



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN REAKTOR PLASMA  
NON-TERMAL DAN UJI KINERJANYA UNTUK  
PENGOLAHAN GAS CO<sub>2</sub> PADA TEKANAN RENDAH**

**SKRIPSI**

**IKHSAN FATRIAN  
0606076476**

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



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN REAKTOR PLASMA  
NON-TERMAL DAN UJI KINERJANYA UNTUK  
PENGOLAHAN GAS CO<sub>2</sub> PADA TEKANAN RENDAH**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**IKHSAN FATRIAN  
0606076476**

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

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

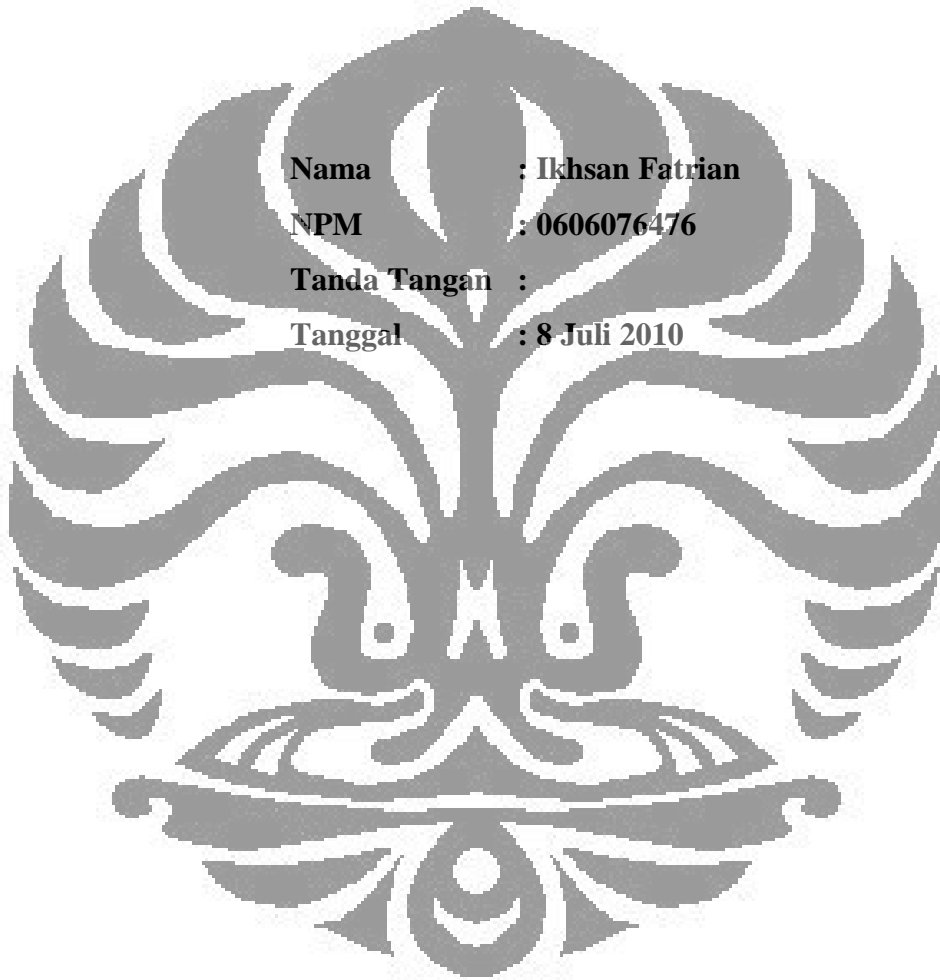
**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar**

**Nama : Ikhsan Fatrian**

**NPM : 0606076476**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 8 Juli 2010**



## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Ikhsan Fatrian  
NPM : 0606076476  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Rancang Bangun Reaktor Plasma Non-Termal dan Uji Kinerjanya untuk Pengolahan Gas CO<sub>2</sub> pada Tekanan Rendah

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. Setijo Bismo, DEA (.....)

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

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

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 8 Juli 2010

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah membimbing penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi. Berkat petunjuk-Nya, penulis dapat menyelesaikan makalah skripsi dengan judul **“Rancang Bangun Reaktor Plasma Non-Termal dan Uji Kinerjanya untuk Pengolahan CO<sub>2</sub> pada Tekanan Rendah”** ini untuk memenuhi tugas skripsi, salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana Teknik Departemen Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

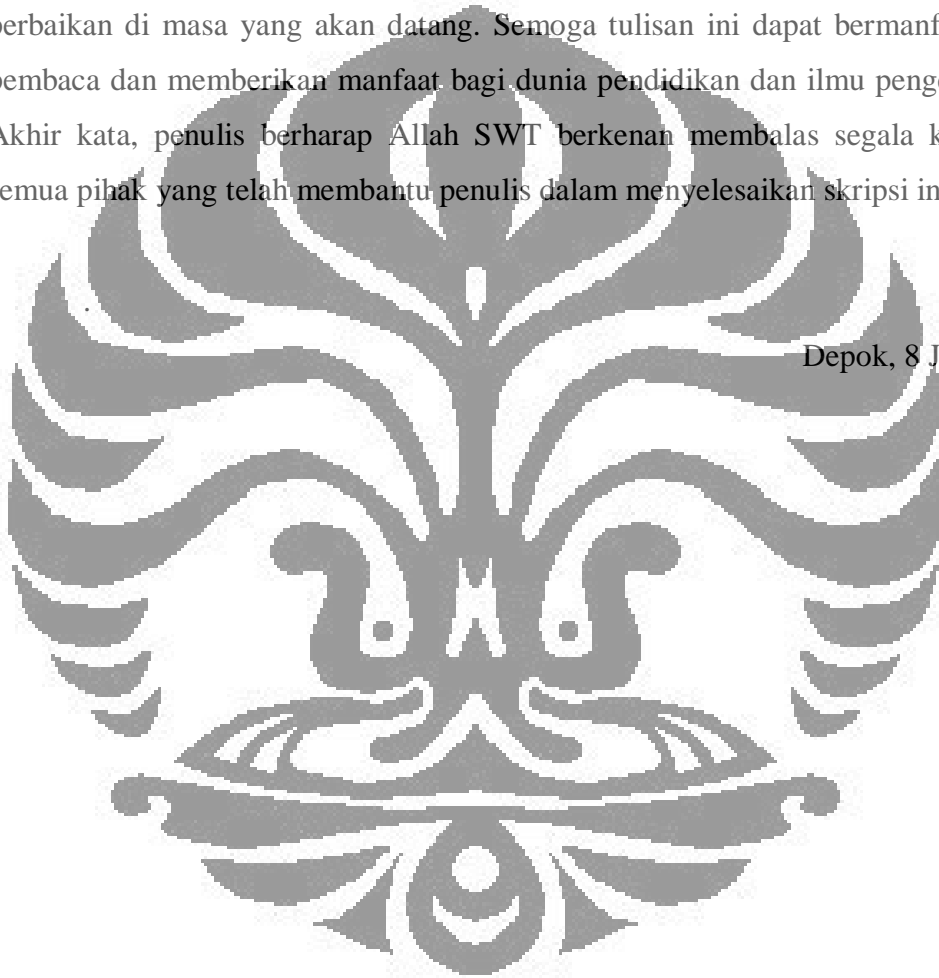
Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Ir. Dijan Supramono M.Sc., selaku dosen pembimbing akademik yang telah menyediakan waktu dan membantu kehidupan akademik perkuliahan selama ini;
3. Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA., selaku ketua Departemen Teknik Kimia FTUI;
4. Ir. Yuliusman, M.Eng., selaku koordinator skripsi DTK FTUI
5. Para dosen Departemen Teknik Kimia FTUI yang telah memberikan ilmu dan membagi wawasannya;
6. Mba Tiwi, Mang Ijal, Kang Jajat, dan Mas Topik, atas bantuannya yang sangat besar pada saat penulis melakukan penelitian;
7. Keluarga besar terutama ayah, ibu, adik-adik, angku nas, uncu dan mak enek yang selalu memberi dukungan dan semangat;
8. Kevin, Reza, dan Fatur, teman seperjuangan yang berbagi suka, duka, canda dan tawa selama penelitian ini;
9. Teman satu kontrakan: Ade, Abrar, dan Riko atas dukungannya;

10. Semua teman-teman yang tidak dapat disebutkan satu demi satu, yang selalu memberikan informasi dan bantuan semangat;
11. Semua pihak yang telah membantu penyusunan makalah skripsi ini secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa dalam makalah skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sehingga dapat menyempurnakan skripsi ini dan melaksanakan perbaikan di masa yang akan datang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan memberikan manfaat bagi dunia pendidikan dan ilmu pengetahuan. Akhir kata, penulis berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Depok, 8 Juli 2010



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

---

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

Nama : Ikhsan Fatrian  
NPM : 0606076476  
Program Studi : Teknik Kimia  
Departemen : Teknik Kimia  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

**Rancang Bangun Reaktor Plasma  
Non-Termal dan Uji Kinerjanya untuk Pengolahan Gas CO<sub>2</sub> pada  
Tekanan Rendah**

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 : 8 Juli 2010  
Yang menyatakan

(Ikhsan Fatrian)

## ABSTRAK

Nama : Ikhsan Fatrian  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul : Rancang Bangun Reaktor Plasma Non-Termal dan Uji Kinerjanya untuk Pengolahan CO<sub>2</sub> pada Tekanan Rendah

Penelitian ini berkonsentrasi pada perancangan dan pengujian kinerja reaktor plasma non-thermal jenis *DBD*. Reaktor yang dibangun berjenis koaksial terbuat dari gelas borosilikat dengan volume 29 cc dan 42 cc. Kedua reaktor dioperasikan dalam suhu kamar dan tekanan atmosferik. Variasi yang digunakan untuk uji kinerja reaktor adalah laju alir umpan, tegangan, volume reaktor, dan sumber listrik (Inverter UPS dan PLN). Reaktor ini mampu menghasilkan konversi CO<sub>2</sub> hingga 2.27% dengan penggunaan sumber listrik inverter UPS dan sebesar 4.55% dengan penggunaan listrik PLN.

Kata Kunci:  
Plasma Non-Termal, DBD, Inverter UPS, Listrik PLN, Karbon Dioksida.

## ABSTRACT

Name : Ikhsan Fatrian  
Study Program : Chemical Engineering  
Title : Design of Non-Thermal Plasma Reactor and its Performance Test for CO<sub>2</sub> Processing at Low Pressure

This research concern are performed DBD reactor design and its performance test. Reactors which are coaxial type are made of borosilicate glass with 29 and 42 cc of volume. Reactors operate at ambient temperature and atmospheric pressure. Variations that been used in performance test are reactant flow rate, applied voltage, reactor volume, and power source (Inverter UPS and public electricity). Reactors can produce CO<sub>2</sub> conversion rate about 2.27% by using electric source from inverter UPS and about 4.55% by using public electricity.

Keyword:  
Non-Thermal Plasma, DBD, Inverter UPS, public electricity, Carbon Dioxide



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	vi
ABSTRAK .....	vii
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR TABEL .....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan Penelitian .....	3
1.4. Manfaat Penelitian .....	4
1.5. Batasan Masalah .....	4
1.6. Sistematika Penulisan .....	4
<b>2. TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>6</b>
2.1. Definisi Karakteristik Dasar Plasma Non-termal .....	8
2.1.1. Jenis Plasma .....	8
2.1.2. Karakteristik Plasma dan Aplikasinya .....	10
2.2. <i>Dielectric Barrier Discharge</i> (DBD) .....	11
2.3. Spesi Aktif dalam Lingkungan Plasma Non-Termal .....	13
2.3.1. Foton .....	13
2.3.2. Spesi Netral .....	14
2.3.3. Partikel-partikel bermuatan .....	15
2.4. Gas Rumah Kaca .....	15
2.4.1. Karbon Dioksida (CO <sub>2</sub> ) .....	15
2.4.2. Air (H <sub>2</sub> O) .....	20
2.5. Pengolahan CO <sub>2</sub> .....	22
<b>3. METODE PENELITIAN .....</b>	<b>26</b>
3.1. Rancangan Penelitian .....	27
3.2. Lokasi Penelitian.....	27
3.3. Deskripsi Peralatan Penelitian .....	27
3.3.1. Sumber Tegangan Tinggi.....	27
3.3.1.1. Kelengkapan peralatan.....	27
3.3.1.2. Instalasi .....	31
3.3.2. Reaktor Plasma DBD.....	31
3.3.2.1. Kelengkapan Komponen.....	31
3.3.2.2. Peraktian reaktor .....	36
3.4. Preparasi Gas .....	40
3.5. Uji Start-Up Alat.....	40
3.6. Uji Fisik .....	41

3.7. Uji Kinerja Reaktor Plasma DBD.....	43
3.8. Prosedur Pemakaian Gas Chromatography (GC).....	43
3.8.1. Preparasi GC.....	43
3.8.2. Prosedur mengalirkan gas Argon.....	43
3.8.3. Prosedur membuka tabung gas .....	44
3.8.4. Prosedur menutup gas .....	44
3.8.5. Prosedur menyalakan GC.....	44
3.8.6. Prosedur menyalakan chromatopac .....	45
3.8.7. Prosedur mematikan GC .....	45
3.9. Analisis dan Perhitungan.....	46
3.9.1. Perhitungan Konversi.....	46
3.9.2. Perhitungan Daya Listrik.....	46
3.9.3. Perhitungan Konsumsi Energi.....	46
3.9.4. Perhitungan energy yield.....	46
3.9.5. Analisis Uji Kinerja Reaktor .....	47
3.9.6. Waktu tinggal .....	47
3.9.7. Analisis Kinerja Reaktor.....	47
<b>4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>48</b>
4.1. Uji Fisik Plasma DBD.....	48
4.1.1. Uji Fisik dengan Listrik PLN.....	48
4.1.2. Uji Fisik dengan Sumber Listrik Inverter .....	53
4.2. Uji Kinerja Reaktor.....	53
4.3.1. Pengaruh Laju alir dan tegangan.....	55
4.3.2. Pengaruh ukuran Reaktor.....	59
4.3.3. Utilitas Energi.....	62
4.3.4. Pengaruh Jenis Sumber Daya Listrik.....	64
<b>5. KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>68</b>
5.1. Kesimpulan.....	68
5.2. Saran.....	69
<b>DAFTAR REFERENSI.....</b>	<b>70</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Perbedaan fasa padat, cair, gas dan plasma.....	7
Tabel 2.2. Karakteristik plasma DBD .....	11
Tabel 2.3. Warna plasma yang ditimbulkan setiap aliran gas .....	12
Tabel 2.4. Energi-energi foton dalam spektrum elektromagnetik .....	13
Tabel 2.5. Emisi CO <sub>2</sub> dari beberapa jenis bahan bakar .....	16
Tabel 2.6. Sifat fisika dan kimia karbon dioksida .....	17
Tabel 2.7. Emisi CO <sub>2</sub> tahunan beberapa negara di dunia .....	18
Tabel 2.8. Produksi radikal dan ion dari CO <sub>2</sub> dalam reaktor plasma non-termal	20
Tabel 2.9. Sifat fisika dan kimia air .....	21
Tabel 2.10. Produksi radikal dan ion dari H <sub>2</sub> O dalam reaktor plasma non-termal	21
Tabel 2.11. Reaksi antara CO <sub>2</sub> dan H <sub>2</sub> O dalam reaktor plasma.....	22
Tabel 2.12. Nilai utilitas energi yang diperoleh Guangyun <i>et al</i> (2003).....	24
Tabel 4.1. Hubungan tegangan yang diaplikasikan pada reaktor dengan fenomena yang teramati pada sumber listrik PLN.....	45
Tabel 4.2. Komposisi gas umpan dan produk hasil pengujian GC sumber listrik Inverter UPS .....	48
Tabel 4.3. Data konsumsi energi listrik reaktor pada pemakaian inverter UPS ..	48
Tabel 4.4. Hubungan jenis reaktor, aliran umpan dan waktu tinggal dalam tinggal dalam reaktor plasma DBD.....	56
Tabel 4.5. Tabel hasil perhitungan energy yield dan efisiensi energi untuk mengkonversi CO <sub>2</sub> .....	62
Tabel 4.6. Analisis komposisi aliran umpan dan produk pada penggunaan sumber listrik PLN.....	65
Tabel 4.7..... Data tegangan, arus, daya dan energi listrik utuk setiap reaktor pada penggunaan sumber listrik PLN .....	65

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Berbagai jenis partikel dan tumbukan pada ruang plasma .....	8
Gambar 2.2.	Konfigurasi dasar plasma jenis BDB .....	11
Gambar 2.3.	Peningkatan kandungan CO <sub>2</sub> di atmosfer .....	19
Gambar 2.4.	Hubungan konversi CO <sub>2</sub> dengan kelembaban reaktif umpan.....	23
Gambar 2.5.	Skema peralatan yang digunakan Guangyun dkk (2003).....	23
Gambar 3.1.	Diagram alir penelitian.....	26
Gambar 3.2.	Foto aki yang digunakan .....	28
Gambar 3.3.	Foto inverter UPS yang digunakan .....	28
Gambar 3.4.	Foto regulator tegangan yang digunakan .....	29
Gambar 3.5.	Foto <i>Neon Sign Transformer</i> yang digunakan.....	30
Gambar 3.6.	Alat ukur listrik .....	30
Gambar 3.7.	Instalasi sumber listrik pada reaktor plasma DBD.....	31
Gambar 3.8.	Selongsong <i>Acrylic</i> .....	32
Gambar 3.9.	Elektroda tegangan tinggi SS-316.....	32
Gambar 3.10.	Foto gelas Dielektrik yang digunakan.....	33
Gambar 3.11.	Pemasangan elektroda jala.....	33
Gambar 3.12.	Skema pola lubang <i>baffle</i> .....	34
Gambar 3.13.	Dua jenis <i>nipple</i> .....	35
Gambar 3.14.	Susunan reaktor peratan pada papan akrilik .....	36
Gambar 3.15.	Skema melintang reaktor plasma jenis pipa koaksial .....	36
Gambar 3.16.	Gambaran reaktor dan bagiannya .....	37
Gambar 3.17.	Skema aliran umpan dan peralatannya.....	39
Gambar 3.18.	Bubler .....	40
Gambar 3.19.	<i>Co Analyzer</i> .....	42
Gambar 3.20.	<i>H<sub>2</sub> Analyzer</i> .....	42
Gambar 4.1.	Terbentuknya bunga api yang menyebabkan retaknya reaktor dua (diameter 14 mm).....	50
Gambar 4.2.	Grafik hubungan waktu, laju alir dan konsentrasi CO pada reaktor 1 dan tegangan 4470 V dengan menggunakan alat uji detektor gas CO .....	52
Gambar 4.3.	Grafik hubungan waktu, laju alir dan konsentrasi CO pada reaktor 1 dan tegangan 6820 V dengan menggunakan alat uji detektor gas CO .....	53
Gambar 4.4.	Grafik hubungan laju alir, tegangan dan produksi CO pada reaktor satu .....	56
Gambar 4.5.	Grafik hubungan laju alir, tegangan dan konsentrasi CO pada reaktor dua .....	57
Gambar 4.6.	Grafik hubungan laju alir, tegangan dan konversi CO <sub>2</sub> pada reaktor satu .....	57
Gambar 4.7.	Grafik hubungan laju alir, tegangan dan konversi CO <sub>2</sub> pada reaktor dua.....	58
Gambar 4.8.	<i>Discharge gap</i> dalam reaktor.....	59
Gambar 4.9.	Grafik hubungan tegangan, jenis reaktor dan produksi gas CO pada laju alir 500 cc/menit.....	60

Gambar 4.10. Grafik hubungan tegangan, jenis reaktor dan produksi gas CO <sub>2</sub> pada laju alir 1500 cc/menit.....	60
Gambar 4.11. Grafik hubungan tegangan, jenis reaktor dan konversi gas CO <sub>2</sub> laju alir 500 cc/menit .....	61
Gambar 4.12. Grafik hubungan tegangan, jenis reaktor dan konversi gas CO <sub>2</sub> laju alir 1500 cc/menit.....	61
Gambar 4.13. Grafik hubungan <i>energy yield</i> , laju alir dan tegangan pada reaktor satu .....	62
Gambar 4.14. Grafik hubungan efisiensi energi, laju alir dan tegangan pada reaktor dua.....	63
Gambar 4.15. Grafik hubungan efisiensi energi, laju alir dan tegangan pada reaktor satu .....	63
Gambar 4.16. Grafik hubungan efisiensi energi, laju alir dan tegangan Pada reaktor dua.....	64
Gambar 4.17. Grafik hubungan produksi gas CO <sub>2</sub> dengan jenis sumber listrik yang diterapkan pada laju alir 500 cc/menit dan tegangan 4470 V.....	65
Gambar 4.18. Grafik hubungan konversi CO <sub>2</sub> dengan jenis sumber listrik yang diterapkan pada laju alir 500 cc/menit dan tegangan 4470 V.....	66
Gambar 4.19. Grafik hubungan <i>energi yield</i> dengan jenis sumber listrik yang diterapkan pada laju alir 500 cc/menit dan tegangan 4470 V.....	67
Gambar 4.20. Grafik hubungan efisiensi energi dengan jenis sumber listrik yang diterapkan pada laju alir 500 cc/menit dan tegangan 4470 V.....	67



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Pengurangan gas rumah kaca menjadi agenda yang sangat penting dalam isu pemanasan global. Kontributor rumah kaca dewasa ini ialah gas karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), gas metana ( $\text{CH}_4$ ), dinitrogen oksida ( $\text{N}_2\text{O}$ ), karbon monoksida ( $\text{CO}$ ), nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ), dan sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) (Wikipedia, 2009). Karbon Dioksida, yang merupakan produk pembakaran senyawa organik, mendominasi emisi gas rumah kaca ke atmosfer dengan persentase sebesar 57%. Sumber emisi tersebut antara lain pelepasan gas buang kendaraan bermotor, limbah industri, pembukaan areal hutan dan aktifitas metabolisme makhluk hidup.

Penanganan gas rumah kaca sejauh ini, terutama gas karbon dioksida, lebih banyak berfokus kepada pereduksian pelepasan ke udara (Istadi, 2006) melalui efisiensi pemakaian bahan bakar, belum banyak dilakukan penanganan yang lebih komersil yaitu dengan mengubahnya menjadi bahan kimia yang bermanfaat (Liu *et al.*, 2006). Jika gas  $\text{CO}_2$  dapat digunakan kembali, efek rumah kaca dapat dicegah dan berbagai senyawa kimia bermanfaat dapat diperoleh. Saat ini, banyak studi yang telah dilakukan untuk menyelidiki penggabungan gas  $\text{CO}_2$  untuk menghasilkan senyawa karbon rantai rendah seperti  $\text{CH}_4$ ,  $\text{HCHO}$ , dan  $\text{C}_2\text{H}_6$  (Guangyun *et al.*, 2003), begitu pula dengan konversi gas  $\text{CO}_2$  menjadi gas  $\text{CO}$  dan  $\text{H}_2$ . Produk seperti gas  $\text{CO}$  dapat dimanfaatkan menjadi bahan baku produk kimia dan gas  $\text{H}_2$  merupakan sumber energi ramah lingkungan yang dipercaya sebagai sumber energi manusia di masa depan menggantikan bahan bakar fosil.

Beberapa teknologi reaktor konvensional telah diusulkan untuk konversi  $\text{CO}_2$  menjadi senyawa kimia yang lebih bermanfaat, tetapi terkendala oleh tingkat konversinya yang sangat rendah (sekitar 5.7%) dan konsumsi energi yang tinggi, walaupun selektifitasnya sudah cukup baik (sekitar 70-80%) (Istadi, 2006). Oleh karena itu, potensi teknologi non-konvensional seperti reaktor plasma harus

dimanfaatkan dalam kasus ini. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh beberapa peneliti di dunia, ditemukan bahwa teknologi reaktor plasma dapat digunakan untuk konversi kimia pada temperatur rendah bahkan dalam temperatur ruangan (Yamamoto *et al.*, 2004).

