



UNIVERSITAS INDONESIA

**UJI KINERJA GASIFIKASI PLASMA NON-TERMAL UNTUK
PENGOLAHAN LIMBAH PADAT ORGANIK
DALAM KEADAAN VAKUM DAN MENGGUNAKAN GAS
*SUPPORT CO₂***

SKRIPSI

ANDY RIVAI

0405060121

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**UJI KINERJA GASIFIKASI PLASMA NON-TERMAL UNTUK
PENGOLAHAN LIMBAH PADAT ORGANIK
DALAM KEADAAN VAKUM DAN MENGGUNAKAN GAS
*SUPPORT CO₂***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

ANDY RIVAI

0405060121

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Andy Rivai

NPM : 0405060121

Tanda Tangan : 

Tanggal : 7 Juli 2009



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Andy Rivai
NPM : 0405060121
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Uji Kinerja Gasifikasi Plasma Non-Termal Untuk
Pengolahan Limbah Padat Organik Dalam Keadaan
Vakum dan Menggunakan Gas *Support* CO₂

Telah berhasil dipertahankan dihadapan 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 : Ir. Eva Fathul Karamah, MT

(.....)

Pembimbing : Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA

(.....)

Penguji : Ir. Amien Rahardjo, MT

(Dept. Teknik Elektro FTUI)

(.....)

Penguji : Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc. Ph.D

(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juli 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah saya panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul *Uji Kinerja Gasifikasi Plasma Non-Termal Untuk Pengolahan Limbah Padat Organik Dalam Keadaan Vakum dan Menggunakan Gas Support CO₂*. ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada :

- 1) Ir. Eva Fathul Karamah, MT dan Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- 2) Prof.Dr.Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku Pembimbing Akademik dan Ketua Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia;
- 3) Orang tua dan keluarga yang telah memberikan banyak bantuan dukungan materil dan moril;
- 4) Teman-teman satu penelitian, Rosita, Desta, dan Masta yang telah memberikan kerja sama yang sangat baik;
- 5) Teman-teman Lab. Separasi Adi, Oji, Letti, Haikal, dan Andri yang selalu membuat canda tawa ditengah kesibukan;
- 6) Karyawan DTK, Mang Ijal. Kang Jajat, Mas Opik, dan Mas Heri yang telah banyak membantu dan bersedia kami repotkan;
- 7) Teman-teman GP 2005 atas pertemanan yang begitu berkesan.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, 7 Juli 2009

Andy Rivai

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

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

Nama : Andy Rivai
NPM : 0405060121
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

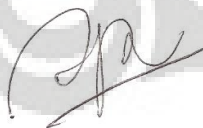
demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Uji Kinerja Gasifikasi Plasma Non-Termal Untuk Pengolahan Limbah Padat Organik Dalam Keadaan Vakum dan Menggunakan Gas *Support* CO₂

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 7 Juli 2009
Yang menyatakan



Andy Rivai

ABSTRAK

Nama : Andy Rivai
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Uji Kinerja Gasifikasi Plasma Non-Termal Untuk Pengolahan Limbah Padat Organik Dalam Keadaan Vakum dan Menggunakan Gas *Support* CO₂

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja plasma non-thermal dalam mengolah limbah padat. Pengujian uji kinerja tersebut dilakukan dengan melakukan gasifikasi limbah padat secara *batch* dalam reaktor berbahan gelas borosilikat dengan pembangkit plasma sederhana berbasis CFL, baik dalam kondisi reaktor vakum dan terisi gas *support* CO₂. Variasi parameter uji kinerja meliputi nilai kapasitansi pada CFL, jumlah elektroda, bahan elektroda dan jenis limbah.

Kinerja reaktor plasma non-thermal yang paling optimal adalah sebagai berikut: kondisi reaktor dengan gas CO₂, nilai kapasitansi sebesar 1000 nF, dan menggunakan elektroda wolfram sebanyak 4 buah. Dalam keadaan terisi gas CO₂, kinerja reaktor untuk mereduksi massa organik lebih baik dibandingkan dengan kondisi reaktor vakum, yaitu 17,15% untuk plasmatron 23W dan 28,58% untuk plasmatron 65W.

Kata kunci : plasma non- termal, gasifikasi, limbah padat.

ABSTRACT

Name : Andy Rivai
Major : Chemical Engineering
Title : Performance Test of Non-Thermal Plasma Gasification for Organic Solid Waste Treatment in Vacuum State and Using Support Gas CO₂

The aim of present experiment is to know the non-thermal plasma performance to process solid waste. It test conducted by gasifies solid waste in borosilicate glass reactor with simple plasma generator based on CFL semi-continously, both in vacuum state and filled support gas CO₂. The variation of performance parameter test include CFL capacitance value, number of electrode, electrode materials, and kind of waste.

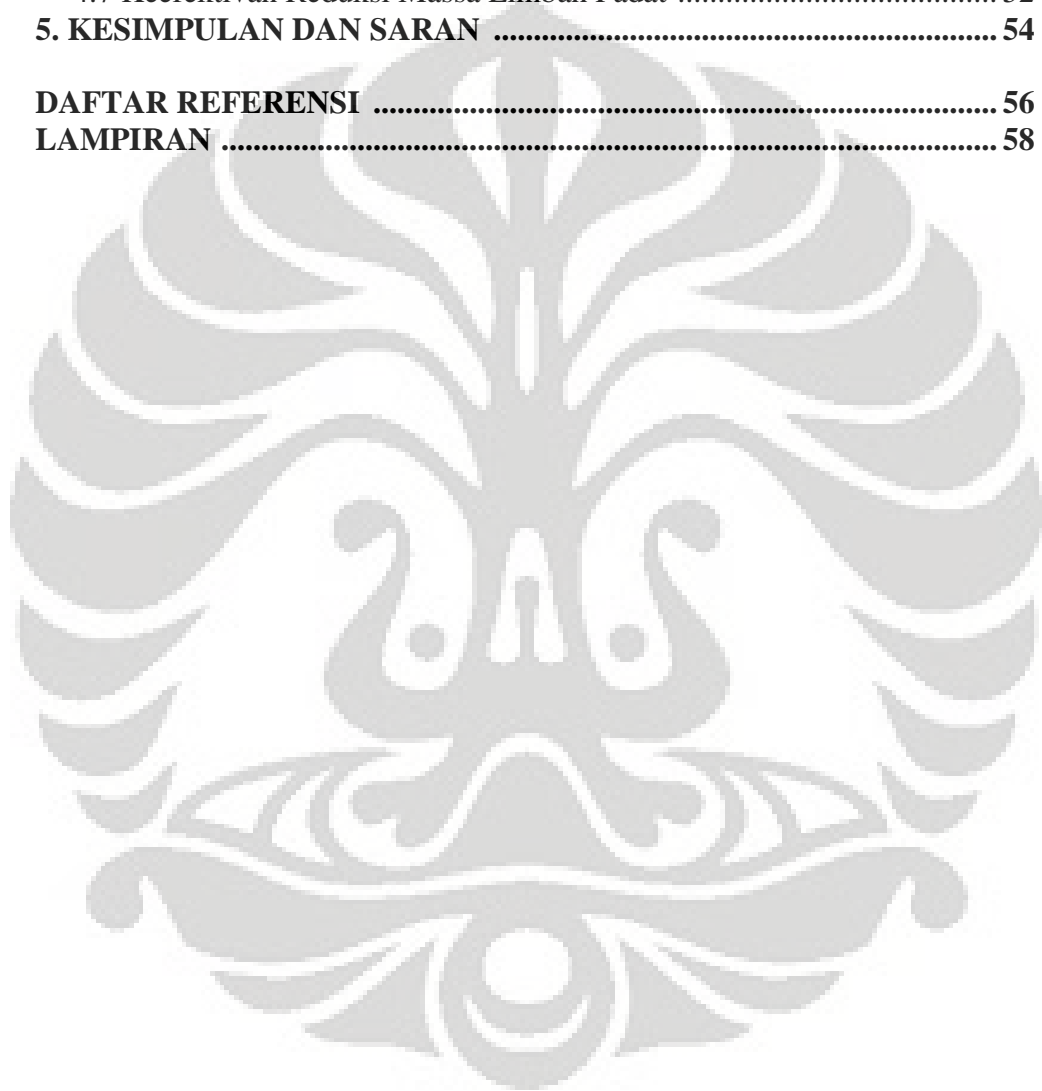
The most optimum condition are using support gas CO₂, capacitance value 1000nF, and using 4 wolfram electrode. In state of filled CO₂ gas, reactor performance to reduce organic mass better compared to vacuum reactor condition, that is 17,15% for 23W plasmatron and 28,58% for 65W plasmatron.

Keywords : non-thermal plasma, gasification, solid waste.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	4
1.5 Sistematika Penulisan	4
2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Proses Pengolahan Sampah	5
2.1.1 Proses Biologis	5
2.1.2 Proses Termal	6
2.2 Gasifikasi Plasma	8
2.2.1 Perbedaan Gasifikasi Plasma dan Gasifikasi Standar	10
2.3 Plasma Secara Umum	11
2.3.1 Sifat-sifat Plasma	11
2.3.1.1 Derajat Ionisasi	13
2.3.1.2 Temperatur	14
2.3.2 Contoh Plasma Industri atau Komersial	16
2.3.3 Contoh Aplikasi Plasma Non-Termal	17
3. METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1 Diagram Alir Penelitian	19
3.2 Rancangan Penelitian	20
3.2.1 Rancang Bangun Alat	20
3.2.2 Uji <i>Start-Up</i> Alat	20
3.2.3 Preparasi Sampel	21
3.2.4 Uji Kinerja Gasifikasi Plasma Non-Termal	21
3.2.5 Pengambilan Sampel Gas	22
3.2.6 Analisa Sampel Gas serta Pengolahan Data	23
3.3 Prosedur Penelitian	23
3.3.1 Prosedur Pembuatan Plasmatron Sederhana Berbasis <i>CFL</i>	23
3.3.1.1 Preparasi Sirkuit Elektronik <i>CFL</i>	24
3.3.1.2 Prosedur Pengujian dan Preparasi <i>Flyback</i>	24
3.3.1.3 Prosedur Merakit Plasmatron Sederhana	26
3.3.2 Prosedur Uji Kinerja Alat	27
3.3.3 Prosedur Pemakaian <i>Gas Chromatography</i>	29
3.4 Data yang Diambil	32

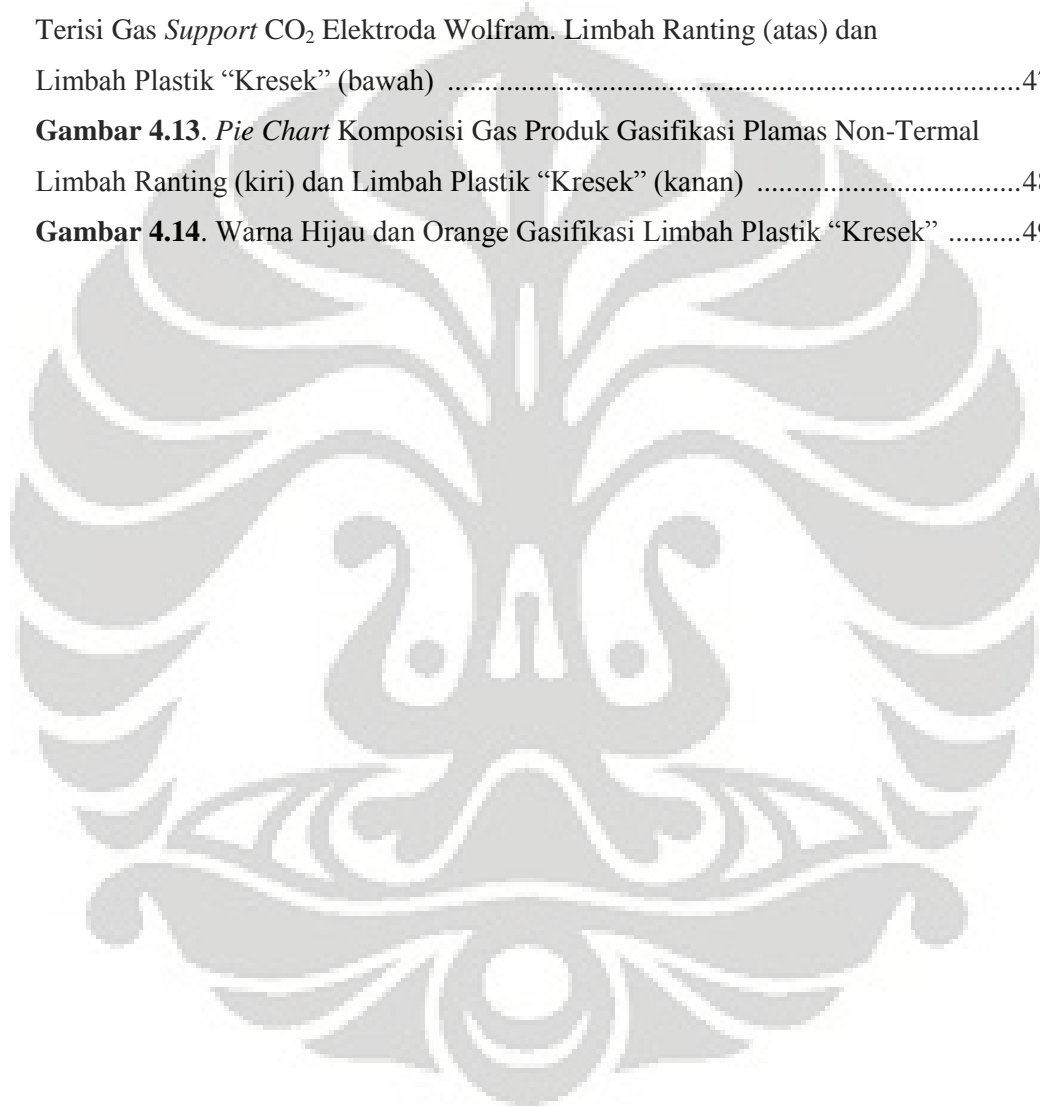
3.5 Analisa Sampel Gas Produk	32
3.6 Pengolahan Data	32
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1 Menentukan Jarak Optimum Elektroda- <i>Ground</i>	34
4.2 Pengaruh Nilai Kapasitansi Kapasitor dan Jumlah Elektroda	35
4.3 Pengaruh Bahan Elektroda	41
4.4 Pengaruh Jenis Limbah	44
4.5 Identifikasi Gas Produk Hasil Gasifikasi	47
4.6 Kebutuhan Energi Listrik	49
4.7 Keefektivan Reduksi Massa Limbah Padat	52
5. KESIMPULAN DAN SARAN	54
DAFTAR REFERENSI	56
LAMPIRAN	58



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Sebuah Konsep <i>Landfill</i> Modern yang Di Dalamnya Terdapat Sistem Pengolahan Produk Buangan yang Baik	6
Gambar 2.2. Skema Sederhana Raktor Gasifikasi Plasma	9
Gambar 2.3. Ilustrasi Mekanisme Kerja Obor Plasma	10
Gambar 2.4. Petir Merupakan Salah Satu Fenomena Plasma Bumi (Plasma Terrestrial)	12
Gambar 2.5. Tingkatan Plasma Berdasarkan Densitas Elektron dan Temperatur	14
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian Gasifikasi Plasma Non-Termal	19
Gambar 3.2. Skema Sistem Peralatan Gasifikasi Plasma Non-Termal	20
Gambar 3.3. Skema Sistem Peralatan Gasifikasi Plasma Non-Termal	24
Gambar 3.4. Skema Untuk Menemukan Kaki Primer <i>Flyback</i>	25
Gambar 3.5. Skema Untuk Menemukan Kaki Sekunder <i>Flyback</i>	25
Gambar 3.6 Rangkaian Pembangkit Plasma Non-Termal Sederhana Berbasis CFL	26
Gambar 4.1. Diagram Batang Nilai Kapasitansi Kapasitor Vs Gas CO untuk Plasmatron 23 watt, Vakum	36
Gambar 4.2. Diagram Batang Nilai Kapasitansi Kapasitor Vs Gas CO untuk Plasmatron 65 watt, Vakum	36
Gambar 4.3. Diagram Batang Kekuatan Plasmatron Vs Gas CO, Reaktor Diisi Gas <i>Support</i> CO ₂	38
Gambar 4.4. Plasma Keadaan Reaktor Terisi Gas <i>Support</i> CO ₂ (atas), Plasma Keadaan Reaktor Vakum (bawah)	39
Gambar 4.5. Diagram Batang Perbandingan Antara Elektroda Wolfram dan Stainless Steel Kondisi Reaktor Vakum, Limbah Ranting	42
Gambar 4.6. Diagram Batang Perbandingan Antara Elektroda Wolfram dan Stainless Steel Kondisi Reaktor Diisi Dengan Gas <i>Support</i> CO ₂ , Limbah Ranting ...	42
Gambar 4.7. Diagram Batang Perbandingan Antara Elektroda Wolfram dan Stainless Steel Kondisi Reaktor Diisi Dengan Gas <i>Support</i> CO ₂ , Limbah Plastik	43
Gambar 4.8. Diagram Batang Perbandingan Antara Jenis Limbah dengan Jenis Bahan Elektroda Plasmatron 23 Watt Kondisi Reaktor Vakum	45

Gambar 4.9. Diagram Batang Perbandingan Antara Jenis Limbah dengan Jenis Bahan Elektroda Plasmatron 65 Watt Kondisi Reaktor Vakum	45
Gambar 4.10. Diagram Batang Perbandingan Antara Jenis Limbah dengan Jenis Bahan Elektroda Plasmatron 23 Watt Kondisi Reaktor Terisi Gas <i>Support</i> CO ₂	46
Gambar 4.11. Diagram Batang Perbandingan Antara Jenis Limbah dengan Jenis Bahan Elektroda Plasmatron 65 Watt Kondisi Reaktor Terisi Gas <i>Support</i> CO ₂	46
Gambar 4.12. Kromatogram GC Gasifikasi Plasma Non-Termal Keadaan Reaktor Terisi Gas <i>Support</i> CO ₂ Elektroda Wolfram. Limbah Ranting (atas) dan Limbah Plastik “Kresek” (bawah)	47
Gambar 4.13. <i>Pie Chart</i> Komposisi Gas Produk Gasifikasi Plamas Non-Termal Limbah Ranting (kiri) dan Limbah Plastik “Kresek” (kanan)	48
Gambar 4.14. Warna Hijau dan Orange Gasifikasi Limbah Plastik “Kresek”	49



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Bentuk Umum Plasma	12
Tabel 2.2. Tingkatan Parameter Plasma	13
Tabel 2.3. Klasifikasi Plasma	15
Tabel 4.1. Klasifikasi Plasma	41
Tabel 4.2. Tegangan Plasma Untuk Logam Wolfram dan Stainless Steel	44



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Sampah, khususnya sampah padat baik biomassa dan plastik di kawasan perkotaan (*municipal solid waste*) banyak menimbulkan masalah gejolak sosial dan lingkungan, khususnya di DKI Jakarta dan di kota-kota besar lainnya. Penanganan sampah perkotaan di berbagai Tempat Pembuangan Akhir (TPA) sampah tidak dilaksanakan secara konsisten seperti yang direncanakan.

Menurunnya kualitas lingkungan yang disebabkan oleh sampah harus ditangani secara serius. Ibarat sebuah bom waktu, masalah sampah dapat menjadi bencana besar bagi manusia, karena dapat meledak kapan saja. Pada tanggal 8 September 2006, telah terjadi tragedi yang menelan korban jiwa di TPA Bantar Gebang milik Pemerintah Daerah DKI Jakarta. Keadaan ini semata-mata bukanlah sekedar persoalan kelemahan teknologi, melainkan sistem pengelolaan persampahan yang tidak terpadu. Di sisi lain, volum buangan limbah domestik meningkat sejalan dengan peningkatan jumlah penduduk dan peningkatan intensitas kegiatannya sehari-hari. Namun, hingga kini belum ada perbaikan yang berarti dalam penanganan masalah sanitasi dan pencemaran lingkungan (air, tanah, dan udara) yang timbul akibat buruknya pengelolaan limbah domestik.

Metode pengolahan sampah *sanitary landfill* (sampah ditimbun, diratakan, dan dipadatkan, kemudian ditutup tanah secara berlapis-lapis) ternyata dilaksanakan tidak lain hanyalah sekedar *open dumping* (ditimbun dan ditumpuk begitu saja). Bahkan, sebagian besar penanganan sampah di TPA berbagai daerah hanya dirancang menggunakan metode *open dumping*, termasuk di TPA Cilincing, Jakarta, yang sempat menimbulkan pencemaran air tambak oleh air lindi (*leachate*) dan di TPA Leuwigajah, Bandung, yang longsor dan menelan puluhan korban jiwa.

Teknologi termal seperti insinerasi, gasifikasi dan pirolisis yang digunakan untuk pengolahan sampah adalah cara paling efektif karena dapat mengurangi volum sampah, mereduksi tingkat racun sampah, dan menghasilkan produk bernilai guna dan dapat diolah lebih lanjut. (C-Tech Innovation Ltd, 2003)

Pengolahan sampah dengan metode insinerasi yang saat ini banyak digunakan pada faktanya bukan metode yang ramah lingkungan. Dalam proses insinerasi sampah, terdapat banyak polutan berbahaya yang dilepaskan. Dioksin (2,3,7,8-tetraklorodibenzo-*p*-dioksin), PCB (*Polychlorinated Biphenil*) dan para kongenernya (*Tetra Chloro Dibenzo Dioxins*, *Tetra Chloro Dibenzo Furans*, turunannya dan atau senyawa-senyawa lainnya yang sejenis) adalah polutan-polutan yang terkenal paling berbahaya dari hasil samping proses insinerator. Dioksin dapat menyebabkan gangguan kesehatan seperti kanker, kerusakan sistem kekebalan, reproduksi, dan permasalahan-permasalahan dalam pertumbuhan. Lebih lanjut, insinerator juga merupakan sumber utama pencemaran merkuri, timbal, kadmium, arsen, dan kromium, senyawa-senyawa hidrokarbon-halogen (organoklorida non-dioksin), gas-gas penyebab hujan asam, partikulat-partikulat yang dapat mengganggu fungsi paru-paru, dan gas-gas efek rumah kaca (CO_2 dan CH_4).

