



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN  
KONVERTER PLASMA NON-TERMAL DAN UJI KINERJANYA  
UNTUK PENGOLAHAN GAS CO<sub>2</sub>  
DENGAN SUMBER TEGANGAN BOLAK BALIK (AC)**

**SKRIPSI**

**FATHUR RAHMAN HARAHAAP  
06 06 07 63 62**

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



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN  
KONVERTER PLASMA NON-TERMAL DAN UJI KINERJANYA  
UNTUK PENGOLAHAN GAS CO<sub>2</sub>  
DENGAN SUMBER TEGANGAN BOLAK BALIK (AC)**

**SKRIPSI**

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

**FATHUR RAHMAN HARAHAAP  
06 06 07 63 62**

**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 : Fathur Rahman Harahap**

**NPM : 06 06 07 63 62**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 1 Juli 2010**

**HALAMAN PENGESAHAN**

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Fathur Rahman Harahap  
NPM : 06 06 07 63 62  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Rancang Bangun Konverter Plasma Non-termal dan Uji Kinerjanya untuk Pengolahan Gas CO<sub>2</sub> dengan Sumber Tegangan Bolak-Balik (AC)

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 1 : Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA (.....)  
Penguji 1 : Ir. Eva Fathul Karomah, MT (.....)  
Penguji 2 : Ir. Yuliusman, M.Eng (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 8 Juli 2010

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala, karena berkat rahmat dan petunjuk-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ungkapan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Setjo Bismo, DEA selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini;
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI;
3. Bapak Dr. Ir. Dijan Supramono, M.Sc., selaku pembimbing akademis yang telah membimbing penulis selama empat tahun kuliah di Teknik Kimia FTUI;
4. Kedua orang tua serta adik-adik yang selalu memberikan doa, dukungan moral, dan material sehingga skripsi ini dapat selesai;
5. Ikhsan Fatrian, Reza Saputra, dan Kevin Naldo rekan-rekan satu bimbingan yang telah banyak membantu dan berbagi dalam perjalanan panjang pengerjaan skripsi ini;
6. Mang Ijal, Kang Jajat, dan Mbak Tiwi yang telah banyak membantu dari awal hingga akhir;
7. Anak-anak KAPA FTUI (especially RC'ers), yang telah banyak memberikan dorongan dan semangat kepada penulis dalam penyusunan laporan skripsi ini;

Akhirnya penulis berharap agar skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 25 Juni 2009

Penulis

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

---

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

Nama : Fathur Rahman  
NPM : 06 06 07 63 62  
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 Konverter Plasma Non-termal dan Uji Kinerjanya untuk  
Pengolahan gas CO<sub>2</sub> dengan Sumber Tegangan Bolak-Balik (AC)**

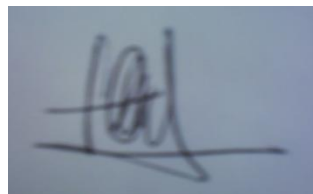
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya,

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 25 Juni 2010

Yang menyatakan



(Fathur Rahman Harahap)

## ABSTRAK

Nama : Fathur Rahman Harahap  
 Program Studi : Teknik Kimia  
 Judul : Rancang Bangun Konverter Plasma Non-termal untuk Konversi CO<sub>2</sub> dengan Sumber Tegangan Bolak-Balik (AC)

Dalam penelitian ini dibahas mengenai filosofi rancang bangun reaktor DBD serta uji kinerja dari reaktor plasma DBD yang digunakan untuk mengonversi CO<sub>2</sub> menggunakan sumber listrik dari trafo NST. Rancang bangun yang dibahas menyangkut fungsi dan alasan penggunaan setiap alat serta fenomena plasma yang timbul ketika melakukan penelitian. Sedangkan pada pengujian kinerja reaktor DBD, umpan yang digunakan adalah CO<sub>2</sub> kering dan CO<sub>2</sub> basah. Variasi yang diuji adalah laju alir, ukuran reaktor, dan tegangan. Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah konversi CO<sub>2</sub> berlangsung lebih baik pada kondisi laju alir rendah, ukuran reaktor kecil, dan menggunakan tegangan tinggi.

Kata kunci:

Plasma, Reaktor DBD, konversi CO<sub>2</sub>

## ABSTRACT

Name : Fathur Rahman Harahap  
 Majority : Chemical Engineering  
 Title : Design of Nonthermal Plasma Converter for CO<sub>2</sub> Conversion Using AC Voltage

In this research, we talked about the philosophy of DBD reactor design and performance test of DBD plasma reactor that used for CO<sub>2</sub> conversion using NST voltage. The design explained the function and the reason of using every instrument and plasma phenomena that happen during the research. Whereas in the DBD reactor performance test, the feed which was used are dry CO<sub>2</sub> and wet CO<sub>2</sub>. The variation that tested is flow rate, reactor size, and voltage of the system. The conclusion from this research is CO<sub>2</sub> conversion is better in the condition: low flow rate, small reactor, and using high voltage.

Key words:

Plasma, DBD Reactor, CO<sub>2</sub> conversion

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	v
ABSTRAK .....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
<b>BAB 1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Lingkup Permasalahan.....	3
1.5. Sistematika Penulisan.....	4
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
2.1. Definisi Plasma.....	5
2.2. Jenis Plasma.....	8
2.2.1. Plasma termal (plasma suhu tinggi).....	8
2.2.2. Plasma non-termal (plasma dingin).....	9
2.3. Jenis Plasma Non-termal.....	9
2.4. Spesi Aktif dalam Lingkungan Plasma Non-termal.....	10
2.4.1. Foton.....	10
2.4.2. Spesi netral.....	11
2.4.3. Partikel-partikel bermuatan.....	12
2.5. Keuntungan Penggunaan Plasma.....	13
2.6. Senyawa-senyawa reaktan untuk Reaktor Plasma.....	13
2.6.1. Karbon dioksida.....	13
2.4.3. Air.....	14
2.7. Reaktor plasma.....	14
2.8. Dielectric Barrier Discharge.....	16
<b>BAB 3. METODE PENELITIAN.....</b>	<b>20</b>
3.1. Rancang Bangun Reaktor Plasma DBD .....	21
3.1.1. Reaktor DBD.....	21
3.1.1.1. Konstruksi umum .....	22
3.1.1.2. Kelengkapan komponen.....	22
3.1.2. Sumber tegangan tinggi .....	30
3.1.2.1. Konstruksi umum .....	30
3.1.2.2. Kelengkapan alat .....	31

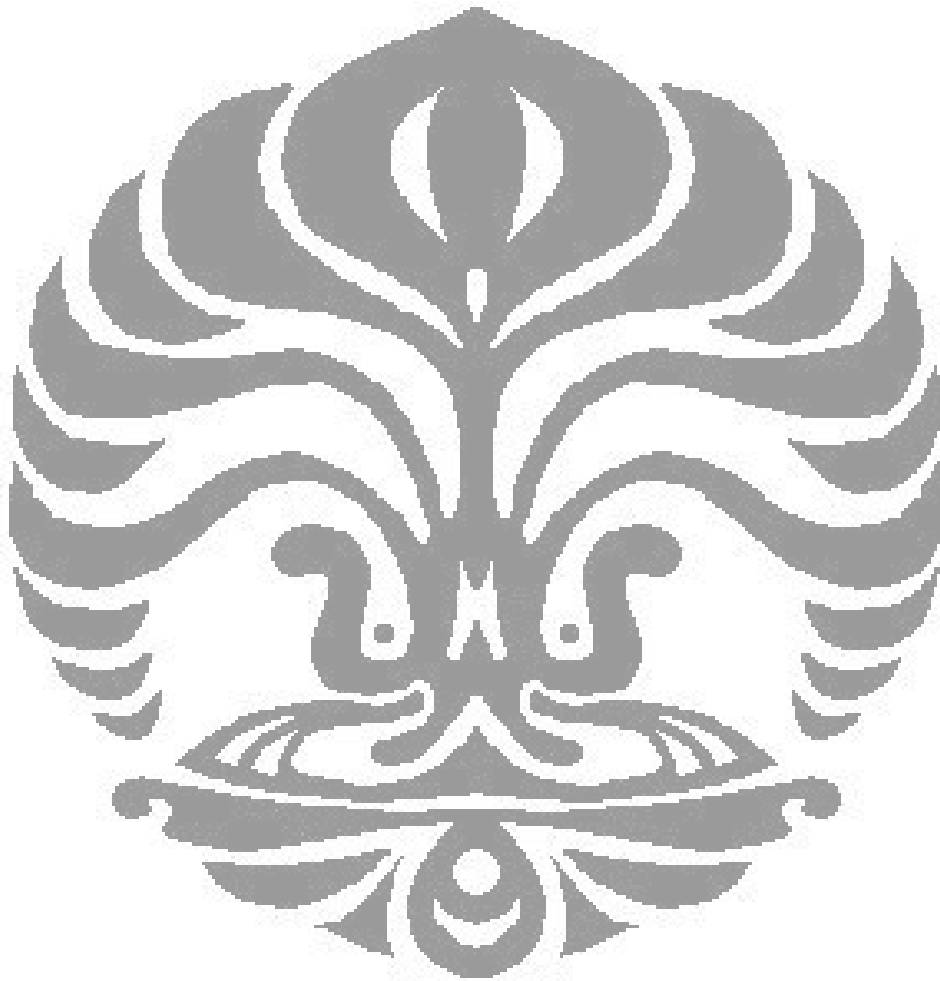


3.2. Uji <i>start up</i> alat .....	31
3.3. Uji Kinerja Reaktor Plasma Non-termal .....	34
3.3.1. Alat dan bahan.....	34
3.3.2. Prosedur uji kinerja reaktor plasma.....	34
3.3.3. Uji analisis gas keluaran GC .....	35
3.4. Analisis Gas Produk Keluaran Reaktor .....	37
3.4.1. CO analyzer.....	37
3.4.3. H <sub>2</sub> Analyzer .....	38
3.4.3. Gas Chromatography .....	39
3.5. Pengolahan Data .....	40
3.5.1. Perhitungan konversi.....	40
3.5.2. Perhitungan selektivitas .....	40
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>41</b>
4.1. Hasil Rancang Bangun Reaktor Plasma DBD.....	41
4.2. Uji Plasma Fisik.....	43
4.2.1. Rentang tegangan kerja .....	45
4.2.2. Tegangan minimum .....	46
4.2.3. Tegangan maksimum .....	47
4.3. Uji Kinerja Reaktor Plasma DBD untuk konversi CO <sub>2</sub> .....	48
4.3.1. Pengaruh laju alir terhadap produktivitas reaktor DBD.....	49
4.2.2. Pengaruh tegangan terhadap produktivitas reaktor DBD.....	50
4.2.3. Pengaruh ukuran reaktor terhadap produktivitas reaktor DBD .....	51
4.4. Uji Kinerja Reaktor Plasma DBD untuk konversi CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O .....	53
4.4.1. Pengaruh laju alir terhadap produktivitas reaktor DBD.....	54
4.4.2. Pengaruh tegangan terhadap produktivitas reaktor DBD.....	56
4.4.3. Pengaruh ukuran reaktor terhadap produktivitas reaktor DBD .....	59
4.5. Pengaruh Umpan yang digunakan terhadap produktivitas Reaktor DBD .....	61
<b>BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>63</b>
5.1. Kesimpulan.....	63
5.2. Saran .....	64
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>65</b>
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

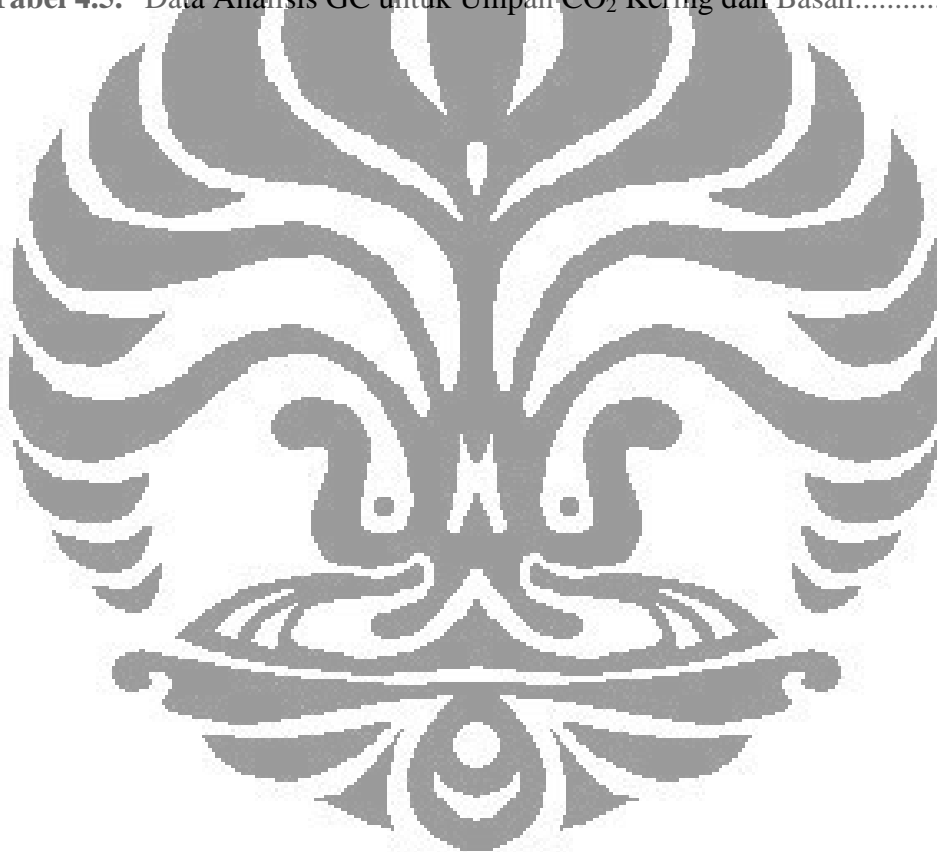
<b>Gambar 2.1.</b>	Reaksi-reaksi yang terjadi di dalam reaktor plasma .....	15
<b>Gambar 2.2.</b>	Prinsip dasar reaktor plasma DBD .....	17
<b>Gambar 2.3.</b>	Skema reaktor DBD .....	19
<b>Gambar 3.1.</b>	Diagram alir penelitian .....	20
<b>Gambar 3.2.</b>	Skematis rangkaian percobaan.....	21
<b>Gambar 3.3.</b>	Selongsong acrylic .....	23
<b>Gambar 3.4.</b>	Elektroda tegangan tinggi .....	23
<b>Gambar 3.5.</b>	Elektroda jala .....	24
<b>Gambar 3.6.</b>	Gelas dielektrik .....	24
<b>Gambar 3.7.</b>	Posisi pemasangan gelas dielektrik.....	25
<b>Gambar 3.8.</b>	Arah aliran pada baffle.....	26
<b>Gambar 3.9.</b>	Dua jenis nipple.....	27
<b>Gambar 3.10.</b>	Gas sampling.....	28
<b>Gambar 3.11.</b>	Aliran gas CO <sub>2</sub> yang melewati bubbler.....	28
<b>Gambar 3.12.</b>	Instalasi sumber listrik yang melewati bubbler .....	31
<b>Gambar 3.13.</b>	Regulator tegangan.....	31
<b>Gambar 3.14.</b>	Neon sign transformer.....	32
<b>Gambar 3.15.</b>	Amperemeter dan voltmeter.....	33
<b>Gambar 3.16.</b>	CO Analyzer.....	37
<b>Gambar 3.17.</b>	Aliran gas menggunakan diluent.....	38
<b>Gambar 3.18.</b>	H <sub>2</sub> analyzer.....	39
<b>Gambar 3.19.</b>	GC-TCD.....	39
<b>Gambar 4.1.</b>	Komponen-komponen pada reaktor DBD .....	41
<b>Gambar 4.2.</b>	Aliran gas di dalam reaktor.....	42
<b>Gambar 4.3.</b>	Komposisi umpan masuk reaktor.....	44
<b>Gambar 4.4.</b>	Produksi CO pada berbagai laju alir untuk umpan CO <sub>2</sub> basah pada reaktor 12 mm dan tegangan primer 70 V .....	47
<b>Gambar 4.5.</b>	Lecutan pijar api.....	48
<b>Gambar 4.6.</b>	Pengaruh laju alir terhadap konversi CO <sub>2</sub> pada tegangan 70 V dan 170 V (reaktor 12 mm).....	50
<b>Gambar 4.7.</b>	Pengaruh tegangan terhadap konversi CO <sub>2</sub> pada reaktor 12 mm dan 14 mm (laju alir 500 cc/menit) .....	51
<b>Gambar 4.8.</b>	Pengaruh laju alir terhadap konversi CO <sub>2</sub> pada reaktor 12 mm dan 14 mm (tegangan 170 V).....	52
<b>Gambar 4.9.</b>	Pengaruh laju alir terhadap konversi CO <sub>2</sub> pada tegangan 70 V dan 170 V (reaktor 14 mm).....	54
<b>Gambar 4.10.</b>	Pengaruh laju alir terhadap selektivitas CO (pada tegangan 70 V dan 170 V (reaktor 12 mm).....	55
<b>Gambar 4.11.</b>	Pengaruh laju alir terhadap selektivitas H <sub>2</sub> pada tegangan 70 V dan 170 V (reaktor 12 mm).....	55
<b>Gambar 4.12.</b>	Pengaruh tegangan terhadap konversi CO <sub>2</sub> pada reaktor 12 mm dan 14 mm (laju alir 500 cc/min).....	57
<b>Gambar 4.13.</b>	Pengaruh tegangan terhadap selektivitas CO pada reaktor 12 mm dan 14 mm (laju alir 500 cc/min).....	58
<b>Gambar 4.14.</b>	Pengaruh tegangan terhadap selektivitas H <sub>2</sub> pada reaktor	

	12 mm dan 14 mm (laju alir 500 cc/min).....	59
<b>Gambar 4.15.</b>	Pengaruh Laju Alir Terhadap Konversi CO <sub>2</sub> pada Reaktor 12 mm dan 14 mm (tegangan 170 V).....	60
<b>Gambar 4.16.</b>	Pengaruh laju Alir Terhadap Selektivitas CO pada Reaktor 12 mm dan 14 mm (tegangan 170 V).....	60
<b>Gambar 4.17.</b>	Pengaruh Laju Alir Terhadap selektivitas H <sub>2</sub> pada reaktor 12 mm dan 14 mm .....	61
<b>Gambar 4.18.</b>	Pengaruh Umpan yang Digunakan Terhadap Konversi CO <sub>2</sub> (Laju Alir 500 cc/min) .....	62



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b> Warna Plasma yang Ditimbulkan setiap Aliran Gas .....	7
<b>Tabel 2.2.</b> Perbedaan antara Plasma, Gas, Padat, dan Cair .....	8
<b>Tabel 2.3.</b> Energi –energi foton dalam spektrum elektromagnetik .....	11
<b>Tabel 2.4.</b> Karakteristik non-termal discharge .....	17
<b>Tabel 2.5.</b> Bahan yang digunakan sebagai elektroda.....	19
<b>Tabel 4.1.</b> Spesifikasi Reaktor DBD.....	43
<b>Tabel 4.2.</b> Hubungan Tegangan yang Diaplikasikan pada Reaktor dengan Fenomena yang Teramati pada Sumber Listrik PLN.....	46
<b>Tabel 4.3.</b> Data Analisis GC untuk Umpan CO <sub>2</sub> Kering .....	49
<b>Tabel 4.4.</b> Data Analisis GC untuk Umpan CO <sub>2</sub> Basah .....	53
<b>Tabel 4.5.</b> Data Analisis GC untuk Umpan CO <sub>2</sub> Kering dan Basah.....	62



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Gas rumah kaca (GRK) merupakan salah satu topik lingkungan yang amat penting akhir-akhir ini. Dampaknya pada perubahan iklim menjadikannya salah satu isu permasalahan lingkungan di dunia internasional. Efek gas rumah kaca adalah proses masuknya radiasi dari matahari dan terjebaknya radiasi di dalam atmosfer akibat gas rumah kaca sehingga suhu bumi menjadi naik.

Bertambahnya GRK di atmosfer akan menahan lebih banyak radiasi daripada yang dibutuhkan bumi sehingga akan terjadi kelebihan panas. Sebagai akibat kelebihan panas ini terjadilah masalah pemanasan global (*global warming*) yakni naiknya suhu permukaan bumi. Masalah ini juga diikuti naiknya suhu air laut, perubahan pola iklim seperti naiknya curah hujan, perubahan frekuensi dan intensitas badai, serta naiknya permukaan air laut akibat mencairnya es di kutub.

Gas yang dikategorikan sebagai GRK adalah gas-gas yang berpengaruh, baik secara langsung maupun tidak langsung terhadap efek rumah kaca. Gas-gas itu diantaranya karbon dioksida (Hyung, 2003), CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO, NO<sub>2</sub>, dan SO<sub>2</sub>. Di Indonesia kontribusi terbesar GRK berasal dari CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, dan N<sub>2</sub>O. Bagian terbesar emisi ini dihasilkan oleh sektor kehutanan dan energi.

Pada tahun 1990 kehutanan dan tata guna lahan menghasilkan 42,5 % dari total emisi GRK, sementara dari sektor energi menghasilkan 40,9 %, kemudian diikuti oleh emisi sektor pertanian (13,4 %), industri (2,4 %) dan limbah (0,8 %). Kegiatan konversi hutan dan pembukaan lahan adalah kegiatan yang paling banyak menghasilkan emisi GRK khususnya CO<sub>2</sub>. Hal ini terjadi karena dalam proses pembukaan lahan, banyak dilakukan pembakaran biomassa (sisa-sisa pohon seperti cabang, ranting dan daun) dan pembakaran hutan. Pembakaran inilah yang menghasilkan lebih dari sepertiga total emisi GRK dari seluruh sektor. Pada sektor energi, sebagian besar emisi CO<sub>2</sub> dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil. Pembakaran bahan bakar fosil berlangsung pada kendaraan bermotor dan generator-generator penghasil listrik.

Perubahan iklim berdampak merugikan pada lingkungan hidup dan kehidupan manusia. Oleh karena itu tingkat konsentrasi gas rumah kaca yang menjadi penyebab perubahan iklim harus dikurangi. Untuk mengurangi tingkat konsentrasi GRK diperlukan kesadaran dan komitmen umat manusia secara individu dan kelembagaan secara terus menerus bekerjasama terlibat dalam upaya mengurangi emisi gas rumah kaca

Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan diusulkan suatu alternatif pengolahan gas rumah kaca yang ramah lingkungan menggunakan teknologi plasma. Usulan yang dimaksud adalah suatu kegiatan rekayasa dan rancang-bangun Reaktor Plasma Non-termal berjenis *Dielectric Barrier Discharge* untuk mengolah CO<sub>2</sub> menjadi gas sintesis yang dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif. Sumber pembangkit plasma yang digunakan berasal dari sumber daya PLN.

Dalam penelitian ini akan dilakukan rancang-bangun *prototype* Reaktor Plasma Non-termal dengan kondisi kontinyu. Dimana, keefektifan dari *prototype* Reaktor Plasma Non-termal ini dipengaruhi oleh jenis tegangan yang digunakan, laju aliran, dan ukuran discharge gap dari reaktor yang digunakan. Nantinya, pada akhir analisis akan disimpulkan proses konversi yang memberikan hasil optimum.

## 1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah yang diberikan pada penelitian ini, dirumuskan suatu masalah yang akan dijadikan pembahasan yakni :

1. Bagaimana rancang bangun reaktor plasma non-termal sederhana dengan menggunakan tegangan listrik PLN.
2. Bagaimana kinerja reaktor plasma dingin dalam menghasilkan konversi CO<sub>2</sub> dan atau dengan H<sub>2</sub>O yang optimal.
3. Bagaimana hubungan antara laju alir, ukuran reaktor, dan tegangan yang digunakan terhadap konversi CO<sub>2</sub>.

### 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian yang dilakukan adalah:

1. Merancang bangun prototipe konverter plasma non-termal untuk mengonversi CO<sub>2</sub> dan atau dengan H<sub>2</sub>O.
2. Menghasilkan plasma menggunakan sumber listrik PLN.
3. Menguji kinerja reaktor plasma dingin pada skala laboratorium terhadap konversi CO<sub>2</sub> dan atau dengan H<sub>2</sub>O.