Salah satu jenis reaktor plasma yang banyak dikembangkan saat ini adalah jenis *dielectric-barrier discharge* (DBD), yang telah dikenal selama lebih dari satu abad. Investigasi eksperimental pertama dilaporkan oleh Siemens tahun 1857, yang berkonsentrasi pada generasi ozon. Konfigurasi dasar dari reaktor plasma DBD ialah terdapatnya dua buah elektoda yang dialiri listrik tegangan tinggi, dengan menyisipkan material dielektik diantara elektoda tersebut. Ketebalan dan besarnya konstanta dielektrik menentukan jumlah arus listrik yang dapat dilewatkan melalui dielektrik. Dielektrik tersebut mendistribusikan discas mikro ke seluruh permukaan elektoda disamping untuk menjamin tidak ada *spark* atau *arc* di dalam ruang discas. Keuntungan penggunaan reaktor plasma jenis DBD adalah bahwa energi rata-rata elektron dapat diatur dengan mengubah densitas gas dan jarak antar elektoda (Istadi, 2006). Reaktor plasma jenis DBD sangat potensial untuk reaksi-reaksi kimia organik maupun anorganik karena sifat non-equilibrium, tenaga input rendah, serta kemampuan mempengaruhi reaksi kimia dan fisika pada temperature yang relatif rendah.

Dalam penelitian kali ini diusulkan penggunaan reaktor plasma non-termal jenis *dielectric-barrier discharge* (DBD) untuk konversi karbon dioksida dengan keberadaan sedikit air. Reaktor dirancang untuk menghasilkan plasma dingin non-equilibrium. Konfigurasi reaktor berbentuk *shell and tube* dengan volume 1 L, bagian shell terbuat dari akrilik dan bagian *shell*, yang juga berfungsi sebagai dielektik, terbuat dari kaca borosilikat. Elektroda yang digunakan ialah *stainless steel* berbentuk batang dan jala. Pada penelitian ini juga akan diuji beberapa parameter perancangan reaktor seperti pengaruh ukuran dielektrik kaca reaktor (ukuran *discharge gap*), waktu tinggal umpan, besar tegangan dan daya yang diaplikasikan, dan pengaruh sumber listrik yang digunakan.

## 1.2. Perumusan Masalah

Masalah penting yang diidentifikasi dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana rancang bangun reaktor plasma non-termal jenis DBD untuk konversi gas CO<sub>2</sub> dengan keberadaan sedikit air menjadi senyawa kimia yang lebih bermanfaat.
2. Apa saja produk yang diperoleh dari pengolahan gas CO<sub>2</sub> menggunakan plasma non-termal jenis DBD.
3. Bagaimana pengaruh variasi kondisi operasi, seperti laju alir umpan, tegangan yang diaplikasikan, jenis sumber listrik yang digunakan, dan ukuran *discharge gap*, terhadap konversi gas CO<sub>2</sub>.

## 1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian yang diusulkan dalam proposal ini, pada prinsipnya adalah suatu kegiatan rancang-bangun dari suatu alat pengolah gas karbon dioksida dan uap air dengan teknik plasma non termal. Oleh karena itu, tujuannya adalah:

1. Mendapatkan suatu prototipe Reaktor Plasma DBD dengan menggunakan sumber-sumber listrik AC, yaitu PLN dan inverter UPS, sebagai sumber energinya.
2. Menguji unjuk kerja dari reaktor tersebut dalam mengkonversi gas karbon dioksida dengan keberadaan sedikit air dengan melakukan analisis terhadap produk hasil reaksi.
3. Menganalisa pengaruh variasi kondisi operasi, seperti laju alir umpan, tegangan yang diaplikasikan, jenis sumber listrik yang digunakan, dan ukuran *discharge gap*, terhadap konversi gas CO<sub>2</sub>.



#### 1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk pengembangan tahapan penelitian berikutnya atau aplikasi lebih lanjut serta menemukan kondisi operasi reaktor plasma DBD untuk pengolahan CO<sub>2</sub> yang optimal.

#### 1.5. Batasan Penelitian

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Umpan hanya terdiri dari gas karbon dioksida dan sedikit uap air
2. Penelitian menghasilkan plasma non-termal dengan menggunakan sumber listrik PLN 220 V dan inverter UPS yang diubah menjadi listrik bolak-balik tegangan tinggi dengan menggunakan trafo tegangan tinggi.
3. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses Departemen Teknik Kimia UI, pada suhu dan tekanan atmosfer.
4. Parameter yang diselidiki ialah pengaruh ukuran reaktor, waktu tinggal umpan, besar *discharge gap*, besar tegangan dan daya yang diaplikasikan, dan pengaruh sumber listrik yang digunakan terhadap kinerja reaktor plasma DBD untuk pengolahan CO<sub>2</sub>.

#### 1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang dilakukan dalam penulisan skripsi ini adalah :

##### BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang penulisan masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan makalah

##### BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi literatur-literatur yang mengandung teori yang berhubungan dengan rancang bangun “prototipe” reaktor plasma DBD untuk

mengkonversi gas CO<sub>2</sub> dengan keberadaan air menjadi senyawa kimia yang lebih bermanfaat

### BAB 3 METODE PENELITIAN

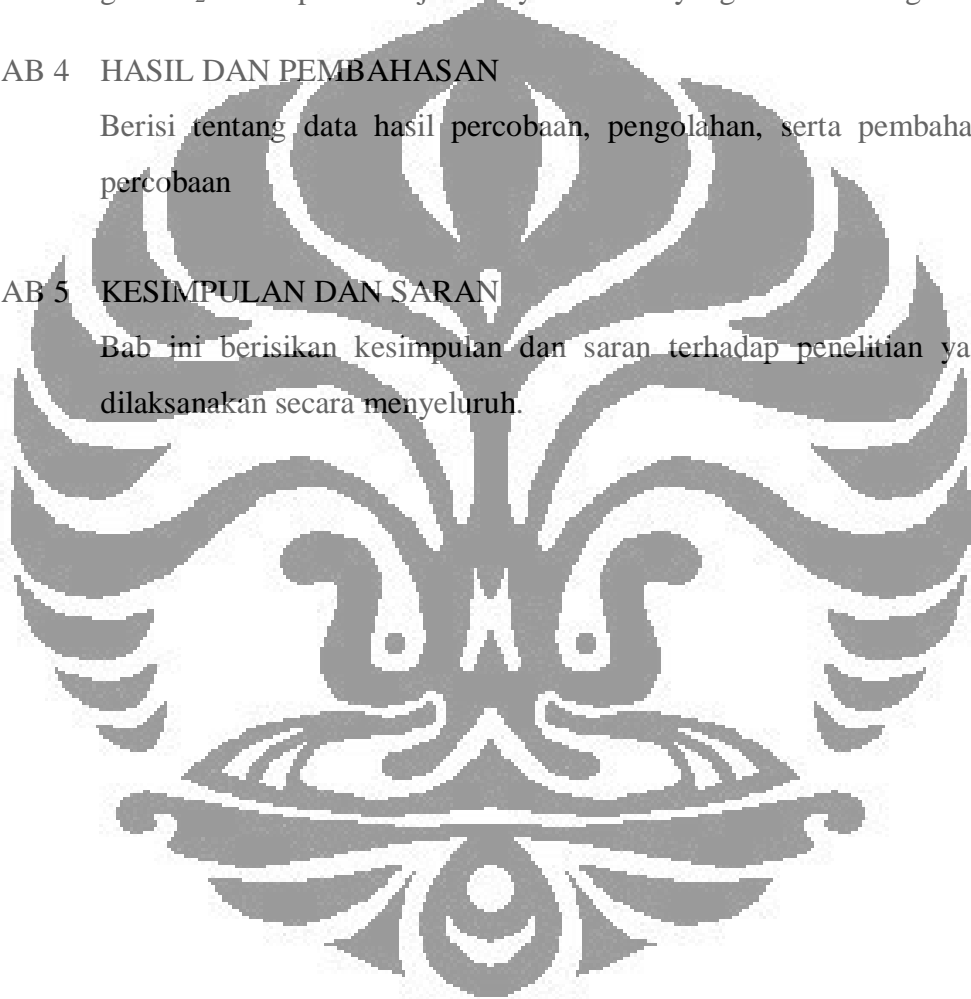
Bab ini berisi metode, alat, dan prosedur yang akan digunakan rancang bangun reaktor plasma DBD dan pengoperasiannya untuk mengkonversi gas CO<sub>2</sub> dan uap air menjadi senyawa kimia yang lebih berharga

### BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang data hasil percobaan, pengolahan, serta pembahasan dari percobaan

### BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan kesimpulan dan saran terhadap penelitian yang telah dilaksanakan secara menyeluruh.



## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

Semua zat berubah dari padat menjadi cair, dan dari cair ke gas ketika energi atau panas ditambahkan. Perubahan ini disebut perubahan fasa dan terjadi pada temperatur konstan. Ketika energi ditambahkan ke dalam gas, elektron akan terlepas dari partikel netral dan menjadi ion. Keadaan di mana banyak ion dan elektron yang bercampur disebut "plasma" seperti yang terlihat dalam Gambar 2.1. Perubahan dari gas menjadi plasma didasarkan pada reaksi ionisasi. Energi yang dibutuhkan untuk reaksi berada dalam kisaran 1-50 eV, yang jauh lebih banyak daripada energi panas laten yang dibutuhkan pada perubahan fasa (0,01 eV). Oleh karena itu, perubahan dari gas menjadi plasma tidak sepenuhnya diklasifikasikan ke dalam perubahan fasa. Namun, plasma sering disebut keadaan keempat materi, dimana padat, cair, dan gas adalah keadaan-keadaan lain dari suatu zat (Yamamoto *et al.*, 2004). Pada Tabel 2.1 diperlihatkan perbedaan antara fasa padat, cair, gas dan plasma.

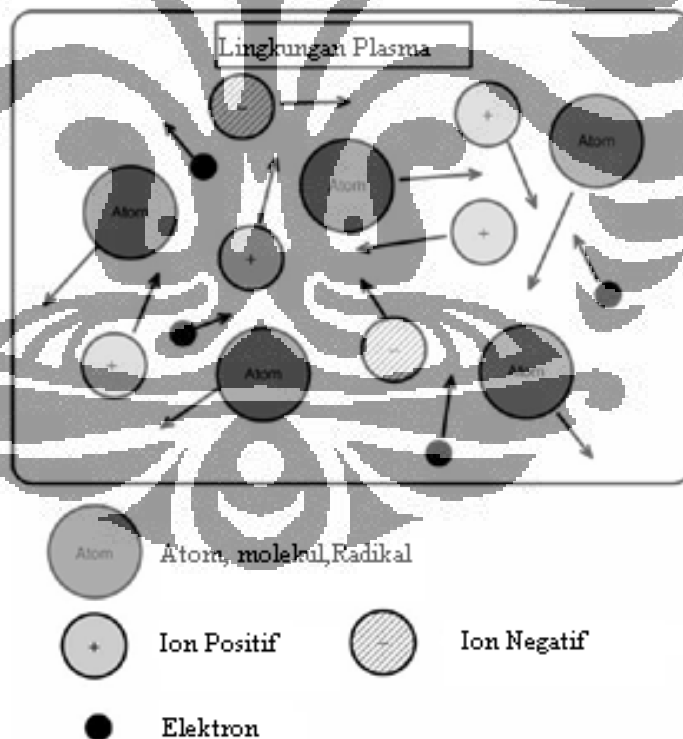
Plasma secara umum didefinisikan sebagai ionisasi gas yang secara makroskopik bermuatan netral (memiliki jumlah kerapatan ion  $n_i$  sama dengan jumlah kerapatan elektron  $n_e$ ). Keduanya, ion dan partikel elektron dalam plasma digerakkan oleh energi panas. Secara khusus, elektron memiliki kecepatan yang jauh lebih besar dari partikel lain karena mobilitas yang besar dan massa mereka yang kecil.

Plasma ada di alam sekitar kita dalam berbagai bentuk seperti petir, matahari, aurora, ionosfer, bintang, dan juga di lingkungan manusia, seperti pengelasan listrik, mesin lucutan listrik, *pale light* di *pantograph* kereta api, api, lampu *fluorescent*, dan lampu neon. (Wikipedia, 2009)

**Tabel 2.1.** Perbedaan fasa padat, cair, gas dan plasma

	Padat	Cair	Gas	Plasma
Fasa	Memiliki bentuk dan volume tertentu	Fase dengan bentuk tidak jelas namun memiliki volume tertentu	Volume dan bentuknya tidak jelas	Volume dan bentuknya tidak jelas
Partikel pembentuk	Tersusun dalam jarak paling dekat (kompak)	Tersusun dalam jarak agak renggang	Tersusun dalam jarak paling renggang	Tersusun dari gas-gas yang terionisasi
Kemampuan berpindah	Tidak dapat berpindah dengan bebas	Dapat berpindah dengan bebas	Dapat berpindah dengan bebas	Tercipta karena adanya perpindahan muatan listrik
Energi pergerakan	Rendah	Lebih tinggi daripada padatan	Tinggi	Sangat tinggi
Perubahan bentuk	Dapat dilakukan secara paksa	Terjadi berdasarkan bentuk wadahnya	Terjadi berdasarkan wadah dan kontainernya	Bentuknya tidak jelas
Suhu	$< 0^{\circ}\text{C}$	$0 < T < 100^{\circ}\text{C}$	$T > 100^{\circ}\text{C}$	$T > 10.000^{\circ}\text{C}$

Sumber: Lieberman *et al.* (1994)

**Gambar 2.1.** Berbagai jenis partikel dan tumbukan pada ruang plasma

Sumber: Yamamoto *et al.* (2004) (telah diolah kembali)

## 2.1. Definisi Karakteristik Dasar Plasma Non-termal

### 2.1.1. Jenis Plasma

Plasma dapat diklasifikasikan berdasarkan perbandingan antara suhu gas plasma  $T_g$  dengan suhu pembakaran ( $T \approx 1000^\circ\text{C}$ ) (Meichsner, 2005).

#### a. Plasma termal.

Plasma jenis ini memiliki 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. Densitas jumlah elektron yang tinggi akan menyebabkan frekuensi tumbukan elastis yang sangat tinggi dan kesetimbangan termal tercapai dengan cepat pada kondisi operasi tekanan atmosferik. Contoh plasma termal adalah plasma dari arus DC atau frekuensi radio (RF) (Kogelschatz, 2003).

#### b. Plasma non-termal.

Plasma ini memiliki 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 menyebabkan peningkatan entalpi gas yang cukup besar. Hasilnya, suhu elektron jauh melampaui suhu partikel-partikel berat dan karenanya memungkinkan untuk mempertahankan suhu keluaran (*discharge*) pada suhu yang jauh lebih rendah, bahkan pada suhu ruang.

Plasma non-termal menghasilkan spesi-spesi aktif yang lebih beragam, dan atau lebih besar energinya dibandingkan dengan spesi yang biasa dihasilkan pada reaktor kimia. Keberadaan spesi-spesi aktif ini memungkinkan dilakukannya proses pada permukaan material yang tidak dapat dilakukan dengan cara lain atau tidak praktis atau tidak ekonomis jika dilakukan dengan metode lain. Aplikasinya ialah modifikasi permukaan lokal, karena ion, atom dan molekul tetap relatif dingin dan tidak menyebabkan kerusakan termal pada permukaan yang disentuh. Plasma jenis ini dihasilkan dalam berbagai jenis discharge pijar (*glow discharge*), *discharge* RF (*radio frequency*) tekanan rendah dan *corona discharge*, yang

mempunyai densitas energi berkisar antara  $10^{-4}$  hingga puluhan watt per  $\text{cm}^{-3}$  (Roth, 2001).

Dalam hubungan antara temperatur gas ( $T_g$ ), ion ( $T_i$ ), dan elektron ( $T_e$ ), plasma dapat diklasifikasikan lagi menjadi dua jenis (Chen, 1974):

- a. Plasma setimbang. Apabila temperatur elektron ( $T_e$ ) sama dengan temperatur gas ( $T_g$ ) dan temperatur ion ( $T_i$ ). Sebagai contoh, plasma termal *arc discharge* pada tekanan atmosferik.
- b. Plasma tidak setimbang. Apabila temperatur elektron ( $T_e$ ) lebih besar dari temperatur gas ( $T_g$ ) dan temperatur ion ( $T_i$ ). Sebagai contoh, plasma *glow discharge* bertekanan rendah, plasma pulsa tegangan tinggi bertekanan atmosferik.

Plasma yang berada dalam keadaan kesetimbangan termal sepenuhnya jika memenuhi lima syarat berikut (Nicholson, 1986):

- a. Distribusi energi partikel mengikuti distribusi Maxwell-Boltzmann. Nilai rata-rata dari distribusi energi didefinisikan sebagai temperatur plasma.
- b. Temperatur setiap partikel yang setara dan sama dengan temperatur plasma.
- c. Keadaan eksitasi dekat dengan distribusi Boltzmann.
- d. Kerapatan jumlah partikel menjadi reaksi keseimbangan komposisi.
- e. Gelombang elektromagnetik dianggap sebagai radiasi benda hitam.

Selain dua hal di atas, plasma juga dapat diklasifikasikan berdasarkan derajat ionisasi. Derajat ionisasi didefinisikan sebagai kepadatan jumlah ion dibagi dengan jumlah partikel netral.

- a. Plasma terionisasi sempurna: Derajat ionisasi adalah  $> 90\%$ . Partikel netral memiliki sedikit efek pada plasma. Contoh: reaksi fusi nuklir.
- b. Plasma terionisasi lemah: Derajat ionisasi adalah  $< 1\%$ . Efek elektron dominan.
- c. Plasma terionisasi sebagian: Memiliki karakter campuran dari plasma terionisasi sepenuhnya dan plasma terionisasi lemah.

Ionisasi sering disebabkan oleh benturan partikel kecepatan tinggi dan partikel netral. Proses ini disebut reaksi ionisasi. Reaksi ionisasi utama ditampilkan dalam Persamaan 2.1 sampai 2.6.

- a. Ionisasi oleh tabrakan elektron)



- b. Ionisasi oleh tabrakan ion



- c. Ionisasi oleh partikel netral



- d. Ionisasi oleh foton



- e. Ionisasi oleh atom tereksitasi



- f. Ionisasi oleh pelekatan elektron



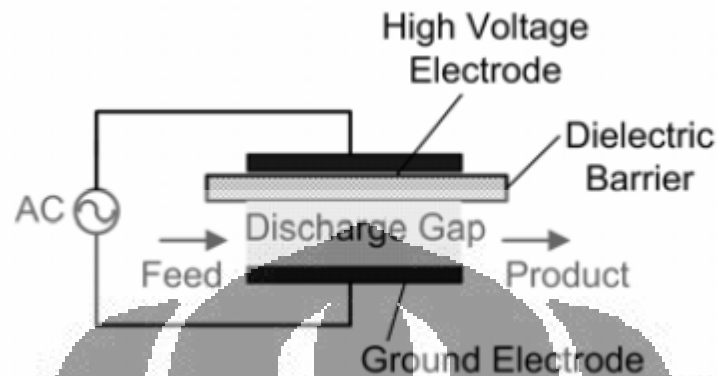
### 2.1.2. Karakteristik Plasma dan Aplikasinya

Plasma berbeda dari gas biasa yang tidak terionisasi yang berdampak beberapa hal berikut (Nicholson, 1986):

- Aktivasi kimia sangat tinggi. Plasma sangat mudah menghasilkan radikal ketika gas dimasukkan ke dalamnya, yang mendorong reaksi kimia agar lebih mudah terjadi. Bidang plasma kimia, plasma untuk perlindungan lingkungan, dan *Chemical Vapor Deposition* (CVD) memanfaatkan karakteristik ini.
- Mengantarkan listrik. Arus listrik bisa dihantarkan melalui plasma karena banyak partikel-partikel bermuatan listrik yang terdapat dalam plasma, seperti ion dan elektron. Dengan menggunakan fitur ini, parameter plasma dapat dikontrol dan plasma dapat dipanaskan hingga suhu tinggi.
- Energi tinggi dan suhu tinggi (gas atau elektron). Plasma dengan suhu  $10\text{-}100 \times 10^6 \text{ }^\circ\text{C}$  akan menghasilkan reaksi fusi nuklir. Diharapkan bahwa jenis sumber energi ini dapat digunakan pada abad 21. Di daerah suhu yang lebih rendah, plasma ini digunakan dalam pengolahan mekanis seperti pengelasan plasma, pemotongan, *electrical discharge machining*, plasma *spraying*, dan sebagainya.
- Radiasi elektromagnetik dan emisi cahaya. Banyak jenis gelombang elektromagnetik kuat dipancarkan dari plasma karena temperatur ionisasi yang tinggi. Hal ini dapat digunakan sebagai sumber cahaya, sebuah layar elektronik, dan analisis optik.

## 2.2. Dielectric Barrier Discharge (DBD)

Konfigurasi dasar reaktor plasma jenis DBD dapat dilihat di Gambar 2.2, sedangkan karakteristik discas non-termal dapat dilihat di Tabel 2.2.



Gambar 2.2. Konfigurasi dasar plasma jenis DBD

Sumber: Istadi (2006)

Tabel 2.2. Karakteristik plasma DBD

Parameter	DBD
Tekanan (Bar)	1
Medan Listrik (kV/cm)	0.1 – 100
Energi elektron (eV)	1 – 10
Suhu Elektron (K)	10.000 – 100.000
Densitas Elektron ( $\text{cm}^{-3}$ )	$10^{14}$
Derajat ionisasi	$10^{-4}$

Sumber: Istadi (2006) (telah diolah kembali)

Ketebalan dan besarnya konstanta dielektrik menentukan jumlah arus listrik yang dapat dilewatkan melalui dielektrik. Dalam beberapa aplikasi, dielektrik tersebut membatasi densitas arus rata-rata di dalam ruang gas. Dielektrik tersebut mendistribusikan discas mikro ke seluruh permukaan elektroda disamping untuk menjamin tidak ada *spark* atau *arc* di dalam ruang discas. Salah satu keuntungan plasma reaktor jenis DBD adalah bahwa energi rata-rata elektron dapat diatur dengan mengubah densitas gas dan jarak antar elektroda

Reaktor plasma jenis DBD menghasilkan plasma dengan jenis non-termal dan tidak setimbang, Disebut plasma tidak setimbang karena temperatur gas



adalah temperatur kamar sedangkan temperature elektron dapat mencapai  $10^4 - 10^5$  K dalam *dielectric-barrier discharge*. Pemecahan gas (gas *breakdown*) menghasilkan elektron-elektron yang dipercepat oleh medan listrik membentuk plasma. Discas elektrik dapat dihasilkan dengan beberapa cara tergantung kepada jenis voltase dan spesifikasi reaktor yang digunakan. Dalam reaktor plasma elektron berenergi tinggi bertumbukan dengan molekul-molekul gas menghasilkan eksitasi, ionisasi, dan pembentukan atom-atom dan senyawa metastabil. Jika medan listrik di dalam zona discas cukup untuk memecahkan ikatan kimia gas maka akan terlihat discas mikro dalam jumlah yang banyak. Selanjutnya atom-atom aktif dan senyawa metastabil akan bertumbukan dengan molekul-molekul sehingga akan terjadi reaksi kimia. Tumbukan antara elektron-elektron berenergi tinggi dengan molekul-molekul gas menghasilkan eksitasi, disosiasi, atau ionisasi tanpa menyebabkan pemanasan terhadap gas, sehingga temperature bulk gas selalu rendah dan tidak berkeseimbangan dengan temperatur elektron.

Tabel 2.3. Warna plasma yang ditimbulkan setiap aliran gas

Gas yang mengalir	Warna plasma yang timbul
CF <sub>4</sub>	Biru
Cl <sub>2</sub>	Hijau keputihan
CCl <sub>4</sub>	Hijau keputihan
H <sub>2</sub>	Merah muda (pink)
O <sub>2</sub>	Kuning pucat
Br <sub>2</sub>	Kemerahan
He	Merah menuju ungu
Ne	Merah bata
Ar	Merah tua
N <sub>2</sub>	Merah menuju kuning
Xe	Biru keputihan atau biru keabu-abuan yang agak buram
CO <sub>2</sub>	Keputihan atau biru-putih yang cukup terang
Udara	Ungu kemerahmudaan dan makin cerah jika arus bertambah
Gas campuran Ar-N <sub>2</sub>	Merah muda atau orange keputihan atau keabu-abuan. Berwarna lavender pada arus rendah. Di ujungnya berwarna biru-ungu-lavender

Eksitasi gas ini menghasilkan fenomena yang menjadi tanda terbentuknya plasma, yaitu emisi cahaya dalam spektrum sinar tampak. Emisi ini terjadi akibat gas yang tereksitasi kemabali ke keadaan elektronik dasarnya dengan melepaskan energi (Oxtoby *et al.*, 2003). Tabel 2.3 menyajikan emisi spektrum sinar tampak dari beberapa senyawa kimia.