Saat ini teknologi plasma baik plasma termal dan non-termal banyak digunakan dalam banyak aplikasi industri, tak terkecuali untuk pengolahan sampah. Plasma yang digunakan untuk pengolahan sampah adalah plasma termal. Plasma termal digunakan dalam gasifikasi plasma untuk pengolahan sampah merupakan pilihan yang aman dan efisien karena dilakukan dengan cara yang ramah lingkungan. Gasifikasi plasma dapat mengolah beragam sampah termasuk limbah berbahaya. Keuntungan utama gasifikasi plasma adalah dapat mengkonversi sampah menjadi energi dan membantu mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil (Waste Processing, n.d). Selain itu gasifikasi plasma hanya menghasilkan dioksin sampai 100 kali lebih rendah dari insinerasi (Edbherto, 2004). Di sisi lain plasma non-termal belum digunakan untuk aplikasi pengolahan sampah. Dalam salah satu aplikasinya, plasma non-termal dapat digunakan untuk menghasilkan gas sintesis dari propana (Ouni, Khacef, & Cormier, 2009).

Dalam penelitian ini akan dikaji suatu alternatif pengolahan limbah padat menggunakan plasma dingin atau plasma non-termal. Teknologi yang diusulkan yaitu gasifikasi plasma non-termal sebagai metode yang efektif dan ramah lingkungan. Penelitian ini merupakan kegiatan rancang-bangun reaktor plasma

non-termal dan pembangkit plasma sederhana untuk gasifikasi limbah padat menjadi gas sintesis yang memiliki nilai manfaat. Penelitian dilakukan pada kondisi vakum dalam reaktor dari bahan gelas borosilikat dengan kapasitas 0,45 liter. Plasma dingin diperoleh dari pembangkit plasma sederhana yang merupakan sistem rangkaian elektronik *compact fluorescent lamp (CFL)* dan pembangkit tegangan tinggi jenis *flyback*. Dalam penelitian ini akan diuji pengaruh variabel nilai kapasitansi kapasitor, jumlah elektroda, bahan elektroda, dan jenis limbah untuk mengetahui keefektivan dari sistem gasifikasi yang digunakan untuk mengolah limbah padat tersebut. Selain itu, variabel yang menghasilkan produk optimal akan diuji pada kondisi reaktor terisi gas CO₂ untuk mengetahui kondisi optimal proses gasifikasi.

1.2 Rumusan Masalah :

Perumusan masalah dalam penelitian ini akan diarahkan untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut :

1. Apakah plasma non-termal dapat digunakan untuk mengolah limbah padat dan menghasilkan gas sintesis?
2. Bagaimana produktivitas gasifikasi plasma non-termal dalam menghasilkan gas sintesis?
3. Bagaimana pengaruh variasi nilai kapasitansi kapasitor, jumlah elektroda, bahan elektroda, jenis limbah, dan kondisi reaktor terhadap kinerja gasifikasi plasma non-termal dalam mengolah limbah padat biomassa dan plastik?

1.3 Tujuan Penelitian:

1. Merancang bangun prototipe reaktor yang khusus digunakan untuk pengolahan limbah padat menggunakan plasma non-termal.
2. Membuat generator/pembangkit plasma non-termal sederhana dari sirkuit elektronik *compact fluorescent lamp* dan pembangkit tegangan tinggi jenis *flyback*.
3. Menguji kinerja prototipe Gasifikasi Plasma Non-Termal untuk limbah padat biomassa dan plastik “kresek” melalui percobaan dengan variasi

nilai kapasitansi kapasitor, jumlah elektroda, bahan elektroda, dan kondisi reaktor.

1.4 Ruang lingkup Penelitian:

1. Limbah padat yang diolah adalah limbah padat ranting pohon dan plastik “kresek”
2. Plasma yang digunakan tergolong plasma dingin/plasma non-termal yang dibangkitkan dengan plasmatron sederhana menggunakan rangkaian elektronik *Compact Fluorescent Lamp* dan pembangkit tegangan tinggi jenis *flyback*.
3. Parameter kinerja proses adalah persentase reduksi massa limbah dan banyaknya gas sintesis yang dihasilkan
4. Pengujian kandungan dan komposisi produk gas dilakukan dengan metode analisa kromatografi gas
5. Daya dan arus masuk diukur menggunakan voltmeter dan amperemeter.

1.5 Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Menjelaskan latar belakang permasalahan, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi literatur-literatur yang mengandung teori-teori yang memberikan konsep-konsep dalam perumusan penyelesaian masalah yang ada.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Menjelaskan metode dan prosedur yang digunakan dalam melakukan pengambilan dan pengolahan data dalam gasifikasi plasma

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Memaparkan data hasil penelitian dan analisa terhadap data maupun fenomena-fenomena yang terjadi selama proses penelitian

BAB V KESIMPULAN

Berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil penelitian

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

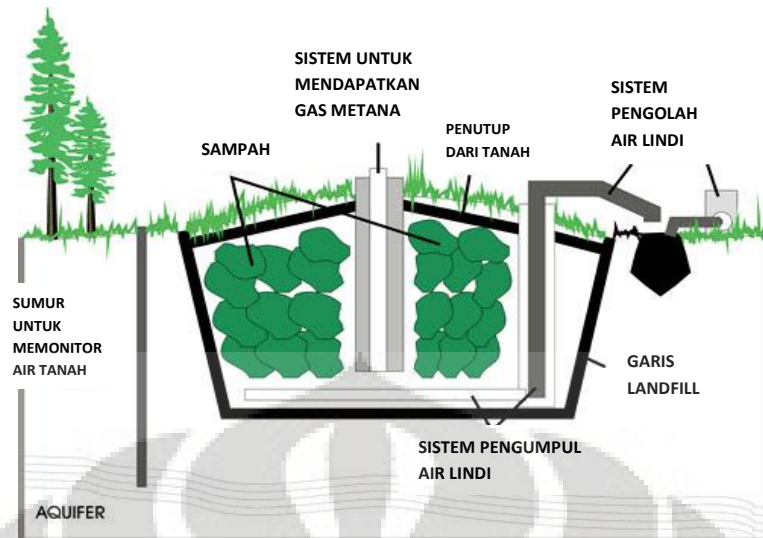
2.1 Proses Pengolahan Sampah (Hutagalung, 2007)

Pada dasarnya terdapat dua alternatif proses pengolahan sampah menjadi energi, yaitu proses biologis dan proses termal. Perbedaan mendasar di antara keduanya ialah proses biologis menghasilkan gas-bio yang kemudian dibakar untuk menghasilkan tenaga yang akan menggerakkan motor yang dihubungkan dengan generator listrik sedangkan proses termal menghasilkan panas yang dapat digunakan untuk membangkitkan *steam* yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin uap yang dihubungkan dengan generator listrik.

2.1.1 Proses Biologis

Proses konversi biologis dapat dicapai dengan cara *digestion* secara anaerobik (biogas) atau tanah urug (*landfill*). Biogas adalah teknologi konversi biomassa (sampah) menjadi gas dengan bantuan mikroba anaerob. Proses biogas menghasilkan gas yang kaya akan metana dan *slurry*. Gas metana dapat digunakan untuk berbagai sistem pembangkitan energi sedangkan *slurry* dapat digunakan sebagai kompos. Produk dari digester tersebut berupa gas metana yang dapat dibakar dengan nilai kalor sekitar 6500 kJ/Nm³.

Landfill ialah pengelolaan sampah dengan cara menimbunnya di dalam tanah. Di dalam lahan *landfill*, limbah organik akan didekomposisi oleh mikroba dalam tanah menjadi senyawa-senyawa gas dan cair. Senyawa-senyawa ini berinteraksi dengan air yang dikandung oleh limbah dan air hujan yang masuk ke dalam tanah dan membentuk bahan cair yang disebut lindi (*leachate*).



Gambar 2.1. Sebuah Konsep *Landfill* Modern yang Di Dalamnya Terdapat Sistem Pengolahan Produk Buangan yang Baik (Michael Hutagalung, 2007)

Jika *landfill* tidak didesain dengan baik, *leachate* akan mencemari tanah dan masuk ke dalam badan-badan air di dalam tanah. Karena itu, tanah di *landfill* harus mempunyai permeabilitas yang rendah. Aktifitas mikroba dalam *landfill* menghasilkan gas CH_4 dan CO_2 (pada tahap awal - proses aerobik) dan menghasilkan gas metana (pada proses anaerobiknya). Gas *landfill* tersebut mempunyai nilai kalor sekitar 450-540 Btu/scf. Sistem pengambilan gas produk biasanya terdiri dari sejumlah sumur-sumur dalam pipa-pipa yang dipasang lateral dan dihubungkan dengan pompa vakum sentral. Selain itu terdapat juga sistem pengambilan gas dengan pompa desentralisasi. Gambar 2.1 menggambarkan sebuah konsep *landfill* modern.

2.1.2 Proses Termal

Proses konversi termal dapat dicapai melalui beberapa cara, yaitu insinerasi (pembakaran langsung), pirolisis, dan gasifikasi. Insinerasi pada dasarnya ialah proses oksidasi bahan-bahan organik menjadi bahan anorganik. Prosesnya sendiri merupakan reaksi oksidasi cepat antara bahan organik dengan oksigen. Apabila berlangsung secara sempurna, kandungan bahan organik (H dan C) dalam sampah akan dikonversi menjadi gas karbondioksida (CO_2) dan uap air (H_2O). Unsur-unsur

penyusun sampah lainnya seperti belerang (S) dan nitrogen (N) akan dioksidasi menjadi oksida-oksida dalam fasa gas (SO_x, NO_x) yang terbawa di gas produk.

Metode pembakaran langsung limbah biomassa diterapkan pada pabrik gula menggunakan ampas tebu yang merupakan limbah hasil proses produksi gula. Listrik yang dihasilkan digunakan untuk memproduksi gula itu sendiri sehingga sistem ini merupakan siklus yang memanfaatkan limbah biomassa menjadi energi listrik.

Pembakaran langsung biomassa kedalam ruang bakar kadang di pandang tidak efisien. Hal ini disebabkan ukuran atau volum biomassa. Sebagai langkah untuk mengefisienkan proses pembakaran langsung maka proses densifikasi atau biasa dikenal briket perlu dilakukan. Manfaat yang diperoleh adalah meningkatkan energi per unit volum disamping menyeragamkan ukuran biomassa yang akan masuk dalam ruang bakar. Ukuran yang lebih padat dengan peningkatan densitas menjadikan briket lebih efisien sehingga meningkatkan nilai kalor per unit volum. Proses pembriketan sering terjadi pada limbah biomassa seperti jerami, bekas gergajian, atau berbagai cangkang biomassa seperti cangkang kopi, coklat maupun kemiri serta jagung, ketela dan limbah jarak pagar yang sangat menarik untuk dikaji ("Thermochemical", n.d).

Selanjutnya, pirolisis merupakan proses konversi bahan organik padat melalui pemanasan tanpa kehadiran oksigen. Dengan adanya proses pemanasan dengan temperatur tinggi, molekul-molekul organik yang berukuran besar akan terurai menjadi molekul organik yang kecil dan lebih sederhana. Hasil pirolisis dapat berupa tar, larutan asam asetat, metanol, padatan char, dan produk gas. Dengan menggunakan peralatan modern proses pirolis telah mencapai tahap yang sangat menggembirakan yaitu apa yang di kenal dengan pirolisis cepat atau *fast pyrolysis* yaitu suatu proses pirolisis dengan meningkatkan kecepatan kenaikan suhu. Dengan cara ini dapat dihasilkan produk minyak pirolisis yang hingga 75% lebih tinggi dibandingkan dengan pirolisis konvensional. Proses pirolisis cepat telah diadopsi oleh Teknologi Biomassa Eropa yang telah memproduksi

50 ton minyak pirolisis (setara 314 barel minyak) dengan material kayu sebanyak 250 ton/hari (“Thermochemical”, n.d).

Gasifikasi merupakan proses konversi termokimia padatan organik menjadi gas. Gasifikasi melibatkan proses perengkahan dan pembakaran tidak sempurna pada temperatur yang relatif tinggi (sekitar 900-1100 °C). Seperti halnya pirolisis, proses gasifikasi menghasilkan gas yang dapat dibakar dengan nilai kalor sekitar 4000 kJ/Nm³. Keuntungan dari proses gasifikasi ini adalah sangat efisien bila dibandingkan dengan pembakaran langsung. Gas sintetik memiliki dua keuntungan yaitu bisa dibakar langsung menggunakan mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*) ataupun diekstrak menjadi metanol dan hidrogen (“Thermochemical”, n.d).

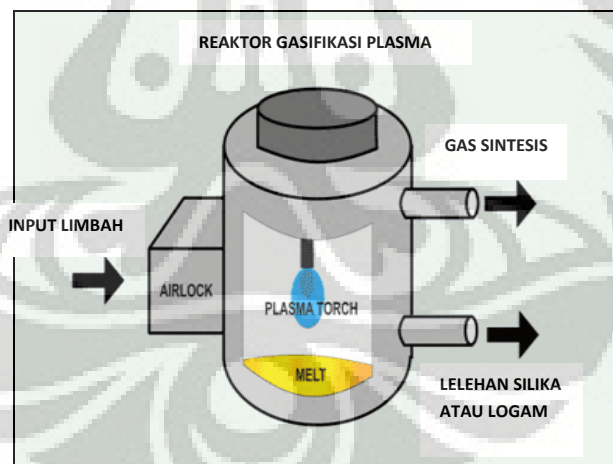
2.2 Gasifikasi Plasma (“Technical Discussion”, n.d)

Teknologi yang belakangan ini berkembang untuk pengolahan limbah adalah teknologi plasma. Teknologi plasma telah diidentifikasi sebagai teknologi yang mampu mengolah beragam limbah padat kota dan menghasilkan produk yang bernilai guna.

Proses pembakaran memerlukan banyak oksigen. Karbon yang terkandung dalam bahan organik bereaksi dengan oksigen membentuk karbondioksida dan air. Pembakaran bersifat eksotermik dan melepaskan energi dalam bentuk panas. Pembakaran materi berbahan dasar karbon yang tidak sempurna akan meninggalkan abu dan arang yang berisi logam berat dan zat beracun dan perlu dikirim ke *landfill* khusus. Materi berbahan dasar bukan karbon seperti logam, gelas/kaca, tanah, beton, silika, dan lain-lain, tidak terpengaruh oleh proses pembakaran dan menjadi bagian dari abu. Total materi tidak terbakar kira-kira sama dengan 30% berat. Insinerasi menghasilkan tar, furans, NO_x, dioksin dan sulfurdioksida dalam konsentrasi tinggi dan butuh biaya banyak untuk dibersihkan.

Gasifikasi plasma bukanlah insinerasi dan tidak membakar sampah. Gasifikasi plasma merupakan transformasi materi berbahan dasar karbon dalam lingkungan kekurangan oksigen menggunakan suatu sumber panas

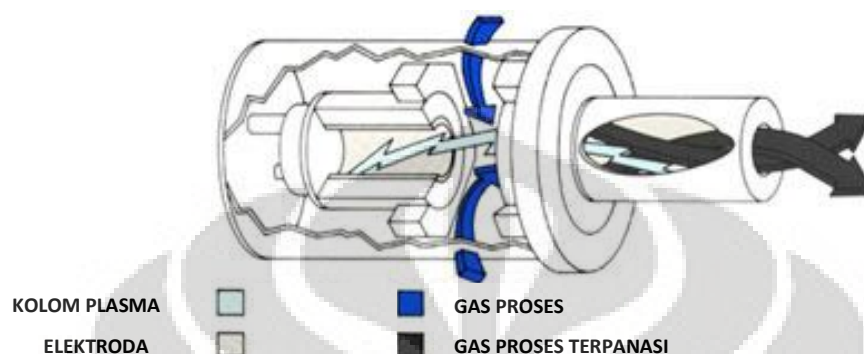
tinggi eksternal (plasma) untuk menghasilkan bahan bakar gas (yang disebut gas sintesis) yang dapat digunakan untuk aplikasi lain. Walaupun temperatur gasifikasi plasma jauh lebih tinggi dibandingkan dengan insinerasi, materi organik tidak terbakar karena tidak ada cukup oksigen. Proses yang terjadi mengontrol jumlah oksigen dan hanya memungkinkan cukup oksigen untuk membentuk karbon monoksida. Materi organik ditransformasikan menjadi bahan bakar gas terdiri atas karbonmonoksida (CO) dan hidrogen (H₂) dalam reaksi kimia yang dikenal sebagai pirolisis. Hanya sedikit energi dilepaskan ketika molekul karbon dan oksigen bersatu. Temperatur tinggi dari Gasifikasi Plasma melelehkan logam, gelas/kaca, silika, tanah, dan lain-lain, yang mengalir keluar melalui bagian bawah reaktor. Logam didaur ulang dan bahan anorganik berubah menjadi lelehan gelas/kaca. Oleh karena panas tinggi dan kekurangan oksigen tidak dihasilkan tar, dioksin atau furans dan NO_x serta SO_x sangat rendah. Hasilnya hanya satu 1% sampah tidak terkonversi menjadi produk yang tidak dapat dijual. Gambar 2.2. menunjukkan skematik sederhana dari reaktor gasifikasi plasma.



Gambar 2.2 Skema Sederhana Raktor Gasifikasi Plasma
(<http://www.safewasteandpower.com/process.html>)

Mekanisme kerja dari obor plasma (*plasma torch*) adalah energi listrik diumpankan ke obor yang mempunyai dua elektroda dan menciptakan bunga api. Gas inert dilewatkan melalui obor, gas terpanasi sampai temperatur internal 13.871 °C. Gambar 2.3 mengilustrasikan bagaimana obor plasma bekerja.

Obor plasma beroperasi pada suhu sangat tinggi (antara 5000 s.d 100.000 °C) dan dapat memproses semua jenis sampah seperti : sampah padat, racun, limbah medis, *biohazard*, limbah industri dan nuklir pada temperatur ambient. (Leal-Quiros, 2004)



Gambar 2.3 Ilustrasi Mekanisme Kerja Obor Plasma
(http://www.recoveredenergy.com/d_plasma.html)

2.2.1 Perbedaan Gasifikasi Plasma dan Gasifikasi Standar (“Frequently asked questions”, n.d)

Teknologi gasifikasi standar beroperasi dalam reaktor pada suhu antara 370-815 °C. Teknologi ini tidak menggunakan sumber panas eksternal apapun dan mengandalkan prosesnya sendiri untuk kelangsungan reaksi. Proses gasifikasi menghasilkan bahan bakar gas yang serupa dengan gas yang diproduksi oleh proses plasma, walaupun jauh lebih kotor dan mengandung arang serta tar. Temperatur yang lebih rendah tidak bisa memecahkan seluruh materi. Perbedaan lain yang signifikan adalah bahwa banyak bahan yang harus disortir dari aliran umpan sampah sebelum masuk reaktor . Gas yang dihasilkan mengandung tar yang sulit untuk dihilangkan dan zat-pencemar lain yang harus dibersihkan lebih lanjut. Residu arang yang tertinggal mencapai 15% dari berat umpan dan harus tetap di buang ke landfill. Selain kelemahan ini sebagian besar sistem gasifikasi tidak bisa diumpakan sampah padat secara langsung dari truk. Sampah harus dikeringkan sampai level kelembapan yang dapat diterima dan diproses dalam ukuran seragam serta kontinu dan akhirnya menambah biaya serta kompleksitas.

2.3 Plasma Secara Umum (“Plasma (physics)”,n.d)

Di dalam ilmu fisika dan ilmu kimia, plasma adalah gas yang terionisasi secara parsial, dimana proporsi tertentu dari elektron berada dalam keadaan bebas daripada berikatan dengan atom atau molekul. Plasma juga dapat dikatakan sebagai atom yang kehilangan elektron karena beberapa atau semua elektron di orbit atom terluar telah terpisah dari atom atau molekul. Hasilnya adalah sebuah koleksi ion dan elektron yang tidak lagi terikat satu sama lain. Kemampuan muatan positif dan muatan negatif untuk sedikit berpindah dengan bebas membuat plasma bersifat induktif secara listrik sehingga memberikan respon yang kuat pada bidang elektromagnetik. Oleh karena itu plasma mempunyai sifat tidak sama dengan padatan, cairan atau gas dan dianggap sebagai satu keadaan materi yang berbeda. Plasma berbentuk gas netral seperti awan, sebagai contoh, dalam kasus bintang. Seperti gas, plasma tidak mempunyai bentuk dan volum terbatas kecuali dalam kotak tertutup, tetapi tidak sama dengan gas, dalam pengaruh medan magnet, plasma mungkin membentuk struktur seperti kawat pijar, sinar dan lapisan ganda. Bentuk plasma secara umum dapat dilihat pada Tabel 2.1.

2.3.1 Sifat-sifat Plasma

Parameter plasma berlaku pada nilai yang bervariasi oleh banyak kelas suatu besaran, tetapi sifat plasma dengan parameter berlainan mungkin saja sangat serupa (lihat Gambar 2.5). Tabel 2.1 memaparkan parameter dari plasma terestrial/plasma bumi dan plasma kosmik. Disebabkan cakupan parameternya yang luas, plasma memiliki bentuk yang beragam baik di bumi maupun di ruang angkasa. Tabel 2.2. memberikan contoh bentuk plasma paling umum yang ada di bumi dan ruang angkasa umumnya. Petir merupakan bentuk umum plasma bumi yang sering terjadi dan paling mudah diamati.

