



UNIVERSITAS INDONESIA

**UJI KINERJA PROSES GASIFIKASI PLASMA NONTERMAL
UNTUK LIMBAH PADAT ORGANIK DENGAN
PLASMATRON SEDERHANA**

SKRIPSI

**ROSITA OKTAVINA
040506058X**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**UJI KINERJA PROSES GASIFIKASI PLASMA
NONTERMAL UNTUK LIMBAH PADAT
ORGANIK DENGAN PLASMATRON SEDERHANA**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar

Sarjana Teknik

**ROSITA OKTAVINA
040506058X**

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

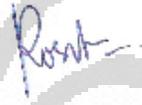
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Rosita Oktavina

NPM : 040506058X

Tanda Tangan :



Tanggal : 2 Juli 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Rosita Oktavina
NPM : 040506058X
Program studi : Teknik Kimia
Judul skripsi : Uji Kinerja Proses Gasifikasi Plasma Nontermal Untuk Limbah Padat Organik Dengan Plasmatron Sederhana

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, M.Sc., Ph.D

Penguji : Dr. Ir. Nelson Saksono, MT.

Ditetapkan di : Depok.
Tanggal : 2 Juli 2009

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena karena berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **”Uji Kinerja Proses Gasifikasi Plasma Nontermal Untuk Limbah Padat Organik Dengan Plasmatron Sederhana.”** Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada keluargaku, mama, Ms. Nett, Ka Na, Iyie, atas semua perhatian dan dukungan penuh yang telah diberikan selama ini terutama selama penulis kuliah dan menyusun skripsi ini. Pada kesempatan ini, penulis juga menyampaikan rasa terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku Kepala Departemen Teknik Kimia UI.
2. Bapak Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA, dan Ibu Ir. Eva Fathul K, MT., atas bimbingan, petunjuk, dan bantuan yang diberikan kepada penulis dalam penyusunan skripsi ini.
3. Ibu Ir. Dianursanti, MT., selaku pembimbing akademis penulis.
4. Bapak Ir. Amien Rahardjo, MT., dari Departemen Teknik Elektro FTUI atas bantuannya dalam bidang elektronika terutama dalam menghitung tegangan keluaran plasma dan daya masukan plasmatron sederhana.
5. Andy Rivai, Destaninggara, dan Masta Devita, rekan-rekanku yang selalu kompak selama melakukan penelitian dan dalam penyusunan skripsi ini.
6. Teman-teman satu penelitian di Lab. Separasi yang selalu membuat suasana laboratorium menjadi ramai.
7. Mang Ijal dan Kang Jajat yang banyak membantu penulis dalam persiapan dan pengerjaan penelitian ini.
8. Abang Isna, Endah, Eris, Gema, Tya atas segala hiburan dan waktunya dalam menemani penulis.
9. Teman-teman Lab Bioproses atas kesediaannya 'menampung' penulis saat penulis menunggu waktu untuk melaksanakan penelitian ini.

10. Teman-teman pemakai GC atas kesediaannya untuk berbagi GC selama penulis melakukan penelitian ini
11. Teman-teman sekosanku yang telah menjadi teman ngobrol selama pengerjaan skripsi ini.
12. Semua teman-teman GP 2005 yang tidak bisa disebutkan satu persatu yang senantiasa membantu dan memberikan semangat bagi penulis.
13. Seluruh pihak yang telah membantu penulis namun tidak dapat disebutkan satu per satu.

Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembacanya. Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan skripsi ini. Untuk itu, penulis mengharapkan saran dan masukan untuk memperbaiki penulisan selanjutnya.

Depok, 25 Juni 2009

Penulis,

Rosita Oktavina

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Rosita Oktavina
NPM : 040506058X
Program studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

Uji Kinerja Proses Gasifikasi Plasma Nontermal Untuk Limbah Padat Organik Dengan Plasmatron Sederhana.

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 2 Juli 2009

Yang menyatakan



(Rosita Oktavina)

ABSTRAK

Nama : Rosita Oktavina
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Uji Kinerja Proses Gasifikasi Plasma Nontermal Untuk Limbah Padat Organik Dengan Plasmatron Sederhana

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kinerja plasma nontermal dalam mengolah limbah padat organik. Pengolahan limbah padat organik dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode gasifikasi plasma menggunakan plasma nontermal sebagai sumber energinya. Plasma nontermal yang digunakan dihasilkan dari plasmatron sederhana yang dibuat dari ballast CFL 220V 23 W dan 65 W yang dirangkai dengan *flyback*. Penelitian dilakukan dalam 2 kondisi reaktor, yaitu vakum dan diisi gas nitrogen. Dalam kondisi vakum, diperoleh kondisi optimum, yaitu dengan menggunakan 1 buah elektroda dengan jarak pelepasan plasma 3 cm. Proses gasifikasi plasma dengan kondisi reaktor yang diisi dengan gas nitrogen berlangsung lebih baik karena mampu menghasilkan gas CO lebih banyak dibandingkan dalam kondisi vakum. Penggunaan elektroda batang wolfram mampu menghasilkan gas CO yang lebih baik dibandingkan dengan batang tembaga. Proses gasifikasi plasma ini juga lebih baik untuk plasmatron 65 W karena tegangan keluarannya lebih besar dibandingkan dengan 23 W.

Kata Kunci: Plasma nontermal, limbah padat, gasifikasi plasma.

ABSTRACT

Name : Rosita Oktavina
Major : Teknik Kimia
Title : Investigation of Nonthermal Plasma Gasification Performance for Organic Solid Wastes Using Simple Scale Plasmatron

The goal of this research is to know the performance of nonthermal plasma in organic solid wastes treatment. In this research, solid wastes were treated using plasma gasification treatment with nonthermal plasma as the source of energy. This nonthermal plasma was generated using simple plasmatron made of ballast from CFL 220 V - 23 W and 65 W with flyback. There were two reactor condition used, vacuum and N₂ flushing. The optimum condition gained when vacuum was using 1 electrode with the length of the torch of 3 cm. The use of nitrogen for flushing the reactor produced more carbon monoxide than the vacuum. Wolfram produced better nonthermal plasma than copper because of the wolfram's conductivity. In this gasification, the voltage produced with 65 W plasmatron was higher than the 23 W since the voltage produced related to the power of the plasmatron.

Keywords: Nonthermal Plasma, solid wastes, plasma gasification.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Pembatasan Masalah	4
1.5. Sistematika Penulisan	5
2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Limbah dan Hubungannya dengan Kehidupan Manusia	6
2.2. Jenis – Jenis Limbah	6
2.3. Metode Pengolahan Limbah Padat	7
2.3.1. <i>Landfilling</i>	7
2.3.2. Insenerasi	8
2.3.3. Gasifikasi	10
2.4. Plasma	11
2.5. Kegunaan Plasma dalam kehidupan sehari-hari	13
3. METODE PENELITIAN	17
3.1. Rancangan Penelitian	17
3.1.1. Perancangan dan Pengujian Plasmatron Sederhana	19
3.1.2. Perancangan dan Pengujian Reaktor Plasma Nontermal	22
3.1.3. Persiapan (preparasi) sampel limbah padat organik	24
3.1.4. Proses Gasifikasi Plasma Nontermal	24
3.1.5. Analisis Produk Gas dan Daya yang Dibutuhkan	25
3.2. Alat dan Bahan yang Digunakan	26
3.3. Prosedur Penelitian	28
3.3.1. Uji Kinerja Plasmatron Sederhana	28
3.3.2. Prosedur Penggunaan GC	30

4. PENGOLAHAN DATA DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1. Pengujian Kinerja Plasmatron dan Reaktor Plasma Non Termal Pada Kondisi Vakum	33
4.2. Analisis Gas Hasil Kromatogram.....	37
4.3. Hasil Penelitian Kondisi Optimum dengan kondisi vakum	39
4.4. Hasil Penelitian Kondisi Optimum dengan kondisi reaktor diisi dengan gas N ₂	42
4.5. Daya yang dibutuhkan dan Tegangan Plasma dalam proses gasifikasi .	43
4.5.1. Hubungan Antara Jarak Pelepasan Plasma Dingin Dengan Daya Yang Dibutuhkan Pada Kedua Plasmatron	44
4.5.2. Hubungan Jarak Pelepasan plasma dengan Tegangan Keluaran Plasma	45
4.5.3. Hubungan Jenis Plasmatron terhadap Daya Masukkan dan Tegangan Plasma.....	48
5 KESIMPULAN DAN SARAN	51
DAFTAR PUSTAKA	52



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1.	Skema pengolahan limbah padat dengan metode <i>landfilling</i>	8
Gambar 2. 2.	Skema bagian-bagian dari insenerator	9
Gambar 2. 3.	Proses penggunaan plasma dalam membantu pembakaran bahan bakar di kendaraan bermotor	14
Gambar 2. 4.	Contoh reaktor untuk mengolah limbah padat	15
Gambar 3. 1.	Diagram alir penelitian.....	18
Gambar 3. 2.	Contoh <i>ballast</i> CFL 220 V yang digunakan.....	19
Gambar 3. 3.	Trafo <i>flyback</i> atau <i>Integrated High Voltage Transformer</i>	20
Gambar 3. 4.	Plasmatron sederhana yang dibuat dari ballast CFL 220 V dan <i>flyback</i>	21
Gambar 3. 5.	Plasma nontermal yang dihasilkan dari rangkaian plasmatron sederhana.....	22
Gambar 3. 6.	Skema Reaktor Plasma nontermal yang Digunakan	22
Gambar 3. 7.	Elektroda yang digunakan: (a) batang tungsten dan tembaga sebagai katoda (b) stainless steel sebagai anoda dan grafit sebagai isolator panas.....	23
Gambar 3. 8.	Skema peralatan peralatan yang digunakan pada proses gasifikasiplasma nontermal.....	29
Gambar 3. 9.	Rangkaian peralatan yang digunakan dalam penelitian	29
Gambar 3. 10.	Skema Elektronika Plasmatron Sederhana Yang Digunakan.....	30
Gambar 4. 1.	Proses gasifikasi yang dilakukan dengan menggunakan 5 buah elektroda	35
Gambar 4. 2.	Hasil Penelitian Menggunakan Plasmatron 23 W dengan Elektroda Batang Wolfram pada kondisi reaktor vakum	35
Gambar 4. 3.	Hasil Penelitian Menggunakan Plasmatron 65 W dengan Elektroda Batang Wolfram pada Kondisi Reaktor Vakum.....	36

Gambar 4. 4.	Salah satu kromatogram yang diperoleh dari proses gasifikasi plasma nontermal yang dilakukan.....	37
Gambar 4. 5.	Hasil Kromatogram Plasmatron 23 W Kondisi Optimum pada Sampel Serbuk Gergaji Menggunakan Elektroda Wolfram.....	38
Gambar 4. 6.	Hasil Penelitian dengan Plasmatron 23 W dengan Menggunakan Elektroda Wolfram dan Tembaga Untuk Sampel Daun dan Serbuk Gergaji	40
Gambar 4. 7.	Hasil Penelitian dengan Plasmatron 65 W dengan Menggunakan Elektroda Wolfram dan Tembaga Untuk Sampel Daun dan Serbuk Gergaji	40
Gambar 4. 8.	Hasil Penelitian dengan Kondisi Reaktor Diisi dengan Gas N ₂ Menggunakan Kedua Jenis Plasmatron Dengan Elektroda Wolfram dan Sampel Serbuk Gergaji	42
Gambar 4. 9.	Hasil Penelitian yang Menunjukkan Hubungan Jarak Pelepasan plasma dengan Daya yang Dibutuhkan Menggunakan Plasmatron 23 W dengan Elektroda Wolfram dan Sampel Daun pada kondisi reaktor vakum	44
Gambar 4. 10.	Hasil Penelitian yang Menunjukkan Hubungan Jarak Pelepasan plasma dengan Daya yang Dibutuhkan Menggunakan Plasmatron 65 W dengan Elektroda Wolfram dan Sampel Daun pada kondisi reaktor vakum	44
Gambar 4. 11.	Susunan peralatan untuk mengukur tegangan plasma.....	46
Gambar 4. 12.	Hasil Penelitian yang Menunjukkan Hubungan Antara Jarak Pelepasan plasma dengan Tegangan Keluaran Pada Plasmatron 23 W dengan Elektroda Wolfram dan Sampel Daun Pada Kondisi Vakum	46
Gambar 4. 13.	Hasil Penelitian yang Menunjukkan Hubungan Antara Jarak Pelepasan plasma dengan Tegangan Keluaran Pada Plasmatron 65 W dengan Elektroda Wolfram dan Sampel Daun Pada Kondisi Vakum	47
Gambar 4. 14.	Grafik Hasil Penelitian Hubungan Antara Jenis Plasmatron dengan Daya Masukan Dengan Menggunakan Elektroda Wolfram dan Serbuk Gergaji	48
Gambar 4. 15.	Grafik Hasil Penelitian Hubungan Antara Jenis Plasmatron dengan Tegangan Plasma Dengan Menggunakan Elektroda Wolfram dan Serbuk Gergaji	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Beberapa Warna Plasma yang Timbul Akibat Adanya Aliran Gas Tertentu	12
Tabel 2.2. Klasifikasi Plasma	13



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Kalibrasi Gas CO dan H ₂ untuk perhitungan kasdar gas produk dari proses gasifikasi plasma	55
Lampiran 2. Perhitungan daya yang dibutuhkan dan tegangan plama yang dihasilkan	57
Lampiran 3. Hasil Analisis GC mengenai kadar gas CO dari hasil proses gasifikasi plasma	61



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sampah yang terdapat di Indonesia, khususnya di kota-kota besar seperti Jakarta menjadi suatu permasalahan tersendiri yang sangat memperihatinkan berbagai kalangan karena tiap hari produksi sampah di wilayah DKI Jakarta sendiri dapat mencapai enam ribu ton (setara dengan sekitar 27.000 m³) dan diprediksi akan terus meningkat pada tahun mendatang (<http://www.kapanlagi.com/h/0000219281.html>, diakses 12 November 2008) Dari jumlah tersebut, hanya sekitar 25.000 m³ sampah yang dapat terangkut ke tempat pembuangan akhir (TPA) sampah yang terdapat di Bantar Gebang, Bekasi dan sisa dari sampah yang tidak terangkut tersebut menjadi suatu permasalahan yang harus segera diatasi karena dapat merusak lingkungan di sekitar TPA tersebut. (Herminindian, 2007). Masalah ini ditambah dengan tidak memadainya tempat pengolahan sampah yang telah ada sehingga mengganggu kesehatan masyarakat yang tinggal disekitar TPA Bantar Gebang.

Ada beberapa metode yang digunakan dalam pengolahan limbah padat ini. Metode pertama adalah dengan mengolah limbah menjadi kompos. Pengolahan sampah menjadi kompos telah banyak dilakukan, salah satunya dilakukan oleh salah satu pengembang Perumahan CitraRaya Surabaya yang mengolah 30% dari limbah padat dan limbah cair yang dihasilkan oleh penghuninya menjadi kompos dan air yang dapat digunakan kembali. (<http://64.203.71.11/kompas-cetak/0711/30/Properti/4037813.htm>, diakses 12 November 2008). Namun, hal ini masih mendapatkan tantangan karena masih rendahnya kesadaran masyarakat untuk berpartisipasi.

Metode kedua adalah dengan metode *landfill* dimana limbah ditimbun dalam tanah untuk menghasilkan gas-gas yang bernilai kalor lebih tinggi. Metode selanjutnya adalah metode insenerasi yaitu dengan membakar sampah dengan menggunakan insenerator yang merupakan metode banyak digunakan untuk mengolah sampah. Pada suatu sisi, membakar sampah pada suhu diatas 1000 °C

merupakan salah satu cara yang cepat untuk mengurangi jumlah limbah padat yang ada. Namun sebaliknya, metode ini menghasilkan asap yang membahayakan kesehatan manusia karena dapat menghasilkan gas-gas berbahaya, seperti karbon monoksida, karbon dioksida, senyawa dioksin dan senyawa furan. Karena gas-gas berbahaya yang dihasilkan ini, di beberapa negara maju, seperti Jepang dan Amerika Serikat, telah meninggalkan metode insenerasi ini dan beralih pada metode pengolahan sampah yang lebih ramah lingkungan seperti proses gasifikasi, yaitu gasifikasi dengan menggunakan tenaga plasma.

Pada tahun 2005, K. Moustakas dan rekan-rekan melakukan penelitian tentang gasifikasi plasma untuk mengolah limbah berbahaya yang dihasilkan oleh industri, seperti industri pengolahan minyak bumi dan pupuk, dengan menggunakan plasma termal yang menghasilkan gas sintesis. Namun, pada penelitian ini proses gasifikasi plasma dilanjutkan dengan pembakaran dengan menggunakan bahan bakar propana dan udara sehingga gas sintesis yang terbentuk akan membentuk CO_2 dan H_2O senyawa asam dalam gas buang namun dalam jumlah yang lebih sedikit dibandingkan dengan metode insenerator. (Moustakas, et al, 2005)

Plasma nontermal telah digunakan untuk mengoksidasi produk gas berbahaya dari pengolahan limbah yang berasal dari penggunaan plasma termal yang dilakukan oleh E. Kowalska dan rekan-rekan di Polandia pada tahun 2008. Dalam penelitian ini, Kowalska menggunakan plasma nontermal selektivitas dan produktivitasnya lebih tinggi untuk proses kimia pada temperatur yang rendah sehingga energi yang dibutuhkan lebih rendah daripada plasma termal yang pada temperatur yang relatif tinggi ($\sim 8000 \text{ K}$), membutuhkan energi yang tinggi tapi selektivitas terhadap proses kimianya rendah. Plasma nontermal dalam penelitian ini digunakan untuk menghancurkan limbah berbahaya yang terdapat dalam senyawa organik sehingga dapat menghasilkan proses pengolahan yang lebih aman. Namun, dalam penelitian ini masih melibatkan oksigen dalam prosesnya. (Kowalska, E., et. al., 2008).

Teknologi yang diusulkan dalam penelitian ini adalah untuk mengolah limbah padat organik dengan menggunakan plasma nontermal dengan kondisi yang minim oksigen untuk menghasilkan metode pengolahan limbah padat yang

lebih ramah lingkungan, ekonomis dan aman dibandingkan dengan menggunakan plasma termal seperti yang telah banyak digunakan di negara-negara maju. Selain itu, dengan menggunakan metode gasifikasi plasma nontermal ini diharapkan dapat menghasilkan gas sintesis berupa karbon monoksida dan hidrogen (CO dan H₂) yang dapat dimanfaatkan untuk kehidupan manusia.

Penelitian ini meliputi perancangan plasmatron sederhana yang dibuat dari ballast CFL 220 V dengan *flyback* dan reaktor plasma nontermal dengan kapasitas 0,45 L sebagai tempat berlangsungnya proses gasifikasi. Pengujian kinerja reaktor plasma nontermal yang dilangsungkan dengan kondisi *batch*. Dari penelitian yang dilakukan, diharapkan dapat mengetahui efektivitas dari protipe reaktor yang digunakan untuk pengolahan limbah padat dengan metode gasifikasi plasma nontermal tersebut.