### 1.4. Lingkup Permasalahan

Penelitian tentang proses konversi CO<sub>2</sub> dengan menggunakan reaktor plasma non-termal ini dibatasi oleh beberapa hal, diantaranya adalah:

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses (TIP) dengan kondisi operasi kontinu.
2. Reaktor Plasma Dingin (Non-termal) akan dirancang menggunakan bahan kaca borosilikat sedangkan elektroda menggunakan bahan stainless steel.
3. Bahan baku yang digunakan pada penelitian ini adalah CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O dalam bentuk gas.
4. Sumber listrik yang digunakan berasal dari sumber listrik PLN.
5. Pengukuran kuat arus listrik dan tegangan listrik yang dilakukan dengan menggunakan amperemeter dan voltmeter.
6. Analisa kualitatif kandungan senyawa produk dilakukan dengan analisa kualitatif menggunakan metode *gas chromatography*.

### 1.5. Sistematika Penulisan

Metode penulisan yang digunakan dalam penelitian ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

#### BAB I PENDAHULUAN

Bagian ini menjelaskan latar belakang masalah, rumusan masalah yang dibahas, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, keaslian penelitian, serta sistematika penulisan.

#### BAB II LANDASAN TEORI

Berisi tinjauan pustaka yang merupakan literatur dasar penelitian agar dapat memberikan gambaran tentang plasma non-termal yang digunakan untuk mengonversi senyawa karbon dioksida. Tinjauan pustaka ini meliputi penjelasan tentang teknologi plasma meliputi jenis-jenis plasma, keuntungan penggunaan plasma, penelitian-penelitian sebelumnya yang bertautan, gas rumah kaca yang digunakan, serta *dielectric barrier discharge*.

### BAB III METODE PENELITIAN

Membahas tentang skema penelitian, metode, peralatan yang digunakan dalam penelitian, serta prosedur yang dilakukan untuk merancang dan menguji kinerja dari prototipe reaktor plasma non-termal untuk mengonversi karbon dioksida

### BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang data hasil percobaan, pengolahan, serta analisa dari penelitian.

### BAB V PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan dan saran yang dibutuhkan untuk penelitian selanjutnya.

### LAMPIRAN.



## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

Gas CO<sub>2</sub> merupakan senyawa yang penting bagi kehidupan manusia. Perannya sebagai gas rumah kaca merupakan penyebab terjadinya pemanasan global di bumi. Konversi CO<sub>2</sub> menjadi senyawa kimia yang lebih berharga merupakan suatu isu yang sangat penting belakangan ini. Sudah banyak metode yang digunakan untuk mengonversi CO<sub>2</sub> seperti diantaranya oksidasi katalitik, aktivasi elektrokimia, dan oksidasi fotokatalitik (Weimin Gong, 2000).

Penelitian mengenai plasma umumnya berlangsung pada suhu dan tekanan tinggi. Langkah yang paling penting untuk menentukan jenis proses yang dipilih adalah saat membangkitkan senyawa radikal yang ada dan mengontrol reaksi yang terjadi. Metode alternatif yang dapat digunakan untuk mengkonversi CO<sub>2</sub> menjadi gas sintetis menggunakan plasma. Pada makalah skripsi ini akan dibahas mengenai konversi CO<sub>2</sub> menggunakan reaktor *dielectric barrier discharge* yang berlangsung pada kondisi atmosferik.

#### 2.1. Definisi Plasma

Plasma didefinisikan sebagai jenis materi keempat (setelah padat, cair, dan gas) berbentuk lebih menyerupai gas yang berada dalam keadaan terionisasi dan memiliki waktu keberadaan (lifetime) yang relatif singkat dibandingkan gas asalnya. Terminologi plasma dalam teknologi plasma tidak lain adalah partikel neutron, ion positif, ion negatif, dan elektron yang sangat terpengaruh oleh medan elektromagnetik.

Plasma dapat juga dikatakan sebagai atom atau molekul yang kehilangan elektron karena beberapa elektron di orbit terluarnya telah terpisah dari atom (molekul) asalnya. Hal ini menunjukkan sekumpulan ion dan elektron yang tidak lagi terikat satu sama lain. Proses penyisihan elektron dari atom dan atau molekul tersebut membutuhkan suatu tingkat energi tertentu, baik dalam bentuk panas, listrik,

ataupun cahaya. Partikel-partikel yang terionisasi (bermuatan) tersebut kemudian secara spontan berubah menjadi plasma (Eliezer, 2001).

Berdasarkan perbedaan suhu partikel pembentukannya, yaitu suatu gas yang diionisasi sehingga melepaskan elektronnya, plasma dibedakan menjadi dua jenis yaitu:

1. Plasma termal, yaitu jenis plasma yang memiliki suhu partikel gas setara atau hampir sama dengan suhu elektronnya ( $T_{\text{gas}} \approx T_{\text{elektron}}$ ). Suhu elektron dan partikel gas berada dalam keadaan kesetimbangan (quasi equilibrium) akibat adanya pemanasan joule (joule heating). Contohnya adalah plasma matahari.
2. Plasma non-termal adalah plasma dengan suhu gas yang lebih rendah dari suhu elektronnya ( $T_{\text{gas}} < T_{\text{elektron}}$ ). Suhu elektron dapat mencapai harga sekitar 1 eV atau sekitar 10.000 K. Sedangkan partikel gas berada di sekitar suhu ambien. Contohnya adalah Aurora Borealis dan Aurora Australis.

Teknologi plasma memiliki beberapa keunggulan, diantaranya dikenal sebagai teknologi yang ramah lingkungan, murah dan mudah, dan dapat digunakan berulang kali. Dalam dunia teknik telah dikenal luas beberapa aplikasi teknologi plasma non-termal (NTP). Beberapa diantara aplikasi ini adalah teknologi plasma dalam AC atau sistem pendingin udara (*plasma cluster*) dan teknologi plasma pada layar televisi.

Plasma dibuat dengan cara pemanfaatan tegangan listrik teknologi plasma melibatkan pembentukan bunga api listrik dengan melewati arus listrik di atas 10 kV melalui suatu gas dalam proses yang disebut pemutusan listrik (*electrical breakdown*). Dikarenakan adanya tahanan listrik sepanjang sistem, dihasilkan sejumlah panas dalam jumlah yang signifikan dengan cara mengambil elektron dari molekul-molekul gas menghasilkan suatu aliran gas yang terionisasi, atau plasma (Gomez, et al, 2009).

Tabel 2.1. Warna plasma yang ditimbulkan setiap aliran gas

Gas yang mengalir	Warna plasma yang timbul
CF <sub>4</sub>	Biru
SF <sub>6</sub>	Biru putih
SiF <sub>4</sub>	Biru muda
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

Sumber: Barros, 2008;

Mengalirnya arus listrik menunjukkan akan adanya ionisasi yang mengakibatkan terbentuknya ion serta elektron di antara kedua elektroda tadi. Semakin besar tegangan listrik yang diberikan pada elektrode, semakin banyak jumlah ion dan elektron yang terbentuk. Aksi-reaksi yang terjadi antara ion dan elektron dalam jumlah banyak ini menimbulkan kondisi udara di antara dua elektroda ini netral, inilah yang disebut plasma (Chem-is-try.org, 2009).

**Tabel 2.2.** Perbedaan antara Plasma, Gas, Padat, dan Cair

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

Sumber: Lieberman dan Lichtenberg, 2005.

## 2.2. Jenis Plasma

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

### 2.2.1. Plasma termal (plasma suhu tinggi)

Densitas energi plasma termal sangat tinggi. Suhu antara partikel berat (atom, molekul, ion) dan elektron relatif sama. Suhu elektron dan gas hampir berada dalam keadaan kesetimbangan (*quasi-equilibrium*) dikarenakan adanya efek pemanasan Joule (*Joule heating*). Mobilitas elektron plasma termal jauh lebih tinggi sehingga energi yang diberikan kepada plasma akan ditangkap oleh elektron yang dipindahkan ke partikel-partikel berat melalui tumbukan elastis.

Densitas jumlah elektron yang tinggi pada plasma termal dikaitkan dengan

kondisi operasinya yang berlangsung pada tekanan atmosferik menyebabkan frekuensi tumbukan elastis sangat tinggi dan kesetimbangan termal tercapai dengan cepat. Contoh plasma termal adalah plasma dari arus DC atau radio frekuensi (RF) inductively coupled discharges (Kogelschatz, 2004). Plasma matahari juga termasuk salah satu contoh plasma termal.

### 2.2.2. Plasma non-termal (plasma dingin)

Plasma non-termal memiliki densitas energi yang lebih rendah dibandingkan dengan plasma termal. Perbedaan suhu antara elektron dan partikel yang lebih berat jauh berbeda. Elektron dengan energi yang cukup bertumbukan dengan gas latar (*background*) menghasilkan disosiasi, eksitasi dan ionisasi tingkat rendah tanpa peningkatan entalpi gas yang cukup besar. Hasilnya, suhu elektron melampaui suhu partikel-partikel berat hingga beberapa derajat perpangkatan dan karenanya memungkinkan untuk mempertahankan suhu keluaran (*discharge*) pada suhu yang jauh lebih rendah, bahkan pada suhu ruang.

Plasma jenis ini menghasilkan spesi-spesi aktif yang lebih beragam, dan atau lebih besar energinya dibandingkan dengan spesi yang biasa dihasilkan pada reaktor kimia. Pada plasma jenis ini suhu dari elektron mencapai 10.000 K sedangkan suhu gas sama dengan suhu ruang. Plasma jenis ini dihasilkan dalam berbagai jenis seperti *glow discharge (GD)*, *corona discharge (CD)*, dan *dielectric barrier discharge (DBD)* yang mempunyai densitas energi berkisar antara  $10^{-4}$  hingga puluhan watt per  $\text{cm}^3$ . (Roth, 2001). Contoh plasma non-termal alami adalah *Aurora Borealis* dan *Aurora Australis*. Sedangkan contoh plasma non-termal buatan akan dijelaskan pada sub-bab berikutnya.

### 2.3. Jenis Plasma Non-termal

Seperti telah disinggung sekilas pada paragraf sebelumnya, saat ini dikenal beberapa jenis plasma non-termal, yaitu: *glow discharge*, *radio frequency discharge*, *gliding arc plasma*, *dielectric barrier discharge*, *microwave plasma*, dan *corona discharge*. Perbedaan utama diantara plasma ini adalah bagaimana arus dan daya *discharge* dikontrol dengan suplai energi, laju alir, dan desain (T. Paulmier, et al., 2005).

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

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

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

Teknik plasma *corona* serupa dengan *gliding arc* dalam pemasangan, tetapi berbeda dalam operasinya. Dalam *gliding arc*, plasma ditekan ke bawah reaktor, tetapi plasma *corona* dihasilkan diantara elektroda sepanjang reaktor (Mutaf-Yardimci, 1998). Plasma dihasilkan dengan menggunakan pulsa elektrik yang sangat cepat. Keuntungan dari proses ini adalah panjang dari pulsa elektrik lebih pendek dari waktu di antara pulsa, hasilnya daya yang dikonsumsi menjadi lebih kecil dibandingkan dengan teknologi plasma yang lain.

#### 2.4. 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 spesi yang sama yang dihasilkan dalam reaktor kimia konvensional. Spesi aktif ini biasanya dihasilkan dari discharge pijar (*torch*) atau plasma pancaran (*arc*) yang terdiri dari foton, spesi netral, dan partikel bermuatan (Roth, 2001).

##### 2.4.1. 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 dan kebanyakan mempunyai efek umum yang sama dengan dinding panas atau reaksi-reaksi kimia biasa.

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

Tabel 2.3. Energi-Energi Foton dalam Spektrum Elektromagnetik

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

Sumber: Refh, 2001.

Dikarenakan tidak bermuatan, foton tidak terpengaruh oleh medan listrik atau magnet yang dapat hadir dalam selubung sehingga dapat mencapai permukaan dengan energi aslinya. Foton-foton ultraviolet dan sinar 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:

- *Disosiasi*, menghasilkan sebuah atom individual atau potongan molekular kecil dari molekul yang lebih besar, seperti polimer.
- *Pemotongan*, memecah rantai molekular polimer; atau menghasilkan dua potongan molekular besar dari sebuah molekul induk.
- *Pencabangan*, menghasilkan rantai-rantai sisi pada sebuah molekul besar

atau polimer.

- *Crosslinking*, yang menghasilkan matriks molekular dua atau tiga dimensi dengan membentuk ikatan-ikatan antara molekul-molekul atau polimer yang berdekatan.

#### 2.4.2. 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:

- atom-atom reaktif
- Spesi-spesi atomik yang sangat reaktif secara kimiawi seperti H, O, F, Cl, dan lain-lain
- Monomer yang membentuk cabang-cabang polimerik pada permukaan yang disentuhnya
- Potongan-potongan molekular yang relatif ringan, yang dapat membentuk senyawa kompleks pada permukaan dan atau mendorong pencabangan atau *cross-linking* molekul-molekul yang dekat permukaan
- Atom tereksitasi atau kondisi molekular, dimana eksitasi elektron orbital membuat spesi-spesi menjadi lebih reaktif secara kimiawi daripada keadaan normal
- Radikal bebas, potongan molekular yang dihasilkan dalam plasma dengan sekurang-kurangnya satu elektron yang tidak berpasangan.

Semua spesi aktif ini dapat berinteraksi dengan kuat dengan permukaan.

#### 2.4.3. 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 rekombinasi 3 pihak. Ion-ion molekular dapat juga dihasilkan seperti potongan molekular bermuatan seperti  $\text{OH}^-$ , yang dapat mengalami reaksi kimia kuat dalam plasma atau pada permukaan.

## 2.5. Keuntungan penggunaan plasma

Pemanfaatan teknologi plasma memiliki beberapa keuntungan dibandingkan proses pengolahan gas buang maupun  $\text{CO}_2$  secara konvensional yaitu:

- Efisiensi termal yang tinggi
- Produktivitas yang lebih baik
- Tidak menimbulkan polusi
- Proses satu langkah (tidak perlu pre-treatment maupun post-treatment yang rumit)
- Kemampuan untuk memproses beragam jenis senyawa

## 2.6. Senyawa-Senyawa Reaktan untuk Reaktor Plasma

### 2.6.1. Karbon dioksida

$\text{CO}_2$  berbentuk gas pada keadaan STP dan berada di atmosfer bumi. Rata-rata konsentrasi  $\text{CO}_2$  di atmosfer bumi sekitar 387 ppm, walaupun jumlah ini dapat bervariasi bergantung pada lokasi dan waktu.  $\text{CO}_2$  adalah gas rumah kaca yang penting karena ia menyerap gelombang inframerah dengan kuat.  $\text{CO}_2$  dihasilkan oleh semua hewan, tumbuh-tumbuhan, fungi, dan mikroorganisme pada proses respirasi dan digunakan oleh tumbuhan pada proses fotosintesis. Oleh karena itu,

CO<sub>2</sub> merupakan komponen penting dalam siklus karbon. CO<sub>2</sub> juga dihasilkan dari hasil samping pembakaran bahan bakar fosil (anonymous, 1997)

CO<sub>2</sub> tidak mempunyai bentuk cair pada tekanan di bawah 5,1 atm namun langsung menjadi padat pada temperatur di bawah -78 °C. CO<sub>2</sub> adalah gas yang tidak berwarna dan tidak berbau. Konsentrasi yang lebih besar dari 5.000 ppm tidak baik untuk kesehatan, sedangkan konsentrasi lebih dari 50.000 ppm dapat membahayakan kehidupan hewan.

Pada keadaan STP, kerapatan CO<sub>2</sub> berkisar sekitar 1,98 kg/m<sup>3</sup>, kira-kira 1,5 kali lebih berat dari udara. Molekul CO<sub>2</sub> (O=C=O) mengandung dua ikatan rangkap yang berbentuk linear. Senyawa CO<sub>2</sub> tidak bersifat dipol. Reaksi CO<sub>2</sub> ketika diplasmakan adalah sebagai berikut:

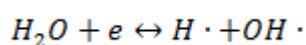


(2.1)

### 2.6.2. Air

Air adalah substansi kimia dengan rumus kimia H<sub>2</sub>O. Air bersifat tidak berwarna, tidak berasa, dan tidak berbau pada kondisi standar. Dalam bentuk ion, air dapat dideskripsikan sebagai sebuah ion hidrogen (H<sup>+</sup>) yang berikatan dengan sebuah ion hidroksida (OH<sup>-</sup>).

Molekul H<sub>2</sub>O dapat diuraikan menjadi unsur-unsur asalnya dengan mengalirinya arus listrik. Proses ini disebut elektrolisis air. Pada katoda, dua molekul H<sub>2</sub>O bereaksi dengan menangkap dua elektron, tereduksi menjadi gas H<sub>2</sub> dan ion OH<sup>-</sup>. Sementara itu pada anoda, dua molekul H<sub>2</sub>O lain terurai menjadi gas O<sub>2</sub>, melepaskan 4 ion H<sup>+</sup> serta mengalirkan elektron ke katoda. Ion H<sup>+</sup> dan OH<sup>-</sup> mengalami netralisasi sehingga terbentuk kembali beberapa molekul air. Reaksi yang terjadi di dalam reaktor DBD saat H<sub>2</sub>O diplasmakan adalah sebagai berikut:

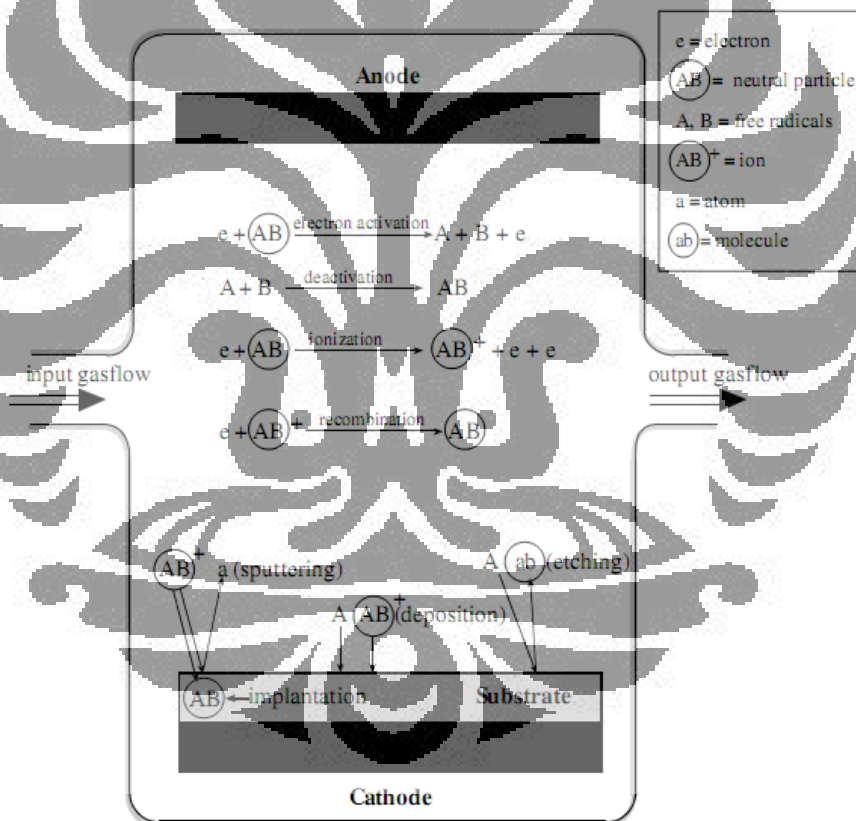


(2.2)

### 2.7. Reaktor Plasma

Reaktor plasma adalah tempat terjadinya reaksi kimia antara gas yang menjadi reaktan dan plasma yang terbentuk di dalam reaktor. Komponen utamanya adalah sepasang elektroda untuk menciptakan pemutusan elektrik (*electric discharge*) dalam reaktor. Ketika terjadi pemutusan elektrik tersebut, elektron di dalam plasma akan bergerak sangat cepat dan terjadi tumbukan antara elektron dan molekul-molekul dari gas reaktan, memecahnya menjadi atom-atom (Kogelschatz, 2002).

Hasil tumbukan selanjutnya antara elektron dan atom tersebut berupa ionisasi yang membentuk ion dan radikal bebas (yang berasal dari atom dan molekul yang berpartisipasi dalam reaksi kimia). Gambar 2.1 di bawah ini menunjukkan ilustrasi dari reaksi yang terjadi dalam reaktor plasma.



**Gambar 2.1.** Reaksi-Reaksi yang Terjadi di dalam Reaktor Plasma

Sumber: Eliezer, 2001

Hal penting di dalam reaktor plasma adalah pengaturan pembangkitan fluks elektron dan ion di dalam reaktor plasma. Dissosiasi molekular akan membangkitkan radikal bebas yang dapat saling berkombinasi untuk membentuk material lainnya atau kembali ke bentuk aslinya. Di dalam wadah reaktor, pada

bagian katoda, radikal dan ion dapat terabsorpsi, terikat, atau terpisahkan. Jika produk pada reaksi permukaan mudah ter evaporasi maka akan meninggalkan permukaan. Jika produknya tidak mudah ter evaporasi, deposisi akan terjadi dan lapisan film akan terbentuk. Untuk produk yang tetap berada pada permukaan atau di bawah permukaan, hasilnya berupa implantasi (Kogelschatz, 2002).

Reaktor didesain berbeda agar hanya menghasilkan proses yang diinginkan. Untuk mencapai tujuan ini, terdapat banyak parameter operasi (variasi eksternal) di antaranya: laju alir gas, komposisi gas, tekanan di dalam reaktor, kekuatan listrik dan frekuensi, magnitudo dan arah medan magnet eksternal (terkadang digunakan untuk memastikan atau mengarahkan partikel yang bermuatan di dalam plasma), temperatur masukan, dan geometri reaktor (Eliezer, 2001).

Proses yang terjadi ditentukan oleh variabel internal yang merupakan hasil dari seluruh variabel eksternal tadi. Variabel internal adalah densitas dan fluks elektron dan ion, suhu elektron dan ion, molekul gas netral, dan radikal bebas yang diproduksi di dalam reaktor (Eliezer, 2001).

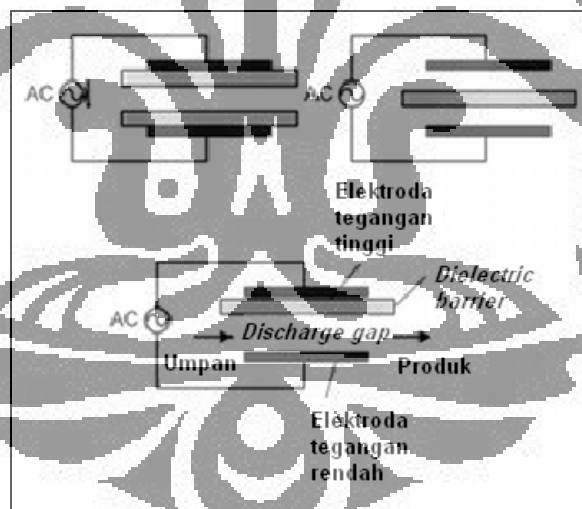
Dengan banyaknya parameter yang terkait dan kompleksitas medium plasma, penggunaan komputer modern dan analisis numerik canggih sangat diperlukan untuk pengembangan proses plasma, khususnya di industri. Variabel operasi yang tidak seragam dari plasma seperti temperatur, ion dan elektron berenergi tinggi, dan keberadaan plasma pada kondisi yang sangat beragam menyebabkan penggunaan plasma menjadi khas dan khusus terhadap suatu industri (Eliezer, 2001).

## 2.8. Dielectric Barrier Discharge

*Dielectric Barrier Discharge* (DBD) adalah penembakan listrik di antara dua elektroda yang dipisahkan dengan insulasi penghalang dielektrik. DBD yang sering juga disebut *silent discharge* dikenal sebagai alat penghasil ozon. Proses ini menggunakan muatan listrik bertegangan tinggi. Reaktor DBD dapat dibuat dalam berbagai konfigurasi. Umumnya reaktor ini dibuat dalam bentuk planar menggunakan pelat paralel yang dipisahkan dengan sebuah dielektrik. Selain berbentuk planar, reaktor DBD juga dapat dibuat dalam bentuk silindris menggunakan pelat berbentuk kawat dengan pipa dielektrik di antara keduanya.