### 2.3. Spesi Aktif dalam Lingkungan Plasma Non-Termal

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

#### 2.3.1. Foton

Foton dihasilkan dalam spektrum panjang gelombang yang luas pada spektrum elektromagnetik seperti yang dituliskan pada Tabel 2.3. Dalam spektrum elektromagnetik infra merah, energi foton infra merah terlalu rendah untuk berinteraksi dengan gas kerja dan membangkitkan radiasi dari plasma. Foton jenis ini mengandung energi di bawah 1,7 eV.

Tabel 2.4 Energi-energi foton dalam spektrum elektromagnetik

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

Sumber: Roth (2001)

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

potongan-potongan molekular yang lebih kecil.

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

- a. Disosiasi, menghasilkan sebuah atom individual atau potongan molekular kecil dari molekul yang lebih besar, seperti polimer.
- b. Pengguntingan, memecah rantai molekular polimer; atau menghasilkan dua potongan molekular besar dari sebuah molekul induk.
- c. Pencabangan, menghasilkan rantai-rantai sisi pada sebuah molekul besar atau polimer.
- d. *Crosslinking*, yang menghasilkan matriks molekular dua atau tiga dimensi dengan membentuk ikatan-ikatan antara molekul-molekul atau polimer yang berdekatan.

### 2.3.2. Spesi Netral

Melalui tumbukan elektron netral dan reaksi kimia dalam plasma, plasma dapat menghasilkan beberapa jenis spesi-spesi netral aktif yang mempunyai energi dan mampu berinteraksi dengan permukaan. Spesi-spesi netral tersebut diantaranya adalah:

- a. Atom-atom reaktif
- b. Spesi-spesi atomik yang sangat reaktif secara kimiawi seperti H, O, F, Cl, dan lain-lain
- c. Monomer yang membentuk cabang-cabang polimerik pada permukaan yang disentuhnya
- d. Potongan-potongan molekular yang relatif ringan, yang dapat membentuk senyawa kompleks pada permukaan dan atau mendorong pencabangan atau *cross-linking* molekul-molekul yang dekat permukaan
- e. Atom tereksitasi atau kondisi molekular, dimana eksitasi elektron orbital

membuat spesi-spesi menjadi lebih reaktif secara kimiawi daripada keadaan normal

- f. Radikal bebas, potongan molekular yang dihasilkan dalam plasma dengan sekurang-kurangnya satu elektron yang tidak berpasangan.

### 2.3.3. Partikel-partikel bermuatan

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

Partikel-partikel bermuatan yang dihasilkan dari plasma diantaranya elektron yang dihasilkan dalam plasma oleh ionisasi tumbukan elektron netral, yang biasanya mempunyai suhu kinetika 1-10 eV. Elektron-elektron ini mencapai permukaan dalam jumlah yang sama dengan fluks ion jika permukaan tersebut adalah insulator. Ion-ion dapat positif atau negatif, namun hampir selalu positif dalam *discharge* pijar vakum dimana kemungkinan perlekatan kecil.

Ion-ion positif dihasilkan oleh ionisasi dan pertukaran muatan. Ion-ion negatif dihasilkan dalam jumlah yang signifikan pada plasma tekanan atmosferik dengan perlekatan elektron. Proses ini tidak disukai pada kondisi vakum, karena pembentukan ion negatif adalah sebuah proses tiga badan (*three body recombination*). Ion-ion molekular dapat juga dihasilkan seperti potongan molekular bermuatan seperti  $\text{OH}^-$ , yang dapat mengalami reaksi kimia kuat dalam plasma atau pada permukaan.

### 2.4. Gas Rumah Kaca

Gas rumah kaca adalah gas-gas dalam yang menyerap dan memancarkan radiasi inframerah termal. Proses ini adalah dasar penyebab efek rumah kaca. Gas rumah kaca utama di atmosfer bumi adalah uap air, gas karbon dioksida, gas metana, gas  $\text{NO}_x$ , dan ozon. Dalam sistem tata surya kita, atmosfer Venus, Mars dan Titan juga mengandung gas-gas yang menyebabkan efek rumah kaca. Gas rumah kaca sangat mempengaruhi suhu bumi, tanpa mereka permukaan bumi rata-rata sekitar  $15\text{ }^\circ\text{C}$  ( $59\text{ }^\circ\text{F}$ ) lebih dingin daripada sekarang.

Kontribusi pada efek rumah kaca dipengaruhi oleh karakteristik dari gas dan kelimpahannya (Wikipedia, 2009). Sebagai contoh, pada metana adalah gas rumah kaca yang delapan kali lebih kuat daripada karbon dioksida, tetapi hadir dalam konsentrasi yang jauh lebih kecil sehingga total kontribusi lebih kecil. Ketika gas ini digolongkan oleh kontribusi mereka terhadap efek rumah kaca, yang paling penting adalah:

- a. Karbon dioksida, yang menyumbang 9-26%
- b. Metana, yang memberikan kontribusi 4-9%
- c. Uap air, yang menyumbang 36-72%
- d. Ozon, yang memberikan kontribusi 3-7%

#### 2.4.1. Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>)

Karbon dioksida (rumus kimia CO<sub>2</sub>) adalah senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen pada satu atom karbon. Berwujud gas pada suhu dan tekanan standar dan hadir di Atmosfer bumi pada keadaan ini ini. Gas CO<sub>2</sub> terdeteksi hanya sebesar 0,038% dalam atmosfer.

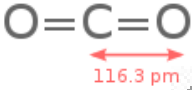
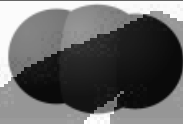
Table 2.5. Emisi CO<sub>2</sub> dari beberapa jenis bahan bakar

Bahan Bakar	Emisi CO <sub>2</sub> (lbs/10 <sup>6</sup> Btu)
Gas Alam	117
LPG	139
Propana	139
<i>Aviation gasoline</i>	153
Bensin otomotif	156
Minyak tanah	159
Minyak bakar	161
<i>Tires derived fuel</i>	189
Kayu dan limbah kayu	195
Batu bara ( <i>bituminous</i> )	205
Batu bara ( <i>subbituminous</i> )	213
Batu bara ( <i>lignite</i> )	215
Jelaga	225
Batu bara ( <i>anthracite</i> )	227

Sumber: [www.en.wikipedia.org](http://www.en.wikipedia.org) (2009)

Karbon Dioksida dihasilkan sebagai produk sampingan dari pembakaran bahan bakar fosil atau pembakaran materi organik. Tabel 2.5 menyajikan data emisi CO<sub>2</sub> beberapa jenis bahan bakar organik. Selain itu, sejumlah kecil karbon Dioksida dihasilkan dari gunung berapi dan proses panas bumi seperti udara panas dan sumber mata air panas dan penguraian kerak karbonat dalam batu.

**Tabel 2.6** Sifat fisika dan kimia karbon dioksida

Karbon Dioksida	
	
Nama IUPAC	Karbon Dioksida
Nama lain	Gas asam karbonat; karbonat anhidrida; es kering (padat)
Rumus	CO <sub>2</sub>
Massa molar	44,010 gr/mol
Penampilan	gas tidak berwarna, gas tak berbau
Kepadatan	1,562 g / mL (padatan pada 1 atm dan -78,5 °C) 0,770 g / mL (cair pada 56 atm dan 20 °C) 1,977 g / L (gas pada 1 atm dan 0 °C) 849,6 g / L (cairan superkritis pada 150 atm dan 30 °C)
Titik lebur	-78 °C, 194,7 K, -109 °F (subl. )
Titik didih	-57 °C, 216,6 K, -70 °F (at 5,185 bar)
Kelarutan dalam air	1,45 g / L pada 25 °C, 100 kPa
Keasaman (pK <sub>a</sub> )	6,35 (10,33)
Viscosity	0,07 cP pada -78 °C
Bentuk molekul	Linier

Sumber: [www.en.wikipedia.org](http://www.en.wikipedia.org) (2009).

Karbon dioksida adalah gas tidak berwarna dan tidak berbau pada konsentrasi rendah. Pada konsentrasi yang lebih tinggi berbau tajam dan asam. Larutan CO<sub>2</sub> bersifat asam dan hadir dalam bentuk senyawa bikarbonat. CO<sub>2</sub> beracun dalam konsentrasi yang tinggi. Pada konsentrasi 1% (10.000 ppm) akan membuat orang merasa mengantuk. Konsentrasi dari 7% sampai 10% menyebabkan pusing, sakit kepala, disfungsi visual dan pendengaran, dan tidak sadar hingga kematian. CO<sub>2</sub> sering menyebabkan kematian pada orang yang tidur

di ruangan tertutup ber-AC karena terjadi penumpukan kandungan CO<sub>2</sub> dalam ruangan, tanpa disadari oleh korban. Tabel 2.6 menyajikan sifat fisika dan kimia karbon dioksida.

Gas karbon dioksida merupakan salah satu kontributor rumah kaca. Secara alamiah, kandungan gas CO<sub>2</sub> dalam jumlah kecil di udara dibutuhkan untuk menjaga suhu bumi agar tetap stabil, namun jika terdapat dalam jumlah yang besar akan menyebabkan suhu bumi menjadi lebih tinggi daripada saat ini. Kenaikan beberapa derajat dari suhu bumi akan sangat berbahaya karena akan mencairkan es di kutub-kutub bumi, sehingga menenggelamkan kota-kota besar dunia seperti New York, Amsterdam, dan Jakarta.

Tabel 2.7. Emisi CO<sub>2</sub> tahunan beberapa negara di dunia

Ranking	Negara	Emisi CO <sub>2</sub> (Metrik ton/tahun)	Persentase emisi total
	Dunia	28.431.741	99,0 %
1	China	6.103.493	21,5 %
2	Amerika Serikat	5.752.289	20,2 %
-	Uni Eropa	3.914.359	13,8 %
3	Russia	1.564.669	5,5 %
4	India	1.510.351	5,3 %
5	Jepang	1.293.409	4,6 %
6	Jerman	805.090	2,8 %
7	Inggris	568.520	2,0 %
8	Kanada	544.680	1,9 %
9	Korea Selatan	475.248	1,7 %
10	Italia	474.148	1,7 %
19	Indonesia	333.483	1,2 %

Sumber: [www.en.wikipedia.org](http://www.en.wikipedia.org) (2009)

Sebenarnya alam mempunyai mekanisme untuk menjaga keseimbangan karbon di alam, dikenal dengan siklus karbon. Siklus ini melibatkan samudra sebagai tempat penyimpanan karbon. Ada sekitar 50 kali lebih banyak karbon yang terlarut dalam samudera dalam bentuk CO<sub>2</sub> dan asam karbonat, bikarbonat dan karbonat ion dibandingkan dengan yang ada di atmosfer. Sebagai hasil dari keseimbangan ini, konsentrasi gas karbon dioksida atmosfer tetap antara 260 sampai 280 ppm pada 10.000 tahun antara akhir zaman glasial terakhir dan awal era industri. Namun siklus ini terganggu semenjak dimulainya revolusi industri. Pelepasan CO<sub>2</sub> dalam jumlah besar ke udara tidak bisa diimbangi dengan penyerapan oleh lautan, sehingga terjadi peningkatan konsentrasi gas CO<sub>2</sub> di udara. Pengukuran konsentrasi, dapat gas karbon dioksida di atmosfer saat ini, dapat dilihat pada Gambar 2.3, 100 ppm lebih tinggi dari tingkat pra-industri (Wikipedia, 2009). Daftar penyumbang emisi CO<sub>2</sub> terbesar di dunia disajikan dalam Tabel 2.7.



**Gambar 2.3** Peningkatan kandungan CO<sub>2</sub> di atmosfer

Sumber: [www.CO2now.com](http://www.CO2now.com) (2009)



**Tabel 2.8.** Produksi radikal dan ion dari CO<sub>2</sub> dalam reaktor plasma non-termal

Reaksi	Proses	Yield awal (per 100 eV)
$e + \text{CO}_2 \rightarrow e + \text{CO} + \text{O}$	Disosiasi	4,51
$e + \text{CO}_2 \rightarrow 2e + \text{CO}^+ + \text{O}$	Disosiasi ionisasi	0,51
$e + \text{CO}_2 \rightarrow 2e + \text{CO} + \text{O}^+$	Disosiasi ionisasi	0,21
$e + \text{CO}_2 \rightarrow 2e + \text{CO}_2^+$	Ionisasi molecular	2,24

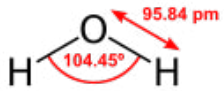

Sumber: Chae *et al.* (2000)

Secara umum, karbon dioksida sangat susah bereaksi dalam reaktor konvensional, sehingga dalam pemanangannya selama ini lebih diarahkan kepada pereduksian. Namun dengan teknologi plasma reaksi karbon dioksida lebih mudah terjadi karena terbentuknya berbagai radikal yang akan mendorong terjadinya reaksi. Pada Tabel 2.8 dapat dilihat reaksi yang terjadi dalam reaktor plasma non-termal dengan umpan berupa CO<sub>2</sub> murni.

#### 2.4.2. Air (H<sub>2</sub>O)

Air (H<sub>2</sub>O, HOH) adalah molekul yang paling melimpah di permukaan bumi, yang merupakan sekitar 70% dari permukaan planet. Di alam air berada dalam bentuk cair, padat, dan gas. Pada suhu kamar, air hampir tidak berwarna, hambar, tidak berbau dan cair. Banyak zat-zat yang larut dalam air sehingga sering dipakai sebagai pelarut universal. Air penting bagi kehidupan di Bumi dan merupakan salah satu molekul terbanyak (air menutupi 71% permukaan bumi). Bagi manusia air merupakan molekul terpenting karena 55 - 75 % dari tubuh manusia terdiri atas air dan manusia hanya mampu bertahan hidup selama empat hari tanpa meminum air. Pada Tabel 2.9 disajikan sifat fisika dan kimia air.

**Tabel 2.9.** Sifat fisika dan kimia air

Air	
	
Nama IUPAC	Water
Nama lain	Dihydrogen monoxide Oxidane Hydroxylic acid Hydrogen Hydroxide R-718
Rumus	H <sub>2</sub> O
Massa molar	18,01528 g mol <sup>-1</sup>
Penampilan	Cairan hampir tidak berwarna
Kepadatan	1.000 kg m <sup>-3</sup> , liquid (4 °C) 917 kg m <sup>-3</sup> , solid
Titik lebur	0 °C, 32 °F (273,15 K)
Titik didih	100 °C, 212 °F (373,15 K)

Sumber: [www.en.wikipedia.org](http://www.en.wikipedia.org), 2009

Mengingat kelimpahan air yang sangat besar di alam tersebut, maka air merupakan reaktan yang sangat potensial, tak terkecuali dalam kasus pengolahan CO<sub>2</sub> ini. Dalam reaktor plasma, jika dimasukkan umpan berupa air murni, maka akan terjadi reaksi seperti Tabel 2.10. Sedangkan reaksi antara H<sub>2</sub>O dan CO<sub>2</sub> yang paling mungkin dalam reaktor plasma diperlihatkan oleh Tabel 2.11.

**Tabel 2.10.** Produksi radikal dan ion dari H<sub>2</sub>O dalam reaktor plasma non-termal

Reaksi	Proses	Yield awal (per 100 eV)
$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow e + \text{H} + \text{OH}$	Disosiasi	3,58
$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2e + \text{H} + \text{OH}^+$	Disosiasi ionisasi	0,67
$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2e + \text{H}^+ + \text{OH}$	Disosiasi ionisasi	0,57
$e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2e + \text{H}_2\text{O}^+$	Ionisasi molekular	1,99

Sumber: Chae *et al.* (2000)

**Tabel 2.11.** Reaksi antara CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O dalam reactor plasma

Reaksi	ΔH (kJ/mol)
$\text{CO}_2 + e \rightarrow \text{CO} + \cdot\text{O} + e$	
$\cdot\text{O} + \cdot\text{O} \rightarrow \text{O}_2$	-498,36
$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \cdot\text{OH} + \cdot\text{H}$	498,82
$\text{CO}_2 + \text{H}\cdot \rightarrow \text{CO} + \cdot\text{OH}$	
$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2$	105,72
$\text{CO} + \cdot\text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	
$\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	
$\text{H}_2 + e \rightarrow 2\text{H}\cdot + e$	436
$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \cdot\text{OH} + \cdot\text{H} + e$	498,82
$\text{H}\cdot + \text{H}\cdot \rightarrow \text{H}_2$	-436
$\text{OH}\cdot + \text{OH}\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	-214,09

Sumber: Sergey (2004) (telah diolah kembali)

Dalam pereaksian karbon dioksida dan uap air dalam reaktor plasma, produk yang paling mungkin untuk didapatkan ialah gas CO, gas H<sub>2</sub> dan gas O<sub>2</sub>. Titik penting dalam reaksi ini adalah pemutusan hubungan C=O dan H-O karena ikatannya yang kuat. Pemutusan ikatan C=O akan menghasilkan gas CO dan radikal Oksigen, sedangkan pemutusan ikatan H-O akan menghasilkan radikal O-H dan radikal Oksigen. Radikal oksigen dapat bergabung menghasilkan gas O<sub>2</sub>. Radikal O-H dapat bereaksi lebih lanjut untuk menghasilkan O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> ataupun H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

## 2.5. Pengolahan CO<sub>2</sub>

Dewasa ini, telah banyak ahli yang melakukan penelitian mengenai pengolahan CO<sub>2</sub> dalam lingkungan plasma. Kebanyakan ialah pengolahan CO<sub>2</sub> bersama reaktan lain menjadi hidrokarbon rantai rendah seperti CH<sub>4</sub>, HCHO, dan C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> dengan menggunakan plasma jenis *glow discharge* dan *microwave discharge* dan masih sedikit yang mempelajari konversi CO<sub>2</sub> dengan keberadaan air pada plasma jenis *dielectric barrier discharge* (DBD). Selama proses kimia

plasma, CO<sub>2</sub> dapat dikonversi menjadi CO, dan CO dapat bereaksi lebih lanjut dengan spesi aktif lainnya dalam ruang plasma.

Untuk menganalisa kinerja dari reaktor untuk dekomposisi CO<sub>2</sub> Jogan *et al.* (1993) dalam penelitian mengenai efek waktu tinggal pada konversi gas CO<sub>2</sub> dari gas sisa pembakaran menjadi gas CO, mengusulkan penggunaan dua jenis parameter utilitas energi yaitu *energy yield* ( $E_y$ ), seperti yang diperlihatkan Persamaan 2.8, dan efisiensi energi, yang ditunjukkan oleh Persamaan 2.9. Penelitian ini menggunakan *packed bed ferroelectric bed reactor*.

$$E_y = \frac{CO_2 \text{ terdekomposisi (gr)}}{\text{Daya yang diberikan (kWh)}} \quad (2.7)$$

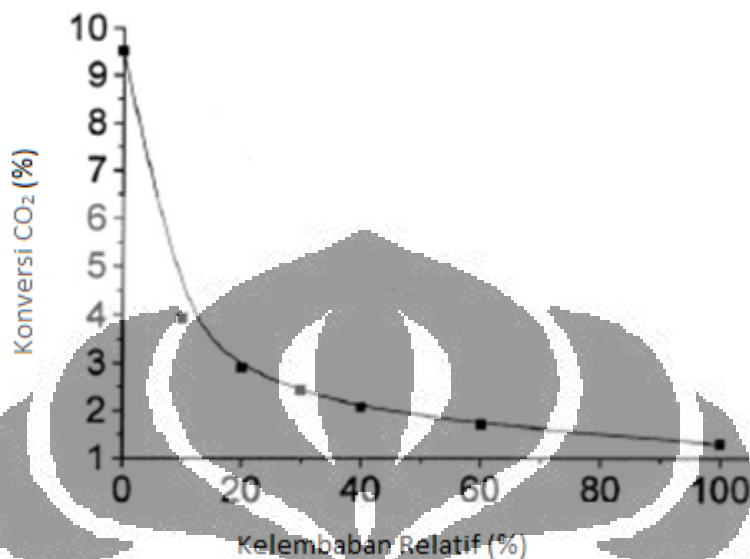
$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{Energi ikatan (kJ mol}^{-1}) \times CO_2 \text{ terdekomposisi (mol)}}{\text{Daya yang diberikan (kJ)}} \quad (2.8)$$

Dalam penelitian ini Jogan *et al.* (1993) menyimpulkan:

1. Laju pereduksian gas CO<sub>2</sub> dan laju pembentukan gas CO meningkat dengan meningkatnya energi listrik dan penurunan laju alir gas
2. Energi *yield* untuk pereduksian CO<sub>2</sub> dan pembentukan gas CO menurun dengan peningkatan energi listrik dan penurunan laju alir yang diaplikasikan dalam ruang discharge.
3. Pereduksian gas CO<sub>2</sub> dan konsentrasi CO meningkat dengan meningkatnya waktu tinggal.
4. Energi *yield* untuk pereduksian gas CO<sub>2</sub> dan pembentukan gas CO menurun dengan menurunnya waktu tinggal.

Guangyun *et al.* (2003) dalam penelitiannya memperoleh bahwa dengan meningkatnya kelembaban relatif pada umpan akan menurunkan konversi CO<sub>2</sub> menjadi CO pada reaktor plasma DBD. Pada kelembaban relatif 0% diperoleh konversi tertinggi yaitu 9,5%, sedangkan pada kelembaban relatif 100% hanya diperoleh konversi CO<sub>2</sub> menjadi CO sebesar 1,3%. Penurunan konversi CO<sub>2</sub> dengan meningkatkan kelembaban relatif karena molekul H<sub>2</sub>O diserang oleh elektron berenergi tinggi membentuk radikal OH, yang akan bereaksi dengan CO sehingga CO<sub>2</sub> terbentuk kembali. Selain itu semakin banyaknya gas O<sub>2</sub> yang terbentuk dari reaksi dekomposisi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O juga merugikan konversi CO<sub>2</sub>

menjadi CO karena akan kembali mengoksidasi gas CO menjadi gas CO<sub>2</sub>. Pada Gambar 2.4 dapat dilihat hubungan konversi CO<sub>2</sub> terhadap kelembaban relatif umpan.



**Gambar 2.4.** Hubungan konversi CO<sub>2</sub> dengan kelembaban relatif umpan

Sumber: Guangyun *et al.* (2003) (telah diolah kembali)

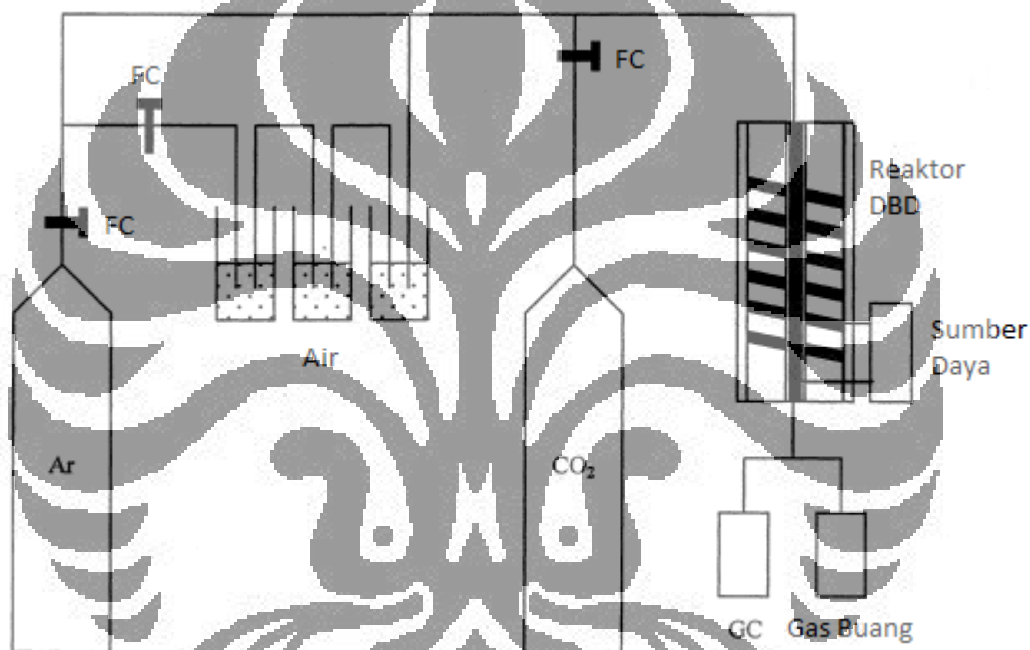
**Tabel 2.12.** Nilai utilitas energi yang diperoleh Guangyun *et al.* (2003)

Tegangan (V)	Daya (W)	$E_y$ (gr/kWh)	Efisiensi (%)
7200	80	3,2	1,0
6300	61,25	4,5	1,5
5400	45	7,0	2,3
4500	31,25	10,2	3,4
3600	25	13,2	4,4
2700	15	17,7	5,9
1800	7,5	30,2	10,0

Laporan Guangyun *et al.* (2003) (Tabel 2.12) mengenai utilitas energi menghasilkan kesimpulan yang sama dengan Jogan *et al.* (1994), yaitu penambahan tegangan akan menurunkan *energy yield* dan efisiensi.

