



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI GASIFIKASI PLASMA NONTERMAL UNTUK  
PENGOLAHAN LIMBAH PADAT ORGANIK MENGGUNAKAN  
PLASMATRON DAN GENERATOR PLASMA HVT**

**SKRIPSI**

**DESTANINGGARA TRESNA K. P.  
040506701Y**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
UNIVERSITAS INDONESIA  
JULI 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI GASIFIKASI PLASMA NONTERMAL UNTUK  
PENGOLAHAN LIMBAH PADAT ORGANIK MENGGUNAKAN  
PLASMATRON DAN GENERATOR PLASMA HVT**

**SKRIPSI**

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

**DESTANINGGARA TRESNA K. P.  
04 05 06 70 1Y**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
UNIVERSITAS INDONESIA  
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 : Destaninggara Tresna K. P.**

**NPM : 040506701Y**

**Tanda Tangan :** 

**Tanggal : 01 Juli 2009**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Destaninggara Tresna K. P.  
NPM : 040506701Y  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Studi Gasifikasi Plasma Nontermal untuk Pengolahan Limbah Padat Organik Menggunakan Plasmatron dan Generator Plasma HVT

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr.Ir. Setijo Bismo, DEA

Penguji : Ir. Sutrasno Kartohardjono MSc., PhD

Penguji : Ir. Amien Rahardjo, MT



(.....)  
(.....)  
(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 01 Juli 2009

## UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam penyelesaian skripsi ini, penulis mendapatkan bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr.Ir. Setijo Bismo, DEA sebagai pembimbing dan Ibu Ir. Eva F. Karamah, MT atas kontribusinya dalam memberikan bimbingan, saran, dan diskusi skripsi.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI.
3. Bapak Ir. Yuliusman, M.Eng selaku koordinator skripsi Departemen TGP-FTUI.
4. Ibu Ir. Dianursanti, MT selaku Pembimbing Akademik penulis.
5. Kedua Orang Tuaku serta adikku yang selalu memberikan dukungan dan doanya
6. Andy Rivai, Rosita Oktavina, dan Masta Devita atas kerjasamanya dalam penyusunan sripksi ini.
7. Adi Lukmanto, Fahrur Rozi, dan Letti Annasari selaku rekan grup riset, serta rekan-rekan Tekkim '05 atas perhatian dan semangatnya
8. Mang Ijal, Kang Jajat, Mas Heri, Mas Taufik, Mas Eko, beserta seluruh karyawan Departemen atas segala bantuan dan kerjasamanya.

Penulis berharap agar makalah skripsi ini kelak dapat berguna dan dipergunakan dengan baik. Saran dan kritik yang membangun senantiasa diharapkan demi perbaikan penulisan di masa mendatang.

Depok, Juli 2009

Destaninggara T. K. P.

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

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

Nama : Destaninggara Tresna Kusuma Putri

NPM : 040506701Y

Program Studi : Teknik kimia

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

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

Studi Gasifikasi Plasma Nontermal untuk Pengolahan Limbah Padat Organik Menggunakan Plasmatron dan Generator Plasma HVT

berserta 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 : 01 Juli 2009

Yang menyatakan



( Destaninggara Tresna K. P. )

## ABSTRAK

Nama : Destaninggara Tresna K. P.  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul : Studi Gasifikasi Plasma Nontermal untuk Pengolahan Limbah Padat Organik Menggunakan Plasmatron dan Generator Plasma HVT

Dalam penelitian ini dibahas kinerja dari Plasma Nontermal (plasma dingin) yang digunakan dalam proses gasifikasi plasma untuk limbah organik padat. Alat pembangkit plasma dingin yang digunakan ada tiga macam, yaitu plasmatron dengan *ignition coil* 12 V DC dan plasmatron menggunakan Ballast CFL, serta dengan generator plasma dari HV Transformer (*Neon Sign Transformer*). Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa, plasma nontermal (plasma dingin) juga dapat dimanfaatkan untuk proses gasifikasi limbah padat seperti halnya plasma termal, walaupun dengan kadar gas sintesis (*syngas*) yang dihasilkan belum begitu optimal. Kesimpulan yang dapat diambil adalah alat pembangkit plasma dingin yang dapat menghasilkan plasma dengan kualitas baik untuk proses gasifikasi adalah plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W.

**Kata Kunci:**

Gasifikasi plasma, plasma nontermal, plasmatron, limbah padat organik

## ABSTRACT

Name : Destaninggara Tresna K. P.  
Majority : Teknik Kimia  
Title : Study of Nonthermal Plasma Gasification for Organic Solid Wastes Treatment Using Plasmatrons and HVT Plasma Generator

This research discusses about the performance and quality of nonthermal plasma in plasma gasification process for organic solid wastes treatment. There are three types of plasma generator to generate nonthermal plasma, which are plasmatron using *ignition coil* 12 V DC, plasmatron using Ballast CFL 220 V 23 W, and also a plasma generator from HV Transformer (*Neon Sign Transformer*). Research results indicated that, nonthermal plasma can be use for organic solid wastes gasification process also as thermal plasma did, despite that the quantity of *syngas* product not optimal yet. From that three plasma generators, the best plasma generator that can generate nonthermal plasma in good quality for gasification process is plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W.

**Key words:**

Plasma gasification, nonthermal plasma, plasmatron, organic solid waste

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	x
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>7</b>
2.1 Limbah Padat.....	7
2.1.1 Kondisi Limbah Padat Domestik.....	8
2.1.2 Pengolahan Limbah Padat.....	9
2.1.3 Konversi Limbah Padat Organik.....	9
2.2 Teknologi Plasma.....	14
2.2.1 Karakteristik Plasma.....	14
2.2.2 Ragam Plasma dalam Proses Industri.....	18
2.3 Gasifikasi Plasma.....	21
2.3.1 Metode Gasifikasi Plasma.....	22
2.3.2 Prinsip Kerja Gasifikasi Plasma.....	23
2.3.3 Pertimbangan Pentingnya Gasifikasi Plasma Serta Keuntungan-Keuntungannya.....	25
2.3.4 Aplikasi Gasifikasi Plasma Saat Ini dan di Masa Mendatang.....	26
<b>BAB 3 METODELOGI PENELITIAN.....</b>	<b>27</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	27
3.2 Rancangan Penelitian.....	28
3.2.1 Rancang Bangun Plasmatron.....	28
3.2.2 Rancang Bangun Reaktor Plasma Nontermal.....	34

3.2.3 Pengujian Plasmatron dan Reaktor Plasma Nontermal .....	36
3.2.4 Preparasi Sampel Limbah Padat .....	36
3.2.5 Uji Pengolahan Limbah Padat (Proses Gasifikasi) .....	37
3.2.6 Pengambilan dan Analisis Sampel Gas sebagai hasil gasifikasi limbah padat.....	37
3.3 Prosedur Penelitian.....	38
3.3.1 Uji Kinerja Reaktor Plasma .....	38
3.3.2 Uji Analisa Gas Keluaran dengan GC .....	40
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>43</b>
4.1 Pengujian Kinerja Plasmatron dan Reaktor Plasma Non Thermal.....	43
4.1.1 Hasil Proses Gasifikasi Pada Kondisi Operasi Vakum .....	44
4.1.1.1 Hasil Penelitian untuk Plasmatron CFL 220 V 23 W .....	49
4.1.1.2 Hasil Penelitian untuk Generator Plasma HV Transformer. ....	51
4.1.1.3 Hasil Penelitian untuk Plasmatron Ignition Coil 12 V DC.. ....	52
4.1.1.4 Hasil Perbandingan Kinerja Antara Ketiga Jenis Plasmatron Pada Kondisi Vakum .....	53
4.1.2 Hasil Proses Gasifikasi Pada Kondisi Operasi <i>Gas Blanket</i> (Nitrogen).....	55
4.1.3 Hasil Proses Gasifikasi Optimum Untuk Limbah Serbuk Gergaji... ..	57
4.2 Pengaruh Kinerja Plasmatron Terhadap Energi Listrik .....	58
4.2.1 Hasil Konsumsi Energi Untuk Setiap Jenis Plasmatron.....	59
4.2.2 Hasil Konsumsi Energi Setiap Kondisi Operasi Yang Berbeda .....	60
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>63</b>
5.1 Kesimpulan.....	63
5.2 Saran.....	63
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>65</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>67</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	<i>Modern Landfill</i> .....	10
Gambar 2. 2	Ilustrasi Bagian-Bagian Dalam Sebuah <i>Incinerator</i> .....	13
Gambar 2. 3	Beberapa Fenomena Plasma di Alam; (a) Halilintar (b) Aurora ...	17
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian.....	27
Gambar 3. 2	<i>Ignition Coil</i> .....	28
Gambar 3. 3	IC NE555 Timer .....	29
Gambar 3. 4	12 V DC Ignition Coil Driver Circuit dengan IC 555 .....	29
Gambar 3. 5	Plasmatron dengan 12 V DC Ignition Coil Driver dengan IC 555	30
Gambar 3. 6	Ballast CFL.....	31
Gambar 3. 7	<i>Integrated High Voltage Transformer (Flyback)</i> .....	31
Gambar 3. 8	Rangkaian Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W .....	32
Gambar 3. 9	Rangkaian utuh Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W .....	32
Gambar 3. 10	<i>Neon Sign Transformer</i> .....	33
Gambar 3. 11	Rancangan <i>Prototype</i> Reaktor Plasma .....	34
Gambar 3. 12	Skema Sistem Peralatan Gasifikasi Plasma Nontermal.....	35
Gambar 3. 13	Elektroda Ground Yang Terbuat Dari Grafit Dan Penyangga Dari Stainless Steel.....	35
Gambar 3. 14	Elektroda batang Tungsten (Wolfram).....	36
Gambar 4. 1	Gasifikasi Plasma Dalam Kondisi Vakum Menghasilkan Warna Ungu Terang .....	46
Gambar 4. 2	Salah Satu Data Kromatogram Hasil Gasifikasi Plasma Dalam Kondisi Vakum.....	47
Gambar 4. 3	Salah Satu Data Kromatogram Hasil Gasifikasi Plasma Dalam Kondisi Vakum.....	47
Gambar 4. 4	Hasil Analisis GC dengan Menggunakan Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W .....	50
Gambar 4. 5	Hasil Analisis GC dengan Menggunakan Generator Plasma dari HV Transformer .....	52
Gambar 4. 6	Hasil Analisis GC Dengan Menggunakan Plasmatron <i>Ignition Coil</i> .....	53
Gambar 4. 7	Hasil Analisis GC Dengan Membandingkan Ketiga Jenis Plasmatron Untuk Kondisi Vakum.....	54
Gambar 4. 8	Hasil Analisis GC Dengan Kondisi <i>Gas Blanket</i> Nitrogen .....	56
Gambar 4. 9	Hasil Analisis GC Untuk Kondisi Optimum Dengan Membandingkan Kedua Jenis Kondisi Operasi .....	57

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kandungan Unsur C, H, Dan O, Dalam Beberapa Jenis Limbah Padat	8
Tabel 2. 2 Klasifikasi Plasma.....	14
Tabel 2. 3 Perbedaan Plasma dengan Ketiga jenis materi lainnya.....	15
Tabel 2. 4 Karakteristik Dasar Plasma.....	17
Tabel 4. 1 Konsumsi Energi dengan Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W.....	59
Tabel 4. 2 Konsumsi Energi dengan Plasmatron <i>Ignition Coil</i> 12 V DC.....	59
Tabel 4. 3 Konsumsi Energi dengan Generator Plasma HV Transformer.....	59
Tabel 4. 4 Konsumsi Energi dengan menggunakan 2 jenis Plasmatron Pada Kondisi Flushing N <sub>2</sub> .....	60
Tabel 4. 5 Konsumsi Energi Dengan Kondisi Operasi Yang Berbeda.....	61
Tabel 4. 6 Hasil Perhitungan Tegangan yang Terbangkitkan.....	62



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Menurunnya kualitas lingkungan yang disebabkan oleh sampah harus ditangani secara serius. Ibarat sebuah “bom waktu” masalah sampah dapat menjadi bencana besar bagi umat manusia, karena dapat meledak kapan saja, terutama akibat dari timbunan sampah padat. Sampah padat dari biomassa (terutama sebagai hasil aktivitas hewan dan tumbuhan) yang bercampur bebas dengan bahan-bahan polimer dan atau serat sintetik (plastik, nylon, rayon, dsb), semakin lama semakin menggunung tinggi dan melebar jauh. Di sisi lain, sampai saat ini belum ada teknik dan teknologi pengolahan terpadu dan sistematis dari sampah secara umum yang benar-benar aman dan ramah lingkungan. Terlebih pada daerah-daerah perkotaan dan atau pemukiman penduduk yang cukup padat, ternyata permasalahan pengelolaan sampah seringkali menjadi ”momok” bagi lingkungan sekitarnya.

Daerah perkotaan padat penduduk seperti Jakarta merupakan salah satu pemasok sampah terbesar di Indonesia. Berdasarkan survei yang dilakukan oleh Unilever mengenai fakta sampah di Jakarta, data terakhir Dinas Kebersihan Jakarta pada tahun 2008, menunjukkan jumlah sampah Jakarta sampai saat ini  $\pm 27.966 \text{ m}^3$  per hari. Sekitar  $25.925 \text{ m}^3$  sampah diangkut oleh 757 truk sampah untuk dibawa ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA) sampah dan  $\pm 2041 \text{ m}^3$  yang tak terangkut menjadi masalah yang masih menunggu untuk segera diatasi. Jadi kalau mau kita hitung, penduduk DKI Jakarta dapat membangun 1 Candi Borobudur setiap 2 hari dari tumpukan sampah, sehingga dalam setahun, kita dapat membangun 185 buah Candi Borobudur. Sedangkan, sampai kini Jakarta masih sangat bergantung terhadap satu-satunya TPA di Bantar Gebang. Padahal masih terngiang dalam ingatan kita, pada tanggal 8 September 2006 pukul 00.00 WIB, 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. (“Fakta Sampah Jakarta”, n.d; “Pemilihan dan Strategi”, n.d.)

Sampah mengandung mikroorganisme patogen dan limbah B3 yang sangat toksik bagi makhluk hidup. Di dalam sampah akan terjadi perkembangbiakan mikroorganisme penyebab penyakit (bakteri patogen) dan juga binatang serangga sebagai pemindah / penyebar penyakit (vektor). Untuk itu diperlukan suatu penanganan sampah yang baik untuk mengurangi dampak terhadap lingkungan maupun kesehatan masyarakat di sekitar penampungan sampah.

Metode pengelolaan sampah ada beberapa cara, seperti tempat pembuangan terbuka (open dump), sanitary landfill, pengomposan (*compositing*), dan pembakaran (*incineration*). Metode pengolahan sampah dan limbah padat menggunakan insinerator, bukanlah merupakan metode atau teknologi yang ramah lingkungan. *Global Anti-Incinerator Alliance* (GAIA) menyebutkan bahwa Teknologi Insinerator merupakan suatu metode yang tidak berkelanjutan dan ketinggalan jaman dalam penanganan sampah. Dalam proses insinerasi sampah, terdapat banyak polutan yang dilepaskan, baik ke udara maupun ke media lainnya. Dioksin (2,3,7,8-tetraklorodibenzo-*p*-dioksin atau TCDD), PCB (*polychlorinated biphenil*) dan para kongenernya seperti 2,3,7,8-tetrachlorodibenzofuran (TCDF), serta turunannya dan atau senyawa-senyawa lainnya yang sejenis) adalah polutan-polutan yang terkenal paling berbahaya dari hasil samping proses insinerator. Lebih jauh lagi, dioksin dapat menyebabkan gangguan kesehatan secara luas, termasuk kanker, kerusakan sistem kekebalan, reproduksi, dan permasalahan-permasalahan dalam pertumbuhan. Secara umum, insinerator merupakan sumber dioksin yang utama.

Lebih jauh lagi, GAIA juga menjelaskan bahwa insinerator juga merupakan sumber utama pencemaran Merkuri (Hg, raksa). Merkuri merupakan racun saraf yang sangat kuat, yang dapat mengganggu sistem motorik, sistem panca indera dan kerja sistem kesadaran. Selain itu juga, insinerator juga merupakan sumber utama polutan-polutan logam berat lainnya, seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), arsen (As) dan kromium (Cr). Polutan-polutan lain yang dihasilkan dari insinerator yang juga perlu diperhatikan antara lain adalah 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<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub>). Namun demikian, klasifikasi polutan-polutan

yang dihasilkan insinerator masih belum lengkap, dan masih banyak lagi senyawa-senyawa yang belum teridentifikasi dalam bentuk emisi dan abu di udara. Untuk polutan-polutan sangat berbahaya, seperti dioksin, sudah tidak diijinkan adanya peningkatan emisi sementara pengawasan terhadap emisi-emisi tersebut tidak proporsional dan bahkan banyak menyimpang dari prosedur bakunya. Data yang ada menunjukkan bahwa insinerator bahkan tidak mampu memenuhi baku mutu peraturan yang ada sekalipun. (McConney dan Bennett, 2002; EPA, 2003)

Di dalam penelitian yang sudah dilakukan, umumnya plasma dengan jenis Plasma Termal digunakan untuk proses gasifikasi limbah padat. Namun dalam penelitian kali ini jenis plasma yang akan digunakan dalam pengolahan limbah padat adalah Plasma Nontermal. Penelitian dengan menggunakan Plasma Nontermal ini bertujuan untuk mengetahui dan mempelajari kinerja jenis plasma tersebut jika digunakan untuk proses gasifikasi limbah padat dan juga untuk mengetahui apakah hasil gasifikasi limbah padat jika menggunakan Plasma Nontermal akan berupa *syngas* sebagaimana yang dihasilkan dari proses gasifikasi limbah padat dengan menggunakan Plasma Termal. Penggunaan Plasma Nontermal ini berkaitan dengan beberapa kelebihan yang dimiliki Plasma Nontermal jika dibandingkan dengan Plasma Termal. Sehubungan dengan temperatur proses, Plasma Nontermal memiliki temperatur di bawah 450 °K, sehingga memiliki tingkat bahaya yang lebih rendah jika dibandingkan dengan Plasma Termal yang memiliki temperatur di atas 1000° K. Reaktor dan segala perangkat yang digunakan untuk membangkitkan Plasma Nontermal lebih sederhana dari pada perangkat yang digunakan untuk membangkitkan Plasma Termal, walaupun konversi terjadinya proses gasifikasi plasma berjalan lebih lambat. Selain itu, kebutuhan listrik jika menggunakan Plasma Nontermal lebih sedikit dari pada Plasma Termal, dimana Plasma Termal lebih membutuhkan uap air dan oksigen karena merupakan reaksi sub nuklir.

Oleh karena itu, dalam penelitian ini diusulkan suatu alternatif pengolahan limbah (sampah) padat menggunakan teknologi plasma gasifikasi dengan Plasma Nontermal sebagai pengganti insenerasi. Dimana, alat pembangkit plasma yang digunakan adalah 2 jenis *Plasmatron* yaitu plasmatron dengan *ignition coil* 12 V

DC dan plasmatron menggunakan Ballast CFL, serta sebuah Generator Plasma yang terbuat dari HV Transformer. Kemudian dilakukan rancang-bangun *prototype* Reaktor Plasma Nontermal dengan kondisi *batch* dan memiliki kapasitas 0,45 Liter. Efektivitas dari *prototype* Reaktor Plasma Nontermal ini dipengaruhi oleh jenis pembangkit plasma yang akan digunakan, jumlah tegangan yang digunakan, dan jenis sampah yang akan diolah.

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah tersebut, maka rumusan masalah untuk penelitian:

1. Bagaimana Rancang-bangun suatu "*prototype*" Reaktor Plasma Nontermal untuk Gasifikasi Limbah Padat organik (biomassa dan sintetis) dalam skala laboratorium dengan menggunakan plasmatron sederhana dengan rangkaian 12 V DC Ignition Coil Driver Circuit dengan IC 555, Ballast CFL, dan generator plasma HV Transformer.
2. Bagaimana pengaruh jenis plasmatron yang digunakan, waktu jalannya proses gasifikasi limbah padat, dan jenis sampah yang akan diolah terhadap kinerja dari Reaktor Plasma Nontermal untuk gasifikasi limbah padat.
3. Pada penelitian ini diharapkan dengan menggunakan Plasma Nontermal pada proses gasifikasi limbah padat akan menghasilkan proses gasifikasi plasma yang optimal dan tentunya *syngas* sebagaimana yang dihasilkan jika menggunakan Plasma Termal.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Merancang suatu "*prototype*" Reaktor Plasma yang khusus digunakan untuk pengolahan Limbah Padat menggunakan Plasma Nontermal.
2. Membuat generator plasma dingin sederhana dari dua buah plasmatron yaitu Ballast CFL 220 V 23 W dan Kumparan Pemantik (*Ignition Coil*), serta sebuah generator plasma dengan menggunakan HV Transformer.
3. Menguji kinerja reaktor plasma dingin untuk pengolahan limbah padat

organik (daun kering dan serbuk gergaji) dengan dua kondisi operasi berbeda, yaitu pada kondisi vakum dan dengan gas blanket (Nitrogen).

4. Mengevaluasi pengaruh jenis plasmatron, waktu proses dan jenis sampah terhadap kinerja.

#### 1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini yang akan menjadi batasan masalah adalah sebagai berikut :

1. Limbah padat yang akan diolah adalah limbah-limbah organik padat (biomassa dan sintetik) di lingkungan Universitas Indonesia.
2. Plasma yang akan digunakan untuk gasifikasi limbah padat tersebut berasal dari plasmatron dengan rangkaian 12 V DC Ignition Coil Driver Circuit dengan IC 555, Ballast CFL, dan generator plasma HV Transformer.
3. Alat yang digunakan adalah suatu "*prototype*" Reaktor Plasma Nontermal untuk Gasifikasi Limbah Padat organik (biomassa dan sintetik) dalam skala laboratorium dengan sistem *batch*, yang merupakan hasil rancangan penelitian di bawah bimbingan Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA.
4. Dilakukan pengukuran daya , tegangan dan kuat arus yang dibutuhkan untuk membangkitkan plasma dari setiap jenis plasmatron dan generator plasma. Pengukuran ini menggunakan alat ukur berupa voltmeter dan ampere meter.

#### 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang dilakukan dalam penulisan makalah seminar ini adalah :

##### BAB I PENDAHULUAN

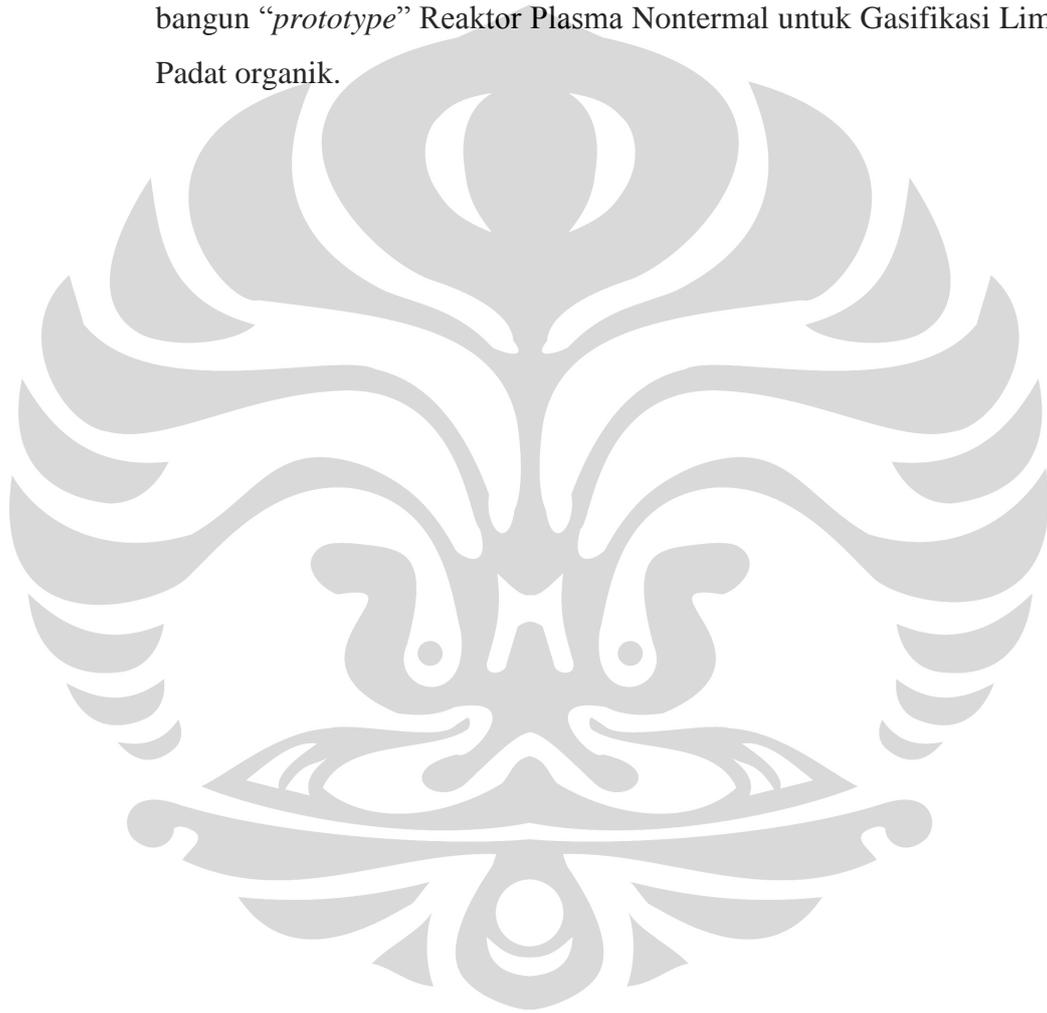
Bab ini berisi latar belakang penulisan masalah, selain itu juga memuat perumusan masalah, batasan masalah, dan sistematika penulisan makalah

##### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi literatur-literatur yang mengandung teori yang berhubungan dengan rancang bangun “*prototype*” Reaktor Plasma Nontermal untuk Gasifikasi Limbah Padat Organik, beberapa diantaranya adalah limbah padat, insenerator, dan teknologi gasifikasi plasma, serta penggunaannya dalam pengolahan limbah padat.

### BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisi metode, alat, dan prosedur yang akan digunakan rancang bangun “*prototype*” Reaktor Plasma Nontermal untuk Gasifikasi Limbah Padat organik.



## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

Berbagai solusi teknologi penanggulangan limbah dari negara-negara maju sepertinya sudah pernah ditawarkan, namun sepertinya teknologi-teknologi yang ditawarkan masih selalu membutuhkan berbagai kajian khusus, mengingat permasalahan limbah di Indonesia cukup unik dibandingkan permasalahan di berbagai negara maju. Hal ini dapat dilihat mulai dari permasalahan kultur bangsa Indonesia yang tidak disiplin, hingga permasalahan regulasi pemerintah yang masih sangat lemah. Namun, kita akan tetap mencoba untuk menggali teknologi-teknologi lain yang lebih tepat guna mengatasi permasalahan limbah di Indonesia. Salah satu teknologi terkini yang di masa depan diperkirakan akan menjadi solusi terbaik dalam menangani masalah limbah adalah pemanfaatan teknologi plasma, atau lebih dikenal dengan nama plasma gasifikasi (*gasification*). Berbagai penelitian dasar telah banyak dilakukan. Dewasa ini di berbagai negara maju seperti di kota Yoshii (1999) dan Mihama-Mikata (2002), Jepang pengembangan skala pilot untuk meningkatkan efisiensi dari teknologi pengolahan sampah ini semakin gencar dilakukan.

Pada bab ini akan dijelaskan tentang dasar-dasar teori yang digunakan dalam penelitian ini. Pembahasan ini termasuk tentang limbah padat, metode-metode pengolahan limbah padat, teknologi plasma, serta metode gasifikasi plasma.

#### **2.1 Limbah Padat**

Limbah adalah sesuatu bahan atau benda yang sudah tidak dipakai lagi oleh manusia atau benda padat yang sudah digunakan lagi dalam suatu kegiatan manusia dan dibuang. Para ahli kesehatan masyarakat Amerika membuat batasan, limbah (*waste*) adalah sesuatu yang tidak digunakan, tidak dipakai, tidak disenangi atau sesuatu yang dibuang yang berasal dari kegiatan manusia dan tidak terjadi dengan sendirinya. Limbah erat kaitannya dengan kesehatan masyarakat karena dari limbah-limbah tersebut akan hidup berbagai mikroorganisme penyebab penyakit (bakteri patogen) dan juga binatang serangga sebagai

pemindah / penyebar penyakit (vektor). Oleh sebab itu limbah harus dikelola dengan baik sampai sekecil mungkin agar tidak mengganggu atau mengancam kesehatan masyarakat.

### 2.1.1 Kondisi Limbah Padat Domestik

Limbah masih merupakan permasalahan lingkungan yang cukup serius yang dihadapi di negara kita. Rata-rata per orang per hari menghasilkan sampah 1–2 kg, dan akan terus meningkat sejalan dengan meningkatnya kesejahteraan dan gaya hidup masyarakat. Di lain pihak penanganan limbah yang masih dilakukan secara konvensional belum dapat mengendalikan limbah yang ada. Limbah yang tidak ditangani dengan baik dapat menimbulkan berbagai permasalahan kesehatan. Seperti pada kejadian pasca banjir di Jakarta, awal tahun 2002, jumlah kasus leptospirosis meningkat akibat tertimbunnya limbah di beberapa wilayah di Jakarta. Selain itu, polusi bau dari limbah yang membusuk, pencemaran air akibat pembuangan limbah ke sungai dan merembesnya air lindi dari TPA (tempat pembuangan akhir) ke permukiman dan sumber air penduduk, pencemaran udara akibat pembakaran limbah merupakan permasalahan lain yang timbul akibat pembakaran limbah. Sebanyak 20% sampah dibuang ke sungai menyumbang sekitar 60–70% pencemaran sungai. Limbah padat organik dalam sampah domestik dan agrokompleks, terutama terdiri dari materi biodegradable, dapat menimbulkan masalah serius dalam berbagai aspek, seperti transportasi, lahan penampungan, bau, hygiene, emisi gas rumah kaca, lindi, khususnya jika tidak ditangani benar. Berikut merupakan tabel mengenai kandungan unsur C, H, dan O yang dimiliki oleh beberapa jenis limbah padat:

**Tabel 2. 1** Kandungan Unsur C, H, Dan O, Dalam Beberapa Jenis Limbah Padat

Jenis Limbah Padat	Kandungan Unsur dalam % berat		
	C	H	O
Kayu	46,24	6,08	44,42
Dedaunan dan rerumputan	44,58	5,35	39,18

Sumber: “Proximat”, n.d.

### 2.1.2 Pengolahan Limbah Padat

Pemusnahan dan/atau pengolahan limbah padat ini dapat dilakukan melalui berbagai cara, antara lain sebagai berikut :

- a. Ditanam (*landfill*) yaitu pemusnahan limbah dengan membuat lubang ditanah kemudian sampah dimasukkan dan ditimbun dengan tanah.
- b. Dibakar (*incineration*) yaitu memusnahkan limbah dengan jalan membakar didalam tungku pembakaran (*incenerator*).
- c. Dijadikan pupuk (*composting*) yaitu pengolahan limbah menjadi pupuk (kompos), khususnya untuk limbah organik daun-daunan, sisa makanan, dan limbah lain yang dapat membusuk. Di daerah pedesaan hal ini sudah biasa sedangkan di daerah perkotaan hal ini perlu dibudayakan. Apabila setiap rumah tangga dibiasakan untuk memisahkan sampah organik dengan anorganik kemudian sampah organik diolah menjadi pupuk tanaman, dapat dijual atau dipakai sendiri. Sedangkan limbah anorganik dibuang dan akan segera dipungut oleh para pemulung. Dengan demikian masalah limbah akan berkurang (Soekidjo. 2003).

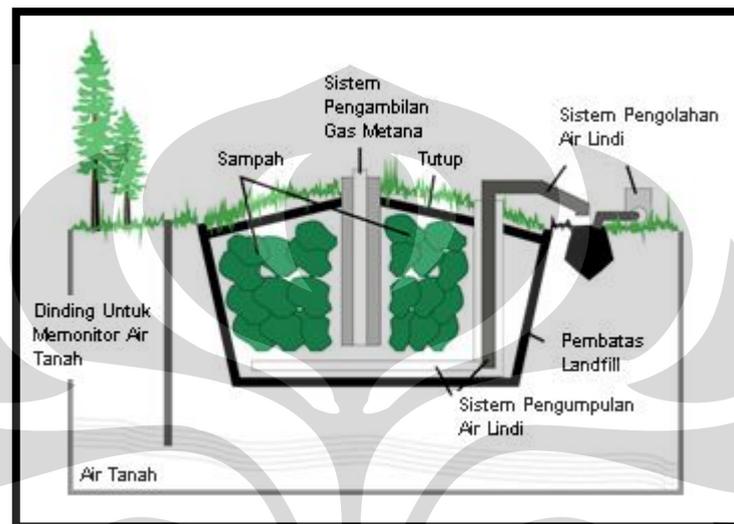
### 2.1.3 Konversi Limbah Padat Organik

Terdapat beberapa metode untuk mengkonversi limbah padat menjadi energi. Pada dasarnya ada dua alternatif proses pengolahan limbah menjadi energi, yaitu proses biologis yang menghasilkan gas-bio dan proses thermal yang menghasilkan panas. Pada kedua proses tersebut, hasil proses dapat langsung dimanfaatkan untuk menggerakkan generator listrik. 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 thermal menghasilkan panas yang dapat digunakan untuk membangkitkan steam yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin uap yang dihubungkan dengan generator listrik.

#### A. Proses Konversi Biologis (Hutagalung. 2007)

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 methane dan slurry. Gas methane dapat digunakan untuk berbagai sistem pembangkitan energi sedangkan *slurry* dapat digunakan sebagai kompos. Produk dari digester tersebut berupa gas methane yang dapat dibakar dengan nilai kalor sekitar  $6500 \text{ kJ/Nm}^3$ .



**Gambar 2.1** *Modern Landfill*

(Hutagalung, 2007)

*Landfill* ialah pengelolaan limbah 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*). 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  $\text{CH}_4$  dan  $\text{CO}_2$  (pada tahap awal - proses aerobik) dan menghasilkan gas methane (pada proses anaerobiknya). Gas *landfill* tersebut mempunyai nilai kalor sekitar 450-540 Btu/scf. Sistem pengambilan gas hasil 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.

Proses biokonversi limbah padat organik (pengkomposan dan biometanasi), merupakan cara paling murah dengan hasil cukup bagus. Limbah padat domestik dan agrokompleks, potensial diproses menjadi kompos, suatu *soil conditioner*, berdampak positif terhadap tekstur tanah, dengan kandungan nutrisi tanaman cukup bagus. sehingga kebutuhan pupuk sintetis berkurang. Keuntungan pengkomposan tidak hanya nilai ekonomis, namun terutama alasan estetika, juga merupakan konservasi biomasa dan nutrisi dan energi. Kotoran ternak, suatu limbah *biodegradable* dengan proses biokonversi dapat menjadi gas bio, dengan potensi energi. Di Jerman, seperti halnya negara industri maju lain, *sanitary landfill* yang umum dilakukan untuk penanganan sampah domestik tidak lagi merupakan alternatif. Saat ini di sana terdapat sekitar 800 unit pengkompos dan 1000 unit pembangkit gas bio (yang akan ditingkatkan menjadi 2000 unit). Pemilahan sampah berdasar jenisnya (*biodegradable dan non biodegradable*) di tingkat penghasil sangat mutlak merupakan langkah awal untuk pemanfaatan ulangnya, ditinjau dari segi konservasi biomassa dan energi, serta kelestarian lingkungan.

## B. Proses Konversi Termal

Proses konversi thermal dapat dicapai melalui beberapa cara, yaitu insinerasi, pirolisis, dan gasifikasi.

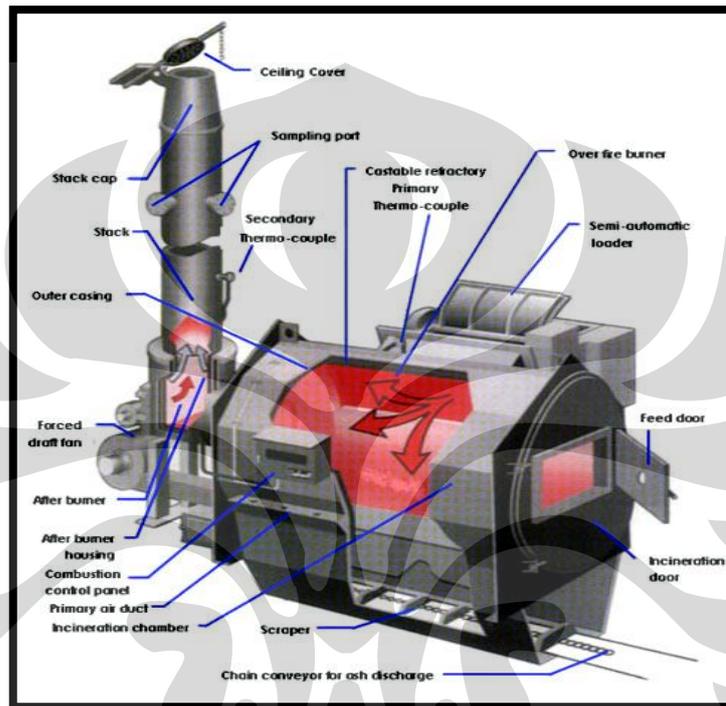
**Insinerasi** pada dasarnya ialah proses oksidasi bahan-bahan organik menjadi bahan anorganik. Prosesnya sendiri merupakan reaksi oksidasi cepat antara bahan organik dengan oksigen. Apabila berlangsung secara sempurna, kandungan bahan organik (H dan C) dalam sampah akan dikonversi menjadi gas karbondioksida (CO<sub>2</sub>) dan uap air (H<sub>2</sub>O). Unsur-unsur penyusun sampah lainnya seperti belerang (S) dan nitrogen (N) akan dioksidasi menjadi oksida-oksida dalam fasa gas (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>) yang terbawa di gas produk. Beberapa contoh insinerator ialah *open burning, single chamber, open pit, multiple chamber, starved air unit, rotary kiln, dan fluidized bed incinerator* (Hutagalung. 2007).

Metode pengolahan sampah dan limbah padat menggunakan insinerator, bukanlah merupakan metode atau teknologi yang ramah lingkungan. *Global Anti-Incinerator Alliance* (GAIA) menyebutkan bahwa Teknologi Insinerator merupakan suatu metode yang tidak berkelanjutan dan ketinggalan jaman dalam penanganan sampah. Dalam proses insinerasi sampah, terdapat banyak polutan yang dilepaskan, baik ke udara maupun ke media lainnya. Dioksin (2,3,7,8-tetraklorodibenzo-*p*-dioksin atau TCDD), PCB (*polychlorinated biphenil*) dan para kongenernya seperti 2,3,7,8-tetrachlorodibenzofuran (TCDF), serta turunannya dan atau senyawa-senyawa lainnya yang sejenis) adalah polutan-polutan yang terkenal paling berbahaya dari hasil samping proses insinerator. Lebih jauh lagi, dioksin dapat menyebabkan gangguan kesehatan secara luas, termasuk kanker, kerusakan sistem kekebalan, reproduksi, dan permasalahan-permasalahan dalam pertumbuhan. Secara umum, insinerator merupakan sumber dioksin yang utama. Sebagai sumber terbentuknya dioksin, selain karena penggunaan bahan-bahan kimia yang mengandung unsur atau senyawa klor (Cl) dari berbagai produk industri kimia dan petrokimia, termasuk herbisida, insektisida, dan fungisida. Dioksin dapat juga terbentuk dari kegiatan pemutihan kertas di pabrik pulp dan kertas (proses *chlorine bleaching*), pembuatan plastik PVC (*polyvinyl chloride*), pembakaran limbah organik dan padatan yang mengandung klor (misalnya plastik, teflon, dan PVC), dan emisi insinerator kota (*municipal incinerator*) (Kleopfer et al., 1986).

Lebih jauh lagi, GAIA juga menjelaskan bahwa insinerator juga merupakan sumber utama pencemaran Merkuri (Hg, raksa). Merkuri merupakan racun saraf yang sangat kuat, yang dapat mengganggu sistem motorik, sistem panca indera dan kerja sistem kesadaran. Selain itu juga, insinerator juga merupakan sumber utama polutan-polutan logam berat lainnya, seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), arsen (As) dan kromium (Cr). Polutan-polutan lain yang dihasilkan dari insinerator yang juga perlu diperhatikan antara lain adalah 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 ( $\text{CO}_2$  dan  $\text{CH}_4$ ). Namun demikian, klasifikasi polutan-polutan yang dihasilkan insinerator masih belum lengkap, dan masih banyak lagi

senyawa-senyawa yang belum teridentifikasi dalam bentuk emisi dan abu di udara.

Untuk polutan-polutan sangat berbahaya, seperti dioksin, sudah tidak diijinkan adanya peningkatan emisi sementara pengawasan terhadap emisi-emisi tersebut tidak proporsional dan bahkan banyak menyimpang dari prosedur bakunya (McConney dan Bennett, 2002).



**Gambar 2. 2** Ilustrasi Bagian-Bagian Dalam Sebuah *Incinerator*.

(Hutagalung, 2007).

**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 pirolisa dapat berupa tar, larutan asam asetat, methanol, padatan char, dan produk gas.

**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 pirolisa, proses gasifikasi menghasilkan gas yang dapat dibakar dengan nilai kalor sekitar 4000 kJ/Nm<sup>3</sup>. Saat ini proses konversi limbah organik padat dengan

menggunakan system gasifikasi merupakan pilihan utama dalam pengolahan limbah, sebab terbukti lebih efisien dan ramah lingkungan, serta dapat mengkonversi limbah padat menjadi gas sintesis yang memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dan tingkat resiko bahaya yang lebih rendah, bahkan dapat dianggap sebagai alternatif terbaik untuk insinerator pengolah sampah (Hutagalung. 2007).

## 2.2 Teknologi Plasma

### 2.2.1 Karakteristik Plasma

Plasma adalah bentuk keempat dari zat utama yang ada di muka bumi ini, selain padat, cair, dan gas. Plasma adalah gas yang terionisasi yang dihasilkan dari *electrical discharge*, secara spontan. Plasma dalam skala laboratorium dapat dibedakan menjadi dua kelompok, yaitu plasma temperatur tinggi (*fusion plasma*) dan plasma temperatur rendah (*gas discharge*). Klasifikasi dari berbagai jenis plasma dapat dilihat dalam Tabel 2.2 di bawah ini. Plasma temperatur tinggi berarti semua muatan (elektron, ion, maupun muatan netral) berada dalam kondisi keseimbangan termal. Plasma temperature rendah dibagi lagi menjadi *thermal plasma (quasi-equilibrium plasma)* yang berada dalam kondisi LTE (*local thermal equilibrium*), dan *non-thermal plasma* atau *cold plasma (non-equilibrium plasma)* (H. Huang dan L. Tang, 2007).

**Tabel 2. 2** Klasifikasi Plasma

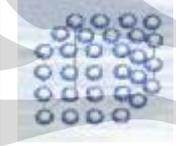
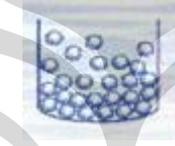
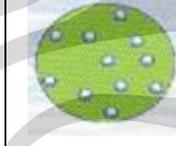
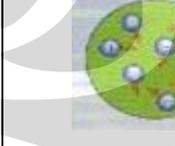
Jenis Plasma	Temperatur	Contoh
Plasma Temperatur Tinggi ( <i>Equilibrium plasma</i> )	$T_e = T_i = T_h,$ $T_p = 10^6 \text{ K} - 10^8 \text{ K}; n_e \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}$	<i>Laser fusion plasma</i>
Plasma Temperatur Rendah / plasma Thermal ( <i>Quasi-equilibrium plasma</i> )	$T_e \approx T_i \approx T_h,$ $T_p = 2 \times 10^3 \text{ K} - 3 \cdot 10^4 \text{ K}; n_e \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}$	Busur Plasma ; <i>atmospheric RF discharge</i>
Non-thermal plasma ( <i>Non-equilibrium plasma</i> )	$T_e \gg T_h, T_p \approx 3 \times 10^2 \text{ K} -$ $4,5 \times 10^2 \text{ K}; n_e \approx 10^{10} \text{ m}^{-3}$	<i>Corona discharge</i>

Keterangan:  $T_e$  = temperatur elektron;  $T_i$  = temperatur ion;  $T_h$  = temperature Netral;  $T_p$  = temperatur plasma;  $n_e$  = densitas elektron.

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

Seperti yang telah dituliskan sebelumnya bahwa plasma sering disebut sebagai keadaan materi ke-empat. Plasma berbeda dari keadaan materi berenergi lebih rendah lainnya, seperti padatan, cairan, dan gas. Perbedaan antara keempat materi tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.3 berikut ini.

**Tabel 2.3** Perbedaan Plasma dengan Ketiga jenis materi lainnya

Jenis Material	Padatan	Cairan	Gas	Plasma
Contoh	Es (H <sub>2</sub> O)	Air (H <sub>2</sub> O)	Steam (H <sub>2</sub> O)	Gas yang Terionisasi ( $H_2 \rightarrow H^+ + H^+ + 2e^-$ )
Temperatur	Dingin $T < 0^\circ\text{C}$	Hangat $0 < T < 100^\circ\text{C}$	Panas $T > 100^\circ\text{C}$	Sangat Panas $T > 100.000^\circ\text{C}$
Gambar Molekul				

Sumber: "perspectives on plasmas", n.d.

Plasma adalah materi di alam yang bisa mendukung agar reaksi fusi bisa berhasil. Plasma merupakan kumpulan gas berdensitas tinggi ( $10^7$ - $1.032 \text{ m}^2$ ) yang terionisasi dan berada di dalam lautan elektron. Plasma dibangkitkan dengan memberikan energi yang cukup besar sehingga elektron-nya terlepas dengan tetap menjaga muatan totalnya netral, biasanya dengan cara memberikan energi termal. Temperatur plasma sendiri diukur dengan satuan eV dan bisa mencapai  $10^5$  eV atau setara dengan  $10^{10}$  K. Ini adalah temperatur elektron, sementara temperatur ion biasanya jauh lebih rendah. Plasma bisa dikategorikan ke dalam dua jenis, menurut temperaturnya, yakni plasma panas (*hot plasma*) dan plasma dingin (*cold plasma*). Plasma Termal digunakan di dalam reaksi fusi, sementara cold plasma banyak digunakan untuk purifikasi/pemurnian gas, teknologi permukaan (*surface treatment*), penanganan limbah sampai dekomposisi hidrokarbon (Akbar, 2008).

Plasma dibangkitkan di dalam reaktor fusi dengan tiga cara, yakni pemanasan resistif (*ohmic heating*), tembakan pancaran netral (*neutral-beam injection*), dan pemanasan gelombang radio (*radio-frequency heating*). Karena plasma adalah konduktor listrik, pembangkitannya bisa dilakukan dengan cara

mengalirkan arus listrik, yang dikenal dengan pemanasan ohmic/resistif. Atom bermuatan netral yang berenergi tinggi bisa ditembakkan ke dalam plasma sehingga bisa memanaskan plasma karena terjadi transfer energi dari atom yang kemudian terionisasi pada plasma.

Beberapa sifat plasma:

- Fasa yang paling stabil dengan bentuk dan volume yang tak tentu, seperti gas.
- Menghantarkan listrik, seperti fasa padatan.
- Tidak dapat berpindah dengan bebas, hanya dapat bergetar.
- Terpengaruh medan magnet.
- Energi dan suhu pergerakan sangat tinggi.
- Suhu di atas 500 °C (Kosmis).
- Perubahan bentuk dapat dilakukan secara paksa (dipatahkan, dipotong, dll.).



(a)



(b)

**Gambar 2. 3** Beberapa Fenomena Plasma di Alam; (a) Halilintar (b) Aurora

Tabel di bawah berikut ini menunjukkan karakteristik dasar dari plasma.

**Tabel 2. 4** Karakteristik Dasar Plasma

Karakteristik	Rentang Parameter Plasma yang Khas	
	Plasma Bumi	Plasma Kosmis
Ukuran (meter)	$10^{-6}$ m (lab plasmas) to $10^2$ m (lightning) (~8 OOM)	$10^{-6}$ m (spacecraft sheath) to $10^{25}$ m (intergalactic nebula) (~31 OOM)
Umur (detik)	$10^{-12}$ s (laser-produced plasma) to $10^7$ s (fluorescent lights) (~19 OOM)	$10^1$ s (solar flares) to $10^{17}$ s (intergalactic plasma) (~17 OOM)
Kerapatan (partikel/m <sup>3</sup> )	$10^7$ m <sup>-3</sup> to $10^{32}$ m <sup>-3</sup> (inertial confinement plasma)	$10^0$ (i.e., 1) m <sup>-3</sup> (intergalactic medium) to $10^{30}$ m <sup>-3</sup> (stellar core)
Temperatur (K)	~0 K (crystalline non-neutral plasma) to $10^8$ K (magnetic fusion plasma)	$10^2$ K (aurora) to $10^7$ K (solar core)
Medan Magnet	$10^{-4}$ T (lab plasma) to $10^3$ T (pulsed-power plasma)	$10^{-12}$ T (intergalactic medium) to $10^{11}$ T (near neutron stars)

Sumber: “*Plasma (physics)*”, n.d.

Plasma, bila mengalami kontak dengan gas, akan menghasilkan warna yang berbeda-beda, tergantung jenis gasnya. Berbagai warna plasma tersebut disebabkan adanya emisi dari energy atom, ion, ataupun molekul yang tinggi.

Seperti yang diketahui bahwa kondisi energi dari setiap gas memiliki perbedaan, setiap gas memiliki karakteristik yang berbeda-beda sehingga menghasilkan karakteristik warna yang berbeda pula. Beberapa warna yang muncul saat berbagai gas mengalami kontak dengan plasma adalah sebagai berikut:

- $\text{CF}_4$ : biru
- $\text{SF}_6$ : biru keputih-putihan
- $\text{SiF}_4$ : biru terang
- $\text{SiCl}_4$ : biru terang
- $\text{Cl}_2$ : hijau pucat
- $\text{CCl}_4$ : hijau
- $\text{H}_2$ : pink
- $\text{O}_2$ : kuning pucat
- $\text{N}_2$ : ungu kemerahan
- $\text{Br}_2$ : reddish
- He: merah keunguan
- Ne: brick red
- Ar: merah gelap
- $\text{CO}_2$ : ungu keputihan

Oleh karena, apabila gas kontak dengan plasma akan menghasilkan warna yang berbeda-beda, maka warna dari plasma ini sering kali digunakan sebagai indikator atau untuk memperkirakan kemurnian gas proses dari kontaminan (“Glossary”, n.d.)

### 2.2.2 Ragam Plasma dalam Proses Industri

Jenis-jenis plasma yang digunakan dalam proses-proses industri:

#### 1. Plasma termal atau equilibrium:

Merupakan plasma yang memiliki densitas energi tinggi, kesamaan suhu antara partikel berat (atom, molekul, ion) dan elektron. Karena mobilitas yang jauh lebih tinggi, energi yang diberikan kepada plasma ditangkap oleh elektron yang dipindahkan ke partikel-partikel berat dengan tumbukan elatis. Karena densitas jumlah elektron tinggi, dikaitkan dengan operasi pada tekanan atmosferik, frekuensi tumbukan elastis sangat tinggi dan kesetimbangan termal tercapai dengan cepat. Contoh plasma termal adalah plasma dari arus DC atau frekuensi radio (RF).