1.2. Perumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah diungkapkan sebelumnya maka diperoleh rumusan permasalahan pada penelitian ini, diantaranya adalah:

1. Bagaimana menghasilkan prototipe reaktor plasma nontermal yang khusus digunakan dalam pengolahan limbah padat berupa daun dan serbuk kayu dengan gasifikasi dengan plasma nontermal.
2. Bagaimana menghasilkan suatu generator plasma dingin sederhana yang terbuat dari *ballast compact flouorecent light* (CFL) 220 V – 23 W dan 220 V – 65 W dan transformator jenis *flyback*
3. Bagaimana kinerja reaktor plasma dingin untuk proses gasifikasi plasma untuk limbah padat yang digunakan.
4. Bagaimana hubungan antara daya yang dibutuhkan dengan plasma nontermal yang dihasilkan dari plasmatron sederhana yang dibuat.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian yang akan dilakukan, diantaranya adalah:

1. Merancang bangun prototipe reaktor khusus untuk mengolah limbah padat berupa daun dan serbuk kayu dengan menggunakan plasma nontermal.
2. Menghasilkan generator plasma dingin sederhana yang dibuat dari CFL 220 V – 23 W dan 220 V – 65 W dan transformator *flyback*.
3. Menguji kinerja reaktor plasma dingin untuk proses gasifikasi plasma untuk limbah padat dengan skala laboratorium.
4. Mengetahui hubungan antara daya yang dibutuhkan dan tegangan yang dihasilkan terhadap plasma nontermal yang dihasilkan dari plasmatron sederhana.

1.4. Pembatasan Masalah

Penelitian tentang proses gasifikasi dengan menggunakan reaktor plasma nontermal ini dibatasi oleh beberapa hal, diantaranya adalah:

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses (TIP) dan RPKA dalam skala laboratorium dengan kapasitas reaktor plasma 0,45 L dengan kondisi operasi *batch*.
2. Limbah padat yang digunakan adalah daun kering dan serbuk gergaji yang diperoleh dari lingkungan di sekitar Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok.
3. Plasmatron yang digunakan adalah plasmatron sederhana yang dibuat dari rangkaian CFL 220 V – 23 W dan CFL 220 V – 65 W dengan trafo *flyback*.
4. Pengukuran kuat arus listrik dan tegangan listrik yang dilakukan dengan menggunakan amperemeter dan voltmeter.
5. Pengukuran tegangan plasma nontermal yang dihasilkan dilakukan dengan menggunakan dua buah kapasitor yang disusun secara seri berdasarkan rancangan Bapak Amin dari Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

1.5. Sistematika Penulisan

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

BAB I PENDAHULUAN

Bagian ini menjelaskan latar belakang penelitian dan penulisan, rumusan masalah yang dibahas, tujuan dilakukannya penelitian, batasan-batasan masalah, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tinjauan pustaka yang merupakan literatur – literatur dasar penelitian dan meliputi penjelasan mengenai limbah padat, pengolahan limbah padat. insenerator, plasma, penggunaan plasma dalam mengolah limbah padat.

BAB III METODE PENELITIAN

Membahas tentang skema penelitian, metode, peralatan yang digunakan dalam penelitian, dan prosedur yang dilakukan untuk merancang dan menguji kinerja dari prototipe reaktor plasma non-termal untuk mengolah limbah padat.

BAB IV PENGOLAHAN DATA DAN PEMBAHASAN

Membahas tentang hasil yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan.

BAB V PENUTUP

Berisi tentang kesimpulan yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan dan saran-saran yang dibutuhkan untuk penelitian selanjutnya.

LAMPIRAN

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Limbah dan Hubungannya dengan Kehidupan Manusia

Dalam mendukung kegiatannya, manusia akan memanfaatkan barang-barang yang terdapat dalam lingkungan disekitarnya. Pada akhirnya, barang-barang tersebut tidak dapat digunakan lagi sehingga menjadi sampah atau limbah. Berdasarkan tersebut, limbah dapat diartikan sebagai benda/barang yang dihasilkan dari kegiatan manusia dan sudah tidak digunakan lagi. Limbah ini akan menimbulkan masalah bagi lingkungan disekitarnya jika tidak ditangani lebih lanjut. Salah satu limbah yang dapat mengganggu lingkungan adalah limbah domestic rumah tangga (*domestic waste*) yang biasanya berbentuk padat. Contoh limbah rumah tangga diantaranya adalah pembungkus kertas, daun dan ranting. (Notoatmodjo, 2003).

2.2. Jenis – Jenis Limbah

Berdasarkan fasanya, limbah dapat diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu: limbah padat, cair dan gas. Limbah padat adalah limbah yang berbentuk padat, dapat berupa plastik pembungkus, limbah cair berbentuk cair, seperti air limbah bekas mencuci, dan limbah gas berbentuk gas, seperti asap kendaraan bermotor. Pada kesempatan kali ini, akan dibahas lebih lanjut tentang limbah padat.

Berdasarkan kemudahannya dalam membusuk, limbah padat dibagi menjadi dua, yaitu: limbah organik dan anorganik. Limbah organik adalah limbah yang dapat membusuk atau diuraikan oleh lingkungannya, seperti sisa makanan, daun-daunan, dan ranting kering. Sedangkan limbah anorganik adalah limbah yang tidak dapat membusuk, contohnya adalah kantong plastik dan pecahan gelas. Kedua jenis limbah ini akan menimbulkan masalah bagi lingkungan dan bagi kesehatan manusia jika tidak dikelola dengan baik. (Notoatmodjo, 2003).

2.3. Metode Pengolahan Limbah Padat

Di kota besar seperti Jakarta, limbah padat biasanya dikumpulkan ke suatu tempat penampungan akhir (TPA), seperti TPA Bantar Gebang, untuk kemudian diolah lebih lanjut. Di TPA, limbah padat ini dibiarkan terpapar begitu saja di atas sebuah lahan untuk kemudian diolah dengan cara dimasukkan dalam ruangan bawah tanah yang kedap air. (Maramis, 2008). Namun kenyataannya, limbah padat yang dikumpulkan tidak dapat diolah lebih lanjut sehingga akan menumpuk di TPA dan mengganggu kesehatan masyarakat yang tinggal di sekitarnya tersebut. (<http://www.kapanlagi.com/h/0000219281.html>, diakses 12 November 2008).

Ada beberapa metode yang digunakan dalam mengolah limbah padat, diantaranya adalah pembuangan terbuka, penguburan, insenerasi, dan gasifikasi. Kebanyakan pengolahan limbah padat di Indonesia umumnya menggunakan metode pembuangan terbuka (*open dumping*) dan penguburan (*landfilling*), sedangkan metode insenerasi dan gasifikasi banyak diterapkan oleh beberapa negara tetangga, seperti Singapura. Insenerasi adalah pengolahan limbah dengan cara membakar limbah padat dengan menggunakan insenerator, sedangkan gasifikasi mengolah limbah dengan menggunakan temperatur yang sangat tinggi namun minim oksigen untuk mendapatkan gas yang dapat dimanfaatkan kembali, seperti gas sintesis.

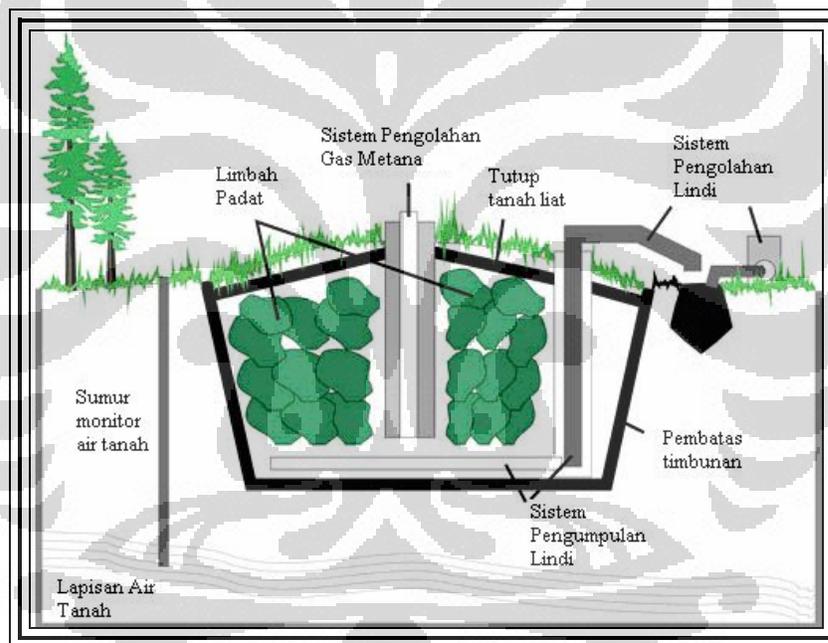
2.3.1. *Landfilling*

Metode *landfilling* adalah metode pengolahan limbah padat yang dilakukan dengan cara menimbunnya dalam tanah agar limbah terdekomposisi oleh mikroba-mikroba dalam tanah sehingga berubah menjadi senyawa gas dan cair. Senyawa yang terbentuk ini akan berinteraksi dengan air yang dikandung oleh limbah padat dan dengan air hujan sehingga membentuk cairan yang disebut dengan lindi (*leachate*).

Melalui metode *landfilling* ini, diharapkan terbentuk gas metana dan karbon dioksida. Kedua gas ini terbentuk akibat dari aktifitas mikroba dalam tanah saat mikroba melakukan dekomposisi limbah padat. Gas CH₄ yang

dihasilkan biasanya diambil dari dalam ‘sumur gas’ dengan menggunakan pipa yang dihubungkan dengan pompa vakum atau dengan menggunakan pompa desentralisasi.

Metode *landfilling* ini dapat mengurangi masalah timbunan limbah padat yang dihasilkan kota besar seperti Jakarta, namun dapat menimbulkan masalah baru. *Leachate* hasil interaksi antara senyawa limbah dengan air dapat mencemari tanah dan masuk dalam badan-badan air dalam tanah jika desain dari *landfill* tidak baik. Oleh karena itu, metode ini tidak dapat diterapkan pada semua kondisi tanah karena hanya dapat dilakukan pada tanah yang memiliki permeabilitas yang rendah. Berikut ini merupakan contoh dari skema *landfilling*. (Hutagalung, 2007).

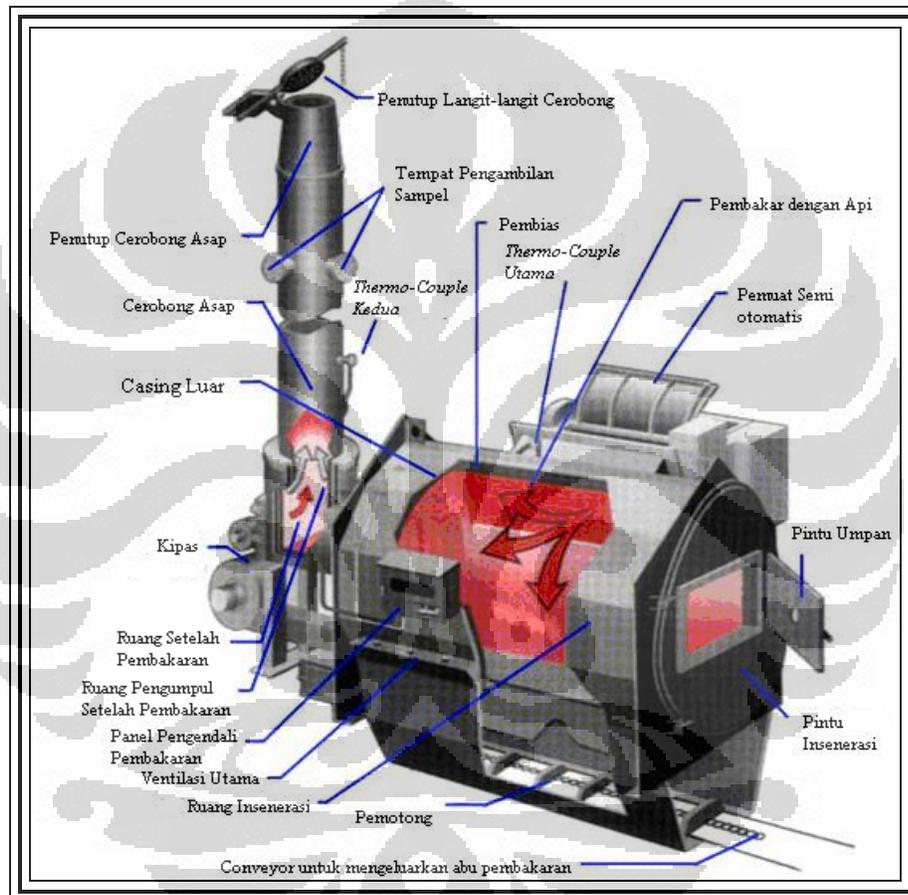


Gambar 2. 1. Skema pengolahan limbah padat dengan metode *landfilling*. (Hutagalung, 2007)

2.3.2. Insenerasi

Metode insenerasi adalah suatu metode pengolahan limbah padat dengan cara membakar limbah padat organik pada temperatur yang sangat tinggi, dengan menggunakan insenerator, sehingga disebut sebagai salah satu metode pengolahan limbah secara termal. Proses ini diharapkan berlangsung sempurna sehingga

kandungan organik dalam limbah padat akan terkonversi menjadi karbon dioksida dan uap air. Panas uap air yang dihasilkan ini dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin sehingga dapat menghasilkan energi listrik. (<http://en.wikipedia.org/wiki/Incineration>, diakses 18 November 2008). Berikut ini adalah skema dari insenerator yang biasa digunakan dalam pengolahan limbah padat.



Gambar 2. 2. Skema bagian-bagian dari insenerator (Hutagalung, 2007)

Metode insenerasi ini memang dapat mengurangi jumlah limbah padat yang dihasilkan pada suatu daerah hingga 90% dalam waktu yang relatif singkat. (<http://www.ccthit-swain.org/Tutorials/incinerate.cfm#4>, diakses 18 November 2008).

Kelebihan lain dari metode insenerasi ini adalah:

- Dapat menghasilkan panas (*steam*) yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik.
- Tidak membutuhkan lahan yang luas untuk prosesnya.

Namun, metode ini juga dapat menimbulkan permasalahan baru, seperti menghasilkan polusi udara sebagai akibat dari gas buangan yang dihasilkan dari proses insenerasi. (<http://en.wikipedia.org/wiki/Incineration>, diakses 18 November 2008).

Berikut ini merupakan kekurangan lain dari metode insenerasi dalam pengolahan limbah padat, yaitu:

- Menghasilkan senyawa yang berbahaya bagi kesehatan, seperti dioksin, furan, sulfur oksida, dan nitrogen oksida.
- Menghasilkan produk samping berupa abu dan limbah sisa pembakaran yang tidak dapat diolah/digunakan kembali sehingga akan menimbulkan limbah baru.
- Karena ukurannya yang kecil, tidak semua limbah padat, seperti kasur, dapat dibakar dengan insenerator.
- Membutuhkan biaya pembelian dan perawatan yang cukup besar.

(Sumber: GAIA, 2004)

Karena kekurangan-kekurangan yang dimiliki oleh insenerator ini, negara-negara maju telah mengusulkan metode pengolahan limbah yang lain, yang lebih ramah lingkungan.

2.3.3. Gasifikasi

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses gasifikasi dalam pengolahan limbah padat merupakan suatu proses pengolahan yang menggunakan energi termal, seperti metode insenerasi, namun pada kondisi yang minim oksigen agar menghasilkan gas sintentis yang bernilai kalor tinggi untuk dimanfaatkan kembali. (Hutagalung, 2007). Gasifikasi dengan metode konvensional ini memiliki kelebihan dibandingkan dengan metode insenerasi, yaitu:

- Lebih sedikit menghasilkan polusi udara karena menggunakan sedikit oksigen dalam prosesnya.
- Gas yang dihasilkan lebih efisien untuk menggerakkan mesin gas daripada gas dari proses insenerasi yang hanya mampu menggerakkan turbin uap.
- Lebih fleksibel dalam proses operasi dan lebih mudah untuk dioperasikan daripada insenerator konvensional.

(Sumber: Friends of The Earth, 2008)

Proses gasifikasi konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil ini juga memiliki kekurangan, diantaranya adalah:

- Menghasilkan senyawa berbahaya bagi kesehatan manusia dari hasil samping dari prosesnya, seperti senyawa dioksin dan furan. (Blue Ridge Environmental Defense League Report, 2002).
- Membutuhkan tempat untuk membuang abu dan hasil samping dari proses gasifikasi yang dilakukan.
- Tidak terlalu cocok untuk pengolahan limbah padat tertentu, seperti plastik, kertas, dan limbah makanan.
- Membutuhkan energi yang lebih besar daripada energi yang dihasilkan.

(Friends of The Earth, 2008)

Saat ini, di beberapa negara maju telah mengembangkan metode pengolahan limbah padat dengan gasifikasi dengan menggunakan plasma sebagai sumber energi panasnya seperti yang akan dijelaskan kemudian.

2.4. Plasma

Plasma dapat dikategorikan sebagai bentuk keempat dalam klasifikasi material selain padat, cair, dan gas karena plasma memiliki bentuk seperti gas, namun plasma memiliki konduktivitas yang cukup tinggi dalam daerah elektromagnetiknya sama seperti padatan dan cairan. Plasma terbentuk akibat adanya perbedaan muatan listrik yang sangat tinggi antara elektrodanya dan mengalir melalui gas dan menghamburkan energi yang dimiliki oleh gas tersebut sehingga membuat gas menjadi cukup panas. Hal ini membuat partikel dalam gas

ini akan bertumbukan dengan partikel disekitarnya tapi juga akan mempengaruhi medan magnetik disekitarnya. (Moustakas, et al., 2005). Gas yang mengalir inilah yang akan membuat plasma kelihatan tampak berwarna. Tiap gas yang mengalir akan menghasilkan warna tersendiri. Berikut ini merupakan beberapa warna plasma yang ditimbulkan:

Tabel 2. 1. Beberapa Warna Plasma yang Timbul Akibat Adanya Aliran Gas Tertentu

Gas yang mengalir	Warna plasma yang timbul
CF ₄	Biru
SF ₆	Biru putih
SiF ₄	Biru muda
Cl ₂	Hijau keputihan
CCl ₄	Hijau keputihan
H ₂	Merah muda (<i>pink</i>)
O ₂	Kuning pucat
Br ₂	Kemerahan
He	Merah menuju ungu
Ne	Merah bata
Ar	Merah tua
N ₂	Merah menuju kuning
Xe	Biru keputihan atau biru keabu-abuan yang agak buram
CO ₂	Keputihan atau biru-putih yang cukup terang
Udara	Ungu kemerahmudaan dan makin cerah jika arus bertambah
Gas campuran Ar-N ₂	Merah muda atau orange keputihan atau keabu-abuan. Berwarna lavender pada arus rendah. Di ujungnya berwarna biru-ungu-lavender.