Tabel 2.1. Bentuk Umum Plasma ([http://www.wikipedia.org/wiki/Plasma_\(physics\).html](http://www.wikipedia.org/wiki/Plasma_(physics).html))

Tingkatan Parameter Plasma		
Karakter	Plasma terrestrial	Plasma kosmik
Ukuran (meter)	10^6 m (plasma lab) s.d 10^2 m (petir)	10^6 m s.d (pelindung pesawat ruang angkasa) 10^{25} m (intergalactic nebula)
Umur (detik)	10^{-12} (plasma yang dihasilkan oleh laser) s.d 10^7 (cahaya fluoresensi)	10^1 (api matahari) s.d 10^{17} (plasma intergalaksi)
Densitas (partikel per meter kubik)	10^7 m ⁻³ s.d 10^{32} m ⁻³ (inertial confinement plasma)	10^0 m ⁻³ (medium intergalaksi) s.d 10^{30} m ⁻³ (inti bintang)
Temperatur (K)	~ 0 K (crystalline non-neutral plasma) s.d 10^8 K (plasma fusi magnetik)	10^2 K (aurora) s.d 10^7 K (inti matahari)
Medan magnetic (tesla)	10^{-4} T (plasma lab) s.d 10^3 T (pulsed-power plasma)	10^{-12} T (medium intergalaksi) s.d 10^{11} T (dekat neutron stars)

**Gambar 2.4.** Petir Merupakan Salah Satu Fenomena Plasma Bumi (Plasma Terrestrial) ([http://www.wikipedia.org/wiki/Plasma_\(physics\).html](http://www.wikipedia.org/wiki/Plasma_(physics).html))

Tabel 2.2. Tingkatan Parameter Plasma
([http://www.wikipedia.org/wiki/Plasma_\(physics\).html](http://www.wikipedia.org/wiki/Plasma_(physics).html))

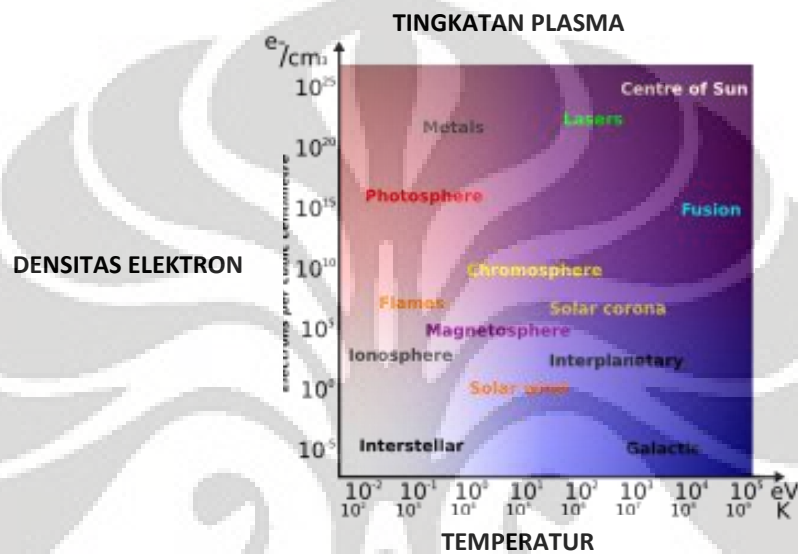
Bentuk Umum Plasma		
<p>Plasma Buatan</p> <ul style="list-style-type: none"> • TV plasma • Lampu fluoresensi kompak • Tempat pembuangan gas roket • Area pelindung panas pesawat ruang angkasa ketika mengorbit ke bumi • Ozonator • Bunga api listrik pada obor las • Bola plasma • Bunga api yang dihasilkan oleh <i>Tesla coil</i> • Plasma yang digunakan pada fabrikasi semikonduktor 	<p>Plasma Terrestrial</p> <ul style="list-style-type: none"> • Petir • Fenomena St. Elmo's fire • Lapisan ionosfer • Aurora 	<p>Plasma Ruang Angkasa dan Astrofisika</p> <ul style="list-style-type: none"> • Matahari dan bintang • Angin matahari • Area antar planet • Area antar sistem galaksi • Area antar bintang dalam satu kelompok

Pada bagian selanjutnya akan dijelaskan dua dari empat sifat plasma yaitu derajat ionisasi dan temperatur. Dua sifat lainnya yaitu potensial dan magnetisasi tidak dijelaskan lebih lanjut.

2.3.1.1 Derajat Ionisasi

Untuk terjadinya plasma, ionisasi sangat diperlukan. Istilah "kepadatan plasma" biasanya mengacu pada "kerapatan elektron", yaitu jumlah elektron bebas per unit volum. Derajat ionisasi plasma adalah jumlah dari atom yang telah kehilangan (atau mendapatkan) elektron, dan dikontrol sebagian besar oleh temperatur. Bahkan gas yang terionisasi secara parsial dimana sekitar 1% partikel gas mengalami ionisasi dapat mempunyai karakteristik plasma (misalnya memberikan reaksi terhadap

medan magnet dan sangat konduktif secara listrik). Derajat ionisasi, α didefinisikan sebagai $\alpha = n_i/(n_i + n_a)$ dimana n_i adalah jumlah kerapatan ion dan n_a adalah jumlah kerapatan atom netral. Kerapatan elektron berhubungan dengan derajat ionisasi oleh keadaan muatan rata-rata $\langle Z \rangle$ dari ion melalui $n_e = \langle Z \rangle \cdot n_i$ dimana n_e adalah jumlah kerapatan elektron. Gambar 2.5 menggambarkan tingkatan plasma berdasarkan densitas elektron dan temperaturnya.



Gambar 2.5. Tingkatan Plasma Berdasarkan Densitas Elektron dan Temperatur
([http://www.wikipedia.org/wiki/Plasma_\(physics\).html](http://www.wikipedia.org/wiki/Plasma_(physics).html))

2.3.1.2. Temperatur

Temperatur plasma pada umumnya diukur dalam kelvin atau elektronvolt, dan merupakan ukuran tidak resmi energi kinetik termal setiap partikel. Dalam banyak kasus, elektron cukup dekat pada keseimbangan termal dimana temperaturnya secara relatif dirumuskan dengan baik, bahkan ketika ada penyimpangan signifikan dari energi fungsi distribusi Maxwellian, sebagai contoh disebabkan oleh radiasi UV, partikel berenergi, atau bidang listrik yang kuat. Oleh karena perbedaan massa yang besar, elektron sampai pada keseimbangan termodinamika di antara elektron-elektron sendiri lebih cepat daripada elektron sampai pada keseimbangan dengan ion atau atom netral. Karena alasan ini "temperatur

ion" mungkin saja sangat berbeda dari (biasanya lebih rendah dari) "temperatur elektron". Hal ini sangat umum dalam teknologi plasma terionisasi dengan rendah, dimana ion seringkali dekat dengan suhu lingkungan.

Berdasarkan temperatur relatif dari elektron, ion dan *neutrals*, plasma digolongkan sebagai "termal" atau "bukan-termal". Plasma termal mempunyai elektron dan partikel berat di temperatur yang sama, yakni mereka ada dalam keseimbangan termal satu sama lain. Sedangkan plasma bukan-termal mempunyai ion serta *neutrals* di temperatur yang jauh lebih rendah (secara normal temperatur ruang) dimana elektron mempunyai temperatur "lebih panas". Lebih jelasnya sebagai berikut :

1. Plasmatermal : $T_{\text{elektron}} \sim T_{\text{gas}}$

Suhu elektron dan gas berada dalam keadaan kesetimbangan (*quasi-equilibrium*) akibat pemanasan Joule (*Joule heating*)

Contoh : plasma matahari

2. Plasma non-termal : $T_{\text{elektron}} > T_{\text{gas}}$

$T_{\text{elektron}} \sim 1 \text{ eV } (\sim 10000 \text{ K}); T_{\text{gas}} \sim \text{suhu ruang}$

Contoh : Aurora borealis

Tabel 2.3 memaparkan lebih detil keadaan plasma temperatur tinggi, plasma temperatur rendah, dan plasma non-termal.

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

Plasma	Keadaan	Contoh
Plasma Temperatur Tinggi (Equilibrium Plasma)	$T_e = T_i = T_n, T_p = 10^6 - 10^8 \text{ K}$ $n_e \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}$	<i>Laser fusion plasma</i>
Plasma Termal (Quasi-Equilibrium Plasma)	$T_e \approx T_i \approx T_n, T_p = 2 \times 10^3 - 3 \times 10^4 \text{ K}$ $n_e \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}$	<i>Arc plasma; atmospheric RF discharge</i>
Plasma Non-Termal (Non-Equilibrium Plasma)	$T_e \geq T_n, T_p \approx 3 \times 10^2 - 4,5 \times 10^2 \text{ K}$ $n_e \approx 10^{10} \text{ m}^{-3}$	<i>Corona Discharge</i>

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

Derajat ionisasi plasma dikendalikan oleh temperatur. Sebuah plasma kadang-kadang disebut dengan "panas" jika hampir sepenuhnya

terionisasi, atau "dingin" jika hanya fraksi kecil (sebagai contoh 1%) molekul gas yang terionisasi. Bahkan di dalam plasma dingin temperatur elektron bisa mencapai beberapa ribu derajat celsius.

2.3.2 Contoh Plasma Industri atau Komersial

Aplikasi plasma dalam dunia industri begitu luas dan beragam. Berikut ini akan dipaparkan aplikasinya berdasarkan jenis plasma.

Low Pressure Discharges :

- Plasma yang dihasilkan dari proses lompatan berpijar (*Glow Discharge Plasmas*): plasma bukan-termal yang dibangkitkan oleh aplikasi dari DC atau medan listrik frekuensi rendah RF (<100 kHz) ke celah antara dua elektroda logam. Mungkin plasma paling umum; ini adalah jenis plasma yang dibangkitkan di dalam cahaya tabung neon.
- Plasma yang dihasilkan dari proses kapasitif (*Capacitively Coupled Plasma*): serupa dengan plasma pelepasan pijar, tetapi dibangkitkan dengan medan listrik frekuensi tinggi RF sekitar 13.56 MHz. Plasma jenis ini digunakan secara luas dalam mikro-fabrikasi dan industri rangkaian terintegrasi untuk penggoresan plasma serta deposisi lebih lanjut uap kimia dengan plasma.
- Plasma yang dihasilkan dari proses induktif (*Inductively Coupled Plasma*): serupa dengan CCP dan serupa dalam aplikasi tetapi elektroda terdiri dari satu kumparan terbungkus di sekitar volume pelepasan muatan yang secara induktif membangkitkan plasma.
- Plasma yang dihasilkan dari proses termal (*Wave Heated Plasma*): serupa dengan CCP dan ICP dalam hal tipikal RF (atau gelombang mikro), tetapi dipanaskan baik dengan cara elektrostatik dan elektromagnetik. Contohnya adalah pelepasan *helicon*, resonansi elektron siklotron (*Electron Cyclotron Resonance*), dan resonansi ion siklotron (*Ion Cyclotron Resonance*). Hal ini secara khusus memerlukan suatu medan magnet koaksial untuk propagasi gelombang.

Atmospheric Pressure :

- Lompatan bunga api (*Arc Discharge*): plasma ini merupakan pelepasan termal dari temperatur sangat tinggi ~ 10.000 K (9.727 °C). Plasma ini dapat dibangkitkan menggunakan beragam sumber daya. Plasma ini umumnya digunakan dalam proses metalurgi. Sebagai contoh plasma ini digunakan untuk melelehkan batu berisi Al_2O_3 untuk menghasilkan aluminium.
- Lompatan korona (*Corona Discharge*): plasma ini merupakan pelepasan muatan bukan-termal yang dibangkitkan dari tegangan tinggi ke ujung elektroda tajam. Plasma ini umumnya digunakan dalam generator ozon dan *particle precipitators*.
- Lompatan muatan dalam dielektrik (*Dielectric Barrier Discharge*): merupakan pelepasan bukan-termal yang dibangkitkan oleh aplikasi dari tegangan tinggi melintasi celah kecil di mana suatu lapisan bukan-konduktif mencegah transisi pelepasan plasma ke suatu bunga api. Hal ini sering salah sebut sebagai pelepasan 'Corona' dalam industri dan mempunyai aplikasi serupa dengan pelepasan korona. Plasma ini juga digunakan secara luas dalam penanganan jaringan kain.

2.3.3 Contoh Aplikasi Plasma Non-Termal/Plasma Dingin

Plasma non-termal merupakan jenis plasma yang tidak berada dalam kesetimbangan termodinamika karena memiliki temperatur ion dan elektron yang berbeda. Baru-baru ini, teknologi plasma non-termal telah berkembang tidak terbatas hanya untuk aplikasi kimia (metalurgi, mikroelektronik, lingkungan).

Aplikasi plasma non-termal dalam konteks pengolahan makanan berfungsi sebagai perawatan/perlakuan antimikroba untuk buah, sayuran, dan makanan lainnya dengan permukaan yang mudah pecah. Makanan ini tidak cocok disterilkan dengan bahan kimia, panas atau alat pengolah makanan konvensional lainnya (“Nonthermal plasma”, n.d)

Dalam konteks *bio-medical*, plasma non-termal digunakan untuk sterilisasi jaringan otot hidup, meningkatkan penggumpalan darah, sterilisasi

kulit tumbuhan, dan *Treatment of Human Melanoma, Macrophages, and Leishmania Major promastigote cell lines* (Fridman, et.al, n.d)

Aplikasi dari plasma non-termal lainnya adalah untuk mengatasi gas buangan SO_x dan NO_x. Gas buang yang mengandung NO_x dan atau SO_x, akan dikontakkan dengan plasma. Akibatnya akan terbentuk radikal yang menyebabkan terjadinya reaksi kompleks yang mengonversi NO_x dan atau SO_x menjadi produk tertentu. Mekanisme ini terjadi di dalam reaktor plasma penghilangan NO_x dan atau SO_x (LaBarge, et.al., 2005).

Contoh aplikasi lainnya adalah : pengendapan uap kimia dengan bantuan plasma, pengetsaan (*etching*), polimerisasi, sintesis fasa gas, *protective coating deposition*, dekomposisi gas beracun & berbahaya, *destruction of warfare agents*, *electromagnetic wave shielding*, modifikasi permukaan polimer, eksitasi gas laser, pengontrolan bau, pembakaran dengan bantuan plasma, dan *gas dynamic flow control*. Banyak dari aplikasi ini telah dikembangkan dengan plasma tekanan rendah (Napartovich, n.d)

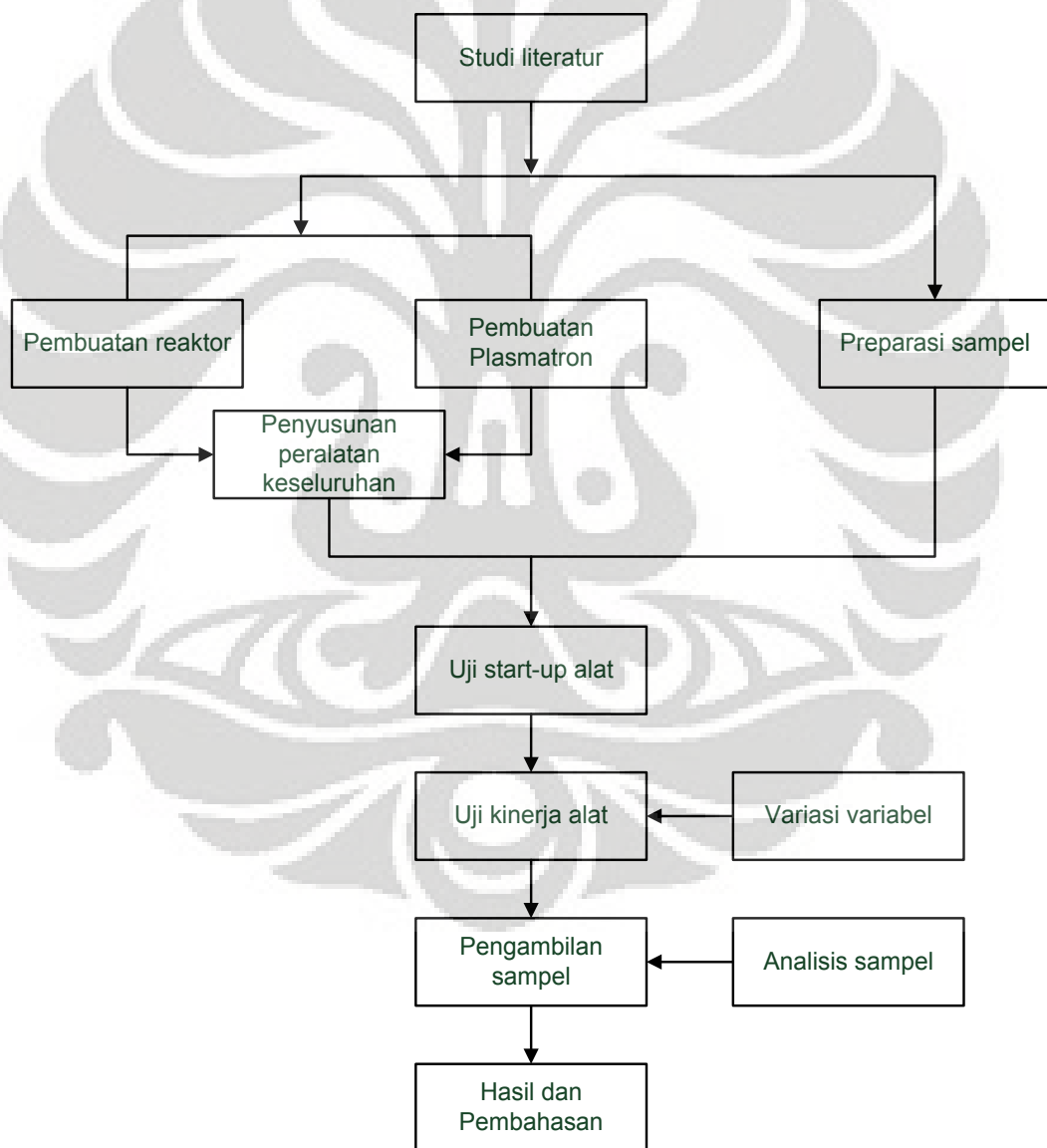
Dalam penelitian ini, plasma non-termal akan diaplikasikan untuk mengolah limbah padat agar dapat menghasilkan produk bernilai guna yaitu gas sintesis. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi alternatif solusi permasalahan sampah yang saat ini menjadi isu penting di belahan bumi manapun.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan tentang diagram alir penelitian, rancangan penelitian, prosedur percobaan, dan analisis sampel yang diambil.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Secara keseluruhan, tahap-tahap pengerjaan penelitian ini digambarkan dalam diagram alir penelitian seperti ditunjukkan Gambar 3.1.

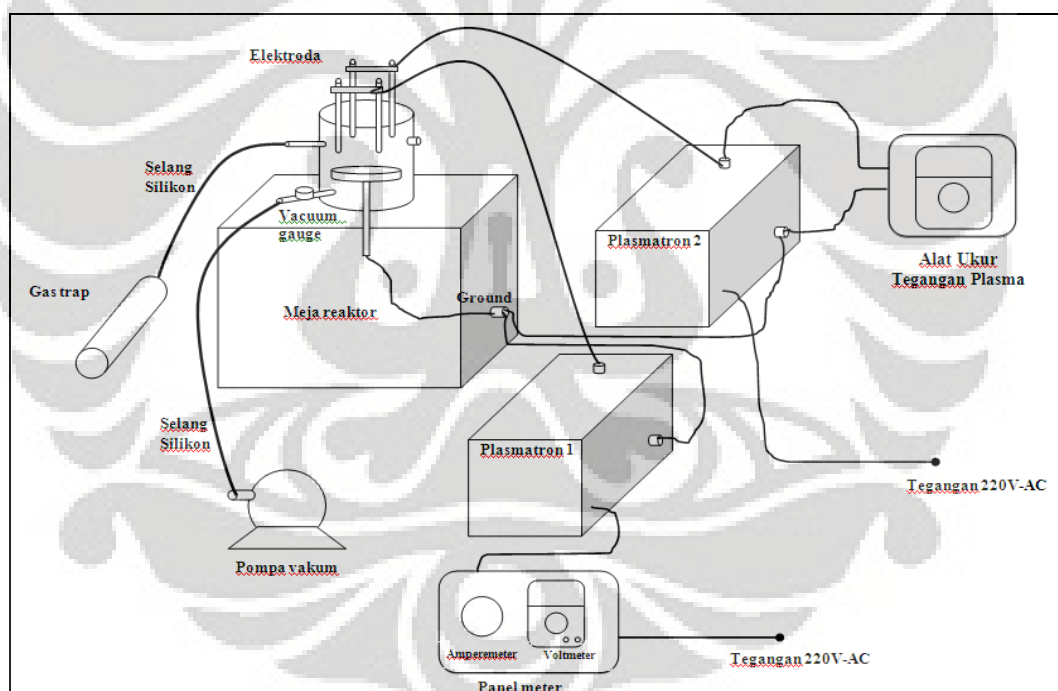


Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Gasifikasi Plasma Non-Termal

3.2 Rancangan Penelitian

3.2.1 Rancang Bangun Alat

Peralatan yang dirancang adalah sistem reaktor plasma non-termal. Perancangan reaktor plasma dilakukan guna mendapatkan desain reaktor plasma yang akan digunakan untuk eksperimen. Alat ini terdiri dari pembangkit plasma/plasmatron dan reaktor plasma non-termal sederhana berbentuk silinder. Material yang akan digunakan untuk membuat reaktor adalah gelas borosilikat dengan dimensi diameter dan tinggi 8 cm. Dipilih bahan gelas borosilikat karena mempunyai ketahanan panas yang cukup tinggi dan mempermudah pengamatan karena tidak berwarna. Kemudian plasmatron yang dibuat merupakan plasmatron sederhana yang dirakit menggunakan sirkuit elektronik lampu fluoresensi kompak dan pembangkit tegangan tinggi jenis *flyback*. Reaktor dan plasmatron yang telah dibuat nantinya akan disusun dengan skema seperti Gambar 3.2



Gambar 3.2 Skema Sistem Peralatan Gasifikasi Plasma Non-Termal

3.2.2 Uji *Start-Up* Alat

Sebelum dilakukan uji *start-up* alat, terlebih dahulu dilakukan uji kebocoran reaktor dan uji kebocoran plasmatron. Uji kebocoran reaktor dilakukan dengan cara sederhana yaitu metode air sabun. Caranya udara dari kompresor

dialirkan ke dalam reaktor (semua *valve* tertutup, kecuali *valve* bagian atas terbuka sedikit) kemudian meneteskan air sabun ke area yang berpotensi bocor. Jika terdapat kebocoran maka dilakukan upaya penambahan atau penggantian *silicon seal* yang lebih rapat dan penguncian yang lebih erat. Pada permukaan tutup reaktor juga ditambahkan lembaran silikon tipis untuk mengurangi kebocoran.

Untuk plasmatron, uji kebocoran dilakukan dengan menyalakan plasmatron yang telah dibuat selama 10 menit dalam kondisi standar, Jika tidak terdapat kebocoran listrik (*short*) baik pada *flyback* maupun pada sirkuit berarti plasmatron yang dibuat cukup bagus dan layak digunakan.

Setelah menyusun peralatan sebagai satu sistem, perlu dilakukan pengujian *start-up* alat untuk mengetahui kinerja reaktor plasma non-termal. Uji *start-up* yang dilakukan adalah pengujian pembakaran 0,5 gram sampel sampah dalam reaktor dengan kondisi vakum. Yang perlu diperhatikan adalah bagaimana pengaruh kondisi vakum terhadap plasma dan plasma terhadap reaktor. Pengujian ini juga berguna untuk mengecek adanya cacat dalam alat secara keseluruhan sekaligus *troubleshooting*.

3.2.3 Preparasi Sampel

Limbah padat yang akan diolah adalah limbah organik berupa ranting dan plastik kresek. Persiapan limbah sebagai sampel ini dilakukan dengan menjemur/mengeringkan sampel terlebih dahulu kemudian digunting/ditumbuk kecil-kecil sampai jumlah masing-masing 50 gram. Sebelum digunakan, sampel perlu di saring dengan penyaring (*mesh*) untuk mendapatkan ukuran yang homogen agar proses gasifikasi plasma non-termal dapat berlangsung dengan baik.

3.2.4 Uji Kinerja Gasifikasi Plasma Non-Termal

Pada tahap ini dilakukan proses pengolahan limbah padat secara *batch*. Proses pengolahan ini dilakukan dengan beberapa variasi yaitu : nilai kapasitansi kapasitor, jumlah elektroda, bahan elektroda, dan jenis limbah padat.

