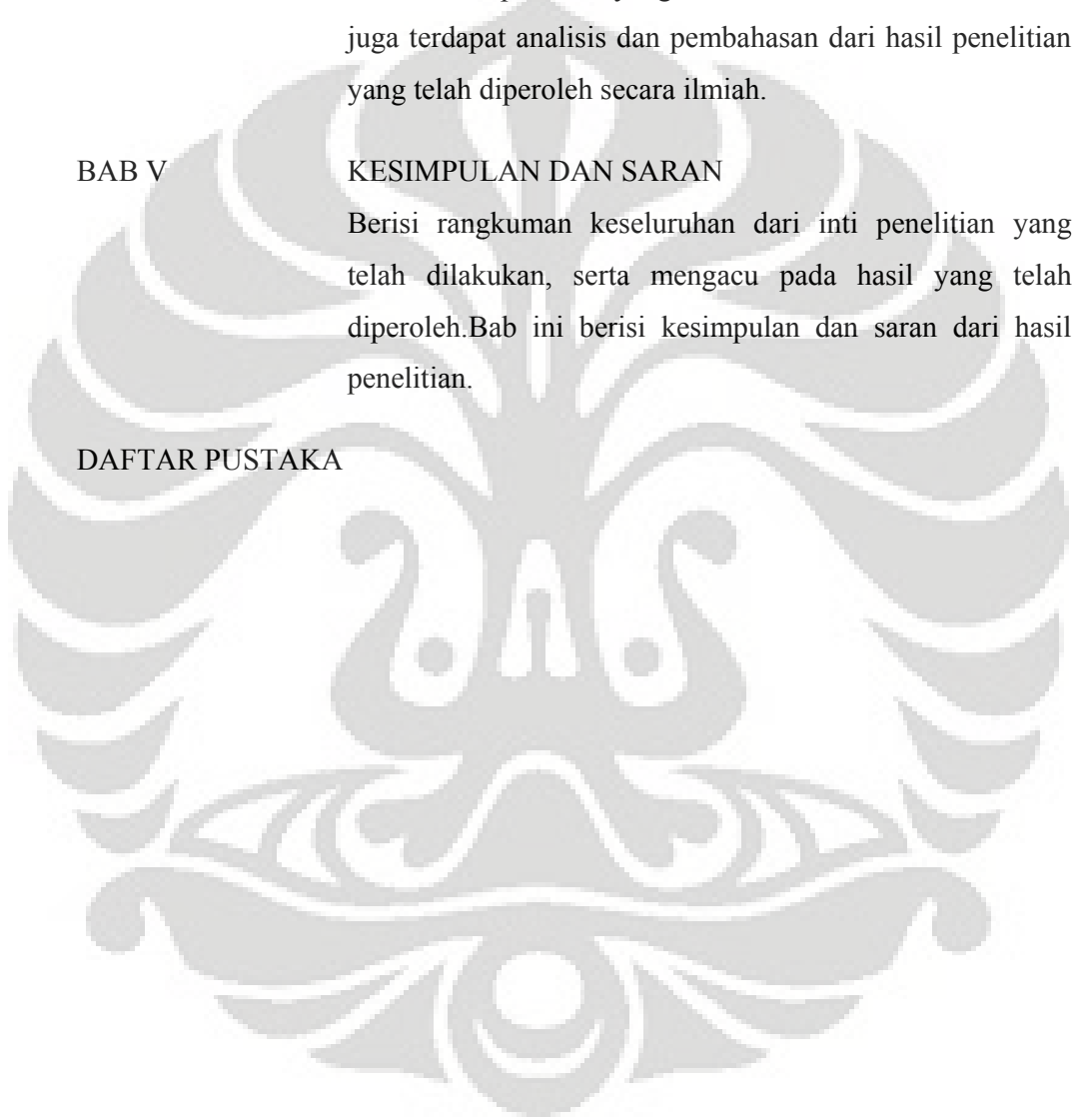
Berisi diagram alir penelitian, peralatan percobaan, bahan percobaan dan prosedur yang dilakukan dalam penelitian.

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 secara ilmiah.

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.

DAFTAR PUSTAKA

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hidrogen

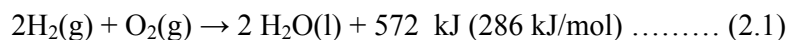
Hidrogen (bahasa Latin: *hydrogenium*, dari bahasa Yunani: *hydro*: air, *genes*: membentuk) adalah unsur kimia pada tabel periodik yang memiliki simbol H dan nomor atom 1. Pada suhu dan tekanan standar, hidrogen tidak berwarna, tidak berbau, bersifat non-logam, bervalensi tunggal, dan merupakan gas diatomik yang sangat mudah terbakar. Dengan massa atom 1,00794 amu, hidrogen adalah unsur teringan di dunia.

Matahari pada dasarnya adalah bola raksasa yang terbuat dari gas hidrogen dan helium. Pada inti matahari, atom-atom hidrogen berkombinasi untuk membentuk atom helium. Proses ini disebut reaksi fusi yang menghasilkan energi radian. Energi radian digunakan untuk mempertahankan kehidupan di bumi. Energi ini yang terdapat pada cahaya dan yang membuat tanaman dapat tumbuh. Energi ini yang membuat angin berhembus dan hujan turun. Energi ini tersimpan sebagai energi kimiawi pada bahan bakar fosil. Sebagian besar energi yang kita gunakan saat ini berasal dari energi radian matahari.

Gas hidrogen mempunyai massa yang lebih ringan daripada udara dan akibatnya, hidrogen akan berada pada lapisan atas dari atmosfer bumi. Hal inilah yang menyebabkan hidrogen tidak dapat ditemukan dalam kondisi bebas di bumi. Hidrogen yang terdapat di bumi terdapat dalam keadaan terkombinasi dengan atom-atom lain. Sebagai contoh hidrogen yang bereaksi dengan oksigen akan membentuk air. Hidrogen juga dapat ditemukan dalam komponen biomassa.

Hidrogen memiliki kandungan energi tertinggi dibandingkan dengan bahan bakar lain (sekitar 3 kali lebih besar daripada bensin) jika ditinjau dari sisi massa, akan tetapi memiliki kandungan energi terendah jika dilihat dari sisi volume (sekitar 4 kali lebih rendah daripada bensin).

Gas hidrogen sangat mudah terbakar dan akan terbakar pada konsentrasi serendah 4% H₂ di udara bebas. Entalpi pembakaran hidrogen adalah -286 kJ/mol. Hidrogen terbakar menurut persamaan kimia:



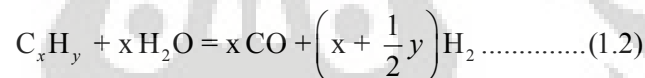
Ketika dicampur dengan oksigen dalam berbagai perbandingan, hidrogen meledak seketika disulut dengan api dan akan meledak sendiri pada temperatur 560 °C. Lidah api hasil pembakaran hidrogen-oksigen murni memancarkan gelombang ultraviolet dan hampir tidak terlihat dengan mata telanjang. Oleh karena itu, sangatlah sulit mendeteksi terjadinya kebocoran hidrogen secara visual.

2.2.1 Teknologi Produksi Hidrogen

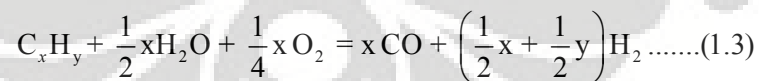
Teknologi untuk menghasilkan hidrogen maupun proses di industri yang dapat menghasilkan hidrogen :

1. Pemisahan Hidrogen dari Hidrokarbon

Teknologi *fuel processing* akan mengkonversi hidrogen yang terkandung dalam material seperti bahan bakar, ammonia, atau methanol menjadi *hydrogen rich stream*. *Fuel processing* dari metana adalah metode yang lazim digunakan saat ini untuk menghasilkan hidrogen secara komersial. Pada proses pengolahan hidrokarbon, terdapat reaksi – reaksi kimia yang akan menghasilkan hidrogen. Sebagai contoh, pada proses *Steam Reforming* terjadi reaksi



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



2. Elektrolisis

Elektrolisis adalah metode pemecahan molekul – molekul air menjadi atom – atom penyusunnya. Elektrolisis yang lazim digunakan saat ini adalah elektrolisis air yang memecah komponen air menjadi atom – atom penyusunnya (hidrogen dan oksigen) dengan menggunakan arus listrik

yang melewati 2 kutub elektroda. Pada elektrolisis komersil yang dilakukan pada suhu rendah memiliki efisiensi 56 – 73 % (pada kondisi operasi 70,1–53.4 kWh/kg H₂ pada 1 atm dan 25 °C). Elektrolisis ini yang menjadi inti dari konsep konversi energi dari energi listrik menjadi energi kimia dalam bentuk hidrogen, dengan oksigen berperan sebagai produk sampingan. Teknologi elektrolisis yang umum digunakan adalah elektrolisis berbasis alkali (menggunakan larutan alkali). Akan tetapi elektrolisis air yang digunakan sebagai metode untuk menghasilkan hidrogen sampai saat ini mempunyai kelemahan yang cukup signifikan yaitu rendahnya konversi yang dihasilkan dari proses elektrolisis dan kebutuhan arus listrik yang tinggi saat operasi elektrolisis sedang berlangsung.

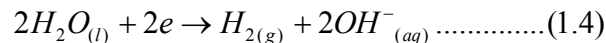
2.2 Elektrolisis Air Konvensional

Elektrolisis air adalah proses dekomposisi air (H₂O) menjadi oksigen (O₂) dan hidrogen (H₂) dengan menggunakan arus listrik yang mengalir melalui air. Proses elektrolisis ini jarang digunakan pada aplikasi industri karena hidrogen dapat diproduksi dengan lebih mudah melalui bahan bakar fosil. Pada elektrolisis, sebuah sumber listrik dihubungkan dengan dua elektroda atau 2 plat (umumnya terbuat dari platina atau karbon) yang diletakkan di dalam air. Setelah proses dijalankan, maka air akan terpisah dan hidrogen akan terkumpul di katoda (elektroda negatif, tempat di mana elektron dimasukkan ke dalam air), dan oksigen akan terkumpul pada anoda (elektroda positif). Gas hidrogen yang dihasilkan jumlahnya dua kali lipat dari gas oksigen yang dihasilkan, dan keduanya proporsional dengan total energi listrik yang dialirkan melalui air.

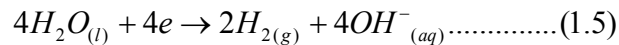
Elektrolisis dari air murni membutuhkan energi dalam jumlah yang cukup besar untuk mengatasi berbagai hambatan aktivasi (energi aktivasi) dari air. Tanpa kelebihan energi, elektrolisis dari air murni akan berlangsung lambat. Hal ini disebabkan oleh terbatasnya kemampuan air untuk terionisasi sendiri. Air murni memiliki konduktivitas listrik kira – kira sepersejuta dari air laut.

Persamaan reaksinya dengan kehadiran K₂CO₃ sebagai elektrolit adalah sebagai berikut (Michael Purba, 2007):

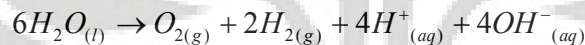
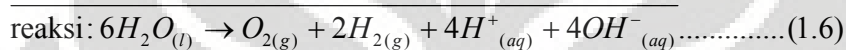
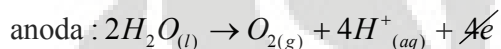
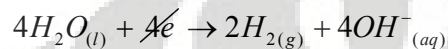
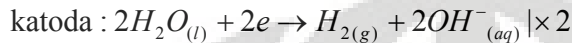
karena ada kation K^+ , maka yang tereduksi adalah air :



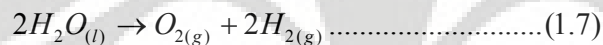
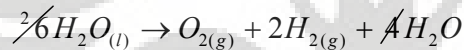
anoda: karena ada anion sisa asam oksida, CO_3^{2-} , maka yang teroksidasi adalah air:



Selanjutnya, disamakan jumlah elektronnya:



selanjutnya $4H^+_{(aq)}$ dan $4OH^-_{(aq)}$ bereaksi membentuk $4H_2O$



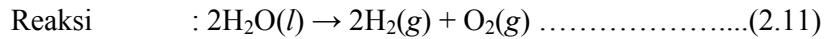
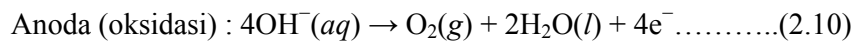
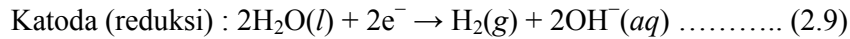
Reaksi di atas dilakukan pada kondisi ruang (suhu 25°C dan tekanan 1 atm) (Michael Purba, 2007)

Melalui proses elektrolisis, idealnya satu mol air dapat menghasilkan satu mol hidrogen dan $\frac{1}{2}$ mol oksigen pada 25°C dan 1 atm. Perubahan entalpi yang terjadi ialah 285,83 kJ sedangkan perubahan entropi ($T\Delta S$) yang terjadi ialah 48,7 kJ. Energi yang diperlukan (disediakan oleh energi listrik dari luar sistem) untuk mengelektrolisis air hanya energi bebas Gibbs saja sebab perubahan entropi dapat diperoleh dari lingkungan. Oleh karena itu, energi yang dibutuhkan menjadi:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \dots\dots\dots(2.8)$$

Sehingga energi listrik yang diperlukan untuk elektrolisis menjadi 231,7 kJ/mol H_2 produk. Oleh karena itu elektrolisis air untuk membentuk hidrogen memiliki beberapa kekurangan diantaranya adalah konsumsi energi listrik yang besar.

Reaksi setengah reaksi yang sama juga dapat disetarakan dengan basa seperti yang dituliskan di halaman berikutnya. Tidak semua reaksi setengah reaksi harus disetarakan dengan penambahan asam atau basa. Berikut reaksi elektrolisis ketika digunakan KOH sebagai elektrolitnya (Michael Purba, 2007):



Michael Faraday disamping mengembangkan metode elektrolisis, juga menerangkan hubungan kuantitatif antara jumlah arus listrik yang dilewatkan pada sel elektrolisis dengan jumlah zat yang dihasilkan pada elektroda. Berdasarkan hasil eksperimennya, Michael Faraday menemukan beberapa kaidah perhitungan elektrolisis, yang dikenal dengan hukum Faraday.

Hukum Faraday I

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

Hukum Faraday II

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

Arus listrik satu Faraday (1F) didefinisikan sebagai jumlah arus listrik yang terdiri dari 1 mol elektron. Untuk menghitung jumlah zat-zat yang terbentuk di katoda dan anoda, hukum faraday dirumuskan sebagai berikut :

$$W = e.F \dots\dots\dots (2.12)$$

W = massa hasil elektrolisis (gram)

e = massa ekuivalen hasil elektrolisis

F = jumlah arus listrik (Faraday),

$$F = \frac{Q}{\text{muatan 1 mol elektron}} = \frac{Q}{(1,6 \times 10^{-19}) \times (6.022 \times 10^{23})} = \frac{Q}{96.485} \dots\dots(2.13)$$

$Q = i.t$, maka didapat:

$$W = \frac{e.i.t}{96.485} \dots\dots\dots (2.14)$$

Atau untuk lebih mudah, sering digunakan

$$W = \frac{e.i.t}{96.500} \dots\dots\dots (2.15)$$

i = kuat arus (ampere)

t = waktu lamanya elektrolisis (detik)

Dan berdasarkan hukum Faraday II diperoleh persamaan :

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{e_1}{e_2} \dots\dots\dots(2.16)$$

m = massa zat (garam)

e = berat ekuivalen = $A_r/Valensi = M_r/Valensi$.