Sumber: Barros, 2008; <http://www.plasma.de/en/glossary-entry-486.html>. Diakses 8 maret 2009

Plasma dapat dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu plasma fusi yang temperaturnya tinggi dan berada dalam keadaan setimbang (plasma setimbang), plasma termal yang temperaturnya tidak tinggi dan berada dalam keadaan kesetimbangan quasi (*quasi-equilibrium plasma*), dan plasma non-termal yang disebut juga dengan plasma dingin karena operasi kerjanya adalah kondisi

temperatur atmosferis dan berada pada keadaan tidak setimbang. (Huang, H., dan L. Tang, 2007). Berikut ini merupakan tabel yang menunjukkan pembagian plasma:

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 Termal (<i>Quasi-equilibrium plasma</i>)	$T_e \approx T_i \approx T_h$, $T_p = 2 \times 10^3 \text{ K} - 3 \times 10^4 \text{ K}$; $n_e \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}$	Busur Plasma; <i>atmospheric RF discharge</i>
Nontermal plasma (Non-equilibrium plasma)	$T_e \gg T_h$, $T_p \approx 3 \times 10^2 \text{ K} -$ $4,5 \times 10^2 \text{ K}$; $n_e \approx 10^{10} \text{ m}^{-3}$	<i>Corona discharge</i>

T_e = temperatur elektron; T_i = temperatur ion; T_h = temperature Netral; T_p = temperatur plasma; n_e = densitas elektron. (sumber: Huang, H., dan L. Tang, 2007)

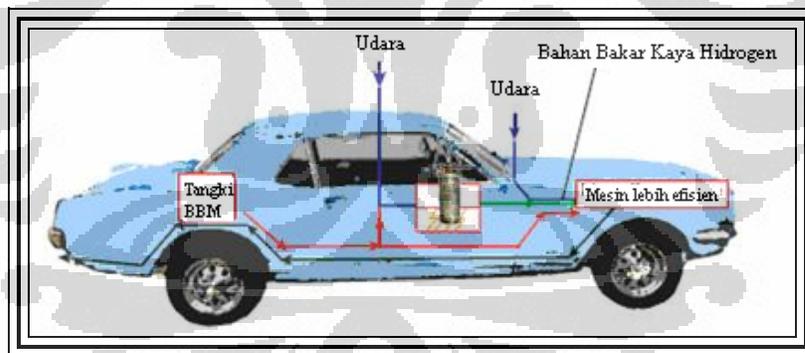
2.5. Kegunaan Plasma dalam kehidupan sehari-hari

Teknologi plasma banyak dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari manusia. Plasma termal sudah digunakan dalam industri logam dan industri gas asetilan dari gas alam yang menggunakan plasma termal sebagai pemanasnya. Kedua contoh tersebut merupakan contoh aplikasi dari plasma yang sudah dilakukan dari awal abad ke-20. Kini, teknologi plasma banyak dikembangkan dalam pengolahan limbah padat dan polusi udara yang banyak timbul. (R. W. Beck., Inc., 2003).

Plasma dingin banyak digunakan untuk modifikasi permukaan dengan luas tertentu atau mengaktivasi permukaan, yaitu pada industri etching karena temperatur plasma yang relatif dingin sehingga ion, atom dan molekul yang terdapat pada permukaan akan relatif dingin dan tidak menjadi rusak akibat adanya energi termal yang diberikan. Selain itu, plasma jenis ini juga banyak digunakan pada material yang sensitif terhadap panas, seperti polimer dan jaringan biologis. (Moustakas, et al, 2005).

Selain banyak digunakan dalam industri, teknologi plasma kini banyak digunakan untuk membantu melestarikan lingkungan, terutama dalam mengendalikan polusi udara dan mengolah limbah padat. Dalam mengendalikan polusi udara, plasma digunakan untuk mengonversi/mengubah gas buangan yang berbahaya dari kendaraan menjadi gas yang lebih ramah lingkungan. Gas buangan berbahaya seperti NO_x menjadi suatu senyawa yang lebih ramah lingkungan sebelum akhirnya dibuang.

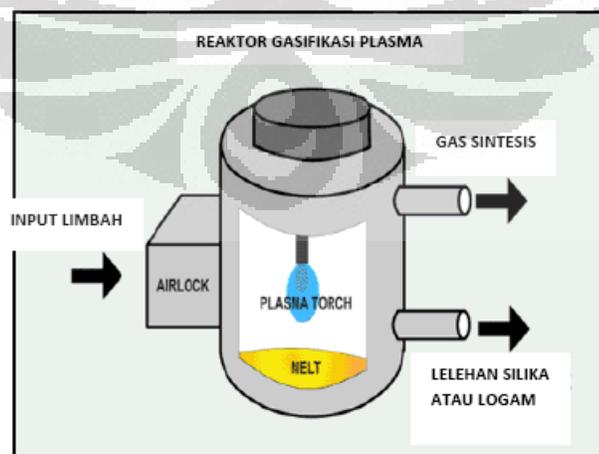
Dalam kendaraan, plasma juga digunakan untuk membantu merengkahkan bahan bakar yang digunakan oleh kendaraan sebelum dibakar dalam kendaraan bermotor sehingga bahan bakar yang digunakan akan mengandung banyak hidrogen yang sangat bersih dan efisien dalam pembakaran. Hal ini membantu mengurangi jumlah polusi yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor karena bahan bakar yang digunakan direngkahkan sebagian menjadi hidrogen sehingga hasil pembakarannya lebih bersih. Berikut merupakan skema dari penggunaan plasma dalam membantu pembakaran bahan bakar kendaraan bermotor, plasma terletak dibawah silinder.



Gambar 2. 3. Proses penggunaan plasma dalam membantu pembakaran bahan bakar di kendaraan bermotor (Coalition For Plasma Science, 2004)

Aplikasi plasma dalam pelestarian lingkungan lainnya adalah perannya dalam mengolah limbah padat, terutama limbah padat rumah tangga. Pengolahan limbah padat dengan menggunakan metode gasifikasi plasma. Prinsip gasifikasi plasma yang digunakan ini mirip dengan metode gasifikasi umumnya, yaitu dengan menggunakan temperatur yang tinggi dan reaktor dalam kondisi yang minim udara, namun, panas yang digunakan bukanlah berasal dari bahan bakar konvensional melainkan dengan menggunakan plasma yang biasanya merupakan plasma termal. Tujuan yang ingin dicapai melalui proses gasifikasi ini adalah menghasilkan senyawa gas sintesis (*syngas*) yang memiliki nilai kalor yang lebih tinggi daripada bahan bakar konvensional sehingga dapat digunakan kembali dalam kehidupan sehari-hari.

Metode pengolahan limbah padat dengan gasifikasi dilakukan dengan cara memasukkan limbah padat dalam suatu reaktor plasma yang minim udara kemudian limbah ini dipanaskan dengan menggunakan plasma yang terjadi akibat adanya perbedaan muatan listrik antara kedua elektroda yang digunakan. Dengan metode ini, volume limbah padat dapat dikurangi hingga 90%, sisa limbah padat yang masih terdapat dalam reaktor merupakan limbah yang tidak berbahaya dan dapat menjadi produk yang dapat digunakan kembali terutama sebagai pupuk kompos. (http://www.recoveredenergy.com/d_plasma.htm, diakses 8 Juni 2009). Berikut ini merupakan contoh dari reaktor plasma yang digunakan untuk pengolahan limbah padat.



Gambar 2. 4. Contoh reaktor untuk mengolah limbah padat

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

Kelebihan proses gasifikasi dengan plasma termal ini dibandingkan dengan proses pengolahan limbah padat lainnya, terutama dengan insenerator adalah (http://www.recoveredenergy.com/d_plasma.htm, diakses 8 Juni 2009):

- Mampu menghasilkan gas sintesis lebih banyak daripada insenerator.
- Tidak menghasilkan senyawa-senyawa berbahaya, seperti dioksin dan furan, sebagai hasil sampingnya.
- Tidak menghasilkan abu dan sisa hasil dari proses pembakaran yang berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan.
- Temperatur operasinya lebih seragam daripada dengan menggunakan insenerator.
- Tidak membutuhkan biaya untuk pembelian bahan bakar.
- Biaya perawatannya lebih murah daripada insenerator
- Proses pembakarannya lebih mudah dikendalikan daripada insenerasi.
- Dapat digunakan untuk berbagai jenis limbah padat.

Selain memiliki kelebihan, proses gasifikasi dengan menggunakan plasma termal ini memiliki beberapa kekurangan, diantara adalah (http://www.recoveredenergy.com/d_plasma.htm, diakses 8 Juni 2009):

- Membutuhkan biaya kapital yang lebih besar dibandingkan dengan menggunakan insenerator.
- Membutuhkan energi listrik yang lebih besar. Konsumsi energi listrik ini akan lebih besar jika limbah padat yang diolah dalam keadaan basah.

BAB 3

METODE PENELITIAN

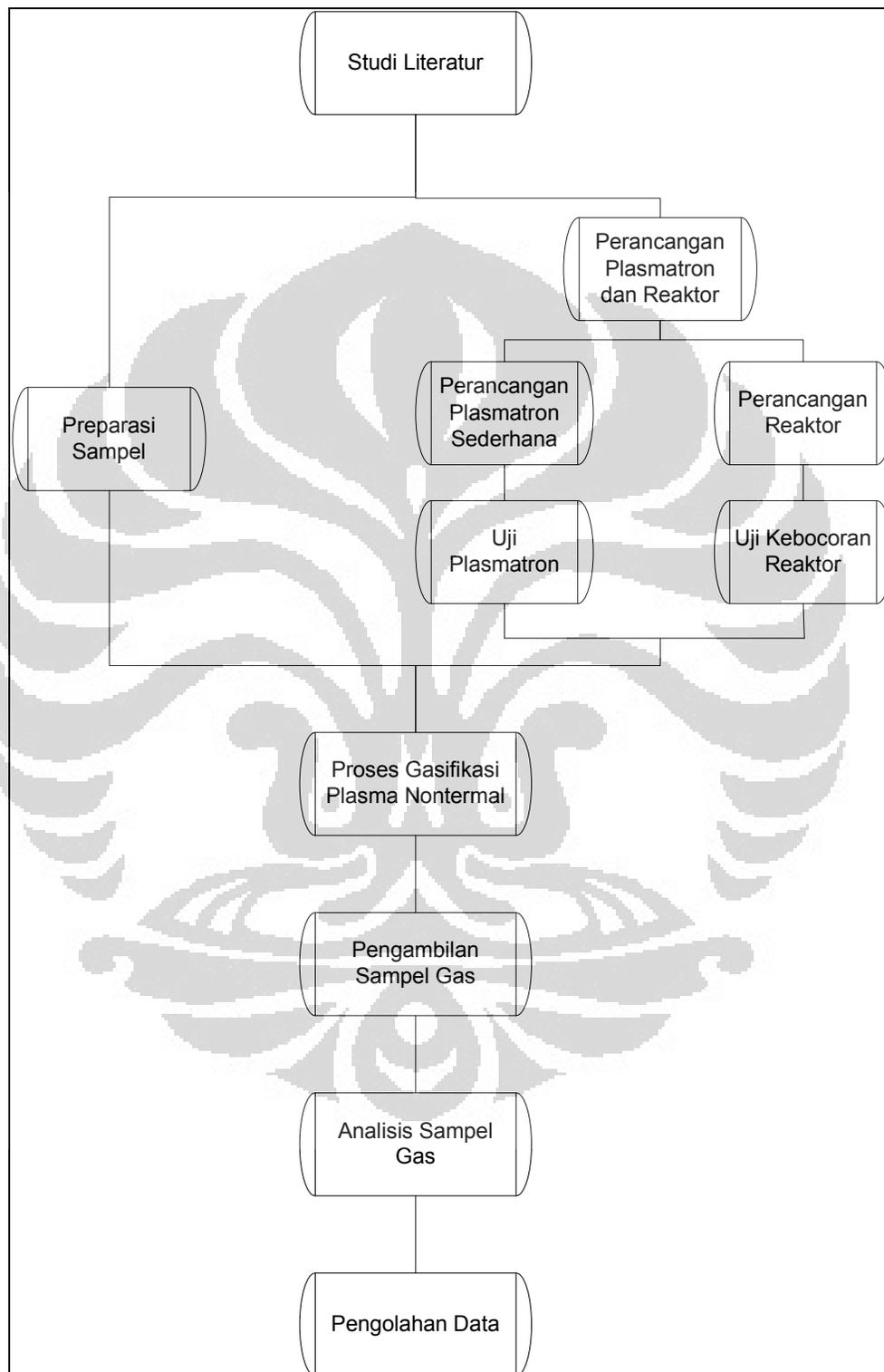
Bagian ini membahas berbagai hal yang berhubungan dengan rancangan penelitian yang akan dilakukan, alat dan bahan yang dibutuhkan dalam melakukan penelitian, dan prosedur yang dilakukan untuk penelitian ini. Pembahasan dalam rancangan penelitian meliputi perancangan dan pengujian untuk plasmatron sederhana dan reaktor plasma nontermal yang dibuat, preparasi sampel yang digunakan dalam penelitian, proses gasifikasi dari sampel yang telah dipersiapkan, dan analisis dari gas produk yang dihasilkan dari proses gasifikasi plasma.

3.1. Rancangan Penelitian

Tujuan yang hendak dicapai dari penelitian ini adalah untuk menguji kinerja dari prototipe reaktor dan plasmatron sederhana yang dihasilkan untuk proses gasifikasi limbah padat dengan plasma nontermal. Penelitian ini dilakukan di dua tempat yaitu di Laboratorium Proses Intensifikasi dan Laboratorium Rancangan Rekayasa Kimia Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia. Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini, adalah:

1. Perancangan dan pengujian plasmatron sederhana.
2. Perancangan dan pengujian terhadap reaktor plasma non-termal.
3. Persiapan (preparasi) sampel limbah padat organik
4. Proses gasifikasi plasma
5. Analisis produk gas

Berikut ini merupakan diagram alir dari penelitian yang akan dilakukan:



Gambar 3. 1. Diagram alir penelitian

3.1.1. Perancangan dan Pengujian Plasmatron Sederhana

Tahap ini bertujuan untuk menghasilkan suatu plasmatron yang dapat menghasilkan plasma non-termal untuk digunakan dalam penelitian ini. Plasma nontermal digunakan pada penelitian ini karena lebih aman dan lebih murah baik dari segi pembuatan maupun dari konsumsi energi. Temperatur plasma termal dapat mencapai 8000 K. Selektivitas plasma termal rendah dan membutuhkan energi yang tinggi bila dibandingkan dengan plasma nontermal. (Kowalska, E., et. al, 2008). Selain itu, tegangan yang dihasilkan juga tidak terlalu tinggi sehingga lebih aman untuk dilakukan dalam laboratorium.

Plasmatron dibuat dengan menggunakan *ballast* lampu yang berasal dari lampu CFL 220 V – 23 W dan CFL 220 V – 65 W dengan trafo jenis *flyback* yang biasa digunakan pada monitor *Cathode Ray Tube* (CRT). *Ballast* lampu CFL 220 V digunakan karena mampu menghasilkan arus frekuensi yang tinggi yang dialirkan ke tabung lampu sehingga tabung dapat menyala sama dengan prinsip kerja elektronik *ballast* dengan ukuran yang lebih ramping dan massa yang lebih ringan. (www.instructables.com/id/MAKE-A-HIGH-VOLTAGE-SUPPLY-IN-5-MINUTES/ diakses 15 Mei 2009). 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. 2. Contoh *ballast* CFL 220 V yang digunakan
(<http://www.pavouk.org/cfl.html> diakses 15 Mei 2009)

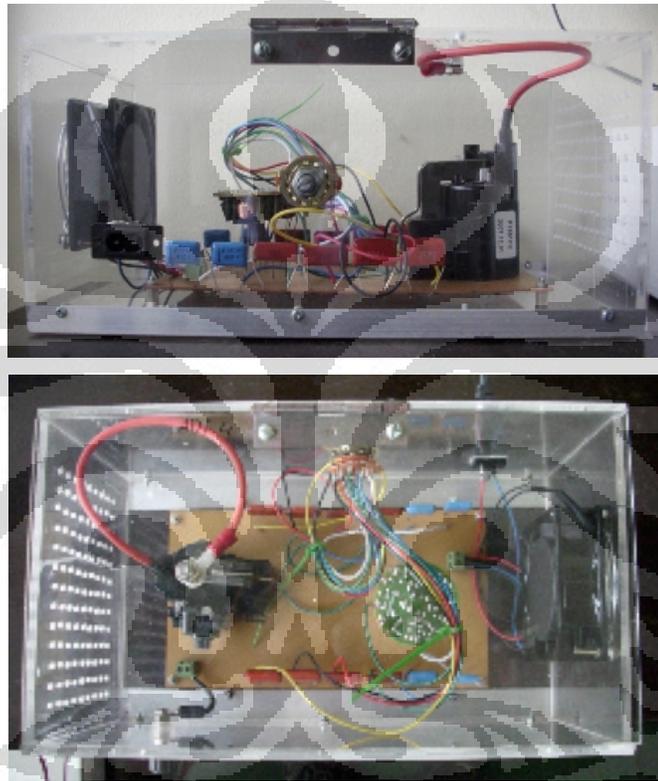
Flyback atau *integrated high voltage transformer* (IHVT) digunakan untuk membangkitkan tegangan tinggi dalam rangkaian pesawat video. (Tim e-dukasi.net, 2007). Dalam penelitian ini, trafo jenis ini digunakan sebagai pembangkit tegangan yang dibutuhkan untuk menghasilkan plasma nontermal yang digunakan dalam proses gasifikasi plasma. Komponen *flyback* ini digunakan karena dapat menghasilkan tegangan tinggi dan frekuensi arus yang tinggi yang diperlukan untuk mengantarkan *electron beam* pada monitor televisi. (www.instructables.com/id/MAKE-A-HIGH-VOLTAGE-SUPPLY-IN-5-MINUTES/, diakses 15 Mei 2009). Berikut merupakan gambar dari trafo *flyback* yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3. 3. Trafo *flyback* atau *Integrated High Voltage Transformer*
(Tim e-dukasi.net, 2007)

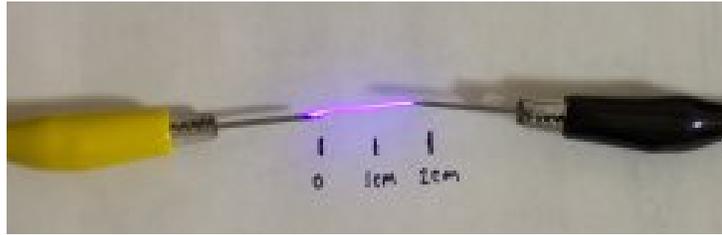
Bagian *flyback* yang digunakan adalah kaki-kaki pada bagian bawah *flyback* yang terdiri atas 10 buah kaki dan kabel-kabel. Dari kaki-kaki *flyback*, kaki yang digunakan hanya dua jenis, yaitu kaki primer dan kaki sekunder. Kaki primer dari *flyback* yang berjumlah dua buah dihubungkan dengan dua buah kaki filamen *ballast* sedangkan kaki sekunder berfungsi sebagai massa (ground) dari plasmatron. Sedangkan, kabel yang digunakan hanyalah kabel utama yang terdapat corong pada ujungnya.