Proses pengolahan limbah dilakukan dalam kondisi vakum dengan jumlah sampel 0,35 gram. Jarak antara elektroda dan *ground* diatur sebesar 2 cm untuk plasmatron 23 watt dan 3 cm untuk plasmatron 65 watt. Jumlah plasmatron yang digunakan dua unit dan waktu operasi selama 5 menit per satu kali *running*. Perlu dipastikan bahwa sebelum *running* dimulai, semua valve pada reaktor telah tertutup atau terkunci dengan rapat dan erat.

Limbah padat yang akan digasifikasi adalah limbah ranting dan plastik kresek. Nilai kapasitansi kapasitor yang divariasikan yaitu 47 nF, 330 nF, dan 1000 nF, kemudian bahan elektroda yang digunakan adalah wolfram dan stainless steel dengan variasi jumlah elektroda 4 dan 5 buah. Untuk menghubungkan beberapa elektroda dalam satu plasmatron, digunakan lembaran aluminium demikian sehingga elektroda-elektroda tersebut dapat terhubung.

Bersamaan dengan proses *running*, voltase dan arus input juga diukur dengan panelmeter (terdiri dari voltmeter dan ampermeter) untuk mengetahui kebutuhan energi proses. Setelah *running* selesai gas hasil gasifikasi langsung dianalisis menggunakan GC, kemudian mendeteksi keberadaan gas CO dengan *CO detector* dan terakhir menimbang massa limbah untuk mengetahui persentase reduksi massa limbah. Diharapkan semua limbah dapat terkonversi menjadi gas dan menyisakan sedikit abu atau lelehan.

Sebagai tambahan juga dilakukan percobaan dengan kondisi reaktor terisi gas CO₂. Variabel nilai kapasitansi kapasitor dan jumlah elektroda yang digunakan pada percobaan ini merupakan variabel optimal yang diperoleh pada percobaan dengan kondisi vakum. Percobaan ini dilakukan untuk mengetahui kondisi reaktor yang dapat menghasilkan kinerja optimal.

3.2.5 Pengambilan Sampel Gas

Pada tahap ini, sampel dari hasil gasifikasi diambil setelah proses berlangsung. Jumlah sampel gas yang diambil sebanyak 1 ml menggunakan *syringe* melalui tabung sampel gas atau langsung melalui reaktor. Kemudian sesegera mungkin diuji menggunakan analisa *Gas Chromatography* di Lab RPKA.

3.2.6 Analisa Sampel Gas serta Pengolahan Data

Sampel gas yang telah diambil dilakukan analisis terhadap parameter-parameter kualitas keluaran, yaitu banyaknya gas sintesis dan persentase reduksi massa limbah.

3.3 Prosedur Penelitian

Berikut ini diuraikan prosedur yang akan dilakukan dalam tahap-tahap eksperimen.

3.3.1 Prosedur Pembuatan Plasmatron Sederhana Berbasis CFL

Alat dan bahan yang digunakan adalah sebagai berikut :

Alat :

1. Capit buaya
2. Acrylic
3. Solder
4. Timah dan minyak solder
5. Lem tembak
6. Resistor
7. Kapasitor
8. Trafo DC 12V-200mA
9. PCB (*printed circuit board*)
10. Spidol permanen
11. Kipas angin 12V
12. Pisau acrylic
13. Lem acrylic
14. Terminal
15. Selongsong kabel
16. *Spacer*
17. *Mini drill*
18. *Cutter*
19. *Rotary switch*

Bahan :

1. CFL 220V-65 watt merk Osram
2. CFL 220V-23 watt merk Osram
3. Flyback tipe F 1691 CE
4. Kabel tegangan tinggi dan kabel sirkuit
5. FeCl_3
6. Aseton

3.3.1.1 Preparasi Sirkuit Elektronik CFL :

Untuk mendapatkan sirkuit elektronik *CFL*, prosedur yang harus dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Menggergaji *casing ballast* lampu secara melingkar. Sebaiknya hati-hati ketika menggergaji agar tidak mengenai komponen sirkuit CFL 220 V
2. Memutuskan kabel sumber tegangan dari bagian logam *ballast*
3. Memutuskan filament lampu dari sirkuit. Filament ini nantinya akan disubstitusi dengan kapasitor. Gambar 3.3. merupakan contoh sirkuit elektronik yang telah dipreparasi.



Gambar 3.3 Sirkuit Elektronik *CFL* yang Telah Dipreparasi

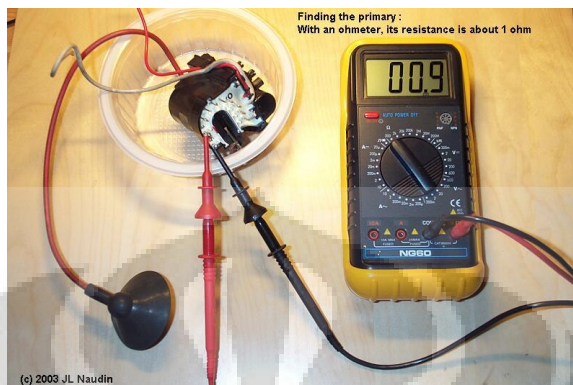
3.3.1.2 Prosedur Pengujian dan Preparasi *Flyback* : (Louis Naudin, 2003)

Sebelum digunakan, perlu diketahui letak kaki primer dan sekunder dari *flyback* agar dapat berfungsi sebagaimana mestinya. Untuk mencari kaki primer dan sekunder, dilakukan prosedur sebagai berikut :

Kaki primer :

Dengan bantuan ohmmeter digital kita dapat dengan mudah menemukan kaki primer *flyback* karena resistansinya sangat kecil sekitar 1 ohm. Perhatikan

Gambar 3.4, caranya adalah dengan mencoba setiap pasang kaki *flyback* yang berdekatan mulai dari satu ujung ke ujung lainnya. Pasangan yang mempunyai hambatan sekitar 1 ohm itulah kaki primer.



Gambar 3.4 Skema Untuk Menemukan Kaki Primer *Flyback*

(<http://lifters.online.fr/lifters/labhvps/tht.hu>)

Kaki sekunder (sebagai massa atau *ground*):

Untuk menemukan kaki sekunder dibutuhkan sumber tegangan DC 24 volt (dapat diganti dengan 3 buah baterai 9 volt disusun seri) dan voltmeter yang diatur untuk rentang 20 volt. Perhatikan Gambar 3.5. Hubungkan input positif voltmeter dengan kabel keluaran tegangan tinggi flyback (kabel merah tebal dengan mangkuk penghisap di ujungnya) dan input negatif dengan kutub negatif baterai. Kemudian hubungkan kabel kutub positif baterai dengan salah satu kaki *flyback* satu persatu, jika terbaca sekitar 20 volt maka itulah kaki sekunder *flyback*.



Gambar 3.5 Skema Untuk Menemukan Kaki Sekunder *Flyback*

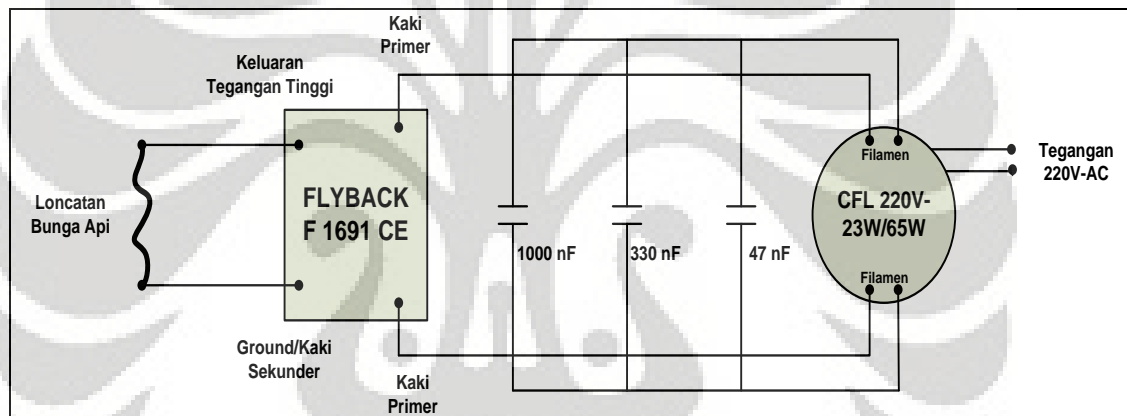
(<http://lifters.online.fr/lifters/labhvps/tht.hu>)

Setelah diketahui kaki primer dan sekunder, *flyback* dipreparasi dengan prosedur sebagai berikut :

1. Memotong semua kaki-kaki selain kaki primer dan sekunder
2. Memotong kabel selain kabel tegangan tinggi (yang paling besar)
3. Menyekat semua kaki dan kabel yang telah dipotong dengan lem tembak serapat mungkin untuk menghindari kebocoran

3.3.1.3 Prosedur Merakit Plasmatron Sederhana:

Setelah sirkuit elektronik *CFL* dan *flyback* selesai dipreparasi maka plasmatron sudah dapat dibuat sesuai rangkaian pembangkit plasma non-termal sederhana berbasis CFL seperti ditunjukkan Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Rangkaian Pembangkit Plasma Non-Termal Sederhana Berbasis CFL

Adapun prosedur perakitan-nya sebagai berikut :

1. Membuat tata letak sirkuit CFL 220V-23W/65W, *flyback*, kapasitor, kabel sirkuit dan terminal di atas permukaan coklat PCB. Jangan lupa untuk menentukan tempat *spacer* pada setiap sudut PCB dan membuat lubangnya menggunakan bor.
2. Melubangi titik-titik letak dari komponen pada prosedur 1 menggunakan *mini drill*.
3. Membuat jalur kontak setiap komponen menggunakan spidol permanen pada permukaan logam PCB, seperti contoh berikut. Perlu diperhatikan

bahwa kedua kaki primer *flyback* terhubung dengan kaki tegangan keluaran dari CFL 220V-23W/65W.

4. Meluluhkan permukaan logam PCB yang tidak ditutup spidol dengan merendam PCB dalam larutan FeCl_3 . Perlu diperhatikan, air yang digunakan adalah air hangat dan wadah yang digunakan cukup untuk merendam PCB keseluruhan.
5. Membersihkan spidol dari permukaan logam PCB dengan aseton.
6. Menyolder semua komponen pada prosedur 1 serapi mungkin.
7. Menyambungkan semua kabel sirkuit yang terhubung dengan kapasitor dan CFL 220V-23W/65W ke *rotary switch*.
8. Menyambungkan kabel untuk *ground* ke terminal dekat *flyback*. Kemudian menyambungkan kabel untuk sumber tegangan ke terminal dekat sirkuit CFL 22 V-23W/65W.
9. Memasang plasmatron ke dalam *casing acrylic*
10. Memasang rangkain *converter* arus AC menjadi DC pada *casing*, menghubungkan dengan kipas angin DC 12 volt.
11. Plasmatron siap digunakan

3.3.2 Prosedur Uji Kinerja Alat :

Alat dan bahan yang digunakan untuk melakukan percobaan adalah :

Alat ;

1. *Stopwatch*
2. Timbangan
3. Vakum meter
4. *Nipple* untuk vakum meter
5. Lembaran silikon
6. Pompa vakum
7. Selang silikon
8. *Syringe*
9. Tabung sampel gas

Bahan :

1. Sampel limbah padat ranting dan plastik kresek

2. *Silicon grease high vacuum*

Percobaan untuk kondisi reaktor vakum dilakukan dengan prosedur sebagai berikut :

1. Pastikan kabel sumber tegangan 220V, tegangan tinggi, dan *ground* telah tersambung serta terkoneksi dengan baik dan benar.
2. Letakkan sampel sebanyak 0,35 gram di atas *bracket* karbon
3. Tutup reaktor dengan rapat,(setelah sebelumnya diberi lapisan lembaran silikon dan *silicon grease*) termasuk semua *valve* yang terhubung dengan reaktor. Pastikan juga elektroda pada tutup reaktor telah terpasang dengan ketinggian yang telah ditentukan. Hubungkan pompa vakum dengan *valve* bagian bawah reaktor, buka *valve*, kemudian vakumkan reaktor, tutup *valve* kembali.
4. Atur plasmatron untuk kapasitor yang diinginkan dengan memutar *rotary switch* pada plasmatron.
5. Nyalakan plasmatron selama 5 menit, kemudian amati fenomena yang terjadi.
6. Setelah 5 menit matikan plasmatron.
7. Ambil sampel gas hasil gasifikasi plasma menggunakan *syringe* melalui akses yang tertutup lembaran silikon.
8. Analisa gas hasil gasifikasi dengan GC.
9. Buka tutup reaktor, mendeteksi keberadaan gas CO dengan *CO detector* dan mencatat kadarnya. Kemudian menimbang sisa sampel limbah padat hasil gasifikasi, terakhir bersihkan *bracket* karbon dari sisa-sisa gasifikasi.
10. Ulangi langkah 1-11 untuk variasi selanjutnya.

Percobaan untuk kondisi reaktor terisi gas CO₂ dilakukan dengan prosedur sebagai berikut :

1. Pastikan kabel sumber tegangan 220V, tegangan tinggi, dan *ground* telah tersambung serta terkoneksi dengan baik dan benar.
2. Letakkan sampel sebanyak 0,35 gram di atas *bracket* karbon

3. Tutup reaktor dengan rapat, (setelah sebelumnya diberi lapisan lembaran silikon dan *silicon grease*). Pastikan juga elektroda pada tutup reaktor telah terpasang dengan ketinggian yang telah ditentukan.
4. Buka penuh *valve* bagian atas dan bawah reaktor. Alirkan (*flushing*) gas CO₂ ke dalam reaktor selama 20 detik, kemudian tutup sedikit *valve* bagian atas, biarkan gas CO₂ tetap mengalir selama 10 detik. Menutup *valve* bagian atas baru kemudian menutup *valve* bagian bawah. Matikan aliran gas CO₂.
5. Atur plasmatron untuk kapasitor yang diinginkan dengan memutar *rotary switch* pada plasmatron.
6. Nyalakan plasmatron selama 5 menit, kemudian amati fenomena yang terjadi.
7. Setelah 5 menit matikan plasmatron.
8. Ambil sampel gas hasil gasifikasi plasma menggunakan *syringe* melalui akses yang tertutup lembaran silikon.
9. Analisa gas hasil gasifikasi dengan GC.
10. Buka tutup reaktor, mendeteksi keberadaan gas CO dengan *CO detector* dan mencatat kadarnya. Kemudian menimbang sisa sampel limbah padat hasil gasifikasi, terakhir bersihkan *bracket* karbon dari sisa-sisa gasifikasi.
11. Ulangi langkah 1-11 untuk variasi selanjutnya.

Variabel-variabel yang diujicoba adalah :

1. Nilai kapasitor = 47 nF, 330 nF, dan 1000 nF
2. Jumlah elektroda = 4 dan 5 elektroda
3. Bahan elektroda = wolfram dan stainless steel
4. Jenis sampah = ranting dan plastik kresek

3.3.3 Prosedur Pemakaian *Gas Chromatography* :

Preparasi GC

Memanaskan GC kurang lebih 1 hari untuk GC yang sudah lama tidak dipakai dan kurang lebih 15 menit untuk GC yang sering dipakai untuk menstabilkan dan memanaskan agar kotoran-kotorannya terbawa.

Prosedur Mengalirkan Gas Argon

- Pastikan tekanan input dan output di regulator berada pada angka 0 dan tidak ada kebocoran pada sambungan-sambungannya.
- Buka *valve* utama dari kencang menjadi kendur, sehingga tekanan akan langsung naik
- Buka *valve* regulator dari kendur menjadi kencang sehingga tekanan akan naik perlahan-lahan

Prosedur Membuka Tabung Gas:

1. Pastikan tekanan input dan output di regulator, jarum *pressure gauge* menunjukkan 0 dan *valve* dalam keadaan tertutup (posisi *valve* longgar)
2. Buka *valve* induk di tabung dengan memutar ke arah kiri (arah kebalikan jarum jam) dan lihat tekanan gas, yang menunjukkan tekanan dalam tabung
3. Buka *valve* regulator perlahan-lahan ke arah kanan (searah jarum jam), lalu atur tekanan gas yang diinginkan
4. Pastikan instalasi gas baik dari tabung sampai perpipaan tidak bocor (cek kebocoran menggunakan pipa sabun)
5. Untuk gas-gas yang beracun dan mudah terbakar (CO, H₂, CH₄), langkah 4 harus dilakukan terlebih dahulu sebelum langkah 1 menggunakan gas inert N₂

Prosedur Menutup Gas

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

Prosedur Menyalakan GC

1. Pastikan tekanan primary 600 kPa, *carrier gas* ± 150-180 kPa
2. Mengatur suhu menjadi 130 – 100 – 100 (°C)
3. Menunggu hingga stabil (lampu berkedip-kedip)
4. Menyalakan current 6 mA

Prosedur Menyalakan Chromatopac:

1. Menghubungkan chromatopac dengan GC, tekan: shift down bersama dengan I,N,I , lalu tekan enter, akan muncul *initialize*.
2. 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.
3. Input attenuasi. 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.
4. Mengatur kecepatan kertas, tekan: speed bersama dengan angka 10, lalu tekan enter.
5. Mengatur stop time,tekan: stop time bersama dengan angka 5 lalu tekan enter.
6. Untuk melihat parameter-parameter yang ada, tekan: shift down bersama dengan print dan width, lalu tekan enter.
7. 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:

1. Mematikan current.
2. Menurunkan temperatur menjadi 30-30-30 kemudian GC dibuka agar pendinginan terjadi lebih cepat.
3. Setelah suhu kolom menjadi 80⁰C (pada indicator) kemudian GC baru dapat dimatikan.

Sebagai tambahan prosedur mematikan aliran gas sesuai dengan prosedur menutup gas.

3.4 Data yang Diambil

Data yang diambil untuk setiap variasi nilai kapasitansi kapasitor&jumlah elektroda, bahan elektroda, jenis limbah, dan kondisi reaktor adalah gas hasil gasifikasi dengan plasma non-termal per satu kali *running* (5 menit) dan berat akhir limbah padat.

3.5 Analisa Sampel Gas Produk Gasifikasi

Analisa Kandungan Gas

Pada penelitian kali ini, analisa kandungan gas akan digunakan metode *gas chromatography* dan dilakukan di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Alam Departemen Teknik Kimia UI. Penelitian ini difokuskan untuk mengetahui gas apa saja yang terbentuk sebagai hasil gasifikasi dan seberapa banyak gas sintesis yang terbentuk.

3.6 Pengolahan Data

Data yang telah diperoleh digunakan dalam pengolahan data untuk mengetahui kinerja proses gasifikasi plasma non-termal:

a. Volume Gas CO

Dihitung menggunakan persamaan hasil kalibrasi pada GC :

$$y = 3 \times 10^{-6} x + 0,2 \dots \dots \dots (1)$$

Dimana y = volume gas CO, ml

x = luas area gas CO yang terbaca pada GC

b. Volume Gas H₂

$$y = -0,057662 + 4,6879 \times 10^{-7} x \dots \dots \dots (2)$$

Dimana y = volume gas H₂, ml

x = luas area gas H₂ yang terbaca pada GC

c. Persentase Reduksi Massa Limbah

$$\%W = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana %W = persentase reduksi massa limbah

W_1 = massa limbah awal, gram

W_2 = massa limbah akhir (setelah gasifikasi), gram

d. Kebutuhan Daya

$$P = V \cdot i \cdot PF \dots\dots\dots (4)$$

Dimana P = daya listrik sesungguhnya, Watt

V = voltase masuk yang terukur pada voltmeter, volt

i = arus yang terukur pada amperemeter, ampere

PF=*Power Factor*, untuk pembangkit plasmatron sederhana berbasis CFL nilai PF ~ 0,95 (berdasarkan pengukuran yang dilakukan oleh Ir. Amien Rahardjo, M.T.)

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menggunakan reaktor transparan yang terbuat dari bahan gelas borosilikat dengan akses elektroda pada tutup dan akses *ground* pada bagian bawah reaktor. Pembangkit plasma non-termal (plasmatron) yang digunakan merupakan pembangkit plasma sederhana dengan komponen utama sirkuit elektronik *Compact Fluorescent Lamp* dan pembangkit tegangan tinggi jenis *flyback*. Elektroda atas yang digunakan adalah batang logam wolfram yang merupakan logam tahan panas dan sebagai pembanding digunakan logam stainless steel. Elektroda *ground* terdiri dari penampang stainless steel dan alas karbon sebagai isolator termal untuk menghindari panas yang berlebihan pada *ground*. Jarak elektroda yang digunakan merupakan jarak elektroda optimum untuk masing-masing plasmatron 23 dan 65 watt. Limbah padat yang akan diolah adalah ranting dan plastik “kresek” yang telah dipreparasi untuk menghasilkan proses yang optimum. Proses gasifikasi dilakukan pada kondisi reaktor vakum dan diisi dengan gas *support* CO₂. Bab ini merupakan suatu evaluasi untuk mengetahui kinerja dari gasifikasi plasma non-termal.

4.1 Menentukan Jarak Optimum Elektroda-Ground

Uji ini dilakukan untuk mendapatkan jarak optimum yang akan digunakan untuk percobaan selanjutnya. Jarak ini merupakan jarak dimana plasma pertama kali dapat menggasifikasi limbah dengan baik tanpa ada gangguan kebocoran arus listrik di plasmatron. Hal ini dilakukan dengan cara menjalankan percobaan secara cepat selama 1 menit untuk melihat secara fisik proses gasifikasi dengan satu unit plasmatron menggunakan satu elektroda wolfram dengan kondisi reaktor vakum. Jarak yang diuji coba adalah 2; 2,5; dan 3 cm untuk plasmatron 23 watt serta 3; 4; dan 5 cm untuk plasmatron 65 watt. Uji coba jarak ini diambil berdasarkan panjang maksimum plasma dalam keadaan standar (suhu dan tekanan ruang) yaitu 2,5 cm untuk plasmatron 23 watt dan 5 cm untuk plasmatron 65 watt. Parameter yang digunakan adalah pertama kalinya plasma dapat mengenai dan menggasifikasi limbah, serta stabil tidaknya plasma. Nilai kapasitansi yang digunakan adalah 47 nF.