Gas dialirkan pada kondisi tekanan atmosfer dengan pipa berfungsi sebagai *dielectric barrier*. Pada kondisi tekanan atmosferik, proses ini memerlukan energi yang tinggi. Jarak di antara kedua elektroda bervariasi mulai dari 0,1 mm pada layar plasma hingga 1 mm pada generator ozon atau beberapa senti pada gas CO<sub>2</sub>. Beragam jenis lecutan api terbentuk di antara dua elektroda selama operasi berlangsung. Saat muatan dikumpulkan pada permukaan dielektrik,

Penggunaan umum dari reaktor DBD adalah untuk memproduksi ozon (Zhou, 1997). Selain itu DBD juga dapat diaplikasikan untuk pengolahan air dan udara hasil industri. DBD juga telah diaplikasikan untuk mendekomposisi berbagai senyawa gas seperti NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, dan CO<sub>2</sub>. Aplikasi DBD di masa sekarang adalah sebagai bahan semikonduktor, pengolahan permukaan polimer, pengontrol polusi, dan panel layar plasma. Operasi DBD pada temperatur rendah menjadikannya sebagai metode alternatif untuk membangkitkan plasma pada tekanan atmosfer. Konfigurasi dasar reaktor plasma jenis DBD dapat dilihat di Gambar 2.2, sedangkan karakteristik-karakteristik plasma non termal dapat dilihat di Tabel 2.4.



Gambar 2.2.. Prinsip Dasar Reaktor Plasma DBD

Sumber: Istadi 2006

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 muatan mikro ke seluruh permukaan elektroda disamping untuk menjamin tidak ada lecutan api atau *arch* di dalam ruang reaktor (Istadi, 2006).

Tabel 2.4. Karakteristik Non-thermal Discharge

Parameter	Glow discharge	Corona Discharge	Dielectric Barrier Discharge
Tekanan (bar)	$< 10^{-2}$	1	1
Medan listrik	0,01	0,5 – 50	0,1 - 100
Energi elektron (eV)	0,5 – 2	5	1 - 10
Temperatur elektron (K)	5.000 – 20.000	50.000	10.000 – 100.000
Densitas elektron ( $\text{cm}^{-3}$ )	$10^8 - 10^{11}$	$10^{13}$	$10^{14}$
Derajat ionisasi	$10^{-8} - 10^{-5}$	Kecil	$10^{-4}$

Sumber: Lieberman dan Lichtenberg, 2005.

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 sangat potensial untuk reaksi-reaksi kimia organik maupun anorganik karena sifat-sifat non-equilibrium, tenaga input rendah, serta kemampuan mempengaruhi reaksi kimia dan fisika pada temperature yang relatif rendah.

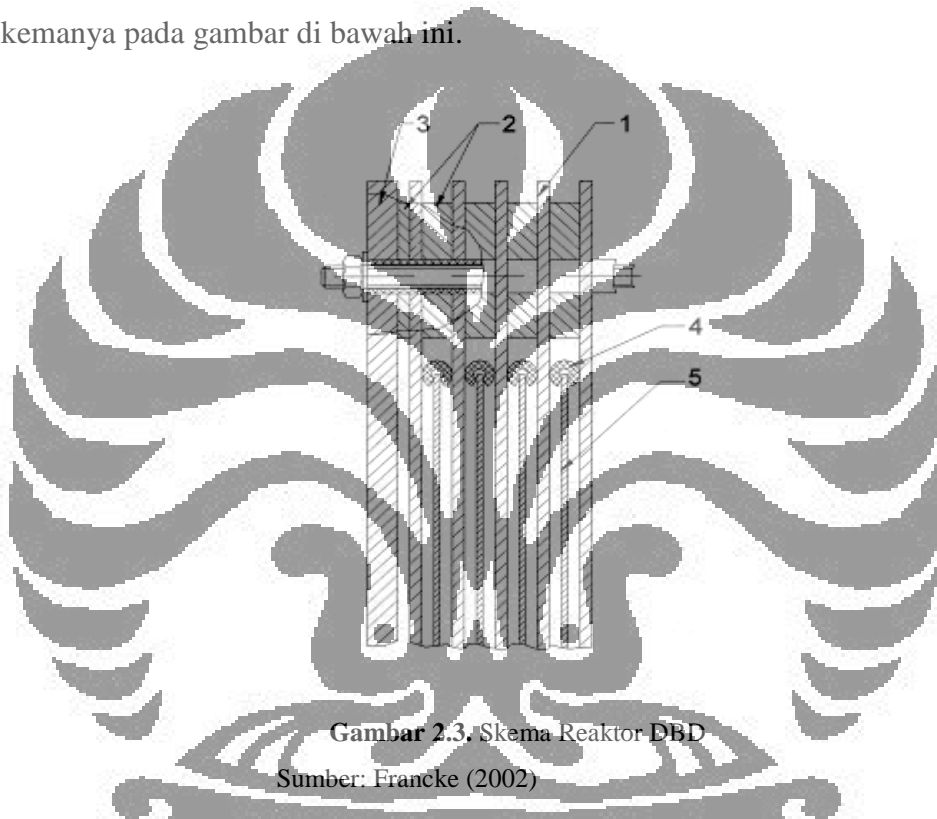
Temperatur gas adalah temperatur kamar sedangkan temperatur elektron dapat mencapai 104-105 K dalam DBD. Pemecahan gas menghasilkan elektron-elektron yang dipercepatkan oleh medan listrik membentuk plasma. *Discharge electric* dapat dihasilkan dengan beberapa cara tergantung kepada jenis tegangan dan spesifikasi reaktor yang digunakan.

Dalam reaktor plasma elektron berenergi tinggi bertumbukan dengan molekul-molekul gas menghasilkan eksitasi, ionisasi, pelipatgandaan elektron, dan pembentukan atom-atom dan senyawa radikal. Jika medan listrik di dalam zona *discharge* cukup untuk memecahkan ikatan kimia gas maka akan terlihat plasma mikro dalam jumlah yang banyak (Francke, 2006).

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 temperatur *bulk gas* tidak berkeseimbangan dengan elektron dan selalu rendah .

Salah satu keuntungan reaktor plasma jenis DBD adalah bahwa energi rata-rata elektron dapat diatur dengan mengubah densitas gas dan susunan jarak antar elektroda di dalam reaktor (Istadi, 2006). Hal ini menjadi sangat potensial untuk reaksi-reaksi kimia organik maupun anorganik karena sifat-sifat *non-equilibrium*, *input* tenaga rendah, serta kemampuan mempengaruhi reaksi kimia dan fisika pada temperatur yang relatif rendah dari reaktor DBD.

Reaktor DBD yang dirancang memiliki prinsip dasar seperti reaktor yang tampak skemanya pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.3. Skema Reaktor DBD  
Sumber: Francke (2002)

Secara umum reaktor DBD yang dirancang harus memiliki bagian-bagian seperti *dielectric barrier* (nomor 1), *spacer* (nomor 2), *grounded metallic plate* (nomor 3), *tube* (nomor 4), dan elektroda (nomor 5). Bahan yang dapat digunakan sebagai elektroda terdiri dari berbagai jenis. Pertimbangan pemilihan bahan yang ingin digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 2.5. Bahan yang Digunakan Sebagai Elektroda

Bahan	Ketahanan korosi	Harga	Kemudahan pemakaian	Hambat jenis ( $\Omega.m$ )
Grafit	Memiliki ketahanan korosi yang baik	Terjangkau	Keras, sulit dipotong	$10,6 \times 10^{-8}$

Kuningan	Memiliki ketahanan korosi yang baik	Mahal	Mudah dibentuk	$(3 - 60) \times 10^{-5}$
Stainless Steel	Memiliki ketahanan korosi yang baik	Terjangkau	Mudah dibentuk	$2,65 \times 10^{-8}$

Sumber: Dari berbagai sumber.

Sedangkan untuk gelas dielektrik, ada dua jenis bahan yang sering digunakan yaitu kaca borosilikat dan kaca kwarsa. Kemampuan untuk menahan panas pada kaca borosilikat tidak sebaik bila menggunakan kaca kwarsa. Namun bila ditinjau dari segi harga, harga kaca borosilikat lebih murah dibandingkan kaca kwarsa.

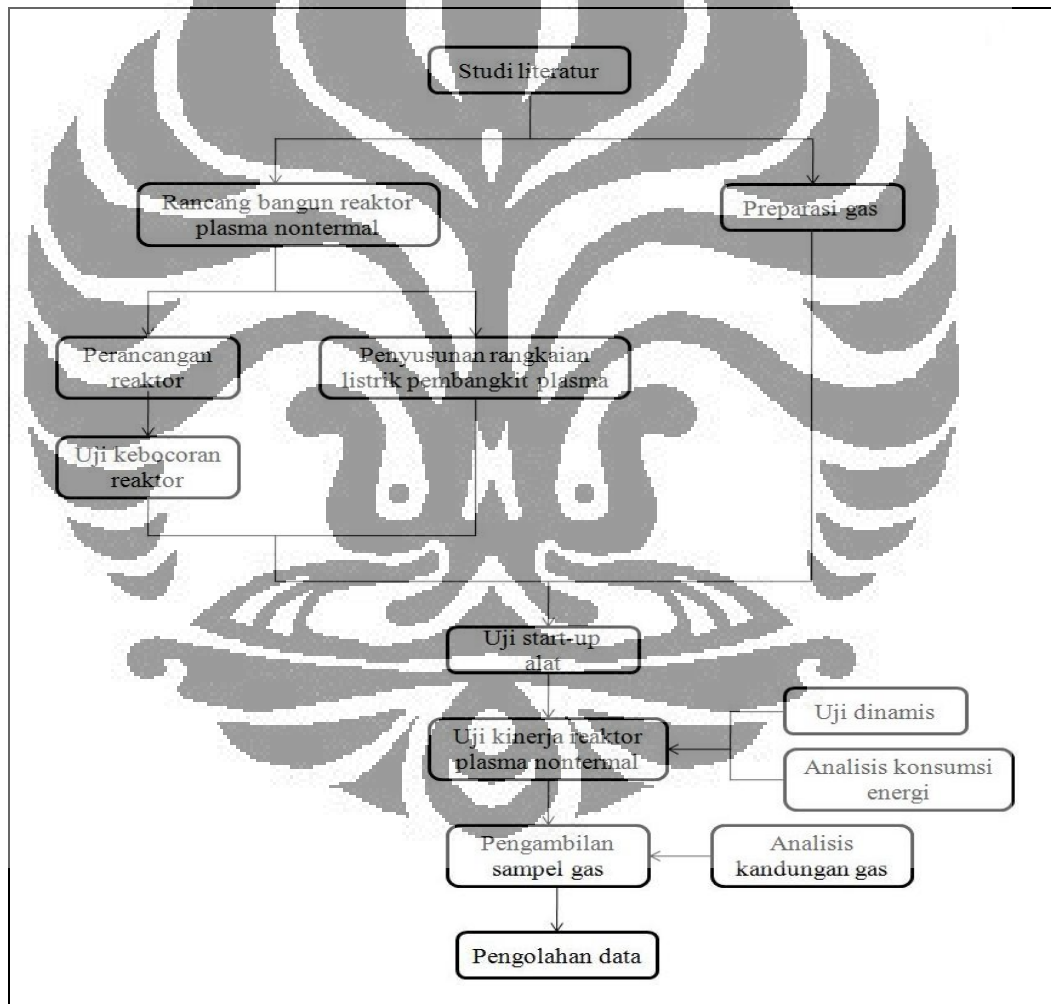




### BAB 3

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan langkah awal dalam pengembangan aplikasi teknologi plasma untuk pengolahan gas. Seperti telah dijelaskan pada bab 1, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui apakah teknologi plasma non-termal memiliki kinerja yang baik untuk konversi CO<sub>2</sub> dan atau H<sub>2</sub>O. Metode penelitian yang digunakan adalah tahap-tahap penelitian yang dapat mendukung tercapainya tujuan tersebut. Tahap-tahap penelitian tersebut mengikuti diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

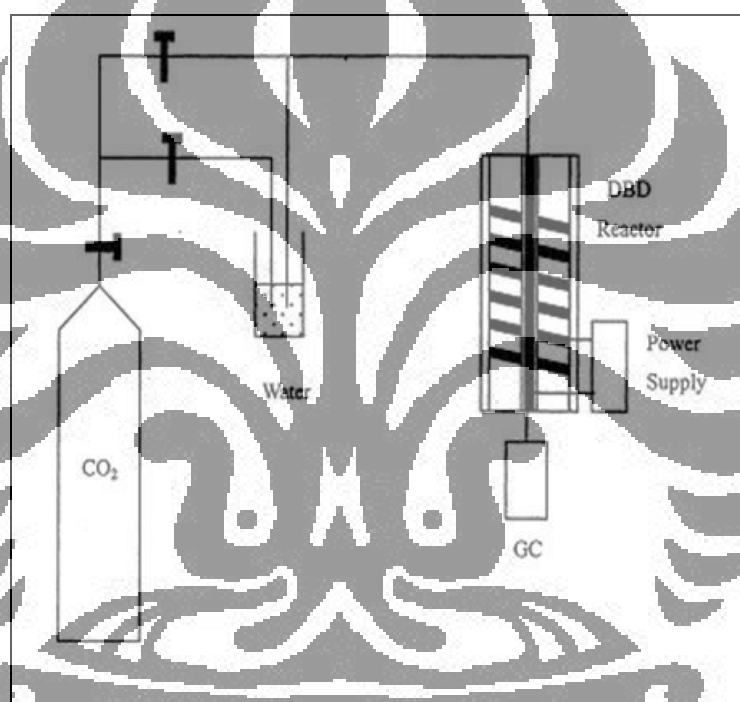
Tahap-tahap penelitian ini akan dijelaskan lebih lanjut pada subbab-subbab utama sebagai berikut:

- Rancang bangun reaktor plasma DBD

- Uji *start up* alat
- Uji kinerja reaktor plasma non-termal
- Analisis gas produk keluaran reaktor
- Pengolahan data

### 3.1. Rancang Bangun Reaktor Plasma DBD

Peralatan yang dirancang dalam penelitian ini terdiri dari dua komponen utama, yaitu reaktor plasma DBD dan pembangkit plasma berupa sumber tegangan tinggi menggunakan transformator tegangan tinggi (NST). Rangkaian alat penelitian secara garis besar ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2: Skematisasi Rangkaian Percobaan

#### 3.1.1. Reaktor DBD

Perancangan reaktor DBD 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.
- Faktor keamanan yang harus diperhatikan.

##### 3.1.1.1. Konstruksi Umum

Pembentukan gas sintetis dari umpan yang berupa CO<sub>2</sub> kering maupun campuran CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O diharapkan terjadi pada reaktor DBD yang dirancang. Dengan dasar

pengembangan dari reaktor DBD yang telah dijelaskan pada bab 2, maka akan dirancang reaktor DBD untuk menghasilkan plasma secara efisien dengan konsumsi daya listrik minimal.

Plasma dibangkitkan menggunakan dua elektroda yang berbentuk batang dan jala. Kedua elektroda ini terbuat dari bahan *stainless steel*. Kedua elektroda dihubungkan dengan sumber tegangan tinggi yaitu NST. Tegangan masukan akan dinaikkan tegangannya menggunakan NST yang diatur lewat regulator tegangan, sehingga keluarannya menghasilkan tegangan mencapai 2 hingga 15 kV.

Reaktor DBD ini dibuat sebanyak dua buah dengan tujuan utama bila terjadi kerusakan terhadap salah satu reaktor, maka penelitian dapat terus berjalan menggunakan reaktor kedua sambil memperbaiki kerusakan yang terjadi terhadap reaktor. Kedua reaktor yang dibuat juga tidak persis sama. Hal yang membedakannya adalah ukuran dari gelas dielektrik yang memiliki diameter berbeda. Hal ini nantinya juga akan menjadi salah satu variasi dalam penelitian kami menyangkut waktu tinggal gas di dalam reaktor.

#### 3.1.1.2. Kelengkapan Komponen

Kelengkapan reaktor yang dirancang terdiri dari:

- Selongsong atau *Shell* reaktor

Bahan yang digunakan sebagai shell adalah *acrylic*. Tujuan penggunaan bahan *acrylic* adalah untuk memudahkan dalam instalasi. Kaca ini berwarna transparan sehingga kita dapat melihat ke dalam reaktor jika terdapat kerusakan komponen-komponen di dalamnya. Gambar dari shell ditunjukkan pada Gambar 3.3. Adapun spesifikasi selongsong yang digunakan adalah:

Tinggi (tipe I/pendek)	= 42,5 cm
Ketebalan	= 2 mm
Diameter luar	= 50 mm
Diameter dalam (ID)	= 46 mm



**Gambar 3.3.** Selongsong *Acrylic*

□ Elektroda Tegangan Tinggi

Elektroda yang digunakan terdiri dari elektroda batang dan elektroda jala. Elektroda batang seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4. ini terbuat dari bahan *stainless steel* ANSI 316 dengan salah satu sisinya tertutup dan diberi ulir untuk pemasangan baut sebagai tempat pemasangan kabel tegangan tinggi yang dihubungkan ke NST. Spesifikasi dari elektroda batang adalah sebagai berikut:

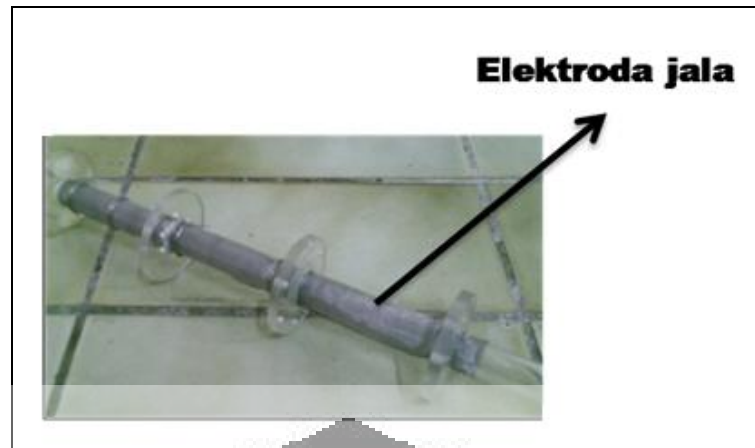
Panjang = 38 cm

Diameter = 6,35 mm



**Gambar 3.4.** Elektroda Tegangan Tinggi

Elektroda jala yang digunakan terbuat dari kawat jala dengan bahan SS 304 dan berukuran 60 *mesh* yang akan menyelimuti seluruh permukaan gelas dielektrik. Elektroda jala seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5. ini terhubung dengan sumber tegangan tinggi (NST) pada bagian tengah *tube* reaktor dengan melilitkan kawat *stainless steel*, menyisakan lilitan kawat pada bagian tengah sebagai tempat sambungan kabel tegangan tinggi ke NST dengan melubangi selongsong *acrylic*.



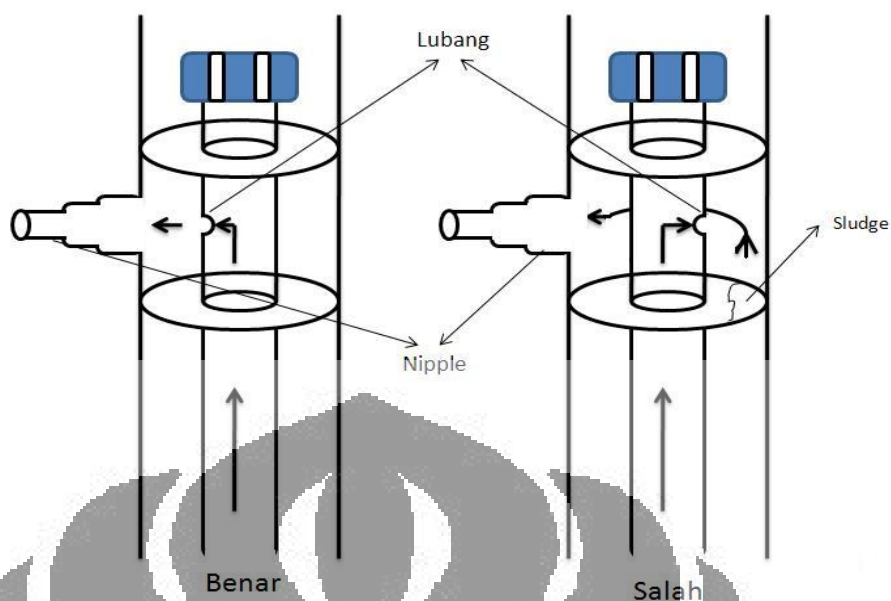
**Gambar 3.5.** Elektroda Jala

- Gelas dielektrik  
 Penghalang dielektrik terbuat dari gelas jenis *pyrex* dari bahan borosilikat (Gambar 3.6) berbentuk tabung (*tube*). Borosilikat dipilih karena mempunyai ketahanan panas yang cukup tinggi dengan harga relatif murah dan mempermudah pengamatan karena tidak berwarna (bening). Gelas dielektrik ini memiliki spesifikasi panjang 36,5 cm, diameter luar 12 mm (reaktor 1) dan 14 mm (reaktor 2).



**Gambar 3.6.** Gelas Dielektrik

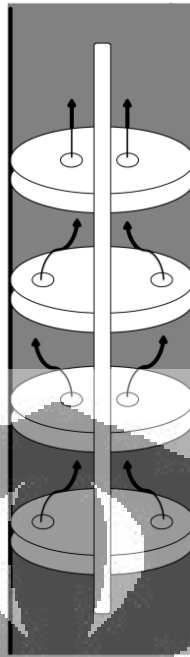
Di salah satu sisi nantinya akan dibuat lubang sebagai tempat mengalirnya produk keluaran reaktor. Posisi lubang keluaran kaca harus sejajar dengan posisi *nipple* gas produk agar begitu gas keluar dari kaca langsung menuju ke *nipple*. Bila letaknya bertolak belakang dikhawatirkan akan terjadi pengembunan gas di mana gas akan mencair dan mengumpul di salah satu sisi reaktor. Posisi pemasangan gelas dielektrik ditunjukkan seperti pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7. Posisi Pemasangan Gelas Dielektrik

□ *Baffle*/penyekat

Tujuan penggunaan *baffle* (Gambar 3.8) adalah untuk menjaga suhu di dalam reaktor agar tidak terlalu panas ketika diplasmakan. *Baffle* ini juga memiliki lubang untuk tempat mengalirnya gas yang posisinya tidak sama. Sehingga terjadi kontak yang baik antara gas pendingin dengan gelas dielektrik. Selain itu, *baffle* juga berguna untuk mencegah gelas dielektrik mengalami kerusakan (pecah) akibat panas yang berlebihan dari reaksi. *Baffle* ini terbuat dari *acrylic* dan juga berfungsi sebagai pemegang bagian dalam reaktor (*tube*) sebagai tempat berlangsungnya reaksi utama. Semua *baffle* ini memiliki diameter lingkaran luar 46 mm, diameter lubang tempat memasukkan gelas dielektrik (bagian tengah *baffle*) 12 mm dan 14 mm, dan ketebalan 3 mm.



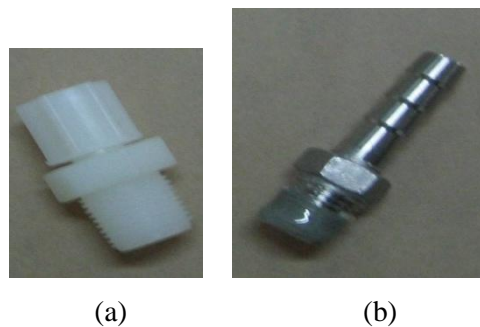
Gambar 3.8. Arah Aliran pada Baffle

□ Tutup Reaktor

Sebagai penutup reaktor untuk bagian atas dan bawah digunakan tutup berbahan teflon yang direkatkan ke tabung selongsong *acrylic* untuk mengisolasi gas agar tidak keluar (bocor) dari reaktor. Tutup reaktor ini dapat dibuka tutup untuk mempermudah pembongkaran bagian dalam reaktor (elektroda batang dan *tube* reaktor) ketika akan dilakukan pembersihan dan perawatan.