Perhitungan lebih mudah jika dilakukan dalam satuan mol, persamaan 2.15 bisa dimodifikasi menjadi:

$$n = \frac{i \cdot t}{96.500 \cdot valensi} \dots (2.17)$$

Sehingga bisa dihitung laju alir produksi hidrogen maupun oksigen dengan menggunakan persamaan 2.5 sebagai berikut:

Untuk hidrogen:

$$\frac{V}{22.400 \text{ cc}} = \frac{Q}{96.500 \text{ C} \cdot 2} \rightarrow \frac{V}{Q} = \frac{22.400 \text{ cc}}{193.000 \text{ C}} = 0,116 \text{ cc/C} \dots (2.18)$$

Untuk oksigen:

$$\frac{V}{22.400 \text{ cc}} = \frac{Q}{96.500 \text{ C} \cdot 4} \rightarrow \frac{V}{Q} = \frac{22.400 \text{ cc}}{386.000 \text{ C}} = 0,0581 \text{ cc/C} \dots (2.19)$$

Elektrolisis air tidak dapat mengkonversi 100 % energi listrik menjadi energi kimia pada hidrogen. Proses ini membutuhkan energi yang jauh lebih besar untuk mengaktivasi air agar dapat terionisasi. Jumlah energi yang diperlukan ini tidak sebanding dengan jumlah hidrogen yang dihasilkan. Dengan menggunakan metode elektrolisis konvensional hanya sekitar 4 % produksi hidrogen dari air murni. Produksi hidrogen dengan elektrolisis H_2O suhu tinggi (*High Temperature Electrolysis*) merupakan metode yang baru dan sedang dalam proses pengembangan. Metode ini dilakukan guna meningkatkan efisiensi elektrolisis H_2O . Ketika suhu elektrolisis H_2O sekitar 900°C , maka efisiensi total produksi hidrogen bisa mencapai 55%.

2.2 Definisi 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. Tingkat ionisasi plasma adalah proporsi dari atom-atom yang kehilangan atau mendapatkan elektron, dan biasanya dikendalikan oleh suhu. Teknologi plasma melibatkan pembentukan bunga api listrik dengan melewati arus listrik melalui suatu gas dalam proses yang disebut pemutusan listrik (*electrical breakdown*). Karena tahanan listrik sepanjang sistem, dihasilkan sejumlah panas dalam jumlah signifikan yang mengambil elektron dari molekul-molekul gas menghasilkan suatu aliran gas yang terionisasi, atau plasma (Gomez, et al, 2009).

2.3 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 elastis. 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 melampaui suhu partikel-partikel berat hingga beberapa derajat perpangkatan dan karenanya memungkinkan untuk mempertahankan suhu keluaran (*discharge*) pada suhu yang jauh lebih rendah, bahkan pada suhu ruang. Plasma jenis ini menghasilkan spesi-spesi aktif yang lebih beragam, dan atau lebih besar energinya dibandingkan dengan spesi yang biasa dihasilkan pada reaktor kimia. Plasma jenis ini dihasilkan dalam berbagai jenis seperti pancaran pijar (*glow discharge*), *corona discharge*, dan *dielectric barrier discharge* yang mempunyai densitas energi berkisar antara 10^{-4} hingga puluhan watt per cm^{-3} . (Roth, 2001). Pada plasma non-termal ini hanya elektron yang bersuhu tinggi ($>5000\text{K}$), sedangkan suhu *bulk* tidak naik secara signifikan (Yan ZC, et.al., 2006). Karena hanya elektron yang tereksitasi, sehingga energi dibutuhkan hanya beberapa ratus Watt daya listrik yang dibutuhkan (T. paulmier dan L. Fulcheri, 2005).

Tabel 2.1. Klasifikasi Plasma

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

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

Sumber: Huang, H., dan L. Tang. (2007).

Plasma non-thermal 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-thermal ini menghasilkan spesi-spesi radikal yang membuat mekanisme reaksi tidak seperti biasanya, yaitu pengaktifan reaksi dengan pemanasan.

2.4 Spesi Aktif Plasma Non-thermal

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).

Berbeda dengan elektrolisis konvensional, dalam elektrolisis plasma reaksi kimia yang terjadi merupakan reaksi antar spesi aktif berupa spesi-spesi radikal yang lebih reaktif dengan kehadiran elektron-elektron dari katoda, sehingga reaksi pun dapat berjalan lebih mudah dan cepat karena tercipta kondisi reaksi reduktif dan oksidatif (Holladay, et al. 2009). Sedangkan pada elektrolisis konvensional, mekanisme reaksinya adalah mengaktifkan reaksi dengan pemanasan, hal ini bisa dilihat dari hukum Faraday yang menggunakan arus sebagai dalam persamaannya. Seperti kita ketahui bahwa arus listrik adalah kontributor terbesar dalam peningkatan suhu, sehingga jalur transmisi PLN menggunakan arus listrik rendah dan tegangan tinggi. Prinsip dasar perbedaan elektrolisis plasma adalah penggunaan tegangan tinggi sehingga terbentuk loncatan elektron berenergi tinggi yang akan menumbuk elektron dalam molekul sehingga elektronnya terksitasi dan terbentuk radikal yang sangat reaktif.

Akan tetapi hasil produksi yang dihasilkan akan lebih bervariasi, sehingga selektivitasnya terhadap produk yang diinginkan harus dijaga. Meskipun demikian, produk hidrogen dengan elektrolisis plasma lebih banyak dibandingkan dengan elektrolisis konvensional.

Elektrolisis plasma dapat mengatasi batasan-batasan dari teknik konvensional seperti dalam biaya, keburukan katalis, ukuran dan berat yang

dibutuhkan, respon yang lamban, dan batasan pada produksi hidrogen dari hidrokarbon (R. B. Biniwale, 2004), bahkan teknologi reaktor plasma dapat digunakan pada temperatur ruangan (Liu C.J. et.al., 2003).

2.5 Jenis Plasma-Plasma Non-termal

Ada empat tipe plasma non-termal, yaitu: *gliding arc plasma*, *dielectricbarrierdischarge* (DBD), *microwave plasma*, dan *corona discharge*. Tiga plasma yang pertama dihasilkan dengan menggunakan listrik dinamis, sedangkan *coronadischarge* dihasilkan dengan menggunakan listrik statis. Perbedaan utama diantara plasma ini adalah bagaimana arus dan daya discas dikontrol dengan suplai energi, laju alir, dan desain (T. Paulmier, et al., 2005)

Reaktor *glidingarcplasma* memiliki elektrode yang memanjang, plasma dibentuk ketika gas memasuki reaktor dan diberi tegangan tinggi. Ketika gas mencapai ujung reaktor, plasma menghilang dan digantikan dengan plasma dari gas masuk reaktor yang baru. Reaktor ini bisa dioperasikan baik dengan arus AC maupun DC, serta memiliki suplai daya yang lebih sederhana dibandingkan dengan *coronadischarge* dan reaktor *microwave plasma* (T. Paulmier, et al., 2005).

Reaktor DBD memiliki bentuk anular. Gas melewati celah selebar 1 milimeter yang merupakan elektroda dengan tegangan tinggi yang membungkus material non-konduktif material seperti kwarsa, dengan sel terluar menjadi elektroda *ground* (katoda) (Yan ZC, et al. 2006)

Tidak seperti plasma *gliding arc* dan DBD, plasma *microwave* tidak menggunakan percikan listrik, tetapi menggunakan *microwave*. Teknik ini memproduksi elektron dengan temperatur 4000 hingga 6000 K, sedangkan partikel yang lebih berat memiliki temperatur sekitar 2000 K.

Teknik plasma corona serupa dengan *gliding arc* dalam pemasangan, tetapi berbeda dalam operasinya. Dalam *glidingarc*, plasma ditekan ke bawah reaktor, tetapi plasma corona dihasilkan diantara elektrode sepanjang reaktor (O. Mutaf-Yardimci, 1998). Plasma dihasilkan dengan menggunakan pulsa elektrik yang sangat cepat. Keuntungan dari proses ini adalah panjang dari pulsa elektrik lebih

pendek dari waktu diantara pulsa, hasilnya daya yang dikonsumsi menjadi lebih kecil dibandingkan dengan teknologi plasma yang lain.

Perbandingan kinerja berbagai teknologi plasma non-termal untuk menghasilkan hidrogen menunjukkan metode elektrolisis *glow discharge* memiliki keunggulan dibanding metode *dielectric barrier discharge* plasma atau pun *corona discharge* plasma dalam hal konsumsi energi, konsentrasi hidrogen dan emisi CO₂ seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2 berikut:

Tabel 2.2.Perbandingan kinerja teknologi non-plasma untuk produksi hidrogen

Teknologi plasma non-termal	Konsumsi Energi (kJ/L)	Konsentrasi H₂ (%)	Emisi CO₂/H₂ (L/L)	Referensi
<i>Glow discharge</i>	4,26	89	0,041	Zong, et al., 2009
<i>Dielectric barrier discharge</i>	14	63,4	0,45	Kabashima, et al., 2003
<i>Corona discharge</i>	9	54,9	0,33	Liu, et al., 2003

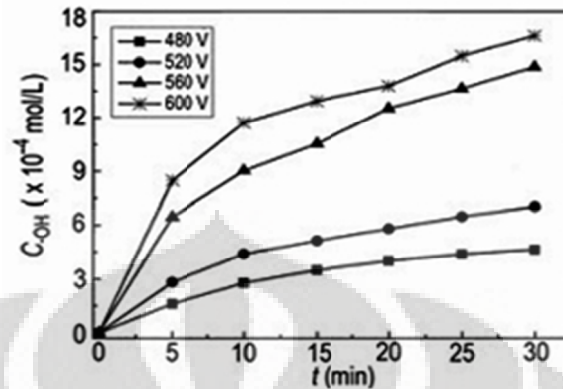
Karena tujuan kita adalah memproduksi hidrogen, maka teknologi plasma yang paling tepat digunakan adalah plasma *glowdischarge* atau plasma pancaran pijar. Elektrolisis dengan menggunakan plasma jenis ini dinamakan dengan *ContactGlowDischargeElectrolysis* (CGDE), elektrolisis plasma pancaran pijar.

2.6 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja CGDE

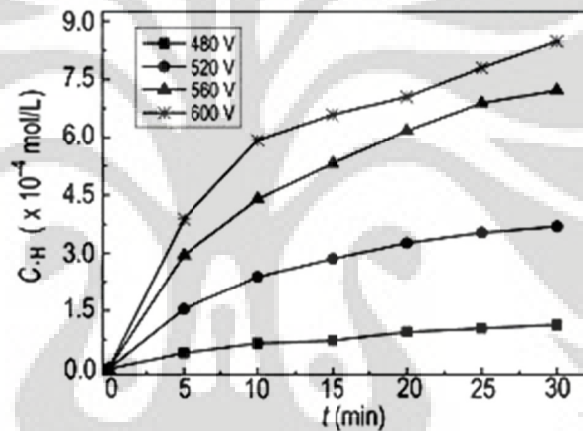
Dalam memproduksi hidrogen dari air dengan teknologi plasma, faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan radikal *OH dan *H yang sangat berperan dalam reaksi pembentukan hidrogen sangatlah penting, GAO Jinzang, et al., 2008 telah melakukan percobaan untuk mengetahui faktor-faktor tersebut. Hasil penelitiannya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

1. Efek tegangan listrik

Efek variasi tegangan listrik pada CGDE terhadap pembentukan radikal yang dihasilkan ditunjukkan oleh grafik Gambar 2.1 dan 2.1 berikut:



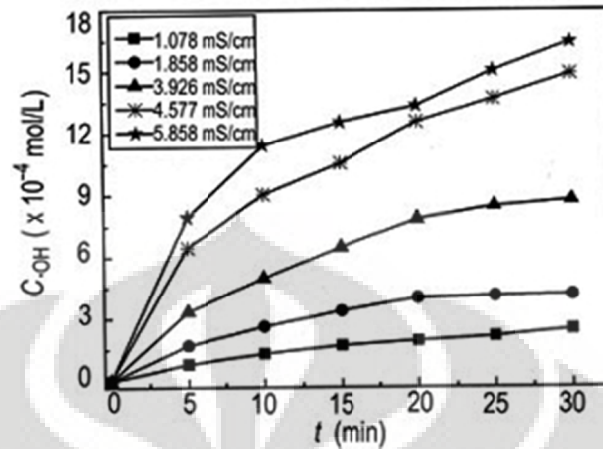
Gambar 2.1 Efek tegangan terhadap pembentukan radikal *OH pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *OH (GAO Jinzang, et al., 2008)



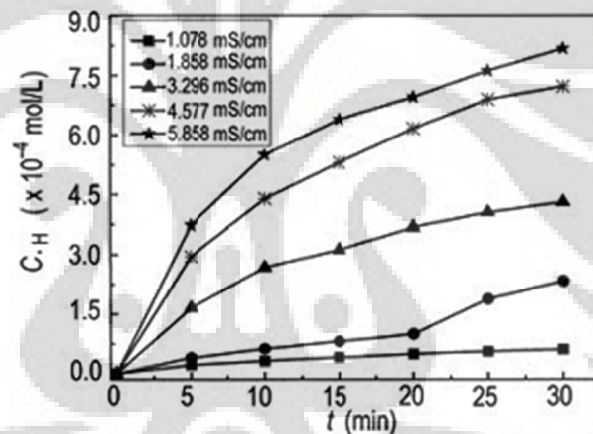
Gambar 2.2 Efek tegangan terhadap pembentukan radikal *H pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *H (GAO Jinzang, et al., 2008)

Pada grafik Gambar 2.1 dan 2.2, 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.

2. Efek konduktivitas larutan



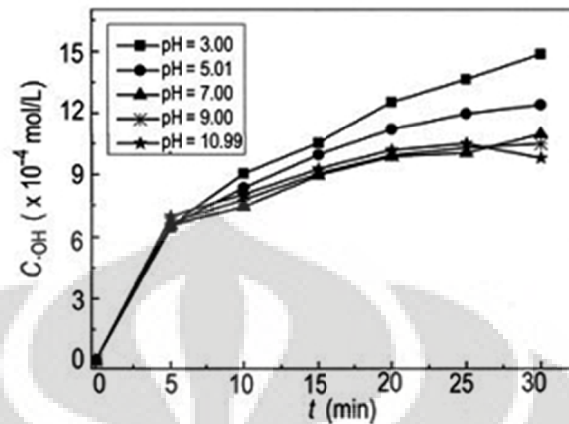
Gambar 2.3 Efek konduktivitas larutan terhadap pembentukan radikal *OH pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *OH (GAO Jinzang, et al., 2008)



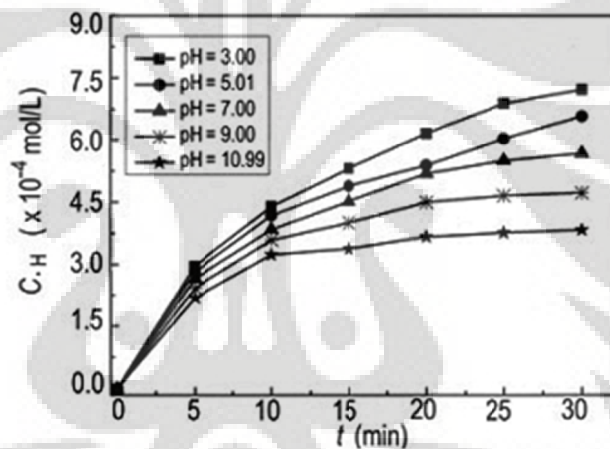
Gambar 2.4 Efek konduktivitas larutan terhadap pembentukan radikal *H pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *H (GAO Jinzang, et al., 2008)

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.

3. Efek pH larutan



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

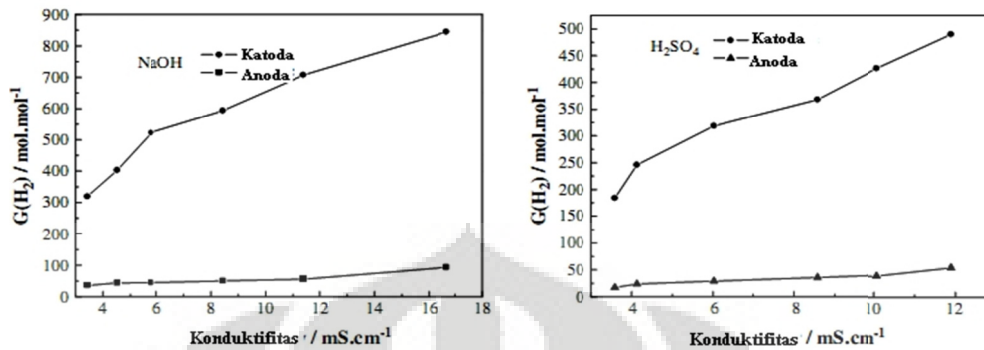


Gambar 2.6 Efek pH larutan terhadap pembentukan radikal *H pada grafik waktu terhadap konsentrasi radikal *H (GAO Jinzang, et al., 2008)

Pada kedua grafik Gambar 2.5 dan 2.6, bisa dilihat bahwa pembentukan radikal *OH maupun *H paling tinggi terjadi ketika pH larutan sekitar 3.