Pertama kali percobaan dilakukan dengan mengatur jarak elektroda-*ground* yang telah ditetapkan. Selanjutnya menyiapkan sampel limbah ke dalam reaktor, mengunci tutup reaktor dan memastikan semua *valve* tertutup dengan rapat. Lalu memvakumkan reaktor dan terakhir menyalakan plasmatron. Berdasarkan hasil pengamatan, untuk plasmatron 23 watt, jarak 2 cm merupakan jarak pertama kalinya plasma dapat langsung mengenai dan menggasifikasi limbah. Untuk jarak 2,5 dan 3 cm plasma pertama kali bergerak ke area yang tidak ada limbah bahkan ke tepi *ground*. Lalu, untuk plasmatron 65 watt, jarak 3 cm dapat langsung mengenai dan menggasifikasi limbah. Sama seperti plasmatron 23 watt, pada jarak 4 dan 5 cm plasma pertama kali bergerak ke area yang tidak ada limbah atau ke tepi *ground*. Namun demikian, setelah beberapa waktu, plasma pada jarak optimal juga dapat berpindah ke area yang tidak ada limbah. Hal ini karena sifat plasma yang selalu mengalir pada jalur yang memiliki hambatan terkecil. Tetapi secara umum, plasma dalam keadaan vakum cenderung agak statis. Hasilnya diperoleh jarak optimum 2 cm untuk plasmatron 23 watt dan 3 cm untuk plasmatron 65 watt.

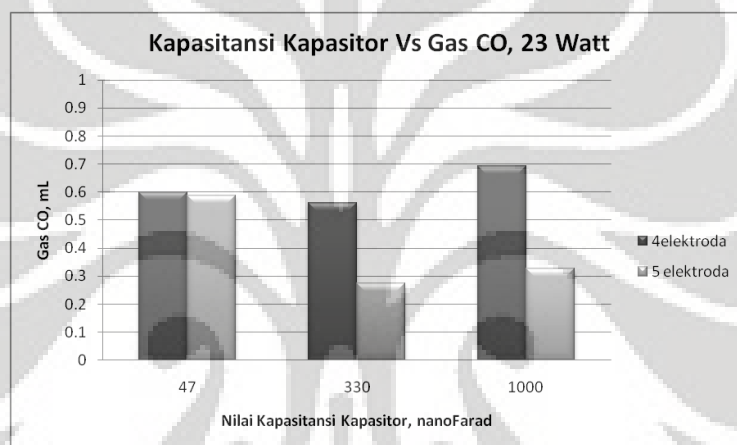
Dalam kondisi vakum warna plasma adalah ungu terang dan berukuran cukup tebal. Ketika partikel dalam reaktor tereksitasi oleh plasma, mereka secara cepat meradiasikan energi dalam bentuk foton atau unit cahaya. Ini yang membuat plasma memancarkan warna karakteristiknya, dan warna plasma bergantung pada gas sumber serta temperaturnya.

4.2 Pengaruh Nilai Kapasitansi Kapasitor dan Jumlah Elektroda

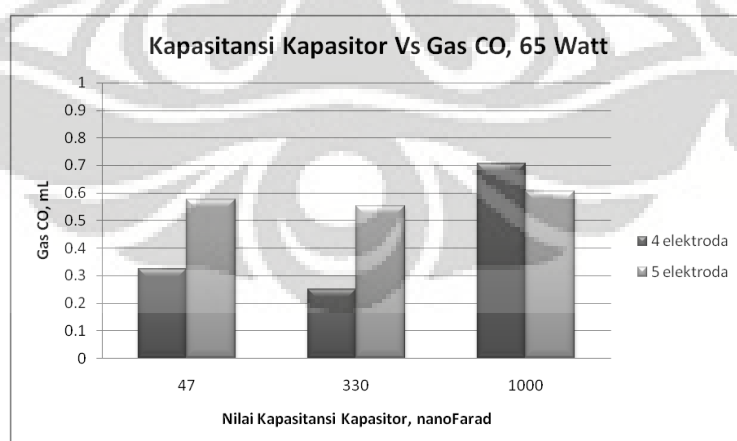
Nilai kapasitor merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi kinerja gasifikasi plasma non-termal. Untuk mengetahuinya, maka dilakukan pengolahan limbah padat dalam reaktor vakum menggunakan nilai kapasitansi kapasitor yang bervariasi baik untuk plasmatron 23 watt dan 65 watt. Limbah yang akan diolah adalah ranting sebanyak 0,35 gram. Elektroda yang digunakan adalah logam wolfram dengan variasi jumlah yaitu 4 dan 5 buah. Sebagai tambahan juga akan dilakukan percobaan dengan kondisi reaktor diisi dengan gas *support* CO₂ untuk mengetahui kondisi optimal.

Semakin besar nilai watt CFL dan nilai kapasitor maka panjang plasma dan kekuatan plasma akan semakin besar karena makin besar tegangan keluaran yang dibangkitkan sehingga densitas dan temperatur plasma yang dihasilkan akan lebih besar. Dengan begitu, makin besar nilai kapasitansi kapasitor maka proses gasifikasi akan lebih baik dan bisa menghasilkan gas sintesis lebih banyak. Gambar 4.1 dan 4.2 merupakan diagram batang representasi hasil eksperimen variasi nilai kapasitansi kapasitor versus gas sintesis yang dihasilkan.

Gas sintesis yang ditampilkan dalam diagram batang hasil percobaan merupakan gas CO saja. Hal ini akan dijelaskan pada bagian akhir sub bab.



Gambar 4.1 Diagram Batang Nilai Kapasitansi Kapasitor Vs Gas CO untuk Plasmatron 23 watt, Vakum



Gambar 4.2 Diagram Batang Nilai Kapasitansi Kapasitor Vs Gas CO untuk Plasmatron 65 watt, Vakum

Pada Gambar 4.1 dan 4.2 dapat dilihat bahwa nilai kapasitansi kapasitor mempengaruhi banyaknya gas CO yang dihasilkan. Untuk jumlah elektroda 4 buah nilai yang menghasilkan gas CO paling banyak adalah 1000 nanofarad baik untuk plasmatron 23 watt dan 65 watt. Beda halnya untuk jumlah elektroda 5 buah, nilai kapasitansi kapasitor maksimal plasmatron 23 watt adalah 47 nF dan plasmatron 65 watt adalah 1000 nF. Hal ini diduga terjadi karena dua alasan. Pertama, plasma tidak keluar melalui dua atau tiga elektroda seperti yang diharapkan. Sebagai aliran listrik setiap saat plasma akan mengalir melalui jalur yang hambatannya paling kecil, sehingga plasma tidak keluar melalui dua atau tiga elektroda walaupun dipasang paralel. Kedua, adanya ketidak-fokusan plasma mengenai/kontak dengan limbah sasaran. Pada saat running 23 watt 47 nF plasma cukup lama fokus mengenai limbah, sedangkan pada saat 1000 nF plasma tidak cukup lama fokus mengenai limbah. Hal ini juga karena plasma yang pada dasarnya sebagai aliran listrik akan menghantar melalui permukaan *ground* yang memiliki hambatan paling kecil atau dengan kata lain lapisan limbah di atas *ground* merupakan suatu hambatan. Tetapi hal ini terjadi beberapa waktu setelah proses *running* berjalan, biasanya plasma tetap menghantar di titik yang sama dan terkadang pindah ke titik yang lain. Dengan kata lain terdapat kesulitan untuk mengarahkan plasma mengenai/kontak dengan limbah. Dengan demikian, dalam waktu proses yang sama, 47 nF menghasilkan lebih banyak gas CO karena plasma lebih lama mengenai/kontak dengan limbah. Hal yang sama juga terjadi pada plasmatron 65 watt.

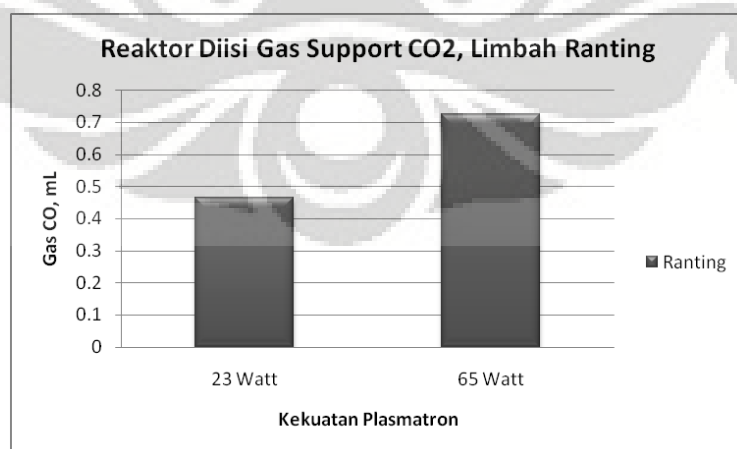
Namun, dalam pengukuran tegangan plasma, ketiga kapasitor ternyata menghasilkan tegangan plasma yang sama. Disini, kekuatan gasifikasi plasma ternyata juga dipengaruhi oleh faktor lain yaitu frekuensi. Perlu diperhatikan bahwa dalam sirkuit AC, impedansi/hambatan menurun dengan peningkatan kapasitansi dan peningkatan frekuensi. Kapasitor berbeda dengan resistor dan inductor dalam hal impedansinya, yaitu berbanding terbalik dengan nilai kapasitansi ("Capacitor", n.d). Dengan begitu nilai kapasitansi 1000 nF dapat menghasilkan gas CO lebih banyak karena plasma yang dihasilkan memiliki intensitas atau frekuensi yang lebih tinggi. Akhirnya 1000 nF dinilai sebagai

kapasitansi optimal baik untuk plasmatron 23 dan 65 watt karena menghasilkan gas CO paling banyak.

Pada Gambar 4.1 dan 4.2 untuk nilai watt plasmatron yang berbeda dengan nilai kapasitansi kapasitor dan jumlah elektroda sama tidak terdapat pola yang konsisten, seharusnya semakin besar nilai watt plasmatron, semakin besar kekuatan plasma dan semakin banyak gas CO yang dihasilkan. Hal ini seperti dijelaskan pada paragraf sebelumnya, diduga karena, pertama bentuk plasma tidak menyebar dan kedua terdapat kesulitan mem-fokuskan plasma untuk mengenai/kontak dengan limbah sasaran. Selama proses *running* terkadang dua plasma fokus ke limbah atau satu saja yang fokus. Dengan melihat jumlah gas CO yang dihasilkan, jumlah elektroda 4 buah merupakan jumlah elektroda optimal karena menghasilkan gas CO paling banyak.

Sesuai dengan parameter kinerja proses, diperoleh kesimpulan nilai kapasitansi kapasitor optimal adalah 1000 nF dan jumlah elektroda optimal 4 buah.

Sebagai pembanding, dilakukan juga proses dengan kondisi reaktor diisi dengan gas *support* CO₂ untuk mengetahui kondisi reaktor mana yang menghasilkan kinerja paling optimal. Gambar 4.3 merupakan diagram batang representasi hasil eksperimen kondisi reaktor diisi dengan gas *support* CO₂ menggunakan nilai kapasitansi kapasitor dan jumlah elektroda optimal dari hasil percobaan yang telah dipaparkan pada paragraf-paragraf sebelumnya.



Gambar 4.3 Diagram Batang Kekuatan Plasmatron Vs Gas CO, Reaktor Diisi Gas *Support* CO₂

Berbeda halnya dengan kondisi vakum, reaktor yang terisi gas CO_2 menghasilkan proses gasifikasi yang lebih cepat dan lebih banyak limbah yang terkonversi. Hal ini karena gas CO_2 dalam reaktor bertindak sebagai media penghantar plasma yang membuat proses gasifikasi berlangsung lebih efektif. Plasma dengan kondisi reaktor diisi dengan gas *support* CO_2 tampak lebih tipis daripada kondisi vakum namun lebih dinamis seperti ditunjukkan Gambar 4.4. Hal ini karena gas CO_2 ikut terpanasi dan membuat gas CO_2 mempunyai konduktivitas yang lebih besar sehingga membuat plasma memiliki jalur yang jauh lebih banyak untuk mengalir. Hal ini menyebabkan lebih banyak limbah yang tergasifikasi oleh plasma.

Plasma kondisi reaktor diisi dengan gas *support* CO_2 tampak lebih tipis disebabkan semakin besar tekanan karena adanya gas dalam reaktor, semakin sulit terjadinya lompatan plasma dari elektroda ke *ground* karena tahanan yang disebabkan keberadaan gas CO_2 dalam reaktor. Akibatnya plasma yang keluar lebih tipis dibandingkan dengan vakum namun lebih dinamis. Jika tekanan terlalu rendah, efek alami (pergerakan dinamis) dari plasma akan berkurang dan hanya terlihat cahaya. Intensitas cahaya juga akan lebih rendah. Hal ini juga menjelaskan kenapa plasma dalam vakum tidak sedinamis plasma dalam reaktor terisi gas *support* CO_2 .



Gambar 4.4 Plasma Keadaan Reaktor Terisi Gas *Support* CO_2 (kiri), Plasma Keadaan Reaktor Vakum (kanan)

Hal yang penting dikaji di sini adalah tidak teridentifikasinya gas hidrogen sebagai gas produk gasifikasi pada analisa GC. Dalam literatur yang terlihat dalam Tabel 4.1 diketahui bahwa plasma non-termal mempunyai rentang suhu 300-400 K (27-127 °C). F. Ouni dkk (2009) dalam studinya yang berjudul *Syngas Production from Propane Using Atmospheric Non-thermal Plasma* menggunakan plasma non-termal bersuhu 420 K (147°C). Suhu plasma non-termal ini cukup untuk memecah molekul dan menghasilkan spesies sangat aktif seperti radikal, atom tereksitasi, ion, dan molekul seperti halnya elektron. Dengan demikian, dalam reaksi yang terjadi, gas H₂ seharusnya memang terbentuk.

Adanya gas CO divalidasi dengan bantuan alat *CO detector*, dimana setiap kali running gas CO selalu terdeteksi. Data kalibrasi GC (lampiran) menunjukkan gas H₂ dan CO memiliki *retention time* analisa GC yang berdekatan. Tidak teridentifikasinya gas H₂ pada analisa GC diduga karena gas CO dan H₂ teridentifikasi dalam satu *peak* yang sama. Dalam hal ini teridentifikasi bersama dalam *peak* gas CO. Hal ini karena terjadi gaya adhesi antara molekul CO dan H₂ yang disebabkan gaya Van der Waals yang lebih tepatnya gaya London (Dipol Seketika-Dipol Terimbas).

Gaya London terjadi dari dipol sesaat antara dua molekul non polar yang berdekatan. Gaya ini disebabkan elektron suatu molekul pada daerah tertentu dan pada saat tertentu berpindah tempat dalam sesaat dari suatu daerah ke daerah lainnya. Perpindahan elektron ini karena awan elektron suatu molekul terganggu oleh medan listrik dari luar. Akibatnya spesies yang normalnya non polar menjadi polar dan molekul ini memiliki dipol sesaat. Selanjutnya elektron dalam molekul didekatnya dapat pula berpindah dan memiliki dipol terimbas. Dipol sesaat dan dipol terimbas inilah yang menimbulkan gaya tarik menarik antar molekul. (Petrucci, 1987)

Mudah tidaknya awan elektron suatu molekul terganggu oleh medan listrik luar (kemudahan mengimbas sesaat) dinamakan polarisabilitas (*polarizability*). Pada umumnya polarisabilitas meningkat sesuai dengan jumlah elektron dalam molekul. Karena massa molekul relatif (Mr) berhubungan dengan jumlah elektron secara umum, polarisabilitas dan gaya London meningkat dengan meningkatnya massa molekul relatif. Gas H₂ teridentifikasi bersama-sama dalam *peak* gas CO

karena molekul gas H₂ terimbas dan tertarik oleh molekul gas CO yang memiliki polarisabilitas lebih besar.

Sejumlah sedikit oksigen untuk reaksi gasifikasi dalam reaktor diduga berasal dari udara yang masih tersisa dalam reaktor baik dalam keadaan vakum maupun terisi gas CO₂. Masih terdapatnya udara/oksigen dalam reaktor mungkin karena proses pem-vakuman yang relatif ringan atau *flushing* yang kurang baik maupun terdapat kebocoran reaktor yang tidak terdeteksi. Kebocoran reaktor dimungkinkan karena terdapat banyak *valve* pada reaktor yang selalu dibuka tutup.

Tabel 4.1. Klasifikasi Plasma (H. Huang, L. Tang, 2007)

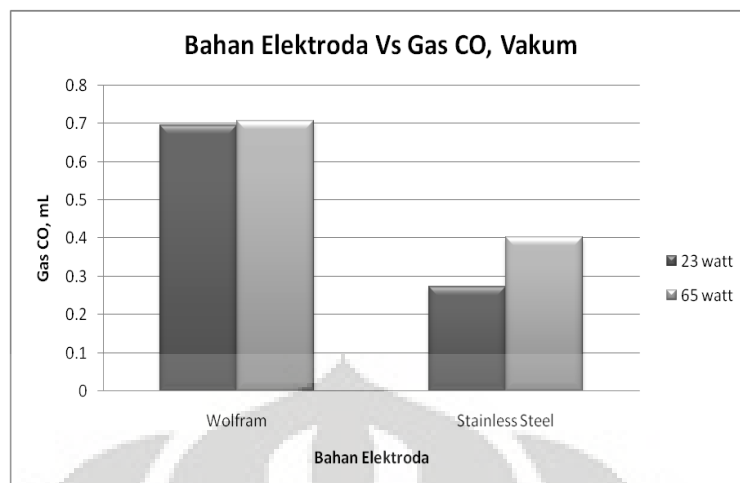
Plasma	Keadaan	Contoh
Plasma Temperatur Tinggi (Equilibrium Plasma)	$T_e = T_i = T_h, T_p = 10^6 - 10^8 \text{ K}$ $n_e \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}$	<i>Laser fusion plasma</i>
Plasma Termal (Quasi-Equilibrium Plasma)	$T_e \approx T_i \approx T_h, T_p = 2 \times 10^3 - 3 \times 10^4 \text{ K}$ $n_e \geq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

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

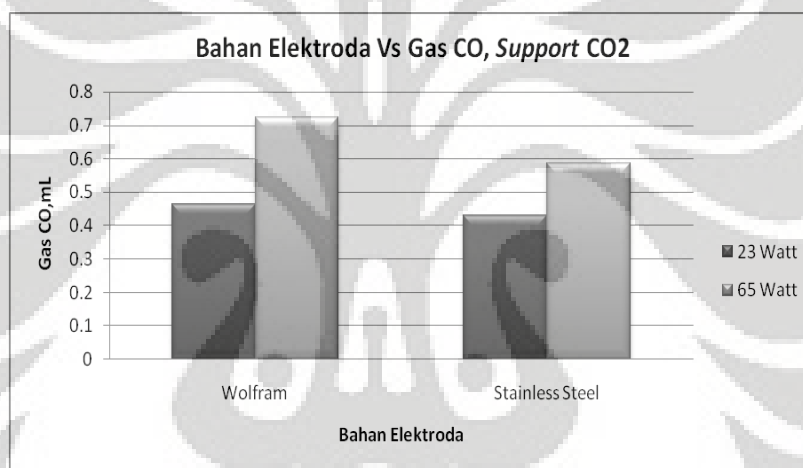
4.3 Pengaruh Bahan Elektroda

Bahan elektroda merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi kinerja gasifikasi plasma non-termal. Untuk mengetahuinya, maka dilakukan percobaan gasifikasi plasma menggunakan bahan elektroda lain yaitu stainless steel. Nilai kapasitansi kapasitor dan jumlah elektroda yang digunakan adalah nilai optimal dari hasil percobaan pertama. Hasil percobaan pertama, baik untuk plasmatron 23 watt dan 65 watt, nilai kapasitor optimum adalah 1000 nanoFarad dan jumlah elektroda optimum adalah 4 elektroda. Percobaan ini dilakukan untuk mengetahui logam mana yang menghasilkan kinerja paling optimal.

Semakin kecil resistansi elektroda, konduktivitas listriknya makin besar maka kekuatan plasma yang dibangkitkan akan semakin besar. Dengan begitu, makin kecil resistansi elektroda yang digunakan maka proses gasifikasi akan lebih baik dan bisa menghasilkan gas sintesis lebih banyak.



Gambar 4.5 Diagram Batang Perbandingan Antara Elektroda Wolfram dan Stainless Steel Kondisi Reaktor Vakum, Limbah Ranting



Gambar 4.6 Diagram Batang Perbandingan Antara Elektroda Wolfram dan Stainless Steel Kondisi Reaktor Diisi Dengan Gas *Support* CO₂, Limbah Ranting

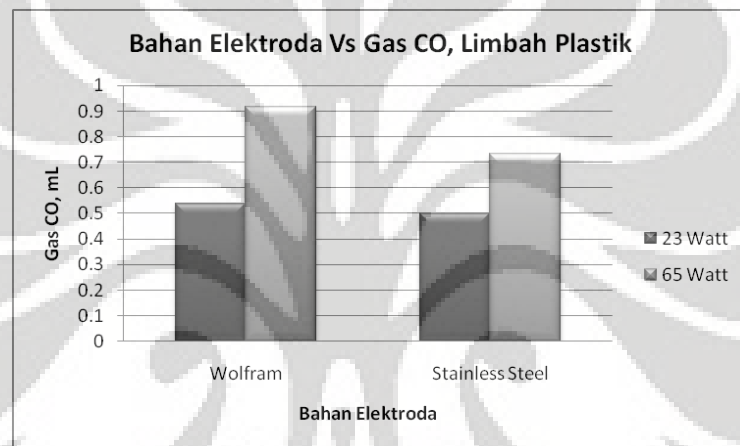
Dari Gambar 4.5 dan 4.6 dapat dilihat dengan jelas baik untuk kondisi vakum dan terisi gas *support* CO₂ bahwa logam wolfram menghasilkan gas CO lebih banyak dari logam stainless steel karena logam wolfram mempunyai resistansi yang lebih kecil. Hal ini menyebabkan wolfram menghasilkan plasma yang lebih kuat karena mempunyai tegangan keluaran yang lebih besar. Untuk limbah plastik, wolfram juga menghasilkan gas CO lebih banyak daripada stainless steel, seperti ditunjukkan Gambar 4.7.