Komponen lain yang terdapat dalam plasmatron sederhana selain *flyback* dan ballast lampu adalah kipas angin yang berfungsi sebagai penyedot panas ballast CFL yang timbul saat plasmatron bekerja. Kapasitor digunakan sebagai pengganti filamen pada CFL 220 V. Plasmatron diletakkan dalam kotak yang terbuat dari bahan mika supaya terlihat lebih rapi dan bagus. Berikut adalah gambar dari plasmatron yang telah siap untuk digunakan dalam penelitian



Gambar 3. 4. Plasmatron sederhana yang dibuat dari ballast CFL 220 V dan *flyback*

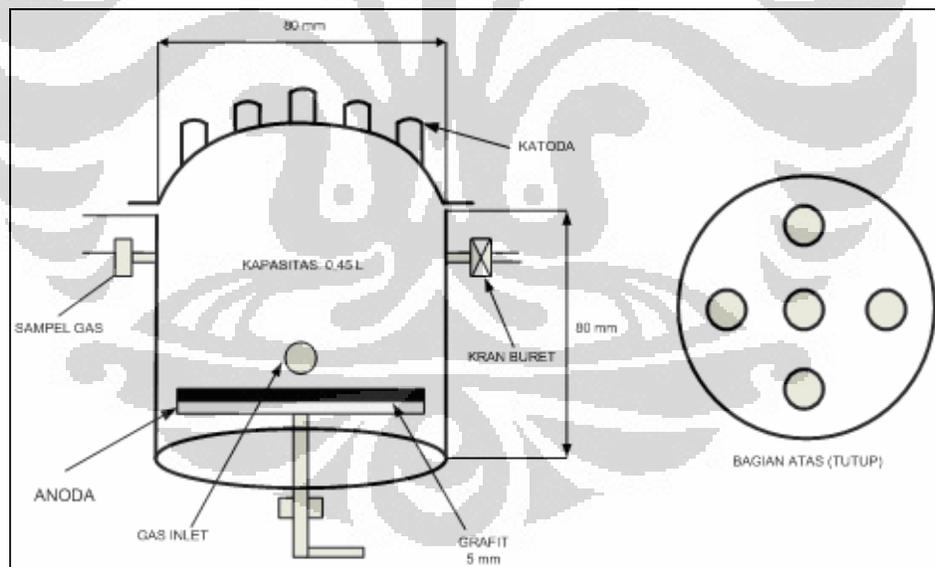
Setelah jadi, plasmatron sederhana yang dibuat diuji untuk memastikan alat dapat menghasilkan plasma nontermal dengan baik untuk digunakan dalam penelitian. Pengujian dilakukan dengan mendekatkan kabel yang terhubung dengan kaki sekunder didekatkan dengan kabel utama yang terdapat pada *flyback* dan rangkaian telah terhubung dengan sumber listrik PLN. Berikut merupakan gambar yang memperlihatkan plasma nontermal yang dihasilkan dari rangkaian plasmatron sederhana yang dibuat.



Gambar 3. 5. Plasma nontermal yang dihasilkan dari rangkaian plasmatron sederhana (Miller, 2005)

3.1.2. Perancangan dan Pengujian Reaktor Plasma Nontermal

Reaktor yang digunakan dalam penelitian ini dibuat dari bahan kaca borosilikat sehingga fenomena timbulnya plasma dengan proses gasifikasi dengan plasma nontermal dapat diamati. Berikut ini ialah skema reaktor plasma yang digunakan.



Gambar 3. 6. Skema Reaktor Plasma nontermal yang Digunakan

Pada tutup reaktor terdapat lima buah lubang yang merupakan tempat untuk meletakkan elektroda (katoda) dan pada bagian dasar reaktor terdapat tempat untuk meletakkan elektroda massa (*ground*-anoda). Elektroda (katoda) dan

massa (*ground-anoda*) inilah yang dihubungkan dengan plasmatron, plasma akan keluar hingga jarak tertentu diantara kedua elektroda tersebut jika rangkaian plasmatron dihubungkan dengan sumber tenaga listrik PLN.

Elektroda yang digunakan adalah batang tungsten dan batang tembaga sebagai katoda dan stainless steel sebagai anoda. Untuk mengatasi panas yang timbul dari proses gasifikasi plasma, pada anoda diberi grafit untuk menyerap panas dan sebagai tempat untuk meletakkan sampel. Berikut merupakan gambar dari elektroda yang digunakan



Gambar 3. 7. Elektroda yang digunakan: (a) batang tungsten dan tembaga sebagai katoda (b) stainless steel sebagai anoda dan grafit sebagai isolator panas

Pemilihan elektroda didasarkan pada konduktivitas listrik yang dimiliki oleh tiap-tiap logam. Tungsten yang digunakan dalam penelitian ini berupa silinder pejal yang berwarna keabu-abuan. Batang tungsten digunakan dalam penelitian ini karena tungsten memiliki sifat konduksi yang baik dan sifatnya relatif inert. Selain itu, tungsten juga biasa digunakan sebagai pemanacar pada instrumen sinar elektron (*electron beam*). Koefisien termal dari tungsten merupakan yang terendah dibandingkan dengan logam murni lainnya. (<http://en.wikipedia.org/wiki/tungsten> diakses 4 Juni 2009).

Sama seperti tungsten, dalam penelitian ini juga menggunakan tembaga berupa silinder pejal kuning keemasan. Tembaga digunakan sebagai salah satu elektroda karena memiliki sifat konduktivitas listrik dan termal yang dimilikinya

merupakan terbaik kedua setelah perak dengan harga yang lebih murah dibandingkan dengan perak. (<http://en.wikipedia.org/wiki/copper>, diakses 4 Juni 2009). Grafit dipilih sebagai isolator termal karena mampu menyimpan panas dengan cukup baik namun tetap memiliki sifat konduktivitas listrik yang baik. Dalam penelitian ini, seluruh elektroda digunakan dalam reaktor dan antara elektroda dengan plasmatron dihubungkan dengan suatu kabel tegangan tinggi.

Pengujian untuk reaktor dilakukan untuk memastikan reaktor dapat digunakan untuk penelitian ini, yaitu dengan menguji kebocoran reaktor sehingga penelitian dapat dilakukan dengan baik. Uji kebocoran dilakukan dengan metode gelembung dengan menggunakan air sabun.

3.1.3. Persiapan (preparasi) sampel limbah padat organik

Sampel yang digunakan dalam penelitian ini dibuat dari limbah padat organik berupa daun-daunan kering dan serbuk gergaji yang berada dalam keadaan kering diperoleh dari lingkungan sekitar Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok. Sampel tersebut kemudian dibuat menjadi ukuran yang kecil kemudian disaring dengan menggunakan kawat mesh agar sampel berada dalam ukuran yang homogen agar proses gasifikasi dapat berlangsung dengan baik.

3.1.4. Proses Gasifikasi Plasma Nontermal

Proses gasifikasi plasma dalam penelitian ini dilakukan dalam dua buah kondisi reaktor, yaitu reaktor dalam kondisi vakum dan reaktor diisi dengan gas pelindung berupa nitrogen. Tahap ini dilakukan untuk mendapatkan data percobaan yang dapat diolah, yaitu untuk memperoleh data tentang kandungan senyawa-senyawa yang dihasilkan setelah proses gasifikasi plasma berlangsung, jumlah arus dan tegangan yang dibutuhkan untuk menghasilkan plasma nontermal, dan tegangan yang dihasilkan saat proses berlangsung. Tujuan dari tahap ini juga untuk melihat proses berlangsungnya gasifikasi plasma dalam dan bagaimana plasma nontermal yang terbentuk pada kedua kondisi.

Pada tahap awal, penelitian hanya menggunakan satu kondisi reaktor (vakum), satu jenis elektroda (batang tungsten), dan satu jenis sampel (daun kering). Variasi penelitian yang akan dilakukan adalah variasi jarak bunga api/pelepasan plasma untuk melihat pengaruhnya terhadap fenomena gasifikasi yang terjadi dan besarnya plasma yang dihasilkan, jumlah elektroda yang digunakan untuk melihat hubungan antara jumlah elektroda yang digunakan dan plasma yang dihasilkan dari satu plasmatron dan besarnya daya lampu yang digunakan plasmatron untuk melihat hubungan antara besar daya yang digunakan dengan proses gasifikasi yang berlangsung.

Dari tahap awal ini, diharapkan akan diperoleh kondisi optimum dari proses gasifikasi, yaitu jumlah elektroda dan jarak bunga api/pelepasan plasma. Kondisi optimum ini digunakan sebagai dasar untuk melakukan variasi jenis elektroda (dengan tembaga), jenis sampel limbah padat (serbuk gergaji), dan kondisi reaktor yang digunakan (diisi dengan gas pelindung berupa nitrogen).

3.1.5. Analisis Produk Gas dan Daya yang Dibutuhkan

Produk gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi plasma ini kemudian dianalisis dengan menggunakan *gas chromatograph* (GC) untuk mengetahui senyawa-senyawa dan kandungan dari gas yang dihasilkan, terutama tentang keberadaan dan jumlah gas sintesis setelah dilakukannya proses gasifikasi plasma.

Data yang diperoleh dari GC kemudian diolah dengan menggunakan data kalibrasi gas sintesis dan gas mungkin timbul yang telah dibuat terlebih dahulu yang diperoleh berdasarkan gas murninya. Dari data kalibrasi ini kemudian akan diperoleh suatu persamaan garis.

Data hasil percobaan yang diperoleh dari data GC kemudian dimasukkan dalam persamaan ini untuk memperoleh nilai jumlah dari gas yang dihasilkan dari percobaan ini. Salah satu contoh gas yang diperkirakan ada yaitu gas CO dan H₂ yang memiliki persamaan kalibrasi

- Kurva kalibrasi CO: $y = 3 \cdot 10^{-6}x + 0,200$

- Kurva kalibrasi H₂: $y = 3 \cdot 10^{-6}x + 0,200$

Dimana: x = luas area gas yang diperoleh dari analisa GC.

Daya yang dibutuhkan oleh plasmatron untuk menghasilkan plasma nontermal diukur dengan menggunakan amperemeter dan voltmeter yang dihubungkan dengan plasmatron dan sumber listrik PLN. Untuk mengukur daya yang dibutuhkan oleh plasmatron, tegangan dan kuat arus yang terbaca oleh alat pengukur perlu dikali dengan faktor daya yang besarnya adalah 0,95. Faktor daya ini digunakan berdasarkan pengujian yang dilakukan oleh Bapak Amien Rahardjo dari Departemen Teknik Elektro FTUI. Faktor daya ini berkaitan dengan rangkaian elektronika dari ballast CFL 220 V yang digunakan. Nilai daya yang telah dikalikan dengan faktor pengali merupakan nilai daya masukkan yang dibutuhkan oleh plasmatron, persamaannya yaitu:

$$P = P_f \times V \times I$$

Dimana:

P_f = faktor daya = diasumsikan bernilai 0,95

V = tegangan yang terbaca oleh voltmeter (V)

I = kuat arus yang terbaca oleh amperemeter (A)

3.2. Alat dan Bahan yang Digunakan

Alat dan bahan yang digunakan dalam melakukan penelitian tentang proses gasifikasi sampel limbah padat dengan menggunakan plasma non thermal ini adalah:

a) Alat yang digunakan:

Alat dan peralatan yang digunakan dalam melakukan penelitian ini, diantaranya adalah:

- Plasmatron sederhana yang terbuat dari *ballast* CFL 220 V dengan *flyback*. Daya lampu yang digunakan adalah 23 W dan 65 W. Plasmatron sederhana ini merupakan penghasil plasma nontermal.
- Reaktor kaca untuk melakukan proses gasifikasi plasma nontermal.
- Batang tungsten/wolfram dan batang tembaga sebagai elektroda katoda.
- Stainless steel sebagai elektroda anoda (massa – *ground*).

- Pelat grafit sebagai isolator termal
 - Pompa vakum untuk membuat reaktor dalam keadaan vakum
 - *Vacuum gauge* untuk mengetahui besarnya tekanan vakum dalam reaktor.
 - *Stopwatch* untuk mengukur lamanya waktu proses gasifikasi plasma.
 - Selang silikon sebagai penghubung antara reaktor – *vacuum gauge*, *vacuum gauge* – pompa vakum, dan reaktor – gas nitrogen.
 - Regulator gas Nitrogen untuk mengatur jumlah gas yang diperlukan dalam proses gasifikasi plasma.
 - Meja reaktor untuk meletakkan reaktor yang digunakan.
 - Neraca untuk mengukur massa sampel.
 - Kawat *mesh* ukuran 0,8 mm untuk preparasi sampel daun dan serbuk gergaji.
 - *Syringe* untuk mengambil sampel gas produk gasifikasi sehingga dapat dianalisa dengan menggunakan kromatografi gas (GC).
 - Kromatografi gas (GC) untuk menganalisis jenis dan kandungan senyawa dari gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi.
 - *CO detector* untuk mengetahui dan memastikan keberadaan gas CO sebagai hasil proses gasifikasi plasma nontermal yang dilakukan.
- b) Bahan yang digunakan:
- Sampah padat organik berupa daun-daunan kering dan serbuk gergaji sebanyak 0,35 g untuk tiap sampel.
 - Gas Nitrogen sebagai gas pelindung saat proses gasifikasi plasma berlangsung.

3.3. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan terbagi menjadi dua buah bagian yaitu prosedur pengujian kinerja plasmatron sederhana dan prosedur pengujian produk gas dengan GC.

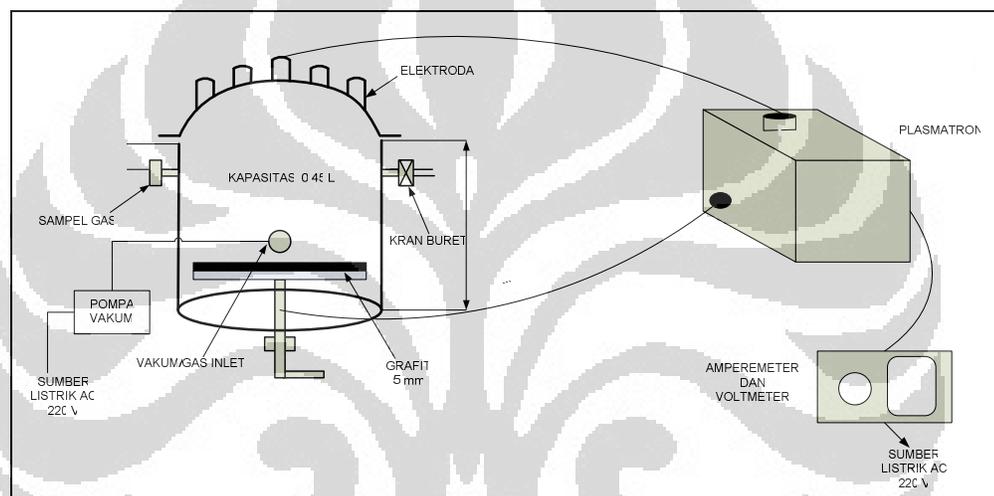
3.3.1. Uji Kinerja Plasmatron Sederhana

1. Menyiapkan semua peralatan yang digunakan, seperti reaktor dan mejanya, plasmatron, pompa vakum, panel pengukur arus listrik, kabel dan selang silikon.
2. Memasang semua elektroda dan pelat grafit pada reaktor.
3. Memastikan semua kabel, yaitu kabel sumber tegangan listrik PLN 220 V, kabel tegangan tinggi, massa (ground), telah tersambung dengan baik dan benar.
4. Meletakkan sampel sebanyak 0,35 g pada pelat karbon dalam reaktor.
5. Mengukur jarak antara elektroda katoda dengan pelat grafit pada jarak tertentu.
6. Menutup rapat reaktor dan memastikan semua kerangan pada reaktor telah tertutup dengan rapat.
7. Memutar *rotary switch* pada plasmatron sederhana ke posisi kapasitor 10 nF (sesuai yang telah ditentukan dari penelitian Andy Rivai).
8. Membuat reaktor dalam keadaan vakum dengan menggunakan pompa vakum hingga tekanan dalam reaktor mencapai -70 cmHg atau 0.079 atm.
9. Menyalakan plasmatron selama 5 menit dan mengamati fenomena gasifikasi plasma yang terjadi. Mematikan plasmatron setelah gasifikasi berlangsung selama 5 menit.
10. Mengambil sampel produk gas hasil gasifikasi plasma melalui bagian samping dari reaktor yang tertutup dengan silicon.
11. Menganalisa produk gas tersebut dengan menggunakan GC.
12. Membuka tutup reaktor dan menimbang massa akhir sampel kemudian membersihkan pelat karbon.
13. Mengulangi langkah 1-12 untuk variasi lainnya.

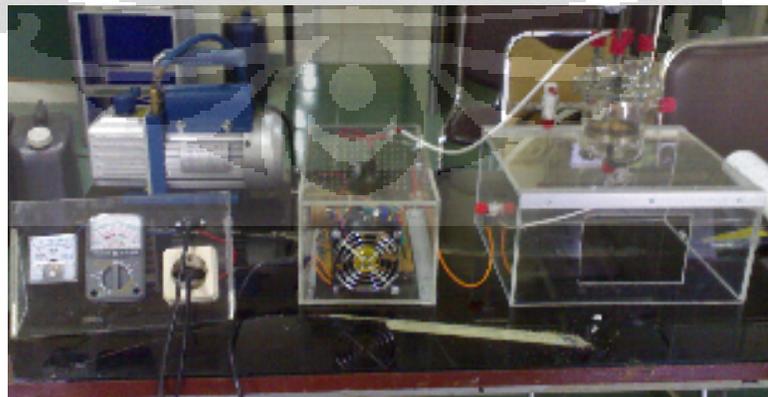
Variasi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah :

- a) Jumlah elektroda katoda = 1, 3 dan 5 buah
- b) Jenis elektroda = tungsten dan tembaga
- c) Jenis sampel limbah padat = daun kering dan serbuk gergaji

Berikut merupakan skema dan susunan dari peralatan yang digunakan dalam penelitian tentang gasifikasi plasma nontermal yang akan dilakukan.