Dalam penelitiannya, Guangyun *et al.* (2003), menggunakan dua tabung kuarsa sebagai penghalang dielektrik. Tabung bagian dalam mempunyai diameter luar 10 mm dan panjang 200 mm, sedangkan tabung bagian luar mempunyai

diameter 32 mm dan ketebalan 1.5 mm. Kedua elektoda yang digunakan berbahan *stainless steel*, elektroda dalam berbentuk batang dan elektroda luar berbentuk lempengan dengan lebar 4 mm yang dililitkan pada tabung bagian luar. Sebagai sumber daya digunakan listrik berfrekuensi 2.2 kHz dengan tegangan yang dapat diatur antara 0 – 9000 V. Laju alir CO<sub>2</sub> bervariasi antara 20 – 80 ml/menit sesuai dengan konsentrasi yang diinginkan, gas Ar ditambahkan sebagai pengencer sehingga laju alir total sebesar 2000 ml/menit. Gas kromatografi digunakan untuk menganalisa produk reaktor plasma DBD ini. Skema peralatan yang digunakan oleh Guangyn *et al.* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



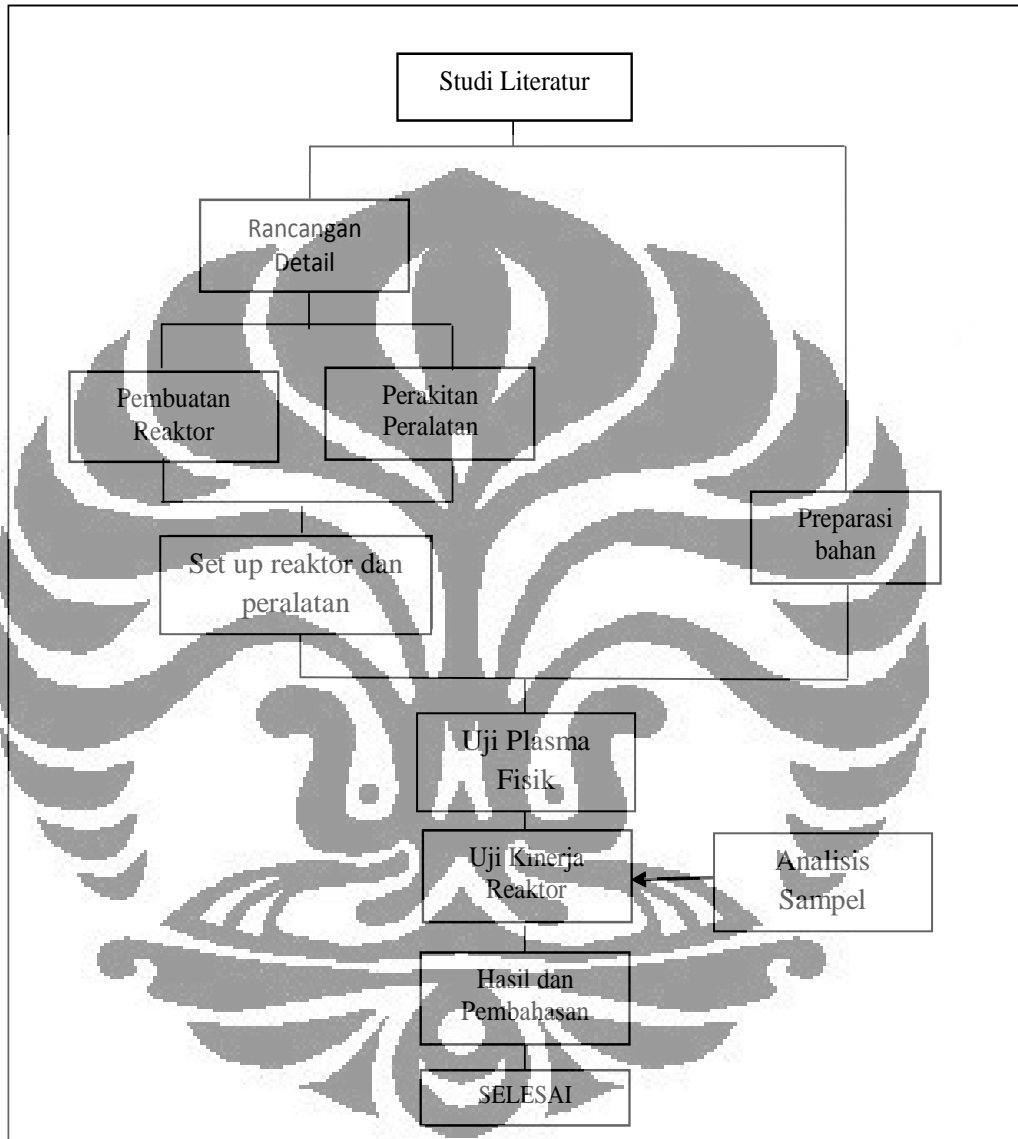
**Gambar 2.5.** Skema peralatan yang digunakan Guangyn *et al.*

Sumber: Guangyu *et al.* (2003) (telah diolah kembali)

Dalam penelitian lain, Matsumoto *et al.* (1999) menemukan bahwa pada sistem reaktor plasma DBD dengan umpan yang terdiri dari gas CO<sub>2</sub> dan gas Ar, *breakdown voltage* (tegangan kerusakan) terjadi pada tegangan 1 kV. Hal ini ditandai dengan munculnya spektrum emisi dari eksitasi gas Ar dan mulai terjadinya dekomposisi gas CO<sub>2</sub>. Selain itu Matsumoto *et al.* (1999) juga menemukan terjadinya kenaikan konversi gas CO<sub>2</sub>, kenaikan produksi gas CO, dan penurunan energi *yield* CO<sub>2</sub> dan efisiensi energi untuk pereduksi gas CO<sub>2</sub> dengan peningkatan tegangan yang diaplikasikan.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Diagram Alir Penelitian



**Gambar 3.1.** Diagram alir penelitian

Penelitian rancang bangun dan uji kinerja reaktor plasma *dielectric-barrier discharge* (DBD) untuk pengolahan CO<sub>2</sub> ini, berlangsung dalam waktu 7 bulan dengan tahapan seperti pada Gambar 3.1. Reaktor yang dibangun merupakan jenis non-termal yang dioperasikan pada tekanan atmosferik, menggunakan sumber energi listrik 220 VAC dari PLN atau inverter UPS dengan umpan berupa karbon dioksida dengan kandungan sedikit air. Diharapkan reaktor plasma ini

menghasilkan produk dengan nilai ekonomis berupa gas sintesis, hidrokarbon ringan, dan senyawa oksigenat.

### 3.2. Lokasi Penelitian

Aktivitas utama penelitian ini akan dilakukan di Laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses (TIP) lantai 2, Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

### 3.3. Rancangan Penelitian

Peralatan yang dirancang adalah sistem reaktor plasma non-termal *Dielectric Barrier Discharge* (DBD) dengan jenis pipa koaksial. Perancangan sistem reaktor plasma ini dilakukan guna mendapatkan susunan rangkaian sistem reaktor plasma yang akan digunakan nantinya untuk melakukan penelitian. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini secara garis besar terdiri dari dua jenis yaitu badan reaktor beserta peralatan penunjangnya dan penghasil listrik tegangan beserta peralatan penunjangnya, yang akan dijelaskan pada sub-bagian 3.3.1 dan 3.3.2. Sedangkan bahan yang digunakan dalam penelitian ini ialah:

1. Gas CO<sub>2</sub>
2. Aquades
3. Lem *epoxy* bermerek “Araldite” jenis merah dan biru. Lem yang berwarna biru lebih lama keringnya dibandingkan dengan warna merah, namun memiliki kemampuan mengisolasi lebih baik.
4. Kawat *Stainless Steel*
5. Selotip

#### 3.3.1. Sumber Tegangan Tinggi

Reaktor plasma jenis DBD yang dibangun memanfaatkan sumber listrik bertegangan tinggi sebagai sumber energinya. Sumber tegangan tinggi diperoleh dengan menggunakan *neon sign transformer* (NST) dengan sumber arus berasal dari listrik PLN ataupun inveter UPS.

##### 3.3.1.1. Kelengkapan peralatan

Peralatan yang digunakan untuk menghasilkan listrik tegangan tinggi dengan menggunakan NST ini antara lain:

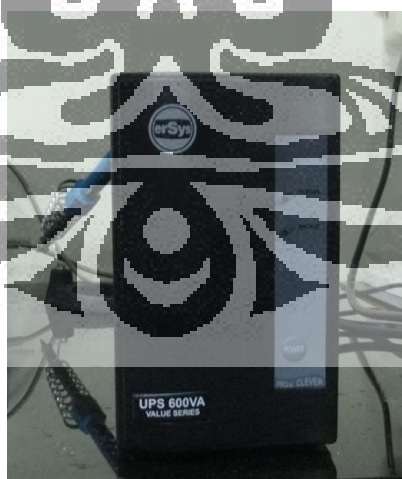


## 1. Sumber Listrik

Sumber listrik yang digunakan adalah dua jenis yaitu listrik PLN dan inverter UPS (Gambar 3.3). Inverter UPS menggunakan sumber listrik yang tersimpan pada baterai di dalamnya yang kemudian diubah menjadi listrik AC 220 V. Sebelum penggunaannya inverter UPS harus diisi terlebih dahulu dengan listrik PLN. Apabila daya yang tersimpan telah habis inverter UPS ini bisa tetap digunakan dengan menghubungkannya dengan aki (Gambar 3.2), aki berfungsi sebagai pengganti baterai inverter UPS yang habis.



Gambar 3.2. Foto aki yang digunakan

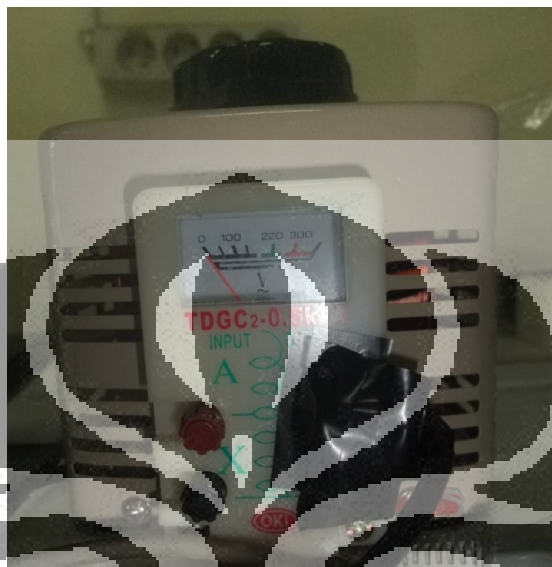


Gambar 3.3. Foto inverter UPS yang digunakan

## 2. Regulator tegangan

Berfungsi sebagai pengatur tegangan keluaran yang diinginkan agar terbentuk plasma pada reaktor, yang digunakan sebagai salah satu parameter

perancangan reaktor plasma. Regulator tegangan (Gambar 3.4) pada dasarnya adalah sebuah trafo, namun jumlah lilitan sekundernya bisa diatur sesuai dengan besar tegangan keluaran yang diinginkan. Regulator tegangan yang digunakan bermerek Oki dengan rentang keluaran 0 – 250 V.



**Gambar 3.4.** Foto regulator tegangan yang digunakan

### 3. *Neon Sign Transformer (NST)*

NST (Gambar 3.5) umumnya digunakan sebagai sumber daya bagi papan iklan atau *neon sign*. Alat ini mampu mengonversi rentang 120 – 240 V menjadi tegangan tinggi, biasanya rentang 2 – 15 kV dengan arus 30 – 120 mA. NST merupakan transformator berinti besi, biasanya disatukan di dalam aspal untuk perlindungan dan isolasi. Inti mempunyai suatu lilitan magnetis yang membatasi arus keluaran, sehingga tetap mampu beroperasi dalam kondisi hubungan singkat. NST bisa juga beroperasi dengan tanpa muatan. Fisik NST cukup berat, sebagai contoh satu transformator *neon sign* dengan keluaran 15 kV dan 60 mA dapat mencapai berat 20 kg.

Dalam penelitian ini, NST berfungsi sebagai penaik tegangan (*step-up*) sehingga menghasilkan energi yang cukup untuk menghasilkan plasma. Transformator yang digunakan bermerek *Standard Electric Works Hongkong* dengan tegangan masukan 110/220 V dan tegangan keluaran maksimal 15.000 V. Alat ini berfrekuensi 50 Hz dan berdaya 450 VA.



**Gambar 3.5.** Foto Neon Sign Transformer yang digunakan

4. Kabel tegangan tinggi

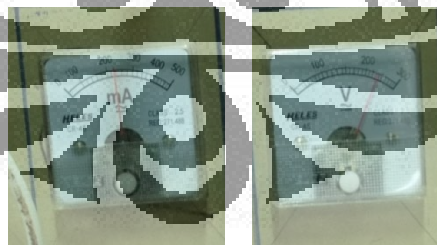
Berfungsi untuk menghubungkan keluaran NST dengan elektoda *stainless steel* yang berada pada reaktor plasma DBD

5. Amperemeter

Berfungsi untuk pengukuran arus yang keluar dari regulator tegangan, yang akan dipergunakan dalam perhitungan konsumsi daya reaktor. Amperemeter (Gambar 3.6 a) yang digunakan bermerek *HELES* dengan rentang 0 – 500 mA.

6. Voltmeter

Berfungsi untuk pengukuran tegangan yang keluar dari regulator tegangan, yang akan dipergunakan dalam perhitungan konsumsi daya reaktor. Voltmeter (Gambar 3.6 b) yang digunakan bermerek *HELES* dengan rentang pengukuran 0 – 300 V.



(a)

(b)

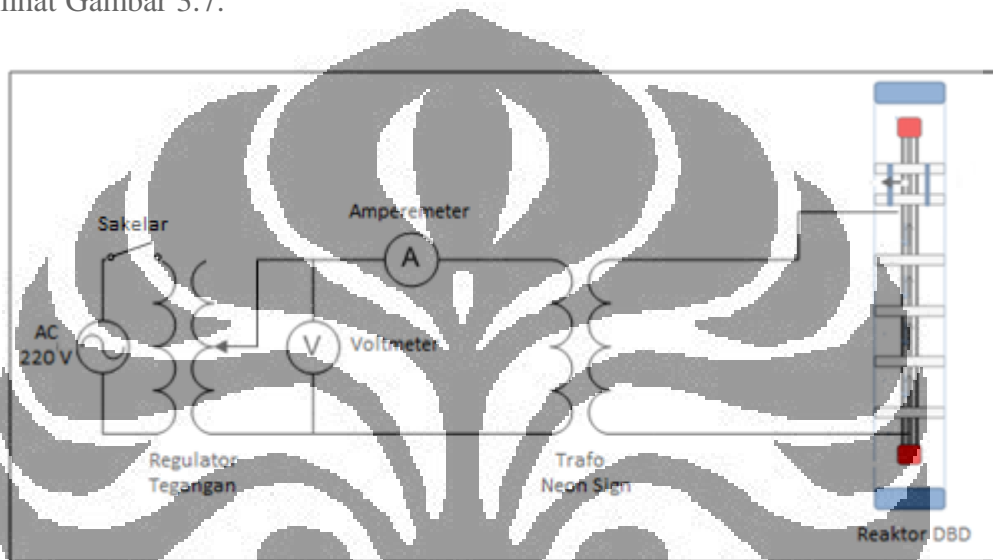
**Gambar 3.6.** Alat Ukur: Listrik (a) Amperemeter; (b) Voltmeter

7. Saklelar

Digunakan untuk memutuskan aliran listrik menuju reaktor. Saklelar mempunyai indikator LED yang akan menyala pada saat dialiri aliran listrik.

### 3.3.1.2. Instalasi

Pada operasionalnya, arus listrik masukan dari PLN atau inverter UPS yang mempunyai tegangan 220 V AC dimasukkan ke regulator tegangan, agar besarnya tegangan dapat diatur. Keluaran dari regulator tegangan akan masuk ke NST untuk dinaikkan tegangannya yang mampu untuk menggenerasikan plasma DBD. Konsumsi daya dapat dihitung dengan menggunakan voltmeter dan amperemeter yang terinstalasi dalam rangkaian. Instalasi listrik ke reaktor dapat dilihat Gambar 3.7.



Gambar 3.7. Instalasi sumber listrik pada reaktor plasma DBD

### 3.3.2. Reaktor Plasma DBD

Perancangan alat pembangkit plasma jenis DBD ini didasarkan pada sejumlah kriteria sebagai berikut:

- Efisien, konsumsi daya listrik minimal, dan produktivitas tinggi.
- Mudah dalam hal pembuatan, pengoperasian, dan perawatannya.
- Biaya pengoperasian dan perawatan yang murah.

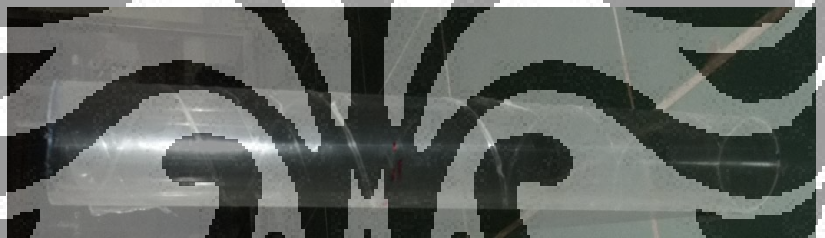
#### 3.3.2.1. Kelengkapan Komponen

Kelengkapan reaktor plasma jenis pipa koaksial yang dirancang terdiri dari:

### 1. Selongsong Reaktor

Selongsong reaktor dirancang berbentuk tabung silinder yang terbuat dari *acrylic*. Jumlah selongsong yang dibutuhkan ialah dua buah. Bagian ini mempunyai fungsi ganda yaitu untuk menjamin pencampuran gas umpan lebih optimal dan sebagai pendingin reaktor dengan memanfaatkan aliran umpan yang belum masuk reaktor. Pertimbangan pemilihan bahan *acrylic* dikarenakan untuk memudahkan dalam instalasi dan melihat nantinya jika terdapat kerusakan komponen-komponen di dalamnya. Spesifikasi selongsong *acrylic* (Gambar 3.8) yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Tinggi = 425 mm
- Ketebalan = 2 mm
- Diameter = 50 mm
- Diameter dalam (ID) = 46 mm



Gambar 3.8. Selongsong *Acrylic*

### 2. Elektroda batang

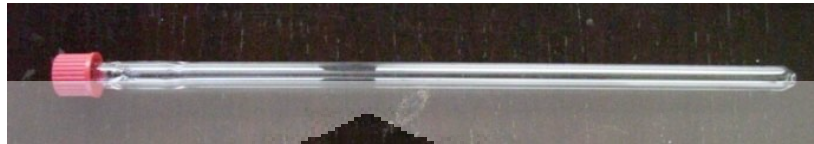
Elektroda ini terbuat dari bahan *stainless steel 316 foodgrade* (Gambar 3.9). Pemilihan SS-316 sebagai elektroda didasarkan pada ketahanan korosinya yang tinggi. Karakteristik ini penting untuk dimiliki karena elektroda batang akan berkontak langsung dengan plasma dan gas yang terplasmakan. Elektroda batang yang diperlukan adalah 2 buah dengan ukuran sama. Batang SS-316 ini memiliki spesifikasi panjang 38 cm, diameter luar (OD) sebesar 6,5 mm. Elektroda batang yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah sebanyak dua buah.



Gambar 3.9. Elektroda tegangan tinggi SS-316

### 3. Dielektrik Gelas

Gelas dielektrik terbuat dari gelas borosilikat seperti terlihat pada Gambar 3.10. Tabung borosilikat ini memiliki spesifikasi: panjang 36,5 cm, diameter luar (OD) 12 mm dan diameter dalam (ID) 10 mm untuk reaktor 1 serta OD 14 mm dan ID 12 mm untuk reaktor 2 dengan tebal kaca 1 mm.



**Gambar 3.10.** Foto gelas Dielektrik yang digunakan

Borosilikat dipilih karena mempunyai ketahanan panas yang cukup tinggi dan mempermudah pengamatan karena tidak berwarna (bening). Sedangkan pemilihan volume reaktor yang cukup kecil didasarkan pada pertimbangan sebagai berikut:

- Reaktor dapat dioperasikan dengan laju alir umpan yang kecil karena harga bahan baku yang cukup mahal dan diharapkan dengan menggunakan laju alir yang kecil akan memberi hasil yang komprehensif dan biaya yang efisien.
- Reaktor dapat ditempatkan di ruangan yang kecil.

### 4. Elektroda Jala

Elektroda ini terbuat dari *stainless steel* 304 berbentuk jala. Elektroda ini dipasang dengan cara diikatkan pada bagian luar dielektrik gelas. Untuk mengikatkannya, pada jarak tertentu dipasang kawat *stainless steel*. Foto elektroda jala yang telah dipasangkannya pada dielektrik gelas diperlihatkan oleh Gambar 3.11.



**Gambar 3.11.** Pemasangan Elektroda Jala

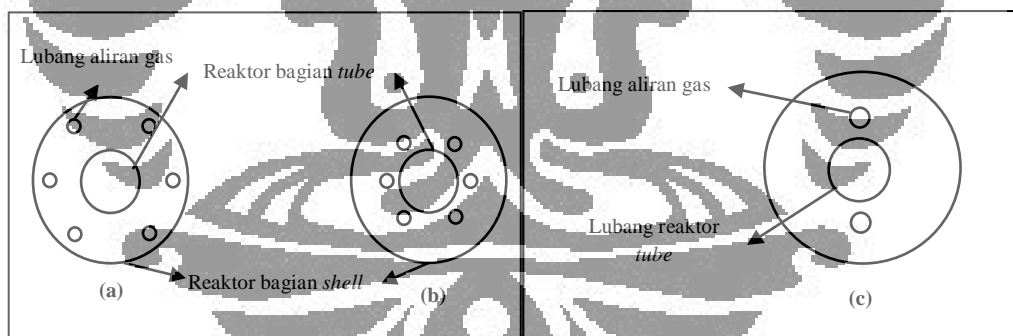


## 5. Baffle dan pipa borosilikat

Dalam reaktor terdapat enam buah *baffle* dengan dua fungsi yaitu empat *baffle* untuk membelokkan aliran gas dan dua *baffle* untuk mencegah terjadinya pencampuran aliran gas umpan dan produk. *Baffle* dipasang pada bagian luar kaca dielektrik. Semua *baffle* ini memiliki diameter lingkaran luar 46 mm, diameter lubang tempat memasukkan tabung *pyrex* (bagian tengah *baffle*) 12 mm dan 14 mm, dan ketebalan 3 mm.

*Baffle* yang berfungsi membelokkan aliran gas mempunyai enam buah lubang (Gambar 3.12 a), dua diantaranya di bagian dalam dan lainnya di bagian luar. Pembelokkan aliran ini mempunyai dua fungsi yaitu menjamin pencampuran umpan lebih maksimal dan mendinginkan gelas dielektrik dengan lebih baik.

*Baffle* yang berfungsi mencegah pencampuran gas umpan dan produk mempunyai dua lubang (Gambar 3.12 b). Lubang ini saling dihubungkan dengan menggunakan pipa kaca borosilikat berukuran 6 mm (OD). Dalam pemasangannya, jarak antara kedua *baffle* dengan dua lubang tersebut ialah 27,2 mm. Ruang diantara kedua *baffle* ini merupakan tempat keluaran produk dalam reaktor.