□ *Nipple* dan Selang

*Nipple* (gambar 3.9) yang dipergunakan ada dua, yaitu untuk umpan masukan dan keluaran reaktor. Keduanya memiliki ukuran ulir yang sama, yaitu 0,25 inci. Untuk *nipple* umpan masukan (bagian bawah) menggunakan *nipple* plastik berwarna putih untuk ukuran selang 8 mm dengan bahan selang *polyurethane*. Sedangkan untuk keluaran (bagian atas) menggunakan *nipple* berbahan *stainless steel* dan selang berbahan *silicon*.



**Gambar 3.9.** Dua Jenis *Nipple* : Bagian Masukan Reaktan (a); Bagian Keluaran Produk (b)

Awalnya untuk umpan masukan juga digunakan *nipple* berbahan *stainless steel*. Namun, ternyata hal ini mengakibatkan terjadinya lecutan bunga api di bagian bawah dari reaktor yang sebenarnya tidak diinginkan. Proses plasma diharapkan terjadi di antara dua elektroda di sepanjang kawat jala. Sejak diganti dengan *nipple* dari plastik hal ini tidak terjadi lagi.

□ Kabel Tegangan Tinggi

Kabel tegangan tinggi berfungsi untuk menghubungkan elektroda tegangan tinggi di dalam reaktor dengan transformator tegangan tinggi. Selain itu juga digunakan pula kawat tembaga untuk menghubungkan elektroda tabung dengan transformator.

□ *Flowmeter*

*Flowmeter* berfungsi untuk mengatur laju alir dari gas yang dialirkan. *Flowmeter* yang digunakan memiliki rentang laju alir dari 500 cc/min hingga 2.500 cc/min. *Flowmeter* yang digunakan memiliki kapasitas kecil sebab reaktor yang digunakan pun tidak terlalu besar ukurannya. Sebelum digunakan, *flowmeter* harus dikalibrasi terlebih dahulu dengan cara melakukan uji sabun. Sebenarnya untuk gas CO<sub>2</sub> sudah memiliki *flowmeter* sendiri yang terdapat pada regulator tabung. Namun ternyata laju alir gas yang keluar tidak sesuai dengan laju alir yang terbaca pada *flowmeter* di regulator sehingga kurang akurat.

□ *Gas sampling*

*Gas sampling* (gambar 3.10) digunakan untuk menangkap gas produk keluaran reaktor untuk kemudian disuntikkan menggunakan *syringe*. *Gas sampling* memiliki dua *valve* yang digunakan untuk memerangkap gas.



Nantinya gas diambil dari bagian atas alat yang telah dilapisi karet silikon. Setelah melakukan 20 kali pengambilan sampel, silikon harus diganti karena ada kemungkinan silikon sudah tercemar oleh gas pengotor.

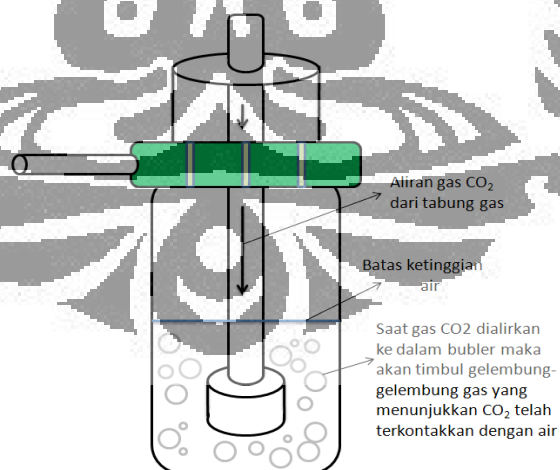


Gambar 3.10. Gas Sampling

#### □ *Bubbler*

Umpan berupa  $H_2O$  ditampung pada sebuah alat yang bernama *bubbler*. Tujuannya adalah agar gas  $CO_2$  yang dialirkan sudah mengandung air tanpa perlu memanaskan air lagi. Sehingga masukan gas ke dalam reaktor merupakan gabungan  $H_2O$  dan  $CO_2$  dalam fase gas.

*Bubbler* yang digunakan adalah modifikasi dari alat bantu pernafasan untuk penderita asma. Gas  $CO_2$  akan melewati selongsong pipa dan dikontakkan dengan air terlebih dahulu hal ini terlihat dari timbulnya gelembung yang timbul saat valve tabung  $CO_2$  dibuka. Hal ini menunjukkan ada aliran gas di dalam *bubbler* ini. Aliran gas  $CO_2$  yang melewati bubbler ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11. Aliran Gas  $CO_2$  yang Melewati *Bubbler*

Selain menggunakan umpan berupa campuran  $CO_2$  ditambah air, juga digunakan umpan  $CO_2$  murni. Percobaan ini hanya untuk membandingkan konversi  $CO_2$  yang terjadi. Produk keluaran yang diamati hanya gas CO

saja karena dengan umpan hanya berupa CO<sub>2</sub> kering, tidak mungkin terbentuk gas H<sub>2</sub>.

□ Klem (pemegang) Reaktor

Digunakan untuk menaruh reaktor pada tatakan reaktor sebanyak 4 buah.

Selanjutnya masing-masing komponen tersebut dirangkai, dengan tahap pengerjaan sebagai berikut :

1. Merakit bagian *tube* reaktor dengan cara memasukkan elektroda batang ke dalam tabung borosilikat. Pada kedua ujung tabung borosilikat (dalam *screw cap* yang berwarna merah) dipasang pembatas *silicon* sebagai pencegah kebocoran gas, sehingga gas dari luar hanya masuk ke dalam *tube* reaktor melalui rongga elektroda batang.
2. Melubangi elektroda batang pada bagian dekat ujung yang memiliki ulir dan baut (bagian bawah dekat masukan). Lubang ini sebagai tempat keluar gas ketika gas mengalir masuk dari bagian atas elektroda batang ke dalam rongga yang terdapat di dalamnya. Gas akan keluar dan mengalir ke atas sepanjang kaca borosilikat melalui lubang ini.
3. Memotong tabung *acrylic* sebagai selongsong (*shell*) dengan panjang 42,5 cm. Melubangi tabung *acrylic* beberapa centimeter dari kedua ujung tabung sebagai lubang pemasangan *nipple*.
4. Membuat penutup kedua ujung *shell* dari teflon serta *baffle* sebagai pemegang bagian *tube* reaktor dan sebagai pengatur arah aliran gas dalam selongsong *acrylic*. Melubangi lubang aliran gas sebanyak 6 lubang tiap *baffle*.
5. Memasang elektroda jala yang menyelimuti kaca borosilikat dan diikat dengan kawat *stainless steel*.
6. Melakukan pengeleman seluruh *baffle* (4 *baffle* pengatur aliran dan 2 *baffle* bagian atas) dengan kaca borosilikat yang telah diselimuti elektroda jala dengan mengatur jarak antar *baffle* dan kemudian memasukkannya ke dalam tabung selongsong *acrylic*. Lalu, mengelem kedua *baffle* teratas (dekat keluaran produk) ke selongsong *acrylic*.

7. Melakukan pengeleman *nipple* plastik dan *nipple stainless steel* ke lubang yang telah dipersiapkan pada selongsong *acrylic*. *Nipple stainless steel* pada bagian atas (keluaran) dan *nipple* plastik pada bagian bawah (masukan).
8. Memasang sumber masukan listrik (skun) berupa kawat *stainless steel* yang dililitkan ke elektroda jala pada bagian tengah *tube* reaktor dan kabel tegangan tinggi pada bagian ujung elektroda batang yang berulir. Kedua spun ini kemudian dihubungkan ke bagian sekunder NST menggunakan kabel tegangan tinggi untuk membangkitkan plasma pada reaktor.
9. Melakukan pengeleman tutup reaktor dengan menggunakan lem *araldite*.
10. Memasang klem penyangga reaktor di tatakan reaktor dengan menggunakan baut dan mur. Klem ini berguna untuk memegang bagian atas dan bagian bawah reaktor sehingga reaktor dapat didirikan sempurna pada bidang tatakan reaktor.

### 3.1.2. Sumber tegangan tinggi

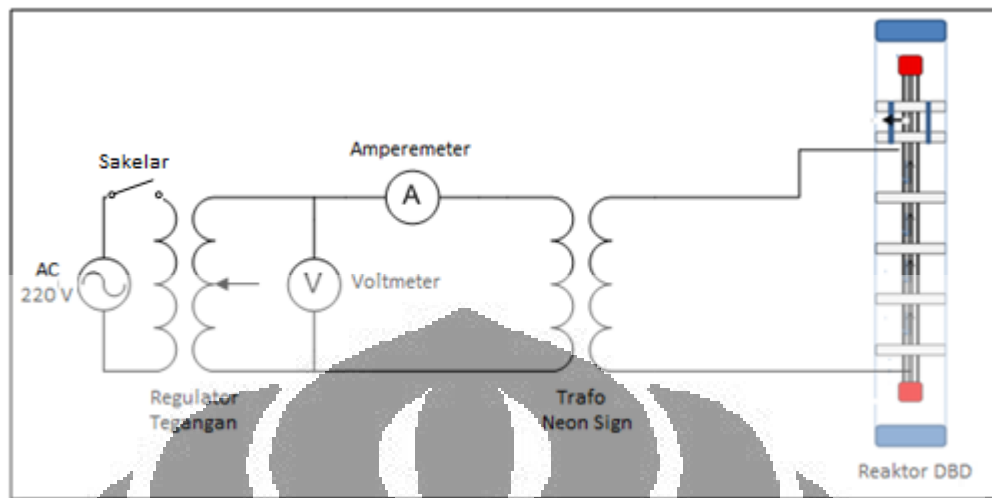
Sumber tegangan tinggi yang digunakan sebagai pembangkit plasma adalah transformator *neon sign* (HV-T) dengan sumber listrik berasal dari listrik PLN. Alat ini mampu mengkonversi tegangan primer dengan rentang 120 – 240 V menjadi tegangan sekunder yang mencapai 2 – 15 kV. Tegangan sekunder inilah menjadi sumber tegangan di dalam reaktor DBD. NST merupakan transformator berinti besi. Bagian intinya mempunyai suatu lilitan magnetis yang membatasi arus keluaran, sehingga memungkinkan untuk beroperasi dengan tak terbatas pada kondisi hubungan pendek.

#### 3.1.2.1. Konstruksi umum

Sumber tegangan tinggi yang digunakan adalah *neon sign transformer* (NST) dengan sumber listrik berasal dari listrik PLN. Pada pelaksanaannya tegangan listrik dari PLN sebesar 220 V akan mengalir menuju trafo NST yang merupakan trafo step up untuk dinaikkan tegangannya hingga mencapai 15.000 V. Tegangan tinggi tersebut digunakan untuk menghasilkan plasma di dalam reaktor.

Pada operasionalnya, arus listrik dari PLN yang mempunyai tegangan 220 VAC masuk ke regulator tegangan. Tujuannya adalah agar besarnya tegangan menuju trafo dapat diatur. Keluaran dari regulator tegangan akan masuk ke NST untuk dinaikkan tegangannya untuk menggenerasikan plasma DBD. Konsumsi daya

dapat dihitung dengan menggunakan voltmeter dan amperemeter yang terinstalasi dalam rangkaian. Instalasi listrik ke reaktor dapat dilihat pada gambar 3.12.



**Gambar 3.12.** Instalasi Sumber Listrik Pada Reaktor Plasma DBD

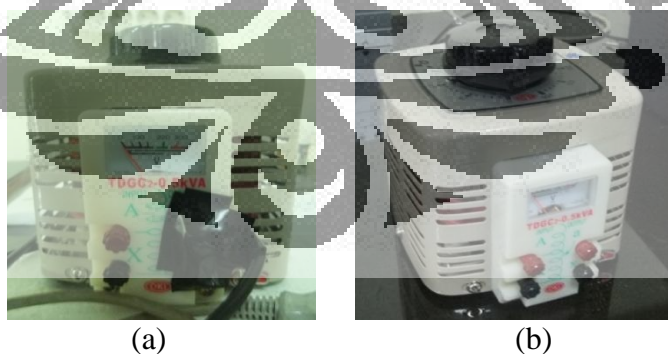
Selain trafo NST, peralatan lain yang digunakan untuk mendukung kelengkapan sumber tegangan tinggi ini beserta analisis kegunaannya adalah sebagai berikut:

#### 3.1.2.2. Kelengkapan Alat

Kelengkapan sistem sumber tegangan tinggi menggunakan transformator *neon sign* (HV-T) terdiri dari:

- Regulator tegangan

Regulator tegangan (Gambar 3.13) berfungsi sebagai pengatur tegangan keluaran yang diinginkan agar terbentuk plasma di dalam reaktor.



**Gambar 3.13** (a) dan (b) Regulator Tegangan

Sayangnya nilai tegangan yang tertera pada regulator tidak sesuai dengan tegangan yang terbaca pada *voltmeter*. Sehingga setiap akan melakukan penelitian untuk tegangan tertentu, sehingga tegangan di regulator harus disesuaikan dengan tegangan yang diinginkan. Seperti tampak pada Gambar 3.13 di atas, spesifikasi alat yang dipakai adalah *voltage regulator* TDGC<sub>2</sub>-

0,5kVA OKI dengan *output indicator* memiliki rentang antara 0 – 250 V. Alat ini memiliki daya sebesar 500 W.

□ Transformator tegangan tinggi (*neon sign HV-T*)

Trafo ini berfungsi sebagai penaik tegangan (*set-up*) sehingga menghasilkan energi yang cukup agar reaktor dapat menghasilkan plasma. Dapat dilihat pada Gambar 3.14 di bawah ini, transformator yang digunakan pada penelitian ini menggunakan merek *Standard Electrics Works Hongkong* tipe T1522 dengan tegangan masukan 220 V dan tegangan keluaran maksimal 15.000 V. Alat ini bekerja pada frekuensi 50 Hz dan daya 450 VA.



Gambar 3.14 Neon Sign Transformer

□ Kabel tegangan tinggi

Kabel jenis ini berfungsi sebagai penghubung antara trafo NST dengan reaktor. Tidak seperti kabel pada umumnya, kabel ini memiliki selaput pelindung yang cukup tebal karena nantinya akan digunakan untuk mengalirkan listrik bertegangan tinggi.

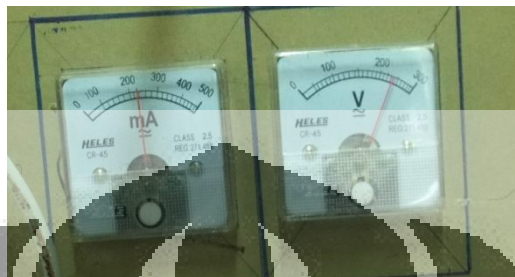
□ Amperemeter

Amperemeter berfungsi untuk pengukuran arus yang keluar dari regulator tegangan. Kuat arus hanya digunakan untuk mengetahui seberapa besar daya yang terpakai untuk setiap reaktor. Amperemeter yang digunakan jenis panel bermerek *HELES* dengan rentang 0 – 500 mA.

□ Voltmeter

Voltmeter berfungsi untuk mengukur tegangan yang keluar dari regulator tegangan. Pada penelitian ini tegangan maksimal yang digunakan adalah

sebesar 170 V. Hal ini dipicu oleh adanya kekhawatiran bila menggunakan tegangan di atas 170 V maka akan terjadi lecutan api yang lambat laun akan menyebabkan rusaknya reaktor. Walaupun pada kenyataannya fenomena plasma baru timbul secara kontinu pada voltase 220 V ke atas. Voltmeter yang digunakan jenis panel bermerek *HELES* dengan rentang 0 – 300 V.



Gambar 3.15 Kiri: Amperemeter; Kanan: Voltmeter

### 3.2. Uji *Start-Up* Alat

Sebelum dilakukan uji *start-up* alat, terlebih dahulu dilakukan uji kebocoran reaktor. Uji kebocoran reaktor dilakukan dengan metode air sabun. Caranya adalah dengan mengalirkan udara ke dalam reaktor (reaktor dalam keadaan tertutup, kecuali *nipple* bagian keluaran terbuka sedikit) kemudian air sabun ditetaskan ke area yang berpotensi bocor. Area yang berpotensi bocor antara lain spun elektroda, yaitu cok kecil penghubung kedua elektroda pada reaktor dan NST menggunakan kabel tegangan tinggi, pengeleman *nipple* ke tabung *acrylic*, dan pengeleman tutup reaktor.

Jika terdapat kebocoran maka dilakukan upaya pengeleman kembali yang lebih merata dan diuji kembali. Untuk pembangkit tegangan tinggi, uji kebocoran dilakukan dengan menyalakannya selama 10 menit dalam kondisi standar. Jika tidak terjadi kebocoran listrik atau pun hubungan singkat, berarti instalasi listrik yang dibuat layak digunakan.

Setelah menyusun keseluruhan peralatan sebagai satu sistem, perlu dilakukan pengujian *start-up* alat untuk mengetahui kinerja reaktor plasma non-termal. Uji *start-up* dilakukan dengan mengalirkan sejumlah kecil umpan ke dalam reaktor untuk direaksikan dan kemudian reaktor dinyalakan. Jika tidak terjadi permasalahan, seperti kebocoran, hubungan singkat, dan sebagainya maka pembangkitan plasma sudah berhasil. Hal ini berarti reaktor sudah bekerja dengan baik dan dapat dioperasikan dengan normal. Kemudian dilakukan pengamatan

terhadap fenomena munculnya plasma pada reaktor DBD dan penentuan tegangan operasional reaktor dengan cara menentukan tegangan minimum dan tegangan maksimum dimana reaktor dapat bekerja

### 3.3. Uji kinerja reaktor plasma non-termal

#### 3.3.1. Alat dan Bahan

Dalam melakukan uji kinerja reaktor DBD, peralatan dan bahan yang digunakan adalah sebagai berikut:

□ Alat

- Reaktor DBD
- Trafo NST
- Stopwatch untuk menghitung waktu reaksi
- *Gas sampling* untuk mengambil sampel gas produk
- Gas chromatography untuk menganalisa produk gas
- Amperemeter dan voltmeter
- Selang silikon untuk menyambung antara tabung gas CO<sub>2</sub> dengan flowmeter, flowmeter dengan reaktor, dan reaktor menuju gas trap

□ Bahan

- Gas CO<sub>2</sub>
- Air yang diletakkan di dalam *bubbler*

#### 3.3.2. Prosedur uji kinerja reaktor plasma

1. Memasukkan H<sub>2</sub>O ke dalam *bubbler* sebagai umpan
2. Memastikan semua selang sudah terpasang mulai dari selang umpan CO<sub>2</sub> ke *bubbler*, *bubbler* ke flowmeter, flowmeter ke reaktor, dan keluaran reaktor menuju *gas sampling*.
3. Memasang reaktor 1 pada tempat pemasangan reaktor
4. Menghubungkan trafo NST dengan regulator tegangan serta memasang kabel tegangan tinggi dari trafo NST ke reaktor.
5. Mengatur laju alir umpan sebesar 500 cc/menit
6. Memeriksa keamanan daerah sekitar reaktor
  - a. Memastikan tidak ada saluran gas yang bocor
  - b. Menyalakan ruang asam
7. Mengatur tegangan keluaran regulator sebesar 70 V.

8. Menyalakan saklar dan melakukan *running* selama 5 menit
9. Menutup *valve* di *gas sampling* dan membawanya ke lab RPKA
10. Menganalisa produk dengan menggunakan GC
11. Mengalirkan udara kompresor ke dalam reaktor selama 1 menit untuk membuang gas sisa yang masih ada di dalam reaktor
12. Mengulangi prosedur 6 – 9 dengan tegangan diganti menjadi 170 V
13. Mengulangi prosedur 4 – 10 dengan mengganti laju alir menjadi 1500 cc/menit
14. Mengulangi prosedur 2 – 11 dengan mengganti reaktor menjadi reaktor 2.
15. Mengulangi prosedur 1 – 11 dengan menggunakan umpan CO<sub>2</sub> murni tanpa H<sub>2</sub>O.

### 3.3.3. Uji Analisis Gas Keluaran dengan GC

Dalam menggunakan gas kromatografi, perlu diperhatikan hal-hal yang menyangkut alat tersebut, seperti dalam hal preparasi, mengalirkan carrier gas (argon), menutup gas, dan lain-lain. Berikut ini merupakan prosedur yang harus dilakukan dalam menggunakan gas kromatografi:

- Preparasi GC
  - Memanaskan GC kurang lebih 15 menit untuk menstabilkan dan memanaskan agar kotoran-kotorannya terbawa.
- Prosedur mengalirkan gas Argon
  - Memastikan tekanan input dan output di regulator berada pada angka dan tidak ada kebocoran pada sambungan-sambungannya.
  - Membuka *valve* utama dari keneang menjadi kendur, sehingga tekanan akan langsung naik.
  - Membuka *valve* regulator dari kendur menjadi kencang sehingga tekanan akan naik perlahan-lahan.
- Prosedur Menyalakan GC
  - Memastikan tekanan primary 600 kPa, *carrier gas* 150 kPa
  - Mengatur suhu menjadi 130 – 100 – 100 °C
  - Menunggu hingga stabil (hingga lampu pada GC berkedip-kedip)
  - Menyalakan *current* pada 6 mA
- Prosedur menyalakan chromatopac (dengan kolom *porapak*):



- Menghubungkan chromatopac dengan GC, tekan: *shift down* bersama dengan I,N,I, lalu tekan *enter*, akan muncul *initialize* pada kertas recorder.
- Mengatur tinta di sebelah kiri, tekan: *shift down* bersama dengan *plot*, lalu tekan *enter*, untuk mengatur gunakan “*coarse*” kemudian tekan kembali *shift down* bersama dengan *plot*, lalu tekan *enter*.
- Jika attenuasi kecil maka segala impurities akan terlihat “*peak*”nya, sehingga digunakan attenuasi yang agak besar, tekan: *attn* bersama dengan angka 7, lalu tekan *enter*.
- Mengatur kecepatan kertas, tekan: *speed* bersama dengan angka 10, lalu tekan *enter*.
- Mengatur *stop time*, tekan: *stop time* bersama dengan angka 3 lalu tekan *enter*.
- Untuk melihat parameter-parameter yang ada, tekan: *shift down* bersama dengan *print* dan *width*, lalu tekan *enter*.
- 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.
- Prosedur mematikan GC:
  - Mematikan *current*.
  - Menurunkan temperature menjadi 30-30-30 kemudian GC dibuka agar pendinginan terjadi lebih cepat.
  - Setelah suhu kolom menjadi 80 (pada indicator) kemudian GC baru dapat dimatikan.
- Prosedur mematikan aliran gas  
Sesuai dengan prosedur menutup gas.

### 3.4. Analisis gas produk keluaran reaktor

Pada sub-bab ini akan dijelaskan peralatan yang digunakan untuk menganalisis kandungan gas keluaran reaktor plasma. Selain itu juga akan dianalisis mengenai alat uji yang digunakan serta pertimbangan pemilihan alat uji tersebut.

### 3.4.1. CO analyzer

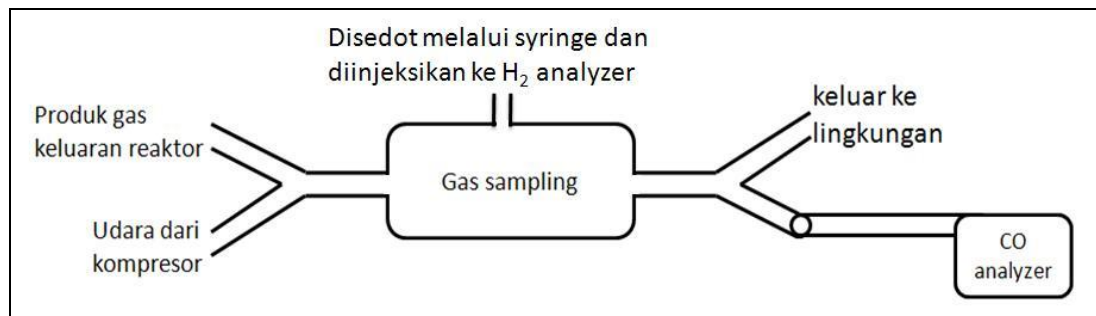
Fungsi alat ini adalah untuk mengukur kandungan gas CO keluaran reaktor plasma. CO analyzer (Gambar 3.16) memiliki rentang pengukuran gas CO dari 0 hingga 1000 ppm. Selain dapat mengukur CO, alat ini juga dapat mengukur komposisi O<sub>2</sub> (rentang 0 – 20%), karbon dioksida (0 – 15 %), serta suhu lingkungan (ambien).