Yan ZC, et al. 2009, telah melakukan percobaan elektrolisis CGDE dengan larutan dielektrikum berupa metanol. Parameter-parameter yang mereka gunakan adalah $G(H_2)$ yaitu perbandingan mol hidrogen yang terbentuk dari elektrolisis plasma dengan mol hidrogen dari proses elektrolisis konvensional. Selain itu digunakan juga parameter energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan seberapa volum produk gas (W_r).

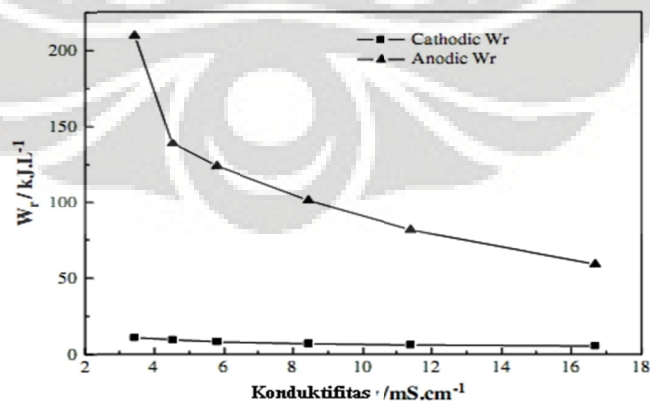
Berikut grafik hasil percobaanya:



Gambar 2.7 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%

Pada grafik Gambar 2.7, $G(H_2)$ semakin bertambah seiring dengan bertambahnya konduktivitas larutan. Produk H_2 di katoda selalu lebih besar dibandingkan produk di anoda, hal ini memang sudah biasa. Kenaikan $G(H_2)$ seiring dengan kenaikan konduktivitas larutan dikarenakan pembentukan radikal H yang semakin meningkat pula dengan kenaikan konduktivitas larutan (seperti pembahasan sebelumnya). Akan tetapi ternyata pada konduktivitas yang sama larutan elektrolit NaOH lebih berkontribusi menghasilkan produk H_2 yang diinginkan dibanding dengan H_2SO_4 , sehingga bisa disimpulkan bahwa NaOH lebih cocok untuk digunakan dalam proses elektrolisis ini.

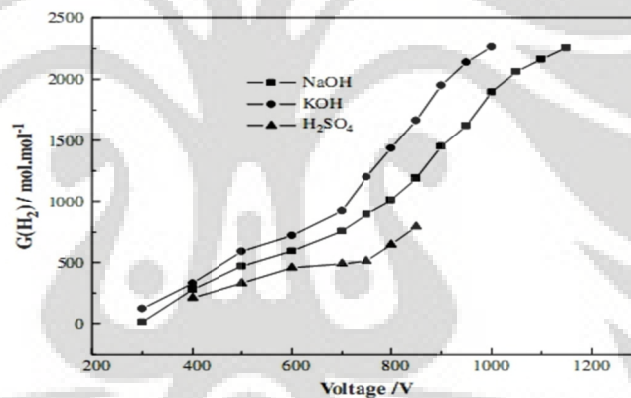
Pengaruh konduktifitas ternyata juga mempengaruhi konsumsi energi yang dibutuhkan untuk berjalannya reaksi, grafik yang didapat sebagai berikut:



Gambar 2.8 Efek konduktifitas terhadap W_r (konsumsi energi) pada larutan NaOH dan metanol,. $T = 337,15$ K, kemurnian 99,5%

Pada grafik Gambar 2.8, bisa disimpulkan bahwa semakin tinggi konduktivitas larutan yang dipakai, konsumsi energi yang digunakan juga semakin kecil karena nilai W_r berbanding terbalik dengan jumlah H_2 yang dihasilkan, sementara semakin tinggi konduktivitas larutan produksi H_2 juga semakin bertambah. Sehingga proses elektrolisis nantinya sebaiknya dilakukan pada larutan yang berkonduktivitas tinggi pula. Karena tidak ada 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.

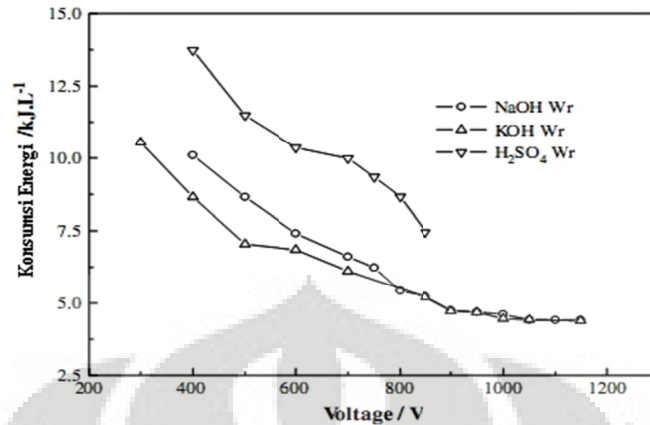
Selain konduktivitas, besarnya tegangan yang diberikan diantara elektroda juga memberikan efek terhadap $G(H_2)$. Berikut grafik yang diperoleh Yan ZC, et al. 2009 tentang hal ini:



Gambar 2.9 Efek tegangan terhadap $G(H_2)$ dalam media dielektrikum yang berbeda. Konduktivitas = $11,55 \text{ mS cm}^{-1}$, $T=337,15 \text{ K}$, kemurnian metanol 99,5%

Grafik Gambar 2.9 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 lah yang memberikan kontribusi terbaik pada semua tegangan listrik yang diberikan.

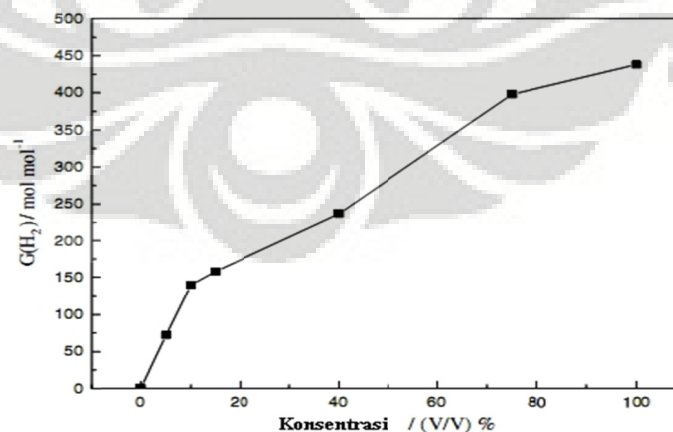
Besarnya tegangan yang di pakai juga mempengaruhi konsumsi energi pada reaksi:



Gambar 2.10 Efek tegangan terhadap konsumsi energi dalam media dielektrikum yang berbeda. Konduktifitas = $11,55 \text{ mS cm}^{-1}$, $T=337,15 \text{ K}$, kemurnian metanol 99,5%

Grafik Gambar 2.10 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.

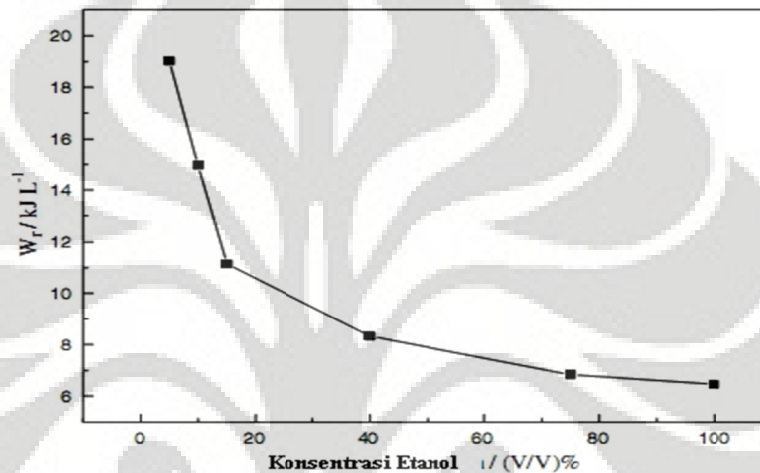
Pada jurnal yang lain, Yan ZC, et al. 2008, juga melakukan CGDE pada larutan etanol, hasil yang didapatkan tidak jauh berbeda. Variasi yang digunakan adalah konsentrasi etanol terhadap yield H_2 yang diperoleh, berikut grafiknya:



Gambar 2.11 Efek konsentrasi etanol terhadap $G(\text{H}_2)$. $T=303,15 \text{ K}$, konduktifitas = $5,6 \text{ mS cm}^{-1}$, $V = 1000\text{V}$

Grafik Gambar 2.11 menunjukkan bahwa $G(H_2)$ semakin tinggi jika konsentrasi etanol yang digunakan semakin besar. Hal ini karena pembentukan radikal $\cdot OH$ dari etanol akan semakin besar jika konsentrasinya juga besar, radikal $\cdot OH$ ini lah yang nantinya akan mengakibatkan pembentukan radikal-radikal lain termasuk juga radikal $\cdot H$ yang akan membentuk H_2 pada akhirnya.

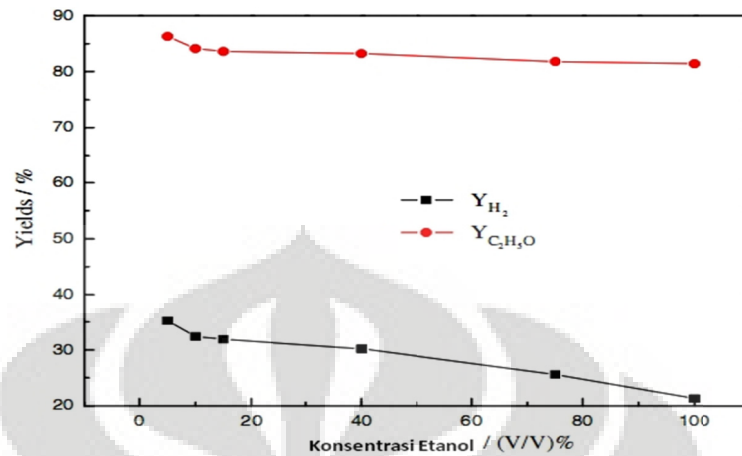
Serta pengaruhnya terhadap konsumsi energi:



Gambar 2.12 Efek konsentrasi etanol terhadap konsumsi energi. $T=303,15\text{ K}$, konduktifitas = $5,6\text{ mS cm}^{-1}$, $V = 1000\text{ V}$

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 konsentrasi etanol yang tinggi dibanding yang berkonsentrasi rendah.

Berikut hasil dari percobaan Zhong Cheng Yan, et al. 2008:



Gambar 2.13 Komposisi produk elektrolisis plasma etanol, $T = 303,15$ K, $V = 1000$ V, konduktivitas = $5,6 \text{ mS.cm}^{-1}$

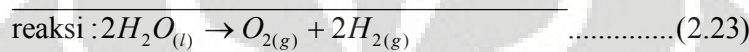
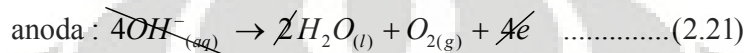
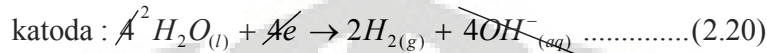
Data grafik Gambar 2.13 menunjukkan yield H_2 yang semakin menurun seiring dengan semakin bertambahnya konsentrasi etanol. Hal ini dikarenakan selektivitas pembentukan H_2 terganggu dengan pembentukan senyawa-senyawa lain karena dalam proses elektrolisis plasma tersebut juga terbentuk berbagai macam radikal seperti radikal CH_3^* yang akan membentuk senyawa-senyawa karbon rantai panjang.

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 (penjelasan sebelumnya sudah sangat jelas).

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.

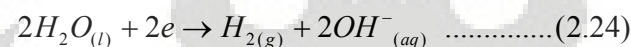
Reaksi yang mungkin terjadi ketika digunakan KOH adalah sebagai berikut (Michael Purba, 2007):



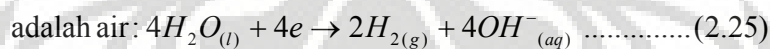
Karena mekanisme yang diharapkan pada elektrolisis plasma adalah keberadaan radikal-radikal yang sangat reaktif untuk kemudian membentuk hidrogen dengan laju yang cepat. Pada reaksi 2.23 tidak terbentuk ion H^+ dengan orbital kosong yang dapat dimasuki electron untuk membentuk radikal serta ion OH^- , maka dapat diambil hipotesis bahwasanya K_2CO_3 akan memberikan reaksi yang diminta ini. Berikut reaksi yang mungkin terjadi ketika K_2CO_3 yang dijadikan sebagai elektrolitnya (Michael Purba, 2007):

katoda :

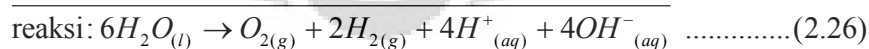
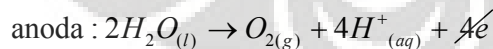
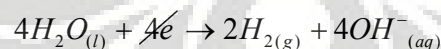
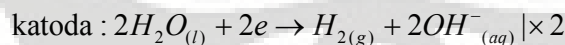
karena ada kation K^+ , maka yang terduksi adalah air :



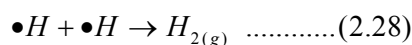
anoda: karena ada anion sisa asam oksida, CO_3^{2-} , maka yang teroksidasi



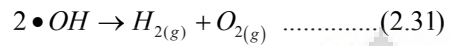
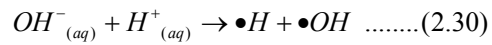
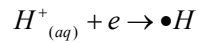
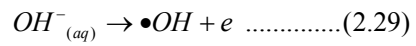
Selanjutnya:



Kation H^+ selanjutnya akan diubah menjadi radikal dan radikal $\bullet H$ sangat reaktif untuk kemudian membentuk hidrogen melalui skema reaksi berikut:



Sedangkan OH^- akan beraksi dengan H^+ karena pertukaran elektron membentuk radikal $\bullet\text{OH}$ yang juga sangat reaktif sebagai berikut:



Dengan adanya reaksi radikal diharapkan pembentukan hidrogen juga akan menjadi lebih cepat dan konsumsi energi yang digunakan juga akan menjadi kecil.