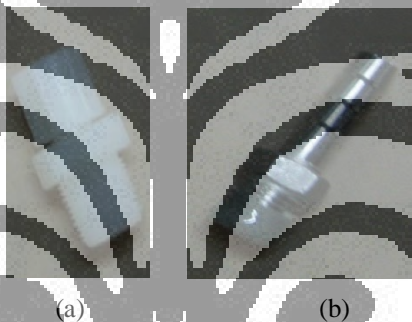
**Gambar 3.12.** Skema pola lubang *baffle*; (a) lubang *baffle* bagian luar; (b) lubang *baffle* bagian dalam; (c) lubang *baffle* yang dipasang tabung gelas berdiameter 6 mm

## 6. Tutup Reaktor

Sebagai penutup reaktor untuk bagian atas dan bawah digunakan tutup berbahan teflon yang kemudian direkatkan ke tabung selongsong *acrylic* untuk mengisolasi gas agar tidak keluar/bocor dari reaktor.

## 7. *Nipple* dan Selang

*Nipple* yang dipergunakan ada 2 jenis, yaitu untuk umpan masukan dan keluaran reaktor. Untuk bagian masukan digunakan *nipple* plastik berwarna putih (Gambar 3.13.a). Untuk mengalirkan umpan ke *nipple* dipakai selang berukuran 8 mm (OD) dengan bahan selang *polyurethane*. Lalu untuk keluaran menggunakan *nipple* berbahan *stainless steel* (Gambar 3.13 b) dan selang berbahan silikon. *Nipple stainless steel* dipasang pada bagian atas reaktor dengan jarak 62,3 mm dari tutup reaktor atas sedangkan *nipple* plastik dipasang pada bagian bawah reaktor dengan jarak 50 mm dari tutup bawah reaktor. Kedua *nipple* memiliki diameter bagian pangkal sebesar 15,1 mm (OD) dengan diameter lubang 5,5 mm (OD). Jumlah *nipple* yang dibutuhkan ialah empat buah, dua buah berbahan plastik dan empat buah berbahan *stainless steel*.



Gambar 3.13. Dua jenis *nipple* : bagian masukan reaktan (a); bagian keluaran produk (b)

## 8. Kabel Tegangan Tinggi dan Spool

Berfungsi untuk menghubungkan elektroda pada reaktor dengan transformator tegangan tinggi. Spool digunakan sebagai colokan listrik tegangan tinggi yang akan dialirkan ke elektroda.

## 9. Rangka alumunium dan papan akrilik

Keduanya digunakan untuk meletakkan reaktor dan peralatan pendukungnya. Reaktor, voltmeter, *flow* meter, dan amperemeter dipasang pada bagian depan sedangkan pada bagian belakang dipasangi instalasi listrik. Foto rangka alumunium dan papan akrilik yang telah dipasangi reaktor dan peralatan lainnya ditunjukkan oleh Gambar 3.14.





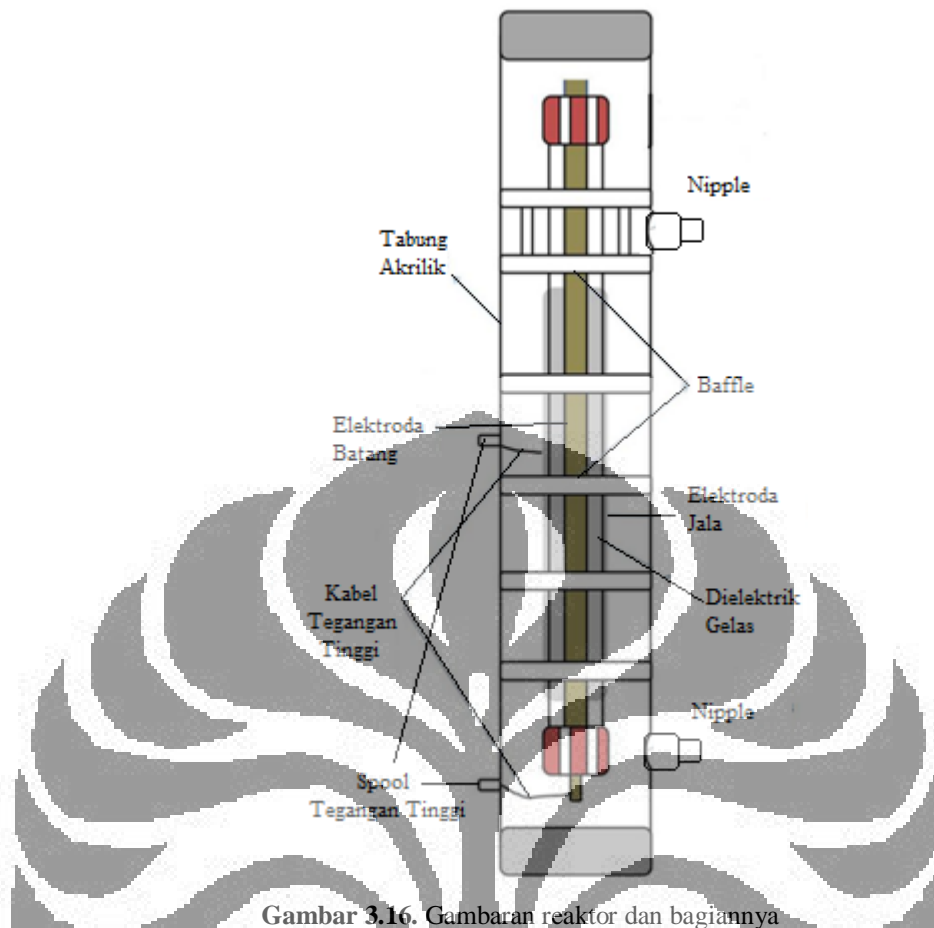
**Gambar 3.14** Susunan reaktor dan peralatan lainnya pada papan akrilik

### 3.3.2.2. Perakitan Reaktor

Reaktor plasma non-termal yang dirancang memiliki prinsip dasar seperti yang tampak skemanya pada Gambar 3.16; sedangkan penampang melintangnya dapat dilihat dalam Gambar 3.15.



**Gambar 3.15.** Penampang melintang reaktor plasma DBD



Gambar 3.16. Gambaran reaktor dan bagiannya

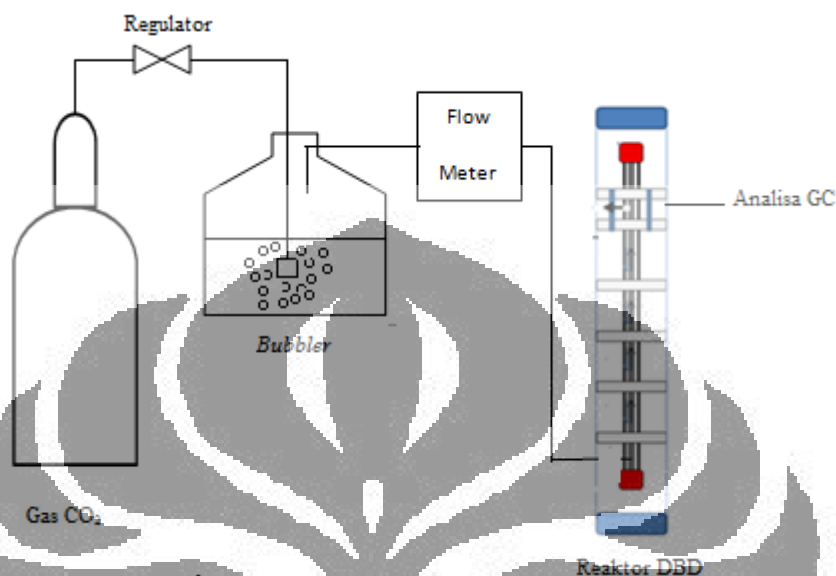
Tahapan perakitan reaktor adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan semua alat dan bahan
2. Potong batang elektroda sehingga panjangnya 38 cm, kemudian lubangi batang elektroda SS-316 pada bagian bawah (bagian dengan ujung tertutup).
3. Masukkan batang elektroda ke dalam tabung borosilikat. Pada kedua ujung tabung borosilikat pasang *silicon seal* untuk mencegah kebocoran gas.
4. Lilitkan elektroda jala pada bagian luar dielektrik gelas, sebagai pengikat sementara gunakan selotip agar gulungan elektroda jala tidak lepas.
5. Masukkan dielektrik gelas ke rongga antara *baffle* dan atur jarak antar *baffle*. Urutan penyusunan *baffle* ialah: dua buah *baffle* yang mempunyai dua lubang pada bagian atas, empat *baffle* dengan enam lubang pada bagian bawah. *Baffle* dengan enam lubang dipasang selang-seling antara *baffle* dengan lubang pada

bagian luar dan lubang pada bagian dalam. *Baffle* paling atas dan bawah haruslah berada di tepi elektroda jala.

6. Buka selotip dan ganti pengikat elektroda jala dengan lilitan kawat *stainless steel*. Jumlah lilitan kawat ialah tiga buah untuk setiap sela *baffle*, kecuali pada sela *baffle* bagian atas. Pada bagian tengah reaktor, dibuat satu lilitan yang simpulnya lebih panjang. Simpul ini akan dipasangkan pada spool.
7. Lem lima buah *baffle* paling bawah dengan lem epoxy sehingga menempel dengan erat pada elektroda jala. Sedangkan *baffle* paling atas dikeluarkan karena ditempelkan belakangan.
8. Lubangi akrilik pada bagian tengah dan 5 cm dari ujung untuk tempat meletakkan spool serta bagian masukan umpan dan keluaran produk untuk tempat pemasangan *nipple*.
9. Masukkan dielektrik gelas tadi ke dalam selongsong akrilik dan atur letaknya ditengah-tengah selongsong.
10. Lem *baffle* yang mempunyai dua lubang dengan sedikit lem epoxy merah pada bagian tepi yang berseberangan, tunggu hingga kering berfungsi sebagai penahan dielektrik gelas pada selongsong akrilik. Setelah kering, lem sisanya dengan lem epoxy biru.
11. Pasang dan lem pipa kaca borosilikat pada lubang *baffle* tadi.
12. Pasang *baffle* yang tersisa tadi pada ujung pipa kaca borosilikat.
13. Lem *baffle* tersebut pada tabung akrilik dengan metode yang sama untuk mengikatkan *baffle* pada langkah nomor sepuluh.
14. Pasang kabel tegangan tinggi sepanjang 10 cm pada bagian ujung elektroda batang yang memiliki ulir dengan menggunakan mur.
15. Hubungkan spool dengan simpul kawat dan kabel tegangan tinggi tadi dengan menyoldernya. Setelah disolder, spool dilem pada lubang yang telah disiapkan dengan lem epoxy biru.
16. Lem *nipple* plastik dan *stainless steel* pada lubang yang telah disiapkan dengan lem epoxy biru.
17. Lem tutup reaktor pada selongsong akrilik dengan lem epoxy biru.

Setelah reaktor dipasang, berikutnya mengatur pemasangan peralatan, sehingga didapatkan aliran gas umpam menuju reaktor seperti yang diinginkan. Skemanya dapat dilihat pada Gambar 3.17.



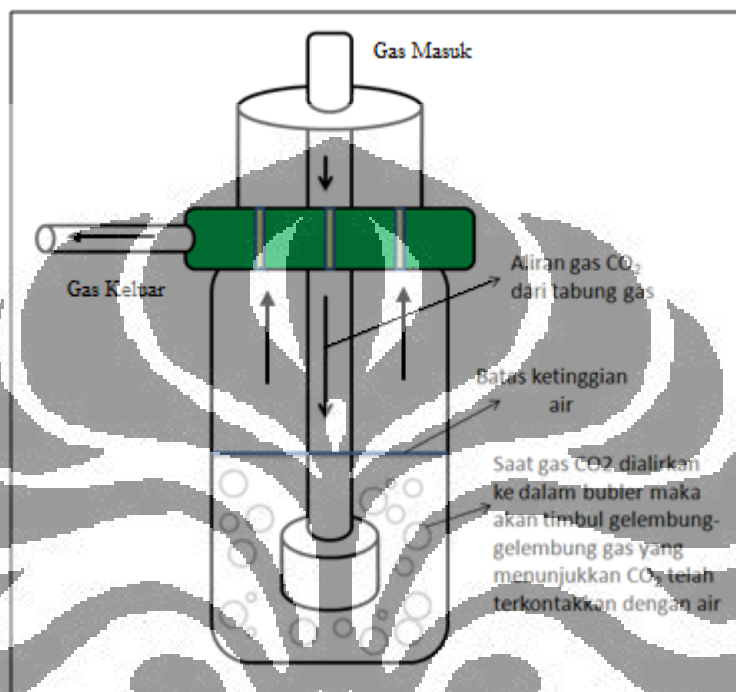
Gambar 3.17. Skema aliran umpam dan peralatannya

Umpam gas CO<sub>2</sub> yang keluar dari tabung terlebih dahulu dialirkan ke *bubbler* yang berisi air, keluaran dari *bubbler* kemudian dialirkan menuju *flow meter*. Dari *flow meter* aliran umpam memasuki reaktor melalui *nipple* plastik yang berada pada bagian bawah reaktor. Di dalam reaktor, campuran gas akan mengalir dari bagian bawah ke atas dengan terbelokkan oleh *baffle* sehingga pencampuran gas lebih baik dan pendinginan reaktor lebih optimal. Aliran gas diteruskan melewati pipa kaca yang terpasang pada dua *baffle* paling atas dan masuk ke bagian atas elektoda batang SS-316. Kemudian aliran gas keluar pada lubang yang terdapat pada bagian bawah SS-316 dan masuk ke ruang *discharge*. Pada ruang *discharge*, gas akan terkena lucutan listrik plasma DBD. Gas produk plasma DBD keluar dari ruang *discharge* melalui lubang dielektrik gelas yang berada di antara dua *baffle* paling atas dan akhirnya keluar reaktor melalui *nipple* SS-304 pada bagian atas. Gas keluaran ini kemudian ditampung dan dianalisa dengan menggunakan *Gas Chromatography* (GC)

### 3.4. Preparasi gas

Pada penelitian ini digunakan 2 jenis senyawa yaitu

1. Karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ )
2. Air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) dalam bentuk uap



Gambar 3.18. *Bubbler*

Kedua senyawa yang digunakan berada pada fase gas. Nantinya  $\text{CO}_2$  dialirkan terlebih dahulu melewati bubbler (Gambar 3.18) yang berisi air. Walaupun di dalam *bubbler* kemungkinan terjadi reaksi antara air dan karbon dioksida membentuk  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , tapi senyawa ini tidak stabil dan akan langsung terurai kembali menjadi  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$ . Sehingga disimpulkan aliran umpan yang masuk ke dalam reaktor adalah  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  dalam bentuk uap.

### 3.5. Uji Start-Up Alat

Sebelum dilakukan uji *start-up* alat, terlebih dahulu dilakukan uji kebocoran reaktor. Uji kebocoran reaktor dilakukan dengan cara sederhana yaitu metode air sabun. Caranya udara dari kompresor dialirkan ke dalam reaktor (semua kerangan tertutup, kecuali satu *valve* terbuka sedikit) kemudian meneteskan air sabun ke area yang berpotensi bocor. Jika terdapat kebocoran maka dilakukan upaya penambahan atau penggantian *silicon seal* yang lebih rapat

dan penguncian yang lebih erat. Pada permukaan tutup reaktor juga ditambahkan lembaran *silicon* tipis untuk mengurangi kebocoran.

Untuk Inverter dan Trafo Tegangan Tinggi, uji kebocoran dilakukan dengan menyalakan kedua alat yang telah dibuat selama 10 menit dalam kondisi standar, Jika tidak terjadi kebocoran dan arus pendek maka sirkuit yang dibuat sudah baik serta dari hasil pengukuran tegangan dan arus telah mencapai yang diharapkan.

Setelah menyusun peralatan sebagai satu sistem, perlu dilakukan pengujian start-up alat untuk mengetahui kinerja reaktor plasma non-termal. Uji start up ialah dengan mengalirkan sejumlah kecil umpan ke dalam reaktor untuk direaksikan. Jika tidak terjadi permasalahan, seperti kebocoran, pembangkitan plasma yang berhasil, maupun aspek lainnya berarti reaktor sudah dapat dioperasikan dengan normal.

### 3.6. Uji Fisik

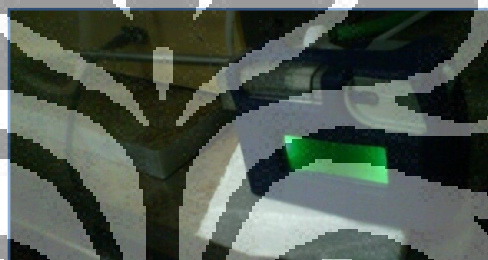
Langkah berikutnya ialah melakukan uji plasma fisik. Uji ini bertujuan untuk mengamati secara audio-visual plasma yang terbentuk dan fenomena-fenomena yang terjadi pada reaktor yang dibuat. Pengamatan dilakukan pada rentang tegangan 0 – 15 kV, laju alir 500 – 2500 cc/menit dan pemakaian dua sumber arus, yaitu listrik PLN dan inverter UPS. Dari uji ini juga akan diketahui ketahanan reaktor terhadap variasi tegangan, sehingga dapat ditentukan pula rentang tegangan kerja reaktor. Tegangan kerja paling bawah didefinisikan sebagai tegangan mulai munculnya plasma DBD sedangkan batas atas merupakan batas aman reaktor dioperasikan sebelum munculnya *spark* (lucutan listrik yang besar) pada permukaan reaktor. *Spark* dihindari karena berenergi tinggi yang bisa menyebabkan timbulnya *hot spot* yang bisa merusak dielektrik kaca yang menjadi badan reaktor.

Disini juga dilakukan analisa awal mengenai kemampuan reaktor mengkonversi gas CO<sub>2</sub>. Uji dilakukan dengan mendeteksi keberadaan gas CO dan H<sub>2</sub> dalam aliran produk. Gas CO dan H<sub>2</sub> merupakan salah satu produk yang paling mungkin dari pengolahan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O. Untuk mendeteksi gas CO digunakan CO *analyzer*, sedangkan untuk gas H<sub>2</sub> digunakan H<sub>2</sub> *analyzer*. Lama pengujian

tergantung pada waktu yang dibutuhkan sehingga tidak terjadi kenaikan komposisi gas CO dan H<sub>2</sub> dalam aliran produk. Berikut adalah penjelasan alat uji yang digunakan dalam percobaan ini:

### 1. CO Analyzer

Fungsi utama alat ini adalah untuk mengukur kadar karbon monoksida pada keluaran reaktor. CO analyzer (Gambar 3.19) memiliki rentang pengukuran gas CO dari 0 hingga 1000 ppm. Selain dapat mengukur CO, alat ini juga dapat mengukur komposisi oksigen (rentang 0–20%), karbon dioksida (0–15 %), serta suhu lingkungan (*ambient*). Dalam pengujian ini CO analyzer langsung dikontakkan dengan gas keluaran reaktor, sehingga hasil pengukuran konsentrasi gas CO dapat dilakukan secara *real time*.



Gambar 3.19. CO Analyzer

### 2. H<sub>2</sub> Analyzer

Fungsi utama H<sub>2</sub> analyzer (Gambar 3.20) adalah untuk mengukur kandungan gas hidrogen. Alat ini memiliki rentang pengukuran komposisi hidrogen dari 0 hingga 50% H<sub>2</sub>. Untuk melakukan pengujian, 50 ml sampel gas produk diambil dengan menggunakan suntikan. Sampel ini kemudian disuntikkan ke H<sub>2</sub> analyzer melalui lubang masukan yang tersedia. Pengujian ini dilakukan setiap 1 menit.



Gambar 3.20. H<sub>2</sub> Analyzer

### 3.7. Uji Kinerja Reaktor Plasma DBD

Pada percobaan ini dilakukan uji kinerja reaktor plasma DBD untuk mengkonversi gas CO<sub>2</sub> terhadap variasi tegangan, laju alir umpan, ukuran reaktor, dan jenis arus listrik yang diaplikasikan. Kondisi operasi pada percobaan ini ditentukan berdasarkan hasil pengujian plasma fisik. Sebagai alat uji komposisi aliran umpan dan produk digunakan *gas chromatography* (GC) jenis TCD.

Prosedur uji kinerja reaktor plasma DBD adalah sebagai berikut:

1. Memasang selang umpan CO<sub>2</sub> ke *bubbler*
2. Menghubungkan keluaran *bubbler* dengan *flow meter*.
3. Memasang reaktor 1 pada tempat pemasangan reaktor.
4. Memasang instalasi listrik pada reaktor 1 dengan sumber daya inverter UPS.
5. Mengatur tegangan primer NST sebesar 70 V.
6. Menghubungkan keluaran *flow meter* dengan masukan reaktor 1.
7. Mengatur laju alir umpan sebesar 500 cc/menit
8. Menyalakan saklar dan melakukan *running* selama 5 menit
9. Menganalisis produk dengan menggunakan GC
10. Mengulangi prosedur 7 – 9 dengan penggantian laju alir menjadi 1500 cc/menit.
11. Mengulangi prosedur 5 – 10 dengan mengganti tegangan menjadi 130 V.
12. Mengulangi prosedur 4- 11 dengan mengganti sumber daya menjadi listrik PLN dan variasi tegangan primer NST sebesar 70 V dan 170 V
13. Mengulangi prosedur 3 – 12 dengan mengganti reaktor menjadi reaktor 2.

### 3.7. Prosedur Pemakaian Gas Chromatography (GC)

#### 3.8.1. Preparasi GC

Panaskan GC kurang lebih satu hari untuk GC yang sudah lama tidak dipakai dan kurang lebih 15 menit untuk GC yang sering dipakai untuk menstabilkan dan memastikan agar tidak ada kotoran-kotoran yang tertinggal.

#### 3.8.2. Prosedur mengalirkan gas Argon:

1. Pastikan tekanan input dan output di regulator berada pada angka 0 (nol) dan tidak ada kebocoran pada sambungan-sambungannya



2. Buka *valve* (kerangan) utama dari kencang menjadi kendur, sehingga tekanan akan langsung naik
3. Buka kerangan regulator dari kendur menjadi kencang sehingga tekanan akan naik perlahan-lahan

### 3.8.3. Prosedur membuka tabung gas:

1. Pastikan tekanan input dan output di regulator, jarum *pressure gauge* menunjukkan 0 dan kerangan dalam keadaan tertutup (posisi *kerangan* longgar)
2. Buka kerangan induk di tabung dengan memutar ke arah kiri (arah kebalikan jarum jam) dan lihat tekanan gas, yang menunjukkan tekanan dalam tabung
3. Buka kerangan regulator perlahan-lahan ke arah kanan (searah jarum jam), lalu atur tekanan gas yang diinginkan
4. Pastikan instalasi gas baik dari tabung sampai perpipaan tidak bocor (cek kebocoran menggunakan gelembung sabun)
5. Untuk gas-gas yang beracun dan mudah terbakar ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ), langkah 4 harus dilakukan terlebih dahulu sebelum langkah 1 menggunakan gas inert  $\text{N}_2$

### 3.8.4. Prosedur menutup gas:

1. Tutup kerangan induk di tabung dengan memutar ke arah kanan (searah jarum jam) tunggu hingga tekanan gas di *pressure gauge* menunjukkan 0.
2. Tutup kerangan di regulator pelan-pelan ke arah kiri (arah kebalikan jarum jam) sampai kerangan longgar dan tunggu tekanan gas di *pressure gauge* sampai menunjukkan angka 0.