Dari literatur diketahui tahanan jenis logam tungsten sebesar $5,6 \times 10^{-8}$ ohm-meter (Elert, n.d) dan tahanan jenis logam stainless steel sebesar $7,2 \times 10^{-7}$

ohm-meter (Elert, n.d). Dari tahanan jenis ini dapat diketahui besarnya resistansi logam wolfram dan stainless steel dengan rumus :

$$R = \frac{l \cdot \rho}{A} \dots \dots \dots (5)$$

Dimana ; R = resistansi logam, ohm
 l = panjang logam, meter
 A = luas penampang logam, m²
 ρ = tahanan jenis logam, ohm-meter



Gambar 4.7 Diagram Batang Perbandingan Antara Elektroda Wolfram dan Stainless Steel Kondisi Reaktor Diisi Dengan Gas *Support* CO₂, Limbah Plastik

Dari hasil perhitungan, resistansi masing-masing logam adalah sebagai berikut :

Wolfram → l= 10,2 cm, d=6,5 mm, A= 3,32x10⁻⁵ m², R= 1,72x10⁻⁴ ohm

Stainless Steel → l=14,8 cm, d=6 mm, A= 2,83x10⁻⁵ m², R= 3,77x10⁻³ ohm

Diperoleh resistansi logam wolfram lebih kecil daripada stainless steel, dengan demikian wolfram lebih banyak menghantarkan tegangan dan arus sehingga kekuatan plasmanya lebih besar. Dari nilai tahanan jenis kita juga dapat mengetahui konduktivitas listrik yang merupakan ukuran kemampuan material untuk mengalirkan arus listrik. Konduktivitas listrik merupakan kebalikan dari tahanan jenis dengan satuan Siemens per meter. Bila dihitung, wolfram memiliki konduktivitas listrik yang lebih besar dari stainless steel. Dalam pengukuran tegangan plasma, diperoleh data seperti dalam Tabel 4.2.

Data pada Tabel 4.2 mendukung fakta bahwa logam wolfram menghasilkan gas CO lebih banyak dari logam stainless steel karena menyalurkan tegangan keluaran plasma yang lebih besar.

Selain itu, logam wolfram ternyata juga mempunyai keuntungan lain untuk digunakan sebagai elektroda. Logam wolfram mempunyai ekspansi panas yang sama dengan gelas borosilikat yang membuat *seal* antara logam dan gelas berfungsi dengan maksimal (“Tungsten”, n.d). Logam wolfram juga tergolong logam refraktori atau logam tahan panas dan mempunyai ketahanan korosi yang tinggi.

Tabel 4.2. Tegangan Plasma Untuk Logam Wolfram dan Stainless Steel

Logam	Plasmatron	Kondisi Reaktor	Tegangan Plasma (Volt)
Wolfram	23 Watt	Vakum	14.301
		Diisi gas <i>support</i> CO ₂	31.326
	65 Watt	Vakum	20.430
		Diisi gas <i>support</i> CO ₂	37.455
Stainless Steel	23 Watt	Vakum	12.258
		Diisi gas <i>support</i> CO ₂	29.964
	65 Watt	Vakum	19.068
		Diisi gas <i>support</i> CO ₂	36.774

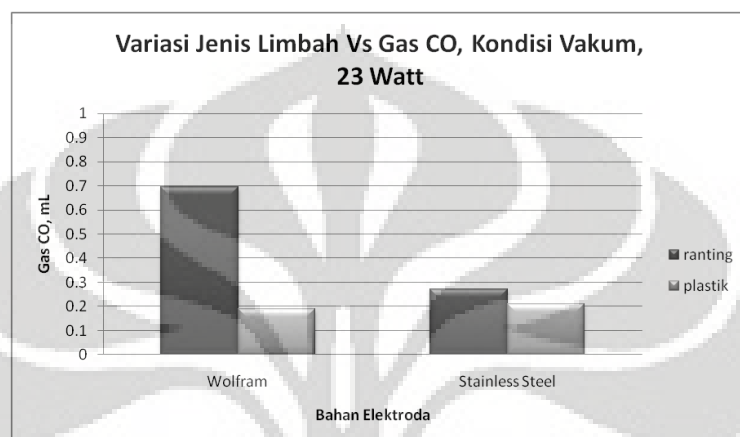
Keterangan : Data pada tabel di atas merupakan tegangan plasma dari satu buah plasmatron. Kapasitor yang digunakan merupakan nilai optimum yaitu 1000nF dan menggunakan dua batang elektroda yang dipasang paralel seperti pada percobaan. Jarak elektroda-*ground* yaitu sebesar 2 cm untuk plasmatron 23W dan 3 cm untuk plasmatron 65W. Diasumsikan dua unit plasmatron (baik 23W dan 65W) yang digunakan bersifat identik atau memiliki tegangan plasma yang sama.

Seperti yang telah dipaparkan pada sub bab sebelumnya, kondisi reaktor terisi gas *support* CO₂ menghasilkan gas CO lebih banyak dari kondisi reaktor vakum. Hal ini disebabkan gas CO₂ menjadi media penghantar yang dapat memperbaiki kinerja gasifikasi plasma non-termal.

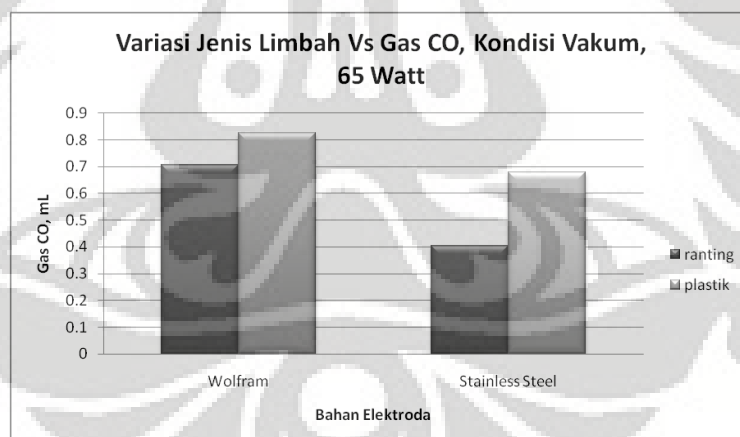
4.4 Pengaruh Jenis Limbah

Jenis limbah merupakan objek utama untuk menguji kinerja gasifikasi plasma non-termal sekaligus mengetahui potensi jenis limbah yang akan diolah.

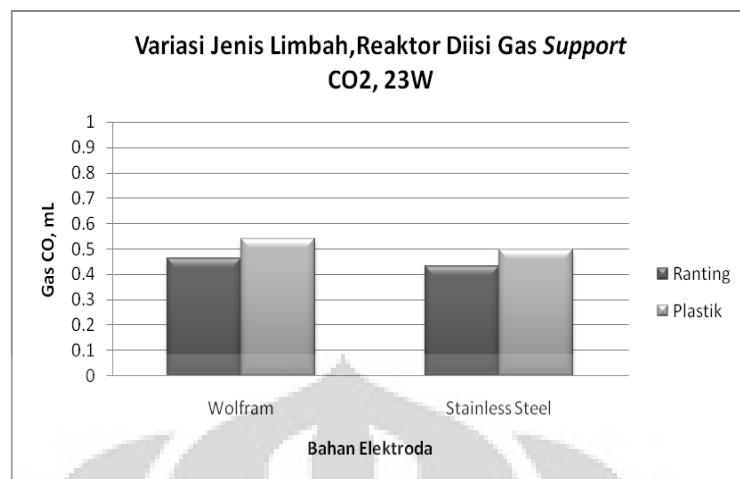
Untuk mengetahuinya, maka dilakukan percobaan gasifikasi plasma menggunakan jenis limbah lain yaitu plastik “kresék”. Nilai kapasitansi kapasitor dan jumlah elektroda yang digunakan adalah nilai optimal dari hasil percobaan pertama. Percobaan ini untuk mengetahui potensi tiap jenis limbah dalam menghasilkan gas sintesis secara kuantitatif.



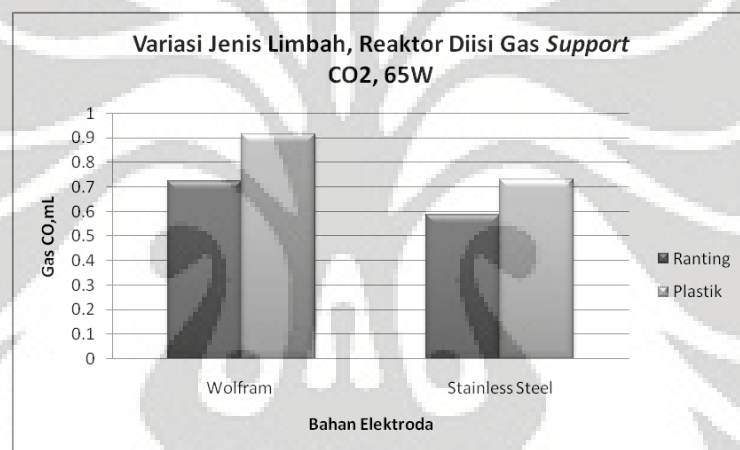
Gambar 4.8 Diagram Batang Perbandingan Antara Jenis Limbah dengan Jenis Bahan Elektroda Plasmatron 23 Watt Kondisi Reaktor Vakum



Gambar 4.9 Diagram Batang Perbandingan Antara Jenis Limbah dengan Jenis Bahan Elektroda Plasmatron 65 Watt Kondisi Reaktor Vakum



Gambar 4.10 Diagram Batang Perbandingan Antara Jenis Limbah dengan Jenis Bahan Elektroda Plasmatron 23 Watt Kondisi Reaktor Terisi Gas Support CO₂

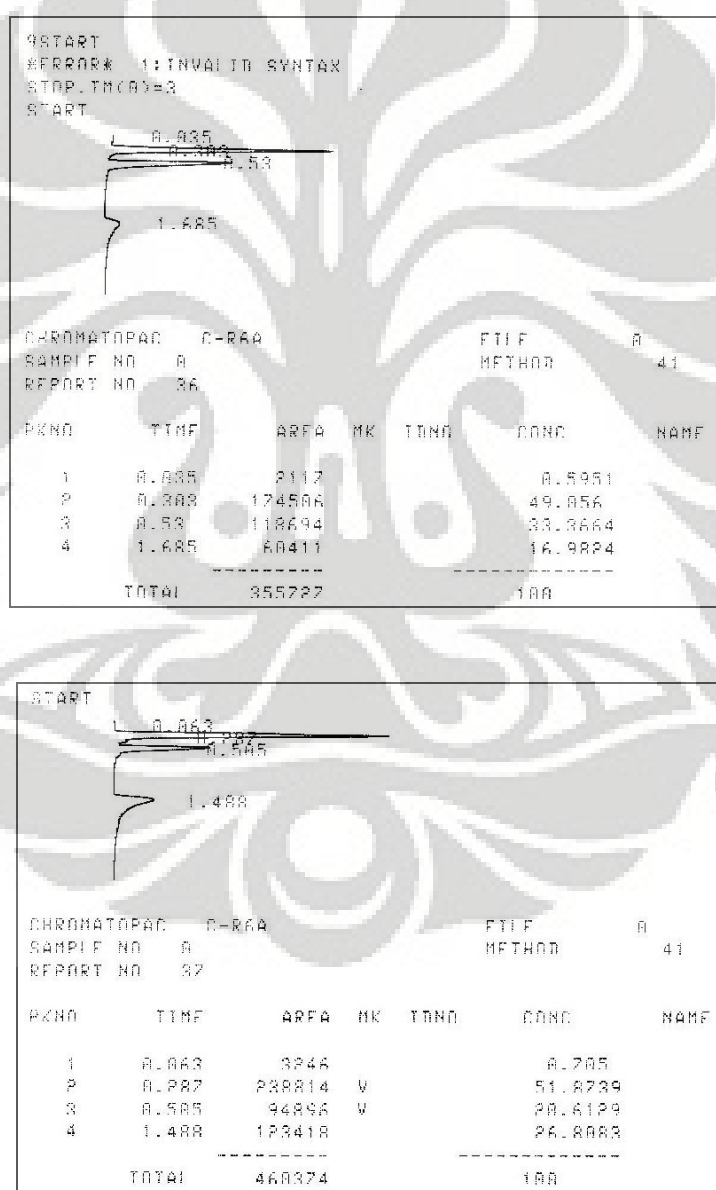


Gambar 4.11 Diagram Batang Perbandingan Antara Jenis Limbah dengan Jenis Bahan Elektroda Plasmatron 65 Watt Kondisi Reaktor Terisi Gas Support CO₂

Seperti dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan 4.9, secara umum limbah plastik “kresek” menghasilkan gas CO lebih banyak. Hal ini disebabkan dua alasan. Pertama limbah plastik lebih mudah tergasifikasi. Kedua fenomena gasifikasi plastik yang berbeda dari ranting. Pada limbah plastik, ketika satu titik terkena plasma, maka plastik-plastik di sekitar titik itu ikut terimbas efek panas plasma. Hal ini menyebabkan limbah plastik lebih banyak tergasifikasi dibandingkan limbah ranting. Lebih jauh plastik mengandung lebih banyak unsur H dan C karena merupakan polimer. Hal ini dapat dilihat pada data lengkap hasil percobaan pada lampiran.

4.5 Identifikasi Gas Produk Hasil Gasifikasi

Gasifikasi plasma non-termal diharapkan dapat menghasilkan produk gas seperti gasifikasi plasma termal. Identifikasi gas produk merupakan suatu evaluasi untuk mengetahui apakah sebenarnya plasma non-termal sama dapat digunakan untuk mengolah limbah padat dan menghasilkan gas sintesis seperti halnya plasma termal. Untuk mengevaluasinya, ditampilkan dua kromatogram hasil gasifikasi menggunakan plasmatron 65W untuk limbah ranting dan plastik “kresek” pada keadaan reaktor terisi gas *support* CO₂ dengan elektroda wolfram.



Gambar 4.12 Kromatogram GC Gasifikasi Plasma Non-Termal Keadaan Reaktor Terisi Gas *Support* CO₂ Elektroda Wolfram. Limbah Ranting (atas) dan Limbah Plastik “Kresek” (bawah)

Berdasarkan data kalibrasi GC, secara berurutan *peak* no 1-4 adalah pengotor, gas CO, gas CO₂, dan uap air. Indikasi terbentuknya gas CO₂ ditunjukkan dengan adanya warna plasma biru keputihan yang merupakan warna khas CO₂ ketika terionisasi. Adanya H₂O ditunjukkan adanya sedikit embun yang terbentuk pada dinding reaktor. Proporsi gas produk ditunjukkan pada Gambar 4.13.

Pada limbah ranting, unsur-unsur penyusun lainnya seperti belerang (S) dan nitrogen (N) tidak teroksidasi menjadi oksida-oksida dalam fasa gas (SO_x, NO_x) karena sedikitnya oksigen. Jikapun terbentuk, kadarnya sangat kecil dan sulit terdeteksi oleh analisa GC.

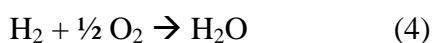


Gambar 4.13 Pie Chart Komposisi Gas Produk Gasifikasi Plamas Non-Termal Limbah Ranting (kiri) dan Limbah Plastik "Kresek" (kanan)

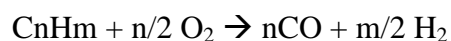
Dari Gambar 4.13 dapat dilihat limbah plastik "kresek" menghasilkan gas CO lebih banyak. Gas-gas hasil gasifikasi terbentuk dalam reaksi oksidasi parsial atau dalam keadaan sedikit oksigen. Berikut adalah gambaran reaksi-reaksi yang diperkirakan terjadi selama proses *running*:



(reaksi gasifikasi biomassa secara umum) ("Technical Discussion", n.d)



Limbah plastik merupakan polimer yang berasal dari hidrokarbon minyak bumi, gambaran umum reaksi gasifikasinya adalah sebagai berikut :



Pada gasifikasi limbah plastik “kresek” keadaan reaktor vakum dihasilkan gas yang tidak diketahui dan diindikasikan oleh adanya warna plasma hijau dan oranye pada saat *running* seperti ditunjukkan Gambar 4.14. Plastik “kresek” biasanya mengandung DOP (*Diocetyl Phthalate*) yang menyimpan benzene dan berfungsi sebagai *plasticizer*. (“Plastik dan styrofoam”, 2005). Selain itu plastik “kresek” juga mengandung logam berat Zn (seng) sebagai bahan *stabilizer*. Diduga gas yang tidak diketahui, merupakan efek dari keberadaan *plasticizer* dan *stabilizer* tersebut.



Gambar 4.14 Warna Hijau dan Orange Gasifikasi Limbah Plastik “Kresek”

Dapat disimpulkan bahwa plasma non-termal dapat digunakan untuk mengolah limbah padat namun gas sintesis yang dihasilkan belum optimal.

4.6 Kebutuhan Energi Listrik

Kebutuhan energi merupakan salah satu parameter evaluasi kinerja gasifikasi plasma non-termal. Untuk mengetahuinya, maka selama proses *running* dilakukan pengukuran tegangan dan arus masuk yang nantinya dapat dihitung kebutuhan energi untuk proses. Selain itu, juga dilakukan pengukuran tegangan

keluaran untuk mengetahui besarnya tegangan yang dibangkitkan oleh plasmatron.

Jika arus listrik mengalir pada suatu penghantar yang berhambatan R , maka sumber arus akan mengeluarkan energi pada penghantar yang bergantung pada:

- Beda potensial pada ujung-ujung penghantar (V).
- Kuat arus yang mengalir pada penghantar (i).
- Waktu atau lamanya arus mengalir (t).

Berdasarkan pernyataan di atas, dan karena harga $V = R \cdot i$, maka persamaan energi listrik dapat dirumuskan dalam bentuk :

Energi (E) = Kebutuhan daya x waktu = $P \cdot t = V \cdot i \cdot PF \cdot t$

Energi (E) = $i^2 \cdot R \cdot PF \cdot t$

Berikut ini disajikan tabel kebutuhan daya (P) dan kebutuhan energi listrik (E) untuk masing-masing percobaan yang terdiri dari dua unit plasmatron.

a. Variasi Jumlah Elektroda dan Nilai Kapasitansi Kondisi Vakum

Plasmatron 23 Watt

Jumlah Elektroda	C (nanoFarad)	P(Watt)	E(Watt.hr)
4	47	51,87	186732
	330	49,875	179550
	1000	51,87	186732
5	47	51,87	186732
	330	49,875	179550
	1000	51,87	186732

Plasmatron 65 Watt

Jumlah Elektroda	C (nanoFarad)	P(Watt)	E(Watt.hr)
4	100	119,7	430920
	330	159,6	574560
	1000	127,68	459648
5	100	127,68	459648
	330	151,162	545832
	1000	143,64	517104

b. Variasi Bahan Elektroda Kondisi Vakum

C=1000 nF; Elektroda=Stainless Steel; Jumlah elektroda=4

Plasmatron	Bahan elektroda	P(Watt)	E(Watt.hr)
23 W	Wolfram	51,87	186732
	Stainless Steel	49,875	179550
65 W	Wolfram	127,68	459648
	Stainless Steel	111,72	402192

c. Variasi Jenis Limbah Padat Kondisi Vakum

Plasmatron 23 Watt; C=1000 nF; Jumlah elektroda=4

Limbah	Bahan elektroda	P(Watt)	E(Watt.hr)
Ranting	Wolfram	51,87	186732
	Stainless Steel	49,875	179550
Plastik	Wolfram	51,87	186732
	Stainless Steel	51,87	186732

Plasmatron 65 Watt; C= 1000 nF; Jumlah elektroda=4

Limbah	Bahan elektroda	P(Watt)	E(Watt.hr)
Ranting	Wolfram	127,68	459648
	Stainless Steel	111,72	402192
Plastik	Wolfram	123,69	445284
	Stainless Steel	119,7	430920

d. Kondisi Reaktor Diisi Gas Support CO₂ ; C=1000 nF

Wolfram

Plasmatron	Jenis limbah	P(Watt)	E(Watt.hr)
23 W	Plastik	87,78	316008
	Ranting	87,78	316008
65 W	Rantng	167,58	603288
	Plastik	167,58	603288

Stainless Steel

Plasmatron	Jenis limbah	P(Watt)	E(Watt.hr)
23 W	Plastik	87,78	316008
	Ranting	87,78	316008
65 W	Plastik	167,58	603288
	Ranting	167,58	603288

Pada poin (a), terlihat perbedaan yang jelas antara kebutuhan energi plasmatron 23 watt dan 65 watt. Namun, baik untuk plasmatron 23 watt dan 65

watt, variasi 3 nilai kapasitansi kapasitor tidak menunjukkan perbedaan kebutuhan energi yang signifikan. Hal ini diduga karena ketiga nilai kapasitor memiliki spesifikasi tegangan maksimum yang sama, sehingga tidak terjadi perbedaan yang besar dalam kebutuhan energi.

Pada poin (b) dan (c), wolfram dapat mengalirkan arus yang lebih besar dari stainless steel. Seperti telah dibahas pada sub bab 4,3, logam wolfram memiliki konduktivitas listrik yang lebih besar, sehingga dapat mengalirkan arus lebih banyak,

Pada poin (d) dapat dilihat bahwa kebutuhan energi kondisi reaktor diisi dengan gas *support* CO₂ lebih besar dari kondisi vakum. Pada bola plasma, tekanan dalam bola biasanya rendah sekitar 2-7 torr (sekitar 0,01 atm). Alasannya, semakin besar tekanan dalam bola, semakin besar tegangan yang dibutuhkan untuk mengionisasi gas dan semakin banyak arus yang mengalir, (“Plasma globes”, 2009). Adanya gas CO₂ memberikan tekanan dalam reaktor, sehingga tegangan yang dibutuhkan untuk mengionisasi lebih besar daripada keadaan vakum, dan tentu saja lebih banyak arus yang mengalir.

4.7 Keefektivan Reduksi Massa Limbah Padat

Reduksi massa sebagai salah satu parameter kinerja proses gasifikasi plasma non-termal perlu dievaluasi untuk mengetahui keefektivan gasifikasi plasma non-termal dalam mengurangi massa limbah. Semakin besar persentase reduksi massa limbah berarti proses yang terjadi semakin efektif. Dalam penelitian ini diharapkan diperoleh persentase reduksi massa limbah yang besar seperti halnya gasifikasi plasma termal. Data yang diambil merupakan data dengan variabel optimal yaitu kapasitor 1000nF dan jumlah elektroda 4 buah.

Kondisi Reaktor Vakum

Sampel	Bahan Elektroda	% Reduksi Massa Limbah	
		23 W	65 W
Ranting	Wolfram	20	22,86
	Stainless Steel	14,29	20
Plastik	Wolfram	8,57	34,29
	Stainless Steel	14,29	31,43

Kondisi Reaktor Terisi Gas *Support* CO₂

Sampel	Bahan Elektroda	% Reduksi Massa Limbah	
		23 W	65 W
Ranting	Wolfram	14,29	22,86
	Stainless Steel	14,29	25,71
Plastik	Wolfram	22,86	37,14
	Stainless Steel	17,14	28,58

Dari kedua tabel di atas kita dapat menyimpulkan beberapa hal. Pertama, semua data di atas menunjukkan persentase reduksi massa plasmatron 65W selalu lebih besar dari plasmatron 23W. Hal ini seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 4.2 karena plasmatron 65W mempunyai kekuatan plasma yang lebih besar sehingga dapat menggasifikasi limbah padat lebih banyak.

Kedua, secara umum kondisi reaktor terisi gas *support* CO₂ menghasilkan persentase reduksi massa yang lebih besar dari kondisi vakum. Hal ini seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 4.2 karena keberadaan gas *support* CO₂ sebagai media penghantar membuat plasma lebih dinamis sehingga limbah yang tergasifikasi lebih banyak.