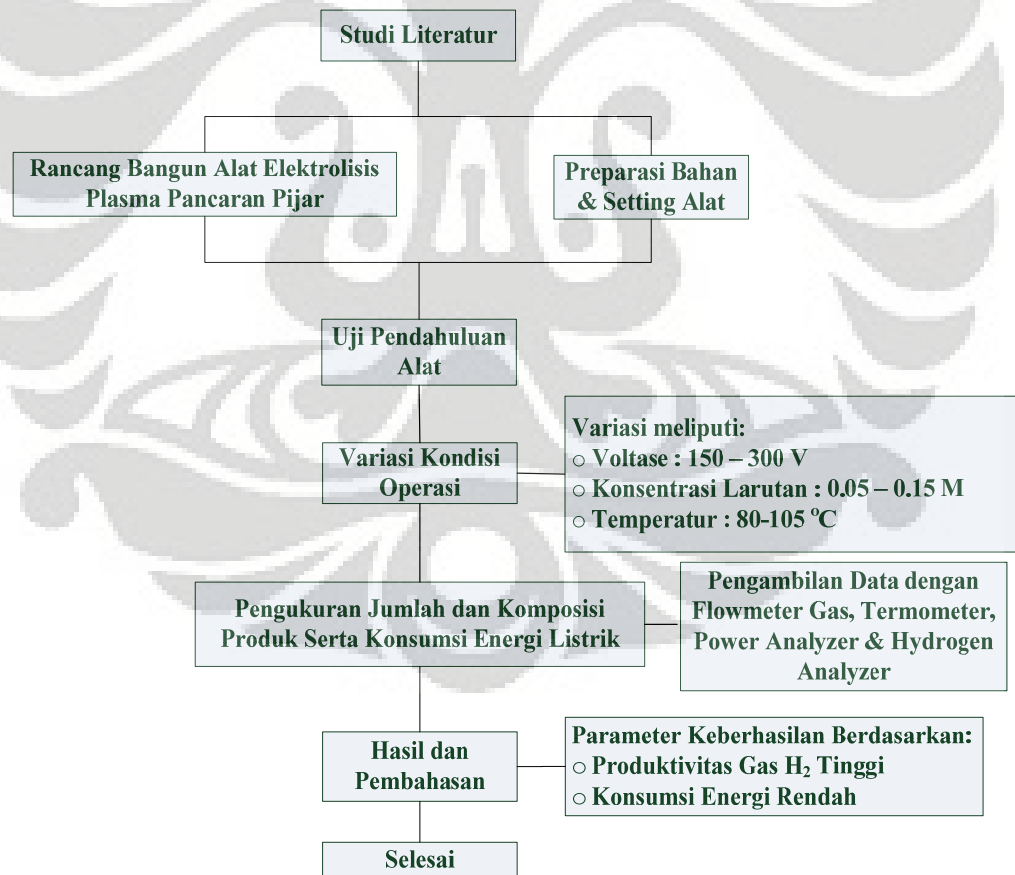
BAB III

METODE PENELITIAN

Sesuai dengan tujuan dari penelitian ini, maka rancangan penelitian dibuat untuk mengetahui pengaruh beberapa variabel proses yang bisa mempengaruhi produktivitas hidrogen dari air dengan menggunakan elektrolit K_2CO_3 pada reaktor elektrolisis plasma pancaran pijar. Penelitian ini dilakukan di laboratorium Teknik Intensifikasi Proses Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut diagram alir penelitian yang akan dilakukan:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- ✓ Garam K_2CO_3
- ✓ Aquadest

Peralatan umum yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- | | |
|--|--|
| ✓ Gelas piala 1000 mL | ✓ Selang |
| ✓ Labu ukur 1000 mL | ✓ Kondenser |
| ✓ Neraca analitik | ✓ <i>Konduktometer</i> untuk mengukur besarnya konduktivitas larutan |
| ✓ Spatula | ✓ <i>Flowmeter</i> gas gelembung sabun |
| ✓ Labu semprot | ✓ <i>Hydrogen analyzer</i> |
| ✓ <i>Syringe</i> | ✓ <i>Power analyzer</i> |
| ✓ Termometer alkohol | ✓ Lap kanebo |
| ✓ Reaktor dari housing filter | ✓ <i>Slideregulator</i> pengatur tegangan input |
| ✓ Katoda dari batang wolfram dan anoda dari jala stainless steel | ✓ Diode |
| ✓ Tabung kaca atau akrilik diameter 6 cm sebagai pembatas ruang katoda dan anoda | ✓ Pompa |

3.3 Rancang Bangun Sistem Produksi Hidrogen

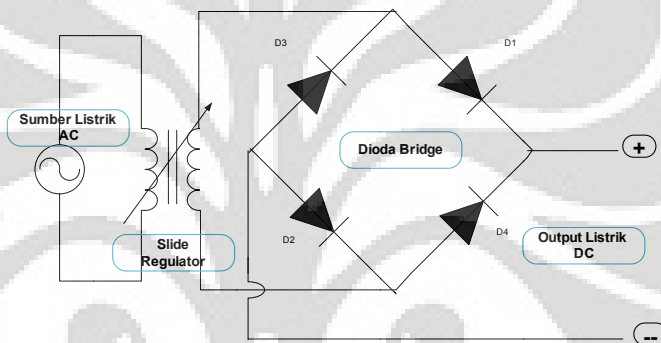
Rancang bangun peralatan sistem produksi hidrogen meliputi rangkaian pembangkit tegangan tinggi, reaktor elektrolisis plasma, sistem pengendali suhu reaktor, sistem pemisahan uap air dari hidrogen yang akan dianalisa, serta peralatan pengukuran produk hidrogen dan kelistrikan.

3.3.1 Rangkaian Pembangkit Tegangan Tinggi

Elektrolisis adalah cabang dari elektrokimia dimana listrik yang digunakan adalah listrik dengan arus searah atau DC (*Direct Current*). Perbedaan antara elektrolisis konvensional dengan elektrolisis plasma adalah terutama pada tegangan yang digunakan. Elektrolisis plasma menggunakan tegangan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan elektrolisis konvensional yaitu umumnya berkisar antara tegangan 150 V sampai dengan 1000 V.

Karena sumber listrik yang digunakan adalah listrik rumahan biasa dengan tegangan ~ 220 V AC, maka diperlukan rangkaian penyearah arus (*rectifier*) untuk mengubahnya menjadi listrik arus DC.

Sebelum listrik AC diubah menjadi arus DC, tegangan masukan *rectifier* bisa divariasikan dengan alat yang dinamakan dengan *slide regulator*. *Slideregulator* ini merupakan jenis *variable* trafo, yaitu bisa divariasikan tegangan keluaran, dan ini yang nantinya digunakan untuk mendapatkan variasi tegangan pada operasi elektrolisis plasma. Rangkaian sistem pembangkit tegangan tinggi bisa dilihat pada Gambar 3.2 berikut:



Gambar 3.2 Rangkaian Pembangkit Tegangan Tinggi Elektrolisis Plasma

Slideregulator yang digunakan memiliki daya maksimum hingga 3 kVA dengan tegangan maksimum sebesar 250 V. Sedangkan untuk menaikkan tegangan sampai 300 V, dibutuhkan trafo *step up* dengan spesifikasi 1 kVa, dan trafo ini diletakkan diantara *slide regulator* dan dioda *bridge* sehingga tegangan masukan trafo bisa diubah-ubah dengan menggunakan *slide regulator* yang ada di belakangnya.



Gambar 3.3 Slide Regulator



Gambar 3.4 Trafo Tegangan Tinggi



Dioda yang digunakan adalah dioda tegangan tinggi dengan spesifikasi tegangan maksimum 1000V dan arus 24A. rangkaian dioda sudah ada yang dijual dalam bentuk *bridge*, dan ini yang digunakan dalam penelitian ini:



Gambar 3.5 Dioda Bridge Tegangan Tinggi

Jadi tidak perlu digunakan plasmatron yang bisa menghasilkan tegangan sampai 15 kV, karena plasma yang diharapkan di sini adalah plasma di dalam larutan elektrolit, sehingga tidak diperlukan tegangan yang terlalu tinggi.

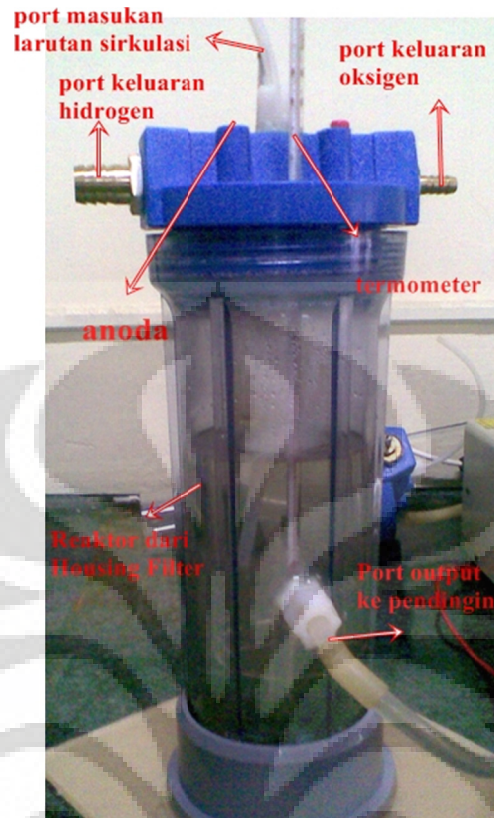
3.3.2 Peralatan Reaktor Elektrolisis Plasma

Komponen reaktor plasma elektrolisis terdiri dari komponen-komponen berikut:

a. Reaktor

Reaktor terbuat dari housing filter berbahan plastik tebal tahan suhu melebihi suhu operasi elektrolisis plasma ini. Selain itu, kelebihan dari housing filter ini adalah tahan terhadap tekanan yang tinggi sehingga memenuhi aspek keamanan dalam penelitian.

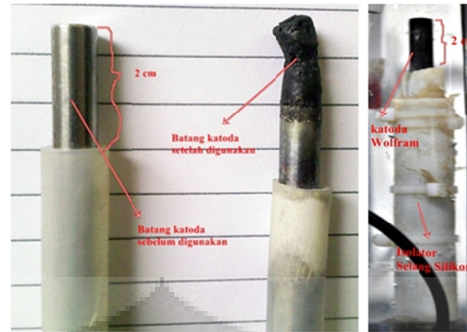
Reaktor memiliki diameter 8,5 – 9,5 cm dan tinggi 25 cm dengan kapasitas tabung sekitar 1,5 L yang nantinya hanya terpakai 1 L untuk larutan elektrolit yang dimasukkan ke dalam reaktor. Tutup reaktor memiliki dua port keluaran, yaitu keluaran hidrogen dari ruang katoda dan keluaran oksigen dari ruang anoda. Selain itu terdapat pula lubang untuk menempatkan anoda dan juga termometer alkohol dan juga lubang port masukan untuk larutan yang disirkulasi dalam sistem pendingin atau pengontrol suhu di dalam reaktor. Housing. Penampakan reaktor beserta keterangannya terdapat pada Gambar 3.6:



Gambar 3.6 Reaktor Elektrolisis Plasma

Reaktor dilengkapi dengan termometer untuk mengetahui temperatur di dalam reaktor, anoda dari atas, katoda dari bawah, *output* oksigen dari ruang anoda, *output* hidrogen dari ruang katoda, dan *port* untuk mensirkulasikan agar temperaturnya seragam dan untuk mengatur temperatur pada suatu rentang suhu tertentu ketika hendak mengambil data.

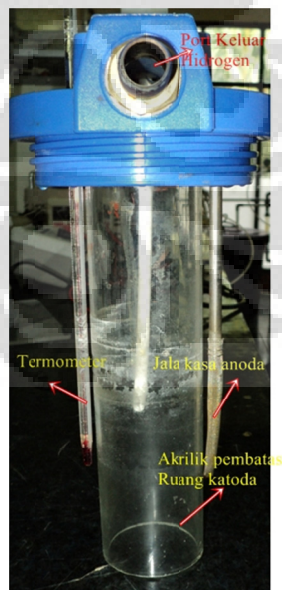
Elektroda yang digunakan pada reaktor elektrolisis plasma juga berbeda dengan elektroda pada elektrolisis konvensional, terutama pada bagian katoda. Katoda yang digunakan sebelumnya adalah berbahan stainless steel. Akan tetapi pada percobaan pendahuluan, bahan ini tidak memadai untuk percobaan lebih lanjut, berikut gambar perbandingan katoda sebelum dan setelah dilakukan uji pendahuluan:



Gambar 3.7 (a) Katoda Stainless Steel (b) Katoda Wolfram

Bisa dilihat bahwasanya katoda menjadi gosong karena tidak tahan terhadap suhu plasma yang tinggi dan suhu larutan yang tidak terlalu tinggi. Perbedaan yang ekstrem ini mengakibatkan stainless steel tersebut seperti ter-*quenching* sehingga mengalami *embrittlement*. Oleh karena itu, digunakan elektroda berbahan wolfram, dan bahan ini sangat kuat terhadap plasma di dalam larutan karena wolfram adalah material yang digunakan sebagai bahan pijar pada bohlam yang suhunya bisa mencapai 3000 °C.

Untuk memisahkan produk hidrogen dan oksigen hasil elektrolisis plasma, dipisahkan antara ruang katoda dan ruang anoda menggunakan tabung kaca atau tabung akrilik dengan diameter 6 cm dan tinggi 20 cm yang dilekatkan pada penutup reaktor. Gambar 3.8 menunjukkan konfigurasi ruang pemisah antara katoda dengan anoda.



Gambar 3.8 Konfigurasi Ruang Pemisah Katoda dan Anoda

Selanjutnya hidrogen akan keluar melalui *port* dengan ukuran yang besar, yaitu $\frac{3}{4}$ " sedangkan oksigen melalui port yang lebih kecil di seberangnya.

3.3.3 Sistem Pengendali Temperatur

Suhu di dalam reaktor sangat cepat mengalami kenaikan, sehingga sangat sulit untuk mendapatkan data yang diinginkan pada suatu rentang temperatur tertentu. Oleh karenanya diperlukan sistem pengendali temperatur reaktor selain untuk menjaga temperatur di dalam reaktor menjadi seragam antara larutan yang dekat dengan plasma yang bersuhu tinggi dengan larutan yang berada di luar area plasma.



Gambar 3.9 Pompa Peristaltik untuk Sirkulasi Larutan

Sistem pengendali temperatur dengan cara mensirkulasikan larutan dengan menggunakan pompa agar larutan mengalir ke dalam bejana dengan air dingin karena ditambahkan es. Pompa yang digunakan adalah pompa peristaltik karena pompa ini memungkinkan kita mengatur laju alir sirkulasi dan juga memungkinkan untuk benar-benar tidak ada kontak antara larutan dengan lingkungan luar.

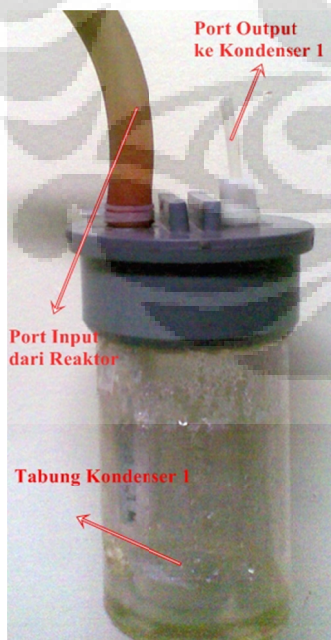
Agar proses transfer panas menjadi efektif, digunakan koil tembaga yang memiliki koefisien perpindahan panas yang besar. Gambar 3.10 menunjukkan bentuk koil tembaga yang digunakan pada sistem pengendali temperatur ini. Setelah digunakan selama percobaan, koil menjadi terkorosi dengan munculnya bercak-bercak dan deposit berwarna biru dan hijau. Oleh karenanya sebaiknya digunakan koil stainless steel 316 jika akan digunakan untuk penelitian yang baru.



Gambar 3.10 Koil Tembaga

3.3.4 Sistem Pemisahan Uap Air Dari Hidrogen

Jumlah uap air yang terbentuk cukup tinggi pada proses elektrolisis plasma, terutama pada suhu diatas $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hal ini akan berpengaruh terhadap perhitungan volumetrik produk H_2 . Selain itu kandungan uap air pada aliran produk dapat merusak alat *hydrogen analyzer*. Untuk itu proses pemisahan uap air dilakukan tiga tahap yaitu pada 2 kondenser dan 1 absorber. *Absorber* yang digunakan adalah silica gel.



Gambar 3.11 Kondenser 1



Gambar 3.12 Kondenser 2

Kondenser 1 merupakan tabung akrilik dengan diameter 8 cm dan tinggi 20 cm. Ukurannya cukup besar untuk mem-*flash* uap dengan perubahan volum mendadak sehingga diharapkan uap akan terkondensasi. Agar proses kondensasi berjalan lebih cepat, kondenser 1 dimasukkan ke dalam air dengan ditambahkan es sehingga temperaturnya menjadi dibawah 20 °C. Begitu juga kondenser 2.



Gambar 3.13 *Absorber Silika Gel*

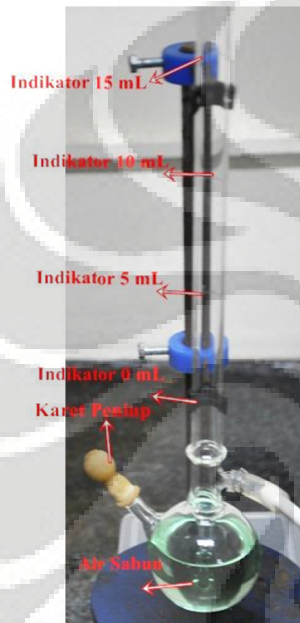
Agar uap air benar-benar tidak terikat dengan gas hidrogen, ditambahkan *absorber* silika gel yang sangat higroskopis, mengingat spesifikasi *hydrogen analyzer* yang mensyaratkan tidak ada kandungan air yang sangat rendah.