Keuntungan plasma termal meliputi: suhu tinggi; intensitas tinggi, radiasi non-ionisasi dan densitas energi tinggi. Sumber panas juga berhadapan dengan permukaan tajam dan gradien termal yang curam yang dapat dikendalikan tanpa tergantung kimiawi. Jika batas atas suhu yang dapat

dicapai dalam pembakaran bahan bakar fosil adalah  $2000^{\circ}\text{C}$ , plasma termal yang dihasilkan dari listrik dapat mencapai suhu  $20.000^{\circ}\text{C}$  atau lebih. Reaktor plasma termal menawarkan berbagai kelebihan diantaranya:

- *Throughput* tinggi dengan geometri reaktor kompak.
- Laju pemadaman (*quench*) tinggi yang memungkinkan dihasilkan komposisi material gas dan padat yang spesifik.
- Laju alir gas rendah (kecuali untuk peralatan plasma non-transfer) dibandingkan dengan pembakaran bahan bakar fosil, dengan demikian mengurangi kebutuhan pengolahan off-gas.

Plasma termal digunakan dalam pengolahan material karena densitas energi tinggi dan kemampuan memanaskan, melebur, dan dalam berbagai kasus, menguapkan material yang akan diolah. Geoplasma, salah satu perusahaan yang mengembangkan teknologi Plasma Termal, berhasil membuat busur api yang jauh lebih efisien untuk menghancurkan sampah dengan gas super panas atau dikenal juga dengan plasma yang dihasilkannya. Pembangkit listrik yang akan dibangun di Florida akan membakar sampah sebanyak 1.500 ton perhari dan menghasilkan listrik sebesar 60 MW yang sebagian kecilnya digunakan untuk keperluan pembangkit listrik tersebut, setidaknya cukup untuk melistriki rumah sebanyak 50.000 (Gomez, E. et.al, 2008).

Plasma termal juga digunakan untuk sintesis kimia karena merupakan sumber spesi reaktif pada suhu tinggi. Hal ini penting dalam preparasi pigmen, silica sintetis dengan kemurnian tinggi, keramik ultra halus kemurnian tinggi dan bubuk inorganik.

## 2. Plasma dingin atau nontermal:

Merupakan plasma yang memiliki densitas energi lebih rendah, terdapat perbedaan suhu besar antara elektron dan partikel yang lebih berat. Elektron dengan energi yang cukup bertumbukan dengan gas latar (*background*) menghasilkan disosiasi, eksitasi dan ionisasi tingkat rendah tanpa peningkatan entalpi gas yang cukup besar. Hasilnya, suhu elektron melampaui suhu partikel-partikel berat hingga beberapa derajat perpangkatan

dan karenanya memungkinkan untuk mempertahankan suhu keluaran (*discharge*) pada suhu yang jauh lebih rendah, bahkan pada suhu ruang ("*Nonthermal plasma*", n.d).

Plasma jenis ini menghasilkan spesi-spesi aktif yang lebih beragam, dan atau lebih besar energinya dibandingkan dengan spesi yang biasa dihasilkan pada reaktor kimia. Keberadaan spesi-spesi aktif ini memungkinkan dilakukannya proses pada permukaan material yang tidak dapat dilakukan dengan cara lain atau tidak praktis atau tidak ekonomis jika dilakukan dengan metode lain. Aplikasi: modifikasi permukaan local, karena ion, atom dan molekul tetap relatif dingin dan tidak menyebabkan kerusakan termal pada permukaan yang disentuh. Plasma jenis ini dihasilkan dalam berbagai jenis *discharge* pijar, *discharge* RF tekanan rendah dan *corona discharge*, yang mempunyai densitas energi berkisar antara  $10^{-4}$  hingga puluhan watt per  $\text{cm}^{-3}$ . (Bardos dan Barankova, 2009)

Saat ini, teknologi plasma dingin atau Non-Termal Plasma banyak digunakan oleh Industri-industri untuk proses pelapisan (*coating* dan *etching*), serta digunakan untuk mengatasi gas buangan  $\text{NO}_x$  dan  $\text{SO}_x$ , seperti yang telah dikembangkan oleh McMaster University.

Gas buang yang mengandung  $\text{NO}_x$  dan atau  $\text{SO}_x$ , akan dikontakkan dengan plasma. Akibatnya akan terbentuk radikal yang menyebabkan terjadinya reaksi kompleks yang mengonversi  $\text{NO}_x$  dan atau  $\text{SO}_x$  menjadi produk tertentu. Mekanisme ini terjadi di dalam reaktor plasma penghilangan  $\text{NO}_x$  dan atau  $\text{SO}_x$ . Ketika terjadi kontak antara gas buang dengan plasma maka akan terbentuk radikal. Gas aditif seperti ammonia ( $\text{NH}_3$ ) atau hidrokarbon seperti metana ( $\text{CH}_4$ ) perlu ditambahkan untuk turut membangkitkan radikal sehingga menyebabkan reaksi pembentukan partikulat. Selain itu, penambahan gas aditif juga disesuaikan dengan produk akhir yang diharapkan terbentuk. Beberapa produk hasil dari pengolahan gas buang ini dapat dimanfaatkan untuk pupuk seperti ammonium nitrat ( $\text{NH}_4$ ) $\text{NO}_3$  (Grothaus dan Fanick.1996).

Dalam penelitian mengenai gasifikasi limbah padat ini, plasma yang digunakan dalam proses adalah Plasma Nontermal. Hal ini bertujuan untuk

menguji kinerja Plasma Nontermal dalam proses Gasifikasi. Penggunaan Plasma Nontermal ini berkaitan dengan beberapa kelebihan yang dimiliki Plasma Nontermal jika dibandingkan dengan Plasma Termal, antara lain:

- Sehubungan dengan temperatur proses, Plasma Nontermal memiliki temperatur di bawah 450 °K, sehingga memiliki tingkat bahaya yang lebih rendah jika dibandingkan dengan Plasma Termal yang memiliki temperatur di atas 1000° K.
- Reaktor dan segala perangkat yang digunakan untuk membangkitkan Plasma Nontermal lebih sederhana dari pada perangkat yang digunakan untuk membangkitkan Plasma Termal, walaupun konversi terjadinya proses gasifikasi plasma berjalan lebih lambat.
- Kebutuhan listrik jika menggunakan Plasma Nontermal lebih sedikit dari pada Plasma Termal, dimana Plasma Termal lebih membutuhkan uap air dan oksigen karena merupakan reaksi sub nuklir.

### 2.3 Gasifikasi Plasma

Plasma gasifikasi adalah merupakan suatu metode efektif dalam menguraikan berbagai senyawa organik dan anorganik menjadi elemen-elemen dasar dari sebuah senyawa, sehingga dapat dipergunakan kembali (*reuse*) dan didaur ulang (*recycle*). Komponen terpenting dari sistem plasma gasifikasi adalah sebuah reaktor plasma, yang dapat terdiri dari sebuah plasma *torch* atau lebih. Plasma *torch* dapat dibentuk dengan memberikan tegangan DC pada dua buah elektroda. Selanjutnya dengan memberikan gas yang dilewatkan pada kedua elektroda tadi terbentuklah plasma *torch* dengan memiliki suhu yang sangat tinggi antara 5.000 °C hingga 10.000 °C. Saat ini jenis plasma yang umumnya digunakan untuk proses gasifikasi plasma adalah Plasma Termal, sedangkan Plasma Nontermal akan diujikan dalam penelitian ini.

Plasma reaktor akan dioperasikan pada kondisi *sub-stoichiometric* atau tanpa oksigen yang masuk dalam plasma reaktor, sehingga tidak terjadi proses pembakaran. Jadi sistem plasma gasifikasi dan vitrifikasi ini bukan sebuah insinerator atau tungku pembakaran lainnya. Dengan suhu yang dapat mencapai 10.000 °C, plasma dapat menguraikan berbagai senyawa beracun dalam waktu

1/1.000 detik. Sehingga dapat mengeliminasi proses pembentukan senyawa lain dan pembentukan gas beracun yang biasanya terjadi pada sebuah pembakaran dari insinerator.

Temperatur ekstrem seperti di atas hanya akan didapat jika kita menggunakan sistem plasma *torch*, suhu ini sangat diperlukan dalam menguraikan molekul senyawa organik menjadi senyawa dasar gas seperti karbon monoksida dan hidrogen. Demikian pula halnya dengan senyawa anorganik selain dapat dilelehkan menjadi *molten glass* yang kemudian mengkristal (*vitriified*).

Unit Gasifikasi Plasma dapat mengeliminasi kebutuhan lahan yang luas untuk tempat pembuangan serta masalah-masalah lainnya dengan cara mengkonversi “bahan bakar” bebas yang seharusnya menempati tempat pembuangan dalam bentuk limbah padat perkotaan dan limbah berbahaya. Unit gasifikasi plasma mengubah material yang mengandung karbon seperti limbah padat perkotaan dan bahkan limbah B3 seperti limbah bio dari rumah sakit, menjadi dua jenis produk samping yang bermanfaat dan menguntungkan, yaitu:

1. Bahan bakar kaya energi yang disebut Gas Sintesis (*Synthesis Gas*), yang digunakan untuk menghasilkan “listrik hijau” dari sumber yang berkelanjutan dan terbarukan.
2. Zat padat inert yang bermanfaat secara komersil yang biasa disebut “slag”. *Slag* dapat digunakan sebagai bahan pembuat jalan dan material bangunan.

### 2.3.1 Metode Gasifikasi Plasma

Ada dua metode yang digunakan pada gasifikasi plasma – yang pertama adalah “busur plasma” dan yang kedua adalah “obor plasma”.

Unit Gasifikasi Plasma “busur plasma” beroperasi pada prinsip yang sama dengan mesin las-busur, di mana sebuah busur listrik dibentuk antara dua elektroda. Busur berenergi tinggi menghasilkan temperatur yang tinggi, gas yang terionisasi tinggi. Busur plasma tersebut ditutup dalam sebuah ruangan. Material limbah dimasukkan ke dalam ruangan tersebut dan panas yang tinggi dari plasma menyebabkan terjadinya pemecahan molekul-molekul organik (seperti minyak, pelarut, dan cat) menjadi atom-atom dasarnya. Dalam sebuah proses yang

terkontrol dengan baik, atom-atom ini membentuk gas-gas yang tidak berbahaya seperti CO<sub>2</sub>. Padatan seperti kaca dan logam meleleh membentuk material, yang sama seperti lava yang membeku, di mana logam beracun akan terenkapsulasi. Dengan teknologi busur plasma, tidak lagi ada pembakaran dan insinerasi serta debu yang terbentuk.

Unit Gasifikasi Plasma “busur plasma” memiliki efisiensi penghancuran yang sangat tinggi. Unit ini sangat kokoh; unit ini dapat menghancurkan segala jenis limbah dengan pengolahan awal maupun tidak; serta menghasilkan bentuk limbah yang stabil. Busur peleleh menggunakan elektroda karbon untuk membentuk busur dalam sebuah *slag* yang meleleh. Elektroda karbon terus-menerus dimasukkan ke dalam ruangan, mengeliminasi kebutuhan *shut down* untuk penggantian elektroda ataupun perawatan. Temperatur tinggi yang tercipta oleh busur mengubah limbah organik menjadi organik ringan dan unsur-unsur primer.

Gas yang terbakar dibersihkan dengan sistem *off-gas* dan dioksidasi menjadi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O pada oksidator keramik. Potensi terjadinya polusi udara sedikit dikarenakan penggunaan pemanasan elektrik dalam ketidakterediaan oksigen bebas. Bagian anorganik dari limbah tetap terjaga dalam bentuk *slag* yang stabil dan tahan luluh.

Pada sistem “obor plasma”, sebuah busur dibentuk antara sebuah elektroda tembaga dan lelehan *slag* atau elektroda lainnya dengan polaritas yang berbeda. Sama seperti sistem “busur plasma”, sistem obor plasma memiliki tingkat efisiensi penghancuran yang sangat tinggi; kokoh; dan dapat mengolah segala jenis limbah atau media dengan atau tanpa perlakuan awal. Bagian anorganik dari limbah tetap terjaga dalam bentuk *slag* yang stabil dan tahan luluh. Sistem pengaturan polusi udara yang digunakan lebih besar daripada sistem busur plasma dikarenakan kebutuhan untuk menstabilkan gas obor (“Plasma Gasification”, n.d).

### 2.3.2 Prinsip Kerja Gasifikasi Plasma

Dasar dari plasma dan pembentukan plasma adalah sederhana.

Pertama, sebuah arus bertegangan tinggi dilewatkan antara dua elektroda yang menghasilkan “busur plasma” intensitas tinggi. Hal ini menyebabkan

elektron dari udara sekitar tertarik dan mengubah gas menjadi plasma atau sebuah medan pancaran energi.

Proses ini sama dengan proses yang terjadi pada lampu fluoresensi dan lampu neon – di mana listrik tegangan rendah lewat di antara elektroda-elektroda dalam sebuah tabung lampu yang tertutup yang mengandung gas inert – yang menyebabkan tereksitasinya elektron pada gas. Gas tersebut kemudian menghasilkan energi cahaya yang menerangi tabung. Busur Plasma dapat menjadi sangat panas sehingga dapat melelehkan logam dan digunakan pada pemotongan logam (“*Plasma Gasification*”, n.d).

Umumnya ada tiga reaksi yang terjadi pada proses plasma *gasification* dalam menghasilkan *synthesis gas (syngas)* yang terdiri dari gas karbon monoksida dan hydrogen, yaitu:

1. Reaksi pertama adalah gasifikasi atau *thermal cracking*. Pada proses ini molekul berukuran besar di uraikan menjadi gas, molekul yang lebih kecil dan ringan. Proses *pyrolisa* ini menghasilkan gas hidrokarbon dan gas hydrogen. Umumnya terbentuk radikal dalam proses ini dengan berbagai cara. Hasil akhir dari proses ini adalah hidrokarbon ringan seperti metan dan hydrogen.
2. Reaksi kedua yang terjadi dalam proses pembentukan *syngas* adalah oksidasi parsial. Oksidasi parsial dapat menghasilkan karbon monoksida, dan dengan proses oksidasi yang lebih rumit akan menghasilkan karbon dioksida dan air. Karbon dioksida dan air adalah merupakan hasil terakhir dari sebuah proses oksidasi.
3. Reaksi ketiga yang terjadi adalah reaksi *reforming*. Reaksi yang terjadi merupakan kombinasi dari reaksi-reaksi yang terjadi selama proses gasifikasi berlangsung. Sebagai contoh, karbon dapat bereaksi dengan air dan menghasilkan karbon monoksida dan hydrogen, atau karbon dapat bereaksi dengan karbon dioksida dan menghasilkan dua buah molekul karbon monoksida. Reaksi *reforming* ini memiliki kemungkinan untuk membentuk *fuel gas*.

Gasifikasi proses akan dikontrol pada suhu plasma plume 4.000 - 5.000 °C (khusus untuk Plasma Termal) dengan suhu *syngas* yang keluar dari reaktor 1.250

- 1.450 °C. Dengan mempertahankan suhu di atas, dapat meminimalisasi ukuran reaktor dan dapat menghasilkan *syngas* sebagai *fuel gas* dalam jumlah yang besar. Selain itu tanpa memerlukan konstruksi material yang tahan panas yang mungkin dipergunakan. Suhu ini juga dapat dioperasikan pada tekanan kamar, sehingga mengurangi desain *chamber pressure* yang mahal.

### 2.3.3 Pertimbangan Pentingnya Gasifikasi Plasma Serta Keuntungan-Keuntungannya

Beberapa keuntungan juga didapatkan dengan pemanfaatan plasma gasifikasi dalam pengolahan sampah di antaranya adalah sebagai berikut (“*Plasma Gasification*”, n.d):

- Gasifikasi Plasma memberikan sebuah solusi limbah yang berkelanjutan untuk semua jenis limbah, termasuk limbah padat perkotaan, limbah B3, bahkan limbah radioaktif, yang menghasilkan keuntungan ekonomi dan lingkungan yang nyata.
- Gasifikasi Plasma tidak menghasilkan partikel debu ringan maupun partikel debu berat.
- Gasifikasi Plasma diisi dengan limbah bebas, dan digerakkan oleh listrik, dan dapat dimatikan dengan hanya membuka saklar.
- Unit Gasifikasi Plasma tidak membutuhkan waktu 24/36 jam pembakaran bahan bakar yang mahal seperti insinerator pada umumnya untuk mencapai temperatur yang diinginkan.
- Sistem gasifikasi Plasma hanya membutuhkan sedikit perawatan dan tidak seperti pembangkit tradisional, sistem ini tidak perlu dimatikan untuk melakukan perawatan dan pembersihan sementara
- Gasifikasi Plasma sebagai sistem skala besar memiliki tingkat efisiensi yang sama dengan sistem dengan skala yang lebih kecil.
- Gasifikasi Plasma dapat memberikan tingkat fleksibilitas yang tinggi dalam waktu yang lama dan dapat beroperasi pada kapasitas kurang dari 100% sehingga ada fleksibilitas jika terjadi kekurangan aliran limbah.

### 2.3.4 Aplikasi Gasifikasi Plasma Saat Ini dan di Masa Mendatang

Keuntungan dari sistem merupakan bukti. Unit ini dapat bertahan sendiri setelah sumber tenaga listrik awal digunakan; sistem ini bersahabat dengan lingkungan; dan memproduksi material yang memiliki aplikasi komersial atau kegunaan dan dapat mendatangkan keuntungan.

Selain mengolah sampah baru, sistem ini juga dapat digunakan untuk mengolah sampah yang terkumpul pada tempat pembuangan sehingga reklamasi lahan dapat terjadi secara menyeluruh. Aplikasi lainnya adalah menggunakan *syngas* sebagai bahan dasar pembuatan hidrogen dalam skala komersial, yang akan digunakan sebagai bahan bakar untuk kendaraan berbahan bakar hidrogen.

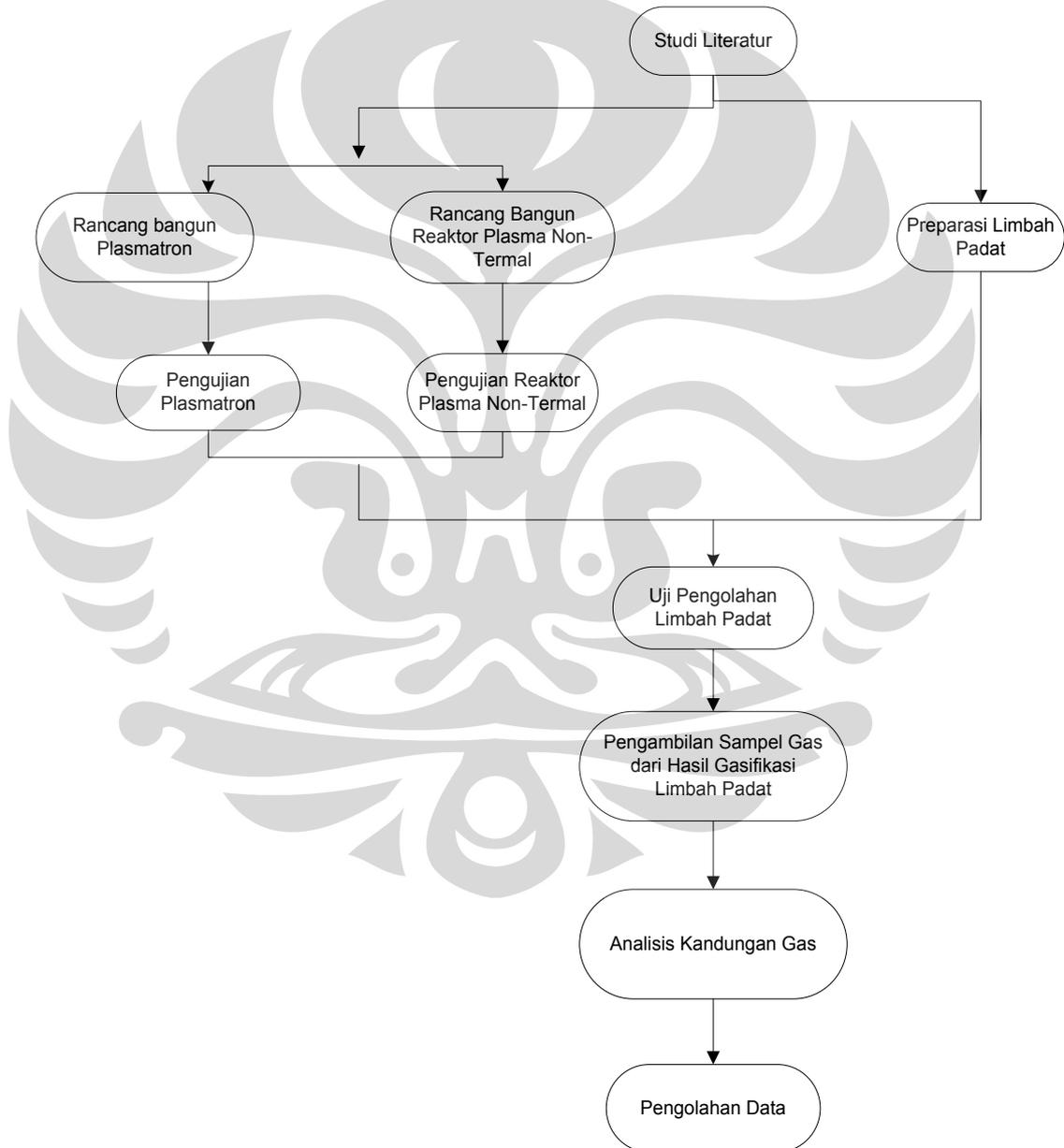


## BAB 3 METODELOGI PENELITIAN

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

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Alur penelitian ditunjukkan pada bagan di bawah ini:



**Gambar 3. 1** Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Rancangan Penelitian

Pada penelitian ini terdapat enam tahap utama yaitu:

#### 3.2.1 Rancang Bangun Plasmatron

Tujuan dari tahap ini adalah untuk menghasilkan alat pembangkit plasma yang terdiri dari dua buah plasmatron, yaitu Ballast CFL 220 V 23 W dan Ignition Coil 12 V DC, serta sebuah Generator Plasma dengan menggunakan HV Transformer.

##### A. Plasmatron dengan Ignition Coil 12 V DC

Untuk membuat plasmatron dengan jenis ini, dibutuhkan beberapa peralatan elektronika dari yang sederhana seperti resistor, kapasitor, transistor, dan lain sebagainya, sampai peralatan elektronika yang lebih krusial seperti adaptor 12 V, IC (*Integrated Circuit*) NE555, dan ignition coil. Dimana ignition coil sebagaimana terlihat pada Gambar 3.2 bertindak sebagai inti dari rangkaian plasmatron ini.

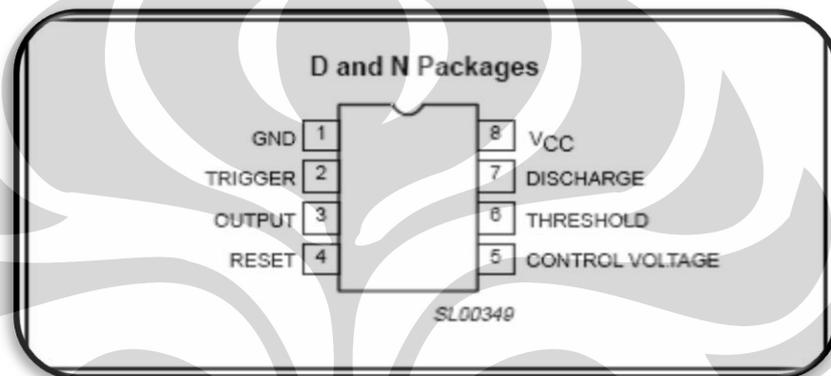


**Gambar 3. 2 Ignition Coil**

(“Ignition Coil”, n.d).

Koil pengapian (*ignition coil*) berfungsi menaikkan tegangan yang diterima dari baterai atau adaptor (12 V) menjadi tegangan tinggi (10 KV atau lebih). Pada koil pengapian (*ignition coil*), kumparan primer dan sekunder digulung pada inti besi. Kumparan-kumparan ini akan menaikkan tegangan yang diterima dari adaptor menjadi tegangan tinggi dengan cara induksi electromagnet (“Ignition Coil”, n.d). Untuk penelitian ini digunakan *Ignition Coil* Bosch.