### 3.8.5. Prosedur menyalakan GC:

1. Pastikan tekanan *primary* 600 kPa, *carrier gas* antara 150-180 kPa
2. Atur suhu injeksi, *initial* dan *final* berturut-turut menjadi 130 – 100 – 100 ( $^{\circ}\text{C}$ )
3. Tunggu hingga stabil (ketiga lampu berkedip-kedip)
4. Nyalakan *current* sebesar 6 mA

### 3.8.7. Prosedur menyalakan chromatopac:

1. Hubungkan chromatopac dengan GC, tekan: shift down bersama dengan I,N,I, lalu tekan enter, akan muncul *initialize*.
2. Atur tinta di sebelah kiri, tekan: shift down bersama dengan plot, lalu tekan enter, untuk mengatur gunakan “*coarse*” kemudian tekan kembali shift down bersama dengan plot, lalu tekan enter.
3. Atur attenuasi (pelemahan sinyal). Jika nilai pelemahan sinyal terlalu kecil maka segala pengotor akan terlihat “*peak*”nya, sehingga digunakan pelemahan sinyal yang agak besar, tekan: atn bersama dengan angka 7, lalu tekan enter.
4. Atur kecepatan kertas, tekan: *speed* bersama dengan angka 10, lalu tekan *enter*.
5. Atur waktu GC untuk menghentikan analisis, tekan: *stop time* bersama dengan angka 5 lalu tekan enter.
6. Untuk melihat parameter-parameter yang ada, tekan: *shift down* bersama dengan print dan *width*, lalu tekan *enter*.
7. Untuk mengetahui apakah GC sudah stabil (garis lurus), tekan: *shift* bersama dengan *plot*, lalu tekan *enter*. Kestabilan juga dapat dilihat dari tekan: print bersama ctrl dan width secara bersamaan. Nilai yang keluar harus lebih besar dari 100. Jika belum mencapai, maka *coarse* atau *fine* diputar untuk mendapatkan hasil yang diinginkan.

### 3.8.8. Prosedur mematikan GC:

1. Matikan *current*.
2. Turunkan temperatur injeksi, *initial* dan *final* berturut-turut menjadi 30-30-30 (°C) kemudian GC dibuka agar pendinginan terjadi lebih cepat.
3. Setelah suhu kolom menjadi 80°C (pada indicator) kemudian GC baru dapat dimatikan.

Prosedur mematikan aliran gas sesuai dengan prosedur menutup gas.

### 3.9. Analisis dan Perhitungan

#### 3.9.1. Perhitungan Konversi

Perhitungan konversi diperlukan untuk mengetahui besarnya kuantitas gas CO<sub>2</sub> yang terdekomposisi. Konversi dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\text{Konversi} = \frac{\text{Massa awal} - \text{Massa residu}}{\text{Massa awal}} \times 100\% \quad (3.2)$$

#### 3.9.2. Perhitungan Daya Listrik

Pada arus bolak-balik, tegangan dan arus berubah setiap saatnya tergantung pada frekuensinya. Pada listrik PLN frekuensi kerja ialah 60 Hz dengan bentuk gelombang berupa sinusoidal. Karena itulah, daya listrik yang dihitung disini merupakan daya rata-rata yang digunakan oleh reaktor, yang dapat dihitung dengan persamaan 3.3.

$$P = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (3.3)$$

Dimana P adalah daya listrik (watt) reaktor,  $V_{rms}$  (*V root mean square*) adalah tegangan listrik (Volt) rata-rata kuadrat reaktor, dan  $I_{rms}$  (*I root mean square*) adalah tegangan listrik (Ampere) rata-rata kuadrat reaktor. Nilai yang ditunjukkan oleh alat uji listrik merupakan nilai rata-rata kuadrat, sehingga perhitungan daya bisa menjadi lebih sederhana.

#### 3.9.3. Perhitungan Konsumsi Energi

$$E = P \cdot t \quad (3.4)$$

Dimana E adalah energi listrik yang dikonsumsi reaktor selama operasi (Joule) P adalah daya listrik reaktor (watt) dan t adalah waktu operasi reaktor (detik)

#### 3.9.4. Perhitungan *energy yield* (E<sub>y</sub>)

Besar energi *yield* (E<sub>y</sub>) (Persamaan 3.5) mengindikasikan jumlah gas CO<sub>2</sub> yang terdekomposisi setiap kWh energi listrik yang digunakan.

$$E_y = \frac{CO_2 \text{ terdekomposisi (gr)}}{\text{Energi yang diberikan (kWh)}} \quad (3.5)$$

### 3.9.5. Efisiensi energi

Efisiensi energi memberikan gambaran besar prosentase energi listrik yang dikonsumsi oleh reaktor yang digunakan untuk memecah ikatan C=O dalam molekul CO<sub>2</sub>.

$$Efisiensi = \frac{\text{Energi ikatan (kJ mol}^{-1}) \times CO_2 \text{ terdekomposisi (mol)}}{\text{Energi yang diberikan (kJ)}} \quad (3.6)$$

Energi ikatan rata-rata C=O pada molekul CO<sub>2</sub> adalah 785,4 kJ/mole

### 3.9.6. Waktu tinggal

Waktu tinggal dapat dihitung dengan persamaan 3.7.

$$t = \frac{V}{Q} \quad (3.7)$$

t adalah waktu tinggal reaktan (s), V adalah volume reaktor (cc) dan Q adalah laju volumetrik umpan (cc/detik)

### 3.9.7. Analisis Uji Kinerja Reaktor

Kinerja reaktor plasma DBD ini dievaluasi berdasarkan beberapa parameter operasi yang utama, yaitu:

- Pengaruh variasi laju alir dan tegangan yang diaplikasikan pada reaktor terhadap konversi gas CO<sub>2</sub> dan produksi gas CO.
- Pengaruh ukuran ruang *discharge* reaktor terhadap konversi gas CO<sub>2</sub> dan produksi gas CO.
- Konsumsi energi terhadap konversi CO<sub>2</sub> pada masing-masing reaktor yang diekspresikan sebagai *energy yield* dan efisiensi energi
- Pengaruh penggunaan sumber listrik yang berbeda terhadap kinerja reaktor.

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil pengujian reaktor plasma jenis *dielectric-barrier discharge* bertipe koaksial yang dirancang. Pembahasan disini meliputi hasil pengamatan fenomena-fenomena yang terjadi pada reaktor dan analisis pengaruh variasi laju alir, ukuran reaktor, pengaruh tegangan operasi serta pengaruh jenis sumber arus listrik yang digunakan terhadap konversi CO<sub>2</sub> menjadi CO dan utilitas energi yang digunakan.

#### 4.1. Uji Fisik Plasma DBD

##### 4.1.1. Uji Fisik dengan Listrik PLN

Uji Fisik Plasma DBD dilakukan setelah memastikan tidak terdapat kebocoran pada reaktor yang dibuat dengan metode gelembung sabun. Tujuannya ialah untuk mengamati fenomena fisik plasma DBD yang terlihat secara kasat mata dan merupakan studi pendahuluan untuk mengetahui apakah reaktor ini dapat digunakan untuk mengkonversi CO<sub>2</sub> menjadi CO dengan kehadiran uap air. Pada uji ini diterapkan tegangan listrik dalam rentang 0 – 15 kV dan laju alir sebesar 500 - 2500 cc/menit.

Saat reaktor dinyalakan, tegangan listrik yang diterapkan dinaikkan secara perlahan. Hal ini dilakukan untuk menyelidiki tegangan minimal yang dibutuhkan untuk memunculkan plasma DBD. Tegangan ini juga dikenal dengan istilah *breakdown voltage* (tegangan perusakan). *Breakdown voltage* merupakan kondisi dimana energi listrik yang diaplikasikan mampu mengeksitasi dan mengionisasi gas-gas dalam ruang plasma. Kondisi ini ditandai dengan munculnya discas mikro dalam ruang plasma DBD, terdengar bunyi dengungan yang berasal dari discas mikro, terlihatnya pendar warna pada reaktor dan mulai terjadinya konversi reaktan menjadi produk.

Pada saat tegangan masukan reaktor sekitar 4770 V (70 V pada primer NST), terdengar bunyi dengungan pelan, menandakan telah terjadi pelepasan lucutan plasma DBD antara kedua elektroda. Ketika tegangan terus dinaikkan,

bunyi degungan ini semakin keras. Pada pengamatan ini, juga terlihat bahwa dengan terjadinya kenaikan tegangan juga diiringi oleh kenaikan arus yang mengalir dalam reaktor, yang juga berarti kenaikan konsumsi daya listrik reaktor. Guangyun *et al.* (2003) melaporkan bahwa pada keadaan di atas *breakdown voltage* semakin besar daya yang diterapkan maka akan semakin besar pula energi yang dibutuhkan untuk menggetarkan elektron dan ion di dalam ruang plasma.

Pada tegangan masukan reaktor sekitar 11.600 V, mulai terjadi lucutan listrik yang tidak diharapkan (*spark*) (Gambar 4.1 a), terutama pada bagian keluaran produk dan masukan umpan, dengan intensitas kemunculan yang tidak terlalu sering. Lucutan pada plasma DBD pada kedua elektroda seharusnya melewati dielektrik gelas, namun pada lucutan listrik yang tidak diharapkan (*spark*) ini tidak demikian. Alih-alih terjadi pelepasan listrik antar elektroda yang melewati dielektrik kaca, justru yang terjadi terjadi lucutan listrik antara ujung elektroda jala dengan ujung elektroda batang yang tidak tertutupi dielektrik kaca. Semakin tinggi tegangan, maka intensitas *spark* ini semakin sering.

Saat memperbandingkan fenomena ini pada kedua reaktor, terlihat pada reaktor satu (diameter penghalang dielektrik 12 mm) *spark* tersebut tidak terlalu sering, sedangkan pada reaktor dua (diameter penghalang dielektrik 14 mm) lucutan yang terjadi lebih sering. Pada tegangan 15.000 V *spark* ini terjadi dengan intensitas tinggi, terutama pada reaktor dua. Karena terlambat mematikan sumber listrik yang mengalir ke reaktor dua, terjadi bunga api (Gambar 4.1. b) pada permukaan dielektrik kaca. Setelah sumber listrik dimatikan dan reaktor dibuka, didapati bahwa dielektrik kaca telah pecah yang ditandai dengan munculnya warna putih susu pada permukaan dielektrik kaca. Karena fakta ini, maka diputuskan untuk melakukan pembatasan besar tegangan listrik yang diaplikasikan pada reaktor hanya dalam rentang 4.770 V – 11.600 V (70 V – 170 V) untuk sumber listrik PLN dengan alasan ketahanan reaktor.

Kemungkinan peristiwa munculnya *spark* ini dipicu oleh dekatnya jarak antara ujung elektroda jala dengan ujung elektroda batang, yang tidak tertutupi oleh dielektrik kaca. Hipotesa ini didukung oleh lebih jaranginya intensitas lucutan listrik yang tidak diharapkan (*spark*) pada reaktor satu (diameter 12 mm), yang jarak antara kedua ujung elektrodanya lebih jauh. Karena sifat dielektrik yang

memperlemah medan listrik (Tipler, 1998), maka listrik akan mencari medium lain yang lebih mudah untuk mengalirkan listrik (hambatan lebih kecil), yaitu gas yang terionisasi dan tereksitasi yang berada di luar dielektrik kaca. Gas yang terionisasi mempunyai muataan listrik, baik positif maupun negatif, yang akan membantu lebih mudahnya terbentuk lucutan listrik. Hal ini dibuktikan dengan lebih seringnya kemunculan *spark* pada bagian keluaran produk plasma DBD yang kaya dengan gas terionisasi dan tereksitasi.

Peristiwa pecahnya reaktor dua (diameter 14 mm) disebabkan oleh *spark* ini dan diperparah dengan adanya pengotor pada permukaan reaktor, sehingga timbul titik panas pada permukaan dielektrik. Dengan hipotesa bahwa jarak antara kedua ujung elektroda mempengaruhi timbulnya *spark*, maka pada pembuatan pengganti reaktor dua (diameter 14 mm) jarak antara ujung elektroda jala dan elektroda batang diperbesar dari sebelumnya. Ketika dilakukan pengujian uji plasma fisik, diamati lucutan listrik ini lebih intensitas kejadiannya.



**Gambar 4.1.** (a) Foto lucutan listrik yang tidak diharapkan (*spark*) (b) Terbentuknya bunga api yang menyebabkan retaknya reaktor dua (diameter 14 mm)

Fenomena lain yang teramati ialah munculnya warna hijau pucat pada kedua reaktor saat tegangan yang diaplikasikan sekitar 13.600 V. Fenomena ini baru teramati saat lampu dalam laboratorium TIP dimatikan. Hal ini terjadi karena intensitas cahaya hijau pucat tersebut sangat rendah sehingga tidak teramati saat kondisi ruangan terlalu terang. Warna ini kemungkinan berasal dari eksitasi gas

CO<sub>2</sub> yang mengemisi warna biru keputihan dan eksitasi gas O<sub>2</sub> yang berwarna kuning pucat. Suatu molekul yang tereksitasi akan segera mengemisi foton (sinar tampak) dan kembali pada keadaan elektronik dasarnya (Oxtoby *et al.*, 2003).

Saat laju aliran umpan pada kedua reaktor diubah-ubah tidak terlihat adanya perbedaan yang nyata pada fenomena fisik plasma DBD yang dihasilkan. Tabel 4.1 menyajikan fenomena fisik yang teramati pada reaktor plasma BDB dalam hubungannya dengan tegangan yang diaplikasikan.

**Tabel 4.1.** Hubungan tegangan yang diaplikasikan pada reaktor dengan fenomena yang teramati pada sumber listrik PLN

Tegangan reaktor (Tegangan primer NST)	Fenomena yang teramati
4.770 V (70 V)	Muncul bunyi degungan pelan, menandakan terjadinya pelepasan plasma DBD
11.600 V (170 V)	Terjadi lucutan listrik yang tidak diharapkan ( <i>spark</i> ) (Gambar 4.1 a) dengan instensitas yang jarang
13.600 V (200 V)	<i>Spark</i> semakin sering terjadi, terlihat warna kehijauan pucat pada reaktor
15.000 V (220V)	<i>Spark</i> sangat sering terjadi, hingga menyebabkan retaknya dielektrik gelas reaktor 2 (diameter dielektrik 14 mm)

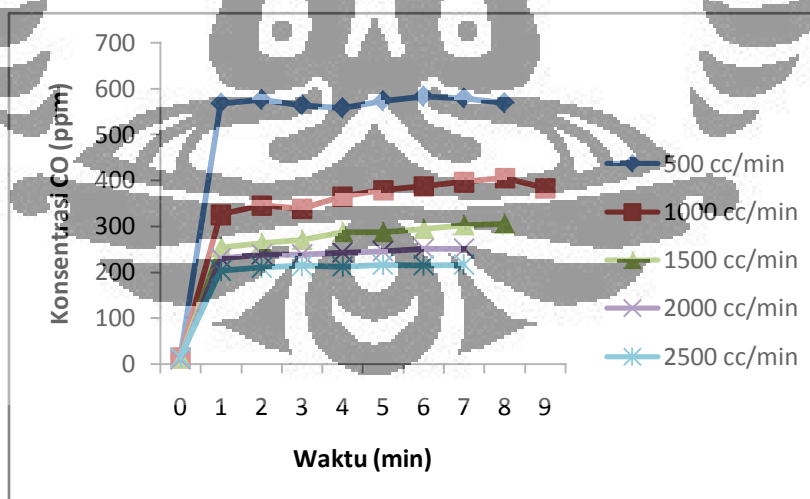
Setelah melakukan uji fisik, uji yang dilakukan berikutnya ialah mengetahui kemampuan reaktor plasma untuk mengkonversi CO<sub>2</sub> menjadi CO. Sebagai indikator digunakan keberadaan gas CO dan H<sub>2</sub>, yang merupakan produk paling mungkin dari pengolahan CO<sub>2</sub> basah, dalam aliran produk reaktor plasma DBD. Pada kondisi sebelum diplasma pada alat detektor tidak tercatat adanya kandungan gas CO dan gas H<sub>2</sub>. Segera setelah reaktor dinyalakan dengan laju alir 500 cc/menit dan tegangan 4470 V, mulai terdeteksi adanya kandungan gas CO yang semakin meningkat seiring dengan waktu, sedangkan gas H<sub>2</sub> tidak terdeteksi sama sekali walaupun tegangan terus dinaikkan. Mungkin ini disebabkan oleh kecilnya kandungan gas H<sub>2</sub> yang terbentuk (skala ppm), sedangkan alat deteksi tidak mempunyai sensitifitas pengukuran sekecil itu.



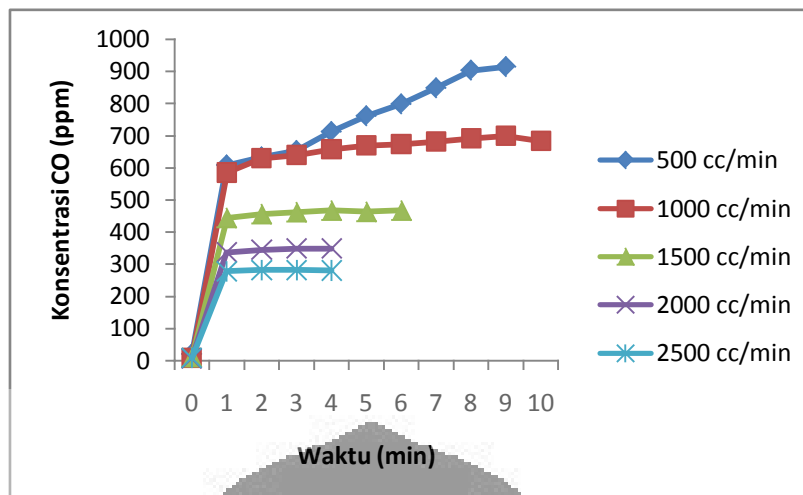
Terbentuknya gas CO ini juga semakin menguatkan bahwa pada kondisi 4470 V *breakdown voltage* telah tercapai.

Setelah reaktor dinyalakan selama dua menit tidak terlihat lagi kenaikan konsentrasi CO pada aliran produk, dari fakta ini disimpulkan bahwa kemungkinan reaksi konversi gas CO<sub>2</sub> menjadi gas CO merupakan reaksi bolak-balik (*reversible*). Dengan membandingkan data konsentrasi CO pada setiap laju alir, dilihat bahwa semakin besar laju aliran umpan, maka akan semakin kecil gas CO yang dihasilkan.

Kemudian secara bertahap tegangan dinaikkan menjadi 5450 V, 6130 V, dan 6820 V. Kenaikan tegangan menyebabkan kenaikan gas CO yang dihasilkan, karena semakin banyak gas CO<sub>2</sub> yang memperoleh cukup energi untuk bereaksi menjadi gas CO. Pada tegangan 6820 V dan laju alir 500 cc/menit, konsentrasi gas CO pada aliran produk telah melewati batas ukur detektor, yang hanya bisa mengukur konsentrasi gas CO hingga 999 ppm, sehingga pengujian dihentikan. Karena keterbatasan ini, diputuskan untuk analisis berikutnya akan dilakukan dengan menggunakan GC (*Gas Chromatografi*), dengan pemilihan kondisi operasi berdasarkan uji plasma fisik ini. Hasil pengujian untuk tegangan 4470 V dan 6820 V dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3.



**Gambar 4.2.** Grafik hubungan waktu, laju alir dan konsentrasi CO pada reaktor 1 dan tegangan 4470 V dengan menggunakan alat uji detektor gas CO



**Gambar 4.3.** Grafik hubungan waktu, laju alir dan konsentrasi CO pada reaktor 1 dan tegangan 6820 V dengan menggunakan alat uji detektor gas CO

#### 4.1.2. Uji Fisik dengan Sumber Listrik dari Inverter UPS

Uji ini dilakukan untuk menyelidiki dan membandingkan fenomena plasma fisik antara kedua sumber listrik, yaitu PLN dan inverter UPS. Pengujian dilakukan dengan mevariasikan tegangan yang diaplikasikan pada reaktor. Dari hasil pengamatan dilihat bahwa fenomena plasma fisik yang terjadi pemakaian sumber listrik dari inverter UPS hampir bersesuaian dengan fenomena sumber listrik PLN. Perbedaan mencolok yang terlihat ialah munculnya *spark* (Gambar 4.1 a) pada tegangan yang lebih rendah, pada sekitar 10.220 V dan lebih besarnya arus listrik yang mengalir. Pada tegangan 11.600 V intensitas *spark* yang muncul semakin tinggi, sehingga pengujian dihentikan. Munculnya *spark* pada tegangan yang lebih rendah ini kemungkinan disebabkan oleh lebih besarnya arus listrik yang mengalir ke reaktor dibandingkan pada saat menggunakan listrik PLN. Karena itu, dalam pengujian berikutnya, pemakaian tegangan dibatasi pada rentang 4470 – 8860 V.

#### 4.2. Uji Kinerja Reaktor

Uji ini merupakan analisis secara kuantitatif performa reaktor plasma DBD untuk pengolahan gas CO<sub>2</sub> basah. Data komposisi aliran umpan dan produk dianalisis menggunakan GC-TCD. Kondisi operasi dipilih berdasarkan uji fisik plasma DBD. Untuk sumber listrik dari inverter UPS, tegangan yang dipilih adalah 4470 V dan 8860 V, yaitu batas terendah teramatinya plasma DBD dan

batas tertinggi sebelum munculnya *spark*. Laju alir yang dipilih ialah 500 cc/menit dan 1500 cc/menit. Pemilihan ini didasarkan bahwa dalam uji fisik konversi CO<sub>2</sub> menjadi CO terbesar ialah pada 500 cc/menit, sedangkan laju alir 1500 cc/menit digunakan sebagai pembandingnya karena menghasilkan konversi yang cukup besar dan rentang nilainya tidak terlalu dekat dengan konversi CO<sub>2</sub> pada laju alir 500 cc/menit. Waktu untuk satu kali operasi reaktor ialah 5 menit karena hasil pengujian plasma fisik diketahui bahwa setelah menit ke-dua tidak terjadi lagi kenaikan produksi gas CO.

Dalam percobaan ini, data yang diambil untuk melakukan analisis variasi laju alir, tegangan dan dimensi dielektrik gelas reaktor ialah:

- Komposisi aliran umpan dan produk reaktan plasma DBD
- Besarnya arus dan tegangan setiap percobaan
- Konsumsi energi setiap percobaan.

Tabel 4.2 memuat data yang diperoleh dari uji kinerja reaktor plasma DBD untuk sumber listrik dari inveter UPS.

**Tabel 4.2.** Komposisi gas umpan dan produk hasil pengujian GC dengan sumber listrik dari inverter UPS

Reaktor	Jenis	Laju Alir (cc/menit)	Tegangan (V)	H <sub>2</sub> O (%mol)	H <sub>2</sub> (%mol)	O <sub>2</sub> (%mol)	CO (%mol)	CO <sub>2</sub> (%mol)
-	Umpan			1,25	-	1,86	-	96,89
1	Produk	500	130	1,17	0,14	3,28	0,66	94,74
			70	1,43	0,1	1,98	0,21	96,28
		1500	130	1,15	0,07	1,77	0,29	96,71
			70	1,23	0,07	2,09	0,11	96,51
2	Produk	500	130	1,5	0,5	2,5	0,66	94,84
			70	1,33	0,1	2,23	0,25	96,09
		1500	130	1,06	-	2,29	0,21	96,44
			70	1,7	0,15	2,1	0,21	95,84

Dari hasil pengamatan GC pada Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa produk dari reaktor plasma DBD ini adalah gas CO yang berasal dari konversi CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> yang berasal dari konversi H<sub>2</sub>O, dan O<sub>2</sub> yang berasal dari konversi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O. Hal

ini dibuktikan dengan meningkatnya kandungan ketiganya dalam aliran produk. CO<sub>2</sub> pada aliran produk juga terlihat mengalami penurunan kuantitas dibandingkan dengan aliran umpan, sedangkan kuantitas H<sub>2</sub>O agak berfluktuasi. Seharusnya kuantitas H<sub>2</sub>O pada aliran produk lebih kecil daripada aliran umpan. Penyimpangan ini kemungkinan karena berfluktuasinya aliran umpan, sehingga mempengaruhi komposisi umpan yang memasuki reaktor. Diduga karena pemakaian *bubbler* sebagai penghasil uap air, sehingga perbandingan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O dalam umpan tidak dapat diatur.

Dalam setiap pengujian, juga dicatat besar tegangan dan arus yang mengalir di dalam reaktor. Dari pengamatan terlihat adanya kenaikan konsumsi daya dan energi dengan kenaikan tegangan yang diaplikasikan tetapi tidak terdapat perbedaan konsumsi daya antara kedua jenis reaktor yang dipakai dalam penelitian.