Gambar 3.16. CO Analyzer

CO analyzer dapat digunakan menggunakan sistem batch maupun kontinu. Kelemahan alat ini menyangkut penelitian ini adalah rentang pengukuran komposisi yang terlalu kecil. Padahal produk CO keluaran reaktor plasma kadar CO di atas 1000 ppm. Alat ini hanya dapat digunakan ketika digunakan tegangan yang relatif kecil dimana kandungan CO masih di bawah 1000 ppm. Tegangan maksimal di mana alat ini masih dapat membaca komposisi CO adalah pada saat voltase 100 V. Di atas 100 V, CO analyzer akan menunjukkan angka 0 yang menandakan komposisi CO sudah di atas 1.000 ppm. Sehingga digunakan *diluent* berupa udara dari kompresor dengan harapan komposisi CO dapat terbaca dengan baik.

Produk gas keluaran reaktor dicampur dengan udara kemudian baru diuji menggunakan CO analyzer. Perbandingan antara udara dan gas keluaran adalah 3:1. Setelah melalui *gas sampling*, gas keluaran akan displit lagi. Satu bagian akan menuju ke CO analyzer, sedangkan satu lagi akan menuju ke lingkungan. Hal ini disebabkan CO analyzer tidak memiliki saluran keluaran, sehingga bila aliran keluaran hanya menuju ke CO analyzer, dapat mengakibatkan terjadinya *back pressure*. Hal ini dapat memicu terjadinya kenaikan tekanan di dalam reaktor sehingga amat berbahaya.



**Gambar 3.17.** Aliran Gas Menggunakan *Diluent*

Pada pelaksanaannya, ternyata gas yang dihasilkan kondisinya tidak stabil. Hal ini disebabkan terjadinya *back pressure* pada saluran pencampur. Sehingga dicoba untuk menukar udara dengan argon. Dikarenakan gas argon sangat stabil dan diharapkan tidak akan terkonversi bila dilewati plasma. Komposisi antara umpan  $\text{CO}_2$  dengan Ar adalah 1:1. Namun ketika dilewatkan plasma ternyata timbul lecutan api yang cukup besar. Akhirnya diputuskan untuk menggunakan umpan  $\text{CO}_2$  murni saja.

#### 3.4.2. $\text{H}_2$ analyzer

Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk mengonversi  $\text{CO}_2$  menjadi  $\text{CO}$  dan  $\text{H}_2$ . Komposisi kandungan hidrogen diukur menggunakan  $\text{H}_2$  analyzer. Fungsi utama  $\text{H}_2$  analyzer (Gambar 3.18) adalah untuk mengukur kandungan gas  $\text{H}_2$ . Alat ini memiliki rentang pengukuran komposisi  $\text{H}_2$  dari 0 hingga 50%  $\text{H}_2$ . Alat ini juga memiliki flowmeter sendiri sehingga dapat diatur laju alir gas masukannya.  $\text{H}_2$  analyzer hanya dapat digunakan secara batch dengan cara mengambil sampel gas dan menyuntikkannya ke dalam alat.



**Gambar 3.18.**  $\text{H}_2$  Analyzer

Kelemahan alat ini menyangkut penelitian ini adalah rentang pengukuran komposisi yang terlalu besar. Padahal kandungan hidrogen keluaran alat ini tidak lebih dari 1 %. Hal ini mengakibatkan kandungan gas  $\text{H}_2$  keluaran reaktor tidak dapat dibaca dengan alat ini.

### 3.4.3. Gas Chromatography (GC)

Dikarenakan beberapa hambatan ketika menggunakan CO analyzer dan H<sub>2</sub> analyzer seperti yang telah dijelaskan di atas, maka akhirnya diputuskan untuk menggunakan GC (Gambar 3.19) untuk menganalisis sampel. Dengan menggunakan alat ini, komposisi gas umpan maupun gas produk dapat dianalisis. Proses pengujian ini dilakukan dengan sistem batch yaitu mengambil sampel gas dan menyuntikkannya ke dalam GC.



Gambar 3.19. GC-TCD

Sebelum menggunakan GC, ini menggunakan CO analyzer untuk mengetahui kapan saat konversi CO<sub>2</sub> berada dalam fase stabil. Hal ini terjadi saat laju konversi CO<sub>2</sub> sama dengan laju pembentukan CO<sub>2</sub>. Hal ini dilihat dari hasil konversi yang mulai naik turun. Rata-rata waktu untuk mencapai kestabilan adalah 5 menit. Semakin tinggi laju alir, waktu untuk mencapai kestabilan semakin cepat.

### 3.4. Pengolahan data

Hasil pengukuran konsentrasi reaktan dan produk dianalisis untuk dibandingkan satu dengan yang lainnya untuk diketahui seberapa baik proses reaksi plasma terjadi didalam reaktor pada kondisi variabel bebas yang diujikan. Untuk setiap variabel proses, dihitung konversi CO<sub>2</sub> yang terjadi di dalam reaktor plasma.

#### 3.4.1. Perhitungan Konversi

Perhitungan konversi bertujuan untuk melihat jumlah CO<sub>2</sub> yang berhasil diplasmakan. Konversi dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\text{Konversi} = \frac{\% \text{ mol reaktan} - \% \text{ mol residu}}{\% \text{ mol reaktan}}$$

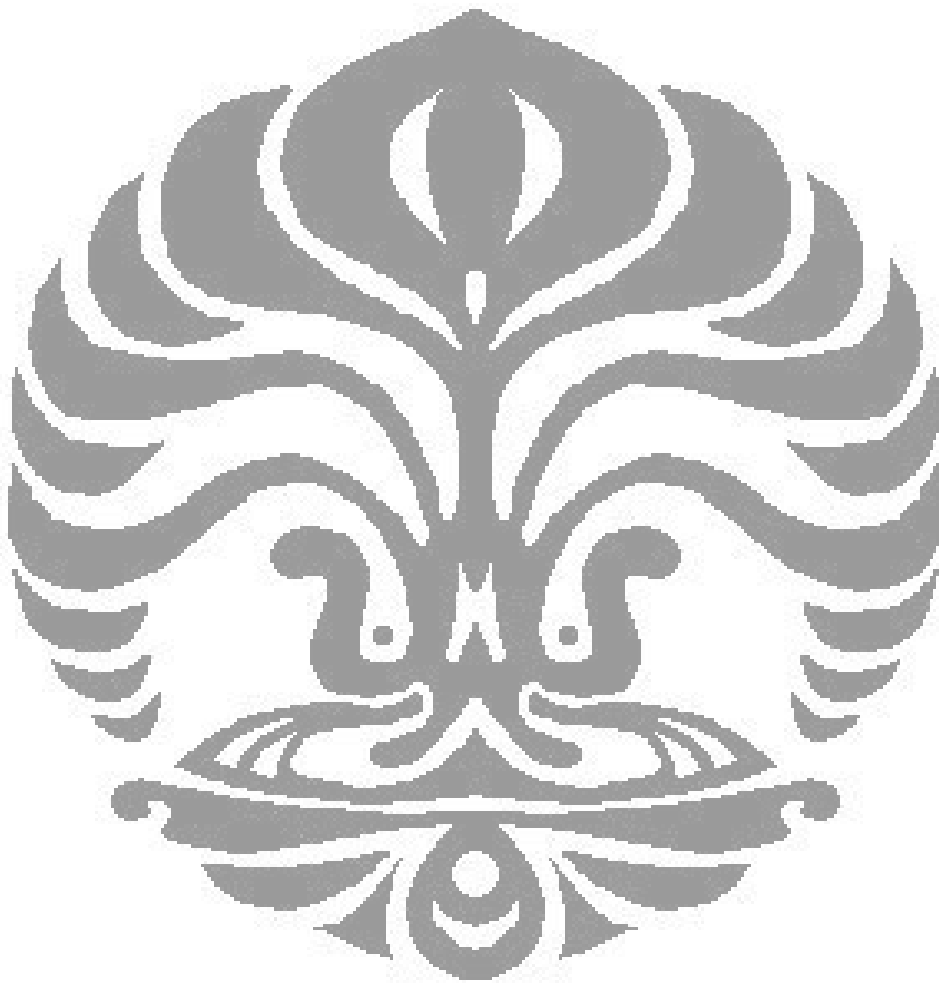
(5.1)

#### 3.4.2. Perhitungan Selektivitas

Selektivitas yang dilihat hanya selektivitas produk gas sintetis. Sedangkan pada bagian membandingkan jenis umpan dengan selektivitas yang dihasilkan, hanya dilihat selektivitas terbentuknya gas CO saja. Selektivitas dihitung menggunakan persamaan:

$$Selektivitas = \frac{\% \text{ mol produk}}{\% \text{ mol reaktan} - \% \text{ mol residu}}$$

(5.2)



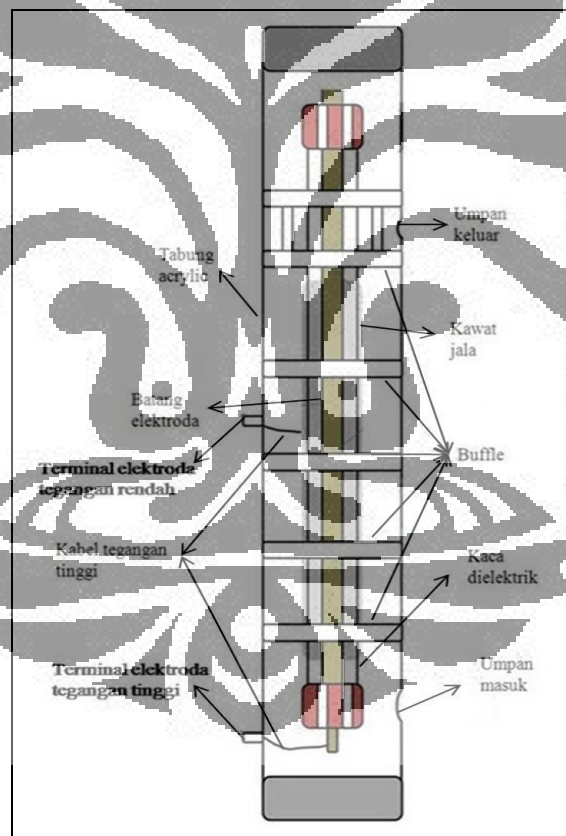
## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan diuraikan mengenai filosofi desain dari reaktor DBD yang dirancang, penjelasan mengenai fenomena plasma yang terjadi, serta uji kinerja reaktor DBD dengan melakukan beberapa variasi.

#### 4.1. Hasil Rancang Bangun Reaktor Plasma DBD

Reaktor plasma DBD yang dirancang memiliki komponen-komponen seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1.



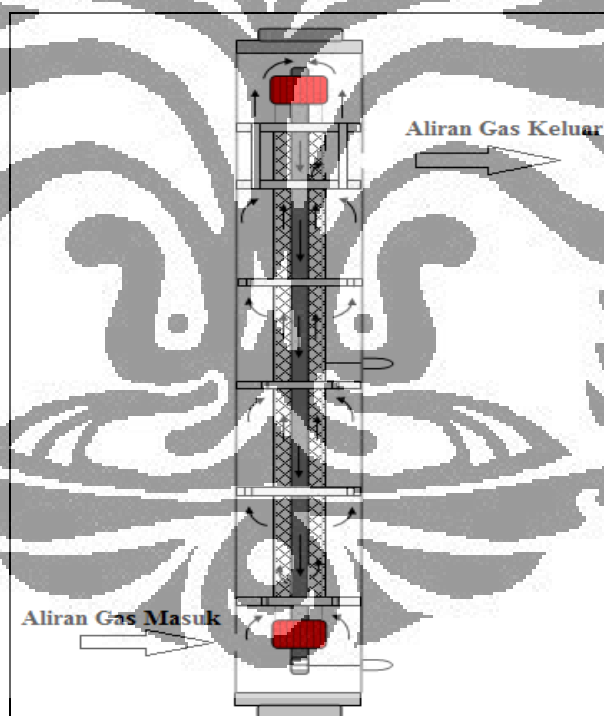
Gambar 4.1. Komponen - Komponen pada Reaktor DBD

Seperti telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya, prinsip utama perancangan reaktor DBD adalah adanya penghalang (barrier) di antara kedua elektroda. Sehingga ketika dialiri arus listrik, elektron akan bergerak dari potensial tinggi ke potensial rendah. Di reaktor ini, media yang berfungsi sebagai media penghalang

adalah gelas dielektrik. Dengan adanya penghalang ini maka akan terjadi loncatan listrik dari elektroda batang menuju elektroda jala.

Dengan dasar pengembangan reaktor DBD dari literatur, maka perancangan reaktor DBD dibuat dengan pertimbangan teoretis untuk menghasilkan plasma secara efisien dengan konsumsi daya listrik minimal. Perancangan reaktor masih dalam tahap sederhana dan didesain secara simpel untuk memberikan kemudahan dalam konstruksi dan penggantian komponen-komponennya.

Di dalam reaktor, gas akan dialirkan seperti pada Gambar 4.2. Tujuannya adalah agar terjadi kontak yang lebih baik antara gas pendingin dengan gelas dielektrik. Reaktor memiliki satu buah saluran masuk dan satu buah saluran keluar. Bila umpan yang digunakan lebih dari satu jenis, maka pencampuran dilakukan sebelum masuk ke reaktor.



**Gambar 4.2.** Aliran Gas di Dalam Reaktor

Rancangan reaktor yang digunakan memiliki konfigurasi aliran sebanyak 3 kali untuk aliran gas yang akan bereaksi di dalam reaktor plasma, yakni 1 kali aliran di antara *shell* dan *tube*, 1 kali di antara kedua elektroda, dan 1 kali di dalam katoda tabung tengah. Tujuannya adalah agar terjadi fenomena pendinginan elektroda yang lebih baik dikarenakan kontak gas yang lebih intensif. Elektroda yang lebih

dingin akan sangat menguntungkan dilihat dari konsumsi energi dan umur pemakaian dielektrik menjadi lebih lama. Spesifikasi dari reaktor yang dibuat adalah ditunjukkan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1.** Spesifikasi Reaktor DBD

Laju alir (cc/min)	Diameter (mm)	Panjang reaktor (cm)	Cross sectional area (cm <sup>2</sup> )	Volume reaktor (cm <sup>3</sup> )	Discharge gap (mm)	Residence time (s)
500	12	42,5	16,61	705,95	2.25	84,71
	14	42,5	34,19	1453,27	3.25	174,39
1500	12	42,5	16,61	705,95	2.25	28,23
	14	42,5	34,19	1453,27	3,25	58,13

Bahan yang digunakan sebagai elektroda pada penelitian ini adalah elektroda SS 316 dengan pertimbangan memiliki ketahanan korosi yang baik, harganya lebih murah, mudah dibetuk, serta daya hantar listrik yang baik. Sedangkan untuk reaktor, bahan yang dipilih adalah kaca borosilikat dengan mempertimbangkan harganya yang lebih murah dibandingkan kaca kwarsa.

#### 4.2. Uji Plasma Fisik

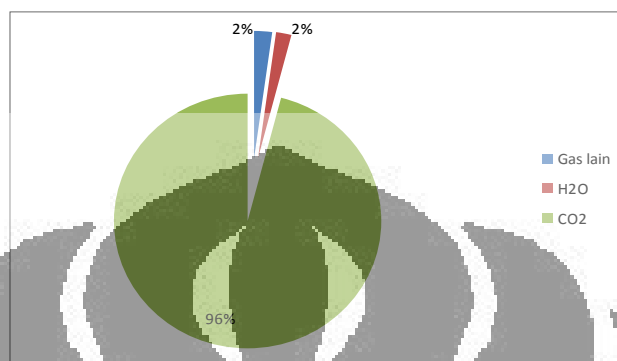
Uji Fisik Plasma DBD dilakukan setelah memastikan tidak ada kebocoran pada reaktor yang dibuat dengan metode gelembung sabun. Tujuannya ialah untuk mengamati fenomena fisik plasma DBD yang terlihat secara kasat mata dan merupakan studi pendahuluan untuk mengetahui apakah reaktor ini dapat digunakan untuk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

Produk utama yang diharapkan dari penelitian ini adalah gas sintesis (CO dan H<sub>2</sub>). Sehingga diperlukan umpan tambahan sebagai sumber senyawa H<sub>2</sub>. Umpan tambahan yang digunakan adalah H<sub>2</sub>O. Alasan penggunaan H<sub>2</sub>O adalah karena senyawa ini mudah didapat dan tidak berbahaya bagi lingkungan. H<sub>2</sub>O yang digunakan nantinya berada dalam fase gas karena senyawa yang masuk ke dalam reaktor harus berada dalam fase gas.

Agar terjadi reaksi, molekul-molekul di dalam reaktor harus saling bertabrakan. Kebanyakan tabrakan antar molekul ini tidak mengakibatkan suatu reaksi. Agar



terjadi reaksi, molekul-molekul yang bertabrakan itu harus mengandung cukup energi potensial sehingga terjadi pematihan ikatan. Orientasi dari tiap molekul juga merupakan faktor penting dalam menentukan apakah suatu reaksi dapat terjadi atau tidak. Komposisi gas umpan setelah dianalisis menggunakan GC diberikan pada Gambar 4.3.



**Gambar 4.3.** Komposisi Umpan Masuk Reaktor

Dari komposisi umpan di atas, terlihat bahwa komposisi gas umpan terbesar adalah CO<sub>2</sub>. Hal ini disebabkan karena gas CO<sub>2</sub> hanya mengalir melewati H<sub>2</sub>O. Energi yang digunakan untuk mengubah H<sub>2</sub>O dari fase cair menjadi fase gas tidak dapat hanya dengan mengalirkan CO<sub>2</sub> tanpa memberikan perlakuan khusus terhadap senyawa H<sub>2</sub>O itu sendiri. Terjadi kesetimbangan cair uap antara H<sub>2</sub>O dan CO<sub>2</sub>.

Setelah dilewatkan plasma, gas keluaran reaktor menjadi sangat bervariasi. Hal ini terjadi karena gas tereksitasi pada tegangan tinggi sehingga terbentuk senyawa radikal bebas. Produk yang dihasilkan menjadi tidak terkontrol. Hal inilah yang menyebabkan dilakukan penelitian untuk mencari konversi yang paling optimal.

Reaksi yang terjadi di dalam reaktor berlangsung secara langsung dan menghasilkan campuran berbagai produk. Hal ini terbukti dari hasil analisis GC di mana setelah membandingkan data sebelum dan sesudah diberi plasma, terdapat senyawa yang mengalami penurunan konsentrasi dan sebagian lagi mengalami peningkatan konsentrasi.

Reaksi yang terjadi di dalam reaktor DBD berjalan dengan mekanisme radikal bebas (*free radical mechanism*). Hal ini merujuk kepada atom atau gugus atom

yang memiliki satu atau lebih elektron tak berpasangan. Ikatan di antara senyawa tersebut terputus karena adanya efek plasma bertegangan tinggi yang sanggup memutuskan ikatan di antara atom. Meskipun atom-atom ini tidak bermuatan positif maupun negatif, spesi ini sangat reaktif karena adanya elektron yang tidak berpasangan. Reaksi radikal bebas seringkali ditandai oleh produk yang beraneka ragam.

Produk gas yang dihasilkan reaktor sulit dikontrol. Penyebab terbentuknya berbagai macam campuran ini adalah tingginya energi pemutusan ikatan  $\text{CO}_2$ . Walaupun di dalam *bubbler* terbentuk senyawa  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , gas yang masuk reaktor masih terdiri dari  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  dalam fase gas. Gas  $\text{H}_2\text{O}$  yang terbawa menuju reaktor komposisinya tidak terlalu besar jika dibandingkan dengan gas  $\text{CO}_2$  (berdasarkan data analisis GC). Ketika melewati plasma maka ikatan kedua senyawa tersebut terputus. Radikal bebas yang terbentuk memungkinkan terbentuknya senyawa baru. Sementara reaksi konversi  $\text{CO}_2$  masih berlangsung, gas  $\text{CO}_2$  mulai terbentuk lagi. Siklus ini akan terjadi secara terus menerus hingga mencapai suatu titik dimana reaksi sudah berlangsung setimbang.

#### 4.2.1. Rentang tegangan kerja

Rentang tegangan kerja merupakan kondisi operasi yang menyangkut tegangan yang digunakan untuk uji plasma fisik. Rentang tegangan primer yang digunakan pada penelitian ini adalah dari 0 hingga 170 V. Pengamatan awal yang dapat dianalisis untuk mengetahui kinerja awal dalam pengujian reaktor plasma ini ialah fenomena plasma yang terjadi ketika reaktor plasma bekerja. Fenomena yang diamati ialah aspek visualisasi pembentukan plasma ketika reaktor dihidupkan. Fenomena ini penting untuk mengetahui pada tegangan berapa plasma telah terbentuk. Pengamatan terhadap fenomena ini dilakukan dari tegangan primer 0 V hingga 180 V yang diatur dengan menggunakan regulator seperti ditunjukkan pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2.** Hubungan Tegangan yang Diaplikasikan Pada Reaktor dengan Fenomena yang Teramati pada Sumber Listrik PLN

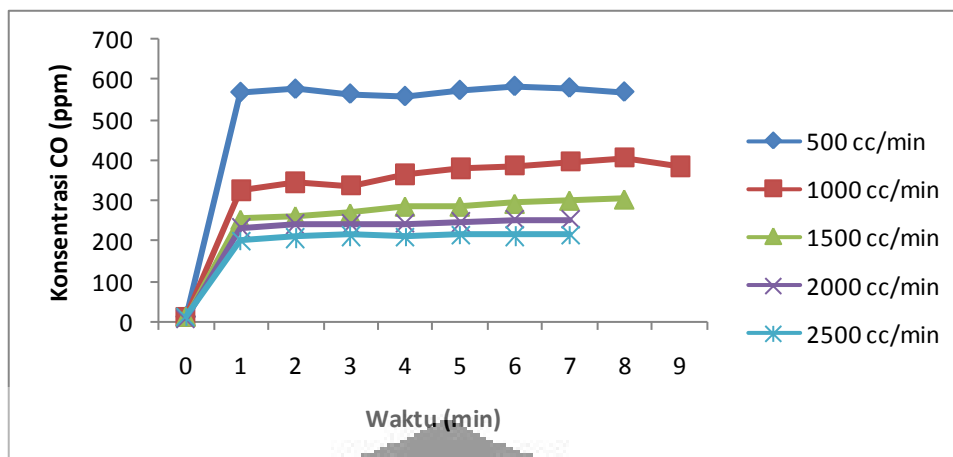
Tegangan primer	Fenomena yang teramati
-----------------	------------------------

70 V	Muncul bunyi degungan pelan, menandakan terjadinya pelepasan plasma DBD. Dari amperemeter terlihat kuat arus sudah meningkat
170 V	Terjadi lucutan listrik yang tidak lazim dengan instensitas yang jarang
200 V	Lucutan listrik yang tidak lazim semakin sering terjadi, terlihat warna kehijauan pucat pada reaktor
220 V	Lucutan listrik yang tidak lazim sangat sering terjadi, hingga menyebabkan retaknya dielektrik gelas reaktor 14 mm.

Pembentukan pijar plasma seharusnya menjadi fenomena utama yang diamati pada uji kualitatif. Namun pijar plasma tidak terlalu terlihat pada reaktor DBD yang dibuat. Sehingga uji yang dilakukan untuk menunjukkan telah terbentuknya plasma adalah dengan mendengarkan bunyi yang timbul ketika reaktor plasma mulai bekerja. Setiap kenaikan tegangan, bunyi yang terdengar akan semakin cepat. Kondisi bunyi maksimum sebelum munculnya lompatan bunga listrik pada zona selongsong menjadi batas atas tegangan primer yang akan diuji pada penelitian ini.