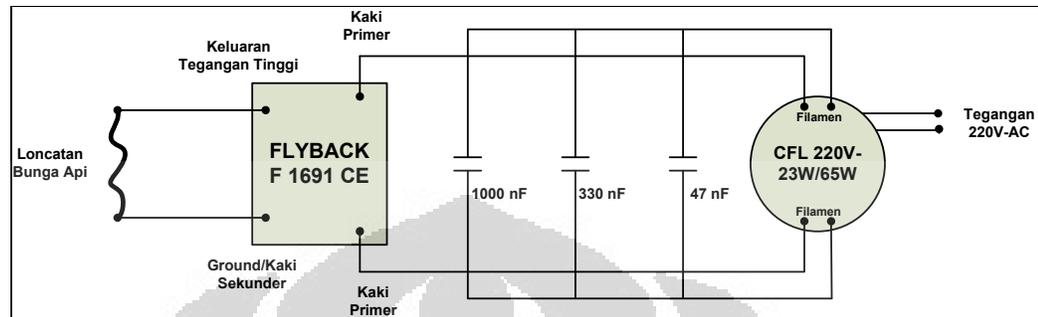


Gambar 3. 8. Skema peralatan peralatan yang digunakan pada proses gasifikasi plasma nontermal



Gambar 3. 9. Rangkaian peralatan yang digunakan dalam penelitian

Berikut ini merupakan gambar/skema elektronika dari plasmatron sederhana yang digunakan dalam penelitian kali ini



Gambar 3. 10. Skema Elektronika Plasmatron Sederhana Yang Digunakan

3.3.2. Prosedur Penggunaan GC

Dalam menggunakan gas kromatografi, perlu diperhatikan hal-hal yang menyangkut alat tersebut, seperti dalam 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 pada sambungan-sambungannya.
- Membuka kerangan utama dari kencang menjadi kendur sehingga tekanan akan langsung naik.
- Membuka kerangan regulator dari kendur menjadi kencang sehingga tekanan akan naik perlahan-lahan.

3. Prosedur membuka tabung gas:

- Memastikan tekanan input dan output di regulator, jarum *pressure gauge* menunjukkan \emptyset dan kerangan dalam keadaan tertutup (posisi kerangan longgar).

- membuka kerangan induk di tabung dengan memutar ke kiri (arah kebalikan jarum jam) dan lihat tekanan gas, yang menunjukkan tekanan dalam tabung.
 - membuka kerangan regulator perlahan-lahan ke kanan (searah jarum jam), lalu mengatur 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 (CO , H_2 , CH_4), langkah 4 harus dilakukan terlebih dahulu sebelum langkah 1 menggunakan gas inert N_2
4. Prosedur Menutup Gas
- Menutup kerangan induk di tabung dengan memutar ke arah kanan (searah jarum jam) tunggu hingga tekanan gas di *pressure gauge* menunjukkan \emptyset .
 - Menutup kerangan di regulator pelan-pelan ke arah kiri (arah kebalikan jarum jam) sampai kerangan longgar dan tunggu tekanan gas di *pressure gauge* sampai menunjukkan angka \emptyset .
 - Prosedur Menyalakan GC.
 - Memastikan tekanan *primary* 600 kPa, *carrier gas* ± 150 kPa
 - Mengatur suhu menjadi 130 – 100 – 100 °C
 - Menunggu hingga stabil (hingga lampu pada GC berkedip-kedip)
 - Menyalakan *current* pada 6 mA
5. Prosedur menyalakan chromatopac:
- 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 5 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.
6. Prosedur mematikan GC:
- Mematikan *current*.
 - Menurunkan temperature menjadi 30-30-30 °C kemudian GC dibuka agar pendinginan terjadi lebih cepat.
 - Setelah suhu kolom menjadi 80 °C (pada indikator) kemudian GC baru dapat dimatikan.
7. Prosedur mematikan aliran gas
- Sesuai dengan prosedur menutup gas.

BAB 4

PENGOLAHAN DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini dibahas beberapa hal terpenting tentang kinerja dari plasmatron sederhana dan reaktor plasma yang digunakan dalam penelitian, data tentang senyawa gas yang diperoleh dari gasifikasi plasma yang dilakukan, dan pembahasan tentang data yang diperoleh dari penelitian.

Penelitian ini awalnya menggunakan satu jenis elektroda, yaitu batang wolfram, dan satu jenis sampel limbah padat, yaitu daun kering. Tujuannya adalah untuk mendapatkan kondisi optimum, yaitu kondisi dimana menghasilkan gas CO paling banyak. Jumlah massa sampel yang tereduksi akibat proses gasifikasi plasma nontermal ini tidak dijadikan sebagai salah satu parameter karena besarnya tidak terlalu signifikan dibandingkan dengan jumlah CO yang dihasilkan.

Penelitian dilakukan dengan menggunakan batang tembaga dan serbuk gergaji sebagai elektroda dan jenis sampel serbuk gergaji untuk kondisi optimum yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan sebelumnya. Kondisi reaktor yang digunakan pada kondisi diatas adalah dalam keadaan vakum, selanjutnya reaktor diisi dengan gas nitrogen untuk mengetahui kondisi yang lebih optimal dan lebih banyak menghasilkan gas CO.

4.1. Pengujian Kinerja Plasmatron dan Reaktor Plasma Non Termal Pada Kondisi Vakum

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, penelitian tahap ini dilakukan dengan menggunakan satu jenis katoda (batang wolfram atau yang disebut juga dengan *tungsten rod*) dan sampel limbah padat (daun kering) dengan kondisi reaktor vakum. Variasi yang dilakukan adalah variasi pelepasan plasma (*torch*) dan jumlah elektroda. Tujuan dari tahapan ini adalah untuk memperoleh kondisi jarak dan jumlah elektroda yang optimum, yaitu jarak dan jumlah elektroda yang menghasilkan jumlah CO yang paling banyak saat gasifikasi plasma selesai dilakukan.

Gas yang menjadi parameter dalam penelitian ini adalah gas CO. Hal ini terkait dengan gas H₂ yang tidak dapat dianalisis/deteksi oleh GC yang digunakan. Hal ini kemungkinan terjadi karena H₂ yang dihasilkan bertumbukan dengan molekul lain akibat dari naiknya tekanan dalam reaktor yang terjadi karena reaktor telah terisi dengan gas produk gasifikasi plasma. Tekanan dalam reaktor yang makin besar akan membuat partikel-partikel yang dihasilkan makin dekat sehingga peluang untuk saling berikatan makin besar. Gas hidrogen yang dihasilkan kemungkinan berikatan dengan sedikit udara yang masih terdapat dalam reaktor membentuk uap air sehingga yang terdeteksi oleh GC adalah uap air dan bukan gas H₂ murni. Kemungkinan lainnya adalah karena CO dan H₂ merupakan reduktor sehingga akan terjadi intervensi antara gas yang satu dengan gas lainnya. (Petrucci, 1987)

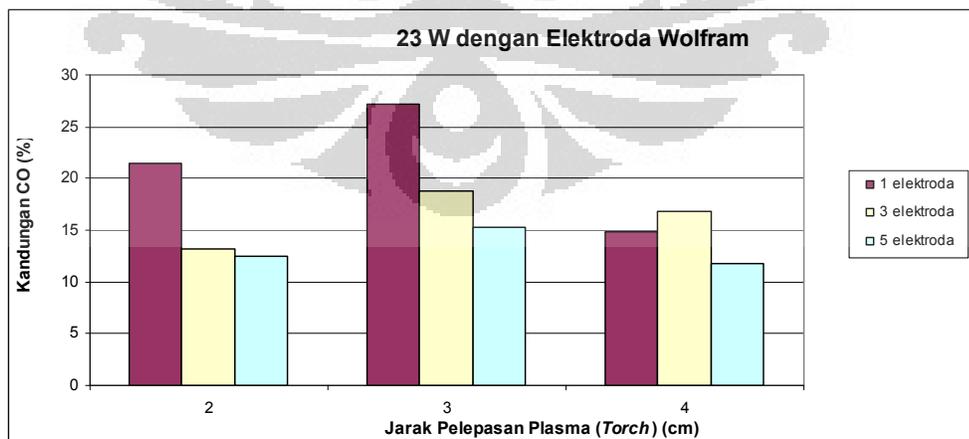
Pada kondisi reaktor yang vakum, plasma yang timbul berwarna ungu seperti saat plasma yang dihasilkan dilewatkan oleh udara namun berwarna lebih tua dan stabil pada bagian atas (dekat dengan katoda) dan berwarna biru keputihan pada bagian dekat dengan sampel daun yang kemungkinan timbul karena plasma langsung membentuk gas CO₂ begitu plasma menyambar sampel. Warna plasma yang ungu terjadi karena dalam reaktor masih ada sedikit udara walaupun plasma dalam keadaan vakum, sedangkan warna biru keputihan terjadi karena adanya gas CO₂ dalam reaktor. (Barros, 2008).

Semakin mendekati akhir proses gasifikasi plasma yang terlihat pada reaktor akan semakin tipis karena tekanan dalam reaktor makin tinggi karena reaktor terisi oleh gas-gas yang terbentuk dari proses gasifikasi ini. Sayangnya, dari variasi elektroda yang digunakan, plasma nontermal yang dihasilkan hanya mampu menyambar sampel pada satu sisi tertentu dari sampel saja dan tidak berpindah-pindah ke daerah sampel lainnya. Berikut ini merupakan salah satu gambar yang menunjukkan proses gasifikasi yang dilakukan dalam penelitian ini.

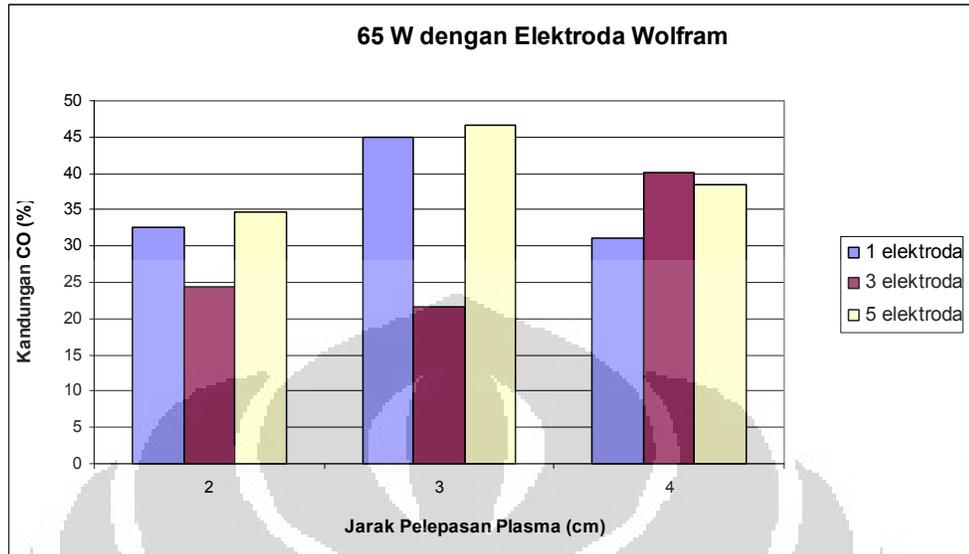


Gambar 4. 1. Proses gasifikasi yang dilakukan dengan menggunakan 5 buah elektroda

Gambar 4.1. merupakan gambar yang diambil pada penelitian yang menggunakan lima buah elektroda dengan sebuah plasmatron sederhana. Dari gambar 4.1., terlihat bahwa plasma hanya keluar melalui satu buah elektroda walaupun menggunakan lima buah elektroda. Hal ini juga terjadi pada variasi tiga elektroda. Terjadinya hal ini kemungkinan disebabkan karena dalam penelitian ini hanya menggunakan satu buah plasmatron sehingga plasma nontermal yang dihasilkan hanya bisa disalurkan melalui satu buah elektroda yang menurut plasma nontermal tersebut merupakan jalan yang paling mudah. Berikut merupakan grafik yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan:



Gambar 4. 2. Hasil Penelitian Menggunakan Plasmatron 23 W dengan Elektroda Batang Wolfram pada kondisi reaktor vakum



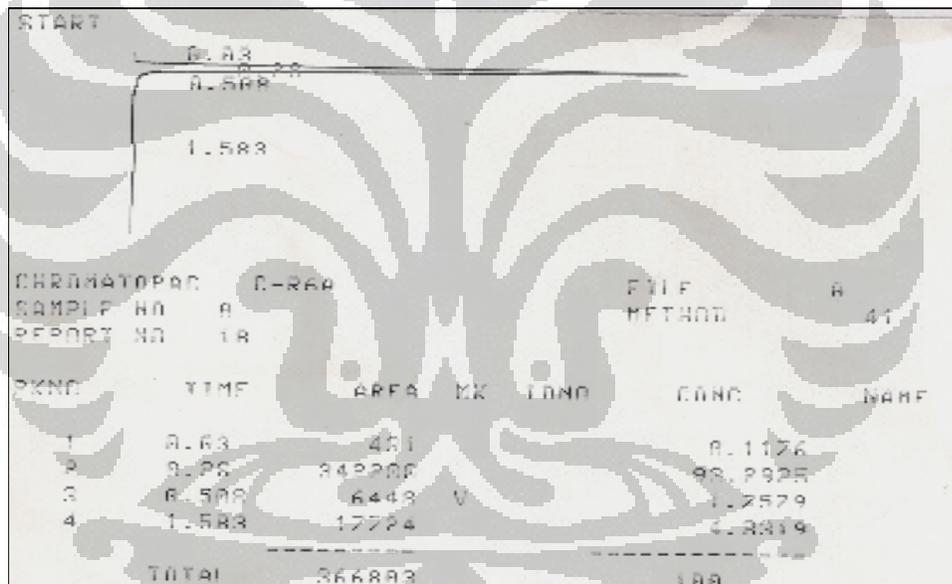
Gambar 4. 3. Hasil Penelitian Menggunakan Plasmatron 65 W dengan Elektroda Batang Wolfram pada Kondisi Reaktor Vakum

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan seperti tersaji pada kedua grafik di atas, yaitu 4.2. dan 4.3. terlihat bahwa jarak optimum adalah pada jarak pelepasan plasma 3 cm karena pada jarak tersebut gas CO yang dihasilkan paling banyak dibandingkan dengan jarak pelepasan plasma 2 cm dan 4 cm. Hal ini kemungkinan terjadi karena pada jarak pelepasan plasma 3 cm plasma dapat 'bergerak lebih leluasa' dalam menyambar sampel dibandingkan dengan jarak 2 cm yang terlalu dekat sehingga plasma langsung stabil pada satu titik dari sampel dan jarak 4 cm yang terlalu jauh sehingga intensitas plasma tidak terlalu besar sehingga proses gasifikasi plasma dalam penelitian ini tidak berlangsung dengan baik.

Pada gambar 4.2. terlihat bahwa jumlah elektroda optimum yang menghasilkan jumlah CO lebih banyak adalah 1 buah elektroda sedangkan pada gambar 4.3. jumlah elektroda optimum adalah 5 buah, namun karena plasma nontermal hanya keluar pada satu elektroda saja walaupun terdapat 5 buah elektroda yang dirangkai dan diberi daya seperti telah dijelaskan sebelumnya sehingga jumlah elektroda yang digunakan adalah 1 buah elektroda.

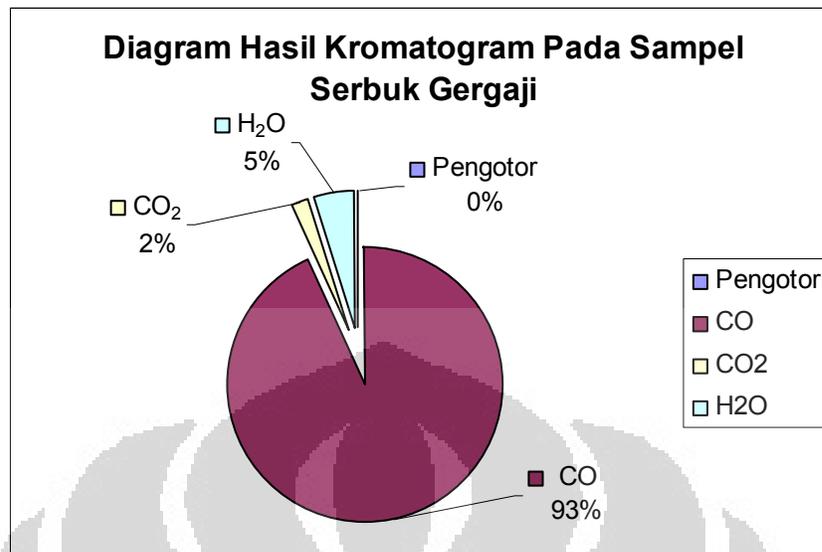
4.2. Analisis Gas Hasil Kromatogram

Kromatogram merupakan sajian data yang diperoleh dari analisis dengan menggunakan GC sehingga komponen-komponen yang berhasil dianalisis oleh GC dapat diketahui. Data yang tersaji pada kromatogram adalah gambar kurva berdasarkan waktu tinggal senyawa yang dianalisis dan penjelasan dari kurva tersebut seperti waktu tinggal, luas area dibawah kurva, dan konsentrasi dari tiap senyawa dari produk gas hasil gasifikasi plasma nontermal yang berhasil diidentifikasi dengan menggunakan GC. Berikut ini merupakan contoh dari data kromatogram yang diperoleh:



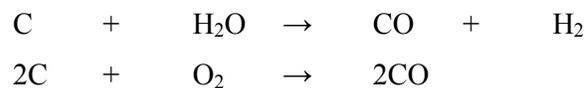
Gambar 4. 4. Salah satu kromatogram yang diperoleh dari proses gasifikasi plasma nontermal yang dilakukan

Berdasarkan data yang diperoleh dari kromatogram pada gambar 4.4. tersebut terlihat bahwa persentase konsentrasi dari tiap senyawa yang dapat dianalisis dari gas produk dari proses gasifikasi plasma yang dilakukan. Persentase data konsentrasi tersebut dapat dibuat menjadi sebuah diagram sehingga akan menghasilkan gambar seperti terlihat pada gambar 4.5. berikut ini



Gambar 4. 5. Hasil Kromatogram Plasmatron 23 W Kondisi Optimum pada Sampel Serbuk Gergaji Menggunakan Elektroda Wolfram

Dari kedua grafik diatas, terlihat bahwa gas produk hasil proses gasifikasi plasma yang dihasilkan adalah CO, CO₂, uap air, dan pengotor. Hal ini terjadi karena sampel yang digunakan merupakan senyawa organik yang mengandung unsur karbon, hidrogen, dan oksigen. Jika dikenai proses gasifikasi dengan plasma, maka ketiga unsur ini akan bersenyawa membentuk gas-gas seperti CO, CO₂ dan H₂O. Gas CO₂ dan H₂O akan terbentuk jika terjadi fenomena pembakaran sempurna. Proses gasifikasi plasma dalam penelitian ini dilakukan dalam keadaan yang kekurangan oksigen sehingga kemungkinan besar akan menghasilkan gas CO yang sangat mematikan. Konsentrasi gas CO yang besar tersebut kemungkinan dihasilkan dari unsur karbon yang terdapat pada sampel yang bereaksi dengan udara, seperti pada reaksi sebagai berikut (Gomez, et. al., 2008).