3.3.5 Sistem Pengukuran Produk Hidrogen dan Komponen Kelistrikan

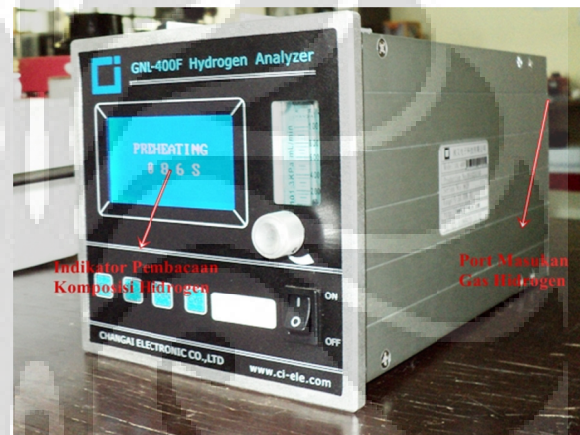
Setelah hidrogen dihasilkan dari sistem produksi hidrogen dengan reaktor elektrolisis plasma yang dilengkapi dengan sistem pengendali suhu, dan telah benar-benar bersih dari kontaminan uap air dengan sistem pemisahan uap air menggunakan 2 kondenser dan 1 *absorber*, maka selanjutnya adalah mengukur berapa hidrogen yang dihasilkan dari percobaan.

Pengukuran produk hidrogenakan sangat sulit jika dilakukan dengan menjebak hidrogen ke dalam wadah untuk selanjutnya diukur volum yang dihasilkan per satuan waktu yang ditetapkan karena munculnya permasalahan tekanan yang dihasilkan ketika hidrogen disimpan dalam wadah tersebut. Oleh

karenanya pengukuran jumlah hidrogen yang dihasilkan dengan mengukur laju alir gas yang dihasilkan dengan *flowmeter* gas dan juga mengukur kemurnian hidrogen dengan menggunakan *hidrogen analyzer*. Jumlah hidrogen murni adalah hasil perkalian antara laju alir gas dikali dengan komposisi kemurnian hidrogen. Gambar 3.14 dan 3.15 di bawah ini menunjukkan *flowmeter* gas gelembung sabun dan *hidrogen analyzer* secara berturut-turut:



Gambar 3.14 *flowmeter* gas



Gambar 3.15 *Hydrogen Analyzer*

Cara menggunakan *flowmeter* gas gelembung air sabun adalah dengan menekan karet peniup sehingga permukaan lubang masukan terbasahi, dan jika ada aliran gas akan mengakibatkan terbentuknya gelembung yang akan naik ke atas tabung. Selanjutnya waktu diukur ketika gelembung mencapai indikator 0 mL sampai indikator yang diinginkan. Jika laju alir sangat lambat, dianjurkan untuk menggunakan indikator 5 mL, akan tetapi jika laju alir sangat cepat, dianjurkan menggunakan indikator 15 mL. Akhirnya laju alir didapat dengan membagi nilai titik indikator (volum dalam mL) dengan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai indikator volum tersebut dan didapatkan laju alir gas dalam mL/s.

Sedangkan cara untuk mengetahui komposisi kemurnian hidrogen (dalam persen volum) dilakukan dengan *hydrogen analyzer*. Caranya dengan memasukkan gas yang akan dianalisis dengan menggunakan *syringe* berupa alat

suntik ke *port* masukan di belakang badan *hidrogen analyzer*. Selanjutnya persen hidrogen akan langsung ter-*display* dalam layar depan *hydrogen analyzer*.



Gambar 3.16 *Syringe*

Untuk *preheating* alat ini, membutuhkan waktu 6 menit, sehingga menjadi pertimbangan untuk prosedur langkah percobaan, yaitu ini merupakan alat yang dinyalakan untuk pertama kali dibanding alat yang lainnya.

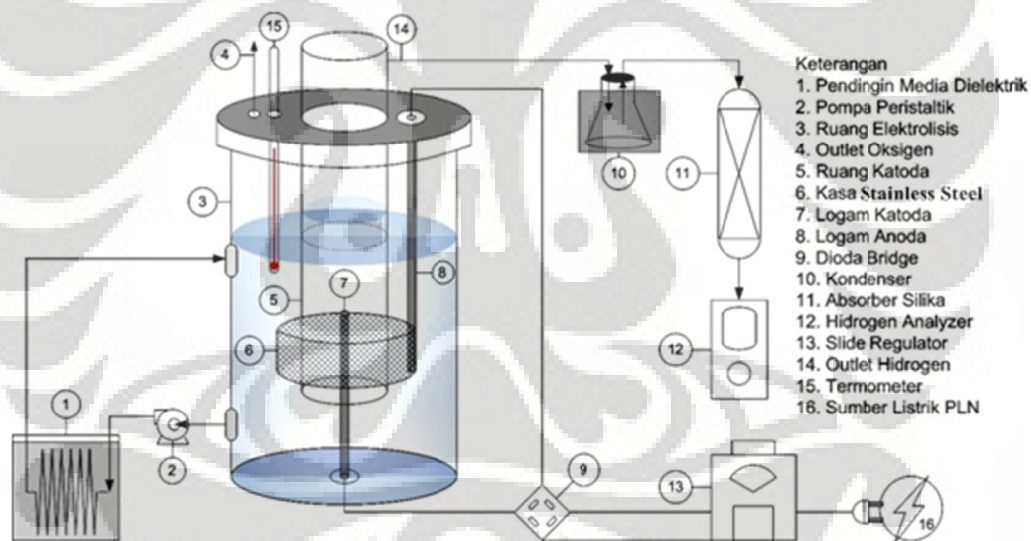
Alat untuk pengukuran komponen kelistrikan digunakan 1 alat, yaitu *power analyzer*. Alat ini dapat digunakan untuk mengukur voltase, kuat arus, dan energi yang digunakan selama waktu tertentu sekaligus sehingga sangat efisien.



Gambar 3.17 *Power Analyzer*

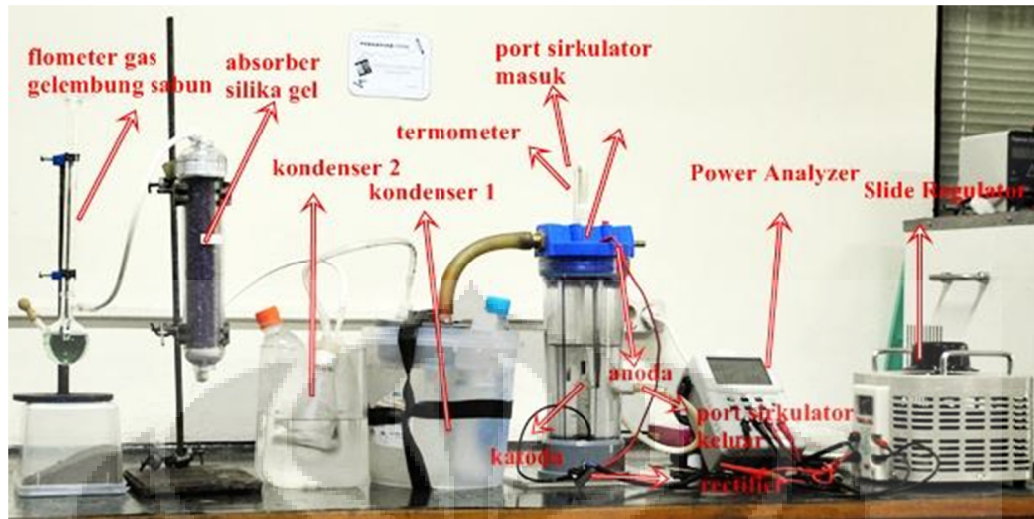
Power analyzer diletakkan antara *slide regulator* dengan rangkaian *dioda bridge*, atau untuk tegangan tinggi diletakkan antara trafo step up dengan rangkaian *dioda bridge*. Hal ini dilakukan karena *power analyzer* hanya dapat digunakan untuk mengukur listrik bolak-balik (AC) sehingga diletakkan sebelum arus listrik berubah menjadi arus searah (DC) yaitu sebelum rangkaian *dioda bridge*. Tegangan yang diukur dalam satuan Volt, kuat arus dalam A, daya dalam Watt, dan energi yang dibutuhkan untuk menjalankan proses selama waktu tertentu dalam Whr (Watt-Hour).

Terakhir adalah konfigurasi dari alat-alat dan sistem yang telah disebutkan, yaitu rangkaian pembangkit tegangan tinggi, reaktor elektrolisis plasma, sistem pengendali suhu reaktor, sistem pemisahan uap air dari hidrogen yang akan dianalisa, serta serta peralatan pengukuran produk hidrogen dan kelistrikan ditunjukkan dalam diagram Gambar 3.18 berikut:



Gambar 3.18 Konfigurasi Alat Elektrolisis Plasma Penghasil Hidrogen

Penampakan kondigurasi alat sebenarnya di laboratorium TIP Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia ditunjukkan Gambar 3.19 di bawah berikut ini:



Gambar 3.19 Keseluruhan Peralatan Dan Pengukuran Sistem Produksi Hidrogen

3.4 Preparasi Bahan

Larutan elektrolit K_2CO_3 :

- Membuat larutan K_2CO_3 0,05 M dengan melarutkan 6,94 gram K_2CO_3 padatan kemudian dilarutkan dalam labu takar 1000 mL dengan aquadest.
- Membuat larutan K_2CO_3 0,1 M dengan melarutkan 13,87 gram K_2CO_3 padatan kemudian dilarutkan dalam labu takar 1000 mL dengan aquadest.
- Membuat larutan K_2CO_3 0,1 M dengan melarutkan 20,8 gram K_2CO_3 padatan kemudian dilarutkan dalam labu takar 1000 mL dengan aquadest.
- Konduktivitas larutan diukur dengan menggunakan *konduktometer* yang sudah dikalibrasi sebelumnya.

3.5 Uji Pendahuluan Peralatan Sistem Produksi Hidrogen

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

Uji pendahuluan dilakukan pada larutan K_2CO_3 dengan konsentrasi 0,05 M, 0,1 M, dan 0,15 M pada tegangan 150, 200, dan 300 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, K_2CO_3 , tidak bereaksi dengan larutan uji yang dipakai.

3.6 Prosedur Penelitian

1. *Hydrogen analyzer* GNL-400F dinyalakan (proses *preheating* selama 6 menit atau 360 s).
2. Larutan K_2CO_3 0,05 M diukur konduktivitasnya.
3. Larutan K_2CO_3 0,05 M sebanyak 1000 mL dimasukkan dalam reaktor. Temperatur larutan diukur dengan termometer.
4. *Slideregulator* tegangan dinyalakan, diputar sampai tegangan 150 volt AC terbaca di *power analyzer*.
5. Aliran pendingin dinyalakan.
6. Setelah muncul plasma dan suhu mencapai 80-85°C, laju alir H_2 diukur dengan *flowmeter* gelembung sabun dengan *stopwatch*. Selanjutnya persen H_2 diukur dengan *hydrogen analyzer*.
7. Suhu mencapai 85-90 °C, laju alir H_2 diukur dengan *flowmeter* gelembung sabun dengan *stopwatch*. Selanjutnya persen H_2 diukur dengan *hydrogen analyzer*.
8. Suhu mencapai 90-95 °C, laju alir H_2 diukur dengan *flowmeter* gelembung sabun dengan *stopwatch*. Selanjutnya persen H_2 diukur dengan *hydrogen analyzer*.
9. Suhu mencapai 95-100 °C, laju alir H_2 diukur dengan *flowmeter* gelembung sabun dengan *stopwatch*. Selanjutnya persen H_2 diukur dengan *hydrogen analyzer*.
10. Suhu mencapai 100-105 °C, laju alir H_2 diukur dengan *flowmeter* gelembung sabun dengan *stopwatch*. Selanjutnya persen H_2 diukur dengan *hydrogen analyzer*.
11. Untuk mengatur kondisi suhu dengan mengatur laju alir sirkulasi pada pompa peristaltik dan menenggelamkan koil tembaga.
12. *SlideRegulator* tegangan dimatikan.

13. *Hydrogen analyzer* dan aliran pendingin dimatikan.

14. Larutan K_2CO_3 diukur konduktivitasnya.

Prosedur yang sama juga dilakukan untuk larutan K_2CO_3 0,1 M dan 0,15 M.

3.6.1 Pengukuran Konduktivitas Larutan

1. Konduktometer dinyalakan.
2. Setelah *ready*, larutan standar diukur.
3. Elektroda dibilas dengan aquadest.
4. Setelah *ready*, diukur konduktivitas larutan K_2CO_3 0,05 M dicatat.
5. Elektroda dibilas dengan aquadest.
6. Konduktometer dimatikan.

Prosedur yang sama juga dilakukan untuk larutan K_2CO_3 0,1 M dan 0,15 M.

3.7 Hasil Uji Peralatan Sistem Produksi Hidrogen.

Untuk mengetahui kinerja dari media dielektrikum kaca atau akrilik dengan elektrolit K_2CO_3 dalam memproduksi hidrogen dari air, diperlukan variabel-variabel terikat yang akan digunakan sebagai parameter kinerja dari K_2CO_3 . Variabel terikat percobaan, yaitu produksi hidrogen (mmol), $G(H_2)$, W_r , dan $G'(H_2)$ untuk dijadikan sebagai parameter perbandingan antara elektrolisis plasma dengan teknik elektrolisis konvensional berdasarkan hukum Faraday dengan konsumsi energi listrik yang sama. Kinerja proses elektrolisis plasma meliputi:

3.7.1 Mol hidrogen yang dihasilkan.

Dari rancangan percobaan, didapatkan data waktu untuk reaktor menghasilkan sejumlah volum gas yang diukur lajunya pada *flowmeter* gelembung sabun. Dari data ini selanjutnya dapat dihitung laju produksi gas perdetik. Karena gas tersebut tidak murni hidrogen, maka komposisi atau kemurnian hidrogen dalam gas harus diukur dengan menggunakan *hydrogen analyzer*. Setelah didapat persen hidrogen dalam gas selanjutnya dapat dihitung laju produksi hidrogen murni tiap detik. Karena basis waktu yang ditentukan dalam penelitian ini 5 menit atau 300s, maka didapatlah jumlah volum hidrogen

murni yang dihasilkan reaktor selama 5 menit. Berikut persamaan untuk menghitung produksi hidrogen selama basis waktu:

$$Flowrate = \left(\frac{V_{gas}}{t} \right) mL / s \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\%H_2 = x\%$$

basis waktu 5 menit, 300s,

$$V_{H_2} = \frac{(Flowrate \times \%H_2 \times 300)}{1000} L \dots\dots\dots(3.2)$$

Dari data volum selanjutnya dapat dihitung produksi mol hidrogen dengan mengasumsikan gas diukur pada keadaan RTP (Room Temperature Pressure) yaitu 25 °C dan 1 atm. Asumsi ini dapat diterima karena gas memanglah sudah dingin karena gas telah melewati dua kondenser dan absorber silika yang dapat menurunkan tekanan gas. Saat RTP, volum 1 mol hidrogen sama dengan 24 L, sehingga mol hidrogen dapat dihitung dengan persamaan 3.2 berikut ini:

$$\text{mol } H_2 = \frac{V_{H_2}}{24} \text{ mol} \dots\dots\dots(3.3)$$

3.7.2 W_r , kJ energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1 Liter hidrogen

W_r didefinisikan sebagai jumlah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan sejumlah volum hidrogen pada waktu yang ditentukan. Untuk menghitung nilai W_r , diperlukan data jumlah energi yang dibutuhkan untuk mengoperasikan proses selama 5 menit. Dan variabel ini dapat diukur langsung dengan menggunakan *power analyzer*. Untuk mendapatkan W_r , digunakan persamaan sebagai berikut:

$$W_r = \left(\frac{Whr(5menit)}{V_{H_2} \times 1000} \right) kJ / L \dots\dots\dots(3.4)$$

3.7.3 $G(H_2)$, perbandingan hasil elektrolisis plasma dengan elektrolisis Konvensional Ideal (teoritis)

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

$$G(H_2) = \frac{V_{gas} / 24}{Q / 2F} = \frac{V_{gas} \cdot F}{12Q} \text{ mol.mol}^{-1} \dots\dots\dots(3.5)$$

Q, F, dan V_{gas} berturut-turut merupakan notasi dari muatan listrik ($Q = I \times t$), konstanta Faraday ($=96485 \text{ C.mol}^{-1}$), dan Volume hidrogen.