Ketiga, persentase reduksi massa limbah plastik lebih besar dari limbah ranting dan hal ini terlihat jelas pada kondisi terisi gas *support* CO₂. Limbah plastik seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 4.4 lebih mudah tergasifikasi dari ranting. Kemudian, limbah plastik mudah terimbas efek panas plasma dibandingkan limbah ranting baik dalam reaktor keadaan vakum maupun terisi gas *support* CO₂. Dengan demikian limbah plastik lebih banyak tergasifikasi dari limbah ranting.

Dalam penelitian ini kemampuan plasma non-termal untuk mereduksi massa limbah belum mencapai nilai optimal dan masih dapat ditingkatkan.

Secara umum, dalam keadaan vakum rata-rata persentase reduksi massa untuk plasmatron 23W adalah 14,29% dan plasmatron 65W sebesar 27,15%. Kemudian untuk keadaan reaktor terisi gas *support* CO₂ rata-rata persentase reduksi massa untuk plasmatron 23W adalah 17,15% dan plasmatron 65W sebesar 28,58%.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari penelitian ini dapat ditarik beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Berdasarkan parameter kinerja proses, baik untuk plasmatron CFL-23W dan 65W variabel optimal penelitian yaitu menggunakan kapasitansi 1000 nF dan menggunakan elektroda wolfram sebanyak 4 buah.
2. Plasmatron dengan kinerja paling tinggi yaitu plasmatron CFL-65W.
3. Adanya gas *support* CO₂ dalam reaktor dapat memperbaiki kinerja gasifikasi plasma non-termal baik dengan plasmatron CFL-23W maupun plasmatron CFL-65W. Selain itu, plasma dalam reaktor diisi gas *support* CO₂ lebih dinamis daripada plasma dalam reaktor vakum
4. Limbah plastik "kresek" menghasilkan gas sintesis lebih banyak dari limbah ranting
5. Dalam keadaan reaktor vakum rata-rata persentase reduksi massa untuk plasmatron 23W adalah 14,29% dan plasmatron 65W sebesar 27,15%. Kemudian untuk keadaan terisi gas CO₂ rata-rata persentase reduksi massa untuk plasmatron 23W adalah 17,15% dan plasmatron 65W sebesar 28,58%
6. Kekuatan gasifikasi plasma tidak hanya dipengaruhi tegangan keluaran, tetapi juga dipengaruhi oleh frekuensi pembangkit plasma yang digunakan
7. Plasma non-termal dapat digunakan untuk mengolah limbah padat namun jumlah gas sintesis dan persentase reduksi massa limbah yang diperoleh belum mencapai nilai optimal

Saran-saran :

Dari hasil percobaan ini, maka diperlukan upaya untuk menyempurnakan rancangan alat penelitian baik reaktor gasifikasi, plasmatron, dan kinerjanya dengan lebih seksama. Adapun penyempurnaan tersebut meliputi :

1. Untuk menghasilkan kinerja yang lebih baik disarankan 1 unit plasmatron digunakan untuk hanya untuk 1 batang elektroda saja
2. Bagaimana cara membuat efek agar plasma dapat fokus dan menyebar?
3. Bagaimana membuat desain reaktor yang membuat plasma dan limbah mempunyai kesempatan kontak yang lebih baik ?

4. Bentuk elektroda yang bagaimana yang dapat menghantarkan plasma dengan fokus?
5. Selain reaktor diisi gas *support* juga bisa ditambahkan *steam* supaya terbentuk gas H₂ lebih banyak
6. Menggunakan analisa GC dengan lebih seksama



DAFTAR REFERENSI

- Fridman, et.al. (n.d). Bio-medical applications of non-thermal atmospheric pressure plasma. *Plasma Medicine Lab, Drexel Plasma Institute*.
- H. Huang, L.Tang. (2007). Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology. *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 1331-1337.
- Leal-Quiros, Edbertho .(2004). Plasma processing of municipal solid waste. *Brazilian Journal Physics*. Vol 34 no.4B , p 1587.
- Ouni, F., Khacef, A., Cormier, J.M. (2009). Syngas production from propane using atmospheric non-thermal plasma. *Journal of Plasma Chem Plasma Process*. DOI 10.1007/sl 1090-009-9166-2
- Petrucci, Ralph H, Suminar. (1987). Kimia dasar: Prinsip dan terapan modern Edisi ke-4-Jillid 2. Jakarta : Penerbit Erlangga.
- A,P, Napartovich. (n.d). Atmospheric pressure non-thermal plasma : Source and applications. *Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade*, vol 84, pp. 250.June 17, 2009.
<http://adsabs.harvard.edu/>
- Capacitor. (n.d). June 20, 2009.
<http://www.wikipedia.org/wiki/Capacitor.htm>
- C-Tech Innovation Ltd. (2003). Thermal methods of municipal waste treatment. May 15, 2009.
<http://www.capenhurts.com>
- Elert, Glenn. (n.d).Resistivity of tungsten. June 10, 2009.
<http://hypertextbook.com/facts/2004/DeannaStewart.shtml>
- Elert, Glenn. (n.d).Resistivity of steel. June 10, 2009.
<http://hypertextbook.com/facts/2006/UmransUgur.shtml>
- Frequently asked questions. (n.d). May 12, 2009
<http://www.recoveredenergy.com/faq.html>
- LaBarge, William, et.al. (2005, Feb 8). Non-thermal plasma reactor gas treatment system. United States Patent. 6852200 B2. May 15, 2009.
<http://www.freepatentsonline.com/6852200.html>
- Louis Naudin, Jean. (2003). How to find primary and secondary coils of a flyback transformer. June 5, 2009.
<http://lifters.online.fr/lifters/labhvps/tht.hu>

Michael, Hutagalung. (2007). Teknologi pengolahan sampah. *MajariMagazine*. December 20, 2008.

<http://www.majarimagazine.com/topics/teknologi/teknolgi-pengolahan-sampah.html>

Mechanism work of plasma torch. (n.d). May 12, 2009

http://www.recoverd.com/d_plasma.html

Nonthermal plasma. (n.d). March 3, 2009.

http://www.wikipedia.org/wiki/Nonthermal_plasma.html

Phy_wan.(2005). Plastik dan Styrofoam. June 3, 2009

<http://forum.upi.edu/v3/index.php?PHPSESSID=913fe78f835893b627943aec7d99f377&topic=1548.msg10571#msg10571.html>

Plasma (physics). (n.d). March 3, 2009.

[http://www.wikipedia.org/wiki/Plasma_\(physics\).html](http://www.wikipedia.org/wiki/Plasma_(physics).html)

PowerLabs Plasma Globes Page.(2009). May 5, 2009

<http://www.powerlabs.org/plasmaglobe.htm>

Simple Schematic of a plasma gasifier. June 5, 2009

<http://www.safewasteandpower.com/process.html>

Technical Discussion. (n.d) May 12, 2009.

http://www.recoverdenergy.com/technical_brief.html

Thermochemical.(n.d). June 11, 2009.

<http://www.renegy.com>

Tungsten. (n.d) June 10, 2009.

<http://www.wikipedia.org/wiki/tungsten.html>

Waste Processing. n.d. May 15, 1009.

<http://www.westinghouse-plasma.com/wasteprocessing.html>

Lampiran 1. Data Hasil Percobaan

Data Hasil Percobaan

1) Variasi Nilai Kapasitansi Kapasitor dan Jumlah Elektroda

- Sampel = ranting
- Elektroda = wolfram
- Berat sampel (W_1) = 0,35 gram
- Waktu gasifikasi (t) = 5 menit
- Kondisi reaktor = vakum
- Jarak elektroda-ground plasmatron 23 watt = 2 cm
- Jarak elektroda-ground plasmatron 65 watt = 3 cm

a. Kondisi vakum Plasmatron 23 watt

Jumlah elektroda (n) = 4

C (nFarad)	i (mA)	V	W_2 (gr)	CO (mL)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	E(Watt.hr)
47	130	210	0,29	0,6008	25,935	51,87	186732
330	125	210	0,29	0,5619	24,938	49,875	179550
1000	130	210	0,28	0,6944	25,935	51,87	186732

Jumlah elektroda (n) = 5

C (nFarad)	i (mA)	V	W_2 (gr)	CO (mL)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	E(Watt.hr)
47	130	210	0,29	0,5885	25,935	51,87	186732
330	125	210	0,29	0,2745	24,938	49,875	179550
1000	130	210	0,25	0,3278	25,935	51,87	186732

b. Kondisi vakum Plasmatron 65 watt

Jumlah elektroda (n) = 4

C (nFarad)	i (mA)	V	W_2 (gr)	CO (mL)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	E(Watt.hr)
100	300	210	0,29	0,3256	59,85	119,7	430920
330	400	210	0,29	0,2503	79,8	159,6	574560
1000	320	210	0,27	0,7077	63,84	127,68	459648

Jumlah elektroda (n) = 5

C (nFarad)	i (mA)	V	W_2 (gr)	CO (mL)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	E(Watt.hr)
47	320	210	0,29	0,5762	63,84	127,68	459648
330	380	210	0,29	0,5533	75,81	151,162	545832
1000	360	210	0,3	0,6059	71,82	143,64	517104

Dari percobaan 1 diperoleh :

- Jumlah elektroda optimum plasmatron 23 watt = 4 buah

- Jumlah elektroda optimum plasmatron 65 watt = 4 buah
- Kapasitansi optimum plasmatron 23 watt = 1000 nanoFarad
- Kapasitansi optimum plasmatron 65 watt = 1000 nanoFarad

2) Variasi Bahan Elektroda

- Sampel = ranting
- Elektroda = stainless steel
- Berat sampel (W_1) = 0,35gram
- Waktu gasifikasi (t) = 5 menit
- Kondisi reaktor = vakum
- Jarak elektroda-ground plasmatron 23 watt = 2 cm
- Jarak elektroda-ground plasmatron 65 watt = 3 cm

Jumlah elektroda dan nilai kapasitansi yang digunakan merupakan hasil dari percobaan 1

Plasmatron	i (mA)	V	W_2 (gr)	CO (mL)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	E(Watt.hr)
23 Watt	125	210	0,3	0,2719	24,938	49,875	179550
65 Watt	280	210	0,28	0,4027	55,86	111,72	402192

3) Variasi Jenis Limbah

- Sampel = plastik kresek
- Berat sampel (W_1) = 0,35 gram
- Waktu gasifikasi (t) = 5 menit
- Kondisi reaktor = vakum
- Jarak elektroda-ground plasmatron 23 watt = 2 cm
- Jarak elektroda-ground plasmatron 65 watt = 3 cm

Percobaan 3 juga menggunakan hasil dari percobaan 1

a. Plasmatron 23 Watt

Bahan elektroda	i (mA)	V	W_2 (gr)	CO (mL)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	E(Watt.hr)
Wolfram	130	210	0.32	0.1896	25,935	51,87	186732
Stainless Steel	130	210	0.3	0.2102	25,935	51,87	186732

b. Plasmatron 65 Watt

Bahan elektroda	i (mA)	V	W_2 (gr)	CO (mL)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	E(Watt.hr)
Wolfram	310	210	0.23	0.8254	61,845	123,69	445284
Stainless Steel	300	210	0.24	0.6795	59,85	119,7	430920

4) Variasi Kondisi Reaktor Terisi Gas CO₂

- Sampel = ranting dan plastik kresek
- Berat sampel (W_1) = 0,35 gram
- Waktu gasifikasi (t) = 5 menit
- Elektroda = wolfram dan stainless steel
- Jarak elektroda-ground plasmatron 23 watt = 2 cm
- Jarak elektroda-ground plasmatron 65 watt = 3 cm

Percobaan 4 juga menggunakan hasil dari percobaan 1

Elektroda Wolfram

Ranting

Plasmatron	i (mA)	V	W ₂ (gr)	CO (mL)	P ₁ (Watt)	P ₂ (Watt)	E(Watt.hr)
23 Watt	220	210	0,3	0,4644	43,89	87,78	316008
65 Watt	420	210	0,27	0,7235	83,79	167,58	603288

Plastik

Plasmatron	i (mA)	V	W ₂ (gr)	CO (mL)	P ₁ (Watt)	P ₂ (Watt)	E(Watt.hr)
23 Watt	220	210	0,27	0,5389	43,89	87,78	316008
65 Watt	420	210	0,22	0,9164	83,79	167,58	603288

Elektroda Stainless steel

Ranting

Plasmatron	i (mA)	V	W ₂ (gr)	CO (mL)	P ₁ (Watt)	P ₂ (Watt)	E(Watt.hr)
23 Watt	220	210	0,3	0,4314	43,89	87,78	316008
65 Watt	420	210	0,26	0,5874	83,79	167,58	603288

Plastik

Plasmatron	i (mA)	V	W ₂ (gr)	CO (mL)	P ₁ (Watt)	P ₂ (Watt)	E(Watt.hr)
23 Watt	220	210	0,29	0,4987	43,89	87,78	316008
65 Watt	420	210	0,25	0,7323	83,79	167,58	603288

Keterangan :

1. Luas area gas CO yang terbaca pada semua keadaan vakum selalu lebih besar dari luas area rata-rata kalibrasi gas CO pada volum 1 mL. Jika dimasukkan dalam persamaan akan menghasilkan volum lebih dari satu mL. Hal ini tidak mungkin karena volum gas yang di-inject-kan pada GC hanya satu mL. Diduga gas CO dan udara terdeteksi dalam *peak* yang sama. Masih adanya udara dalam reaktor dimungkinkan karena reaktor divakumkan dalam level ringan. Maka untuk menghitung volum gas CO, sebelum luas area-nya

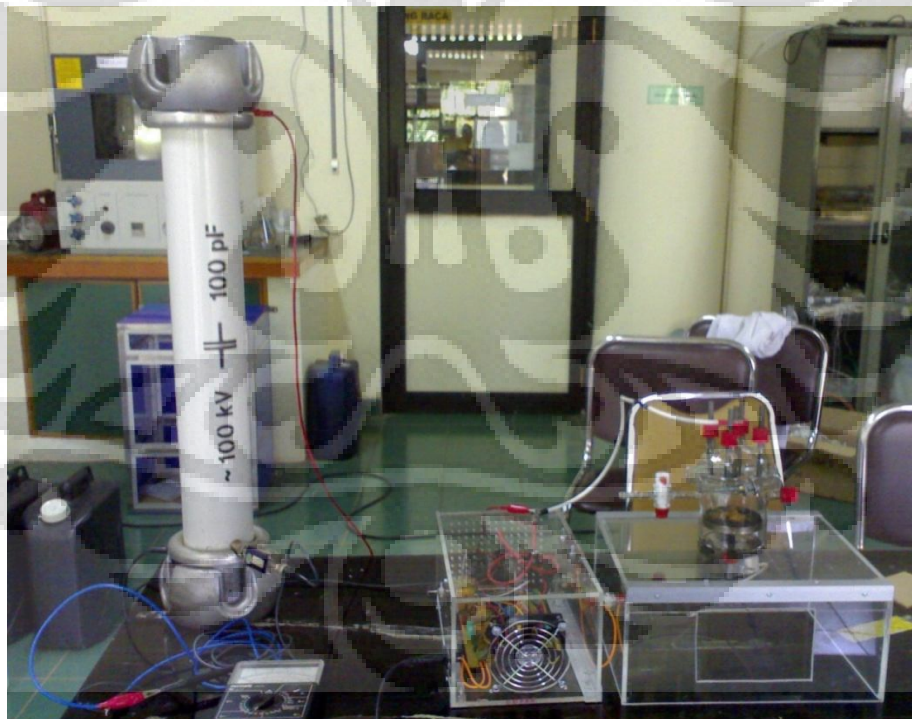
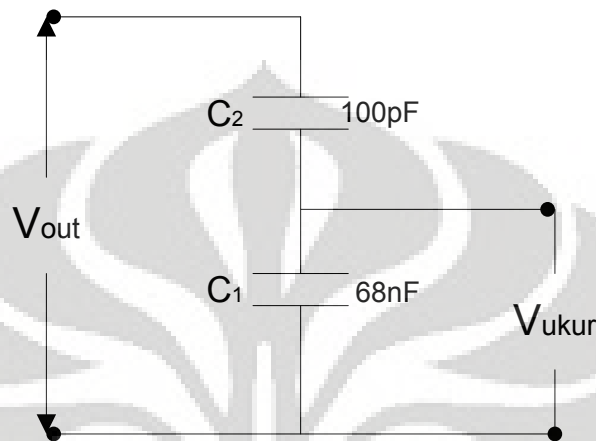
dimasukkan dalam persamaan garis, terlebih dahulu dikurangkan dengan luas area rata-rata udara dalam reaktor yang telah divakumkan yaitu sebesar **313823,33**

2. Berbeda dengan keadaan vakum, pada keadaan terisi gas *support* CO₂ luas area rata-rata gas CO selalu lebih kecil dari luas area rata-rata kalibrasi gas CO. Artinya (diasumsikan) tidak ada udara yang terisisa dalam reaktor, dan dalam reaktor hanya terdapat gas CO₂. Maka pada keadaan terisi gas *support* CO₂, luas area gas CO tidak perlu dikurangi luas area rata-rata udara dalam reaktor yang telah divakumkan.
3. Daya yang tertera pada tabel-tabel di atas merupakan kebutuhan (energi) daya sesungguhnya. Untuk menghitung daya sesungguhnya, dibutuhkan *power factor* (PF) yang merupakan rasio daya sesungguhnya dengan daya yang terlihat. Untuk rangkaian elektronik AC, PF-nya bernilai antara 0,9-1,0. Dalam penelitian ini, PF dinyatakan sebesar ~ 0,95 (berdasarkan pengukuran yang dilakukan oleh Ir. Amien Rahardjo, M.T.) Daya sesungguhnya dihitung dengan rumus $P = V \cdot i \cdot PF$ atau $P = V \cdot i \cdot (1,0)$.
 - **P₁**= Kebutuhan daya sesungguhnya satu unit plasmatron
 - **P₂**= Kebutuhan daya sesungguhnya dua unit plasmatron
(karena keterbatasan alat, selama proses *running*, pengukuran voltase dan arus masuk dilakukan hanya untuk satu unit plasmatron sehingga unit plasmatron yang lain diasumsikan bersifat identik atau memiliki kebutuhan daya yang sama)
 - **E (Watt.hr)** = Kebutuhan energi proses untuk waktu satu jam yang dihitung dengan rumus **$E(\text{Watt.hr}) = P_2 \cdot 3600$**
4. GC yang digunakan yaitu tipe TCD, dengan kolom packing porapak Q, dengan carrier gas Argon. Suhu Injectin 130⁰C, kolom 100⁰C, keluaran 100⁰C.

Lampiran 2. Pengukuran Tegangan Plasma

Pengukuran Tegangan Plasma

Peralatan yang dibutuhkan adalah kapasitor tegangan tinggi dan voltmeter. Untuk mengukur tegangan plasma, rangkaian dan susunan peralatannya adalah seperti berikut :



Vukur dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$V_{out} = \frac{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}{\frac{1}{C_2}} \times V_{ukur}$$

$$V_{out} = \frac{\frac{1}{1000 \times 10^{-12}} + \frac{1}{68 \times 10^{-9}}}{\frac{1}{68 \times 10^{-9}}} \times V_{ukur}$$

Bahan Elektroda	Plasmatron	Kondisi Reaktor	V _{ukur} (Volt)	V _{out} /Tegangan Plasma (Volt)
Wolfram	23 Watt	Vakum	21	14.301
		Diisi gas <i>support</i> CO ₂	46	31.326
	65 Watt	Vakum	30	20.430
		Diisi gas <i>support</i> CO ₂	55	37.455
Stainlees Steel	23 Watt	Vakum	18	12.258
		Diisi gas <i>support</i> CO ₂	44	29.964
	65 Watt	Vakum	28	19.068
		Diisi gas <i>support</i> CO ₂	54	36.774

Keterangan : Data pada tabel di atas merupakan tegangan plasma dari **satu buah plasmatron**. Kapasitor yang digunakan merupakan nilai optimum yaitu 1000nF dan menggunakan dua batang elektroda yang dipasang paralel seperti pada percobaan. Jarak elektroda-ground yaitu sebesar 2 cm untuk plasmatron 23W dan 3 cm untuk plasmatron 65W. Diasumsikan dua unit plasmatron (baik 23W dan 65W) yang digunakan bersifat identik atau memiliki tegangan plasma yang sama.