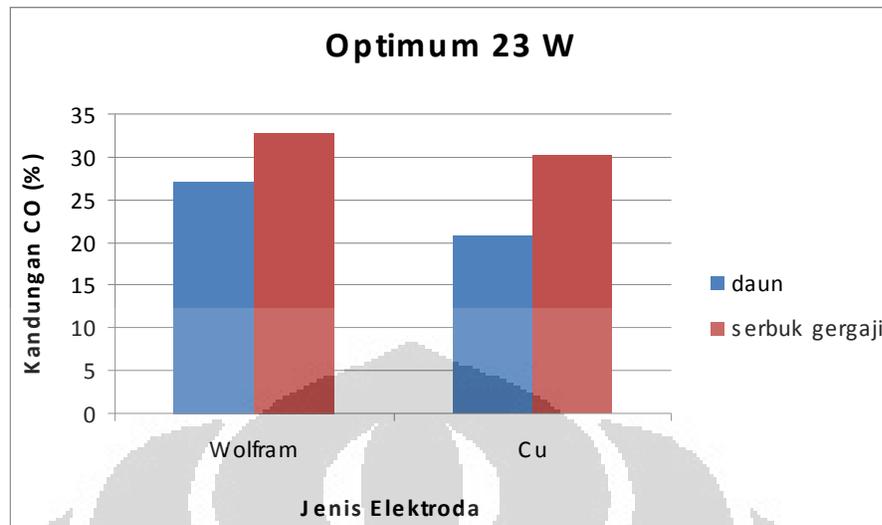


Berdasarkan reaksi tersebut, ada kemungkinan terbentuknya unsur hidrogen, namun jika dilihat berdasarkan gambar 4.4 dan 4.5 tidak ditemukan adanya unsur H_2 . Hal ini kemungkinan terjadi karena hidrogen kemudian membentuk uap air yang lalu bersatu dengan sedikit udara yang masih terdapat dalam reaktor sehingga hasil yang terbaca pada kromatogram adalah uap air bukan hidrogen seperti telah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya.

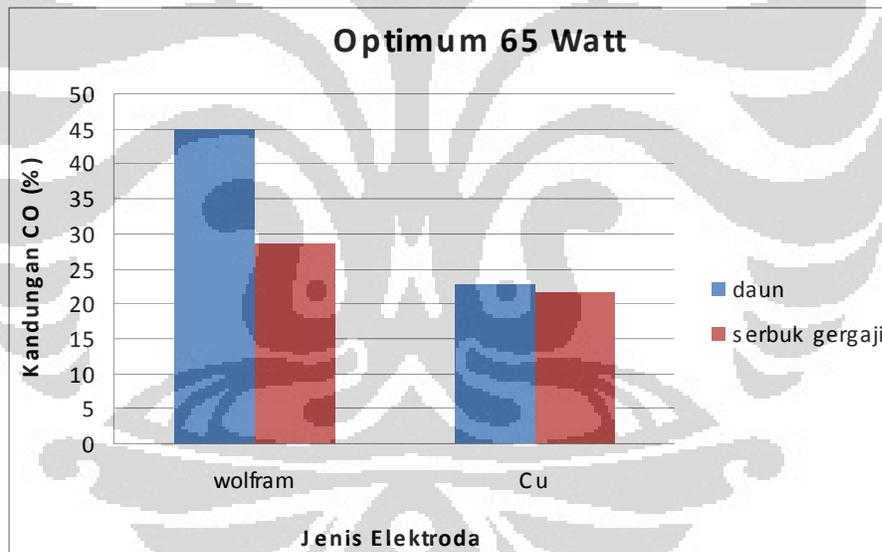
Untuk memastikan kandungan CO yang dihasilkan pada proses gasifikasi ini, digunakanlah detektor CO karena gas CO merupakan gas yang tidak berbau dan tidak berwarna. Penggunaan alat ini berkaitan dengan *retention time* dari udara yang berdekatan dengan *retention time* gas CO sehingga kemungkinan puncak dari udara dan gas CO saling berhimpit. Hasil luas area yang terdapat pada kromatogram tersebutlah yang digunakan untuk menghitung jumlah gas CO yang dihasilkan dengan menggunakan kurva kalibrasi yang telah dibuat sebelumnya. Kurva kalibrasi untuk gas CO dan H_2 dapat dilihat pada lampiran.

4.3. Hasil Penelitian Kondisi Optimum dengan kondisi vakum

Kondisi jarak pelepasan plasma dan jumlah elektroda optimum yang diperoleh dari percobaan sebelumnya digunakan dalam variasi jenis elektroda dan sampel limbah padat. Tujuan dari tahap ini adalah untuk mengetahui pengaruh jenis elektroda dan sampel pada jumlah gas CO yang dihasilkan dari proses gasifikasi ini. Berikut merupakan grafik yang diperoleh dari percobaan dengan menggunakan elektroda batang wolfram dan tembaga dan jenis sampel daun dan serbuk gergaji.



Gambar 4. 6. Hasil Penelitian dengan Plasmatron 23 W dengan Menggunakan Elektroda Wolfram dan Tembaga Untuk Sampel Daun dan Serbuk Gergaji



Gambar 4. 7. Hasil Penelitian dengan Plasmatron 65 W dengan Menggunakan Elektroda Wolfram dan Tembaga Untuk Sampel Daun dan Serbuk Gergaji

Dari kedua grafik tersebut, terutama pada gambar 4.6. terlihat bahwa lampu 23 W lebih efektif digunakan untuk sampel serbuk gergaji dibandingkan dengan daun. Hal ini kemungkinan karena kandungan lignin dan selulosa pada serbuk gergaji yang berasal dari kayu lebih banyak dibandingkan dengan daun.

Serbuk gergaji mengandung sekitar 50% selulosa dibandingkan dengan bagian tumbuhan lainnya (<http://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose>, diakses 20 Juni 2009). Sedangkan lignin merupakan senyawa yang terdapat pada sel, serat, dan *vesse*l pada kayu dan bagian lain dari tumbuhan serta alga. (<http://en.wikipedia.org/wiki/Lignin>, diakses 20 Juni 2009).

Kandungan karbon pada lignin terbanyak kedua setelah pada selulosa sehingga lignin dan selulosa dapat dimanfaatkan untuk sumber energi terbarukan., yaitu sebagai sumber biomassa. (<http://www.ili-lignin.com/aboutlignin.php>, diakses 20 Juni 2009). Kedua komponen ini yang terdapat pada tumbuhan ini dikenal juga dengan lignoselulosa yang dapat dimanfaatkan untuk biomassa. Komponen dari biomassa merupakan campuran dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang banyak ditemukan pada sisa kayu, seperti serbuk gergaji yang digunakan sebagai sampel pada penelitian ini. (<http://en.wikipedia.org/wiki/Lignocellulose>, diakses 20 Juni 2009). Kandungan karbon yang besar inilah yang membuat serbuk gergaji mampu untuk menghasilkan lebih banyak gas CO.

Selain karena kandungan lignin dan selulosa serbuk gergaji lebih besar, ukuran serbuk gergaji yang lebih kecil dibandingkan dengan daun kering juga membuat plasma lebih tersebar lebih dari satu titik sebelum menjadi stabil dan diam pada titik tertentu sehingga proses gasifikasi plasma berjalan lebih merata pada sampel.

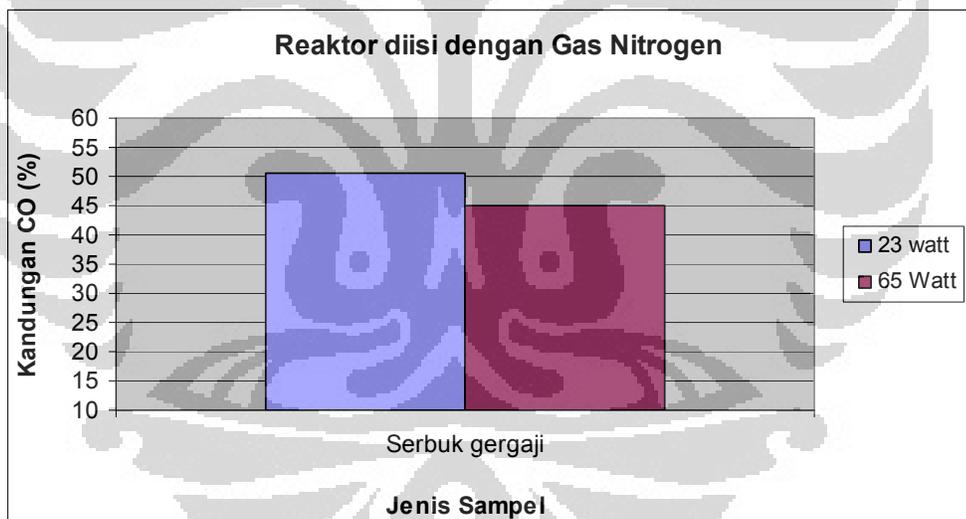
Pada gambar 4.7, gas CO paling banyak dihasilkan adalah pada sampel daun untuk kedua elektroda. Hal ini kemungkinan terjadi karena plasma yang digunakan dalam melakukan proses gasifikasi plasma ini tidak mengenai sampel serbuk gergaji sehingga gas CO yang dihasilkan menjadi lebih sedikit dibandingkan dengan sampel daun yang dikenai oleh plasma.

Grafik yang diperoleh dari penelitian kandungan CO yang dihasilkan pada penelitian dengan menggunakan batang wolfram lebih tinggi dibandingkan dengan tembaga. Dalam penelitian ini, seharusnya hasil yang diperoleh dengan menggunakan tembaga lebih baik bandingkan dengan menggunakan batang wolfram. Hal ini berhubungan dengan sifat-sifat yang dimiliki bahan elektroda yang digunakan, seperti nilai konduktivitas bahan. Nilai konduktivitas dari suatu

logam akan berbanding terbalik dengan nilai resistivitas bahan dari suatu logam. Dari Wikipedia diketahui bahwa nilai resistivitas dari bahan wolfram lebih kecil daripada bahan tembaga. Resistivitas dari wolfram adalah $5,60 \times 10^{-8}$ sedangkan tembaga adalah $1,72 \times 10^{-8}$. Ketidaksesuaian ini kemungkinan disebabkan karena plasma nontermal yang dihasilkan saat menggunakan elektroda batang tembaga tidak menyambar limbah padat dengan baik sehingga gas CO yang dihasilkan tidak sebanyak saat menggunakan batang wolfram. (Wikipedia, resistivity)..

4.4. Hasil Penelitian Kondisi Optimum dengan kondisi reaktor diisi dengan gas N₂

Berikut ini merupakan grafik yang diperoleh pada penelitian dengan kondisi reaktor diisi dengan gas nitrogen untuk jenis plasmatron 23 W dan 65W



Gambar 4. 8. Hasil Penelitian dengan Kondisi Reaktor Diisi dengan Gas N₂ Menggunakan Kedua Jenis Plasmatron Dengan Elektroda Wolfram dan Sampel Serbuk Gergaji

Pada tahap ini, sampel yang digunakan adalah serbuk gergaji dengan elektroda wolfram. Dari gambar 4.8., terlihat bahwa plasmatron 23 W menghasilkan gas CO lebih banyak daripada 65 W walaupun plasma yang dihasilkan oleh plasmatron 65 W lebih besar. Hal ini kemungkinan terkait dengan

proses menyambarnya plasma yang dihasilkan ke sampel. Pada plasmatron 23 W kemungkinan langsung menyambar sampel saat proses dimulai hingga akhir, sedangkan pada 65 W hanya menyambar pada awal proses lalu plasma bergerak ke daerah yang tidak terdapat sampel. Kemungkinan lain yang terjadi adalah karena kondisi reaktor tidak dibuat dalam keadaan vakum sehingga ada kemungkinan gas yang dihasilkan keluar melalui celah-celah kecil dari reaktor atau adanya udara yang masuk dalam reaktor.

Gas nitrogen yang digunakan pada akhir proses gasifikasi tidak dijadikan parameter karena dari hasil analisa dengan GC tidak terlihat adanya gas nitrogen. Hal ini kemungkinan terjadi karena nitrogen merupakan gas inert dan merupakan bagian dari udara sehingga saat pembacaan hasil GC, nitrogen dianggap sebagai bagian dari udara oleh GC yang digunakan.

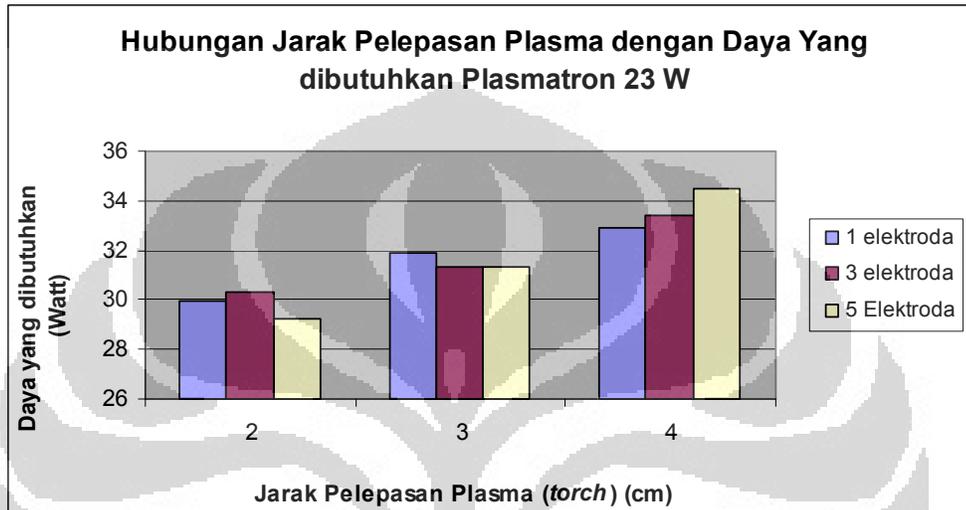
Plasma nontermal yang dihasilkan lebih dinamis dalam menyambar sampel pada kondisi reaktor diisi dengan gas nitrogen dibandingkan saat reaktor vakum. Hal ini kemungkinan terjadi karena jumlah gas dalam reaktor lebih banyak daripada dalam keadaan vakum, sehingga plasma lebih mudah untuk menyambar sampel. Selain itu, gas nitrogen ini juga dapat berfungsi sebagai media yang dapat ikut memanaskan proses gasifikasi.

4.5. Daya yang dibutuhkan dan Tegangan Plasma dalam proses gasifikasi

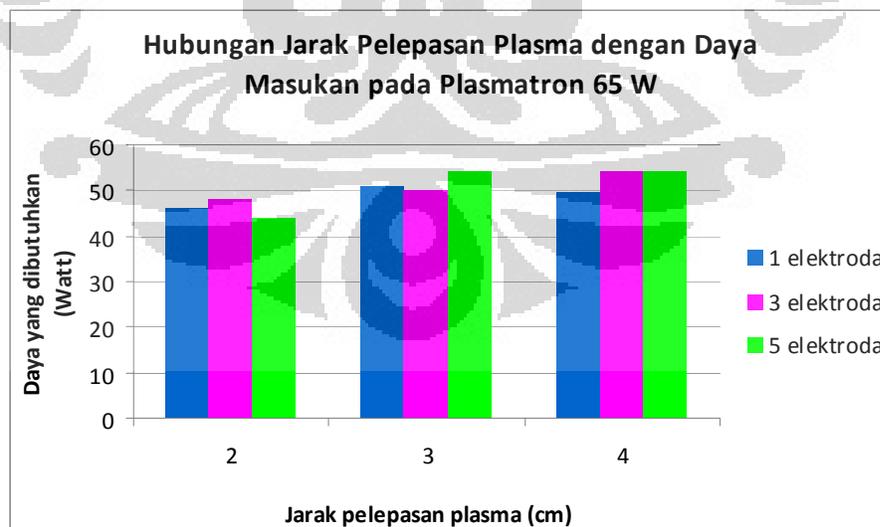
Tujuan dilakukannya tahap ini adalah untuk mengetahui besarnya daya yang dibutuhkan dan besarnya tegangan keluaran dari plasmatron sederhana yang telah dibuat. Plasmatron yang digunakan pada penelitian ini menggunakan tiga jenis kapasitor yang berukuran 47 nF, 330 nF dan 1000nF, namun, besarnya kapasitas dari kapasitor yang digunakan adalah 1000 nF. Pemilihan tersebut dilakukan berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Andy Rivai dalam menentukan kapasitor optimum yang dapat menghasilkan gas CO paling banyak.

4.5.1. Hubungan Antara Jarak Pelepasan Plasma Dingin Dengan Daya Yang Dibutuhkan Pada Kedua Plasmatron

Berikut ini merupakan grafik yang menunjukkan hubungan jarak pelepasan plasma dengan daya yang dibutuhkan plasmatron untuk menghasilkan lampu untuk kedua jenis plasmatron.



Gambar 4. 9. Hasil Penelitian Untuk Hubungan Jarak Pelepasan plasma dengan Daya yang Dibutuhkan Menggunakan Plasmatron 23 W dengan Elektroda Wolfram dan Sampel Daun pada kondisi reaktor vakum



Gambar 4. 10. Hasil Penelitian Untuk Hubungan Jarak Pelepasan plasma dengan Daya yang Dibutuhkan Menggunakan Plasmatron 65 W dengan Elektroda Wolfram dan Sampel Daun pada kondisi reaktor vakum

Dari grafik 4.9 dan 4.10 terlihat bahwa terbentuk kecenderungan yang menunjukkan bahwa makin besar jarak pelepasan plasma makin besar pula daya yang dibutuhkan oleh plasmatron untuk menghasilkan plasma. Hal ini kemungkinan terjadi karena makin besar jarak antara batang wolfram dengan grafit makin besar kuat arus yang dibutuhkan untuk menghasilkan plasma sehingga daya yang dibutuhkan makin besar. Daya yang dibutuhkan oleh suatu plasmatron berkaitan dengan kuat arus yang mengalir dan tegangan yang dibutuhkan oleh plasmatron tersebut. Pada arus searah, daya yang dibutuhkan merupakan perkalian antara kuat arus dan tegangan yang masuk, namun, pada arus bolak balik terdapat faktor pengali (faktor daya). Faktor daya yang digunakan dalam penelitian ini diasumsikan 0,95 yang merupakan faktor pengali yang banyak digunakan dalam rangkaian arus listrik bolak balik.