**Tabel 4.3.** Data konsumsi energi listrik reaktor pada pemakaian inverter UPS

Reaktor	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Listrik (W)	Energi Listrik (Wh) <sup>a</sup>
1	70	0,098	6,86	0,57
	130	0,24	31,2	2,6
2	70	0,098	6,86	0,57
	130	0,24	31,2	2,6

Ket: <sup>a</sup> energi listrik yang digunakan untuk pengoperasian 5 menit

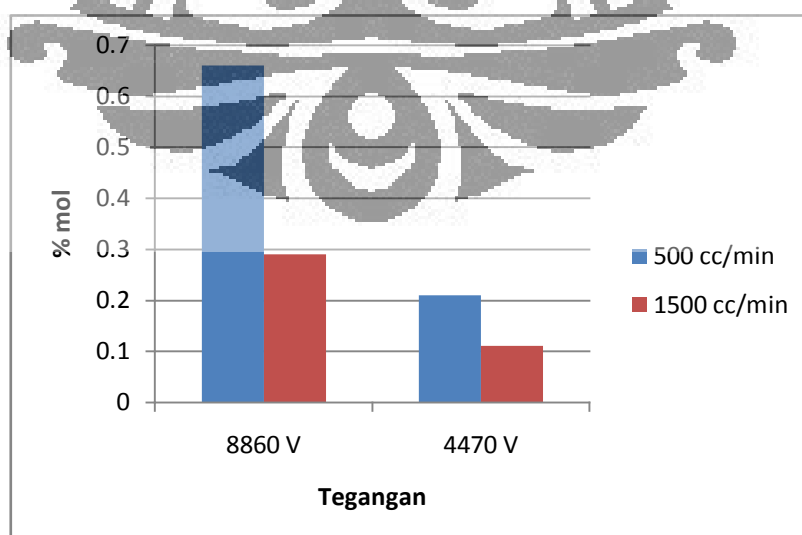
#### 4.2.1. Pengaruh Laju Alir dan Tegangan

Laju alir umpan merupakan salah satu parameter yang menentukan dalam kinerja setiap reaktor, termasuk reaktor plasma jenis DBD yang dirancang kali ini. Besarnya laju alir akan berpengaruh langsung pada waktu tinggal umpan dalam ruang *discharge* reaktor plasma. Semakin kecil laju alir yang diterapkan dalam reaktor plasma, maka waktu tinggal umpan umpan dalam reaktor akan semakin besar. Disini dipilih dua jenis laju alir yaitu 500 cc/menit dan 1500 cc/menit. Reaktor satu (OD 12 mm, ID 10 mm) mempunyai volume sebesar 28,6 cc dan reaktor dua (OD 14 mm, ID 12 mm) mempunyai volume sebesar 41,3 cc. Dari data laju aliran dan ukuran reaktor tersebut, waktu tinggal dapat dicari dengan persamaan 3.7 yang hasilnya dapat dilihat dalam Tabel 4.4.

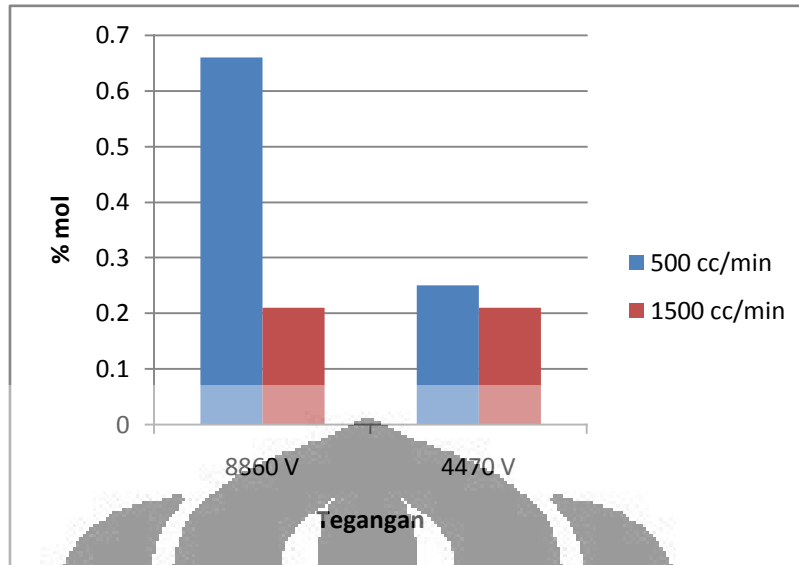
**Tabel 4.4.** Hubungan jenis reaktor, aliran umpan dan waktu tinggal dalam tinggal dalam reaktor plasma DBD

Reaktor	Aliran umpan (cc/menit)	Waktu tinggal (s)
1	500	3,4
	1500	1,1
2	500	5
	1500	1,65

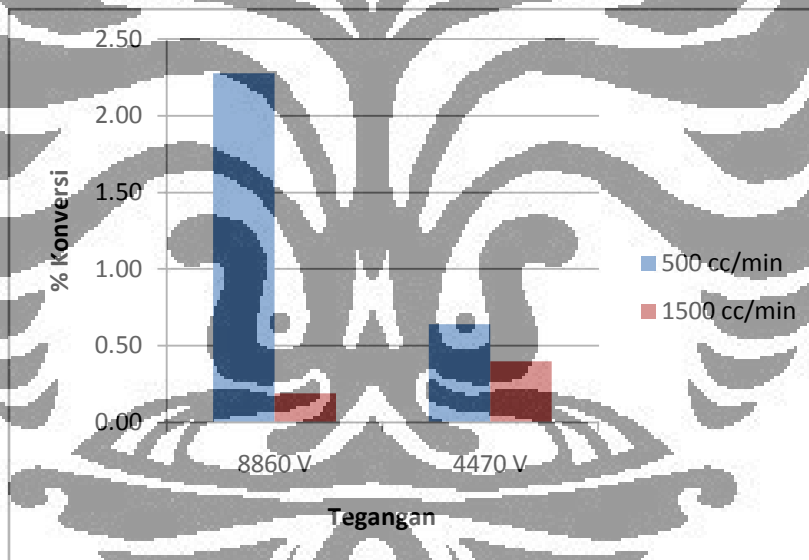
Jogan *et al.* (1993) dalam penelitiannya menyatakan bahwa semakin lama waktu tinggal umpan dalam reaktor plasma, maka akan semakin tinggi konversinya karena akan semakin banyak molekul dan atom yang memperoleh energi yang cukup untuk bereaksi. Hal ini sejalan dengan hasil yang diperoleh dalam penelitian ini, pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa lebih sedikit CO<sub>2</sub> yang terkonversi menjadi CO pada laju alir yang lebih besar (1500 cc/menit), ditandai dengan naiknya konsentrasi CO<sub>2</sub> yang terdeteksi dalam produk dibandingkan dengan laju alir 500 cc/menit. Penurunan kandungan CO<sub>2</sub> ini, berkorespondensi dengan peningkatan konsentrasi CO yang terdeteksi pada produk, dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 yang semakin kecil pada laju alir 1500 cc/menit. Sehingga disimpulkan untuk laju alir yang besar, terdapat kecenderungan lebih sedikit gas CO<sub>2</sub> yang terkonversi dan lebih banyak gas CO yang diproduksi.



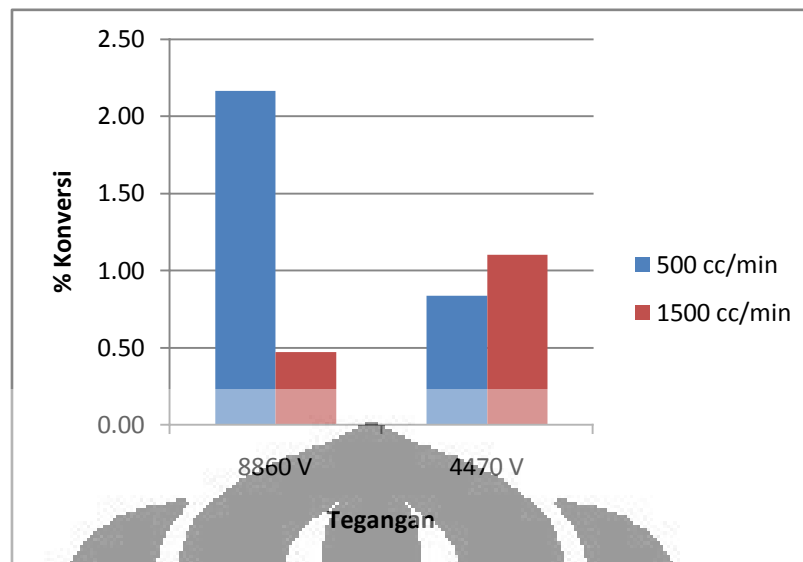
**Gambar 4.4.** Grafik hubungan laju alir, tegangan dan produksi CO pada reaktor 1



Gambar 4.5. Grafik hubungan laju alir, tegangan dan konsentrasi CO pada reaktor 2



Gambar 4.6. Grafik hubungan laju alir, tegangan dan konversi CO<sub>2</sub> pada reaktor 1



**Gambar 4.7.** Grafik hubungan laju alir, tegangan dan konversi  $\text{CO}_2$  pada reaktor 2

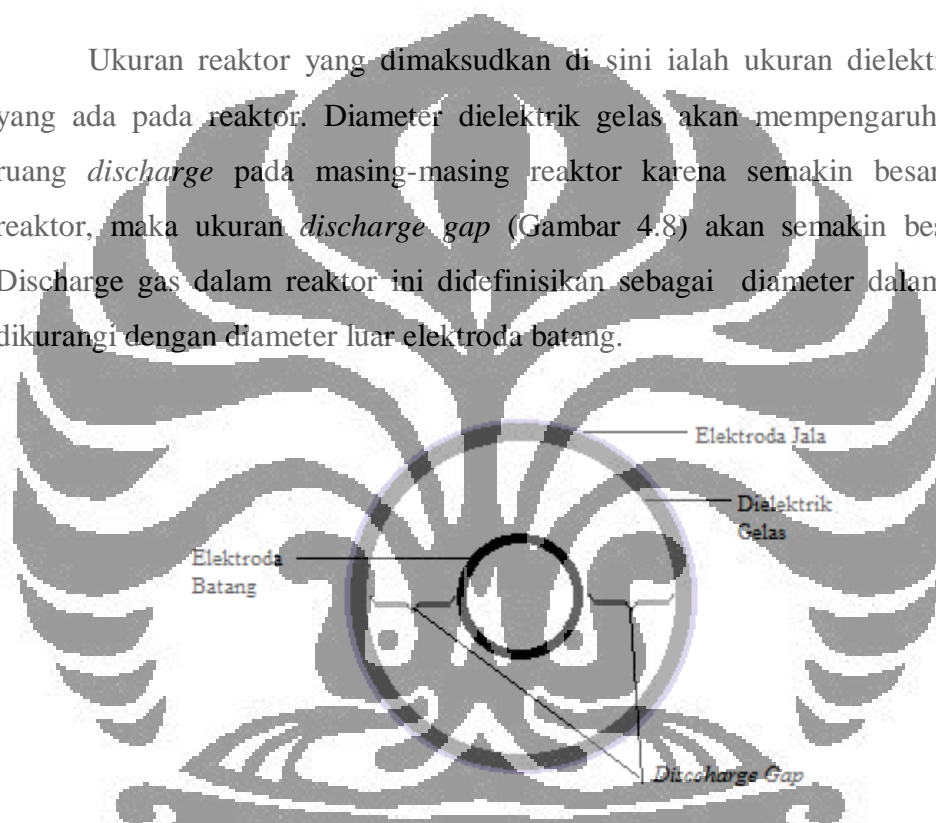
Pada percobaan ini juga diselidiki pengaruh tegangan terhadap konversi gas  $\text{CO}_2$  dan produksi gas  $\text{CO}$ . Guangyu *et al.* (2003) melaporkan, semakin besar tegangan yang diaplikasikan maka akan semakin banyak gas yang tereksitasi ataupun terionisasi. Hal ini akan mendorong pada lebih banyaknya gas  $\text{CO}_2$  terkonversi menjadi gas  $\text{CO}$ .

Untuk produksi gas  $\text{CO}$ , terlihat bahwa semakin tinggi tegangan semakin semakin tinggi pula gas  $\text{CO}$  yang terbentuk. Hasil ini mengkonfirmasi laporan Guangyu *et al.* (2003). Namun, hal yang sama tidak terlihat pada konversi  $\text{CO}_2$  karena terjadi penyimpangan terjadi pada hasil yang diperoleh pada laju alir 1500 cc/menit pada hasil pengamatan kedua reaktor. Dalam grafik pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 terlihat bahwa untuk laju alir tersebut peningkatan tegangan yang diaplikasikan malah menurunkan konversi gas  $\text{CO}_2$  yang terjadi, padahal pada tegangan yang rendah konsumsi energinya juga rendah. Lebih kecilnya energi yang diperoleh oleh reaktan akan berdampak langsung pada penurunan molekul  $\text{CO}_2$  yang memperoleh cukup energi untuk bereaksi. Untuk menjelaskan hal ini, dihipotesakan terjadinya reaksi balik gas  $\text{CO}$  hasil dekomposisi  $\text{CO}_2$  dengan radikal  $\cdot\text{OH}$  yang terbentuk dari dekomposisi  $\text{H}_2\text{O}$  karena besarnya energi pada ruang plasma, sebagai mana yang dilaporkan Guangyun *et al.* (2003). Namun, hal ini tidak cukup memuaskan penurunan konversi  $\text{CO}_2$  akan menyebabkan

penurunan produksi gas  $O_2$  (lihat Tabel 4.2). Selain itu, efek ini seharusnya juga bisa diamati pada laju alir 500 cc/menit yang mempunyai waktu tinggal lebih besar sehingga besar energi yang diterima gas CO, yang bisa mendorong reaksi balik, juga lebih besar. Mengingat fakta ini, maka diperlukan studi lebih lanjut untuk meneliti fenomena ini untuk mencapai kesimpulan yang lebih komprehensif.

#### 4.2.2. Pengaruh Ukuran Reaktor

Ukuran reaktor yang dimaksudkan di sini ialah ukuran dielektrik gelas yang ada pada reaktor. Diameter dielektrik gelas akan mempengaruhi ukuran ruang *discharge* pada masing-masing reaktor karena semakin besar ukuran reaktor, maka ukuran *discharge gap* (Gambar 4.8) akan semakin besar pula. Discharge gas dalam reaktor ini didefinisikan sebagai diameter dalam reaktor dikurangi dengan diameter luar elektroda batang.

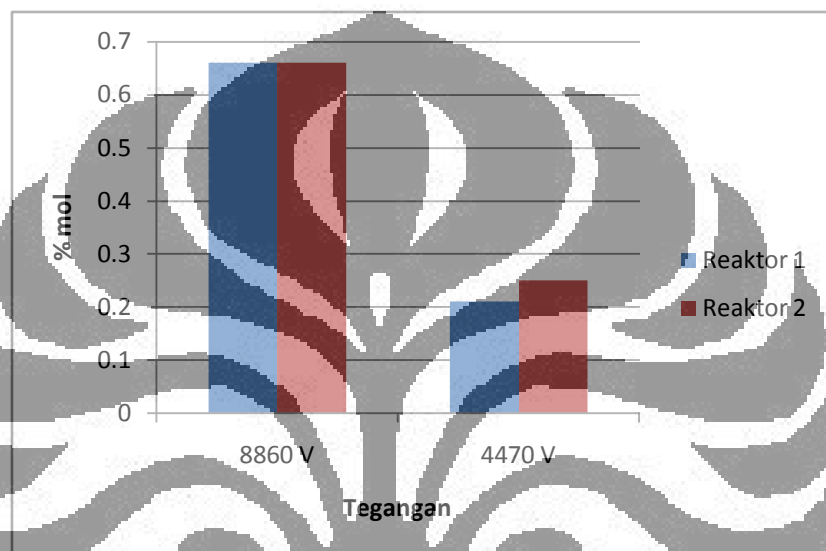


Gambar 4.8. *Discharge gap* dalam reaktor

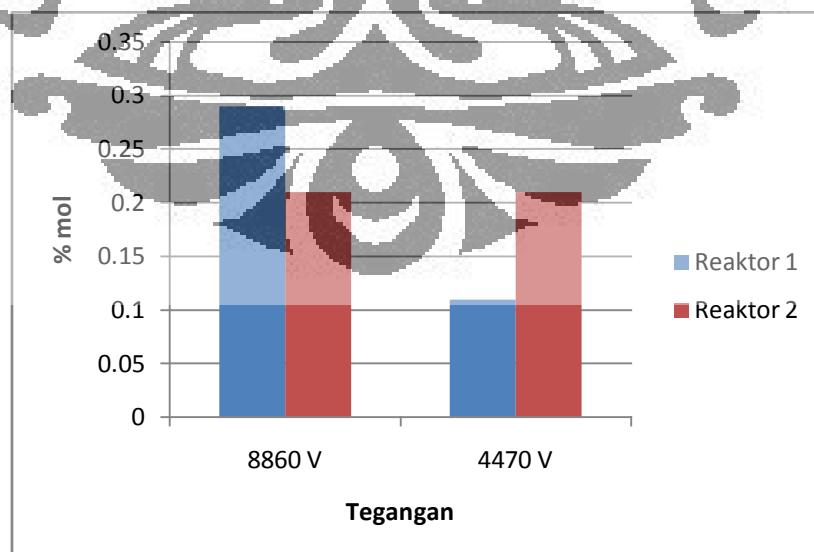
Waktu tinggal dalam ruang discharge (ruang di dalam dielektrik gelas) juga sangat mempengaruhi konversi  $CO_2$  karena disinilah molekul  $CO_2$  memperoleh energi untuk bereaksi. Jogan *et al.* (1993) melaporkan bahwa semakin lama waktu tinggal, maka akan semakin konversi  $CO_2$  yang diperoleh dan semakin besar gas CO yang diperoleh. Semakin lama aliran gas berada dalam ruang *discharge*, maka semakin banyak Waktu tinggal dalam ruang *discharge* telah disajikan sebelumnya dalam Tabel 4.4.



Hal lainnya yang juga dipengaruhi oleh perbedaan ruang *discharge* ialah kuat besarnya medan listrik. Semakin besar ukuran dielektrik kaca, maka kuat medan akan semakin kecil (Tipler, 1998). Semakin kecil kuat medan listrik, berarti semakin kecil pula energi yang diberikan kepada gas yang mengalir pada ruang *discharge*, sehingga CO<sub>2</sub> yang terkonversi menjadi lebih sedikit. Efek ini bertolak belakang dengan penambahan waktu tinggal yang telah efek waktu tinggal yang telah dijelaskan sebelumnya.

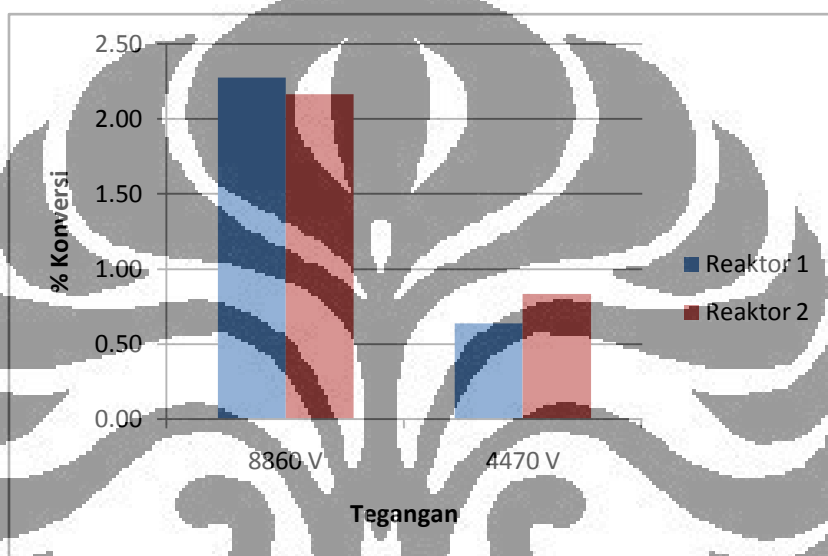


**Gambar 4.9.** Grafik hubungan tegangan, jenis reaktor dan produksi gas CO pada laju alir 500 cc/menit

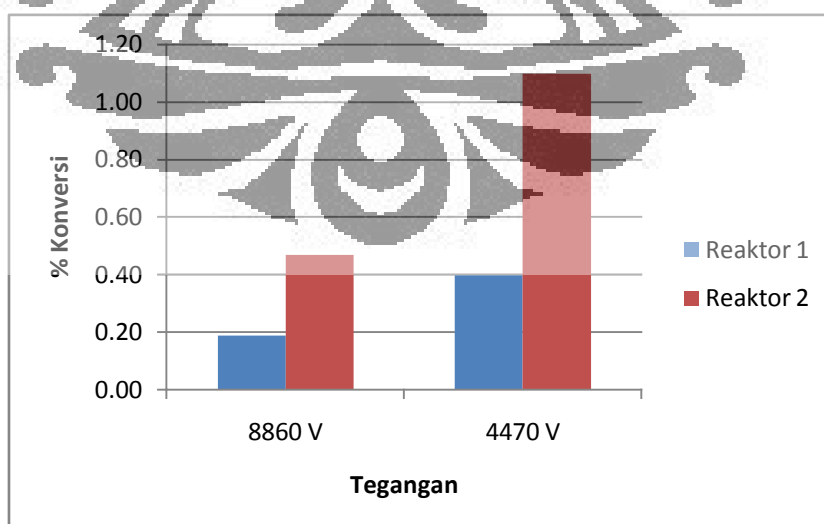


**Gambar 4.10.** Grafik hubungan tegangan, jenis reaktor dan produksi gas CO pada laju alir 1500 c/menit

Dari hasil pengamatan grafik pada Gambar 4.9, Gambar 4.10, Gambar 4.11 dan Gambar 4.12, tidak terlihat adanya pola yang jelas pada hasil pengamatan ini. Yang terlihat konsisten ialah konversi CO<sub>2</sub> dan produksi CO reaktor dua (diameter 14 mm) dibandingkan dengan reaktor satu (diameter 12 mm) pada tegangan 4470 V. Pada tegangan 8860 V tidak terdapat pola yang jelas, pada laju alir 500 cc/menit tidak terdapat perbedaan sedangkan untuk laju alir 1500 cc/menit, konversi CO<sub>2</sub> dan produksi CO reaktor pertama (diameter 12 mm) lebih besar dibandingkan dengan pada reaktor kedua (diameter 14 mm).



**Gambar 4.11.** Grafik hubungan tegangan, jenis reaktor dan konversi gas CO<sub>2</sub>  
Laju alir 500 cc/menit



**Gambar 4.12.** Grafik hubungan tegangan, jenis reaktor dan konversi gas CO<sub>2</sub>  
Laju alir 1500 cc/menit

### 4.2.3. Utilitas Energi

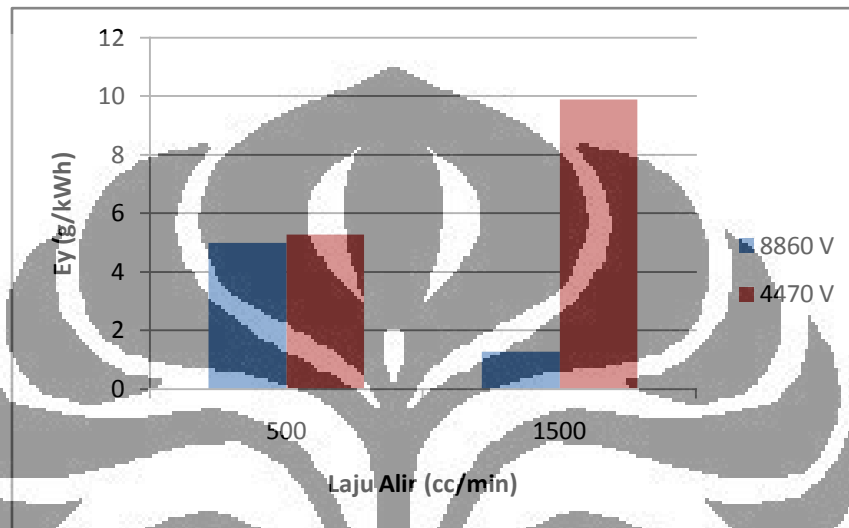
Analisis utilitas energi dibutuhkan untuk mengetahui seberapa banyak energi listrik yang dibutuhkan untuk mengkonversi setiap gram CO<sub>2</sub> dan efisiensi penggunaan energi listrik dalam reaktor. Sebagai asumsi, energi yang hilang pada rangkaian listrik dapat diabaikan. Semakin besar *energy yield* berarti semakin besar jumlah CO<sub>2</sub> yang terkonversi untuk setiap kWh energi listrik yang digunakan. Efisiensi menunjukkan seberapa efisiennya penggunaan energi listrik untuk konversi setiap mol CO<sub>2</sub> yang dikonversikan. Jogan *et al.* (2003) melaporkan bahwa peningkatan tegangan akan menurunkan efisiensi dan *energy yield*. Hasil perhitungan *energy yield* dan efisiensi disajikan dalam Tabel 4.5.