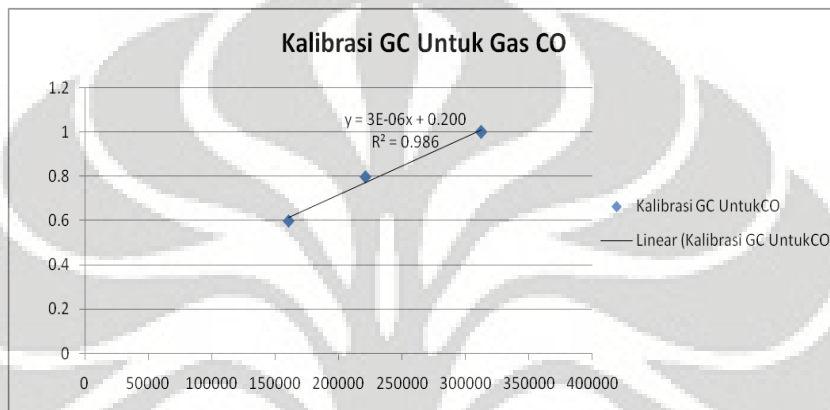
Lampiran 3. Data Kalibrasi GC Gas Sintesis

Data Kalibrasi gas CO dan H₂

❖ Gas CO

Volume (ml)	Luas area				Waktu retensi (menit)		
	1	2	3	rata-rata	1	2	3
1	272084	272334	393513	312643.6667	0,293	0,301	0,3
0,8	246303	204981	211823	221035.6667	0,298	0,302	0,297
0,6	157656	159612	163795	160354.3333	0,295	0,297	0,298

Waktu retensi rata-rata = 0,298

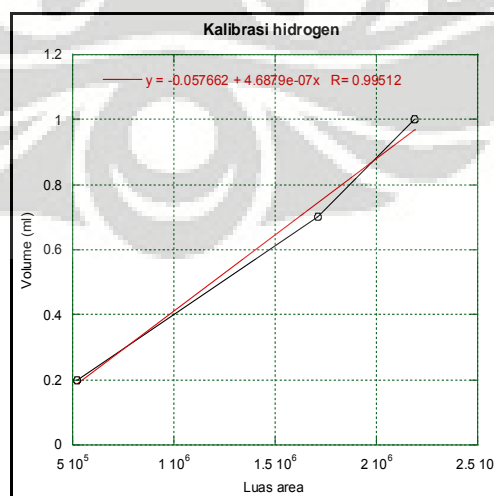


Persamaan garis $y = 3 \times 10^{-6}x + 0,2$

❖ Gas H₂

Volume (ml)	Luas area				Waktu retensi (menit)		
	1	2	3	rata-rata	1	2	3
1	1907558	2321412	2335304	2188091	0,26	0,223	0,23
0,7	1713888	1785486	1635275	1711550	0,24	0,203	0,243
0,2	545129	542134	479807	522357	0,237	0,25	0,245

Waktu retensi rata-rata = 0,237 menit



Persamaan garis $y = -0,057662 + 4,6879 \times 10^{-7}x$

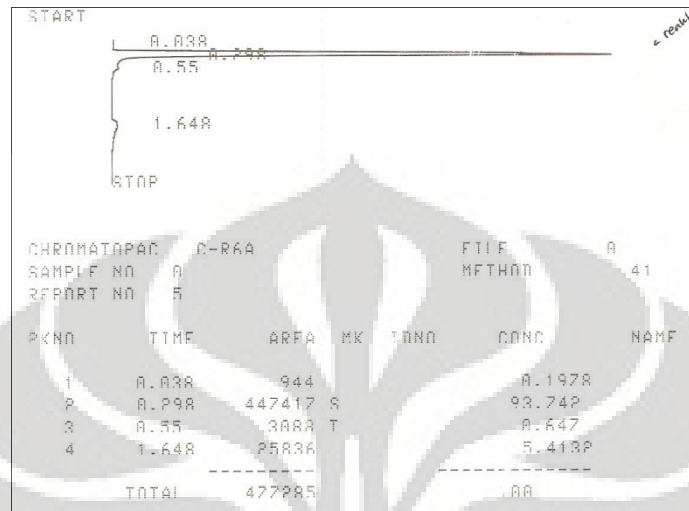
Lampiran 4. Kromatogram GC

Kromatogram GC Data Hasil Percobaan

1. Plasmatron 23 W kondisi vakum

a. Jumlah elektroda = 4

47 nF



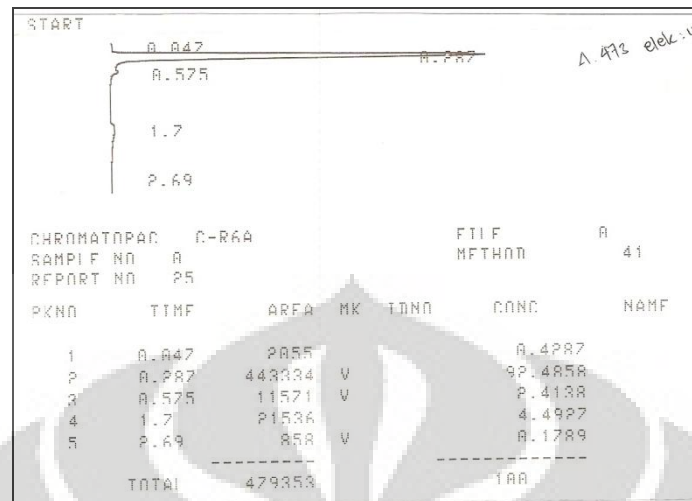
330nF



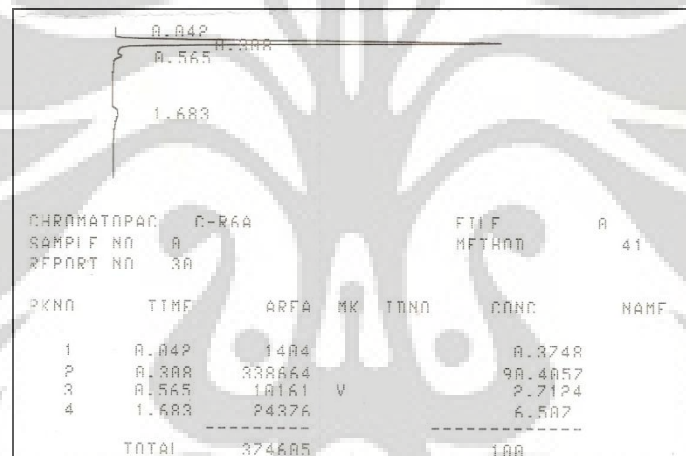
1000nF



- b. Jumlah elektroda = 5
47nF



330nF



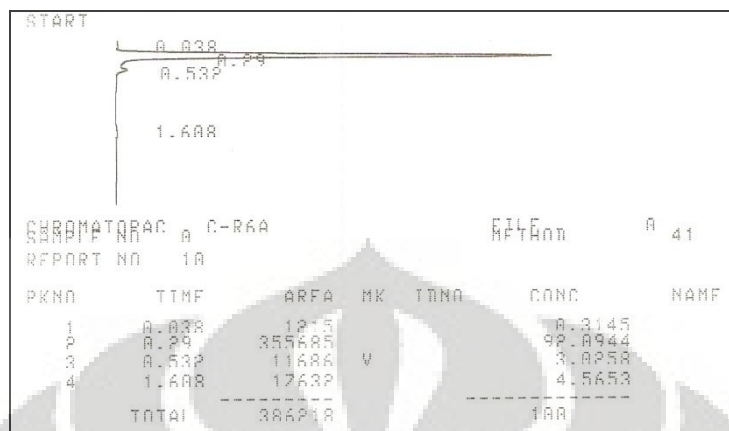
1000nF



2. Plasmatron 65W kondisi vakum

a. Jumlah Elektroda = 4

47nF



330nF

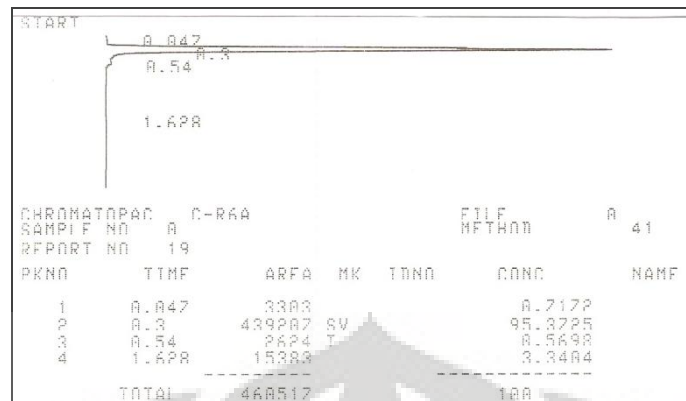


1000nF

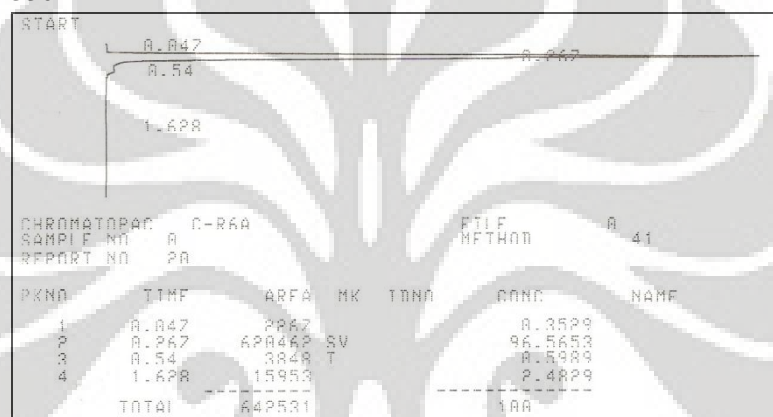


b. Jumlah Elektroda = 5

47nF



330nF

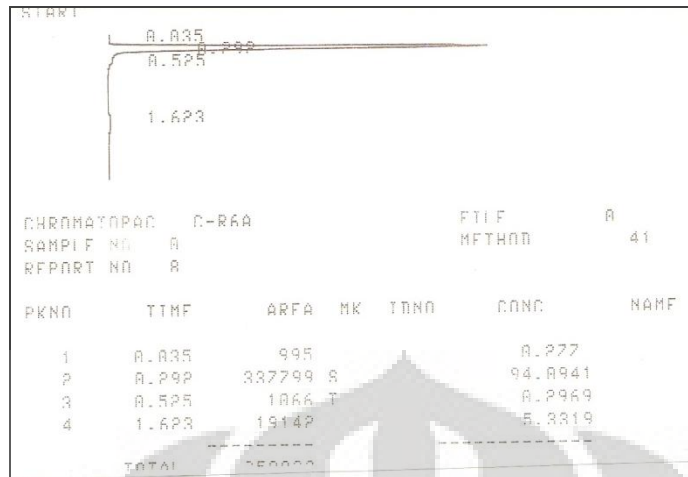


1000nF



3. Variasi Bahan Elektroda (Elektroda Stainless steel 4 buah; limbah ranting; vakum)

Plasmatron 23W

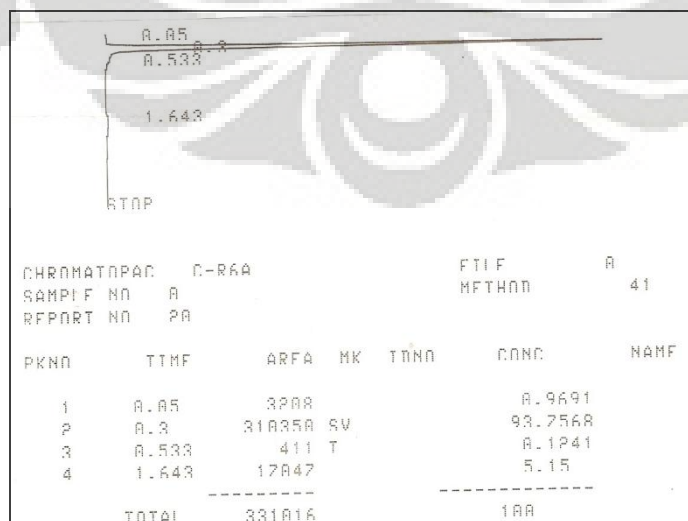


Plasmatron 65W



4. Variasi Jenis Limbah (Plastik dalam keadaan reaktor Vakum, jumlah elektroda=4)

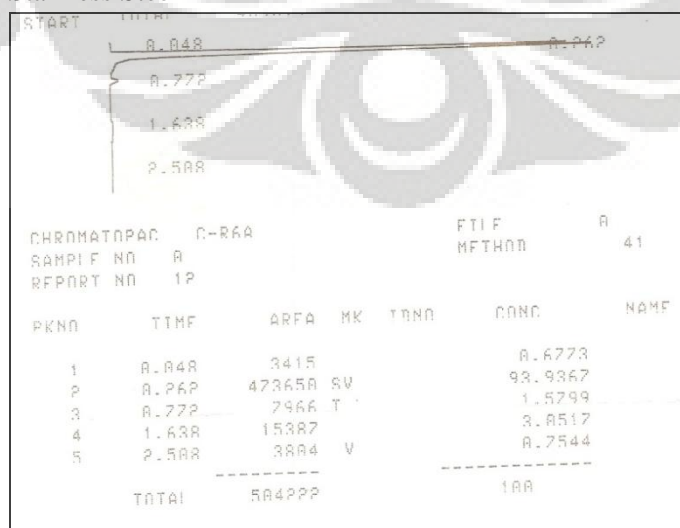
a. Plasmatron 23W Wolfram



Stainless Steel

b. Plasmatron 65W
Wolfram

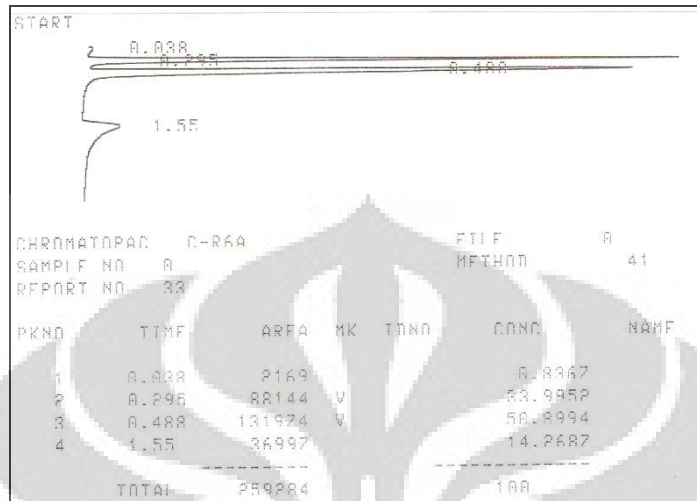
Stainless Steel



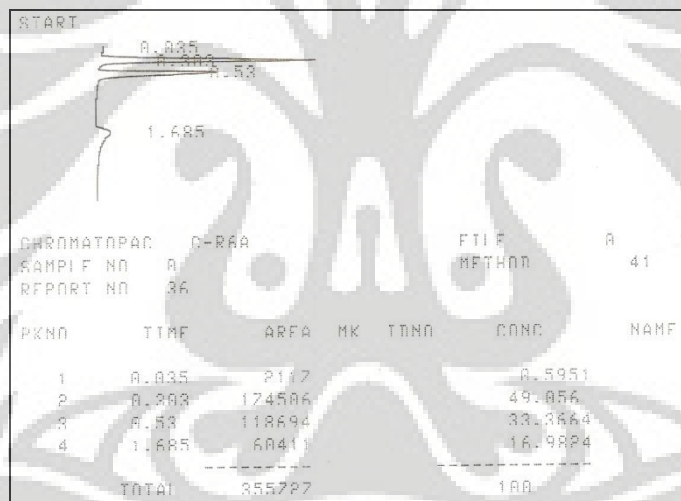
5. Variasi Kondisi Reaktor Terisi Gas CO₂ (Jumlah elektroda=4)

a. Elektroda Wolfram Limbah Ranting

Plasmatron 23W

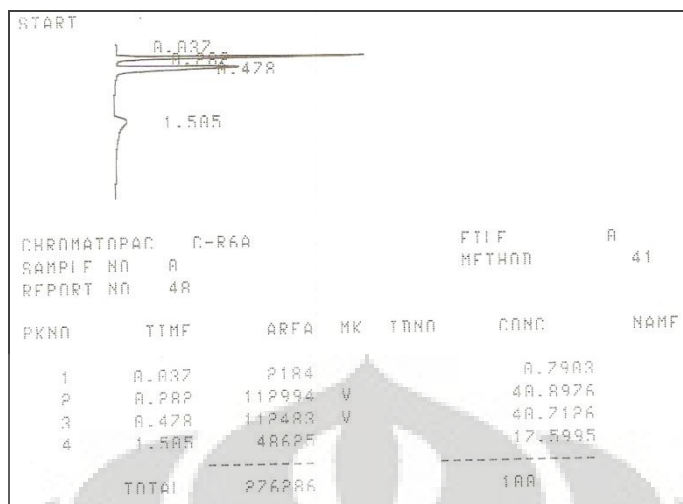


Plasmatron 65W



b. Elektroda Wolfram Limbah Plastik

Plasmatron 23W



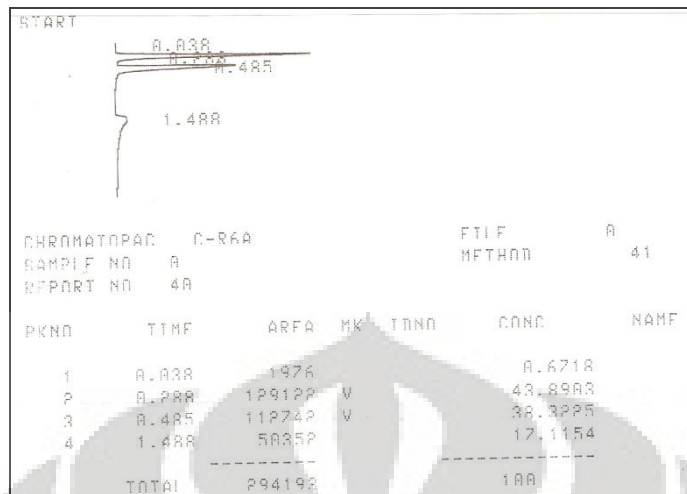
Plasmatron 65W



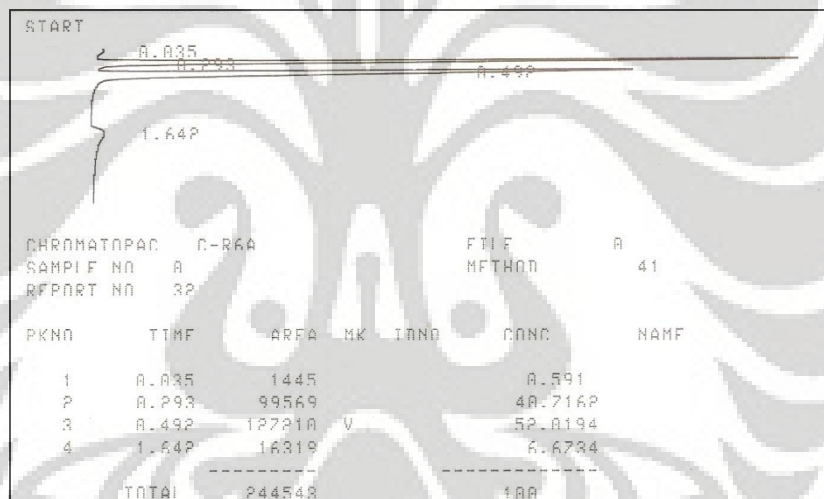
c. Elektroda Stainless Steel Limbah Ranting Plasmatron 23W



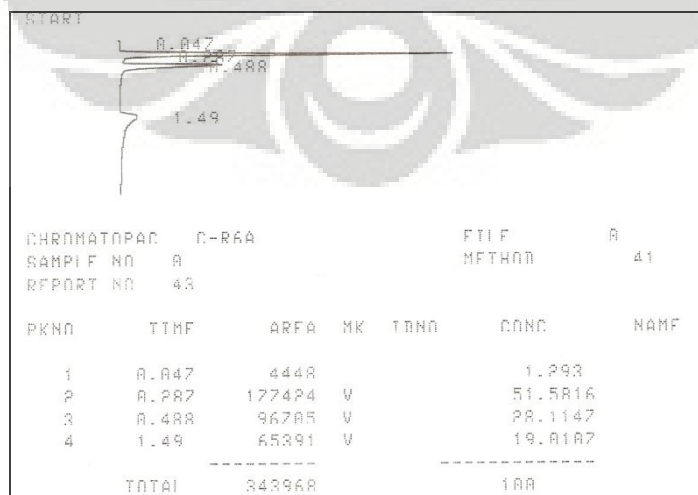
Plasmatron 65W



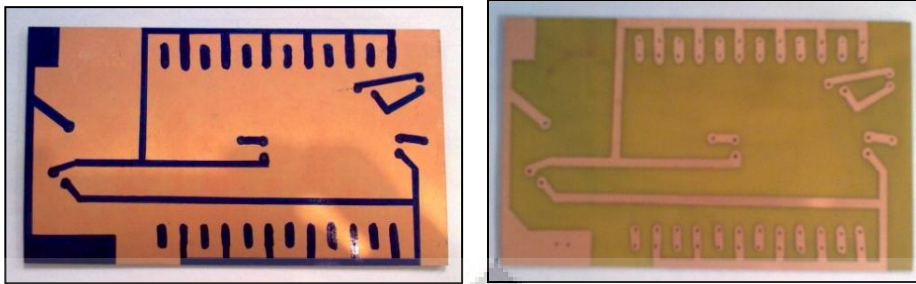
d. Elektroda Stainless Steel Limbah Plastik
 Plasmatron 23W



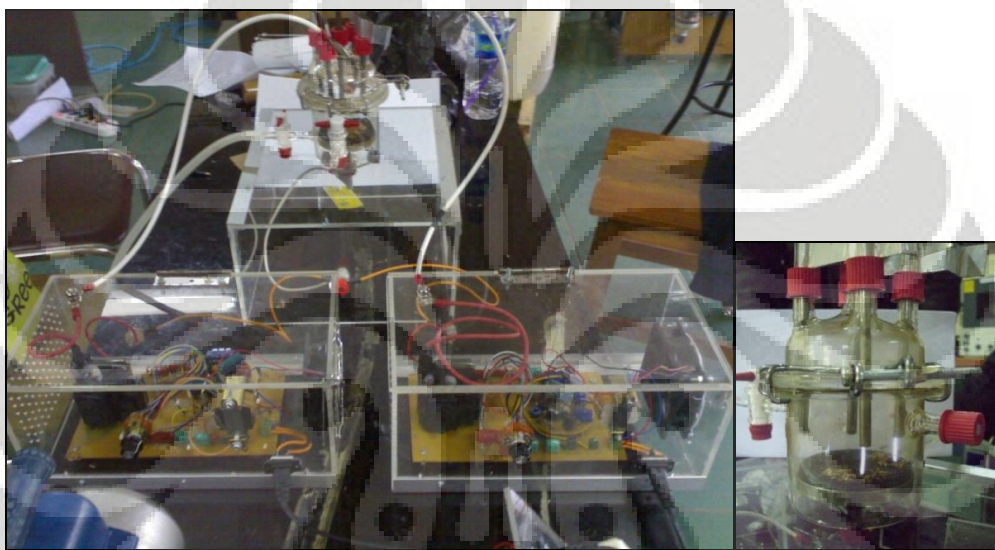
Plasmatron 65W



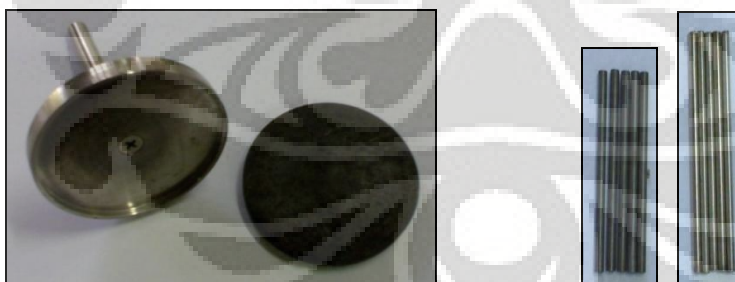
Lampiran 5 Foto-foto Alat Penelitian



Gambar 1. Permukaan Logam PCB Yang Telah Di-bor dan Dibuat Jalur Rangkaian Elektronik (**kiri**) dan PCB Yang Telah Di-etching Sekaligus Dibersihkan (**kanan**)



Gambar 2. Susunan Peralatan Pada Saat *Running* (**kiri**) dan Reaktor Plasma Non-Termal (**kanan**)



Gambar 3. Ground Yang Terdiri Dari Lempeng Grafit dan Alas Stainless Steel (**kiri**) dan Elektroda Wolfram (lebih pendek) dan Stainless Steel (**kanan**)



Gambar 4. CO Detector (**kiri**) dan Lelehan Plastik Kresek Setelah Gasifikasi (**kanan**)