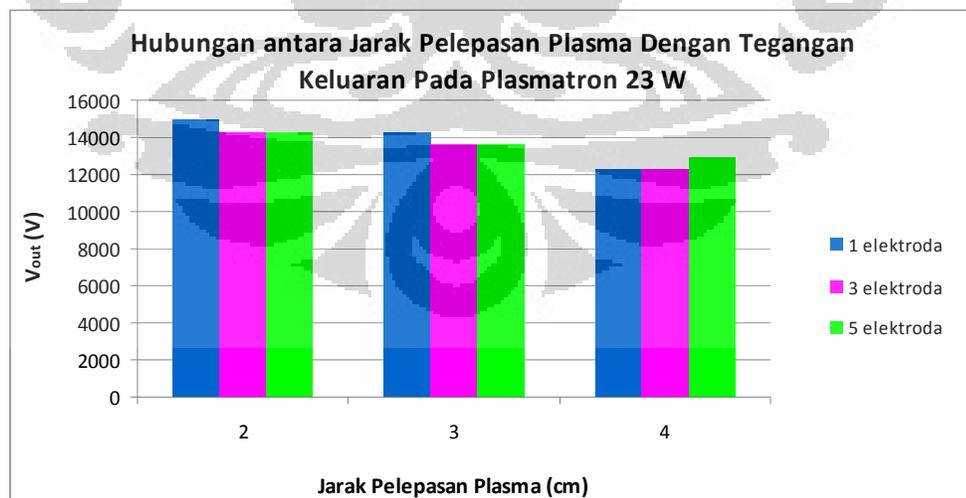
4.5.2. Hubungan Jarak Pelepasan plasma dengan Tegangan Keluaran Plasma

Plasma timbul akibat adanya gas yang terionisasi sebagian dalam perbandingan antara elektron bebas dibandingkan dengan yang terikat pada atom atau molekul. Elektron bebas ini dapat dihasilkan karena adanya beda potensial antara kedua elektroda yang digunakan oleh plasma sehingga plasma yang dihasilkan memiliki tegangan tertentu. Untuk mengukur tegangan dari plasma yang digunakan dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan dua buah kapasitor dan sebuah voltmeter yang disusun seperti terlihat pada gambar berikut

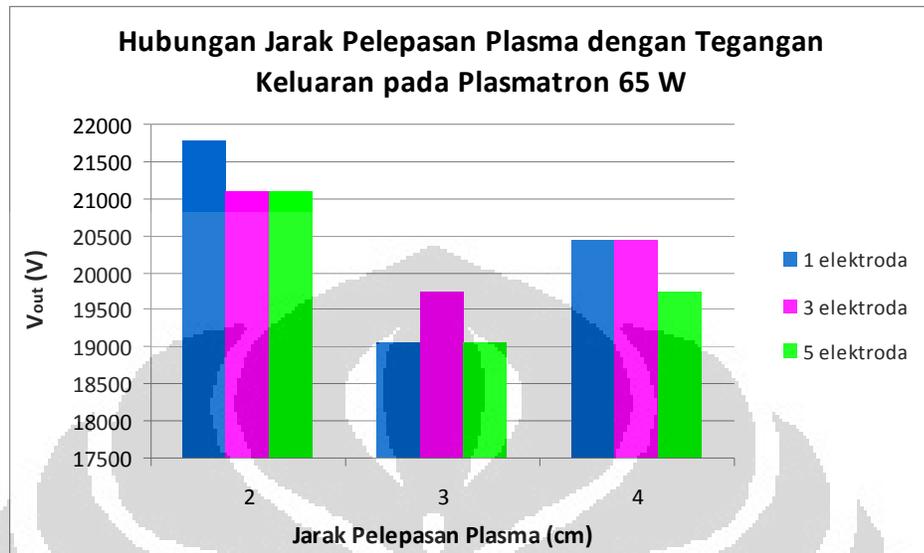


Gambar 4. 11. Susunan peralatan untuk mengukur tegangan plasma

Perhitungan tegangan keluaran plasma dilakukan dengan cara mengalikan tegangan yang terukur pada voltmeter dengan 681 F yang diperoleh dari perhitungan dari nilai kedua buah kapasitor yang digunakan seperti terdapat pada bagian lampiran. Berikut ini merupakan grafik yang menunjukkan hubungan antara jarak pelepasan plasma dengan tegangan plasma yang dihasilkan



Gambar 4. 12. Hasil Penelitian yang Menunjukkan Hubungan Antara Jarak Pelepasan plasma dengan Tegangan Keluaran Pada Plasmatron 23 W dengan Elektroda Wolfram dan Sampel Daun Pada Kondisi Vakum



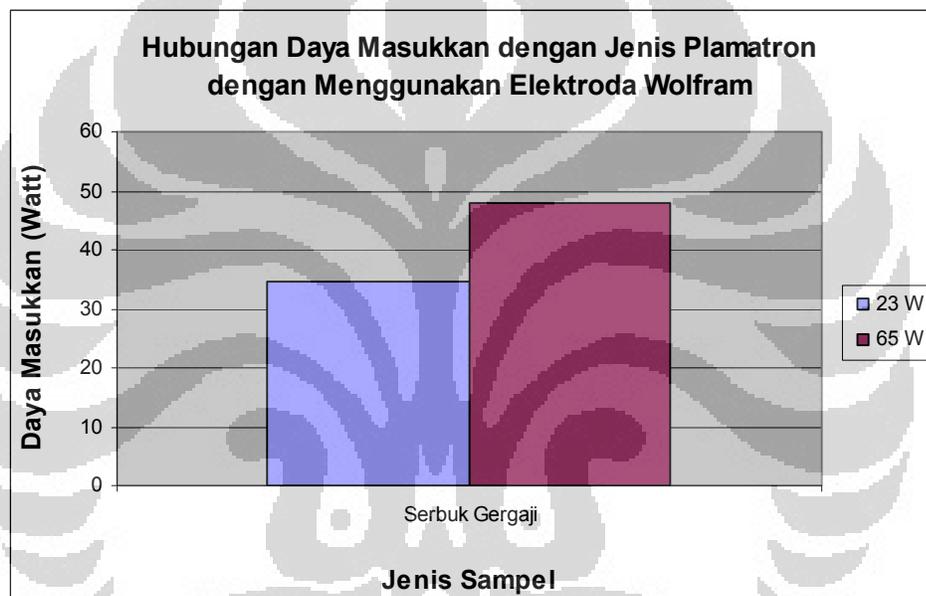
Gambar 4. 13. Hasil Penelitian yang Menunjukkan Hubungan Antara Jarak Pelepasan plasma dengan Tegangan Keluaran Pada Plasmatron 65 W dengan Elektroda Wolfram dan Sampel Daun Pada Kondisi Vakum

Dari kedua grafik 4.12 dan 4.13 tersebut dapat dilihat bahwa tegangan keluaran plasma berkisar antara 12000 – 15000 V dan 19000 – 21000 V, hal ini kemungkinan terjadi karena *flyback* yang digunakan mampu menghasilkan tegangan hingga 20-30 kV dari 120 V pada monitor CRT (Goldwasser, 2006), namun mungkin karena berbeda rangkaian listrik yang digunakan berbeda maka tegangan yang diukur menjadi lebih besar daripada tegangan *flyback* tersebut.

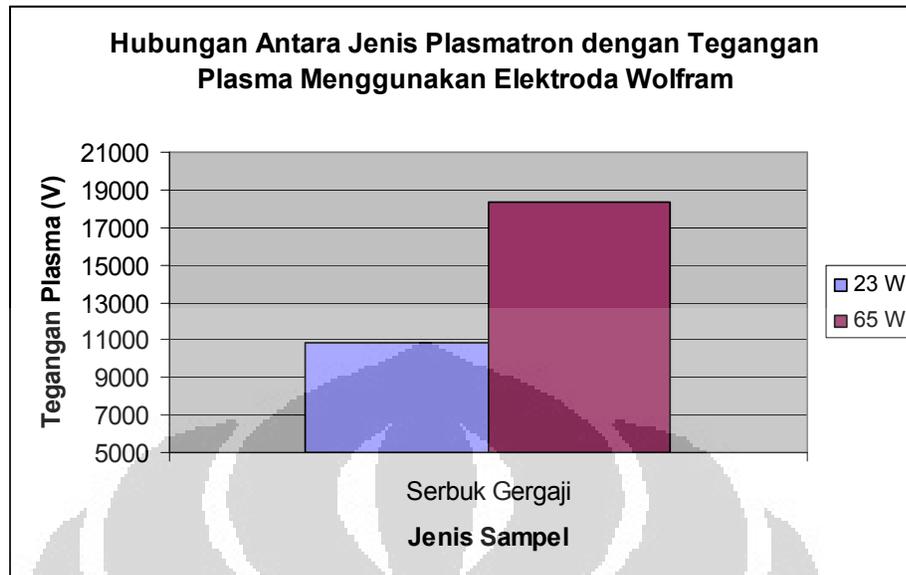
Pelepasan plasma akan mempengaruhi besarnya tegangan plasma yang dihasilkan karena makin besar jarak pelepasan plasma, intensitas plasma yang dihasilkan akan semakin kecil sehingga elektron yang mampu disalurkan dari ujung katoda menuju anoda plasma juga akan makin kecil. Pada plasmatron 65 W, hal tersebut tidak terlihat dengan jelas karena kemungkinan daya yang keluarannya lebih besar daripada plasmatron 65 W. Hubungan tersebut kemungkinan dapat terlihat dengan jelas jika jaraknya diperbesar.

4.5.3. Hubungan Jenis Plasmatron terhadap Daya Masukkan dan Tegangan Plasma

Tujuan dari dilakukannya penelitian tahap ini adalah untuk mengetahui hubungan antara jenis plasmatron dengan daya masukkan dan tegangan plasma yang dihasilkan dengan menggunakan sampel ranting yang paling banyak mengandung komponen biomassa dengan elektroda wolfram. Berikut ini merupakan grafik yang diperoleh yang menunjukkan hubungan antara jenis elektroda.



Gambar 4. 14. Grafik Hasil Penelitian Hubungan Antara Jenis Plasmatron dengan Daya Masukkan Dengan Menggunakan Elektroda Wolfram dan Serbuk Gergaji



Gambar 4. 15. Grafik Hasil Penelitian Hubungan Antara Jenis Plasmatron dengan Tegangan Plasma Dengan Menggunakan Elektroda Wolfram dan Serbuk Gergaji

Berdasarkan gambar 4.14 dan 4.15 tersebut., terlihat bahwa daya yang dibutuhkan dan tegangan yang mampu dihasilkan oleh plasmatron 65 W lebih besar dibandingkan dengan plasmatron 23 W. Perbedaan tegangan plasma nontermal yang dihasilkan dan daya masukan oleh kedua jenis plasmatron kemungkinan berhubungan dengan komponen-komponen listrik yang terdapat pada ballast CFL 220 V 65 W karena rangkaian pada kedua plasmatron tersebut menggunakan jenis *flyback* yang sama. *Flyback* yang digunakan dapat menghasilkan tegangan hingga 20-30 kV seperti telah dibahas sebelumnya dan frekuensi dalam rentang 17 – 50 kHz (http://en.wikipedia.org/wiki/Flyback_transformer, diakses 23 Juni 2009). Frekuensi yang dihasilkan oleh flyback inilah yang juga mempengaruhi proses gasifikasi plasma ini selain tegangan plasma yang dihasilkan. Makin besar frekuensi alat maka kemampuan alat tersebut untuk menyambar sampel akan makin baik.

Kedua grafik diatas juga menunjukkan adanya hubungan antara daya masukan plasmatron, tegangan, dan arus plasma nontermal yang dihasilkan. Hubungan antara ketiganya digambarkan sebagai berikut:

$$P_{in} = V_{in}I_{in}$$

Dengan mengasumsikan daya masuk sama dengan daya keluar, maka persamaan tersebut menjadi:

$$P_{out} = V_{out}I_{out}$$

$$P_{in} = V_{out}I_{out}$$

Besarnya nilai V_{out} merupakan besar dari tegangan plasma nontermal yang dihasilkan. Berdasarkan persamaan diatas, terlihat bahwa makin besar daya masukkan plasmatron maka tegangan keluarannya juga akan makin besar. Selain itu, besarnya daya masukkan akan berbanding terbalik dengan arus keluaran dari plasma nontermal yang dihasilkan. Pada plasmatron 65 Watt daya masukannya besar sehingga tegangan plasma nontermal yang dihasilkan (tegangan keluaran) juga besar, namun arus plasma yang ditimbulkan kecil sehingga tidak berbahaya bagi kesehatan. Listrik tegangan tinggi akan sangat berbahaya jika arus yang ditimbulkan minimal 30 mA dan tegangan listrik minimal 125 V. Jika tegangan dan arus yang ditimbulkan memenuhi kedua persyaratan tersebut maka dapat menyebabkan kematian. Jadi walaupun tegangan plasma nontermal besar, namun proses ini tidak terlalu berbahaya karena kemungkinan arus yang dihasilkan kecil sehingga tidak membahayakan kesehatan manusia.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kondisi optimum dalam penelitian ini adalah kondisi yang menghasilkan jumlah CO paling banyak, yaitu saat jarak pelepasan plasma 3 cm dengan 1 buah jumlah elektroda.
2. Gasifikasi plasma nontermal yang terjadi saat reaktor diisi dengan gas nitrogen lebih dinamis sehingga mampu menghasilkan gas CO lebih banyak dibandingkan dengan kondisi vakum karena dengan adanya gas nitrogen reaktor dan sampel menjadi lebih terpanaskan sehingga proses gasifikasi plasma berjalan lebih mudah.
3. Serbuk gergaji lebih banyak menghasilkan gas CO dibandingkan dengan daun kering karena serbuk gergaji mengandung lebih banyak selulosa dan lignin yang merupakan salah satu sumber karbon.
4. Besarnya daya ballast lampu CFL 220V yang digunakan akan mempengaruhi proses gasifikasi plasma nontermal untuk mengolah limbah padat karena akan besarnya daya yang dibutuhkan dan tegangan yang dihasilkan plasma.

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian tentang gasifikasi plasma nontermal yang selanjutnya adalah:

1. Membuat disain reaktor yang memudahkan agar plasma bertemu dengan limbah padat yang hendak diolah.
2. Membuat disain elektroda sehingga plasma yang dihasilkan dapat lebih mudah menyambar limbah padat, seperti menyerupai pensil.
3. Mengisi gas rektor dengan gas pendukung lain yang dapat membantu menghasilkan gas sintesis yang lebih banyak seperti uap air.
4. Menggunakan satu plasmatron untuk satu elektroda yang digunakan.
5. Menggunakan kolom GC yang sesuai dengan gas yang dianalisa sehingga semua gas yang diperkirakan dihasilkan dari proses gasifikasi plasma ini dapat terdeteksi dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. (2005). *Incinerating Your Garbage*. <http://www.ccthitaw.org/Tutorials/incinerate.cfm#4>. Diakses 18 November 2008.
- Anonim. (30 November 2007). *Olah Sampah Menjadi Kompos*.
<http://64.203.71.11/kompas-cetak/0711/30/Properti/4037813.htm>. Diakses 12 November 2008.
- Anonim. (24 Maret 2008). *Produksi Sampah Jakarta Capai Enam Ribu Ton Per Hari*. <http://www.kapanlagi.com/h/0000219281.html>. Diakses 12 November 2008.
- Anonim. (8 Juni 2008). *Make A High Voltage Supply In 5 Minutes*.
<http://www.instructables.com/id/MAKE-A-HIGH-VOLTAGE-SUPPLY-IN-5-MINUTES/>. Diakses 15 Mei 2009.
- Anonim. (1 Juni 2009). *Copper*. <http://en.wikipedia.org/wiki/copper>. Diakses 4 Juni 2009.
- Anonim. (2 Juni 2009). *Tungsten*. <http://en.wikipedia.org/wiki/tungsten>. Diakses 4 Juni 2009.
- Anonim. (Juni 2009). *Cellulose*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose>. Diakses 20 Juni 2009.
- Anonim. (Juni 2009). *Lignin*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Lignin>. Diakses 20 Juni 2009.
- Anonim. (Juni 2009). *Lignocellulose*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Lignocellulose>. Diakses 20 Juni 2009.
- Anonim. (13 November 2008). *Inceneration*. <http://en.wikipedia.org/Incineration>. Diakses 18 November 2008.
- Anonim. (2008). *Plasma Physics*. http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_physics. Diakses 19 Januari 2009.
- Anonim. (2008). *Compact Fluorescent Lamp (CFL)*.
<http://www.pavouk.org/cfl.html>. Diakses 15 mei 2009.
- Anonim. (2008). *About Lignin*. <http://www.ili-lignin.com/aboutlignin.php>. Diakses 20 Juni 2009.

- Anonim. (2009). *Glossary of Terms [Plasma Colour]*.
<http://www.plasma.de/en/glossary-entry-486.html>. Diakses 8 maret 2009.
- Anonim. (22 Mei 2009). *Flyback transformer*.
http://en.wikipedia.org/wiki/Flyback_transformer. Diakses 23 Juni 2009.
- Anonim. (n.d). *Plasma Gasification*.
http://www.recoveredenergy.com/d_plasma.htm, diakses 8 Juni 2009
- Barros, Sam. (3 Maret 2008). *Power Labs Plasma Globes Page*.
<http://www.powerlabs.org/plasmaglobe.htm>. Diakses 8 Maret 2009.
- Blue Ridge Environmental Defense League Report (1 April 2002). *Waste Gasification Impacts on The Environment and Public Health*.
<http://www.bredl.org/pdf/wastegasification.pdf>. Diakses 6 November 2008.
- Coalition For Plasma Science. (2004). *Cleaning The Environment*.
http://www.plasmacoalition.org/plasma_writeups/environment.pdf. Diakses 4 Mei 2009.
- Friends of The Earth. (September 2008). *Briefing: Pyrolysis, Gasifications, and Plasma*. http://www.foe.co.uk/resource/briefings/gasification_pyrolysis.
 Diakses 1 Mei 2008.
- GAIA. (2004). *Incenerator Myths*. Institute of Local Self-Reliance: Washington D.C. www.ilsr.org/recycling/incenerator_myths. Diakses 18 November 2008.
- Gomez, E., et al., (2008). Thermal Plasma Technology For The Treatment Of Wastes: A Critical Review. *Journal of Hazardous Materials*, xxx, xxx-xxx.
- Goldwasser, Samuel M. (19 November 2006). *Testing of Flyback (LOPT) Transformer*. <http://www.repairfaq.org/sam/flytest.htm>. Diakses 4 Juni 2009.
- Herminindian, Nurina Aini. (29 Agustus 2007). *Pemilihan dan Strategi Penerapan Teknologi Pengolahan Sampah Terpadu, Studi Kasus di DKI Jakarta*.
http://www.dml.or.id/dml5/sampah/pemilihan_dan_strategi_penerapan_teknologi_pengolahan_sampah_terpadu_studi_kasus_di_dki_jakarta.dml.
 Diakses 12 November 2008.