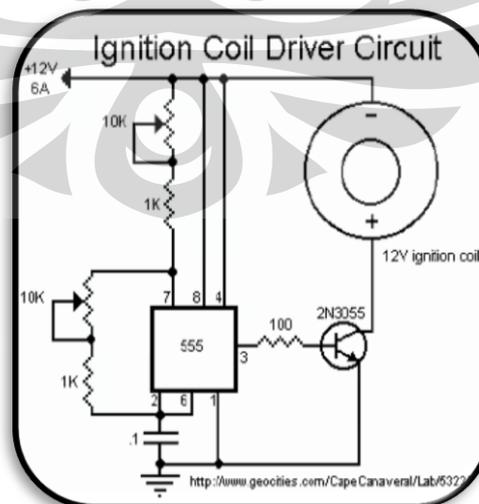
Sirkuit terpadu (*integrated circuit* atau IC) adalah komponen dasar yang terdiri dari resistor, transistor dan lain-lain. IC adalah komponen yang dipakai sebagai otak peralatan elektronika. Atau dapat dikatakan sebagai miniatur sirkuit elektronik (terutama terdiri dari perangkat semikonduktor, serta komponen pasif) yang telah diproduksi di permukaan yang tipis substrat dari semikonduktor bahan. Pada penelitian ini digunakan IC (sirkuit terpadu) jenis NE555 karena jenis ini memiliki kestabilan pengontrolan yang tinggi dan mampu secara akurat menghasilkan *time delays*, atau osilasi (NE/SA, 2003). Berikut Gambar NE555:



**Gambar 3. 3** IC NE555 Timer

(NE/SA, 2003)

Berikut Rangkaian Plasmatron Sederhana (12 VDC Ignition Coil Driver Circuit dengan IC 555) yang akan dibuat:

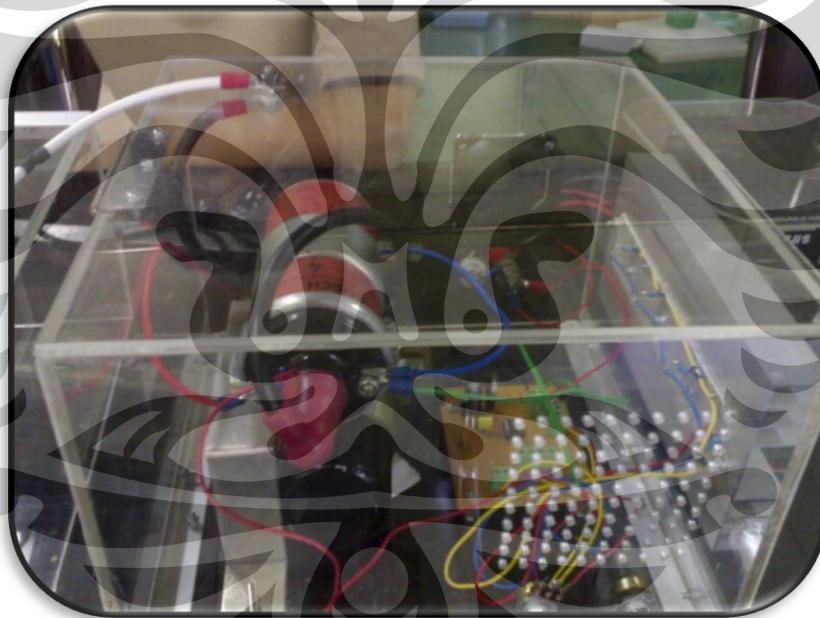


**Gambar 3. 4** 12 V DC Ignition Coil Driver Circuit dengan IC 555

Dimana pada rangkaian tersebut dibutuhkan beberapa komponen elektronen seperti:

- TRD (transistor daya),
- R (resistor daya),
- ECD (kapasitor daya),
- IC (*integrated circuit*) pembangkit tegangan tinggi, dan
- Potensiometer,
- Adaptor (12 – 24 V, 30A)
- Kabel listrik
- PCB

Berikut Gambar Plasmatron dengan menggunakan 12 V DC Ignition Coil Driver Circuit dengan IC 555:



**Gambar 3. 5** Plasmatron dengan 12 V DC Ignition Coil Driver dengan IC 555

#### **B. Plasmatron dengan menggunakan Ballast CFL 23 W**

Untuk Plasmatron Jenis Ballast CFL 23 Watt dibuat dengan menggunakan ballast lampu yang berasal dari ballast lampu CFL Philips dengan daya 23 Watt dan sebuah transformator jenis flyback tipe F 1691 CE yang biasa digunakan pada televisi Sharp.

Ballast lampu CFL digunakan karena prinsip kerjanya sama dengan prinsip kerja dari elektronik ballast, yaitu mampu menghasilkan frekuensi arus yang tinggi yang digunakan untuk meningkatkan tegangan dengan cara mengalirkan arus tersebut ke transformator frekuensi tinggi yang berukuran kecil yang terdapat pada PCB ballast. Pada ballast lampu terdapat berbagai komponen listrik dan enam buah tiang (kaki) yang terdiri atas empat buah kaki yang terhubung dengan filamen lampu dan dua buah kaki yang terhubung dengan sumber tegangan listrik PLN. Berikut ini merupakan gambar dari ballast yang digunakan dalam penelitian ini.



**Gambar 3. 6** Ballast CFL

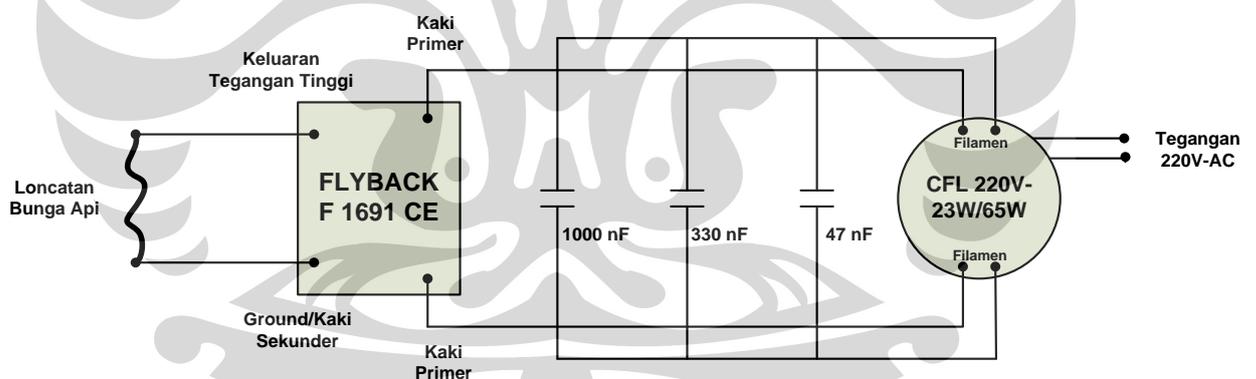
Pada rangkaian plasmatron ini, alat yang digunakan untuk menaikkan tegangan digunakan sebuah flyback atau *Integrated High Voltage Transformator*, seperti yang terlihat pada gambar di bawah ini:



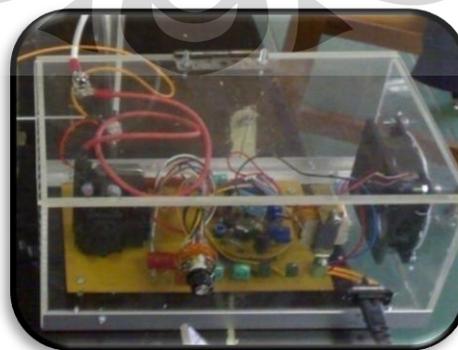
**Gambar 3. 7** *Integrated High Voltage Transformator (Flyback)*

(“Flyback Transformer”, n.d).

Flyback atau *Integrated High Voltage Transformator* adalah transformator yang digunakan untuk membangkitkan tegangan tinggi dalam rangkaian pesawat video. Flyback digunakan untuk menghasilkan plasma yang digunakan dalam penelitian ini. Komponen flyback ini digunakan karena dapat menghasilkan tegangan tinggi dan frekuensi arus yang tinggi yang diperlukan untuk mengantarkan *elektron beam* pada monitor televisi. Bagian yang terlihat pada flyback yang digunakan adalah kaki-kaki yang terdapat pada bagian bawah dari flyback yang terdiri atas 10 buah dan sebuah kabel, sedangkan lilitan kawat terbungkus rapi dalam casing flyback. Dari kaki-kaki flyback, kaki yang digunakan hanya dua buah, yaitu **kaki primer** dan **kaki sekunder**. Kaki primer dari flyback dihubungkan dengan dua buah kaki filamen ballast sedangkan kaki sekunder berfungsi sebagai ground dari plasmatron. Plasma akan keluar jika kaki sekunder didekatkan dengan kabel yang terdapat pada bagian atas flyback. Pada Gambar 3.8 di bawah ini, dapat dilihat rangkaian Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W, dan gambar rangkaian plasmatron yang telah diberi *casing* pada Gambar 3.9.



**Gambar 3.8** Rangkaian Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W.



**Gambar 3.9** Rangkaian utuh Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W

### C. Generator Plasma dengan Menggunakan HV Transformer

Transformator merupakan suatu alat listrik yang mengubah tegangan arus bolak-balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip-prinsip induksi-elektromagnet, serta melalui gandengan magnet memindahkan daya listrik dari suatu rangkaian ke rangkaian lainnya dengan frekuensi yang sama. Tegangan dapat dinaikan atau diturunkan sesuai dengan besar kecilnya tegangan masukan pada bagian primer trafo. Transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Prinsip kerja transformator adalah berdasarkan hukum Ampere dan hukum Faraday, yaitu: arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan sebaliknya medan magnet dapat menimbulkan arus listrik. Jika pada salah satu kumparan pada transformator diberi arus bolak-balik maka jumlah garis gaya magnet berubah-ubah. Akibatnya pada sisi primer terjadi induksi. Sisi sekunder menerima garis gaya magnet dari sisi primer yang jumlahnya berubah-ubah pula. Maka di sisi sekunder juga timbul induksi, akibatnya antara dua ujung terdapat beda tegangan.

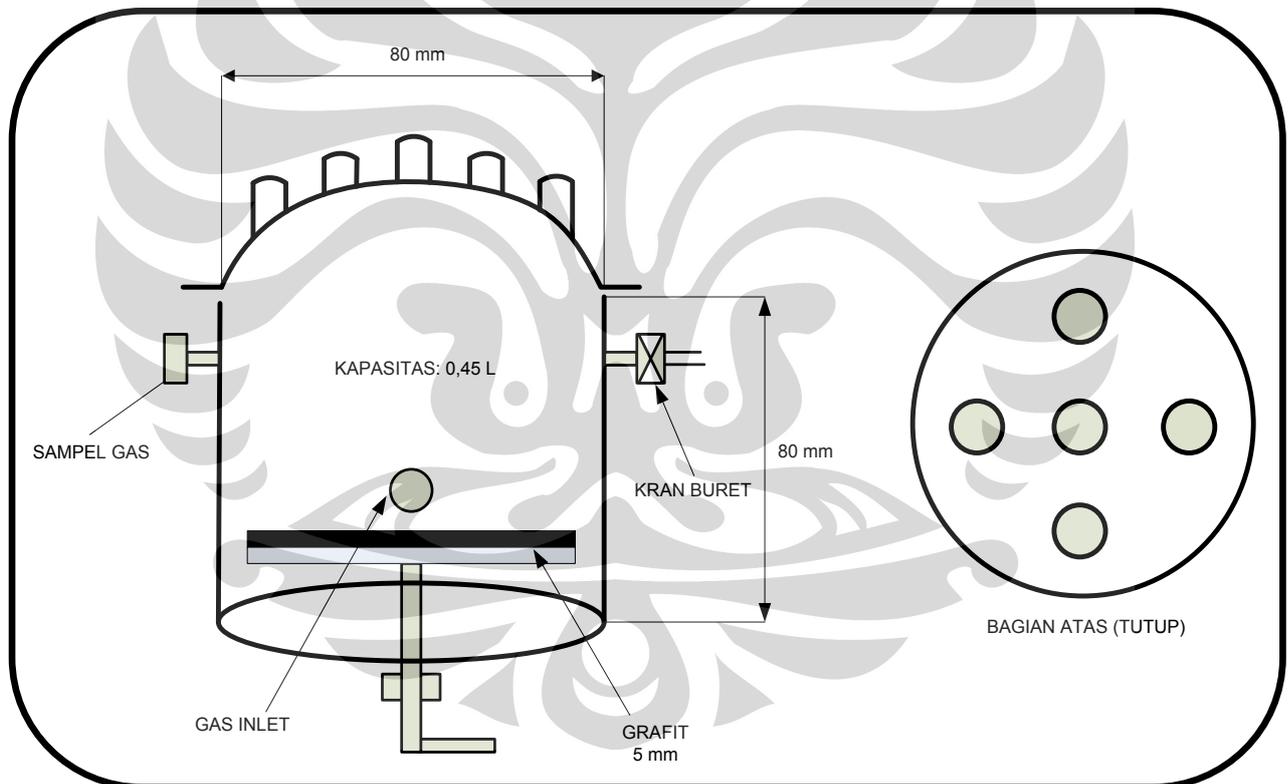
Pada penelitian ini digunakan *High Voltage Transformer* jenis *Neon Sign Transformer*. Hal ini dikarenakan umumnya untuk percobaan yang menggunakan tegangan tinggi, transformator yang digunakan adalah *Neon Sign Transformer* yang berguna sebagai sumber listrik tegangan tinggi. *Neon Sign Transformer* biasanya memiliki output dan arus tegangan yang tinggi, serta memiliki bentuk dan ukuran yang berbeda-beda. Untuk penelitian ini, akan digunakan Neon Sign Transformer yang memiliki tegangan output sebesar 15000 V. Berikut ini merupakan gambar dari *Neon Sign Transformer* yang digunakan dalam penelitian ini



**Gambar 3. 10** *Neon Sign Transformer*

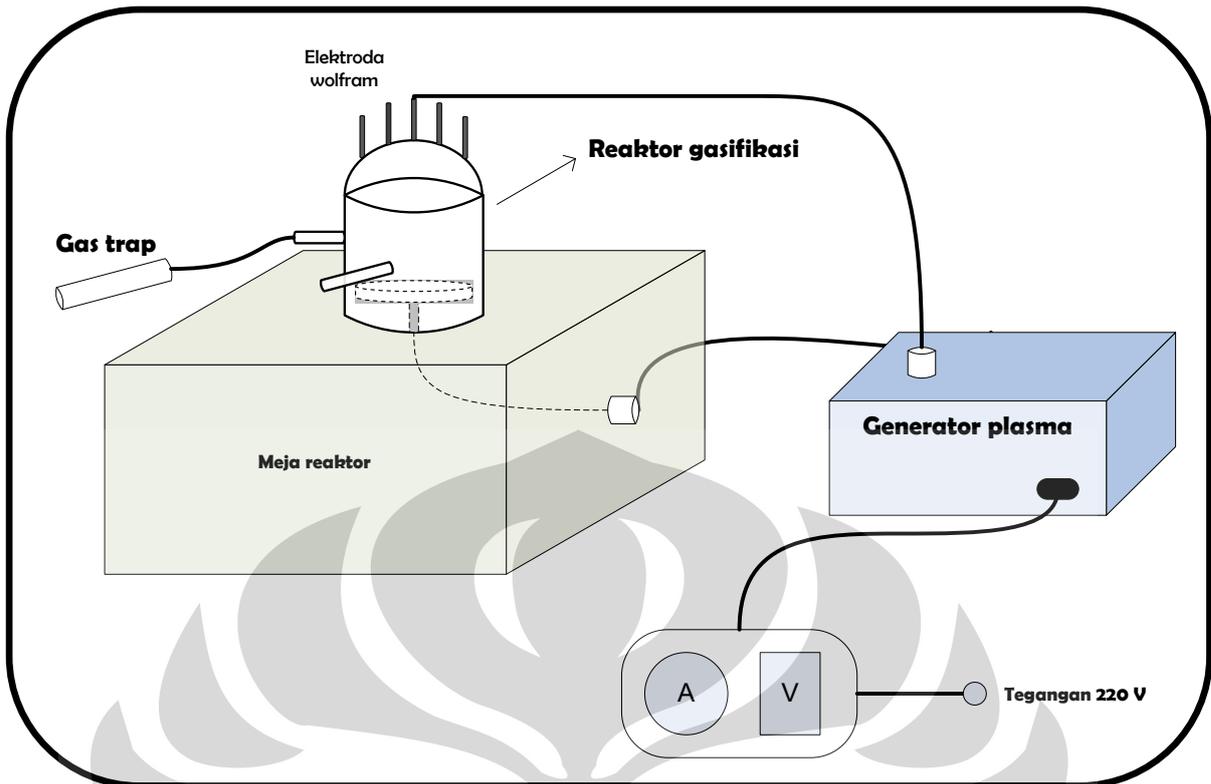
### 3.2.2 Rancang Bangun Reaktor Plasma Nontermal

Pada penelitian ini akan dibangun *prototype* reaktor plasma nontermal, yang terbuat dari gelas borosilikat, dan berbentuk tabung. Alasan pemilihan tabung sebagai bentuk dari reaktor adalah hanya dikarenakan kemudahan dalam pembentukannya saja karena pada dasarnya bentuk dari reaktor ini tidak berpengaruh pada proses gasifikasi. Hal yang lebih dipertimbangkan adalah jarak pancaran plasma yang akan dihasilkan antar elektroda. Karena reaktor ini dirancang sebagai *prototype* dengan ukuran 0,45 L dari reaktor plasma sebenarnya, maka jarak antar elektroda pun dirancang sedemikian rupa, sehingga mencukupi untuk menghasilkan loncatan plasma. Berikut skema rancangan *prototype* Reaktor Plasma Non-Termal yang akan dikerjakan:



**Gambar 3. 11** Rancangan *Prototype* Reaktor Plasma

Berikut skema rancangan dari proses gasifikasi plasma nontermal yang akan dikerjakan:



**Gambar 3. 12** Skema Sistem Peralatan Gasifikasi Plasma Nontermal

Dari Gambar 3.12 di atas dapat dilihat bahwa elektroda dengan jenis grafit digunakan sebagai ground dari reaktor. Grafit ini berbentuk lempengan dengan diameter sekitar 7 cm dan tebal 1 cm, sebagai penyangga elektroda grafit, serta sebagai penghantar listrik ke elektroda ground, digunakan penyangga yang terbuat dari stainless steel. Berikut adalah contoh gambar dari elektroda grafit yang digunakan beserta penyangganya.



**Gambar 3. 13** Elektroda Ground Yang Terbuat Dari Grafit Dan Penyangga Dari Stainless Steel.

Pada bagian tutup dari reaktor yang berbentuk kubah, terdapat lima buah lubang yang digunakan untuk menyematkan lima buah elektroda yang akan digunakan untuk menghantarkan plasma. Kelima buah elektroda yang digunakan dalam penelitian ini adalah batang tungsten atau biasa disebut dengan batang wolfram. Gambar 3.14 di bawah ini merupakan elektroda dari batang tungsten yang digunakan.



**Gambar 3. 14** Elektroda batang Tungsten (Wolfram)

### 3.2.3 Pengujian Plasmatron dan Reaktor Plasma Nontermal

Pengujian terhadap plasmatron dilakukan untuk mengetahui bahwa plasmatron telah dapat berfungsi secara optimal dengan membangkitkan plasma yang nantinya akan digunakan dalam penelitian ini. Sedangkan untuk pengujian prototype reaktor plasma nontermal dilakukan untuk mengetahui ada atau tidaknya kerusakan pada alat tersebut sebelum digunakan lebih lanjut dalam penelitian.

### 3.2.4 Preparasi Sampel Limbah Padat

Limbah padat yang digunakan sebagai sampel limbah padat ada beberapa macam, yaitu:

- limbah organik yang berupa daun-daunan,
- serbuk gergaji

Agar menjadi sampel, limbah ini mengalami perlakuan khusus yaitu dipotong-potong dan disaring agar ukurannya menjadi homogen.

### 3.2.5 Uji Pengolahan Limbah Padat (Proses Gasifikasi)

Pengujian gasifikasi limbah padat untuk skala laboratorium akan dilakukan dengan menggunakan reaktor gelas ukuran 0,45 L, dengan tujuan untuk melakukan pengamatan skala laboratorium yang cukup intensif dan menghemat biaya analisis. Pada tahap ini, dilakukan proses gasifikasi limbah padat dengan kondisi operasi batch.

#### Variasi yang digunakan:

- Jenis Generator Plasma yang digunakan, yaitu Plasmatron dengan jenis Ignition Coil 12 V DC dan CFL 220 V 23 W , serta generator plasma menggunakan HV Transformer.
- Kondisi operasi reaktor plasma (variasi gas blanket)
- Waktu berlangsungnya proses gasifikasi
- Jumlah elektroda yang digunakan

### 3.2.6 Pengambilan dan Analisis Sampel Gas sebagai hasil gasifikasi limbah padat

Selama proses berlangsung diperkirakan terbentuk beberapa komponen gas, tergantung jenis umpan yang digunakan. Untuk itu, selama proses berlangsung, dilakukan analisis terhadap kandungan gas keluaran. Pada sampel gas keluaran yang telah diambil dilakukan analisis terhadap parameter-parameter kualitas keluaran, seperti: kadar gas sintesis ( $\text{CO}$  dan  $\text{H}_2$ ) yang dihasilkan. Analisis sampel gas dilakukan dengan menggunakan kromatografi gas (GC) yang terdapat di laboratorium RPKA. Tujuan dari dilakukannya analisis dengan gas kromatografi (GC) adalah untuk mengetahui jenis dan komposisi dari komponen yang dihasilkan dari proses gasifikasi sample tertentu. Sample GC yang digunakan untuk menganalisis gas yang dihasilkan diambil dengan menggunakan *syringe*. Sampel yang digunakan diambil dengan ketentuan sebagai berikut:

- sampel diambil segera setelah gasifikasi selesai dengan menggunakan tabung sampel gas (*gas trap*)
- sampel diambil setiap batch operasi sebanyak satu kali

Analisis produk gas (keluaran proses gasifikasi) yang akan dilakukan menggunakan analisis *Gas Chromatography* (GC).

### 3.3 Prosedur Penelitian

Berikut akan dipaparkan prosedur yang akan dilakukan dalam tahap-tahap eksperimen.

#### 3.3.1 Uji Kinerja Reaktor Plasma

##### A. Alat dan Bahan

Dalam melakukan uji kinerja reaktor plasma, digunakan beberapa alat dan bahan sebagai berikut :

- Alat :
  - Reaktor gasifikasi untuk tempat terjadinya proses gasifikasi
  - 1 Unit plasmatron yang dibuat dari ballast lampu CFL 23 Watt
  - 1 Unit plasmatron yang dibuat dari Ignition Coil 12 V DC
  - 1 Unit generator plasma yang dibuat dari HV Transformer
  - Timbangan untuk menimbang massa sample yang digunakan
  - Stopwatch untuk menghitung waktu gasifikasi berlangsung
  - *Gas trap* untuk mengambil sample gas produk dari proses gasifikasi
  - *Gas chromatography* untuk menganalisa gas produk gasifikasi
  - *Vacuum gauge*
  - *Ampere meter* dan *volt meter*
  - Pompa vakum untuk membuat keadaan vakum dalam reaktor.
  - Selang silicon sebagai penyambung antara reaktor dengan gas trap, reaktor – vacuum gauge, reaktor – gas nitrogen, reaktor – gas nitrogen, vacuum gauge – pompa vakum
  - Regulator gas Nitrogen untuk mengatur keluaran gas nitrogen yang dibutuhkan
  - Elektroda berupa *tungsten rod* (W) dan batang tembaga sebagai elektroda untuk mengalirkan plasma
  - Elektroda ground berupa plat grafit yang diletakkan di atas stainless steel.
- Bahan
  - Sampel sampah padat berupa daun kering dan serbuk gergaji
  - Gas Nitrogen sebagai gas blanket untuk reaktor saat proses gasifikasi berlangsung.

## B. Prosedur uji kinerja reaktor plasma

1. Memastikan kabel sumber tegangan 220V (CFL), 12 volt (IC) tegangan tinggi, HV Transformer, dan *ground* telah tersambung serta terkoneksi dengan baik dan benar.
2. Meletakkan sampel daun kering sebanyak  $\pm 0,35$  gram di atas plat grafit.
3. Mengisolasi reaktor dengan cara menutupnya dengan rapat dan menutup semua valve yang berhubungan dengan reaktor.
4. Memastikan semua elektroda pada tutup reaktor yang digunakan telah terpasang dengan ketinggian yang telah ditentukan.
5. Memasang kabel tegangan tinggi keluaran plasmatron pada elektroda yang akan dipergunakan sesuai dengan konfigurasi susunan yang telah ditentukan.
6. Menghubungkan *gas trap* dengan valve bagian atas reaktor (valve *gas trap* dalam keadaan tertutup).
7. Membuat reaktor dalam keadaan vakum dengan cara menghubungkan pompa vakum dengan valve bagian bawah reaktor, kemudian memvakum reaktor sampai (-1) – (-10) cmHg, lalu menutup valve yang menghubungkan reaktor dengan pompa vakum.
8. Menghubungkan selang gas nitrogen dengan valve bagian bawah reaktor, membuka valve, kemudian mengalirkan gas nitrogen ke dalam reaktor sampai tekanan 0 cmHg, menghentikan aliran gas nitrogen, menutup valve, dan melepaskan selang gas nitrogen.
9. Mengatur rangkaian untuk setiap jenis generator plasma:
  - a. Untuk Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W:

Mengatur plasmatron sehingga plasmatron menggunakan kapasitor 1000 nF (sesuai yang telah ditentukan) dengan cara memutar rotary switch yang terdapat pada plasmatron.
  - b. Untuk Plasmatron Ignition Coil 12 V DC:

Mengatur agar sumber tegangan dalam hal ini adalah adaptor telah tersambung dengan baik dengan plasmatron dan mengatur keluaran adaptor sebesar 12 V.

- c. Untuk Generator Plasma dengan menggunakan HV Transformator:  
Mengatur agar regulator voltase dan ampere meter telah tersambung dengan baik dengan *Neon Sign Transformer*.
10. Memulai proses gasifikasi dengan cara menyalakan plasmatron selama 5 menit dan mengamati fenomena yang terjadi.
  11. Membuka valve reaktor bagian atas (yang terhubung dengan gas trap) saat proses gasifikasi dimulai agar gas produk dapat masuk ke gas trap untuk dianalisa lebih lanjut.
  12. Mematikan plasmatron setelah proses berjalan selama 5 menit.
  13. Menutup valve reaktor bagian atas dan *gas trap* bersamaan kemudian mencabut *gas trap* dari reaktor untuk dianalisa.
  14. Mengambil *gas trap* yang telah berisi gas produk untuk dianalisa dengan GC.
  15. Menganalisa gas hasil gasifikasi dengan GC
  16. Membuka tutup reaktor dan menimbang sisa sampel hasil pembakaran lalu membersihkan bracket karbon dari sisa-sisa pembakaran
  17. Mengulangi langkah 1-15 untuk variasi lainnya

### 3.3.2 Uji Analisa Gas Keluaran dengan GC

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

1. Preparasi GC  
Memanaskan GC kurang lebih selama 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.
2. Prosedur mengalirkan gas Argon
  - memastikan tekanan input dan output di regulator berada pada angka  $\emptyset$  dan tidak ada kebocoran padasambungan-sambungannya.
  - membuka *valve* utama darikencang menjadi kendur, sehingga tekanan akan langsung naik.