#### 4.2.2. Tegangan minimum

Tegangan primer minimum yang digunakan pada penelitian ini adalah 70 V. Penelitian ini menggunakan tegangan minimal 70 V dengan tujuan untuk melihat waktu rata-rata konversi mencapai kestabilan. Hal ini dapat diamati saat melakukan uji dinamis menggunakan CO analyzer. Dari Gambar 4.4. terlihat dari uji dinamis menunjukkan bahwa konversi  $\text{CO}_2$  mencapai kestabilan pada menit kedua. Namun pada penelitian ini, kami menggunakan waktu lima menit dengan asumsi setelah lima menit konversi untuk seluruh variasi tegangan sudah stabil.



Gambar 4.4. Produksi CO pada Berbagai Laju Alir untuk Umpan  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  pada Reaktor 12 mm dan Tegangan Primer 70 V

Secara visual, fenomena plasma yang terjadi tidak dapat diamati. Namun fenomena plasma dapat dibuktikan dari suara yang timbul di dalam reaktor. Suara itu adalah pergerakan elektron yang terjadi di dalam reaktor. Selain itu, dari hasil uji dinamis dengan terbentuknya senyawa CO menandakan sudah terjadi proses plasma di dalam reaktor.

#### 4.2.3. Tegangan maksimum

Tegangan primer maksimum yang digunakan pada penelitian ini adalah 170 V. Walaupun nantinya diharapkan pada aplikasinya tegangan primer yang digunakan sesuai dengan tegangan listrik PLN yaitu 220 V. Penelitian ini menggunakan tegangan maksimal 170 V karena hal ini menyangkut keamanan dari plasma itu sendiri. Pada tegangan primer di atas 170 V, fenomena plasma yang terjadi menjadi lebih sering terlihat, namun ketika proses berlangsung selama lebih dari 2 menit, kaca borosilikat menjadi rentan pecah. Padahal waktu untuk mencapai kondisi konversi  $\text{CO}_2$  yang stabil adalah sekitar 5 menit. Fenomena munculnya pijar api ditunjukkan pada Gambar 4.5.

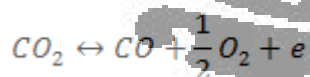


Gambar 4.5. Lecutan Pijar Api

Pada saat tegangan primer 170 V, fenomena terbentuknya plasma semakin terbukti. Walaupun tidak terlihat secara kasat mata, bunyi lecutan plasma yang timbul saat menggunakan tegangan primer 70 V menjadi semakin sering terdengar. Terkadang lecutan plasma juga terjadi walaupun tidak berlangsung secara kontinu.

#### 4.3. Uji Kinerja Reaktor Plasma DBD untuk Konversi CO<sub>2</sub> kering

Seperti telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya, umpan yang digunakan pada penelitian ini adalah CO<sub>2</sub> kering dan CO<sub>2</sub> basah. Kemudian, nantinya akan dibandingkan manakah umpan yang memberikan konversi lebih baik. Untuk umpan CO<sub>2</sub> kering, reaksi yang terjadi di dalam reaktor adalah:



Setelah mencapai kestabilan, reaksi akan berjalan dua arah. CO<sub>2</sub> akan terkonversi menjadi CO dan sebagian CO yang sudah terkonversi akan kembali membentuk CO<sub>2</sub>. O<sub>2</sub> yang merupakan produk samping juga terbentuk di dalam reaktor. Data hasil analisis GC untuk umpan CO<sub>2</sub> kering ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Data analisis GC untuk umpan CO<sub>2</sub> kering

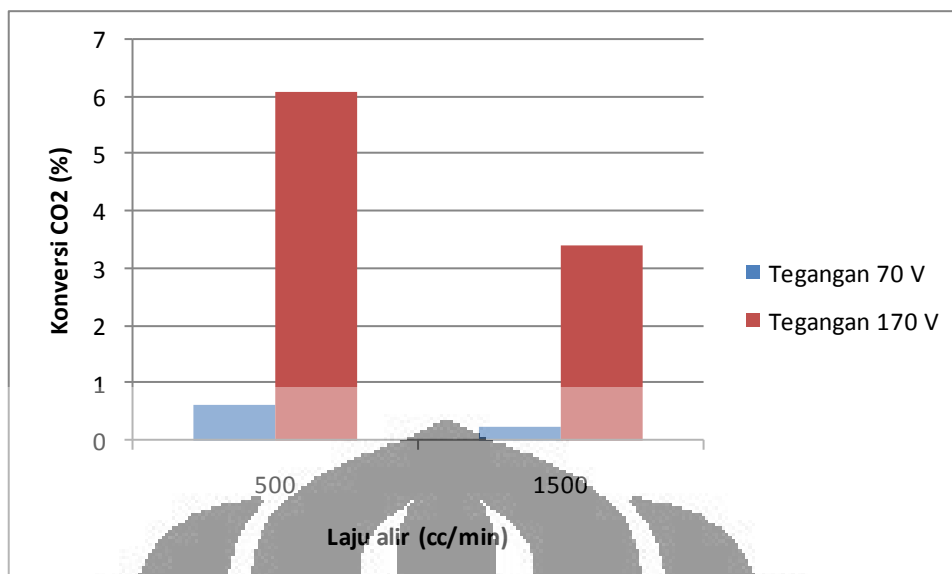
Reaktor	Laju alir (cc/min)	Tegangan primer (V)	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
12 mm	500	70	0,67	0,02	2,73	0,29	96,29
		170	3,97	1,23	3,57	0,22	91
	1500	70	0,95	0,03	1,71	0,17	97,14
		170	2,27	0,76	3,14	0,24	93,6
14 mm	500	70	1,5	0,08	2,2	0,06	95,25
		170	3,31	1,22	3,01	0,6	91,86
	1500	70	1,85	2,98	0	0,05	95,12
		170	3,3	0,1	2,5	0,16	93,93

#### 4.3.1. Pengaruh laju alir terhadap produktivitas reaktor DBD

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh laju alir terhadap kinerja reaktor DBD. 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 dalam reaktor akan semakin besar.

Jogen dkk (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.

Dari Gambar 4.6. terlihat bahwa semakin besar laju alir, konversi CO<sub>2</sub> yang terjadi semakin sedikit. Hal ini dikarenakan saat menggunakan laju alir yang besar, waktu tinggal gas di dalam reaktor menjadi berkurang. Sehingga proses pemutusan ikatan yang terjadi tidak sebanyak pada saat menggunakan laju alir yang lebih kecil.

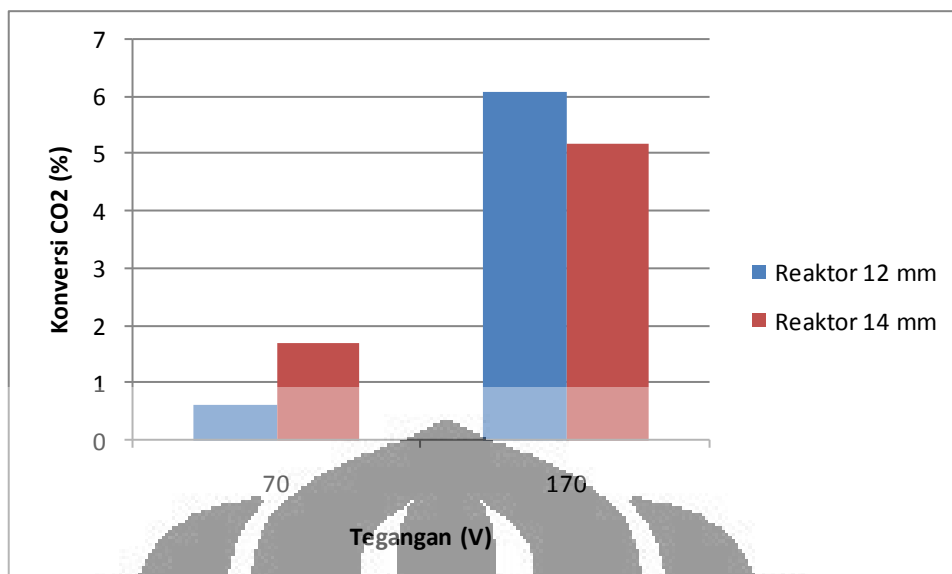


Gambar 4.6. Pengaruh Laju Alir Terhadap Konversi CO<sub>2</sub> pada Tegangan Primer 70 V dan 170 V (Reaktor 12 mm)

#### 4.3.2. Pengaruh tegangan terhadap produktivitas reaktor DBD

Percobaan ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh tegangan primer terhadap produktivitas reaktor dengan cara melakukan variasi tegangan primer. Berdasarkan penelitian mengenai konversi CO<sub>2</sub> dan CO pada reaktor DBD untuk tegangan tinggi yang dilakukan Zheng dkk (2003), menunjukkan bahwa rasio konversi yang dihasilkan akan semakin baik dengan meningkatnya tegangan. Semakin besar tegangan yang diaplikasikan maka semakin banyak gas yang tereksitasi ataupun terionisasi. Hal ini akan mendorong pada lebih banyaknya gas CO<sub>2</sub> yang terkonversi menjadi gas CO.

Dari gambar 4.7. terlihat bahwa semakin tinggi tegangan primer yang digunakan, maka konversi yang dihasilkan akan semakin besar. Hal ini dikarenakan penggunaan listrik bertegangan tinggi menyebabkan pemutusan ikatan yang lebih banyak. Plasma yang terbentuk juga semakin banyak. Hal ini mengakibatkan terputusnya ikatan atom dan reaktan gas sehingga mulai terionisasi.



Gambar 4.7. Pengaruh Tegangan Terhadap Konversi CO<sub>2</sub> pada Reaktor 12 mm dan 14 mm (Laju Alir 500 cc/menit)

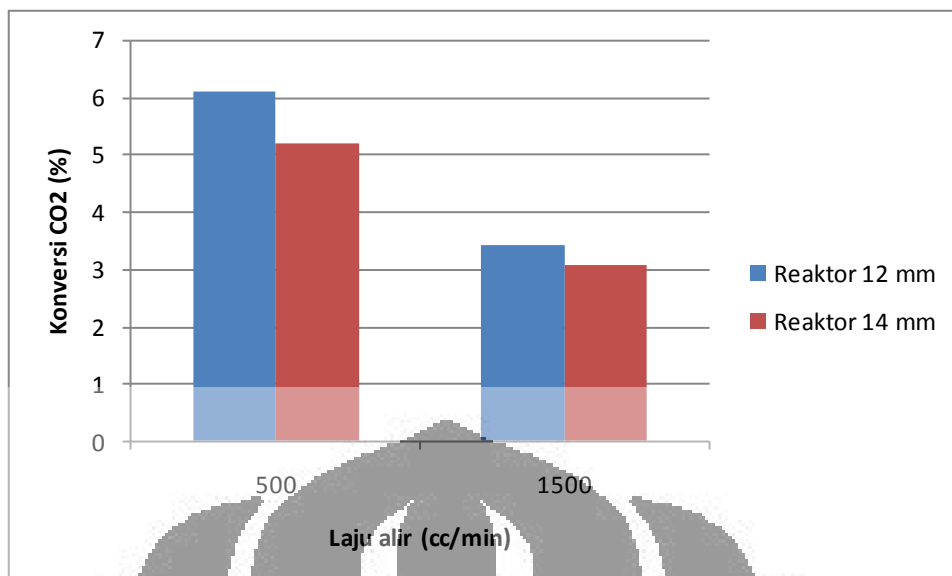
#### 4.3.3. Pengaruh ukuran reaktor terhadap produktivitas reaktor DBD

Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui pengaruh ukuran reaktor terhadap konversi CO<sub>2</sub> yang terjadi dan selektivitas senyawa CO yang dihasilkan. Berdasarkan penelitian terdahulu yang dilakukan Dong Jo Kim (2001), hubungan antara panjang reaktor dengan konversi senyawa NO<sub>x</sub> didapatkan bahwa semakin panjang reaktor maka konversi yang dihasilkan akan semakin tinggi. Literatur ini dijadikan acuan untuk menganalisis data ini.

Pengaruh discharge gap terhadap produktivitas reaktor adalah:

- Semakin besar discharge gap maka energi aktivasi akan semakin kecil
- Semakin besar discharge gap maka waktu tinggal gas di dalam reaktor akan semakin tinggi
- Discharge gap mempengaruhi ketahanan gelas dielektrik





Gambar 4.8. Pengaruh Laju Alir Terhadap Konversi CO<sub>2</sub> pada Reaktor 12 mm dan 14 mm (Tegangan Primer 170 V)

Ukuran reaktor juga mempengaruhi waktu tinggal reaktan di dalam reaktor. Di grafik ini terlihat dengan semakin besarnya ukuran reaktor, konversi yang dihasilkan semakin tinggi. Hal ini dipengaruhi jarak antar elektroda (elektroda batang dan elektroda jala) yang merupakan prinsip dasar dari perancangan reaktor DBD ini.

Semakin besar *discharge barrier* (diameter reaktor semakin besar), maka konversi yang dihasilkan akan semakin kecil. Semakin jauh jarak antar kedua elektroda, maka loncatan listrik sebagai pemicu terjadinya plasma akan semakin sulit terjadi. Serta dengan semakin dekatnya jarak antar kedua elektroda, maka loncatan listrik semakin mudah terjadi dan plasma yang ditimbulkan akan semakin banyak.

Hal lainnya yang juga dipengaruhi oleh perbedaan ruang *discharge* ialah kuat besarnya medan listrik. Semakin besar ukuran dielektrik kaca, maka kuat medan listrik akan semakin kecil. 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.

#### 4.4. Uji Kinerja Reaktor Plasma DBD untuk Konversi CO<sub>2</sub> basah

Pada sub-bab ini akan diuraikan mengenai hasil pengujian kinerja reaktor yang telah dibuat. Sedangkan data yang ingin didapatkan adalah konversi CO<sub>2</sub> yang terjadi dan selektivitas gas sintetis yang terbentuk. Reaksi yang terjadi di dalam reaktor adalah sebagai berikut:



Pembentukan H<sub>2</sub> dimungkinkan karena adanya umpan H<sub>2</sub>O yang dapat dikonversi menjadi gas H<sub>2</sub>. Sedangkan variabel yang akan dilihat adalah pengaruh laju alir, tegangan, dan, ukuran reaktor.

**Tabel 4.4.** Data analisis GC untuk umpan CO<sub>2</sub> basah

Reaktor	Laju alir (cc/min)	Tegangan primer (V)	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
1	500	70	3,23	0,8	3,02	0,14	92,81
		170	0,72	0,06	3,7	0,33	95,19
	1500	70	0,56	0,01	2,89	0,09	96,45
		170	0,6	0,03	2,9	0,17	96,31
2	500	70	3,26	1,06	3,04	0,12	92,52
		170	3,08	1,11	4,49	0,47	90,79
	1500	70	2,01	0	1,78	0	96,22
		170	2,05	0,46	3	0,37	94,12

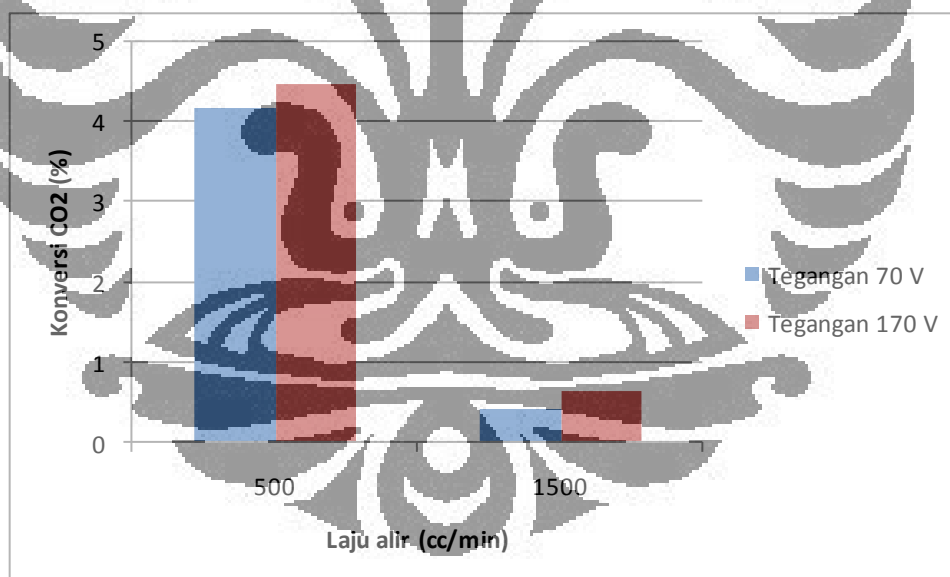
Dari hasil pengamatan GC diatas dapat dilihat bahwa produk dari reaktor plasma DBD ini adalah gas CO yang berasal dari konversi CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> yang berasal dari konversi H<sub>2</sub>O, dan O<sub>2</sub> yang berasal dari konversi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O. Hal ini dibuktikan dengan 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. Hal ini disebabkan pemakaian *bubbler* untuk menggantikan *nebulaizer* sebagai penghasil uap air, Sehingga perbandingan antara CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O dalam umpan tidak dapat dikontrol.

#### 4.4.1. Pengaruh laju alir terhadap produktivitas reaktor DBD

Laju alir mempengaruhi waktu tinggal gas di dalam reaktor. Semakin lama molekul dikontakkan dengan plasma, tentu semakin banyak radikal bebas yang terbentuk. Hal ini akan mengakibatkan semakin banyak gas sintesis yang terbentuk. Waktu tinggal juga dapat ditingkatkan dengan cara membuat reaktor dalam sistem tertutup, namun karena reaktor ini didesain untuk sistem kontinu, maka gas harus terus mengalir di dalam reaktor. Pada uji dinamis, saat menggunakan tegangan primer rendah konsentrasi CO yang terbentuk akan semakin meningkat dengan berkurangnya laju alir.

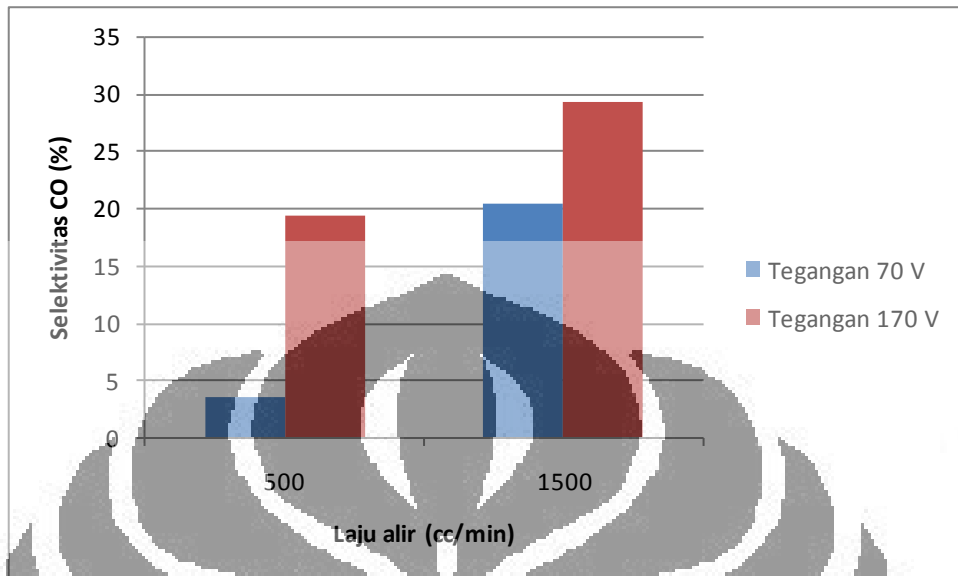
Pada gambar 4.9. terlihat bahwa semakin kecil laju alir yang digunakan maka konversi yang dihasilkan akan semakin baik. Sama seperti pada penjelasan sebelumnya saat menggunakan umpan CO<sub>2</sub> kering, dengan menggunakan laju alir yang lebih kecil konversi yang dihasilkan akan semakin baik karena waktu tinggal reaktan menjadi lebih lama.



**Gambar 4.9.** Pengaruh Laju Alir Terhadap Konversi CO<sub>2</sub> pada Tegangan Primer 70 V dan 170 V (Reaktor 14 mm)

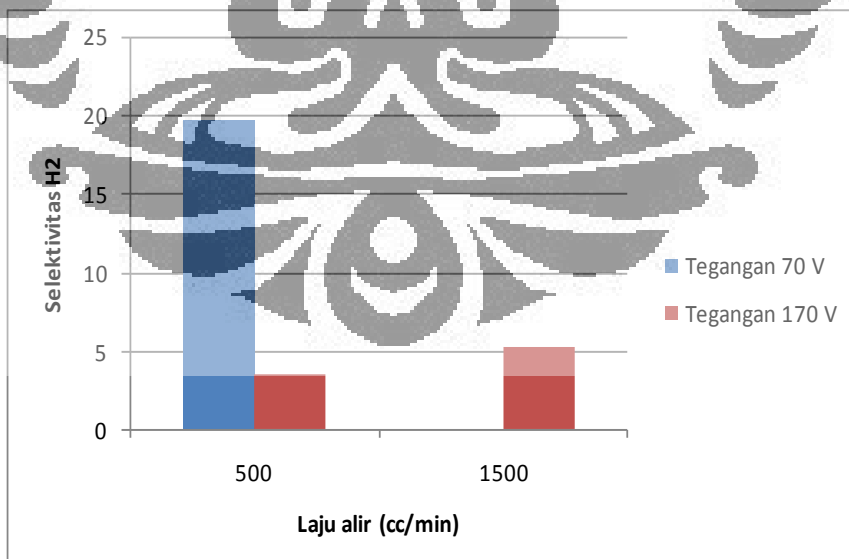
Sedangkan hubungan antara laju alir dengan selektivitas CO yang terbentuk menunjukkan bahwa semakin besar laju alir yang digunakan, produksi CO yang dihasilkan akan semakin banyak. Hal ini menandakan pemutusan ikatan yang

terjadi ketika plasma mulai dinyalakan, tidak serta merta membentuk produk gas CO.



**Gambar 4.10.** Pengaruh Laju Alir Terhadap Selektivitas CO pada Tegangan Primer 70 V dan 170 V (Reaktor 12 mm)

Dari gambar 4.11, terlihat bahwa produksi  $H_2$  berbanding lurus dengan konversi  $CO_2$ . Hal ini mungkin disebabkan sebagian  $CO_2$  yang terkonversi menghasilkan senyawa  $O_2$  dengan cara menarik atom H masing-masing dari  $CO_2$  dan  $H_2O$ .



**Gambar 4.11.** Pengaruh Laju Alir Terhadap Selektivitas  $H_2$  pada Tegangan Primer 70 V dan 170 V (Reaktor 12 mm)

#### 4.4.2. Pengaruh tegangan terhadap produktivitas reaktor DBD

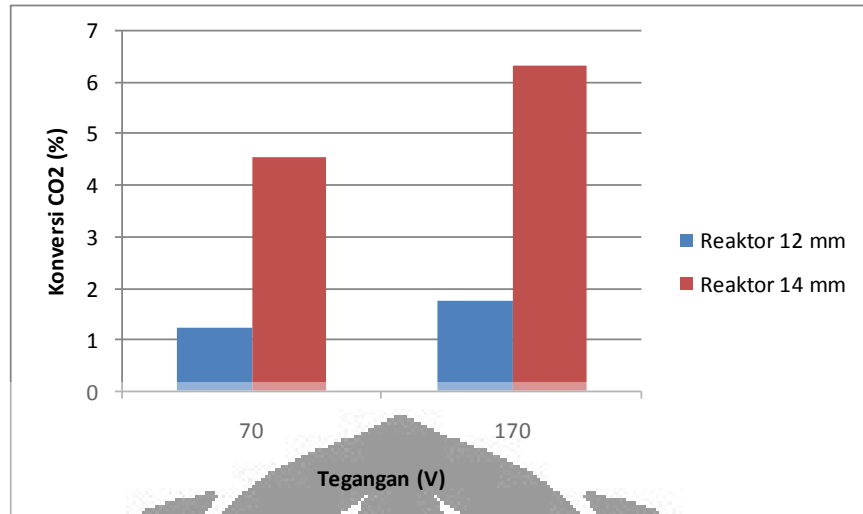
Agar konversi  $\text{CO}_2$  dapat terjadi, maka molekul gas tersebut harus memiliki cukup energi untuk mencapai keadaan transisi saat dikontakkan dengan plasma. Energi potensial yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan transisi membentuk suatu *barrier energy*. Energi yang dibutuhkan agar konversi ini dapat terjadi disebut energi pengaktifan.