3.7.4 $G'(H_2)$, Perbandingan Hasil Elektrolisis Plasma Dengan Elektrolisis Konvensional Aktual

Karena keefektifan produksi hidrogen sangat ditentukan oleh kualitas alat elektrolisis, sehingga tidak bisa dibandingkan hasil elektrolisis plasma ini dengan hasil ideal (teoritis) dengan hukum Faraday yang menuntut kondisi alat dan pengontrolan yang sangat baik, sehingga dihitung juga perbandingan dengan hasil produksi hidrogen dari elektrolisis konvensional secara aktual yang dilakukan dengan alat percobaan yang sama ketika dilakukan elektrolisis plasma.

$$G'(H_2) = \frac{1 / W_r \text{ elektrolisis plasma}}{1 / W_r \text{ elektrolisis konvensional}} \dots\dots\dots(3.6)$$

W_r menunjukkan energi kJ yang dibutuhkan menghasilkan hidrogen, sehingga $1/W_r$ menunjukkan hidrogen yang dihasilkan per energi yang digunakan. Jadi $G'(H_2)$ membandingkan produksi hidrogen dari elektrolisis plasma dengan elektrolisis konvensional secara aktual dengan menggunakan energi yang sama besar.

Dari keempat variabel terikat di atas akan dapat diambil kesimpulan tentang kinerja sistem penghasil hidrogen melalui elektrolisis plasma dibanding dengan sistem elektrolisis konvensional ideal (teoritis) maupun dengan elektrolisis konvensional secara aktual dalam hal untuk memproduksi hidrogen dari air dengan energi yang sama.

Energi untuk menghasilkan hidrogen juga dapat ditentukan kondisi operasi mana yang dapat menghasilkan produksi hidrogen besar tetapi konsumsi energinya kecil, serta dapat mengetahui pengaruh temperatur, tegangan yang digunakan, serta konsentrasi larutan terhadap kinerja alat produksi hidrogen ini.

BAB IV PEMBAHASAN

Elektrolisis plasma adalah elektrolisis dengan tegangan tinggi dan arus yang rendah, berbeda dengan elektrolisis konvensional berdasarkan hukum Faraday yang menggunakan arus yang tinggi sedangkan tegangan rendah. Jadi dengan arus yang besar menunjukkan banyaknya elektron yang mengalir untuk pemecahan molekul air, H_2O , menjadi atom-atom pembentuknya, yaitu hidrogen dan oksigen. Sedangkan elektrolisis plasma dengan tegangan tinggi dan arus yang rendah menunjukkan besarnya kecepatan elektron yang mengalir dari katoda ke anoda meskipun jumlahnya kecil.

Dengan adanya elektron berkecepatan tinggi ini menyebabkan terjadinya orientasi pembentukan senyawa-senyawa metastabil pada elektrolisis plasma. Senyawa-senyawa metastabil ini yaitu radikal-radikal yang mana spesi-spesi metastabil ini sangat reaktif dan mampu membentuk reaksi yang mana tidak bisa terjadi pada reaksi kimia umumnya (Istadi, 2006). Dengan sifat tersebut diharapkan pembentukan hidrogen pun akan bisa ditingkatkan melebihi elektrolisis konvensional dengan reaksi kimia pada umumnya.

Bab pembahasan secara garis besar dibagi menjadi dua, yaitu aspek kualitatif dan aspek kuantitatif.

4.1 Aspek Kualitatif

Fenomena terbentuknya plasma bisa dilihat pada Gambar 4.1 di bawah ini.



Gambar 4.1 Proses Terbentuknya Plasma

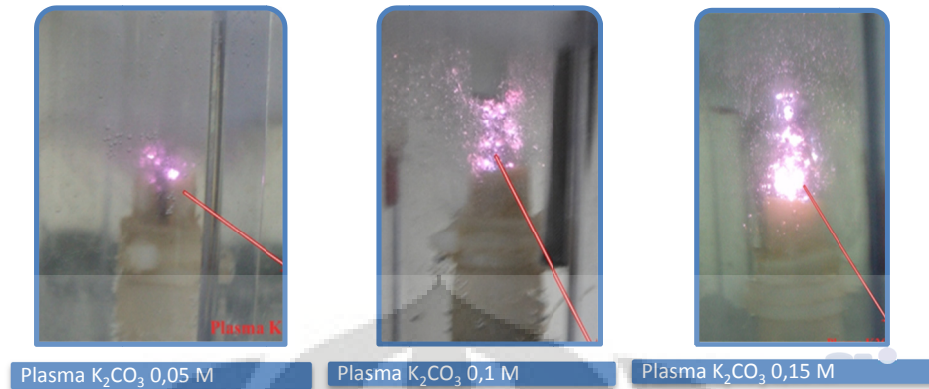
Pada permulaan, tidak ada gelembung gas yang dihasilkan di katoda. Lama kelamaan jumlah gas hidrogen di dalam ruang katoda (hidrogen) semakin banyak. Pada saat ini elektron dari katoda (kutub negatif, sumber elektron) mengalir menuju anoda dengan bantuan ion-ion dari larutan elektrolit yang konduktif. Elektrolit yang digunakan adalah K_2CO_3 yang akan membentuk ion-ion bermuatan, K^+ dan CO_3^{2-} yang mampu menghantarkan elektron di dalam larutan.

Selama proses transfer elektron dari katoda ke anoda melalui elektrolit akan disertai dengan pembentukan gas hidrogen dan gas oksigen karena peristiwa elektrolisis konvensional dengan disertai kenaikan temperatur yang tinggi karena elektrolisis konvensional seperti telah dijelaskan sebelumnya lebih mementingkan energi dalam arus yang besar, sehingga kenaikan temperatur yang terjadi pun juga berjalan cepat.

Sampai akhirnya jumlah gas yang terbentuk sudah cukup banyak, dan sifat dari gas adalah isolator atau tidak menghantarkan arus listrik, atau dengan kata lain larutan menjadi berkurang konduktivitasnya. Gas yang terus terbentuk karena proses elektrolisis konvensional menyebabkan larutan menjadi semakin berkurang konduktivitasnya sementara tegangan antara katoda dan anoda sangat tinggi (kecepatan elektron tinggi) menyebabkan elektron dari katoda terpaksa harus loncat ke anoda tanpa melalui ion-ion dari elektrolit.

Karena elektron berukuran sangat kecil tetapi cepat karena tegangan tinggi yang digunakan sehingga mampu mendorong elektron yang ada di dalam ikatan atom disertai dengan munculnya kilatan cahaya karena proses eksitasi elektron tersebut sehingga gas yang terlewati elektron akan ter-ion membentuk plasma.

Bisa dilihat pada Gambar 4.1 bahwasanya plasma terbentuk setelah jumlah gas yang terbentuk sudah cukup banyak sementara tegangan antara katoda dan anoda besar, sehingga elektron akan langsung loncat ke anoda yang menyebabkan terbentuknya plasma pijar. Plasma hanya terjadi pada katoda karena katoda adalah kutub negatif (penyuplai elektron), sehingga dari katoda-lah elektron tersebut ditembakkan oleh elektroda, sedangkan di anoda tidak terbentuk plasma sama sekali.



Gambar 4.2 Perbandingan penampakan plasma pada komposisi yang berbeda

Gambar 4.2 menunjukkan perbandingan bentuk plasma pada larutan dengan konsentrasi yang berbeda. Ketika konsentrasi elektrolit ditambahkan, kerapatan elektron di dalam larutan menjadi semakin besar, dan ini menyebabkan tumbukan elektron yang semakin intensif, sehingga plasma yang dihasilkan pun juga semakin besar.

Warna plasma yang dihasilkan berwarna ungu karena akibat dari warna nyala ion K^+ . Dalam elektrolisis konvensional, reaksi yang terjadi adalah hanya reduksi air pada katoda, akan tetapi karena adanya tegangan yang sangat tinggi pada elektrolisis plasma menyebabkan “pemaksaan” elektron untuk masuk ke dalam orbital kosong ion K^+ . Elektron memasuki orbital bersama dengan pelepasan energi. Jumlah energi yang dilepaskan elektron ketika memasuki orbital kosong berbeda-beda sesuai dengan jenis atomnya. Energi eksitasi ion K^+ besarnya sama dengan energi gelombang cahaya tampak warna ungu, sehingga timbul warna ungu pada katoda sebagai donor elektron.

Bisa dilihat bahwasanya warna pijar adalah ungu pada semua konsentrasi K_2CO_3 . Akan tetapi, karena K sangatlah reaktif terhadap air, maka selanjutnya K akan beraksi lanjut dengan air untuk membentuk ion K^+ .

Ion K^+ selalu dapat terbentuk, sehingga plasma warna ungu pun akan terus dapat terbentuk ketika tegangan tinggi digunakan untuk elektrolisis ini yang dapat menyebabkan elektron menuju orbital kosong dalam ion K^+ yang menyebabkan warna nyala plasma. Inilah fenomena yang terjadi selama proses elektrolisis plasma.

Pada plasma non-termal atau plasma non-equilibrium terjadi perbedaan suhu yang sangat besar antara elektron dengan suhu *bulk*. Adanya perbedaan ini menyebabkan elektroda yang digunakan pun harus mampu untuk tetap dalam kondisi baik pada kondisi ekstrem ini.

Semula katoda yang digunakan berbahan stainless steel. Pada saat digunakan dengan tegangan sekitar 300 – 400 V, katoda stainless steel sampai membara berwarna kuning di dalam larutan, dan ketika elektrolisis dihentikan, katoda menjadi seperti di-*quenching* oleh larutan dengan suhu *bulk*. Akibatnya katoda yang digunakan pun rusak. Gambar 4.3 menunjukkan perbandingan katoda sebelum dan sesudah terpapar plasma dan dibandingkan dengan katoda tungsten (wolfram) sebagai pengganti katoda stainless steel.



Gambar 4.3 Perbandingan Katoda Stainless Steel dengan Katoda Wolfram Karena Paparan Plasma

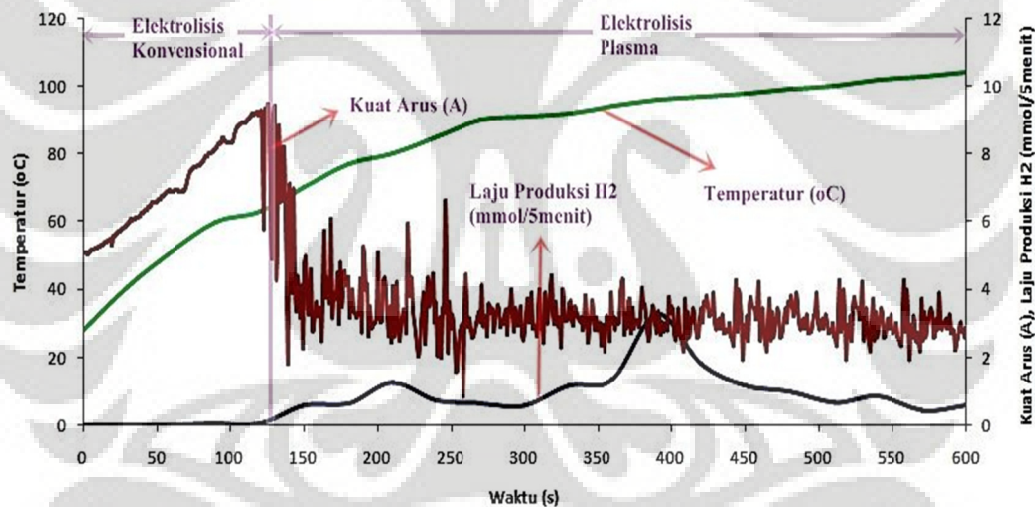
Bisa dilihat bahwasanya katoda stainless steel yang digunakan mengalami kerusakan setelah terpapar plasma non-termal dan kemudian terkena dengan larutan dengan suhu *bulk*. Selain itu sifat logam menjadi sangat berbeda ketika logam dalam bentuk membara, yaitu sangat mudah rusak. Oleh karenanya dibutuhkan katoda yang memiliki titik leleh yang tinggi.

Ketika katoda wolfram digunakan, tidak terjadi kerusakan karena wolfram tidak akan membara pada suhu dimana stainless steel sudah membara. Hal ini dikarenakan perbedaan titik leleh yang besar antara stainless steel 304 yang digunakan yaitu 1400°C (www.ssina.com). Sedangkan dibutuhkan suhu di atas

3422°C (www.wikipedia.org), dua kali lebih untuk membuat filament wolfram membara. Karena ini adalah batangan, bukan berbentuk filament, maka akan butuh energi yang sangat besar untuk membuatnya membara seperti stainless steel. Akibatnya katoda wolfram dapat bertahan terhadap kondisi ekstrem pada elektrolisis plasma tanpa mengalami kerusakan, sehingga selanjutnya digunakan katoda wolfram pada penelitian ini.

4.2 Aspek Kuantitatif

Berikut hasil yang didapatkan dari penelitian dengan merecord hasil kuat arus yang digunakan selama jalannya reaksi dan temperatur serta hasil produksi hidrogen dengan elektrolisis plasma pada larutan dengan konsentrasi 0,1 M K_2CO_3 pada tegangan operasi 200 V:



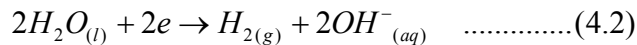
Gambar 4.4 Grafik Kondisi Operasi pada Tegangan 200 V dan Konsentrasi 0,1 M K_2CO_3

Dari Gambar 4.4 bisa disimpulkan bahwasanya pada mula-mula belum terbentuk plasma, kuat arus semakin menanjak naik bertambah besar 5 sampai dengan 10 A. Hal ini menunjukkan bahwa pada saat elektrolisis konvensional (belum terbentuk plasma) energi yang dibutuhkan sangatlah besar (daya yang digunakan antara 1200 Watt sampai dengan 2000 Watt). Dalam elektrolisis konvensional, reaksi yang terjadi adalah hanya reduksi air karena ada kation alkali K^+ pada katoda dan oksidasi air pada anoda karena ada anion sisa asam oksida CO_3^{2-}

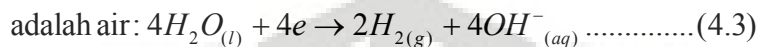
Reaksi elektrolisis konvensional yang terjadi karena adanya K_2CO_3 sebagai berikut (Michael Purba, 2007):

katoda :

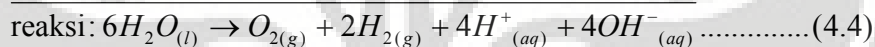
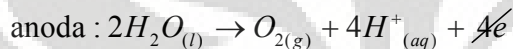
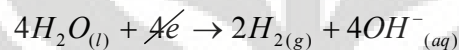
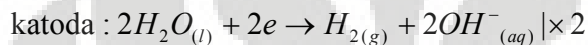
karena ada kation K^+ , maka yang tereduksi adalah air :



anoda: karena ada anion sisa asam oksida, CO_3^{2-} , maka yang teroksidasi



Selanjutnya, reaksi yang terjadi pada katoda dan anoda adalah:



Bisa dilihat secara stoikiometrik jumlah mol hidrogen yang dihasilkan di katoda adalah dua kali mol oksigen yang dihasilkan di anoda. Akan tetapi laju alir produksi hidrogen rendah, dari 6 mol air hanya didapatkan 2 mol hidrogen, sisanya membentuk ion dalam larutan. Bisa dilihat pada grafik Gambar 4.4 bahwasanya pada saat elektrolisis konvensional kurva biru tua (laju produksi hidrogen) sangat kecil dibandingkan laju alir produksi hidrogen sebelah kanan (elektrolisis plasma).

Selama elektrolisis konvensional, elektron dari katoda ke anoda mengalir melalui ion-ion dalam larutan elektrolit, sehingga kuat arus terukur menjadi semakin besar karena terbentuknya ion H^+ dan OH^- dalam larutan dari reaksi elektrolisis konvensional itu sendiri. Selain terbentuk ion, juga terbentuk gas H_2 dan O_2 yang bersifat isolator semakin banyak karena elektron yang mengalir juga semakin banyak (kuat arus semakin bertambah) dan sampai akhirnya menjadi jenuh yang menyebabkan elektron memilih untuk langsung loncat dari katoda karena tegangan yang tinggi menyebabkan elektron bergerak dengan kecepatan yang tinggi pula.