**Gambar 4.5.** Tabel hasil perhitungan *energy yield* dan efisiensi energi untuk mengkonversi CO<sub>2</sub>

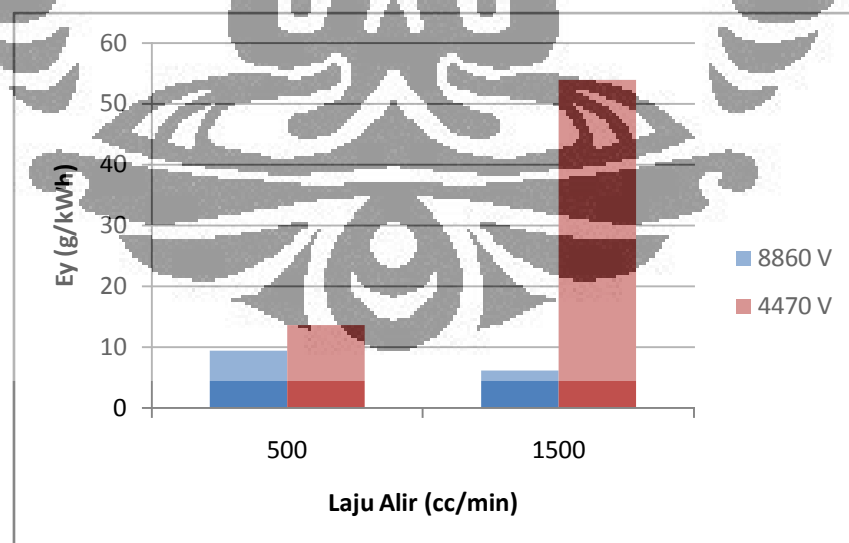
Reaktor	Laju Alir (cc/min)	Tegangan (V)	E <sub>y</sub> (gr/Kwh)	Efisiensi (%)
Reaktor 1	500	8860	4,99	2,47
		4470	5,27	2,61
	1500	8860	1,27	0,63
		4470	9,88	4,90
Reaktor 2	500	8860	9,43	4,67
		4470	13,70	6,79
	1500	8860	6,24	3,09
		4470	53,88	26,71

Hasil pengamatan terhadap Tabel 4.5 dan Gambar 4.13 sampai Gambar 4.15 dapat terlihat kemiripan hasil yang diperoleh dari penelitian ini dengan laporan Guanyun *et al.* (2003) yaitu terjadinya penurunan tingkat efisiensi dan *energy yield* dengan meningkatnya tegangan (Tabel 2.12). Penurunan ini disebabkan oleh semakin meningkatnya energi yang dibutuhkan untuk menggetarkan lektron dalam plasma. Di dalam plasma terdapat lucutan mikro yang jumlahnya sangat banyak. Lucutan akan menggetarkan elektron dan molekul yang berada di ruang *discharge*. Adanya elektron yang terlepas dari molekul dan atom akan menjadi media untuk menghantarkan listrik antar kedua elektroda pada reaktor DBD ini.

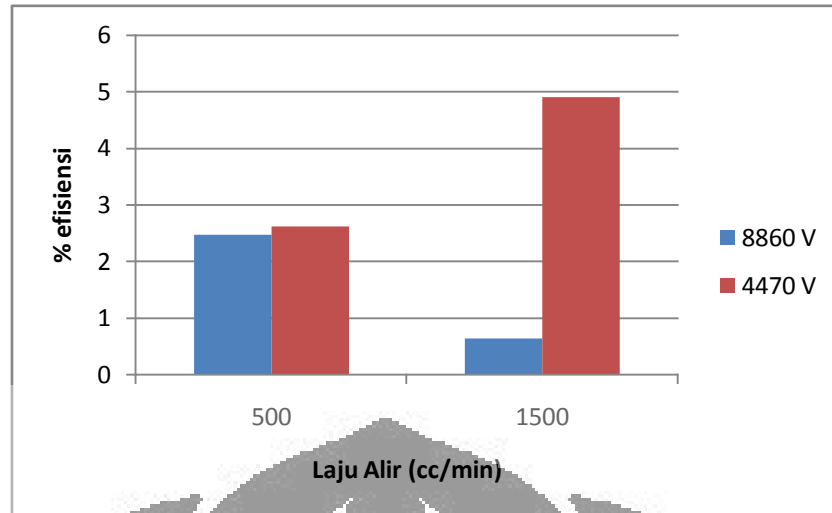
Perbandingan hasil yang diperoleh pada penelitian ini dengan hasil yang diperoleh oleh Guangyun *et al.* (2003) didapati bahwa pada tegangan yang bersesuaian efisiensi dan *energy yield* yang diperoleh pada penelitian ini lebih kecil. Hasil ini memberikan isyarat bahwa masih perlu dilakukan peningkatan rancangan reaktor untuk meningkatkan efisiensi dan *utilitas energy*.



**Gambar 4.13.** Grafik hubungan *energy yield*, laju alir dan tegangan pada reaktor 1

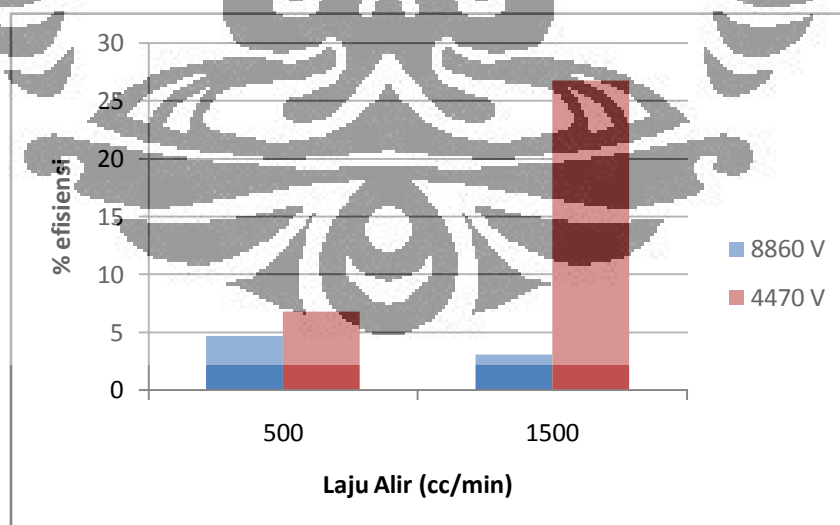


**Gambar 4.14.** Grafik hubungan *energy yield*, laju alir dan tegangan pada reaktor 2



**Gambar 4.15.** Grafik hubungan efisiensi energi, laju alir dan tegangan pada reaktor 1

Dalam analisis sebelumnya mengenai pengaruh tegangan terhadap konversi  $\text{CO}_2$  disimpulkan bahwa semakin besar tegangan yang diterapkan, maka akan semakin besar pula konversi. Namun disini didapati fakta menarik, yaitu rasio penambahan konversi  $\text{CO}_2$  lebih kecil dibandingkan dengan rasio penambahan energi listrik yang terpakai. Sehingga disimpulkan untuk memperoleh efisiensi penggunaan energi listrik yang besar, disarankan menggunakan tegangan yang rendah dalam operasi.



**Gambar 4.16.** Grafik hubungan efisiensi energi, laju alir dan tegangan Pada reaktor 2

#### 4.2.4. Pengaruh Jenis Sumber Daya Listrik.

Analisis yang dilakukan pada bagian ini adalah pengaruh perbedaan sumber daya listrik terhadap konversi gas CO<sub>2</sub>, produksi gas CO, dan utilitas energi untuk mengkonversi CO<sub>2</sub> pada kedua reaktor. Kondisi operasi yang dipilih ialah laju alir 500 cc/menit dan tegangan 4470 V. Laju alir 500 cc/menit dipilih karena menghasilkan konversi CO<sub>2</sub> terbesar, sedangkan tegangan 4470 V digunakan karena menghasilkan *energy yield* dan efisiensi energi terbesar. Pada Tabel 4.6 disajikan hasil analisis komposisi umpan dan produk pada penggunaan sumber listrik PLN, sedangkan hasil pengamatan pada penggunaan sumber listrik UPS dapat dilihat pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.6.** Analisis komposisi aliran umpan dan produk pada Penggunaan sumber listrik PLN

Jenis	Reaktor	H <sub>2</sub> O (% mol)	H <sub>2</sub> (% mol)	O <sub>2</sub> (% mol)	CO (% mol)	CO <sub>2</sub> (% mol)
Umpan	-	2,17	-	1,86	-	96,89
Produk	1	0,56	0,01	2,89	0,09	96,45
	2	3,26	1,06	3,04	0,12	92,52

**Tabel 4.7.** Data tegangan, arus, daya dan energi listrik untuk setiap reaktor pada penggunaan sumber listrik PLN

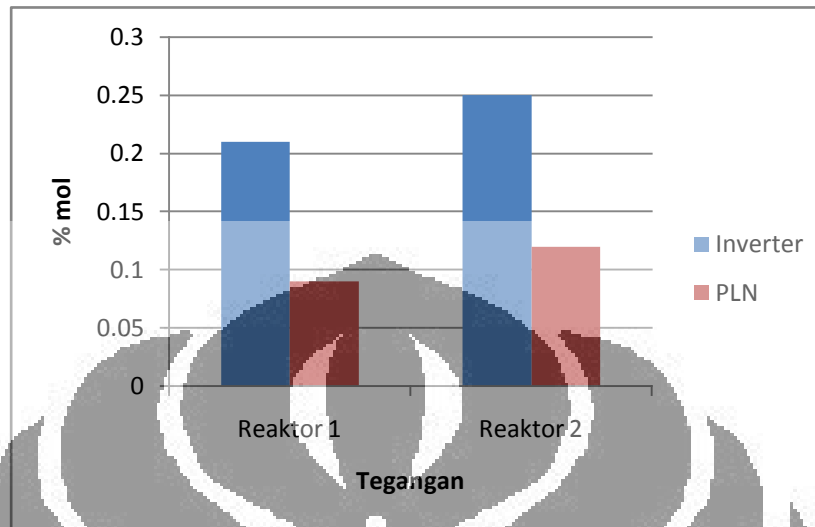
Reaktor	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Listrik (W)	Energi Listrik (Wh) <sup>a</sup>
1	70	0,05	3,5	0,293
2	70	0,05	3,5	0,293

Ket: <sup>a</sup> energi listrik yang digunakan untuk pengoperasian 5 menit

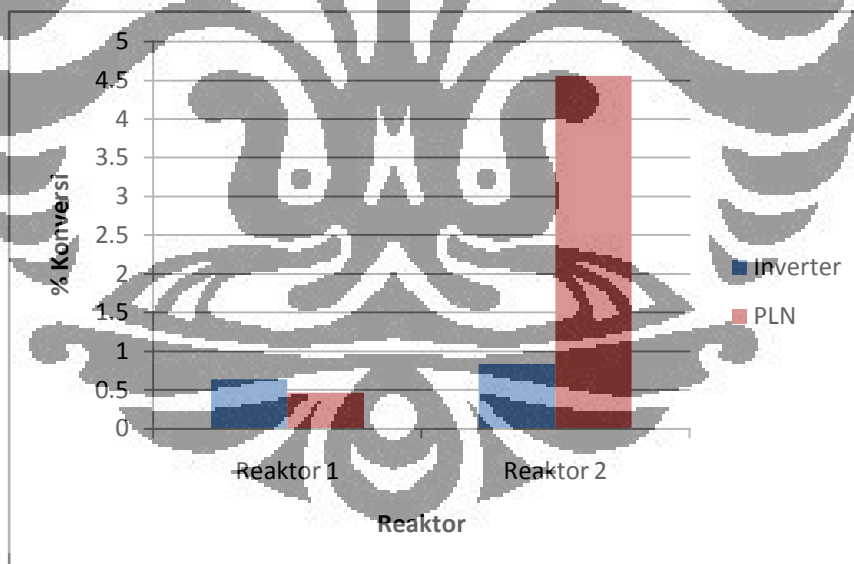
Pengukuran energi listrik yang terpakai (Tabel 4.7) dengan menggunakan pada kedua reaktor tidak menunjukkan adanya perbedaan antara konsumsi energi kedua reaktor. Padahal ukuran *discharge gap* kedua reaktor tersebut memiliki perbedaan.

Dari Gambar 4.17 terlihat bahwa produksi gas CO yang dihasilkan pada penggunaan sumber listrik UPS lebih besar dibandingkan dengan penggunaan sumber listrik PLN. Hal ini kemungkinan karena lebih besarnya energi yang dipakai oleh reaktor pada saat penggunaan sumber listrik inverter. Namun, untuk

konversi gas CO<sub>2</sub> tidak terdapat tren yang sama. Pada reaktor dua (diameter 12 mm) justru konversi CO<sub>2</sub> lebih jauh tinggi pada saat penggunaan listrik PLN dibandingkan dengan penggunaan inverter UPS.



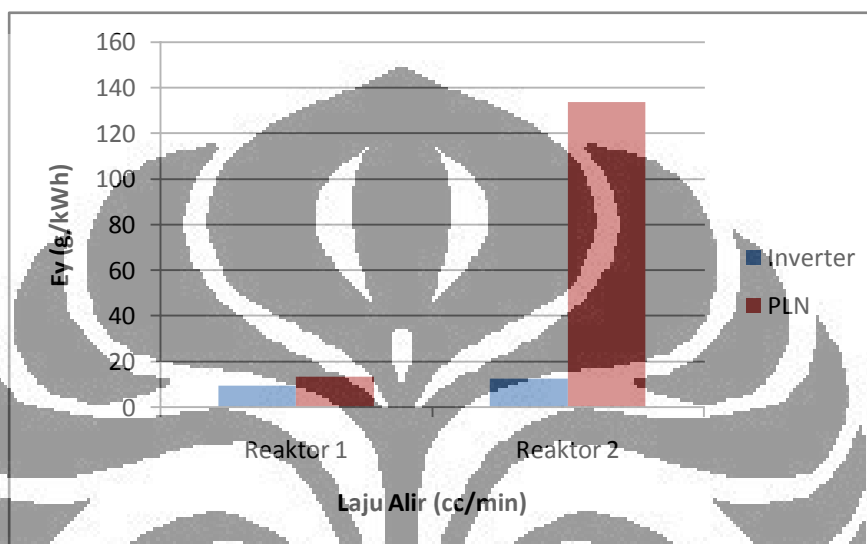
**Gambar 4.17.** Grafik hubungan produksi gas CO dengan jenis sumber listrik yang diterapkan pada laju alir 500 cc/menit dan tegangan 4470 V



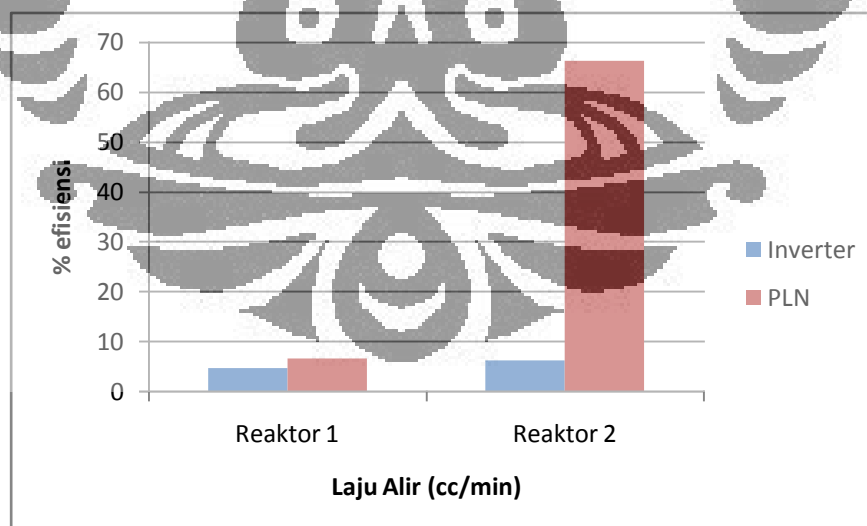
**Gambar 4.18.** Grafik hubungan konversi CO<sub>2</sub> dengan jenis sumber listrik yang diterapkan pada laju alir 500 cc/menit dan tegangan 4470 V

Dari Gambar 4.19, terlihat bahwa *energy yield* pada penggunaan listrik PLN lebih besar dibandingkan dengan penggunaan listrik PLN. Hal sama juga terlihat pada grafik hubungan efisiensi dengan sumber energi listrik dengan jenis sumber listrik (Gambar 4.20). Kenyataan ini memperlihatkan bahwa untuk

mengkonversi gas CO<sub>2</sub> dengan jumlah yang sama, energi yang dikonsumsi oleh listrik PLN lebih kecil dibandingkan dengan inverter UPS. Kemungkinan fakta ini disebabkan oleh perbedaan frekuensi antara listrik PLN dan listrik dari inverter UPS. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa frekuensi listrik inverter UPS sebesar 308 Hz, lebih besar dibandingkan listrik PLN yang hanya mempunyai frekuensi 60 Hz



**Gambar 4.19.** Grafik hubungan *energi yield* dengan jenis sumber listrik yang diterapkan pada laju alir 500 cc/menit dan tegangan 4470 V



**Gambar 4.20.** Grafik hubungan efisiensi energi dengan jenis sumber listrik yang diterapkan pada laju alir 500 cc/menit dan tegangan 4470 V



## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Reaktor plasma non-termal jenis DBD yang dirancang terbukti mampu mengonversi umpan gas CO<sub>2</sub> basah menjadi gas CO, walaupun kuantitasnya masih rendah.
2. Pada penggunaan sumber listrik inverter UPS diperoleh konversi CO<sub>2</sub> hingga 2,27%, sedangkan untuk sumber listrik PLN menghasilkan konversi hingga 4,55%.
3. Terdapat kecenderungan penurunan konversi gas CO<sub>2</sub> terhadap peningkatan laju alir.
4. Konsentrasi gas CO pada aliran umpan dengan penggunaan sumber listrik inverter UPS berkisar 0,11% – 0,66%, sedangkan dengan penggunaan sumber listrik PLN adalah 0,09% - 0,12%.
5. Peningkatan laju alir menyebabkan penurunan produksi gas CO oleh reaktor plasma DBD dengan sumber listrik inverter UPS.
6. Peningkatan tegangan menyebabkan peningkatan produksi gas CO oleh reaktor plasma DBD dengan sumber listrik inverter UPS.
7. Peningkatan tegangan menyebabkan penurunan *energy yield* dan efisiensi energi reaktor plasma DBD dengan menggunakan listrik inverter UPS.
8. Penggunaan listrik inverter UPS sebagai sumber daya menghasilkan produksi gas CO yang lebih besar dibandingkan dengan pemakaian listrik PLN.
9. Penggunaan listrik PLN menghasilkan *energy yield* dan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan inverter UPS.

#### 5.2. Saran

Dari hasil pengujian kinerja reaktor plasma DBD yang telah dibuat, masih diperlukan penyempurnaan lebih lanjut untuk menghasilkan kinerja yang lebih optimal. Saran peneliti mengenai peningkatan yang bisa dilakukan:

1. Diperlukan perbaikan pemasangan elektroda batang dan jala sehingga *spark* tidak terjadi. Hilangnya lucutan ini menyebabkan batas atas tegangan operasi meningkat.
2. Perlu dilakukan studi lebih hubungan konversi terhadap dan tegangan. Agar kecenderungannya lebih terlihat dapat dilakukan analisa pada rentang tegangan yang besar.
3. Untuk analisa yang lebih komprehensif mengenai pengaruh kandungan air terhadap kinerja reaktor plasma DBD, maka dibutuhkan peralatan tambahan yang berguna untuk mengatur aliran uap air sehingga komposisi umpan dapat ditentukan sesuai keinginan peneliti.



## DAFTAR PUSTAKA

- Chae, Jae-Ou; Dessiaterik, Yuriy. (2000). *Non-Thermal Plasma technology for Pollution Control*. Spingelink
- Chang J. S.; Lawless, P. A; Yamamoto, Toshiaki.. *Corona Discharge Processes*. IEEE Thermal Plasma Science. 19(6), 152–1166.
- Chen, F. F. (1974). *Introduction to Plasma Physics*. New York: Plenum Press.
- Cheng, D.K. (1992) *Field and Wave Electromagnetics* (2nd ed.). Reading, UK: Addison-Wesley Publishing Company.
- Guangyun *et al.* (2003). *The Mutual Conversion of CO<sub>2</sub> and CO in Dielectric Barrier Discharge (DBD)*. Plasma Chemistry and Plasma Processing Vol 23, 59-68.
- Istadi. (2006). *Aplikasi Teknologi Hibrid Katalisis-Plasma Dalam Pengembangan Reaktor Kimia Masa Depan*. Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis 1(2), 15-20.
- Jogan *et al.* (1993). *The Effect of Residence Time on the CO<sub>2</sub> Reduction from Combustion Flue Gasses by an AC Ferroelectric Packed Bed Reactor*. IEEE Transaction on Industry Application Vol. 29, 876 – 881.
- Kogelschätz, U. (2003). *Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications*. Plasma Chemistry Plasma Processing 23, 1-46.
- Lieberman, M.A.; Lichtenberg, A.J. (1994). *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Liu, C.J. *et al.* (2001). *Methane Conversion to Higher Hydrocarbons in the Presence of Carbon Dioxide Using Dielectric-Barrier Discharge Plasmas*. Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 21, No. 3.

- Liu, C.J., *et al.* (2006). *Converting of Carbon Dioxide Into More Valuable Chemicals Using Catalytic Plasmas*. 15 Agustus 2009.  
[http://www.anl.gov/pcs/.../45\\_4\\_washington%20dc\\_08-00\\_0694.pdf](http://www.anl.gov/pcs/.../45_4_washington%20dc_08-00_0694.pdf).
- Matsumoto, H *et al.* (2006). *Profiles of Carbon Dioxide Decomposition in a Dielectric-Barrier Discharge-Plasma Sytem*. Bull. Chem. Soc. Jpn., 72, 2567 - 2571.
- Meichsner, J. (2005). *Low Temperature Plasmas*. 7 September 2009.  
<http://www.springerlink.com/index/08238171756W3777.pdf>.
- Morvová, M.; Hanič, F.; Morva, I. (2000). *Plasma Technologies for Reducing CO<sub>2</sub> Emissions from Combustion Exhaust with Toxic Admixtures to Utilisable Products*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 61, 273-287.
- Nicholson, D. R. (1986). *Introduction to Plasma Theory*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Roth, J. Reece. (2001). *Industrial Plasma Engineering* (vol. 1). New York: Taylor & Francis Group.
- Sergey, Y. Savinov *et al.* (2004). *A Kinetic Study on the Conversion of Methane to Higher Hydrocarbons in a Radio-Frequency Discharge*. Korean Journal Chemical Engineering., 21(3), 601-610.
- Yamamoto, Toshiaki; Okubo, Masaaki. (2004). *Nonthermal Plasma Technology*. 20 September 2009. <http://www.springerlink.com/content/k0820728116thr34/>
- Zou, Ji-Jun *et al.* (2003). *Starch-enhanced Synthesis of Oxygenates from Methane and Carbon Dioxide using Dielectric-barrier Discharges*. Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 23, No. 1.
- Wikipedia. (2009). Carbon Dioxide. 20 Oktober 2009.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon\\_dioxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide).
- Wikipedia. (2009). Greenhouse Gas. 20 Oktober 2009. 20 Oktober 2009.  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse-gas>.

Wikipedia. (2009). List of Countries by Carbon Dioxide Emissions. 20 Oktober 2009.

[http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_countries\\_by\\_carbon\\_dioxide\\_emission](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_carbon_dioxide_emission).

Wikipedia. (2009). Methane. 20 Oktober 2009.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Water\\_\(properties\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Water_(properties)).

Wikipedia. (2009). Plasma (Physics). 20 Oktober 2009.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma\\_%28physics%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_%28physics%29).

Wikipedia. (2009). Water. 20 Oktober 2009. <http://en.wikipedia.org/wiki/Water>.

Anonim. (2009). Current Data for Atmospheric CO<sub>2</sub>. 20 Oktober 2009.

[http://co2now.org/20\\_oktober\\_2009](http://co2now.org/20_oktober_2009).