Ketika tegangan yang diberikan kecil,  $\text{CO}_2$  mengalami konversi menuju fase transisi. Pada fase ini ada dua kemungkinan yang dapat terjadi pada senyawa tersebut. Apakah itu terurai menjadi CO dan radikal O atau kembali ke bentuk awalnya ( $\text{CO}_2$ ). Tetapi ketika tegangan yang diberikan semakin tinggi, maka  $\text{CO}_2$  akan semakin mudah terurai menjadi CO.

Molekul yang bergerak di dalam suatu larutan memiliki sejumlah energi potensial di dalam ikatan dan sejumlah energi kinetik dalam pergerakannya. Gabungan dari keduanya disebut energi rata-rata molekul. Energi ini dapat ditingkatkan dengan memberikan tegangan yang tinggi ke dalam reaktor. Akibatnya, molekul  $\text{CO}_2$  akan memperoleh tambahan energi kinetik sehingga tabrakan yang terjadi berlangsung lebih sering dan lebih kuat. Serta terjadi perubahan energi kinetik menjadi energi potensial.

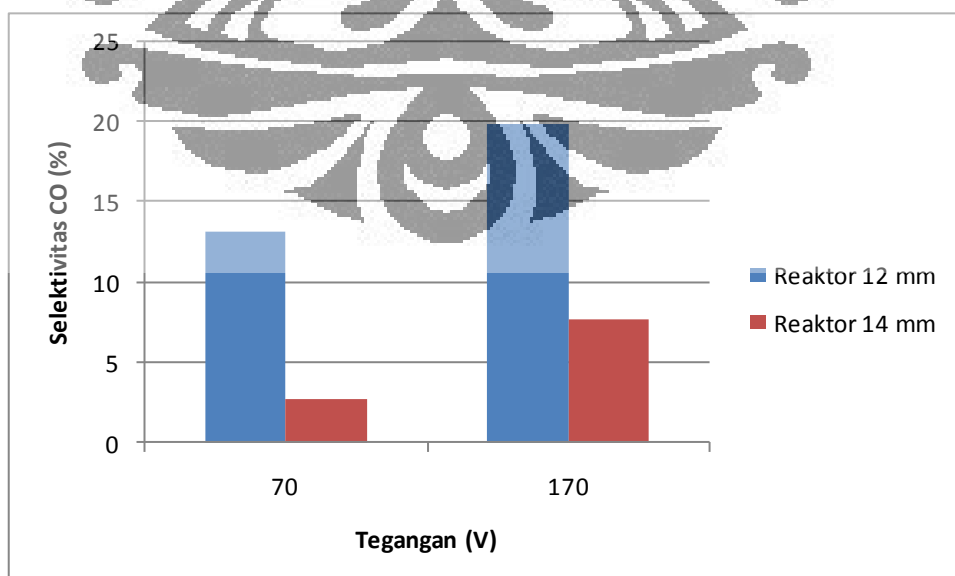
Data uji dinamis menunjukkan bahwa semakin tinggi tegangan, konsentrasi CO yang terbentuk akan semakin banyak. Ketika gas  $\text{CO}_2$  dilewatkan plasma, maka akan terjadi dua peristiwa sekaligus yaitu terbentuknya suatu ikatan baru dan putusannya ikatan pada molekul  $\text{CO}_2$ . Jika tegangan yang diberikan semakin tinggi maka pembentukan senyawa CO dan pemutusan ikatan  $\text{CO}_2$  menjadi semakin cepat.

Gambar 4.12. menunjukkan hubungan antara tegangan dengan konversi  $\text{CO}_2$  pada laju alir 500 cc/min. Dari grafik di atas terlihat bahwa dengan semakin tingginya tegangan yang digunakan, maka konsentrasi  $\text{CO}_2$  di produk semakin kecil. Hal ini menunjukkan konversi yang lebih baik terjadi pada tegangan primer 170 V.



Gambar 4.12. Pengaruh Tegangan Terhadap Konversi CO<sub>2</sub> pada Reaktor 12 mm dan 14 mm (Laju Alir 500 cc/min)

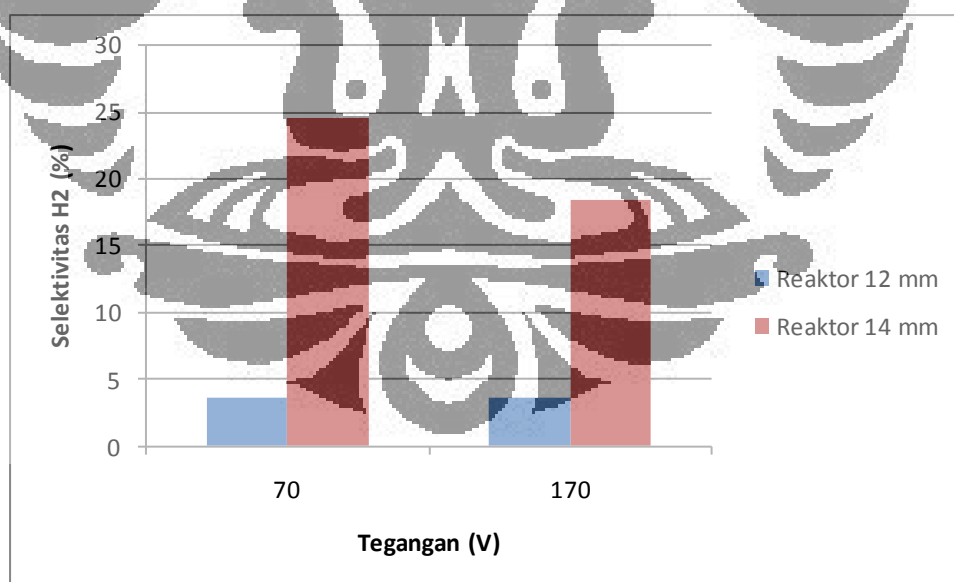
Gambar 4.13. menunjukkan hubungan antara tegangan primer yang digunakan dengan selektivitas CO yang dihasilkan. Tegangan yang diberikan akan mempengaruhi energi aktivasi pada pembentukan produk. Semakin tinggi tegangan yang diberikan maka dapat menurunkan energi aktivasi. Reaksi dengan energi aktivasi rendah akan berjalan dengan lebih cepat. Makin sedikit energi yang diperlukan untuk reaksi, maka akan semakin banyak molekul yang memiliki cukup energi untuk bereaksi.



**Gambar 4.13.** Pengaruh Tegangan Terhadap Selektivitas CO pada Reaktor 12 mm dan 14 mm  
(Laju Alir 500 cc/min)

Hubungan antara tegangan dengan selektivitas gas CO yang terbentuk berbanding lurus dengan konversi CO<sub>2</sub> yang terjadi. Hal ini menunjukkan semakin tinggi tegangan, maka selektivitas yang dihasilkan akan semakin baik. Padahal saat menguji pengaruh laju alir, selektivitas CO berbanding terbalik dengan konversi CO<sub>2</sub>. Dari sini dapat ditarik kesimpulan bahwa selektivitas CO yang terbentuk lebih dipengaruhi penggunaan tegangan daripada meningkatkan waktu tinggal reaktan.

Hasil yang sama juga terlihat dari Gambar 4.14, di mana tegangan primer 170 V memberikan selektivitas yang lebih baik daripada bila menggunakan tegangan primer 70 V. Bahkan saat menggunakan reaktor 14 mm pada tegangan primer 70 V, jumlah gas H<sub>2</sub> yang dihasilkan sangatlah sedikit (skala ppm). Hal ini menandakan ketika menggunakan tegangan kecil, energi yang dimiliki belum cukup untuk menghasilkan senyawa H<sub>2</sub>.

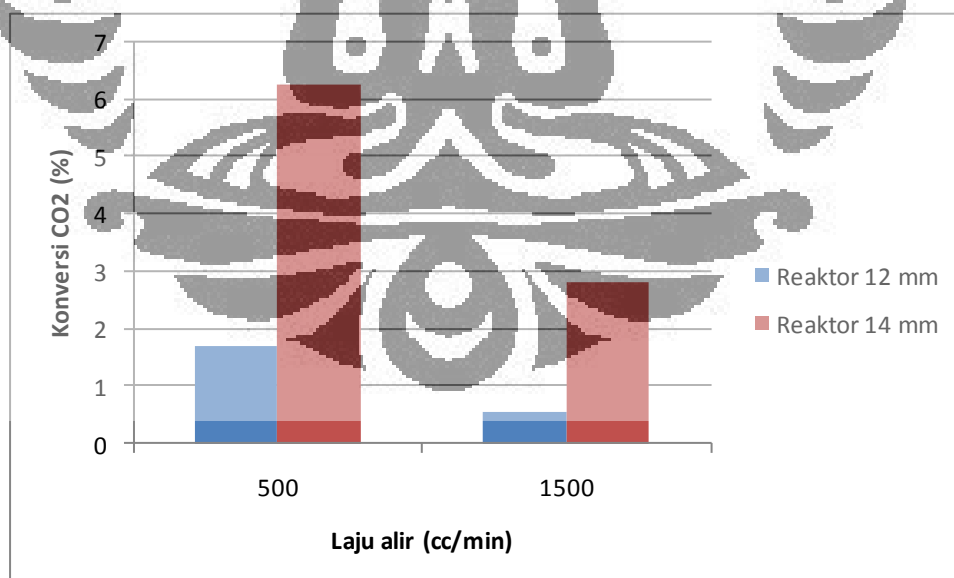


**Gambar 4.14.** Pengaruh Tegangan Terhadap Selektivitas H<sub>2</sub> pada Reaktor 12 mm dan 14 mm  
(Laju Alir 500 cc/min)

#### 4.4.3. Pengaruh ukuran reaktor terhadap produktivitas reaktor DBD

Pada penelitian ini akan dilihat pengaruh diameter reaktor terhadap produktivitas reaktor DBD. Reaktor pertama memiliki diameter 12 mm sedangkan reaktor kedua memiliki diameter 14 mm. Sehingga volume dari kedua reaktor juga berbeda. Perbedaan ukuran reaktor mengakibatkan terjadinya perbedaan waktu tinggal gas di dalam reaktor. Diharapkan dengan meningkatnya waktu tinggal akan meningkatkan konversi. Dari pengukuran menggunakan CO analyzer, terlihat bahwa dengan semakin besar ukuran reaktor, konsentrasi CO yang terbentuk justru semakin kecil. Sebaliknya, pada reaktor yang berukuran lebih kecil, konsentrasi CO yang terbentuk justru lebih besar.

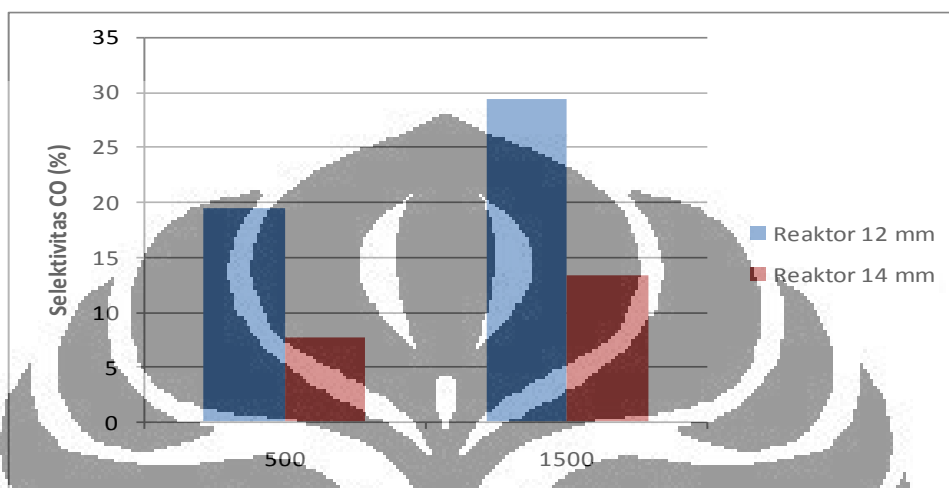
Gambar 4.15. menunjukkan hubungan antara ukuran reaktor dengan konversi CO<sub>2</sub>. Konversi CO<sub>2</sub> semakin baik saat menggunakan reaktor 14 mm. Data ini menunjukkan hasil yang berbeda dibandingkan ketika hanya menggunakan umpan CO<sub>2</sub> kering. Padahal, seharusnya bila menggunakan ukuran reaktor yang berdiameter lebih besar, konversi yang dihasilkan menjadi lebih kecil. Hal ini dikarenakan jarak antar elektroda yang semakin panjang sehingga lompatan elektron menjadi semakin sulit.



**Gambar 4.15.** Pengaruh Laju Alir Terhadap Konversi CO<sub>2</sub> pada Reaktor 12 mm dan 14 mm (Tegangan Primer 170 V)

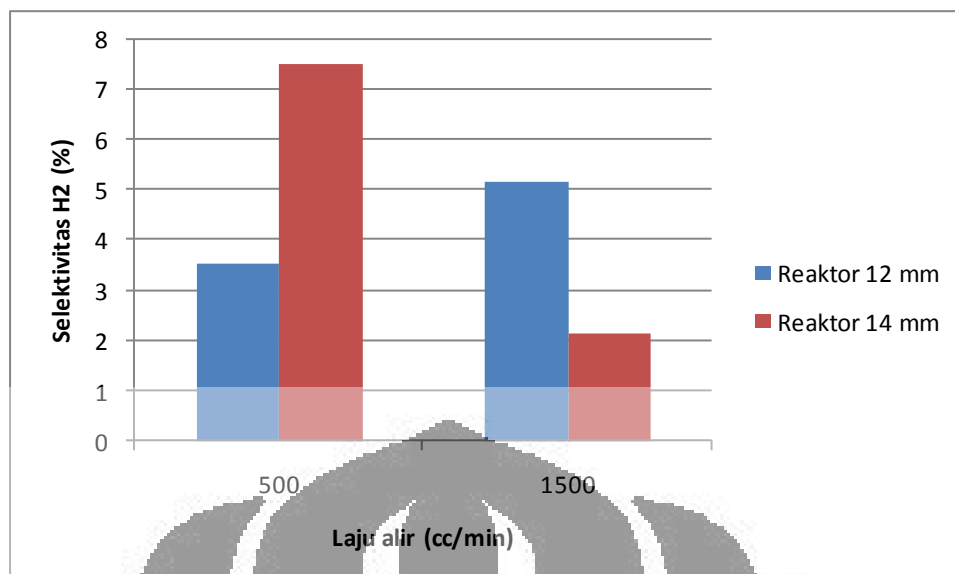


Dari Gambar 4.16. terlihat bahwa selektivitas terbaik dihasilkan saat menggunakan reaktor 12 mm. Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa dengan semakin kecil ukuran reaktor maka selektivitas CO akan semakin baik. Sehingga walaupun saat menggunakan reaktor 12 mm konversi yang dihasilkan lebih sedikit, namun selektivitas yang terbentuk lebih baik.



**Gambar 4.16.** Pengaruh Laju Alir Terhadap Selektivitas CO pada Reaktor 12 mm dan 14 mm (Tegangan Primer 170 V)

Gambar 4.17 menunjukkan pengaruh ukuran reaktor terhadap selektivitas gas  $H_2$  yang terbentuk. Saat menggunakan laju alir 500 cc/menit, reaktor 14 mm menghasilkan gas  $H_2$  yang lebih banyak. Sedangkan pada laju alir 1500 cc/menit, reaktor 12 mm justru menghasilkan selektivitas yang lebih baik. Data tersebut tidak dapat dijadikan acuan, reaktor manakah yang menghasilkan selektivitas  $H_2$  yang lebih baik. Perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai pengaruh laju alir terhadap selektivitas gas sintetis yang terbentuk.



Gambar 4.17. Pengaruh Laju Alir Terhadap Selektivitas H<sub>2</sub> pada Reaktor 12 mm dan 14 mm

#### 4.5. Pengaruh umpan yang digunakan terhadap produktivitas reaktor DBD

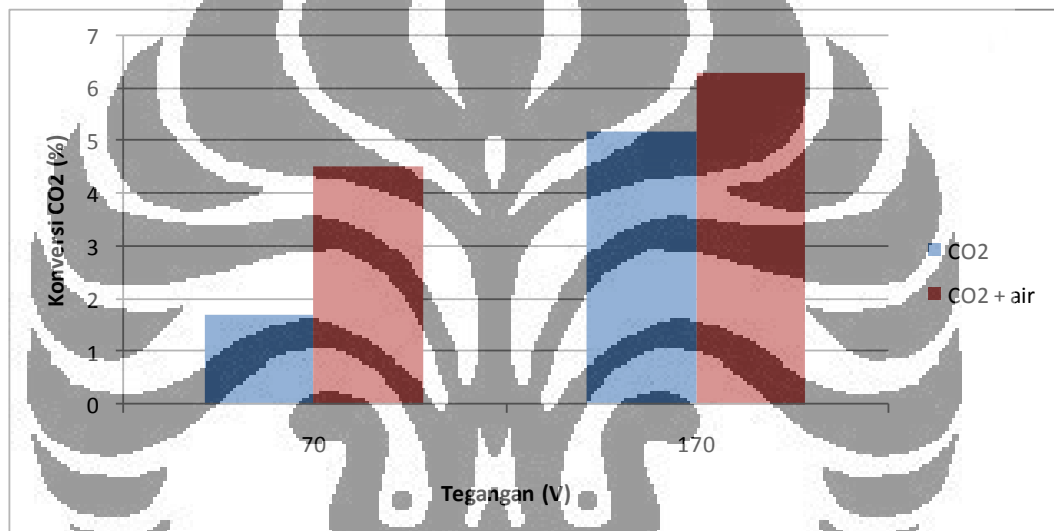
Percobaan ini bertujuan untuk meninjau pengaruh umpan yang digunakan terhadap konversi CO<sub>2</sub>. Sebenarnya untuk menghasilkan gas CO hanya dibutuhkan gas CO<sub>2</sub> sebagai reaktan. Namun untuk memicu terbentuknya produk CO yang lebih banyak ditambah adanya peluang untuk menghasilkan gas sintetis, maka digunakan H<sub>2</sub>O sebagai umpan tambahan. Pada bagian ini akan dilihat umpan manakah yang menghasilkan produktivitas yang lebih baik diantara keduanya.

Tabel 4.5. Data analisis GC untuk umpan CO<sub>2</sub> kering dan basah

Umpan	Laju alir (cc/min)	Tegangan primer (V)	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> +air	500	70	3,26	1,06	3,04	0,12	92,52
	500	170	3,08	1,11	4,49	0,47	90,79
	1500	70	2,01	0	1,78	0,0245	96,22
	1500	170	2,05	0,46	3	0,37	94,12
CO <sub>2</sub>	500	70	1,5	0,08	2,2	0,06	95,25
	500	170	3,31	1,22	3,01	0,6	91,86

	1500	70	1,85	2,98	0	0,05	95,12
	1500	170	3,3	0,1	2,5	0,16	93,93

Gambar 4.18. menunjukkan pengaruh umpan yang digunakan terhadap konversi CO<sub>2</sub> pada laju alir 500 cc/menit. Terlihat bahwa saat menggunakan umpan CO<sub>2</sub> basah, konversi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan yang lebih baik jika dibandingkan dengan menggunakan umpan CO<sub>2</sub> kering. Hal ini disebabkan pemutusan ikatan pada CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O dapat menimbulkan terjadinya reaksi acak sehingga akan menghasilkan konversi yang lebih besar. H<sub>2</sub>O juga mendorong terjadinya konversi CO<sub>2</sub> dan selektivitas CO.



Gambar 4.18. Pengaruh Umpan yang Digunakan Terhadap Konversi CO<sub>2</sub> (Laju Alir 500 cc/min)

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Plasma Non-termal (Plasma Dingin) jenis DBD dapat digunakan untuk mengkonversi CO<sub>2</sub>.
2. Kadar gas sintesis yang dihasilkan plasma non-termal belum seoptimal yang diharapkan. Hal ini dimungkinkan karena teknologi dan peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terbilang sederhana.
3. Semakin tinggi laju alir gas ke dalam reaktor, konversi yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal ini dikarenakan waktu tinggal gas di dalam reaktor menjadi sedikit.
4. Semakin tinggi tegangan yang digunakan, maka konversi yang dihasilkan akan semakin besar. Hal ini disebabkan ketika menggunakan tegangan tinggi, plasma yang ditimbulkan akan semakin besar.
5. Semakin besar ukuran reaktor, maka konversi yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal ini dikarenakan jarak antar kedua elektroda yang berjauhan membuat loncatan listrik pembentuk plasma menjadi lebih sulit.
6. Konversi CO<sub>2</sub> terbaik untuk umpan CO<sub>2</sub> kering adalah saat menggunakan laju alir 500 cc/menit, tegangan 170 V, dan pada reaktor 12 mm yaitu sebesar 6,08 %.
7. Konversi CO<sub>2</sub> terbaik untuk umpan CO<sub>2</sub> basah adalah saat menggunakan laju alir 500 cc/menit, tegangan 170 V, dan pada reaktor 14 mm yaitu sebesar 6,3 %.

## 5.2. Saran

Dari hasil penelitian yang diperoleh, proses konversidengan plasma non-termal belum dapat menghasilkan gas sintesis secara optimal. Sehingga sangat dibutuhkan penyempurnaan serta penelitian lanjutan guna memperoleh teknologi plasma non-termal yang lebih optimal. Adapun penyempurnaan yang perlu dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Diperlukan studi lebih intensif dan terukur terhadap kinetika reaksi yang terjadi di dalam reaktor.
2. Penggunaan katalis dan menaikkan suhu reaktor untuk meningkatkan konversi  $\text{CO}_2$ .
3. Mendesain reaktor plasma DBD sedemikian rupa agar kontak yang terjadi antara plasma dan gas  $\text{CO}_2$  lebih baik dan optimal.
4. Mendesain bentuk elektroda yang dapat menghantarkan plasma dengan lebih baik, sehingga proses reaksi dapat berjalan lebih efektif.
5. Fase gas  $\text{H}_2\text{O}$  yang dicampur dengan gas  $\text{CO}_2$  sebagai umpan sebaiknya dalam bentuk gas. Agar komposisi umpan  $\text{H}_2\text{O}$  yang masuk reaktor lebih banyak.
6. Menggunakan analisis GC yang lebih akurat.