Setelah muncul plasma, arus turun drastis menjadi antara 2 – 4 A dengan rata-rata 3 A. Hal ini dikarenakan terjadinya pemutusan listrik (*electrical breakdown*) (Eva, 2008). Elektron-elektron yang loncat dari katoda menuju anoda

secara langsung ini menghasilkan radikal-radikal metastabil ketika elektron menumbuk elektron pada molekul-molekul air maupun atom gas yang dihasilkan selama elektrolisis konvensional. Hal inilah yang mengakibatkan energi yang digunakan pada elektrolisis plasma sangat rendah (dengan daya antara 300 Watt sampai 600 Watt) padahal produksi hidrogen yang dihasilkan bertambah seperti pada grafik produktivitas hidrogen Gambar 4.4, produksi hidrogen elektrolisis plasma jauh lebih tinggi dibanding elektrolisis konvensional.

Pada elektrolisis konvensional, kurva sebelah kiri, kurva kuat arus yang terbentuk jauh lebih halus dibanding kurva kuat arus pada elektrolisis plasma. Hal ini dikarenakan elektron mengalir dari katoda menuju anoda melalui ion-ion dalam larutan elektrolit yang jumlahnya semakin bertambah sehingga kenaikan kuat arus yang mengalir menanjak secara halus dibanding kurva kuat arus (merah) elektrolisis plasma yang sangat fluktuatif. Selain itu, hal ini juga diakibatkan karena penyearah arus yang digunakan bukan penyearah arus murni dengan kapasitor, sehingga masih ada *noise* arus bolak-balik. *Noise* semakin terlihat jelas ketika terbentuk plasma.

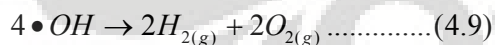
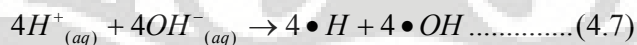
Pada elektrolisis plasma melibatkan pembentukan bunga api listrik dengan melewati arus listrik melalui suatu gas dalam proses yang disebut pemutusan listrik (*electrical breakdown*). Karena tahanan listrik sepanjang sistem, dihasilkan sejumlah panas dalam jumlah yang signifikan, yang mengambil elektron dari molekul-molekul gas menghasilkan suatu aliran gas yang terionisasi, atau plasma (Eva, 2008).

Jadi dengan adanya pemutusan listrik tersebut tahanan menjadi sangat tinggi dan berakibat pada menurunnya arus yang mengalir. Akan tetapi ketika terbentuk plasma, dimana 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 (Eva, 2008). Sehingga ketika terbentuk plasma, larutan menjadi bersifat seperti logam, dan ini akan membuat larutan menjadi sangat konduktif dan arus mengalir sangat besar.

Adanya pemutusan listrik (*electrical breakdown*) yang mengakibatkan hambatan yang sangat besar serta terbentuknya sifat yang sangat konduktif seperti logam inilah yang membuat kurva arus pada elektrolisis plasma menjadi sangat fluktuatif, sangat kontras dibanding kurva arus pada elektrolisis konvensional.

Dari fenomena ini juga bisa diambil kesimpulan bahwasanya elektrolisis plasma baru bisa terbentuk setelah elektrolisis konvensional, berapapun besarnya tegangan yang digunakan. Hal ini dikarenakan energi awal yang sangat besar itu digunakan untuk memecah ikatan hidrogen dan oksigen dalam molekul air sehingga terbentuk produk gas H₂ dan O₂ yang menyebabkan tahanan dalam larutan menjadi semakin tinggi dan memaksa elektron untuk langsung loncat dari katoda karena tegangan yang tinggi yang selanjutnya akan diubah menjadi plasma pijar dalam larutan.

Pada saat telah tercapai elektrolisis plasma, produksi hidrogen menjadi sangat tinggi padahal energi yang digunakan kecil, tegangan cenderung konstan sedangkan kuat arus rata-rata turun secara drastis dibanding elektrolisis konvensional, hal ini dikarenakan pada elektrolisis plasma terbentuk spesi-spesi metastabil dari ion-ion hidrogen dan hidroksil yang masih terlarut dalam larutan dan spesi-spesi ini sangat reaktif sehingga akan bereaksi cepat menyebabkan laju produksi hidrogen pun meningkat. Reaksi pembentukan dan reaksi antar spesi-spesi metastabil ini sebagai berikut:



Sehingga jika ditotal akan menghasilkan 6 mol H₂ dari 4 mol tambahan dari elektrolisis plasma, serta 3 mol O₂ dengan 2 mol tambahan dari hasil produksi elektrolisis konvensional. Sehingga produk elektrolisis plasma tiga kali lipat dari elektrolisis konvensional.

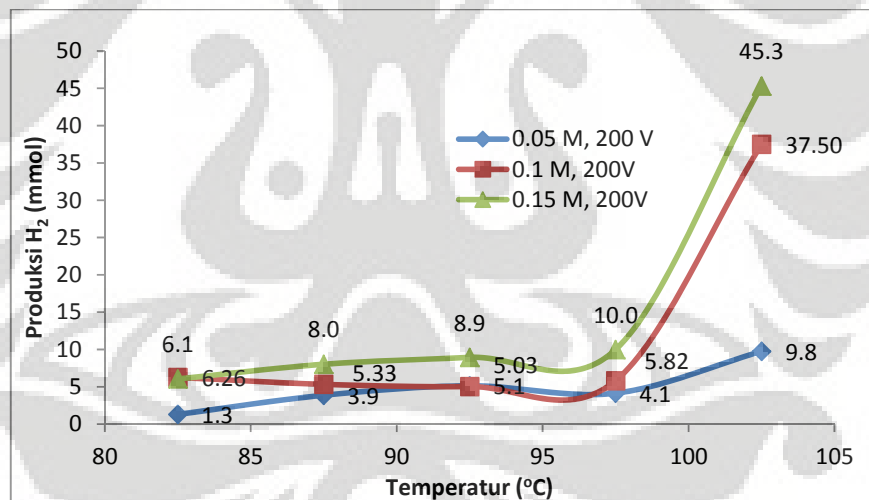
Akan tetapi jika hendak dibandingkan, harus dibandingkan juga energi untuk menghasilkan produk gas hidrogen tersebut. Dari grafik gambar 4.4 bisa diperkirakan energi (dari kurva kuat arus) untuk menjalankan elektrolisis plasma 3

kali lebih kecil dibandingkan elektrolisis konvensional. Sehingga jika dibandingkan antara elektrolisis plasma dibanding elektrolisis konvensional lebih baik 9 kali lipat atau 800% lebih bagus, pencapaian yang sangat tinggi.

Elektron dengan energi yang cukup bertumbukan dengan gas latar (*background*) menghasilkan disosiasi, eksitasi dan ionisasi tingkat rendah tanpa peningkatan entalpi gas yang cukup besar (Eva, 2008) dan hal ini terlihat pada grafik hijau (temperatur) menunjukkan bahwasanya kenaikan temperatur ketika terbentuk plasma lebih landai dibandingkan kenaikan temperatur sebelum terbentuknya plasma, atau dengan kata lain kenaikan temperatur setelah terbentuk plasma lebih lambat dibanding kenaikan temperatur setelah terbentuk plasma

4.2.1 Produksi Hidrogen (mmol)

Pada bagian ini akan di bahas tentang laju produksi hidrogen larutan dengan tegangan 200 V pada berbagai konsentrasi, yaitu 0,05 M, 0,1M, dan 0,15 M.



Gambar 4.5 Laju Alir Produksi Hidrogen

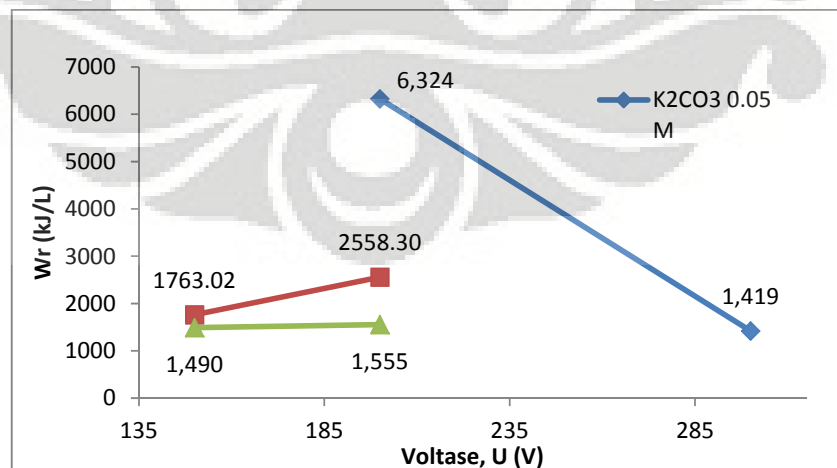
Dari grafik Gambar 4.5 bisa disimpulkan bahwasanya produksi hidrogen semakin meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi larutan K_2CO_3 . Hal ini disebabkan semakin tinggi konsentrasi elektrolit K_2CO_3 , kerapatan elektron dalam larutan semakin besar, sehingga semakin banyak elektron untuk loncat dari katoda ke anoda, dan menyebabkan terbentuknya radikal-radikal $*H$, $*OH$ juga semakin

banyak. Akibatnya pembentukan molekul hidrogen semakin besar karena sifat radikal yang sangat reaktif. Plasma menghasilkan spesi-spesi aktif yang lebih beragam, dan atau lebih besar energinya dibandingkan dengan spesi yang biasa dihasilkan pada reaktor kimia (Eva, 2008), sehingga produk yang dihasilkan pun menjadi lebih banyak karena laju produksinya cepat.

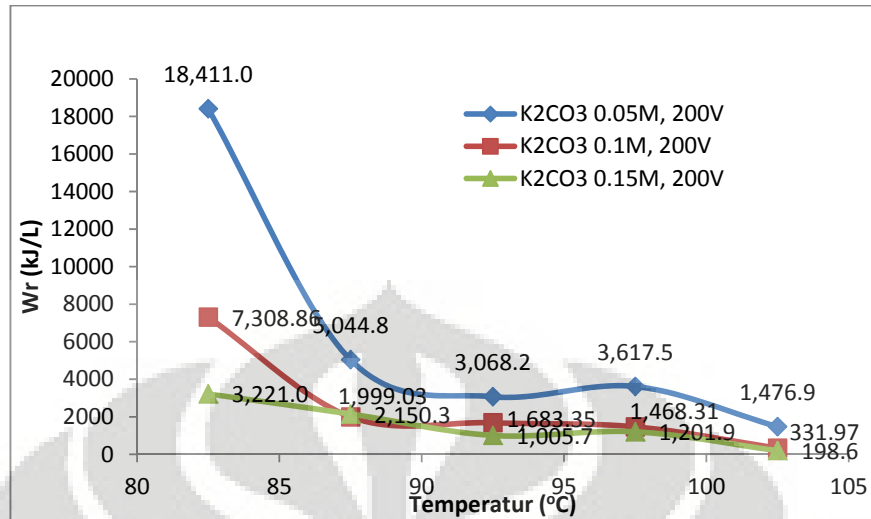
Produksi hidrogen juga meningkat seiring dengan naiknya temperatur operasi. Hal ini dikarenakan ketika temperatur semakin tinggi, akan terbentuk sebagian air menjadi bentuk gas. Bentuk gas uap air akan lebih mudah untuk dipecah menjadi komponen hidrogen dan oksigen dibanding ketika air masih dalam bentuk cairan. Hal ini dikarenakan dengan terbentuknya gas, ruang antar molekul air menjadi lebih renggang sehingga terjadinya tumbukan elektron ke dalam molekul air menjadi lebih mudah. Akibatnya pembentukan radikal $\cdot\text{H}$ dan $\cdot\text{OH}$ yang sangat reaktif dan produksi hidrogen pun bisa meningkat.

Plasma filamen (pita) lebih sering muncul pada gas-gas molekular dari pada gas-gas atomik (Eva, 2008). Itulah mengapa ketika temperatur mencapai temperatur yang tinggi produktivitas naik. Karena pembentukan uap air yang merupakan gas molekular akan memunculkan plasma lebih sering dibanding ketika gas yang terbentuk adalah gas hidrogen dan oksigen yang merupakan gas-gas atomik pada elektrolisis konvensional.

4.2.2 Kebutuhan Energi Per Liter Hidrogen, W_r (kJ/L)



Gambar 4.6 W_r pada Berbagai Konsentrasi K_2CO_3 dan Voltase



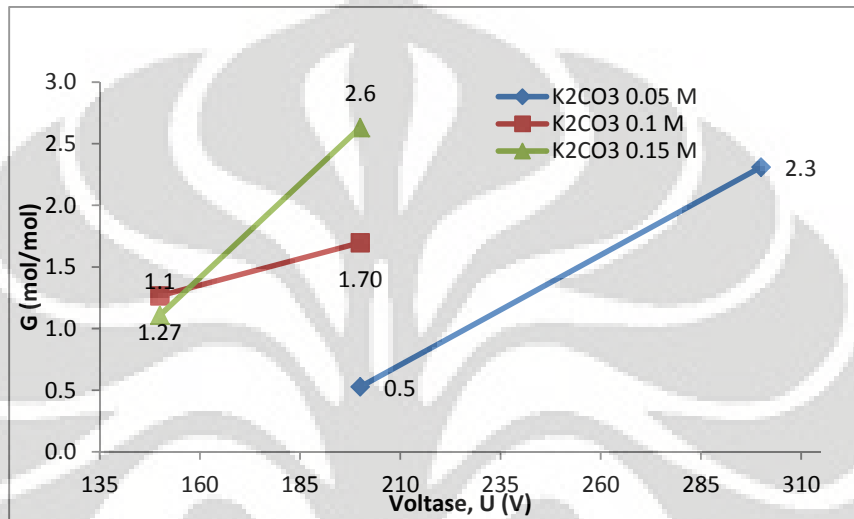
Gambar 4.7 Wr pada berbagai konsentrasi K₂CO₃ dan temperatur

Dari grafik Gambar 4.6 dan 4.7, bisa disimpulkan bahwasanya energi untuk menghasilkan hidrogen per volum semakin kecil seiring dengan kenaikan konsentrasi K₂CO₃, kenaikan voltase/tegangan operasi, dan juga temperatur operasi. Hal ini disebabkan karena dengan semakin banyaknya K₂CO₃, maka semakin tinggi kerapatan elektron, sehingga untuk mentransfer elektron dari katoda ke anoda menjadi semakin mudah dan energi yang dibutuhkan menjadi semakin kecil. Kenaikan tegangan menyebabkan gaya untuk melepaskan elektron menjadi semakin besar, dan hal ini mempermudah elektron untuk berpindah dari katoda ke anoda sehingga radikal yang terbentuk pun juga semakin besar.

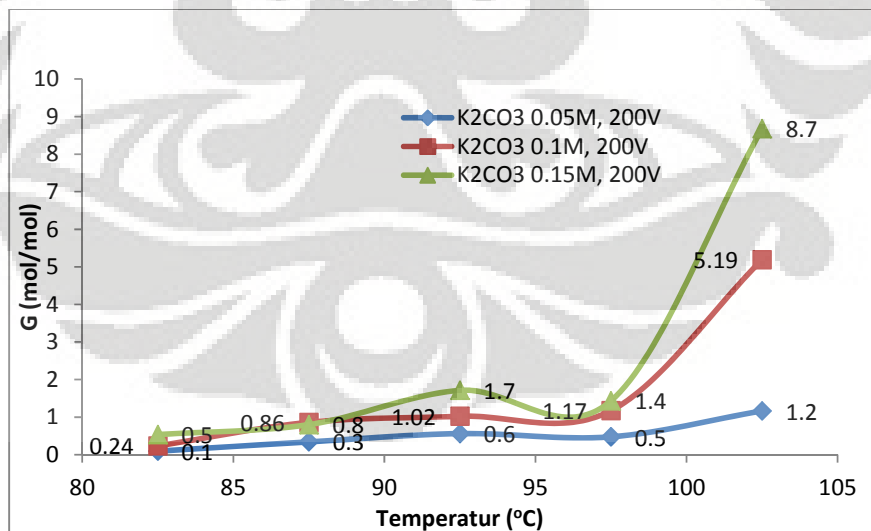
Kenaikan temperatur juga memperkecil energi untuk menghasilkan hidrogen karena semakin tinggi temperatur maka sebagian air akan berubah fasa menjadi gas. Bentuk ini akan menyebabkan pembentukan radikal *H maupun *OH menjadi lebih mudah dibanding ketika dalam bentuk cair (seperti telah dijelaskan sebelumnya), sehingga produksi hidrogen dari radikal yang sangat reaktif menjadi besar. Perlu diingat bahwasanya Wr adalah fungsi energi dan jumlah hidrogen yang terbentuk, jadi kenaikan temperatur akan menaikkan jumlah produksi hidrogen dengan mempermudah pembentukan radikal *H dan *OH meskipun jika ternyata tidak ada penurunan energi yang menyertainya, akan tetapi keadaan itu tetap dapat menurunkan nilai Wr karena nilai Wr tergantung pada besaran energi yang dibutuhkan untuk elektrolisis plasma dan jumlah produksi hidrogen.