- membuka *valve* regulator dari kendur menjadi kencang sehingga tekanannya naik perlahan-lahan.
3. Prosedur membuka tabung gas:
- memastikan tekanan input dan output di regulator, jarum pressure gauge menunjukkan  $\emptyset$  dan *valve* dalam keadaan tertutup (posisi *valve* longgar).
  - membuka *valve* induk di tabung dengan memutar ke arah kiri (arah kebalikan jarum jam) dan lihat tekanan gas, yang menunjukkan tekanan dalam tabung.
  - membuka *valve* regulator perlahan-lahan ke arah kanan (searah jarum jam), lalu atur tekanan gas yang diinginkan.
  - Memastikan instalasi gas baik dari tabung sampai perpipaan tidak bocor (cek kebocoran menggunakan pipa sabun).
  - Untuk gas-gas yang beracun dan mudah terbakar ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ), langkah 4 harus dilakukan terlebih dahulu sebelum langkah 1 menggunakan gas inert  $\text{N}_2$
4. Prosedur Menutup Gas
- Menutup *valve* induk di tabung dengan memutar ke arah kanan (searah jarum jam) tunggu hingga tekanan gas di pressure gauge menunjukkan  $\emptyset$
  - Menutup *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  $\emptyset$
5. Prosedur Menyalakan GC
- Memastikan tekanan primary 600 kPa, *carrier gas*  $\pm 150$  kPa
  - Mengatur suhu menjadi 130 – 100 – 100 °C
  - Menunggu hingga stabil (hingga lampu pada GC berkedip-kedip)
  - Menyalakan *current* pada 6 mA
6. Prosedur menyalakan chromatopac (dengan kolom *porapak*):
- Menghubungkan chromatopac dengan GC, tekan: *shift down* bersama dengan I,N,I, lalu tekan *enter*, akan muncul *initialize* pada kertas recorder.

- Mengatur tinta di sebelah kiri, tekan: *shift down* bersama dengan *plot*, lalu tekan *enter*, untuk mengatur gunakan “*coarse*” kemudian tekan kembali *shift down* bersama dengan *plot*, lalu tekan *enter*.
  - 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*.
  - Mengatur kecepatan kertas, tekan: *speed* bersama dengan angka 10, lalu tekan *enter*.
  - Mengatur *stop time*, tekan: *stop time* bersama dengan angka 3 lalu tekan *enter*.
  - Untuk melihat parameter-parameter yang ada, tekan: *shift down* bersama dengan *print* dan *width*, lalu tekan *enter*.
  - Mengetahui apakah GC sudah stabil (garis lurus), tekan: *shift* bersama dengan *plot*, lalu tekan *enter*. Kestabilan juga dapat dilihat dari tekan: *print* bersama *ctrl* dan *width* secara bersamaan. Nilai yang keluar harus lebih besar dari 100, jika belum mencapai, maka *coarse* atau *fine* diputar untuk mendapatkan hasil yang diinginkan.
7. Prosedur mematikan GC:
- Mematikan *current*.
  - Menurunkan temperature menjadi 30-30-30 kemudian GC dibuka agar pendinginan terjadi lebih cepat.
  - Setelah suhu kolom menjadi 80 (pada indicator) kemudian GC baru dapat dimatikan.
8. Prosedur mematikan aliran gas
- Sesuai dengan prosedur menutup gas.

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan penelitian dengan metode yang disebutkan pada Bab 3, hasil dan pembahasannya dapat dilihat pada Bab ini. Pada Bab ini akan dibahas tentang pembuatan dan pengujian awal plasmatron dan reaktor yang digunakan dalam penelitian, data tentang senyawa gas yang diperoleh dari proses gasifikasi yang dilakukan, dan pembahasan tentang data yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan.

Pada penelitian ini digunakan reaktor yang terbuat dari gelas borosilikat dengan akses elektroda pada tutup dan akses ground pada bagian bawah reaktor. Elektroda atas yang digunakan adalah batang logam wolfram yang merupakan logam tahan panas sedangkan elektroda *ground* terdiri dari penampang stainless steel dan alas karbon sebagai isolator termal untuk menghindari panas yang berlebihan pada reaktor. Variasi jenis plasmatron dilakukan untuk mendapatkan kinerja plasmatron untuk proses gasifikasi limbah apadat optimal. Ketiga jenis plasmatron tersebut adalah Ignition Coil 12 V DC, Ballast CFL 220 V 23 W dan Generator Plasma yang terbuat dari HV Transformer. Untuk waktu gasifikasi dilakukan dengan dua variasi yaitu 5 menit dan 10 menit, sedangkan variasi jumlah elektroda yang digunakan adalah 1 elektroda dan 5 elektroda.

Umpan yang digunakan dalam penelitian ini berupa limbah organik padat seperti daun kering dan serbuk gergaji, dimana untuk limbah serbuk gergaji hanya diperlakukan untuk kondisi optimum saja. Kondisi operasi gasifikasi plasma juga divariasikan dengan kondisi vakum dan dengan adanya *blanket gas*, yaitu Nitrogen (N<sub>2</sub>). Alasan dilakukannya variasi kondisi operasi gasifikasi adalah untuk mengetahui pada kondisi manakah proses gasifikasi plasma untuk limbah padat ini dapat berlangsung optimal dan menghasilkan *syngas* yang optimal pula.

#### 4.1 Pengujian Kinerja Plasmatron dan Reaktor Plasma Nontermal

Salah satu parameter yang digunakan untuk menguji kinerja plasmatron dan reaktor plasma yang digunakan dalam penelitian ini adalah dari segi jumlah

*syngas* yang dihasilkan. Pada dasarnya *syngas* terdiri dari gas CO dan H<sub>2</sub>, namun pada penelitian kali ini yang menjadi parameter hanya gas CO saja. Hal ini disebabkan adanya gaya van der Waals antara molekul H<sub>2</sub> dan CO, hal ini dimungkinkan karena pada saat terjadi proses gasifikasi, tekanan dalam reaktor yang tadinya hampir tidak bertekanan karena adanya perlakuan vakum ringan, menjadi bertekanan karena adanya *syngas* yang dihasilkan dari proses gasifikasi. Jika tekanan gas dalam reaktor menjadi besar maka volum gas akan menjadi semakin kecil, sehingga jarak antar molekul akan semakin dekat. Hal ini menyebabkan semakin besar kemungkinan adanya ikatan antar molekul, dimana molekul akan saling tarik-menarik dan bertumbukan. Pada saat hal ini terjadi, keberadaan gas H<sub>2</sub> terintervensi oleh gas CO, sehingga pada hasil analisa GC, yang terbaca hanyalah gas CO saja, dimana gas CO itupun memiliki puncak yang berhimpit dengan puncak udara. Pernyataan tersebut didukung oleh hasil kalibrasi dari gas H<sub>2</sub> dan CO yang dilakukan menggunakan GC (hasil kalibrasi dapat dilihat pada lampiran), dimana gas H<sub>2</sub> memiliki *retention time* sebesar 0,237, sedangkan gas CO memiliki *retention time* sebesar 0,287. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa, gas H<sub>2</sub> dan CO memiliki *retention time* yang berdekatan, sehingga semakin memperbesar kemungkinan puncak gas H<sub>2</sub> menyatu dengan puncak CO. Selain akibat adanya gaya van der Waals, intervensi gas CO terhadap H<sub>2</sub> juga kemungkinan disebabkan oleh sifat kedua gas tersebut sebagai reduktor.

Pengujian dilakukan untuk ketiga jenis plasmatron yang digunakan, yaitu Ballast CFL 220 V 23 W, HV Transformer dan *Ignition Coil* 12 V DC, dengan kondisi operasi gasifikasi yang berbeda-beda. Berikut merupakan grafik yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan:

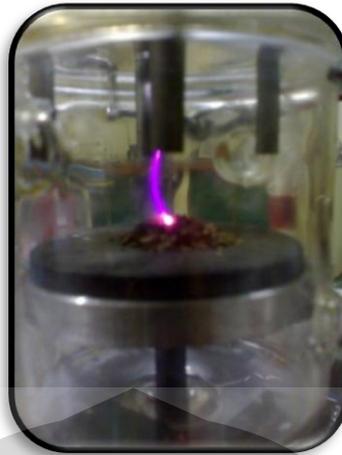
#### **4.1.1 Hasil Proses Gasifikasi Pada Kondisi Operasi Vakum**

Pada tahap penelitian ini proses plasma gasifikasi berlangsung pada kondisi vakum. Dimana, jarak antar elektroda telah ditetapkan sejauh 2 cm, jarak ini mengacu pada jarak optimum keluaran plasma sebagaimana telah dilakukan percobaan awal untuk mengetahui jarak optimum plasma yang dilakukan oleh saudara Andy Rivai. Selain itu, khusus untuk plasmatron jenis Ballast CFL 220 V 23 W, pada penelitian ini ditetapkan muatan kapasitor yang digunakan adalah

1000 nF , hal ini mengacu pada percobaan awal untuk mengetahui kinerja kapasitor optimal untuk proses gasifikasi plasma pada plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W yang juga telah dilakukan oleh saudara Andy Rivai. Nilai kapasitor merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi kinerja reaktor plasma non termal. Semakin besar 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, proses gasifikasi akan lebih baik dan bisa menghasilkan gas sintesis lebih banyak.

Sampel sampah yang digunakan pada tahap penelitian ini adalah sampah jenis daun kering, dimana diperlakukan variasi seperti waktu gasifikasi yaitu 5 dan 10 menit, serta variasi jumlah elektroda yaitu 1 dan 5 elektroda.

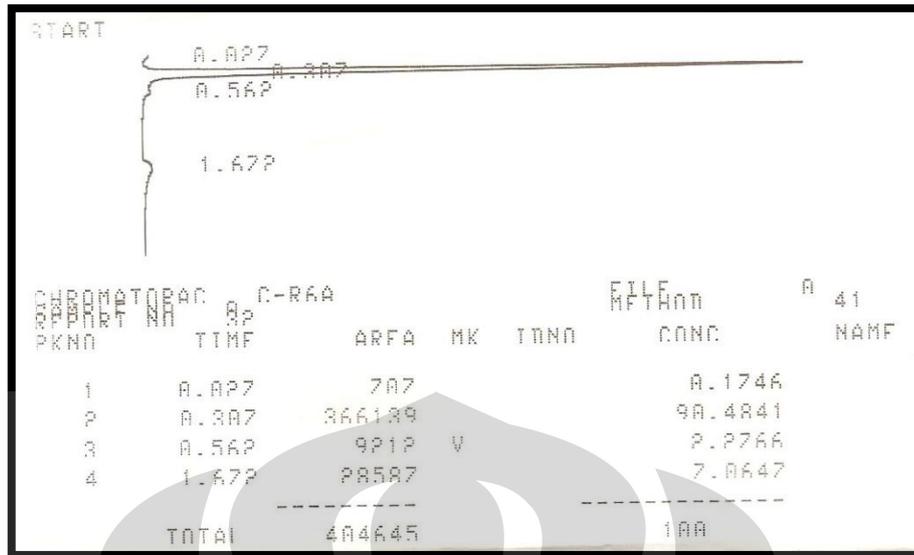
Pada saat proses gasifikasi plasma berlangsung pada kondisi vakum, dihasilkan plasma yang berwarna ungu terang dan berukuran cukup tebal. Hal ini disebabkan elektron mempunyai muatan negatif sedangkan ion bermuatan positif. Ketika kedua partikel bermuatan ini bergerak di sekitar plasma, mereka merubah karakter dasar dari medan elektromagnetik, seperti hibridisasi sub-orbital elektron di sub kulit *s*, *p*, dan *d*. Hal ini dikombinasikan dengan gerakan kesana kemari medan elektromagnetik dari elektroda yang akan mengeksitasi ion, molekul, dan atom. Ketika partikel ini tereksitasi, mereka secara cepat meradiasikan energi dalam bentuk foton, atau unit cahaya. Ini yang membuat plasma memancarkan warna karakteristiknya, dan warna tergantung dari gas sumber serta temperaturnya. Fenomena plasma yang berwarna ungu terang pada kondisi vakum dapat dilihat pada Gambar 4.1 di bawah ini.



**Gambar 4. 1** Gasifikasi Plasma Dalam Kondisi Vakum Menghasilkan Warna Ungu Terang

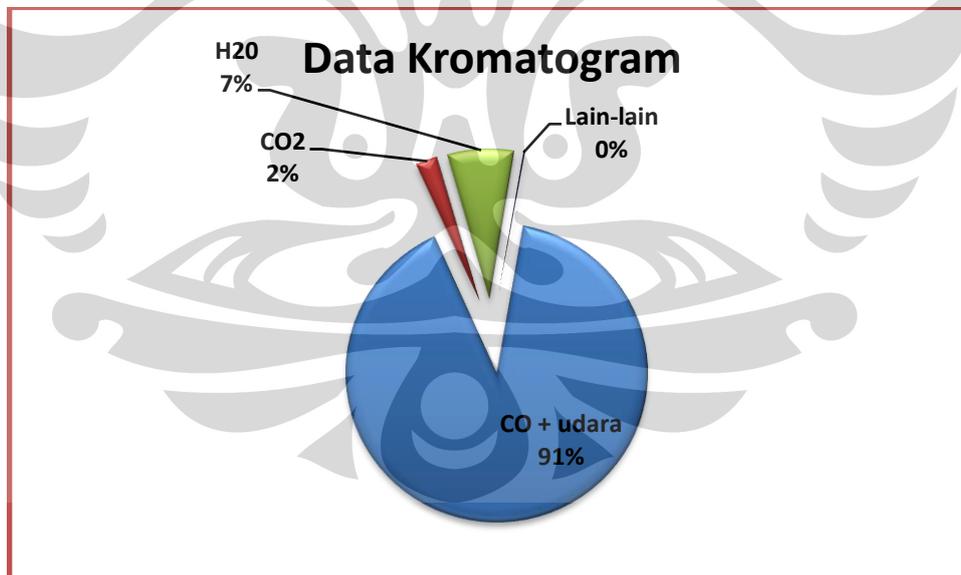
Plasma, bila mengalami kontak dengan gas, akan menghasilkan warna yang berbeda-beda, tergantung jenis gasnya. Berbagai warna plasma tersebut disebabkan adanya emisi dari energi atom, ion, ataupun molekul yang tinggi. Seperti yang diketahui bahwa kondisi energi dari setiap gas memiliki perbedaan, setiap gas memiliki karakteristik yang berbeda-beda sehingga menghasilkan karakteristik warna yang berbeda pula. Untuk kondisi vakum ini, plasma berwarna ungu disebabkan masih terdapatnya partikel udara walaupun dalam jumlah sangat minim di dalam reaktor. Hal ini dikarenakan kondisi vakum yang diperlakukan pada reaktor adalah vakum ringan (PowerLabs, 2009). Dalam analisa dengan GC, gas CO dan udara berada dalam *puncak* yang sama, sehingga untuk mengkonfirmasi bahwa gas hasil pembakaran benar-benar mengandung CO maka digunakan *CO detector*.

Untuk lebih menggambarkan besarnya kadar gas CO yang dihasilkan dari proses gasifikasi plasma, berikut adalah gambar hasil analisis GC berupa kromatogram dari proses gasifikasi plasma pada kondisi vakum dengan menggunakan plasmatron jenis Ballast CFL 220 V 23 W. Proses gasifikasi ini berlangsung dalam waktu 10 menit dan menggunakan 1 elektroda.



**Gambar 4. 2** Salah Satu Data Kromatogram Hasil Gasifikasi Plasma Dalam Kondisi Vakum

Dari data kromatogram diatas, bila diolah dalam bentuk grafik akan menghasilkan *pie chart* seperti pada Gambar 4.3 berikut ini:

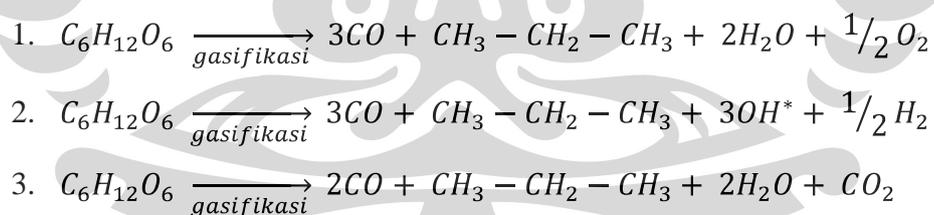


**Gambar 4. 3** Salah Satu Data Kromatogram Hasil Gasifikasi Plasma Dalam Kondisi Vakum

Dalam diagram di atas dapat dilihat bahwa kadar campuran antara CO dan udara memiliki kadar tertinggi, yaitu sekitar 91 %, lalu H<sub>2</sub>O merupakan kedua

tertinggi dengan persentase sebesar 7 %, dan terakhir, terdapat CO<sub>2</sub> dan komponen gas lainnya sebesar 2 %. Seperti yang telah dinyatakan sebelumnya bahwa dalam analisa GC, puncak udara dan puncak gas CO saling berhimpitan, sehingga dengan persentase sebesar 91 % tersebut, keduanya berbagi satu puncak bersama-sama (*manual book of crhomatography*).

Diagram tersebut semakin menekankan bahwa dalam proses gasifikasi limbah padat dengan memanfaatkan Plasma Nontermal, keberadaan gas H<sub>2</sub> sebagai gas produk tidak terbaca oleh analisis GC. Beberapa kemungkinan terbesar penyebab terjadinya hal tersebut, telah peneliti ungkapkan sebelumnya. Pada proses gasifikasi limbah padat dengan menggunakan Plasma Nontermal, pembentukan secara sempurna gas CO dan H<sub>2</sub> sebagai gas hasil gasifikasi sangat sulit tercapai. Contohnya saja gasifikasi plasma yang dilakukan untuk pengolahan limbah daun kering. Salah satu senyawa penyusun daun adalah senyawa karbohidrat dengan rumus molekul C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>. Apabila daun dikenai gasifikasi plasma, maka senyawa penyusunnya tentu saja akan terurai, terutama senyawa karbohidrat. Beberapa kemungkinan skema terjadinya penguraian karbohidrat menjadi senyawa lain akibat perlakuan gasifikasi plasma, diusulkan sebagai berikut:



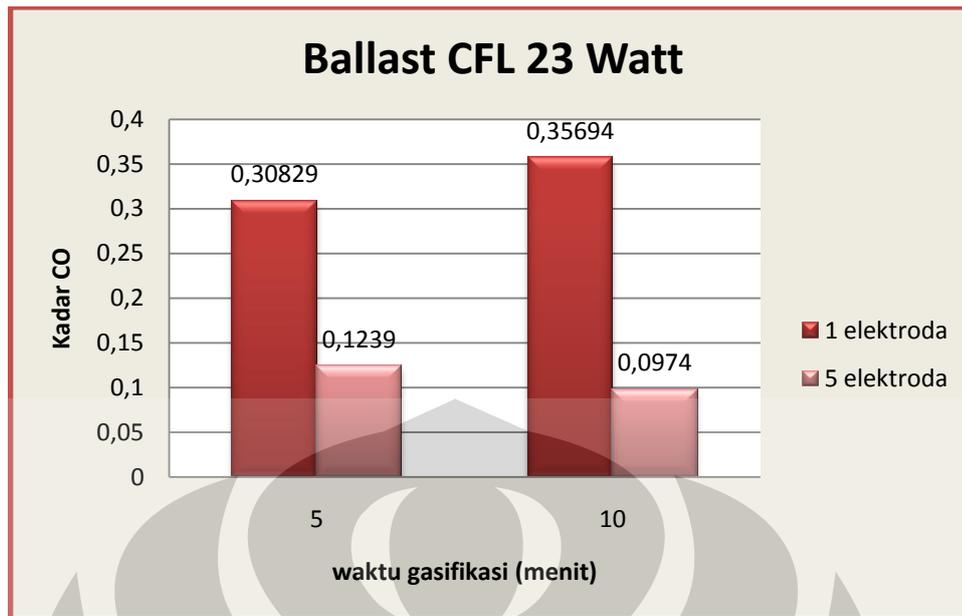
Dari ketiga kemungkinan skema penguraian karbohidrat akibat adanya perlakuan gasifikasi plasma di atas, dapat dilihat bahwa tidak selamanya hasil dari proses gasifikasi plasma akan memunculkan gas CO dan H<sub>2</sub> dalam satu kondisi reaksi. Gas H<sub>2</sub> bisa saja terintervensi oleh keberadaan gas CO yang begitu besar, sebagaimana yang telah peneliti ungkapkan pada analisa sebelumnya, atau bahkan unsur Hidrogen pada limbah organik tersebut tidak terurai menjadi H<sub>2</sub> melainkan H<sub>2</sub>O.

Untuk penelitian ini, dimana dilakukan proses gasifikasi plasma limbah padat dengan menggunakan Plasma Nontermal, tidak dapat dihasilkan *syngas* secara optimal. Hal ini disebabkan, penelitian ini dilakukan dengan skala lab dengan prosedur dan peralatan sederhana. Berbeda halnya dengan gasifikasi plasma menggunakan Plasma Termal yang memang digunakan sebagai metode pengolahan sampah, dimana pada teknologi tersebut, peralatan yang digunakan dari awal proses hingga akhir lebih kompleks, seperti *scrubber*, *gasifier*, dan lain sebagainya, sehingga lebih dapat melakukan pemisahan gas hasil proses dan menghasilkan *syngas* sebagaimana yang diharapkan.

#### **4.1.1.1 Hasil Penelitian untuk Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W**

Dari hasil analisa dengan menggunakan *Gas Chromatography* (GC), terlihat bahwa waktu gasifikasi dan jumlah elektroda berpengaruh pada optimalisasi proses gasifikasi plasma untuk limbah padat. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.4. Dari grafik tersebut dapat dijelaskan bahwa semakin lama waktu gasifikasi berlangsung, semakin besar pula persentase gas CO yang dihasilkan, demikian pula halnya dengan jumlah elektroda yang digunakan. Dapat terlihat bahwa dengan menggunakan 1 elektroda gas CO yang dihasilkan jauh lebih besar dibandingkan jika menggunakan 5 elektroda. Terlihat bahwa kadar gas CO tertinggi mencapai 0,3569 ml dengan waktu 10 menit dan menggunakan 1 elektroda.

Pengaruh waktu gasifikasi dan jumlah elektroda terhadap kadar optimum gas CO yang dihasilkan dalam proses gasifikasi plasma untuk limbah padat pada Gambar 4.4 dibawah ini.



**Gambar 4. 4** Hasil Analisis GC dengan Menggunakan Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W

Pada grafik di atas dapat dilihat bahwa penggunaan elektroda sebanyak 1 buah menghasilkan proses gasifikasi yang lebih optimal, hal ini terlihat dari kadar CO yang dihasilkan. Dengan menggunakan 1 buah elektroda dihasilkan kadar gas CO di atas 0,3 ml. Hal ini sangat jauh berbeda bila dibandingkan dengan penggunaan 5 elektroda yang hanya menghasilkan kadar gas CO sekitar 0,1 ml saja.

Persentase kadar gas CO yang lebih tinggi dengan menggunakan 1 elektroda dibandingkan 5 elektroda adalah dikarenakan jika menggunakan 1 elektroda plasma yang dihantarkan dari plasmatron melalui elektroda lebih terfokus pada 1 elektroda tersebut, hal ini menjadikan plasma yang dihasilkan lebih stabil. Sedangkan bila menggunakan 5 elektroda yang disusun paralel, plasma yang terhantar dari plasmatron ke elektroda harus terbagi pada setiap elektroda dan menjadikan plasma tersebut tidak fokus dalam melakukan gasifikasi. Walaupun plasma tersebut dikatakan terbagi pada 5 buah elektroda, akan tetapi tetap saja yang sanggup mengeluarkan plasma hanya 1 buah elektroda saja. Sebagai aliran listrik, plasma cenderung dan bahkan selalu memilih jalur yang hambatannya paling kecil dan tidak mengenai limbah, sehingga walaupun elektroda-elektroda dipasang paralel, plasma yang keluar tetap satu untuk satu

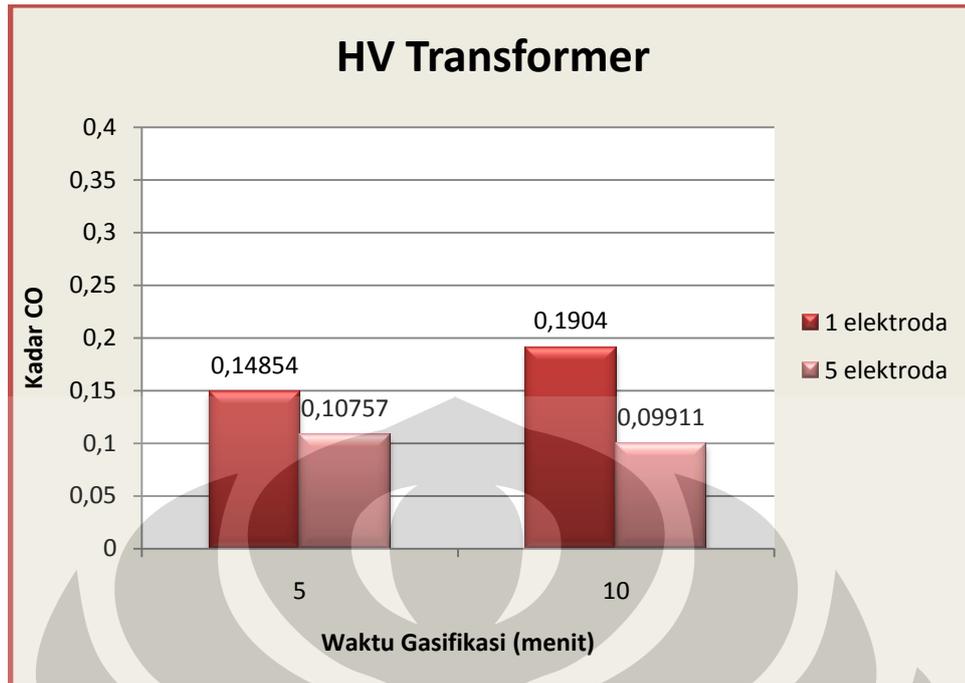
buah plasmatron. Namun 1 buah elektroda yang menghasilkan plasma tersebut tak tentu, terkadang plasma dihasilkan dari elektroda-elektroda yang berbeda secara bergantian.