## DAFTAR REFERENSI

- Baowei, Wang, et al. (2002). *Conversion of natural Gas to C<sub>2</sub> Hydrocarbons through Dielectric barrier Discharge Plasma Catalysis*. State Key Laboratory of C<sub>1</sub> Chemical technology, Tianjin University. Science in China volume 45 number 3.
- Brock, Stephanie I, et al. (2002). *Application of Non-thermal Atmospheric Pressure ac Plasmas to the Carbon Dioxide Reforming Methane*. Research Chemical Intermediate volume 28 number 1 page 13 – 24.
- Farzin, Aghamir, et al. (2004). *Methanol production in AC Dielectric Barrier Discharge*. Journal Plasma Fusion Research volume 6 page 696 – 698.
- Francke, K. P. (2002). *Design and Operating Characteristic of a Simple and Reliable DBD Reactor for use with Atmospheric Air*. Plasma Chemistry and Plasma Processing volume 23 number 1..
- Hong, Suk-Won, et al. (2001). *The Methane Reforming with Carbon Dioxide on Ni-Catalyst Activated by a DC-Pulsed Corona Discharge*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry volume 7 number 6 page 410 – 416.
- Istadi. (2006). *Aplikasi teknologi Hibrid Katalisis Plasma dalam Pengembangan Reaktor Kimia Masa Depan*. University of Diponegoro. Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis page 15 – 20.
- Istadi, N. A. S. Amin. (2007). *Catalytic-Dielectric Barrier Discharge Plasma Reactor for Methane and Carbon Dioxide Conversion*. Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis page 37 – 44.
- Kogelschatz, Ulrich. (2003). *Dielectric Barrier Discharge: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications*. Plasma Chemistry and Plasma Processing volume 23 number 1.
- Liu, Changjun, et al. (2001). *Methane Conversion to Higher Hydrocarbons in the Presence of Carbon Dioxide using Dielectric barrier Discharge Plasmas*. Plasma Chemistry and Plasma Processing volume 21 number 3.
- Matin, Naser Sayed., Hasan A, Seyed Younus Feizabadi. (2008). *Methane Conversion to C<sub>2</sub> Hydrocarbons Using Dielectric Barrier Discharge*

- Reactor: Effects of System Variables*. Plasma Chemistry and Plasma Processing volume 28 page 189 – 202.
- Motret, O, et al. (1996). *Spectroscopic Characterization of CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> Plasmas Excited by a Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric Pressure*. Plasma Chemistry and Plasma Processing volume 17 number 4.
- Soloshenko, I. A. (2009). *Effect of Water Adding on Kinetics of Barrier Discharge in Air*. Plasma Sources Sciences Technology volume 18.
- Song, Hyung Keun, et al. (2003). *Effect of Electrical Pulse Forms on the CO<sub>2</sub> Reforming of Methane using Atmospheric Dielectric Barrier Discharge*. Plasma Chemistry and Plasma Processing volume 24.
- Yang, Yun. (2003). *Direct Non-Oxidative Methane Conversion by Non-thermal Plasma: Experimental Study*. Plasma Chemistry and Plasma Processing volume 23 number 2.
- Zheng, Guangyun, et al. (2003). *The Mutual Conversion of CO<sub>2</sub> and CO in Dielectric Barrier Discharge (DBD)*. Plasma Chemistry and Plasma Processing volume 23 number 1 March.
- Zhou, L. M, et al. (1998). *Partial oxidation of Methane to Methanol with Oxygen or Air in a Nonequilibrium Discharge Plasma*. Plasma Chemistry and Plasma Processing volume 18 number 3.
- Zou, Ji-Jun, et al. (2002). *Starch-enhanced Synthesis of Oxygenates from Methane and Carbon Dioxide using Dielectric-barrier Discharges*. Plasma Chemistry and Plasma Processing volume 23 number 1.
- Anonimous, 1997. Final Report ALGAS Project. Departemen Kementrian Lingkungan Hidup

## LAMPIRAN

### Lampiran 1. Hasil uji analisis menggunakan Gas Chromatography

Reaktor	1	Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	500	cc/menit
	CO <sub>2</sub>	Tegangan	70	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,1	1362			0,67
2	0,817	43	v		0,02
3	1,467	5529			2,73
4	1,742	589	v		0,29
5	5,29	195270			96,29
	TOTAL	202793			100

Reaktor	1	Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	1500	cc/menit
	CO <sub>2</sub>	Tegangan	170	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,117	2194			0,95
2	0,818	66	v		0,03
3	1,465	3964			1,71
4	1,735	403	v		0,17
5	5,28	224706			97,14
	TOTAL				100

Reaktor	1	Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	1500	cc/menit
	CO <sub>2</sub>	Tegangan	70	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,128	5433			2,27
2	0,812	1819	v		0,76
3	1,458	7518	v		3,14
4	1,733	566	v		0,24
5	5,277	224130			93,60
	TOTAL	239466			100

Reaktor	2	Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	500	cc/menit
	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	Tegangan	170	V



No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,173	7604			3,08
2	0,807	2883	v		1,17
3	1,458	11095	v		4,49
4	1,725	1159	v		0,47
5	5,285	224115			90,79
	TOTAL	246856			100

Reaktor		2	Sumber	PLN	
Jenis	Produk		Laju Alir	500	cc/menit
	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O		Tegangan	70	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,175	8148			3,26
2	0,817	2653	v		1,06
3	1,455	7589	v		3,04
4	1,783	296	v		0,12
5	5,282	231101			92,52
	TOTAL	249787			100

Reaktor		2	Sumber	PLN	
Jenis	Produk		Laju Alir	1500	cc/menit
	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O		Tegangan	170	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,15	4771			2,05
2	0,823	1070	v		0,46
3	1,478	6987	v		3,00
4	1,75	853	v		0,37
5	5,332	219166			94,12
	TOTAL	232847			100

Reaktor	2	Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	1500	cc/menit
	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	Tegangan	70	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,182	4784			2,01
2	1,472	4233			1,78
3	5,305	229389			96,22
	TOTAL	238406			100

Reaktor	2	Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	500	cc/menit
	CO <sub>2</sub>	Tegangan	170	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,182	8931			3,31
2	0,798	3280	v		1,22
3	1,45	8105	v		3,01
4	1,717	1627	v		0,60
5	5,268	233088			86,49
6	9,5	8371			3,11
7	10,783	6012	v		2,23
8	11,05	79	v		0,03
	TOTAL	269493			100

Reaktor	2	Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	500	cc/menit
	CO <sub>2</sub>	Tegangan	70	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,167	5852			2,41
2	0,808	188	v		0,08
3	1,457	5322			2,20
4	1,725	153	v		0,06
5	5,267	230936			95,25
	TOTAL	242451			100

Reaktor	1	Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	500	cc/menit
	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	Tegangan	170	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,117	1627			0,72
2	0,817	136	v		0,06
3	1,462	8409			3,70
4	1,733	753	v		0,33
5	5,257	216147			95,19
	TOTAL	227072			100

Reaktor	1	Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	500	cc/menit
	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	Tegangan	130	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,103	1362			0,61
2	0,822	77	v		0,03
3	1,467	6136			2,74
4	1,733	481	v		0,21
5	5,257	215949			96,40
	TOTAL	224005			100

Reaktor	1	Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	500	cc/menit
	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	Tegangan	100	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,123	2222			1,00
2	0,815	89	v		0,04
3	1,463	6917			3,10
4	1,728	345	v		0,15
5	5,26	213566			95,71
	TOTAL	223139			100

Reaktor	1	Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	1500	cc/menit
	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	Tegangan	70	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,108	1236			0,56
2	0,827	31	v		0,01
3	1,475	6428			2,89
4	1,742	194	v		0,09
5	5,275	214456			96,45
	TOTAL	222345			100

Reaktor	1	Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	1500	cc/menit
	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	Tegangan	170	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,108	1368			0,60
2	0,825	59	v		0,03
3	1,47	6638			2,90
4	1,742	398	v		0,17
5	5,267	220596			96,31
	TOTAL	229059			100

Reaktor	1	Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	1500	cc/menit
	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	Tegangan	70	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,108	1347			0,62
2	0,827	29	v		0,01
3	1,473	6313			2,89
4	1,772	87	v		0,04
5	5,29	210637			96,44
	TOTAL	218413			100

Reaktor	2	Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	1500	cc/menit
	CO <sub>2</sub>	Tegangan	70	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,232	4233			1,85
2	1,505	6837			2,98
3	1,82	125	v		0,05
4	5,38	218117			95,12
	TOTAL	229312			100

Reaktor	2	Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	1500	cc/menit
	CO <sub>2</sub>	Tegangan	170	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,2	7723			3,30
2	0,818	228	v		0,10
3	1,458	5843			2,50
4	1,733	382	v		0,16
5	5,257	219520			93,93
	TOTAL	233696			100

Reaktor	1	Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	500	cc/menit
	CO <sub>2</sub>	Tegangan	170	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,175	9206			3,97
2	0,817	2853	v		1,23
3	1,467	8279	v		3,57
4	1,735	513	v		0,22
5	5,278	210853			91,00
	TOTAL	231704			100

Reaktor 1		Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	500	cc/menit
	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	Tegangan	70	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,15	7365			3,23
2	0,798	1826	v		0,80
3	1,458	6881	v		3,02
4	1,728	327	v		0,14
5	5,287	211817			92,81
	TOTAL	228216			100

Reaktor 2		Sumber	PLN	
Jenis	Produk	Laju Alir	1500	cc/menit
	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	Tegangan	70	V

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
1	0,157	8464			3,80
2	0,8	2954	v		1,33
3	1,46	5676	v		2,55
4	1,733	634	v		0,28
5	5,288	205074			92,04
	TOTAL	222802			100

**Lampiran 2. Pengolahan data untuk CO<sub>2</sub> kering & basah**

CO<sub>2</sub> kering

Reaktor	laju alir (cc/min)	tegangan (V)	Konsentrasi H <sub>2</sub> O	Konsentrasi H <sub>2</sub>	Konsentrasi O <sub>2</sub>	Konsentrasi CO	Konsentrasi CO <sub>2</sub>	Konversi CO <sub>2</sub>
12 mm	500	70	0,67	0,02	2,73	0,29	96,29	0,62
	500	170	3,97	1,23	3,57	0,22	91	6,08
	1500	70	0,95	0,03	1,71	0,17	97,14	0,26
	1500	170	2,27	0,76	3,14	0,24	93,6	3,40
14 mm	500	70	1,5	0,08	2,2	0,06	95,25	1,69
	500	170	3,31	1,22	3,01	0,6	91,86	5,19
	1500	70	1,85	2,98	0	0,05	95,12	1,83
	1500	170	3,3	0,1	2,5	0,16	93,93	3,06

CO<sub>2</sub> basah

Reaktor	laju alir (cc/min)	tegangan (V)	Konsentrasi CO <sub>2</sub>	Konsentrasi CO	Konsentrasi H <sub>2</sub>	Konversi CO <sub>2</sub>	Selektivitas CO	Selektivitas H <sub>2</sub>
1	500	100	95,71	0,15	0,04	1,22	13,16	3,51
	500	170	95,19	0,33	0,06	1,75	19,88	3,61
	1500	70	96,45	0,09	0,01	0,45	22,50	2,50
	1500	170	96,31	0,17	0,03	0,60	31,48	5,56
2	500	70	92,52	0,12	1,06	4,51	2,77	24,48
	500	170	90,79	0,47	1,11	6,30	7,76	18,32
	1500	70	96,22	0,0245	0	0,69	3,89	0,00
	1500	170	94,12	0,37	0,46	2,86	13,55	16,85

**Lampiran 3.** Data percobaan menggunakan CO Analyzer dan H<sub>2</sub> analyzer

Tebal reaktor                    12 mm  
Tegangan listrik                70 volt

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	500	29	30	1.9	13	13.9	0.01
1	500	30	30	0.9	568	14.7	0.01
2	500	30	30	1	576	14.6	0.01
3	500	30	30	1.1	564	14.5	0.01
4	500	30	30	1.2	558	14.5	0.01
5	500	30	30	1.3	573	14.4	0.01
6	500	30	30	1.6	583	14.2	0.01
7	500	30	30	1.5	579	14.3	0.01
8	500	30	30	1.5	569	14.3	0.01

Tebal reaktor                    12 mm  
Tegangan listrik                70 volt

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	1000	31	30	1	15	14.6	0.01
1	1000	31	30	1.2	325	14.5	0.01
2	1000	30	30	1.3	345	14.4	0.01
3	1000	30	30	1.5	338	14.3	0.01
4	1000	30	30	1.8	365	14	0.01
5	1000	30	30	1.8	379	14	0.01
6	1000	30	30	1.9	387	14	0.01
7	1000	30	30	2.2	396	13.7	0.01
8	1000	30	30	2.8	405	13.3	0.01
9	1000	30	30	3.2	383	13	0.01

Tebal reaktor                    12 mm  
Tegangan listrik                70 volt

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	1500	31	30	2.2	11	14.7	0.01
1	1500	30	30	2	254	13.9	0.01
2	1500	30	30	2.4	263	13.6	0.01



3	1500	30	30	3.1	270	13.1	0.01
4	1500	31	30	6.3	287	10.7	0.01
5	1500	30	30	6.7	287	10.4	0.01
6	1500	31	30	7	294	10.2	0.01
7	1500	30	30	7.3	302	10	0.01
8	1500	30	30	7.6	305	9.8	0.01

Tebal reaktor 12 mm

Tegangan listrik 70 volt

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		T <sub>s</sub>	T <sub>a</sub>	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	2000	31	30	2.9	10	13.2	0.01
1	2000	30	30	4.2	230	12.3	0.01
2	2000	30	30	4.8	239	11.8	0.01
3	2000	30	30	5.3	239	11.5	0.01
4	2000	31	30	5.8	243	11.1	0.01
5	2000	30	30	6.3	246	10.7	0.01
6	2000	31	30	6.8	251	10.4	0.01
7	2000	30	30	7.2	251	10.1	0.01

Tebal reaktor 12 mm

Tegangan listrik 70 volt

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		T <sub>s</sub>	T <sub>a</sub>	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	2500	31	30	4	15	12.4	0.01
1	2500	31	30	4.7	203	12.9	0.01
2	2500	31	30	5	210	11.7	0.01
3	2500	31	30	5.5	214	11.3	0.01
4	2500	31	30	6	212	11	0.01
5	2500	31	30	6.4	216	10.7	0.01
6	2500	30	30	6.8	215	10.4	0.01
7	2500	31	30	7.3	216	10	0.01

Tebal reaktor 14 mm

Tegangan listrik 70 volt

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		T <sub>s</sub>	T <sub>a</sub>	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	500	31	31	2.1	25	13.8	0.01
1	500	31	31	4.2	452	12.3	0.01

2	500	31	31	4.7	457	11.9	0.01
3	500	31	31	5.1	490	11.6	0.01
4	500	31	31	5.7	507	11.5	0.01
5	500	31	31	5.6	539	11.2	0.01
6	500	31	31	6.2	541	10.8	0.01
7	500	30	31	6.7	554	10.4	0.01
8	500	31	31	7.3	546	10	0.01
9	500	31	31	7.8	538	9.6	0.01

Tebal reaktor 12 mm

Tegangan listrik 70 volt

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		T <sub>s</sub>	T <sub>a</sub>	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	1000	31	31	3.5	25	12.7	0.01
1	1000	31	31	4.7	385	11.9	0.01
2	1000	30	31	5.1	382	11.6	0.01
3	1000	31	31	5.6	384	11.2	0.01
4	1000	31	31	6.2	402	10.8	0.01
5	1000	31	31	6.7	405	10.4	0.01
6	1000	31	31	7.3	417	10	0.01
7	1000	31	31	7.9	412	9.6	0.01

Tebal reaktor 14 mm

Tegangan listrik 70 volt

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		T <sub>s</sub>	T <sub>a</sub>	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	1500	31	31	3.2	20	12.9	0.01
1	1500	31	31	4.8	237	11.8	0.01
2	1500	31	31	5.1	242	11.6	0.01
3	1500	31	31	5.6	247	11.2	0.01
4	1500	31	31	6.2	240	10.8	0.01
5	1500	31	31	6.7	244	10.4	0.01
6	1500	31	31	7.4	250	9.9	0.01
7	1500	31	31	7.9	250	9.6	0.01
8	1500	31	31	8.5	245	9.1	0.01

Tebal reaktor 14 mm

Tegangan listrik 70 volt

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk	Komposisi
-------	------------------------	-------------	-----------

		<b>Ts</b>	<b>Ta</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>CO (ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>H<sub>2</sub> (%)</b>
0	2000	32	32	3.7	21	12.6	0.01
1	2000	31	31	4.8	195	11.8	0.01
2	2000	31	31	5.4	194	11.4	0.01
3	2000	31	31	6	190	11	0.01
4	2000	31	31	6.7	200	10.4	0.01
5	2000	31	31	7.1	200	10.1	0.01
6	2000	31	31	7.6	204	9.8	0.01
7	2000	31	31	8.1	198	9.4	0.01

Tebal reaktor 14 mm

Tegangan listrik 70 volt

<b>Waktu</b>	<b>Laju alir gas (cc/min)</b>	<b>Suhu produk</b>		<b>Komposisi</b>			
		<b>Ts</b>	<b>Ta</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>CO (ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>H<sub>2</sub> (%)</b>
0	2500	31	31	4.2	19	4.2	0.01
1	2500	31	31	6.1	159	10.9	0.01
2	2500	31	31	6.8	157	10.4	0.01
3	2500	31	31	7.3	159	10	0.01
4	2500	31	31	7.8	158	9.6	0.01

Tebal reaktor 12 mm

Tegangan listrik 80 volt

Kuat arus 25 mA

<b>Waktu</b>	<b>Laju alir gas (cc/min)</b>	<b>Suhu produk</b>		<b>Komposisi</b>			
		<b>Ts</b>	<b>Ta</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>CO (ppm)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>H<sub>2</sub> (%)</b>
0	500	28	27	3.1	15	13.2	0.01
1	500	28	27	2.8	479	13.3	0.01
2	500	28	27	2.7	486	13.4	0.01
3	500	28	27	2.7	494	13.4	0.01
4	500	28	27	2.6	522	13.4	0.01
5	500	28	27	2.4	570	13.6	0.01
6	500	28	27	2.3	622	13.7	0.01
7	500	28	27	2.2	685	13.7	0.01
8	500	29	27	2	759	13.9	0.01
9	500	29	27	1.8	806	14	0.01
10	500	29	27	1.8	848	14	0.01
11	500	29	27	1.7	892	14.1	0.01

Tebal reaktor 12 mm

Tegangan listrik 80 volt

Kuat arus 25 mA

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	1000	29	27	1.2	15	14.5	0.01
1	1000	29	27	1.7	585	14.1	0.01
2	1000	29	27	1.9	628	14	0.01
3	1000	29	27	2.3	647	13.7	0.01
4	1000	29	27	2.9	663	13.2	0.01
5	1000	29	27	3.3	675	12.9	0.01
6	1000	29	27	3.9	684	12.5	0.01
7	1000	29	27	4.5	694	12.1	0.01
8	1000	29	27	5	706	11.7	0.01

Tebal reaktor 12 mm  
 Tegangan listrik 80 volt  
 Kuat arus 25 mA

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	1500	30	27	2.6	15	13.2	0.01
1	1500	29	27	3.6	479	13.3	0.01
2	1500	29	27	3.9	486	13.4	0.01
3	1500	29	27	4.3	494	13.4	0.01
4	1500	29	27	4.7	522	13.4	0.01
5	1500	29	27	5.1	570	13.6	0.01
6	1500	29	27	5.5	622	13.7	0.01
7	1500	29	27	5.9	685	13.7	0.01
8	1500	29	27	6.3	759	13.9	0.01
9	1500	29	27	6.6	806	14	0.01

Tebal reaktor 12 mm  
 Tegangan listrik 80 volt  
 Kuat arus 25 mA

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	2000	29	27	3.4	12	12.9	0.01
1	2000	29	27	4.3	369	12.2	0.01
2	2000	29	27	4.6	380	12	0.01
3	2000	29	27	4.8	396	11.8	0.01
4	2000	29	27	5.1	407	11.6	0.01
5	2000	29	27	5.3	408	11.5	0.01

6	2000	29	27	5.8	409	11.1	0.01
7	2000	29	27	6.1	411	11	0.01
8	2000	29	27	6.3	413	10.7	0.01
9	2000	29	27	6.6	410	10.6	0.01
10	2000	29	27	6.8	412	10.4	0.01
11	2000	29	27	7	412	10.2	0.01

Tebal reaktor 12 mm

Tegangan listrik 80 volt

Kuat arus 25 mA

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	2500	30	27	3.2	12	13	0.01
1	2500	30	27	3.9	291	12.5	0.01
2	2500	29	27	5.1	295	11.7	0.01
3	2500	29	27	5.4	299	11.4	0.01
4	2500	29	27	5.9	298	11	0.01
5	2500	29	27	6.3	305	10.7	0.01
6	2500	29	27	6.7	309	10.5	0.01
7	2500	29	27	7	306	10.3	0.01
8	2500	29	27	7.3	309	10.1	0.01
9	2500	29	27	7.6	310	9.9	0.01
10	2500	29	27	7.9	314	9.6	0.01

Tebal reaktor 14 mm

Tegangan listrik 80 volt

Kuat arus 30 mA

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	1000	30	29	1.7	11	14.1	0.01
1	1000	30	29	2.4	479	13.6	0.01
2	1000	29	29	3.1	492	13.1	0.01
3	1000	29	29	3.6	491	12.7	0.01
4	1000	30	29	4.3	494	12.2	0.01
5	1000	29	29	4.8	494	11.8	0.01
6	1000	29	29	5.2	498	11.5	0.01
7	1000	29	29	5.6	497	11.2	0.01

Tebal reaktor 14 mm

Tegangan listrik 80 volt

Kuat arus 30 mA

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	1500	30	29	3.2	8	13.1	0.01
1	1500	30	29	3.8	337	12.6	0.01
2	1500	30	29	4.8	337	12.2	0.01
3	1500	30	29	4.7	337	11.9	0.01

Tebal reaktor 14 mm

Tegangan listrik 80 volt

Kuat arus 30 mA

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	2000	30	29	2.4	8	13.7	0.01
1	2000	29	29	3.2	254	13	0.01
2	2000	29	29	3.7	259	12.6	0.01
3	2000	30	29	4.2	262	12.3	0.01
4	2000	29	29	4.4	263	12.1	0.01
5	2000	29	29	4.8	266	11.8	0.01
6	2000	29	29	5.2	263	11.5	0.01

Tebal reaktor 14 mm

Tegangan listrik 80 volt

Kuat arus 30 mA

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	2500	30	29	3.2	7	13.1	0.01
1	2500	29	29	3.9	230	12.5	0.01
2	2500	29	29	4.3	231	12.2	0.01
3	2500	29	29	4.7	231	11.9	0.01
4	2500	29	29	5	231	11.7	0.01

Tebal reaktor 14 mm

Tegangan listrik 90 volt

Kuat arus 30 mA

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	500	31	29	1.6	15	14.2	0.01

1	500	30	29	4.7	644	11.9	0.01
2	500	30	29	4.5	678	12.1	0.01
3	500	30	29	4	702	12.4	0.01
4	500	29	29	4	714	12.4	0.01
5	500	29	29	4.5	714	12.1	0.01
6	500	30	29	4	736	12.4	0.01
7	500	29	29	4.2	741	12.3	0.01
8	500	29	29	4.3	750	12.5	0.01
9	500	29	29	3.8	757	12.6	0.01
10	500	29	29	4.2	761	12.3	0.01
11	500	29	29	3.8	773	12.6	0.01

Tebal reaktor 12 mm  
Tegangan listrik 100 volt

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	500	29	29	1.2	20	14.5	0.01
1	500	29	29	1.7	608	14.1	0.01
2	500	29	29	2.1	633	13.8	0.01
3	500	29	29	2.1	653	13.8	0.01
4	500	29	29	1.9	712	14	0.01
5	500	29	29	1.7	761	14.1	0.01
6	500	30	29	1.7	798	14.1	0.01
7	500	29	29	1.7	848	14.1	0.01
8	500	30	29	2	903	13.9	0.01
9	500	30	29	2.2	914	13.7	0.01

Tebal reaktor 12 mm  
Tegangan listrik 100 volt

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	1000	30	29	1.3	9	14.4	0.01
1	1000	30	29	1.9	585	14	0.01
2	1000	29	29	2.7	630	13.4	0.01
3	1000	30	29	3.3	639	12.9	0.01
4	1000	30	29	4	658	12.4	0.01
5	1000	30	29	4.9	670	11.8	0.01
6	1000	30	29	5.5	674	11.3	0.01
7	1000	30	29	6.2	682	10.8	0.01
8	1000	30	29	7	692	10.2	0.01
9	1000	30	29	7.5	699	9.9	0.01

Tebal reaktor 12 mm  
Tegangan listrik 100 volt

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	1500	31	29	4.9	10	11.8	0.01
1	1500	30	29	6.2	444	10.8	0.01
2	1500	30	29	6.7	456	10.4	0.01
3	1500	30	29	7.2	462	10.1	0.01
4	1500	30	29	7.6	467	9.8	0.01
5	1500	30	29	8	463	9.5	0.01
6	1500	30	29	8.3	467	9.3	0.01

Tebal reaktor 12 mm  
Tegangan listrik 100 volt

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	2000	31	29	3.8	7	12.6	0.01
1	2000	31	29	4.7	338	11.9	0.01
2	2000	31	29	5.3	345	11.5	0.01
3	2000	30	29	6	349	11	0.01
4	2000	30	29	6.5	349	10.6	0.01

Tebal reaktor 12 mm  
Tegangan listrik 100 volt

Waktu	Laju alir gas (cc/min)	Suhu produk		Komposisi			
		Ts	Ta	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)
0	2500	31	29	4.2	8	12.3	0.01
1	2500	31	29	4.9	278	11.8	0.01
2	2500	31	29	5.5	282	11.3	0.01
3	2500	30	29	6.1	282	10.9	0.01
4	2500	30	29	6.6	281	10.5	0.01