4.2.3 Perbandingan Hasil Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Konvensional (Ideal, $G(H_2)$ dan Aktual $G'(H_2)$)

Untuk mengetahui keefektifan dari proses elektrolisis plasma, maka diperlukan perbandingan dengan elektrolisis yang saat ini digunakan, yaitu elektrolisis konvensional.



Gambar 4.8 Perbandingan Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Plasma vs Elektrolisis konvensional ideal (teoritis) pada Berbagai Konsentrasi K_2CO_3 dan Tegangan Operasi



Gambar 4.9 Perbandingan Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Plasma vs Elektrolisis konvensional ideal (teoritis) pada Berbagai Konsentrasi K_2CO_3 dan Temperatur Operasi

Dari grafik Gambar 4.8 dan 4.9, bisa disimpulkan bahwasanya dengan elektrolisis plasma bisa menghasilkan produksi sampai 8.7 kali lipat lebih banyak dibandingkan dengan elektrolisis konvensional ideal (teoritis), sedangkan analisis pertama berdasarkan Gambar 4.4 sebelumnya 9 kali lipat lebih banyak. Hal ini sangat jauh sekali peningkatan yang bisa dihasilkan dengan perubahan mekanisme pembentukan spesi-spesi metastabil radikal $\cdot\text{H}$ dan $\cdot\text{OH}$ dalam pembentukan hidrogen dengan adanya plasma dibanding dengan elektrolisis konvensional yang memecah hidrogen dan oksigen dari air dengan energi listrik (arus tinggi). Semakin tinggi temperatur dan tegangan operasi, semakin besar perbedaan dengan elektrolisis konvensional ideal karena hal ini semakin mempermudah pembentukan plasma seperti dijelaskan sebelumnya dan akhirnya mempermudah pembentukan plasma dengan mekanisme pembentukan radikal-radikal yang sangat reaktif.

Elektrolisis yang digunakan saat ini masih menggunakan mekanisme Faraday, yaitu menggunakan energi listrik untuk memecah ikatan atom antara hidrogen dan oksigen pada air. Data para pengembang elektrolisis yang ada saat ini dapat dilihat pada Tabel 4.1:

Tabel 4.1 Data Pengembang Elektrolisis Konvensional (Hukum Faraday)

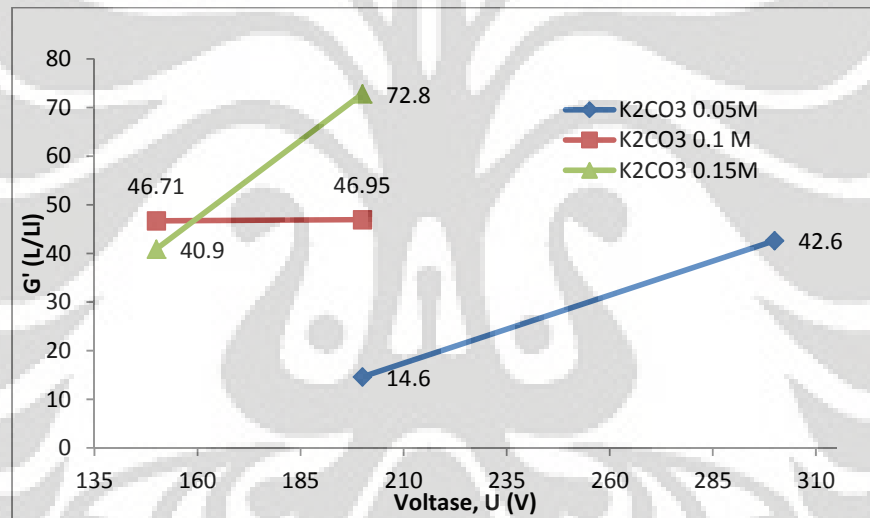
Parameter	De Nora S.A.P	Norsk Hydro	Electrolyzer Corp. Ltd.	Teledyne Energy Systems	General Electric
Tekanan (Mpa)	Ambien	Ambien	Ambien	0,2	0,4
Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	80	80	70	82	80
Elektrolit	29% KOH	25% KOH	28% KOH	35%	Nafion
Kerapatan Arus (Am^{-2})	1500	1750	1340	2000	5000
Tegangan Sel (V)	1,85	1,75	1,9	1,9	1,7
Efisiensi (%)	98,5	98,5	>99,9	NR	NR
Kemurnian O_2 (%)	99,6	99,3-99,7	99,7	>98,0	>98,0
Kemurnian H_2 (%)	99,9	98,9-99,9	99,9	99,99	>99,0

Sumber: Kai Zeng, 2010

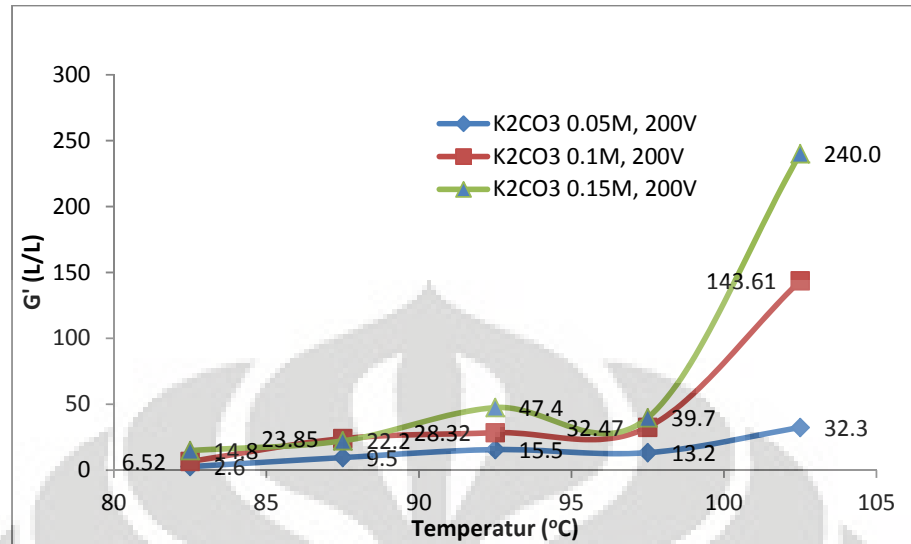
Bisa dilihat bahwasanya pengembang elektrolisis yang ada sampai saat ini (2010) masih belum ada yang mencapai 100 %, dan pada penelitian ini didapatkan hasil produksi hidrogen sampai 870% atau mampu menaikkan produksi hidrogen

sampai 770% lebih banyak dibanding dengan elektrolisis konvensional ideal karena perbedaan mekanisme pemecahan ikatan hidrogen dan oksigen pada air.

Akan tetapi, penelitian yang dilakukan ini tidaklah terlalu sempurna dalam peralatan yang digunakan untuk melakukan proses elektrolisis, karena sangat mungkin terjadi kebocoran, atau bahkan ketidak-stabilan reaksi elektrolisis plasma karena sistem pengontrolan yang kurang bagus, serta data yang diambil juga tidak online, sehingga tidak didapatkan data yang terlalu akurat. Oleh karena itu sangat penting juga untuk membandingkan hasil produksi hidrogen dengan proses elektrolisis konvensional (aktual) dengan menggunakan alat yang sama mengingat kondisi alat juga sangat mempengaruhi pembentukan hidrogen dan kesempurnaan proses pemecahan hidrogen dan oksigen dari air.



Gambar 4.10 Perbandingan Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Plasma vs Elektrolisis Konvensional (aktual) pada Berbagai Konsentrasi K₂CO₃ dan Tegangan Operasi



Gambar 4.11 Perbandingan Produksi Hidrogen dengan Elektrolisis Plasma vs Elektrolisis Konvensional (aktual) pada Berbagai Konsentrasi K₂CO₃ dan Temperatur Operasi

Gambar 4.10 dan 4.11 menunjukkan perbandingan hasil produksi hidrogen dari elektrolisis plasma dibanding dengan hasil produksi elektrolisis konvensional (aktual) dengan alat yang sama. Bisa disimpulkan bahwasanya produksi hidrogen dengan elektrolisis plasma jauh melebihi produksi elektrolisis aktual, yaitu sampai 240 kali lebih banyak. Atau 24,000% kenaikan yang dapat dihasilkan dari elektrolisis plasma. Hal ini dikarenakan perbedaan mekanisme pemecahan hidrogen dan oksigen dari molekul air antara elektrolisis konvensional dengan elektrolisis plasma.

Tabel 4.2 Perbandingan dua tipe elektrolizer komersial

Parameter	Elektroliser Alkalin Monopolar	Elektroliser PEM/sel
Tegangan Sel (V)	1,85	2
Jumlah Sel	N/A	Jul-51
Kerapatan Arus ($A\text{ cm}^{-2}$)	0,25	1,075
Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	70	65 (keluaran)
Kuat Arus (A)	10000	1000 (maksimum)
Daya (kW)	200	N/A
Laju Produksi H_2 (m^3h^{-1})	42	0,42
Laju Produksi O_2 (m^3h^{-1})	21	0,21
Kemurnian H_2 (%)	>99,5	>99,995
Kemurnian O_2 (%)	>99	>99
Konduktivitas Air (S cm^{-1})	N/A	<0,25

Sumber: Kai Zeng, 2010

Sangat efektif karena adanya perbedaan mekanisme reaksi pemecahan hidrogen dan oksigen dari air yaitu dengan pembentukan radikal $\cdot\text{H}$ dan $\cdot\text{OH}$ dengan adanya tumbukan elektron ke molekul air menghasilkan wujud plasma yang disebabkan tingginya tegangan operasi dibanding dengan elektrolisis konvensional yang hanya memecah ikatan hidrogen dan oksigen dengan mekanisme energi listrik (arus yang digunakan sangat tinggi, bahkan sampai 10 kA) untuk memecah ikatan kovalen antara hidrogen dan oksigen dalam molekul air.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah:

1. Produksi hidrogen meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi elektrolit K_2CO_3 , kenaikan tegangan operasi, kenaikan temperatur reaksi.
2. Energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan hidrogen menurun seiring dengan kenaikan tegangan operasi, kenaikan konsentrasi elektrolit, dan kenaikan temperatur reaksi.
3. Elektrolisis plasma hanya dapat terbentuk setelah terjadi elektrolisis konvensional yang mendahuluinya.
4. Arus listrik pada elektrolisis plasma sangat fluktuatif karena terjadinya dua fenomena sekaligus, yaitu *electrical breakdown* yang menyebabkan tahanan listrik naik dan terbentuknya plasma yang memiliki konduktivitas tinggi seperti logam menyebabkan tahanan menjadi kecil sehingga arus sangat fluktuatif dibanding elektrolisis konvensional.
5. Kenaikan temperatur selama terbentuk plasma lebih lambat dibanding saat elektrolisis konvensional. Hal ini dikarenakan pembentukan plasma menghasilkan disosiasi, eksitasi dan ionisasi tingkat rendah tanpa peningkatan entalpi gas yang cukup besar, sehingga peningkatan suhu menjadi lebih lambat dibanding elektrolisis konvensional dengan arus yang tinggi.
6. Produksi hidrogen yang dihasilkan mampu melebihi produksi secara teoritis sampai 8,7 kali elektrolisis konvensional ideal (teoritis). Hal ini disebabkan dalam elektrolisis plasma terjadi perubahan mekanisme reaksi dalam mengubah air menjadi komponennya yaitu hidrogen dan oksigen dengan adanya loncatan elektron karena tegangan tinggi dari pada dengan arus yang besar.
7. Produksi hidrogen yang dihasilkan dibanding dengan elektrolisis konvensional pada alat yang sama mampu mendapatkan hasil hidrogen sampai 240 kali lipat lebih banyak dengan energi yang sama. Hal ini

menunjukkan bahwa teknologi elektrolisis plasma sangat menjanjikan untuk memecah air menjadi komponen pembentuknya, yaitu hidrogen dan oksigen secara sangat efektif.

5.2 Saran

1. Untuk mendapatkan data seharusnya dilakukan dengan menggunakan komputer sehingga data yang didapatkan lebih baik karena lebih akurat serta realtime.
2. Digunakan elektrolit lain seperti KOH, NaOH, H₂SO₄, dll. sebagai pembanding dari kinerja K₂CO₃ sebagai elektrolit pembantu pemecah air menjadi hidrogen utamanya dan oksigen.
3. Melakukan variasi pH sebagai parameter yang mempengaruhi pembentukan radikal mengingat radikal *H dan *OH dalam elektrolisis plasma memberikan pengaruh yang besar seperti pada bab tinjauan pustaka.
4. Melakukan pengukuran jumlah radikal *H dan *OH yang terbentuk, sehingga bisa dianalisis mekanisme pembentukan hidrogen dari air dengan elektrolisis plasma non-termal.

DAFTAR PUSTAKA

- Bockris JOM, Conway BE, Yeager E, White RE. *“Comprehensive treatise of electrochemistry”*. New York: Plenum Press; 1981.
- Chaffin, John H., Stephen M. Bobbio, Hilary I. Inyang³, Life Kaanagbara. (2006), *“Hydrogen Production by Plasma Electrolisis”*, Journal of Energy Eng. Vol. 132, No. 3.
- Dunn S. Hydrogen futures: toward a sustainable energy system. *Int J Hydrogen Energy* 2002;27:235–64.
- Eliaz N, Eliezer D, Olson DL. *“Hydrogen-assisted processing of materials”*. *Mater Sci Eng A* 2000;289:41–53.
- Eva F. Karamah, *Teknologi Plasma dan Ozon*, (2008), Program Studi Teknik Kimia Program Doktor Fakultas Teknik 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.
- Holladay, J.D., J. Hu, D.L. King, Y. Wang. (2009). *“An overview of hydrogen production technologies”*, *Catalysis Today* 139 (2009) 244–260
- Huang, H., dan L. Tang. (2007). *Treatment Of Organic Waste Using Thermal Plasma Pyrolysis Technology*. *Energy Conversion and Management*, 48, 1331-1337.
- Istadi.(2006). *“Aplikasi Teknologi Hibrid Katalis-Plasma Dalam Pengembangan Reaktor Masa Depan”*, *Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, (CREC) Teknik Kimia Universitas Diponegoro. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*
- Kai Zeng, dan Dongke Zhang. (2010). *“Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications”*, *Progress in Energy and Combustion Science*, Elsevier.
- Kanarev, Ph.M., Tadahiko Mizuno (2003). *Cold Fusion by Plasma Electrolysis of Water*. *Journal of New Energy*: 151-156.
- Kogelschatz, U. (2004). *“Atmospheric-pressure plasma technology”*, *Plasma Phys. Controlled Fusion* 46 B63–B75.
- Liu CJ, Liu XZ, , Baldur E. (2003). *“Hydrogen production from methanol using corona discharges”*. *Chinese Chemical Letters*, 14(6):631–3.

- Michael Purba. (2007). “Kimia Untuk SMA Kelas 3/XII”, Jakarta:Erlangga
- 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
- Mueller-LangerF, Tzimas E, Kaltschmitt M, Peteves S. Techno-economic assessment of hydrogen production processes for the hydrogen economy for the short and medium term. Int J Hydrogen Energy 2007;32:3797–810.
- R.B. Biniwale, A. Mizuno, M. Ichikawa, Applied Catalysis A: General 276 (2004) 169–177.
- Richards M, Shenoy A. H2-MHR pre-conceptual design summary for hydrogen production. Nucl Eng Technol 2007;39:1–8.
- Roth, J.R ., (2001). “*Applications to Nonthermal Plasma Processing*”, Industrial Plasma Engineering vol :2, IOP Publish Philadelphia.
- T. Paulmier, L. Fulcheri, Chemical Engineering Journal 106 (2005) 59–71
- Z. Yan, L. Chen, H. Wang, Xuebao Huagong/Journal of Chemical Industry and Engineering (China) 57 (2006) 1432–1437.
- 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
- www.ssina.com. “CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF STAINLESS STEEL”, diakses tanggal 5 Juli 2010
- www.wikipedia.org, “tungsten”, diakses tanggal 5 Juli 2010