Untuk variasi waktu gasifikasi, dapat dilihat pada grafik bahwa dengan waktu gasifikasi 10 menit, akan menghasilkan persentase kadar gas CO yang lebih tinggi dari pada bila proses gasifikasi hanya berlangsung 5 menit saja. Hal ini membuktikan bahwa dengan waktu 10 menit, memberikan waktu yang lebih lama bagi proses gasifikasi mencapai kondisi optimal, sehingga dapat menghasilkan *syngas* (dalam hal ini adalah gas CO) yang lebih banyak.

Plasma yang dihasilkan pada proses gasifikasi plasma dengan menggunakan Ballast CFL 220 V 23 W ini sangat stabil, dengan warna biru keunguan, dan cenderung lebih tebal.

#### **4.1.1.2 Hasil Penelitian untuk Generator Plasma dari HV Transformer**

Untuk Generator Plasma dari HV transformer, analisis yang didapatkan menggunakan *Gas Chromatography* (GC) tidak berbeda jauh dengan hasil analisis dengan menggunakan kinerja plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W. Dapat terlihat pada Gambar 4.5 di bawah ini, bahwa waktu gasifikasi dan jumlah elektroda berpengaruh pada optimalisasi proses gasifikasi plasma untuk limbah padat. Yang membedakan hasil analisis antara penggunaan plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W dengan HV transformer adalah kadar CO yang dihasilkan. Dengan menggunakan plasmatron jenis HV transformer didapatkan kadar CO tertinggi adalah 0,1904 ml dengan waktu gasifikasi 10 menit dan menggunakan 1 buah elektroda.



**Gambar 4. 5** Hasil Analisis GC dengan Menggunakan Generator Plasma dari HV Transformer

Seperti halnya bila menggunakan plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W, dari grafik tersebut dapat dijelaskan bahwa semakin lama waktu gasifikasi berlangsung, semakin besar pula persentase gas CO yang dihasilkan, demikian pula halnya dengan jumlah elektroda yang digunakan. Dapat terlihat bahwa dengan menggunakan 1 elektroda gas CO yang dihasilkan jauh lebih besar dibandingkan jika menggunakan 5 elektroda.

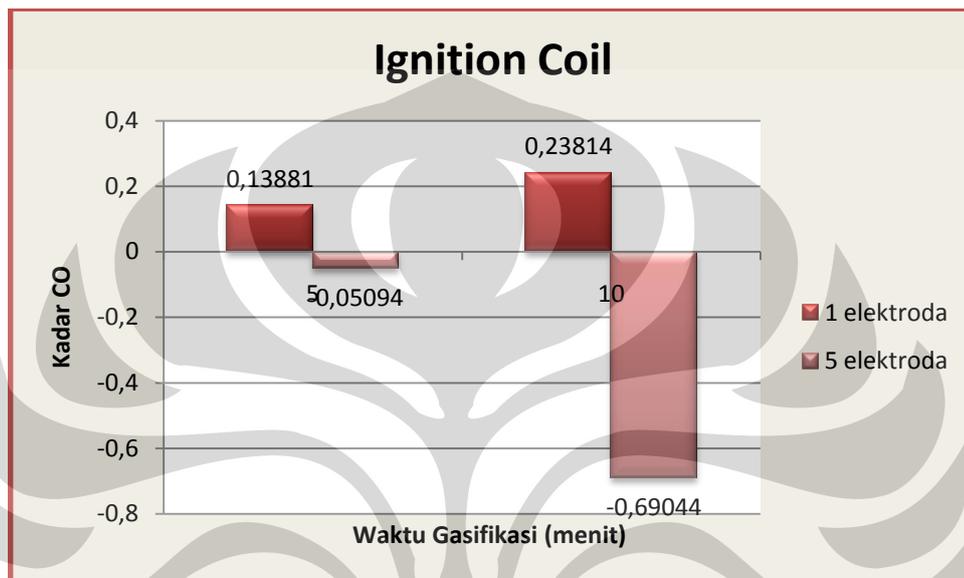
Plasma yang dihasilkan pada proses gasifikasi plasma dengan menggunakan HV transformer ini sangat stabil, dengan warna plasma biru keunguan, dan relatif lebih tipis bila dibandingkan dengan jika menggunakan CFL 220 V 23 W.

#### 4.1.1.3 Hasil Penelitian untuk Plasmatron Ignition Coil 12 V DC

Untuk Proses gasifikasi menggunakan Plasmatron Ignition Coil 12 V DC, hasil analisis menggunakan *Gas Chromatography* (GC) menyatakan bahwa pengaruh waktu gasifikasi dan jumlah elektroda tidak begitu signifikan bila dibandingkan dengan kedua jenis plasmatron pendahulunya. Bahkan dapat

dikatakan bahwa analisis jenis plasmatron ini mengalami penyimpangan dari kedua plasmatron sebelumnya.

Pengaruh waktu gasifikasi dan jumlah elektroda terhadap persentase optimalisasi proses gasifikasi plasma untuk limbah padat pada Gambar 4.6 dibawah ini.



**Gambar 4. 6** Hasil Analisis GC Dengan Menggunakan Plasmatron *Ignition Coil*

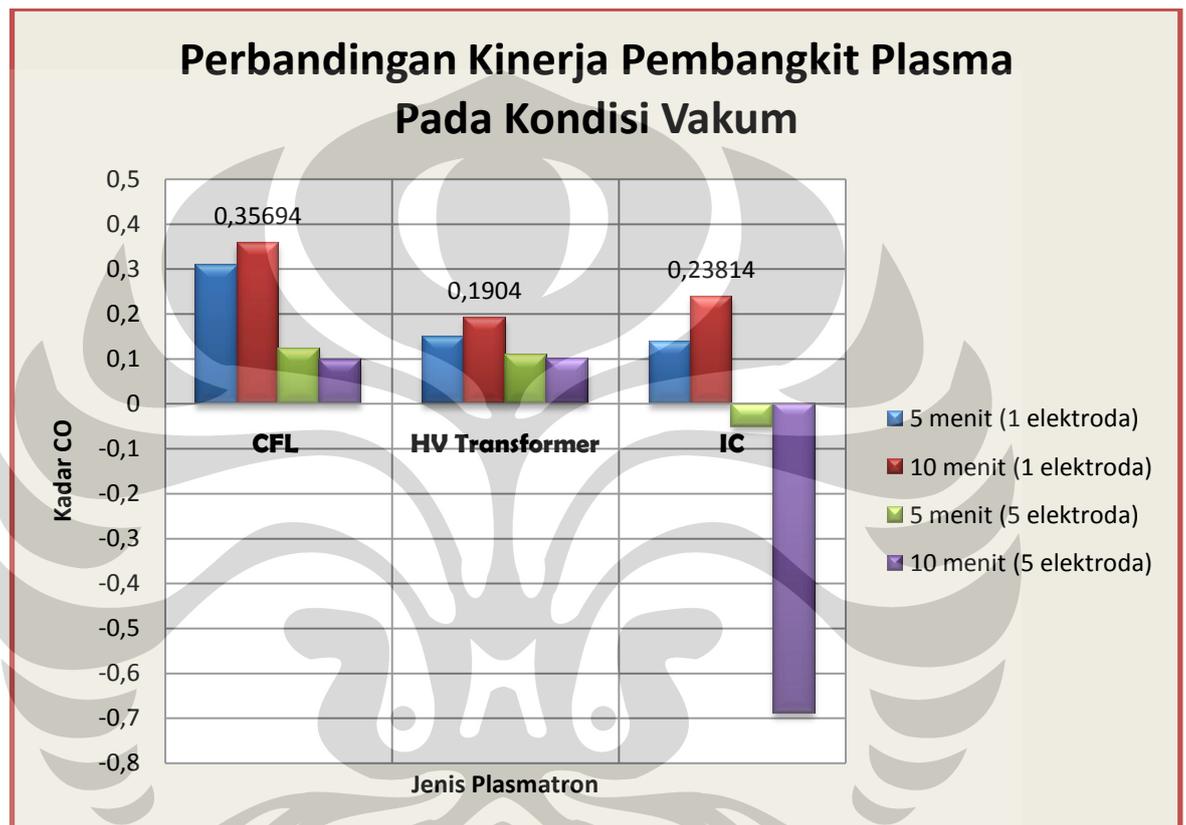
Dapat dilihat pada grafik di atas bahwa keadaan gasifikasi yang paling optimal adalah jika menggunakan 1 elektroda dalam waktu 10 menit, yaitu menghasilkan kadar CO sebesar 0,238 ml dan hal ini mendukung hasil dari analisis sebelumnya menggunakan plasmatron jenis Ballast CFL 220 V 23 W dan HV Transformer. Namun, untuk data hasil gasifikasi menggunakan 5 elektroda baik itu dilakukan dalam kurun waktu 5 menit ataupun 10 menit, didapatkan kadar CO bernilai negatif. Sehingga dapat dikatakan proses gasifikasi plasma dengan menggunakan Plasmatron Ignition Coil 12 V DC dan 5 buah elektroda tidak menghasilkan *syngas* sebagaimana mestinya.

#### 4.1.1.4 Hasil Perbandingan Kinerja Antara Ketiga Jenis Plasmatron Pada Kondisi Vakum

Seperti telah dibahas pada sub bab sebelumnya mengenai analisis kinerja dari ketiga jenis plasmatron. Pada sub bab ini akan dilakukan perbandingan secara

langsung dari keseluruhan hasil analisis menggunakan *Gas Chromatography* (GC) dari ketiga jenis plasmatron tersebut, yaitu adalah Ignition Coil 12 V DC, CFL 220 V 23 W dan HV Transformer.

Hasil perbandingan keseluruhan analisis dari ketiga jenis plasmatron dapat dilihat pada Gambar 4.7 sebagai berikut:



**Gambar 4. 7** Hasil Analisis GC Dengan Membandingkan Ketiga Jenis Plasmatron Untuk Kondisi Vakum

Dapat dilihat pada grafik di atas bahwa kadar CO paling optimum untuk ketiga jenis Plasmatron adalah dihasilkan dari proses gasifikasi bila menggunakan 1 buah elektroda dan dalam waktu 10 menit. Untuk plasmatron jenis Ballast CFL 220 V 23 W memiliki kadar CO optimum sebesar 0,3569 ml, untuk HV transformer sebesar 0,1904 ml, dan untuk Ignition Coil sebesar 0,2381 ml.

Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa untuk kondisi operasi vakum, jenis plasmatron yang dapat menghasilkan proses gasifikasi optimum adalah bila menggunakan Ballast CFL 220 V 23 W, kemudian posisi kedua dipegang oleh

Ignition Coil, dan yang terakhir adalah HV Transformer. Dua posisi teratas dari plasmatron tersebut nantinya akan digunakan untuk uji kinerja menggunakan kondisi operasi *gas blanket* (Nitrogen), untuk mengetahui perbandingan plasmatron dengan kinerja optimum bila menggunakan kondisi vakum maupun dengan Nitrogen.

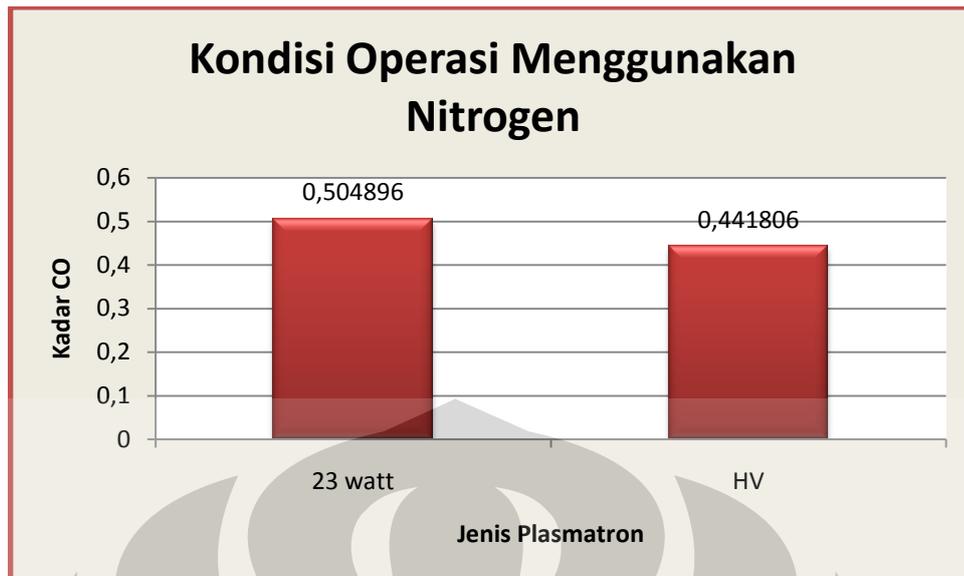
Namun jika melihat kestabilan data yang diperoleh, data hasil analisis menggunakan Ignition Coil menggambarkan ketidakstabilan, sehingga dipilihlah Ballast CFL 220 V 23 W dan HV Transformer sebagai Plasmatron yang diujikan untuk kondisi operasi dengan *blanket gas* yaitu Nitrogen.

#### **4.1.2 Hasil Proses Gasifikasi Pada Kondisi Operasi *Gas Blanket* (Nitrogen)**

Pada penelitian ini, untuk mengetahui kondisi reaktor mana yang paling optimal, dilakukan juga proses dengan kondisi *blanket gas* N<sub>2</sub> sebagai pembanding. Gambar 4.8 merupakan diagram batang representasi hasil eksperimen kondisi *blanket gas* N<sub>2</sub> menggunakan nilai kapasitansi kapasitor dan jumlah elektroda optimal dari hasil percobaan sebelumnya, dengan dilakukan variasi jenis Plasmatron yaitu plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W dan HV Transformer.

Berbeda halnya dengan kondisi vakum, reaktor yang terisi gas N<sub>2</sub> menghasilkan proses gasifikasi yang lebih cepat dan lebih banyak limbah yang terbakar. Hal ini karena gas N<sub>2</sub> dalam reaktor bertindak sebagai media penghantar plasma yang membuat proses gasifikasi berlangsung lebih efektif. Berbeda dengan vakum, dimana hampir tidak ada media penghantar plasma. Pada kondisi *blanket N<sub>2</sub>*, plasma yang dihasilkan lebih tipis jika dibandingkan dengan plasma pada kondisi vakum, tetapi memiliki tingkah laku yang dinamis. Hal ini karena N<sub>2</sub> ikut terpanasi sehingga memiliki konduktivitas yang lebih besar dan membuat plasma cenderung bergerak dinamis dan menyebabkan lebih banyak sampah yang terkena plasma.

Plasma yang dihasilkan pada proses gasifikasi menggunakan kondisi operasi *gas blanket* Nitrogen berwarna ungu kemerahan. Warna plasma ini menunjukkan warna khas N<sub>2</sub> ketika tereksitasi oleh plasma.



**Gambar 4. 8** Hasil Analisis GC Dengan Kondisi *Gas Blanket* Nitrogen

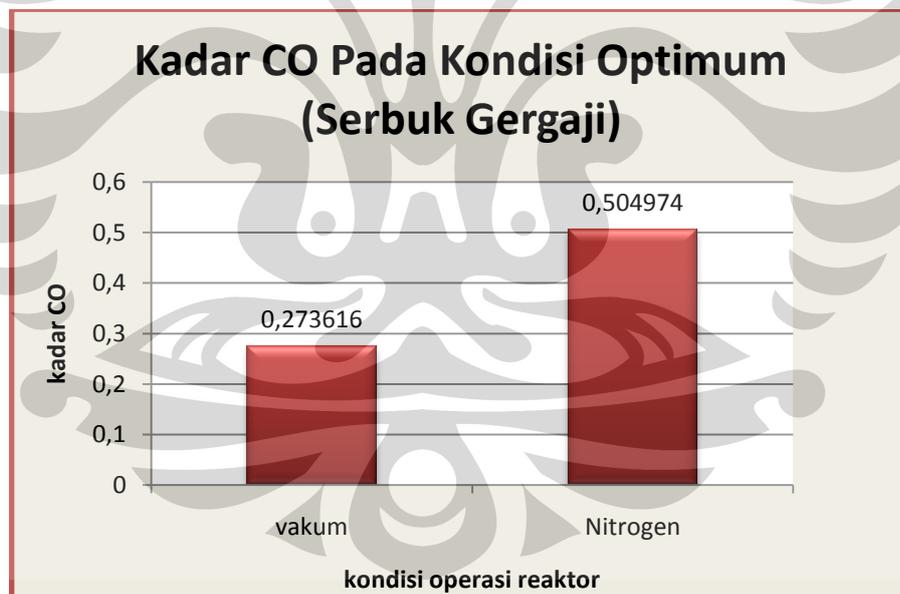
Dapat dilihat pada Gambar 4.8 di atas bahwa dengan menggunakan konfigurasi gasifikasi optimum seperti yang telah didapatkan pada percobaan sebelumnya, yaitu menggunakan 1 elektroda dalam waktu gasifikasi 10 menit dan menggunakan jenis sampah daun kering, dapat dinyatakan bahwa proses gasifikasi plasma limbah padat pada kondisi *gas blanket*  $N_2$  dengan menggunakan jenis Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W akan dihasilkan gasifikasi yang lebih maksimal dibandingkan dengan penggunaan Plasmatron HV Transformer. Hasil analisis data ini mendukung hasil analisis sebelumnya yaitu pada saat proses gasifikasi pada kondisi vakum. Dimana keduanya menunjukkan bahwa proses gasifikasi plasma menggunakan plasmatron jenis Ballast CFL 220 V 23 W menghasilkan plasma lebih optimal dan proses gasifikasi yang lebih efektif sehingga dihasilkan kadar *syngas* yang lebih banyak.

Nantinya, plasmatron jenis Ballast CFL 220 V 23 W digunakan untuk proses gasifikasi plasma optimum untuk limbah padat jenis serbuk gergaji dengan kondisi operasi yang divariasikan. Kondisi operasi tersebut divariasikan untuk mengetahui manakah yang akan menghasilkan proses gasifikasi plasma yang lebih optimal dan *syngas* yang lebih banyak dengan konfigurasi reaktor dan plasmatron yang sama, namun kondisi operasi yang berbeda, yaitu dengan kondisi operasi vakum atau kondisi operasi *gas blanket* Nitrogen.

#### 4.1.3 Hasil Proses Gasifikasi Optimum Untuk Limbah Serbuk Gergaji

Pada percobaan ini, limbah yang akan mengalami perlakuan gasifikasi plasma adalah limbah serbuk gergaji. Proses gasifikasi plasma ini menggunakan plasmatron jenis Ballast CFL 220 V 23 W, seperti sebagaimana telah dinyatakan pada analisa sebelumnya sebagai plasmatron yang dapat menghasilkan gasifikasi lebih optimal. Selain itu, digunakan konfigurasi elektroda sebanyak 1 buah dan jarak antar elektroda adalah 2 cm. pada percobaan ini yang menjadi focus utama adalah kondisi operasi gasifikasi manakah yang akan memberikan proses gasifikasi plasma yang lebih optimal dan *syngas* yang lebih banyak, apakah jika menggunakan kondisi operasi vakum, ataukah kondisi operasi dengan menggunakan *gas blanket* Nitrogen.

Hasil perbandingan kinerja proses gasifikasi plasma dengan menggunakan kondisi operasi vakum dan *gas blanket* Nitrogen dapat dilihat pada Gambar 4.9 sebagai berikut:



**Gambar 4. 9** Hasil Analisis GC Untuk Kondisi Optimum Dengan Membandingkan Kedua Jenis Kondisi Operasi

Pada gambar di atas dapat dilihat bahwa dengan kondisi *gas blanket* N<sub>2</sub> dihasilkan proses gasifikasi yang lebih cepat dan lebih banyak limbah yang terbakar jika dibandingkan dengan pada kondisi vakum. Hal ini karena gas N<sub>2</sub>

dalam reaktor bertindak sebagai media penghantar plasma yang membuat proses gasifikasi berlangsung lebih efektif. Selain itu, adanya Nitrogen dalam reaktor akan memperbaiki proses gasifikasi plasma yang berlangsung, sebab  $N_2$  berperan sebagai gas pendukung. Hal ini sangat sejalan dengan definisi plasma sebagai gas yang terionisasi. Berbeda dengan vakum, dimana hampir tidak ada media penghantar plasma. Namun, pada kondisi blanket  $N_2$ , plasma yang dihasilkan lebih tipis jika dibandingkan dengan plasma pada kondisi vakum, tetapi memiliki tingkah laku yang dinamis. Hal ini karena  $N_2$  ikut terpanasi sehingga memiliki konduktivitas yang lebih besar dan membuat plasma cenderung bergerak dinamis dan menyebabkan lebih banyak sampah yang terkena plasma.

#### 4.2 Pengaruh Kinerja Plasmatron Terhadap Daya Listrik

Kebutuhan daya merupakan salah satu parameter evaluasi kinerja reaktor plasma non termal. Untuk mengetahuinya, maka selama proses pengambilan data dilakukan pengukuran tegangan dan arus masuk yang nantinya digunakan untuk menghitung kebutuhan energi untuk proses. Selain itu, juga dilakukan pengukuran tegangan keluaran untuk mengetahui besarnya tegangan yang dibangkitkan oleh plasmatron.

Dalam perhitungan daya listrik, terlebih dahulu harus menghitung Konsumsi daya yang dibutuhkan oleh setiap jenis plasmatron dan generator plasma. 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 ( $t$ ).

$$Daya = VA \times pf$$

Dimana:

$VA = Volt \times Ampere$ , dan

$Pf$  = bilangan pengali (*power factor*) bernilai 0,6 untuk HV Transformer dan bernilai 0,95 untuk Ballast CFL 220 V 23 W

#### 4.2.1 Hasil Konsumsi Daya Listrik Untuk Setiap Jenis Plasmatron

Berikut merupakan tabel mengenai konsumsi daya untuk setiap jenis Plasmatron dengan kondisi operasi vakum dan sampel sampah daun kering.

**Tabel 4. 1** Konsumsi Daya dengan Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W

Jenis Plasmatron	Waktu Gasifikasi	Jumlah Elektroda	I (Ma)	V (Volt)	VA	Daya (Watt)
23 watt	5 menit	1	150	210	31,5	29,925
		5	150	220	33	31,35
	10 menit	1	140	220	30,8	29,26
		5	150	220	33	31,35

**Tabel 4. 2** Konsumsi Daya dengan Plasmatron *Ignition Coil* 12 V DC

Jenis Plasmatron	Waktu Gasifikasi	Jumlah Elektroda	I (Ma)	V (Volt)	VA	Daya (Watt)
IC	5 menit	1	60	210	12,6	12,6
		5	60	210	12,6	12,6
	10 menit	1	60	210	12,6	12,6
		5	60	210	12,6	12,6

**Tabel 4. 3** Konsumsi Daya dengan Generator Plasma HV Transformer

jenis plasmatron	waktu gasifikasi	jumlah elektroda	I (mA)	V (volt)	VA	Daya (Watt)
HV	5 menit	1	760	120	91,2	54,72
		5	640	120	76,8	46,08
	10 menit	1	700	120	84	50,4
		5	760	120	91,2	54,72

Dari ketiga tabel tersebut dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan antara kebutuhan daya untuk menghasilkan plasma dengan menggunakan plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W, Ignition Coil, dan generator plasma dari HV Transformer. Pada table-table tersebut terlihat bahwa konsumsi daya tertinggi dipegang oleh generator plasma jenis HV Transformer, diikuti oleh Ballast CFL

220 V 23 W, dan yang memiliki konsumsi daya terendah adalah Plasmatron jenis *Ignition Coil*. Namun, walaupun plasmatron jenis *ignition coil* memiliki konsumsi daya terendah, plasmatron jenis ini tidak dapat menghasilkan proses gasifikasi yang optimal sebagaimana yang diharapkan, seperti telah dinyatakan pada analisa sebelumnya. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa plasmatron yang dapat menghasilkan proses gasifikasi plasma secara optimal dan memiliki konsumsi daya listrik yang tidak terlalu tinggi adalah Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W. Sebagai perbandingan, pada Tabel 4.4 di bawah ini ditampilkan konsumsi daya untuk proses plasma gasifikasi pada kondisi *gas blanket* Nitrogen dengan menggunakan dua jenis Plasmatron yang dianggap memiliki kinerja optimum.

**Tabel 4. 4** Konsumsi Daya Listrik dengan menggunakan 2 jenis Plasmatron Pada Kondisi Flushing N<sub>2</sub>

jenis plasmatron	waktu gasifikasi	jumlah elektroda	I (mA)	V (volt)	VA	Daya (Watt)
Ballast CFL 220 V 23 W	10 menit	1	225	210	47,25	44,8875
HV Transformer			760	120	91,2	54,72

Pada Tabel 4.4 di atas dapat dilihat bahwa Plasmatron dengan jenis Ballast CFL 220 V 23 W membutuhkan daya lebih rendah jika dibandingkan dengan plasmatron jenis HV Transformer. Dengan konsumsi daya yang lebih rendah, plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W dapat menghasilkan proses gasifikasi plasma yang lebih optimal dan efektif untuk pengolahan limbah padat, seperti yang telah dijelaskan pada analisa di Sub Bab 4.2, mengenai perbandingan kinerja setiap jenis plasmatron yang dilihat dari kadar *syngas* yang dihasilkan selama proses gasifikasi berlangsung.

#### 4.2.2 Hasil Konsumsi Daya Listrik Untuk Setiap Kondisi Operasi Yang Berbeda

Berikut merupakan Tabel mengenai konsumsi daya untuk poses gasifikasi plasma dengan plasmatron Jenis Ballast CFL 220 V 23 W menggunakan limbah

serbuk gergaji, dengan dua kondisi operasi berbeda, yaitu vakum dan adanya *gas blanket*.

**Tabel 4. 5** Konsumsi Daya Listrik Dengan Kondisi Operasi Yang Berbeda

Jenis Plasmatron	Waktu Gasifikasi	Jumlah Elektroda	Kondisi Operasi	I (Ma)	V (Volt)	VA	Daya (Watt)
Ballast CFL 220 V 23 W	10 menit	1	Vakum	170	210	35,7	33,915
			Nitrogen	225	210	47,25	44,8875

Pada Tabel 4.5 di atas terlihat bahwa kebutuhan daya kondisi blanket lebih besar dari kondisi vakum. Alasannya, semakin besar tekanan dalam reaktor, semakin besar tegangan yang dibutuhkan untuk mengionisasi gas dan semakin banyak arus yang mengalir. Adanya gas  $N_2$  memberikan tekanan yang lebih besar, sehingga tegangan yang dibutuhkan untuk mengionisasi lebih besar daripada keadaan vakum, dan tentu saja lebih banyak arus yang mengalir.

Dalam analisis sebelumnya, yaitu pada analisis pengujian kinerja plasmatron dan reaktor plasma nontermal, telah dinyatakan bahwa plasmatron dengan jenis Ballast CFL 220 V 23 W sebagai plasmatron yang dapat menghasilkan plasma terbaik, sehingga proses gasifikasi limbah padat dapat berjalan dengan optimal. Pernyataan tersebut didukung oleh hasil perhitungan tegangan keluaran atau tegangan yang dibangkitkan oleh setiap jenis plasmatron dan generator plasma selama proses gasifikasi berlangsung. Tabel 4.6 berikut adalah mengenai hasil perhitungan tegangan yang dibangkitkan.

Dari Tabel 4.6 tersebut dapat dilihat bahwa plasmatron dengan jenis Ballast CFL 220 V 23 W dapat menghasilkan tegangan paling besar dibandingkan dengan jenis generator plasma yang lain. Dengan tegangan keluaran yang besar tersebut menjadikan plasmatron dengan jenis ini dapat menghasilkan proses gasifikasi yang lebih optimal, karena tentu saja dengan tegangan yang besar dapat menghasilkan plasma yang lebih baik intensitasnya.

**Tabel 4. 6** Hasil Perhitungan Tegangan yang Terbangkitkan

Jenis Plasmatron	Waktu Gasifikasi	Jumlah Elektroda	V keluaran (Volt)
23 watt (17 kHz < f < 50 kHz)	5 menit	1	14982
		5	14982
	10 menit	1	14982
		5	14982
HV (f = 50 Hz)	5 menit	1	8181,818
		5	8181,818
	10 menit	1	8181,818
		5	8181,818

Dari Tabel 4.6 di atas dapat dilihat bahwa plasmatron dengan jenis Ballast CFL 220 V 23 W memiliki frekuensi yang jauh lebih besar dibandingkan generator plasma yang lain, yaitu  $17 \text{ kHz} < f < 50 \text{ kHz}$ . Hal ini juga mempengaruhi proses gasifikasi yang berlangsung, dimana Ballast CFL 220 V 23 W dengan frekuensi besar yang dimilikinya dapat menghasilkan plasma dengan intensitas yang jauh lebih baik serta proses gasifikasi yang lebih optimal. Sehingga dapat disimpulkan bahwa proses gasifikasi plasma dalam hal ini efek bakar yang dihasilkan dalam proses tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya tegangan yang dihasilkan dari alat pembangkit plasma yang digunakan, namun juga dipengaruhi oleh besarnya frekuensi yang dimiliki oleh pembangkit plasma tersebut.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Setelah mengetahui hasil yang didapat pada penelitian kali ini, maka ada beberapa kesimpulan yang dapat diambil, yaitu:

1. Plasma Nontermal (Plasma Dingin) dapat digunakan dalam teknologi gasifikasi plasma limbah padat seperti halnya plasma Termal.
2. Kadar gas sintesis (*syngas*) yang dihasilkan dari proses gasifikasi limbah padat dengan menggunakan plasma nontermal ini belum seoptimal yang diharapkan. Hal ini dimungkinkan karena teknologi dan peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terbilang sederhana.
3. Dari ketiga jenis pembangkit plasma nontermal yang digunakan dalam penelitian ini, plasmatron dengan jenis Ballast CFL 220 V 23 W dianggap sebagai pembangkit plasma yang paling baik dan efektif dalam proses gasifikasi limbah padat ini.
4. Reaktor yang diisi gas  $N_2$  menghasilkan proses gasifikasi yang lebih cepat dan lebih banyak limbah yang terbakar. Hal ini dikarenakan gas  $N_2$  berfungsi juga sebagai *gas support* sehingga dapat memperbaiki proses gasifikasi plasma yang berlangsung.
5. Efek bakar dalam proses gasifikasi plasma ini tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya tegangan yang dihasilkan dari alat pembangkit plasma yang digunakan, namun juga dipengaruhi oleh besarnya frekuensi yang dimiliki oleh pembangkit plasma tersebut.

#### 5.2 Saran

Dari hasil penelitian yang diperoleh, proses gasifikasi limbah padat dengan plasma nontermal belum dapat menghasilkan gas sintesis yang optimal, sehingga sangat dibutuhkan penyempurnaan serta penelitian lanjutan guna memperoleh teknologi plasma nontermal untuk gasifikasi limbah padat yang lebih optimal. Adapun penyempurnaan yang perlu dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Mendesain reaktor gasifikasi plasma sedemikian rupa agar kontak yang terjadi antara plasma dan limbah padat lebih baik dan optimal.
2. Mendesain bentuk elektroda yang dapat menghantarkan plasma dengan lebih baik, sehingga proses gasifikasi dapat berjalan lebih efektif.
3. Selain menggunakan *gas support*, dalam proses gasifikasi plasma limbah padat digunakan pula *steam* agar gas H<sub>2</sub> dapat lebih banyak terbentuk.
4. Menggunakan analisis GC yang lebih akurat.



## DAFTAR PUSTAKA

- Bardos, Ladislav dan Barankova, Hana. (2009). Plasma Processes at Atmospheric and Low Pressures. *Vacuum* 83. 522-527.
- Gomez, E. et.al. (2008). Thermal Plasma Technology For The Treatment Of Wastes: A Critical Review. *Journal of Hazardous Material*.
- Grothaus, Michael G. dan Fanick, E. Robert. (1996). Harmful Compounds Yield to Nonthermal Plasma Reaktor. *Southwest Research Institute*.
- H. Huang, L. Tang. (2007). Treatment Of Organik Waste Using Thermal Plasma Pyrolysis Technology. *Energy Conversion and Management*, 48, 1331–1337
- Kleopfer et al. (1986). Residues of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin in the Spring River, Missouri . *water, air, and soil pollution*. 219-231,
- McConney, J. dan Bennett, G. (2002). Data Validation Standard Operating Procedures for Chlorinated Dioxin/Furan Analysis b y High Resolution Gas Chromatography/High Resolution Mass Spectrometry. *United State Environmental Protection Agency (US EPA) Region IV, Revision 3.0*, Athens, Georgia, 30605-2720.
- Notoatmodjo, Soekidjo. (2003). Prinsip-Prinsip Dasar Ilmu Kesehatan Masyarakat. Cet. ke-2, Mei. Jakarta : Rineka Cipta.
- US EPA. (2003). “Waste Incinerator Dioxin Control and Emission Standards” paragraf 2 dari the *Air Pollution Control Act*, Environmental Protection Administration.
- Akbar, Iqbal. (16 Mei,2008). Energi Alternatif Masa Depan  
<http://www.himni.or.id>
- Ignition Coil*. (n.d). 3 Maret, 2009.  
[http://www.wikipedia.org/wiki/Ignition\\_Coil.html](http://www.wikipedia.org/wiki/Ignition_Coil.html)
- Fakta Sampah Jakarta Membangun Candi Borobudur Setiap 2 hari*. 20 April2009. <http://akuinginhiijau.org>
- Flyback Transformer*. (n.d). 3 Maret, 2009.  
[http://www.wikipedia.org/wiki/Flyback\\_Transformer.html](http://www.wikipedia.org/wiki/Flyback_Transformer.html)

*Glossary of Terms, Plasma Colour.* (n.d). 11 April, 2009.

<http://www.plasma.de/en/glossary/glossary.html>

LaBarge, William, et.al. (2005, Feb 8). Non-thermal plasma reaktor gas treatment system. United States Patent. 6852200 B2. May 15, 2009.

<http://www.freepatentsonline.com/6852200.html>

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

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

*Nonthermal plasma.* (n.d). 3 Maret, 2009.

[http://www.wikipedia.org/wiki/Nonthermal\\_plasma.html](http://www.wikipedia.org/wiki/Nonthermal_plasma.html)

NE/SA/SE555/SE555C Timer, (februari 2003). 20 Februari, 2009.

<http://www.semiconductors.philips.com>.

*Pemilihan dan Strategi Penerapan Teknologi Pengolahan Sampah Terpadu, Studi Kasus di DKI Jakarta.* 20 April, 2009.

<http://www.dml.or.id>

*Perspectives on Plasmas.* (n.d). 20 Februari, 2009.

<http://www.plasma.org>

*Plasma Gasification.* (n.d).

<http://www.plasmagasification.com>

*Plasma (physics).* (n.d). 3 Maret, 2009.

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

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

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

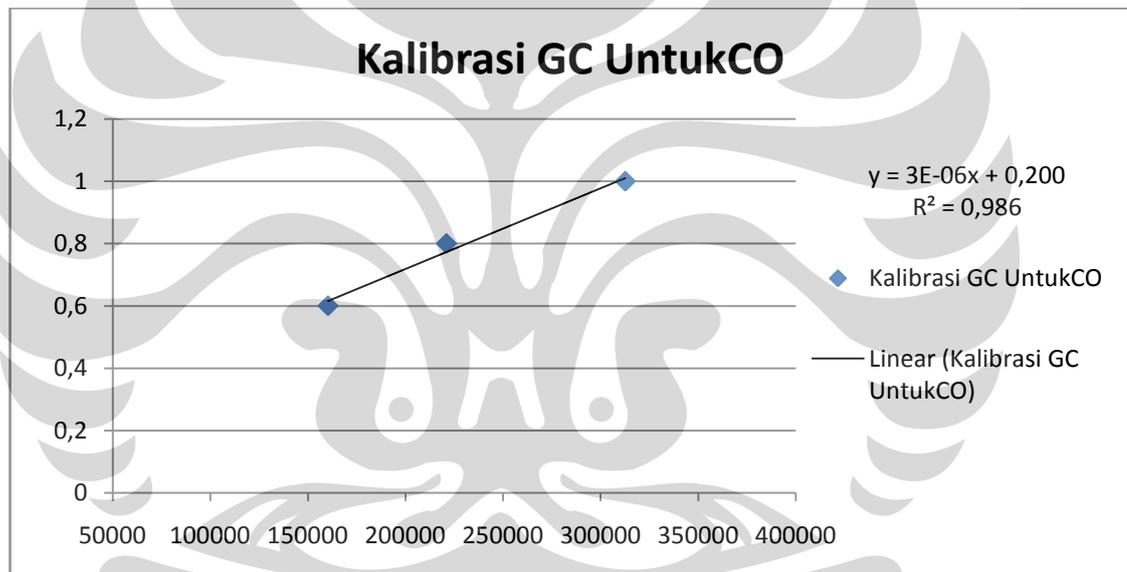
*Proximate And Ultimate Analyses.* 15 Juni, 2009.

[www.woodgas.com](http://www.woodgas.com)

**Lampiran I. Kalibrasi Co Dan H<sub>2</sub> Serta Perhitungan Kadar Gas Produk**

**A. Hasil Kalibrasi Gas CO**

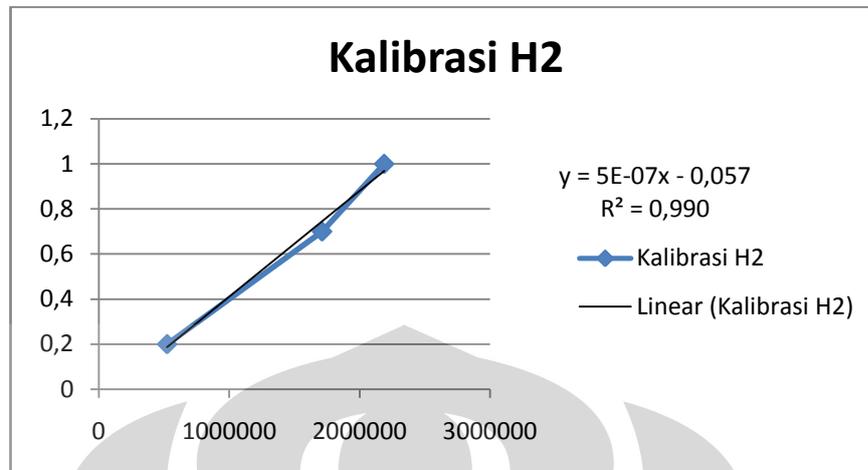
volume (ml)	area			
	1	2	3	rata-rata
1	272084	272334	393513	312643,6667
0,8	246303	204981	211823	221035,6667
0,6	157656	159612	163795	160354,3333



**B. Hasil Kalibrasi Gas H<sub>2</sub>**

Volume (ml)	Area			Area rata-rata
	I	II	III	
1	1907558	2321412	2335304	2188091
0,7	1713888	1785486	1635275	1711550
0,2	545129	542134	479807	522357

(lanjutan)



Dari kedua grafik kalibrasi di atas dihasilkan dua buah persamaan untuk menghitung kadar syngas (gas CO dan H<sub>2</sub>) yang dihasilkan dari proses gasifikasi plasma, yaitu:

- Untuk menghitung kadar gas CO:  
 $kadar\ CO = 3 \times 10^{-6} (Luas\ area\ CO) + 0,2$
- Untuk menghitung kadar gas H<sub>2</sub>:  
 $kadar\ H_2 = 5 \times 10^{-7} (Luas\ area\ H_2) - 0,057$

Pada bagian analisa telah dikatakan bahwa gas H<sub>2</sub> tidak terbaca pada analisis GC, sehingga yang dihitung hanya kadar gas CO saja. Dimana, puncak area dari gas CO berhimpit dengan puncak area dari udara. Sehingga dalam perhitungannya, untuk mencari luas kadar gas CO yang sebenarnya, maka luas puncak yang terbaca pada analisis GC dikurangi dengan luas area udara vakum yang telah dikalibrasi sebelumnya.

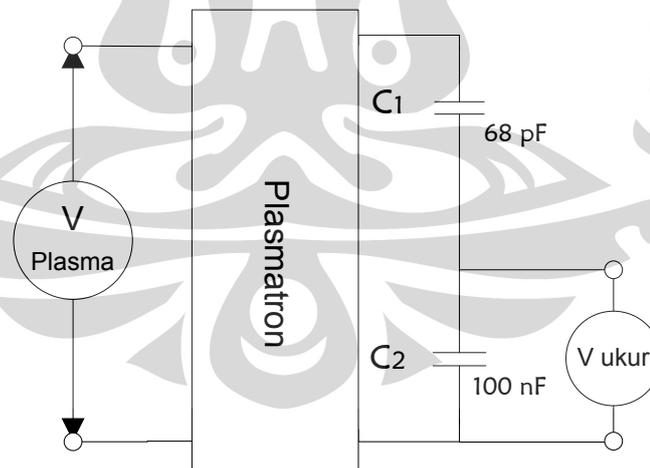
Contoh perhitungan:

- Pada kondisi vakum:  
 Luas area CO = Luas area keseluruhan – luas area udara vakum  
 Luas area udara vakum yang telah dikalibrasi = 313823,3333
- Pada kondisi *gas blanket* (Nitrogen):  
 Luas area CO = Luas area keseluruhan – luas area udara  
 Luas area udara yang telah dikalibrasi = 230174

## Lampiran II. Perhitungan Tegangan Keluaran Alat Pembangkit Plasma

### A. Konversi untuk pengukuran tegangan keluaran (untuk CFL 23 W):

Perhitungan tegangan keluaran dilakukan dengan menggunakan peralatan seperti terlihat pada gambar di bawah ini:



Bila rangkaian di atas diterjemahkan menjadi persamaan, akan menjadi seperti berikut ini:

(lanjutan)

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

$$V_{out} = \frac{\frac{1}{100 \times 10^{-12}} + \frac{1}{68 \times 10^{-9}}}{\frac{1}{68 \times 10^{-9}}} V_{ukur}$$

$$V_{out} = 681 \times V_{ukur}$$

### B. Konversi untuk pengukuran $V_{out}$ (untuk HV Transformmer) :

Pada trafo:

$$\frac{V_{primer}}{V_{sekunder}} = \frac{n_p}{n_s} = a = \frac{220}{15000}$$

$$V_p = \frac{220}{15000} \times V_s$$

$$V_s = \frac{15000}{220} \times V_p$$

Sehingga dihasilkan :

Jenis Plasmatron	Waktu Gasifikasi	Jumlah Elektroda	V Ukur (Volt)	V keluaran (Volt)
23 watt	5 menit	1	22	14982
		5	22	14982
	10 menit	1	22	14982
		5	22	14982
HV	5 menit	1	120	8181,818
		5	120	8181,818
	10 menit	1	120	8181,818
		5	120	8181,818

**Lampiran III. Hasil Analisis GC Mengenai Kadar Gas CO Hasil Proses Gasifikasi Plasma.**

**A. Pada kondisi vakum**

Peak udara vakum: 313823,3333

Jenis Plasmatron	Waktu Gasifikasi	Jumlah Elektroda	Daun Kering			
			Luas Area Peak	Area Peak CO (Peak Total - Peak Vakum)	Volum CO	Massa Akhir
<b>23 watt</b>	5 menit	1	349923	36099,66667	0,308299	0,25
		5	288458	-25365,33333	0,123904	0,31
	10 menit	1	<b>366139</b>	52315,66667	0,356947	0,29
		5	279633	-34190,33333	0,097429	0,29
HV	5 menit	1	296672	-17151,33333	0,148546	0,28
		5	283016	-30807,33333	0,107578	0,3
	10 menit	1	310624	-3199,333333	0,190402	0,29
		5	280195	-33628,33333	0,099115	0,3
IC	5 menit	1	293428	-20395,33333	0,138814	0,31
		5	230174	-83649,33333	-0,050948	0,31
	10 menit	1	326539	12715,66667	0,238147	0,3
		5	17008	-296815,3333	-0,690446	0,31

(lanjutan)

**B. Pada Kondisi Terisi Gas Blanket (Nitrogen)**

Peak udara : 230174

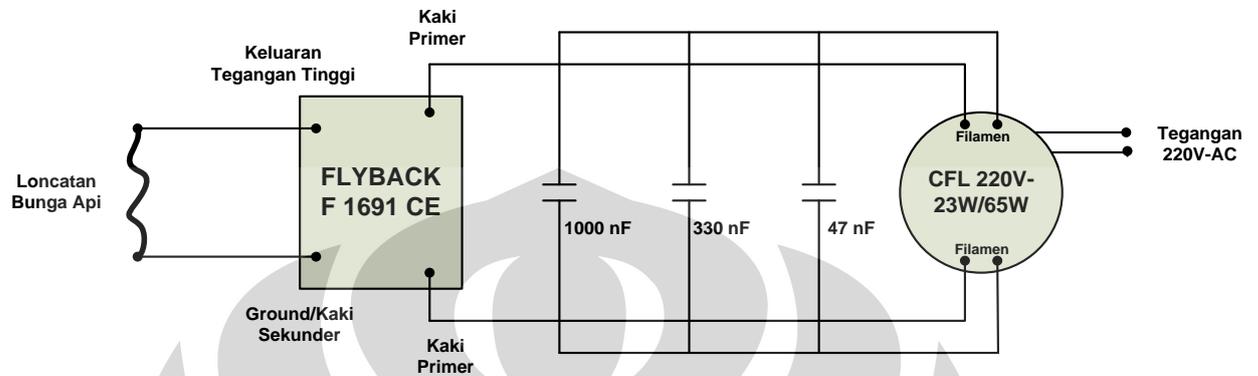
jenis plasmatron	waktu gasifikasi	jumlah elektroda	daun kering			
			luas area peak	area peak CO (peak total - peak udara)	volum CO	massa akhir
23 watt	10 menit	1	331806	101632	0,504896	0,25
HV		1	310776	80602	0,441806	0,28

**C. Pada Kondisi Optimum Yang Berbeda, Dengan Menggunakan Serbuk Gergaji Dan Plasmatron CFL 220 V 23 W**

jenis plasmatron	kondisi operasi	waktu gasifikasi	jumlah elektroda	serbuk gergaji			
				luas area peak	area peak CO (peak total - peak vakum)	volum CO	massa akhir
23 watt	vakum	10 menit	1	338362	24538,66667	0,273616	0,28
	N2			331832	101658	0,504974	0,29

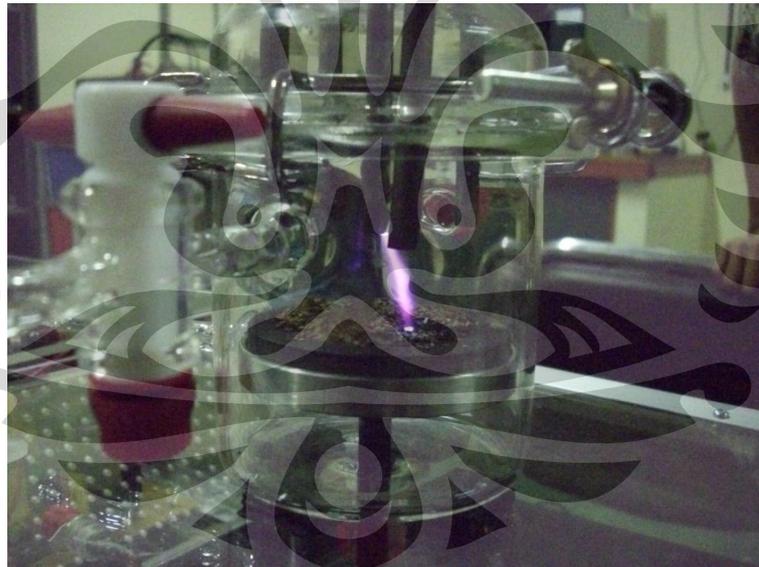
## Lampiran IV. Plasma Yang Terbentuk dan Peralatan Yang Digunakan

### A. Gambar Rangkaian Elektronik untuk Ballast CFL 220 V 23 W



### B. Plasma yang terbentuk pada saat proses gasifikasi limbah padat berlangsung

- Pada kondisi operasi vakum



(lanjutan)

- Pada kondisi operasi menggunakan gas blanket (Nitrogen)



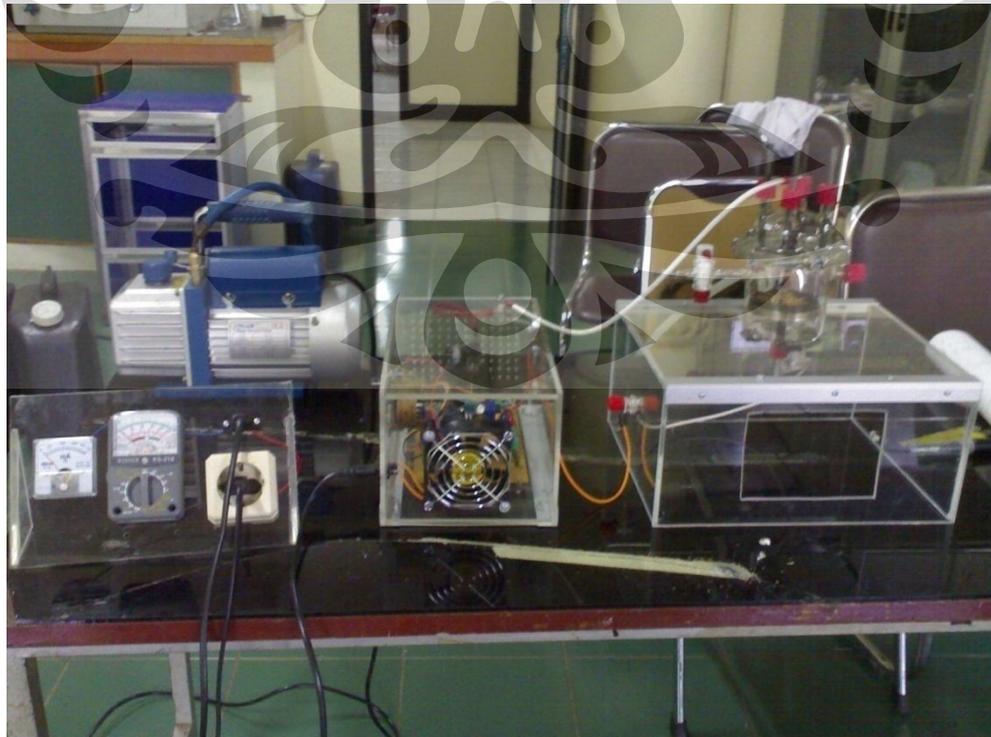
(lanjutan)

**C. Peralatan yang digunakan**

CO Detektor



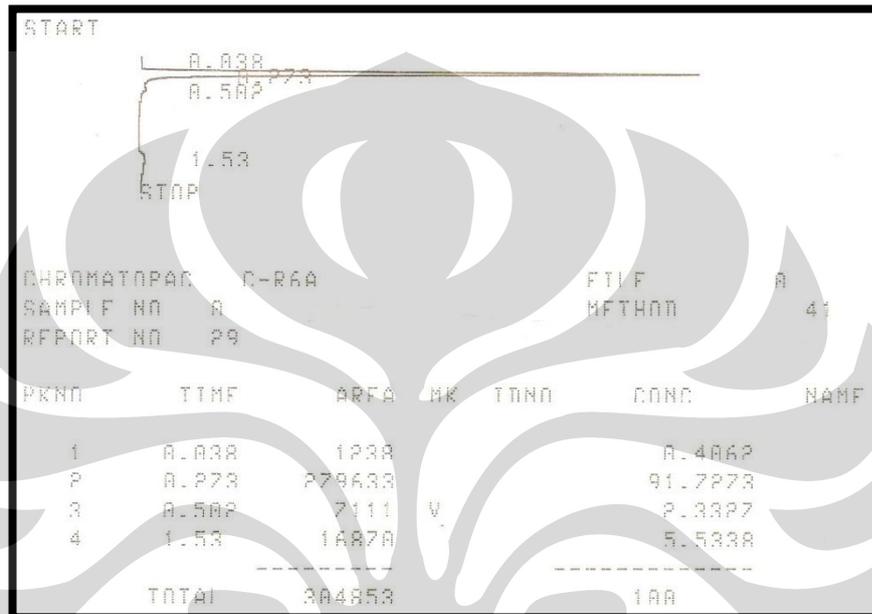
(lanjutan)



## Lampiran V. Kromatogram

### A. Pada kondisi operasi vakum

- Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W  
Lamanya proses gasifikasi : 10 menit,  
Jumlah elektroda : 5 elektroda

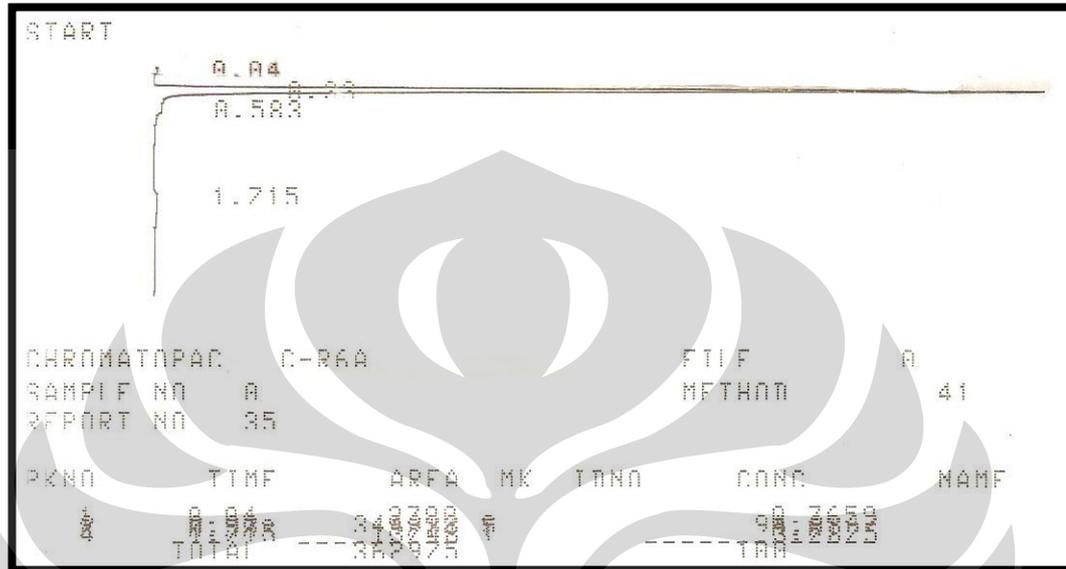


- Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W  
Lamanya proses gasifikasi : 10 menit,  
Jumlah elektroda : 1 elektroda

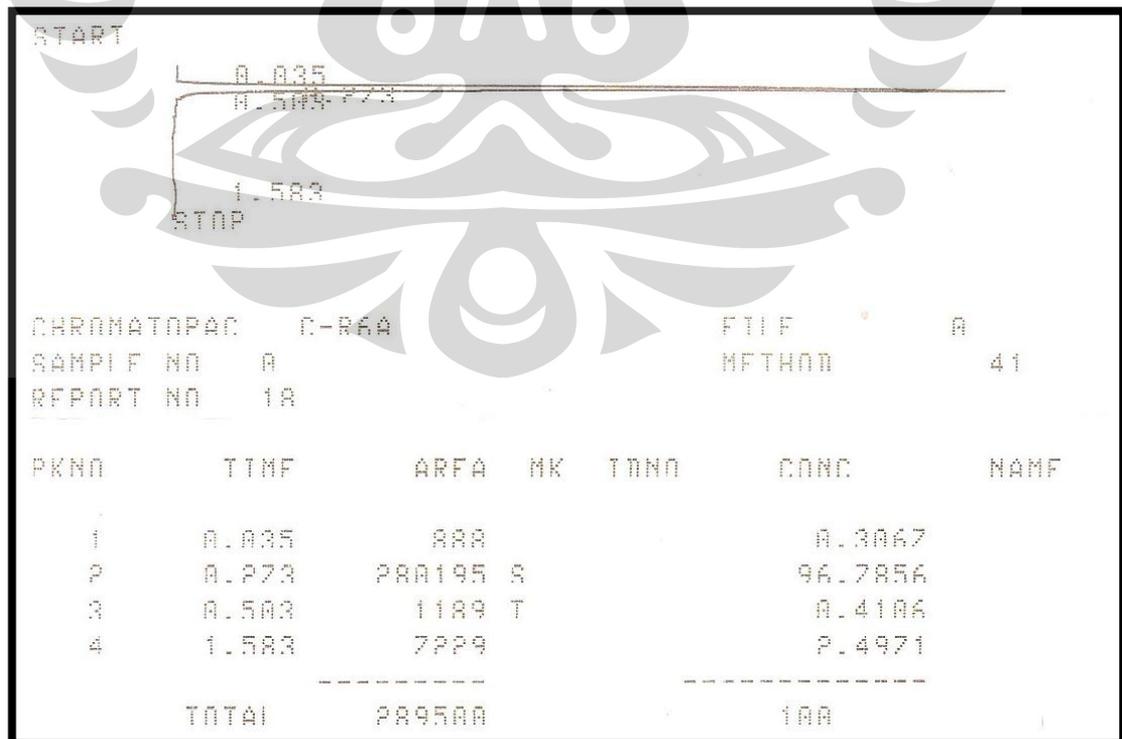


(lanjutan)

- Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W  
Lamanya proses gasifikasi : 5 menit,  
Jumlah elektroda : 1 elektroda

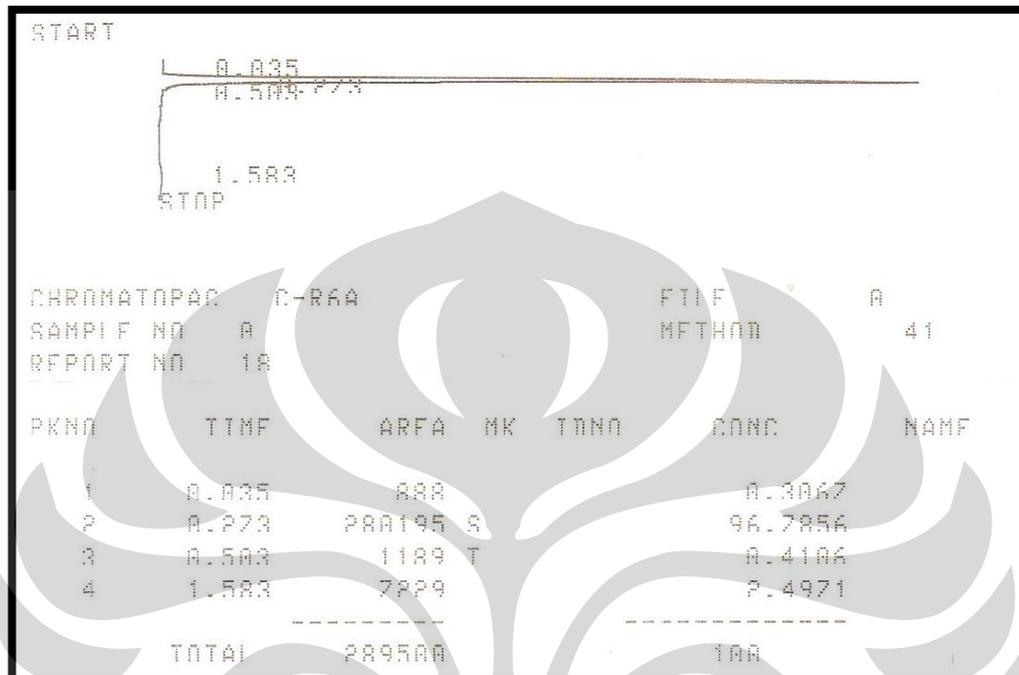


- Generator Plasma dari HV Transformer  
Lamanya proses gasifikasi : 10 menit,  
Jumlah elektroda : 5 elektroda

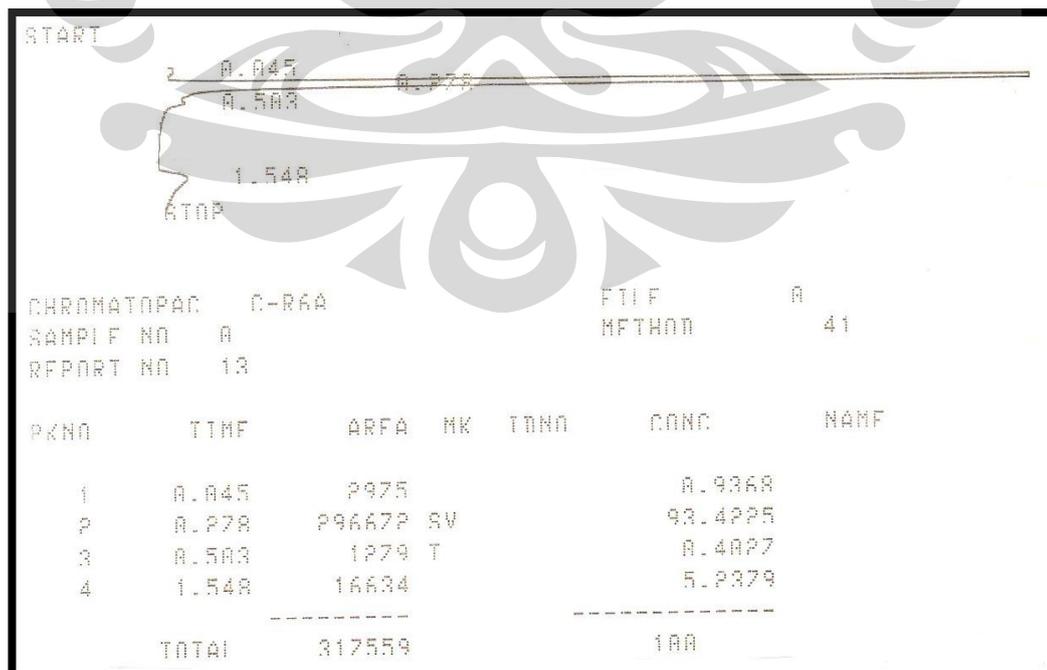


(lanjutan)

- Generator Plasma dari HV Transformer  
Lamanya proses gasifikasi : 10 menit,  
Jumlah elektroda : 1 elektroda

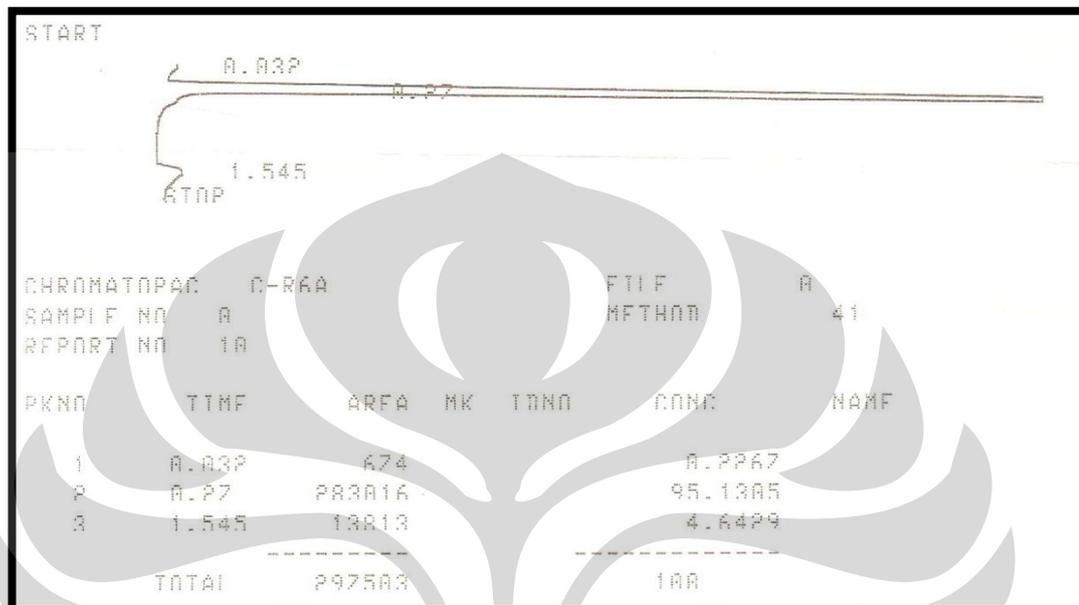


- Generator Plasma dari HV Transformer  
Lamanya proses gasifikasi : 5 menit,  
Jumlah elektroda : 1 elektroda



(lanjutan)

- Generator Plasma dari HV Transformer
- Lamanya proses gasifikasi : 5 menit,  
Jumlah elektroda : 5 elektroda



- Plasmatron *Ignition Coil* 12 V DC  
Lamanya proses gasifikasi : 10 menit,  
Jumlah elektroda : 1 elektroda

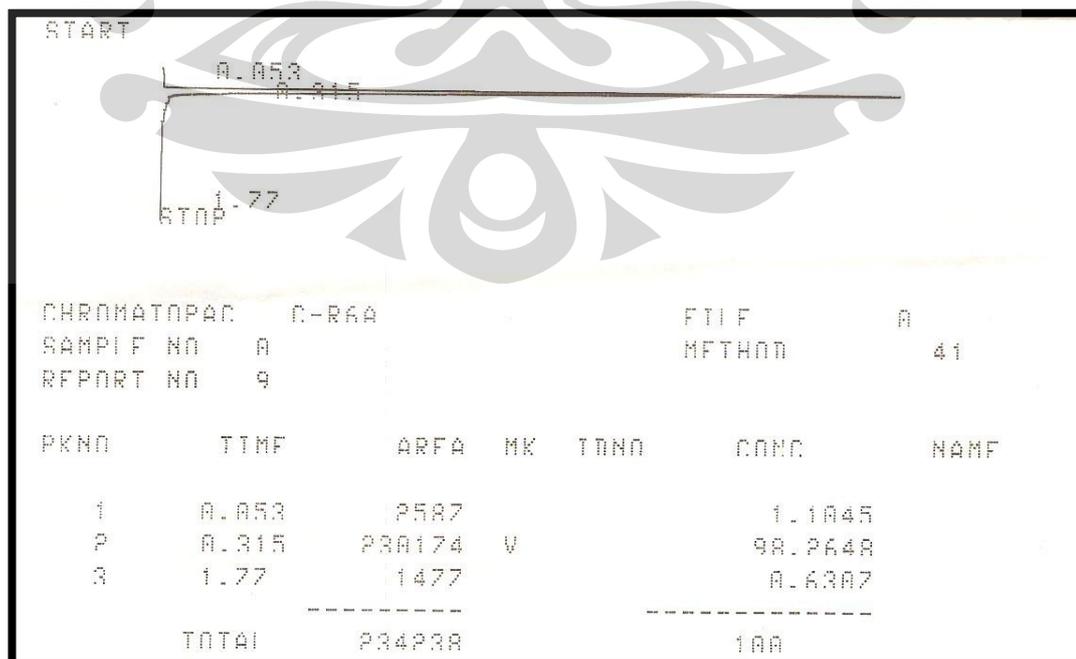


(lanjutan)

- *Plasmatron Ignition Coil 12 V DC*  
Lamanya proses gasifikasi : 5 menit,  
Jumlah elektroda : 1 elektroda

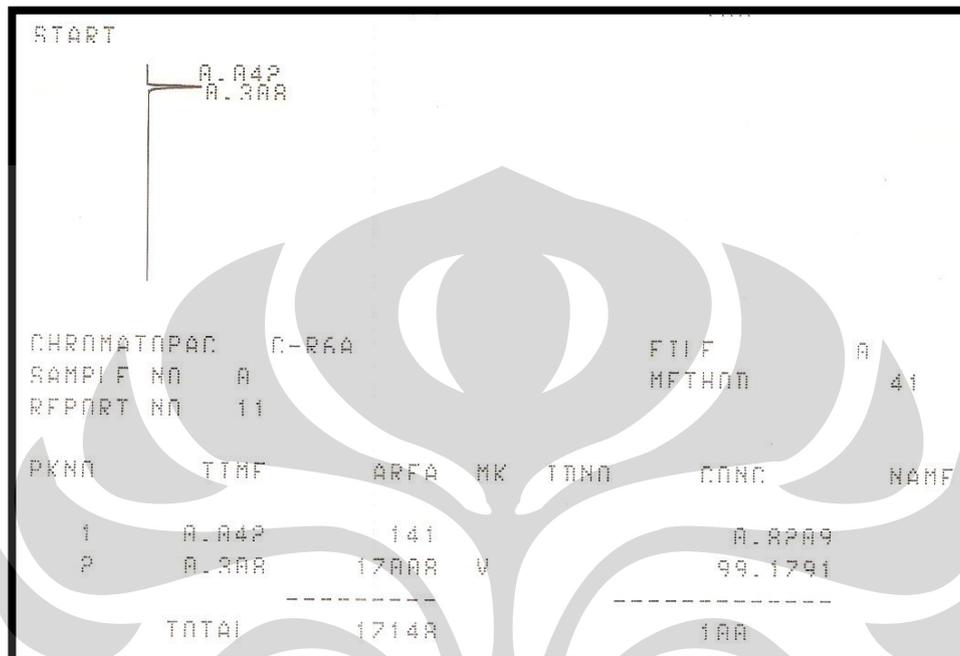


- *Plasmatron Ignition Coil 12 V DC*  
Lamanya proses gasifikasi : 5 menit,  
Jumlah elektroda : 5 elektroda



(lanjutan)

- *Plasmatron Ignition Coil 12 V DC*  
 Lamanya proses gasifikasi : 10 menit,  
 Jumlah elektroda : 5 elektroda

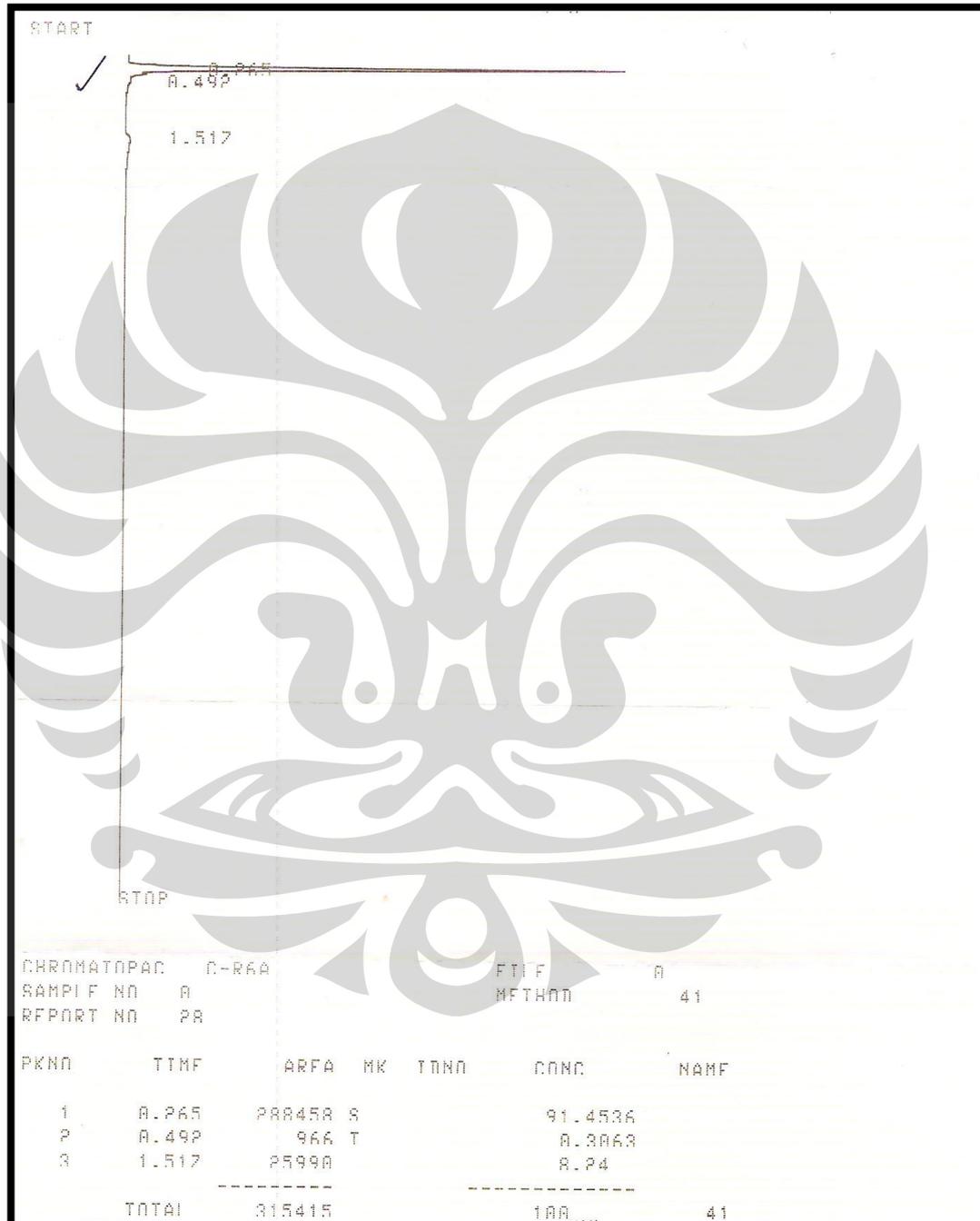


- *Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W*  
 Lamanya proses gasifikasi : 10 menit,  
 Jumlah elektroda : 1 elektroda  
 Jenis sampah : serbuk gergaji



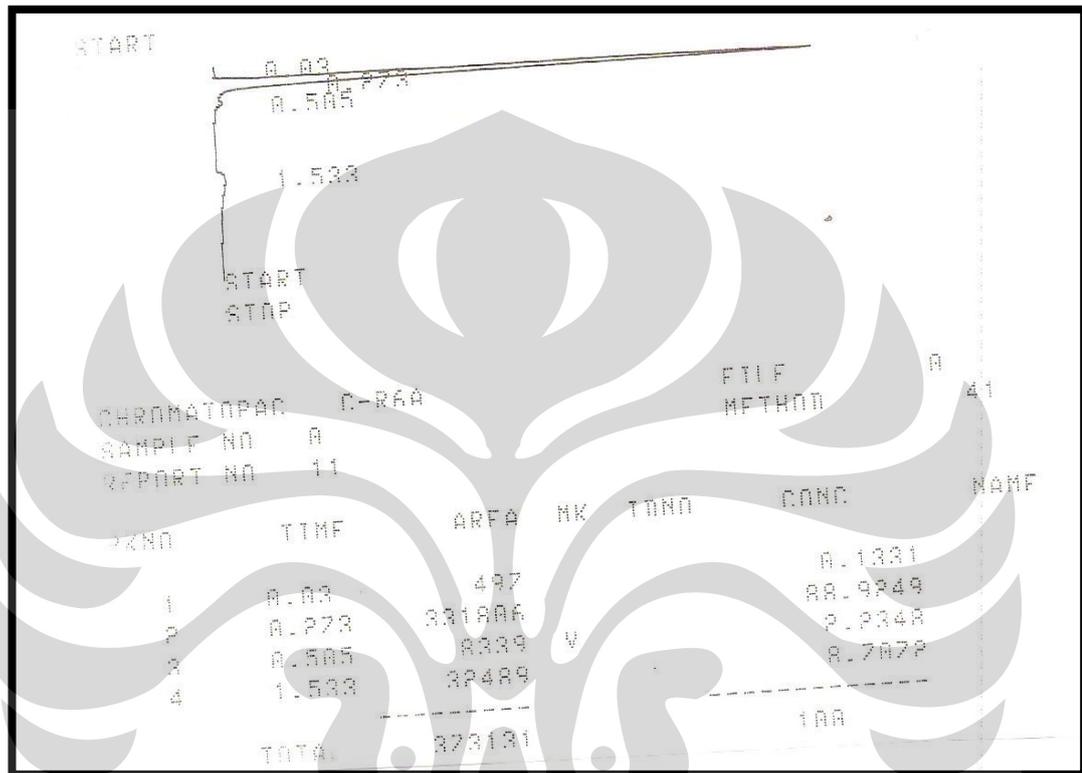
(lanjutan)

- Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W  
Lamanya proses gasifikasi : 5 menit,  
Jumlah elektroda : 5 elektroda



(lanjutan)

- Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W (dengan N<sub>2</sub>)  
 Lamanya proses gasifikasi : 10 menit,  
 Jumlah elektroda : 1 elektroda  
 Jenis sampah : serbuk gergaji



(lanjutan)

**B. Pada Kondisi Operasi Adanya Gas Blanket (N<sub>2</sub>)**

- Plasmatron Ballast CFL 220 V 23 W  
Lamanya proses gasifikasi : 10 menit,  
Jumlah elektroda : 1 elektroda  
Jenis sampah : daun kering