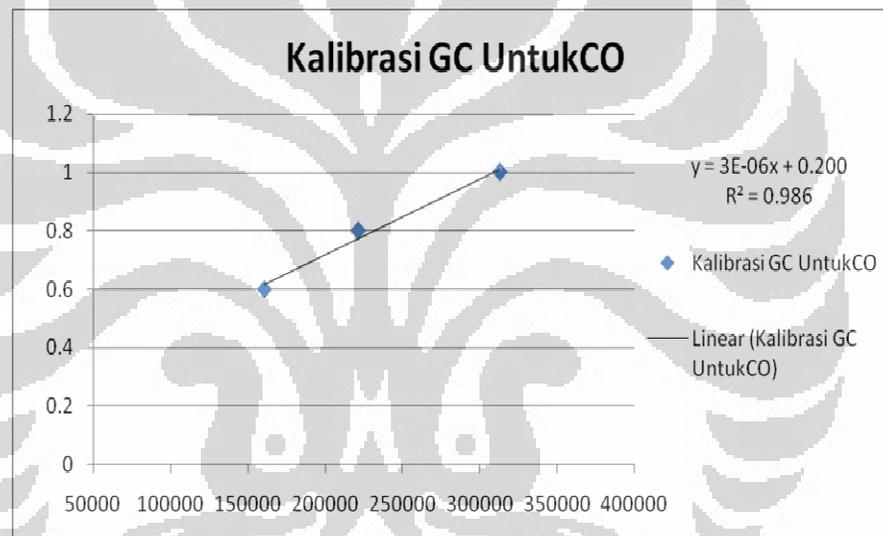
- Huang, H., dan L. Tang. (2007). Treatment Of Organic Waste Using Thermal Plasma Pyrolysis Technology. *Energy Conversion and Management*, 48, 1331-1337.
- Hutagalung, Michael. (30 Desember 2007). *Teknologi Pengolahan Sampah*. <http://majarimagazine.com/2007/12/teknologi-pengolahan-sampah/>. Diakses 12 November 2008.
- Kowalska, E., et. al., (2008). Non-Thermal Plasma For Oxidation Of Gaseous Products Originating From Thermal Treatment Of Waste. *Vacuum*, 82, 1069-1074.
- Maramis, Alfonds Andrew. (28 Maret 2008). *Pengelolaan Sampah dan Turunannya di TPA*. <http://opini-manadopost.blogspot.com/2008/03/pengelolaan-sampah-dan-turunannya-di.html>. Diakses 12 November 2008.
- Miller, Greg. (20 Februari 2005). *A Transistor Driven Flyback Transformer Page*. <http://www.angelfire.com/80s/sixmhz/flyback.html>. Diakses 4 Juni 2009.
- Moustakas, et al., (2005). Demonstration Plasma Gasification-Vitrification System For Effective Hazardous Waste Treatment. *Journal of Hazardous Materials*, B 123, 120-126.
- Notoatmodjo, Soekidjo. (2003). *Prinsip-Prinsip Dasar Ilmu Kesehatan Masyarakat (Edisi Ke-2)*. Jakarta: Rineka Cipta. <http://www.geocities.com/klinikikm/kesehatan-lingkungan/pengelolaan-sampah.htm>. Diakses tanggal 12 November 2008.
- Petrucci, Ralph H. dan Suminar Achmadi (Editor Penerjemah). (1987). *Kimia Dasar Prinsip dan Terapan Modern Jilid 2 (Edisi Keempat)*. Jakarta: Erlangga.
- R. W. Beck., Inc. (23 Januari 2003). City Of Honolulu Review Of Plasma Arc Gasification And Vitrification Technology For Waste Disposal: Final Report. http://www.opala.org/pdfs/solid_waste/arc/PlasmaArc.pdf. Diakses 19 Januari 2009.
- Tim e-dukasi.net. (2007). *Definisi Integrated High Voltage Transformator*. http://www.e-dukasi.net/mapok/mp_files/mp_398/IHVtrafo.html. Diakses 4 Juni 2009.

Lampiran 1. Hasil Kalibrasi CO dan H₂

– Kalibrasi Gas CO

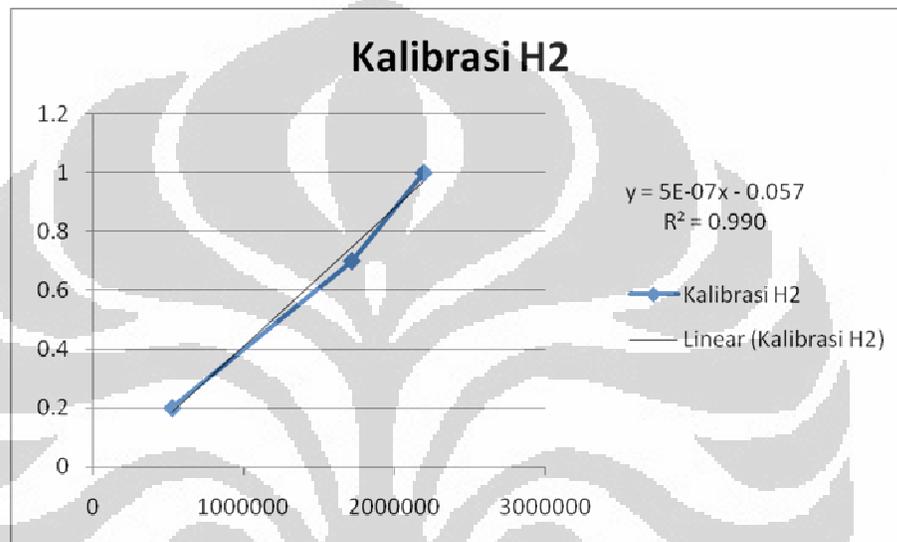
Volume (ml)	Luas area			
	1	2	3	rata-rata
1	272084	272334	393513	312643,6667
0,8	246303	204981	211823	221035,6667
0,6	157656	159612	163795	160354,3333

Kurva kalibrasi yang diperoleh



– Kalibrasi Gas H₂

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



Persamaan garis yang digunakan untuk menghitung kadar syngas (CO dan H₂) yang dihasilkan dari proses gasifikasi plasma, yaitu:

- Untuk menghitung kadar gas CO:

$$\text{kandungan CO} = 3 \times 10^{-6} \times \text{luas area CO} + 0,2$$

- Untuk menghitung kadar gas H₂:

$$\text{kandungan H}_2 = 5 \times 10^{-7} \times \text{luas area H}_2 - 0,057$$

Lampiran 2. Perhitungan Daya Yang Dibutuhkan Dan Tegangan Plasma

A. Rumus yang digunakan dalam perhitungan daya yang dibutuhkan plasmatron

Daya lampu yang dibutuhkan untuk menghasilkan plasma dihitung dengan menggunakan rumusan:

$$P_{in} = V_{in} \times I_{in}$$

Karena listrik yang digunakan adalah listrik arus bolak balik maka nilai P_{in} harus dikalikan dengan faktor daya 0,95 sehingga persamaan di atas menjadi:

$$P_{in} = 0,95 \times V_{in} \times I_{in}$$

Dimana:

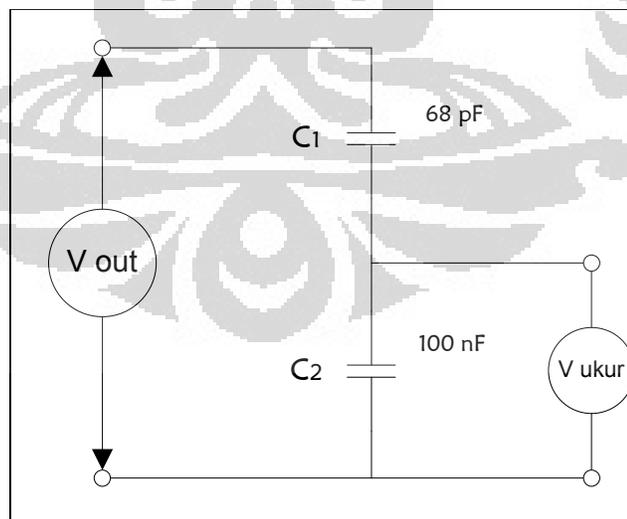
P_{in} = daya yang dibutuhkan (W)

V_{in} = tegangan masukan (V)

I_{in} = kuat arus masukan (A)

B. Perhitungan Tegangan Yang dihasilkan Plasma

Skema untuk pengukuran tegangan yang dihasilkan oleh plasma nontermal yang digunakan adalah



Untuk mendapatkan tegangan plasma, tegangan yang diperoleh dari voltmeter (V_{ukur}) kemudian dimasukkan kedalam persamaan sebagai berikut

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

Dimana:

V_{plasma} = tegangan plasma nontermal (V)

C_1 = besar kapasitas dari kapasitor 1 yaitu 100 pF

C_2 = besar kapasitas dari kapasitor 2 yaitu 68 nF

V_{ukur} = tegangan dari voltmeter (V)

Jika disederhanakan, persamaan di atas menjadi:

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

Berikut merupakan hasil perhitungan daya yang dibutuhkan dan tegangan yang dihasilkan oleh proses gasifikasi plasma nontermal

I. Plasmatron 23 W

1 elektroda

Jarak (cm)	I (mA)	V_{in} (V)	P_{in} (Watt)	$P_{in} \times 0,95$ (Watt)	m_{out} (gr)	CO (%)	V_{ukur} (V)	V_{Plasma} (V)
2	150	210	31.5	29.925	0.16	21.4171	22	14982
3	160	210	33.6	31.92	0.31	27.1615	21	14301
4	165	210	34.65	32.9175	0.29	14.8792	18	12258

3 elektroda

Jarak (cm)	I (mA)	V_{in} (V)	P_{in} (Watt)	$P_{in} \times 0,95$ (Watt)	m_{out} (gr)	CO (%)	V_{ukur} (V)	V_{Plasma} (V)
2	145	220	31.9	30.305	0.28	13.1746	21	14301
3	150	220	33	31.35	0.28	18.7669	20	13620
4	160	220	35.2	33.44	0.28	16.8388	18	12258

5 elektroda

Jarak (cm)	I (mA)	V _{in} (V)	P _{in} (Watt)	P _{in} ×0,95 (Watt)	m _{out} (gr)	CO (%)	V _{ukur} (V)	V _{Plasma} (V)
2	140	220	30.8	29.26	0.32	12.4504	21	14301
3	150	220	33	31.35	0.3	15.3127	20	13620
4	165	220	36.3	34.485	0.33	11.7451	19	12939

II. Plasmatron 65 W

1 elektroda

Jarak (cm)	I (mA)	V _{in} (V)	P _{in} (Watt)	P _{in} ×0,95 (Watt)	m _{out} (gr)	CO (%)	V _{ukur} (V)	V _{Plasma} (V)
2	230	210	48.3	45.885	0.28	32.5525	32	21792
3	255	210	53.55	50.8725	0.3	45.0001	28	19068
4	250	210	52.5	49.875	0.28	31.1878	30	20430

3 elektroda

Jarak (cm)	I (mA)	V _{in} (V)	P _{in} (Watt)	P _{in} ×0,95 (Watt)	m _{out} (gr)	CO (%)	V _{ukur} (V)	V _{Plasma} (V)
2	230	220	50.6	48.07	0.26	24.3187	31	21111
3	240	220	52.8	50.16	0.28	21.7315	29	19749
4	260	220	57.2	54.34	0.31	40.0558	30	20430

5 elektroda

Jarak (cm)	I (mA)	V _{in} (V)	P _{in} (Watt)	P _{in} ×0,95 (Watt)	m _{out} (gr)	CO (%)	V _{ukur} (V)	V _{Plasma} (V)
2	220	210	46.2	43.89	0.32	34.75	31	21111
3	260	220	57.2	54.34	0.28	46.5868	28	19068
4	260	220	57.2	54.34	0.3	38.3473	29	19749

Kondisi optimum untuk plasmatron 23 W dengan 65 W dengan sampel serbuk gergaji dengan menggunakan elektroda batang wolfram dan batang tembaga:

– Plasmatron 23 W

Elektroda batang wolfram

I (mA)	V _{in} (V)	P _{in} (Watt)	P _{in} ×0,95 (Watt)	m _{out} (gr)	CO (%)	V _{ukur} (V)	V _{Plasma} (V)
170	215	36.55	34.7225	0.29	32.755	16	10896

Elektroda batang tembaga

I (mA)	V _{in} (V)	P _{in} (Watt)	P _{in} ×0,95 (Watt)	m _{out} (gr)	CO (%)	V _{ukur} (V)	V _{Plasma} (V)
160	210	33.6	31.92	0.3	30.112	16	10896

– Plasmatron 65 W

Elektroda batang wolfram

I (mA)	V _{in} (V)	P _{in} (Watt)	P _{in} ×0,95 (Watt)	m _{out} (gr)	CO (%)	V _{ukur} (V)	V _{Plasma} (V)
240	210	50.4	47.88	0.3	28.573	27	18387

Elektroda batang tembaga

I (mA)	V _{in} (V)	P _{in} (Watt)	P _{in} ×0,95 (Watt)	m _{out} (gr)	CO (%)	V _{ukur} (V)	V _{Plasma} (V)
230	210	48.3	45.885	0.31	21.6097	27	18387

Lampiran 3. Hasil Analisis GC Pada Gasifikasi Plasma Nontermal

A. Kondisi Reaktor Vakum

Dalam perhitungan kandungan CO untuk kondisi reaktor vakum, luas area yang diperoleh dari hasil kromatogram dikurangi dengan luas area rata-rata dari udara vakum yang diperoleh sebelumnya., yaitu 313823,33

Hasil data yang diperoleh dari proses gasifikasi plasma pada sampel daun dengan elektroda Wolfram dapat dilihat pada tabel dibawah ini

I. Plasmatron Jenis 23 Watt

a. 1 elektroda

Jarak (cm)	Luas Area	Luas Area-vakum	Jumlah CO
2	318347	4523.666667	0.214171
3	337495	23671.666667	0.271615
4	296554	-17269.333333	0.148792

b. 3 elektroda

Jarak (cm)	Luas Area	luas area-vakum	Jumlah CO
2	290872	-22951.333333	0.131746
3	309513	-4310.333333	0.187669
4	303086	-10737.333333	0.168388

c. 5 elektroda

Jarak (cm)	Luas Area	luas area-vakum	Jumlah CO
2	288458	-25365.333333	0.124504
3	297999	-15824.333333	0.153127
4	286107	-27716.333333	0.117451

II. Plasmatron Jenis 65 Watt

a. 1 elektroda

Jarak (cm)	Luas Area	Luas area-vakum	Jumlah CO
2	355465	41641.666667	0.325525
3	396957	83133.666667	0.450001
4	350916	37092.666667	0.311878

b. 3 elektroda

Jarak (cm)	Luas Area	Luas Area-vakum	Jumlah CO
2	328019	14195.666667	0.243187
3	319395	5571.666667	0.217315
4	380476	66652.666667	0.400558

c. 5 elektroda

Jarak (cm)	Luas Area	luas area-vakum	Jumlah CO
2	362790	48966.66667	0.3475
3	402246	88422.66667	0.465868
4	374781	60957.66667	0.383473

Untuk kondisi optimum dengan kondisi operasi:

- Jarak pelepasan plasma = 3 cm
- Jumlah elektroda = 1 buah

I. Plasmatron 23 Watt

a. Elektroda: Batang Wolfram

Sampel: daun

Area	Area-Vakum	CO
337495	23671.66667	0.271615

Sampel: serbuk gergaji

Area	Area-Vakum	CO
356140	42316.66667	0.32755

b. Elektroda: Batang Tembaga

Sampel: daun

Area	Area-Vakum	CO
315949	2125.666667	0.206977

Sampel: serbuk gergaji

Area	Area-Vakum	CO
347330	33506.66667	0.30112

II. Plasmatron 65 Watt

a. Elektroda: Batang Wolfram

Sampel: daun

Area	Area-Vakum	CO
396957	83133.66667	0.450001

Sampel: serbuk gergaji

Area	Area-Vakum	CO
342200	28376.66667	0.28573

b. Elektroda: Batang Tembaga

Sampel: daun

Area	Area-Vakum	CO
323030	9206.66667	0.22822

Sampel: serbuk gergaji

Area	Area-Vakum	CO
318989	5165.66667	0.216097

B. Reaktor diisi dengan Gas Nitrogen

Dalam perhitungan kandungan CO untuk reaktor yang diisi dengan gas nitrogen, luas area yang diperoleh dari hasil kromatogram dikurangi dengan luas area dari udara yang diperoleh sebelumnya, yaitu 230174

Elektroda: Batang Wolfram

Sampel: serbuk gergaji

a. Plasmatron 23 W

Area	area-udara	CO
331832	101658	0.505574

b. Plasmatron 65 W

Area	area-udara	CO
313323	83149	0.450047

C. Gambar Kromatogram yang diperoleh

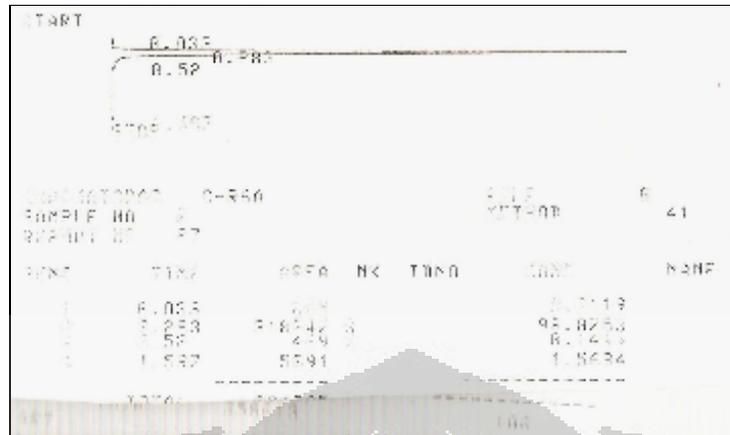
Reaktor dalam kondisi vakum

Elektroda Wolfram, sampel daun

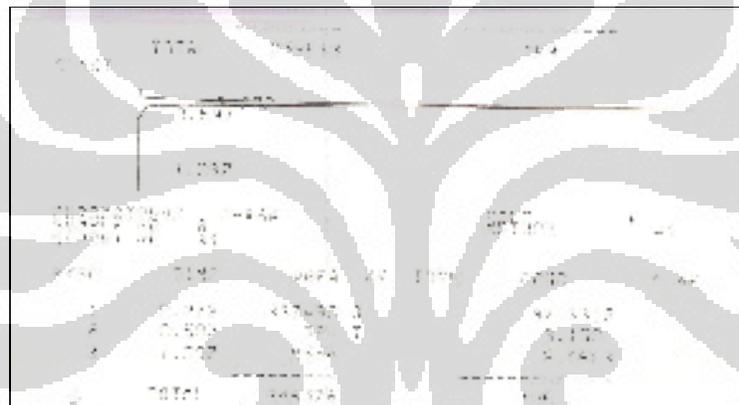
I. Plasmatron 23 W

a. 1 elektroda

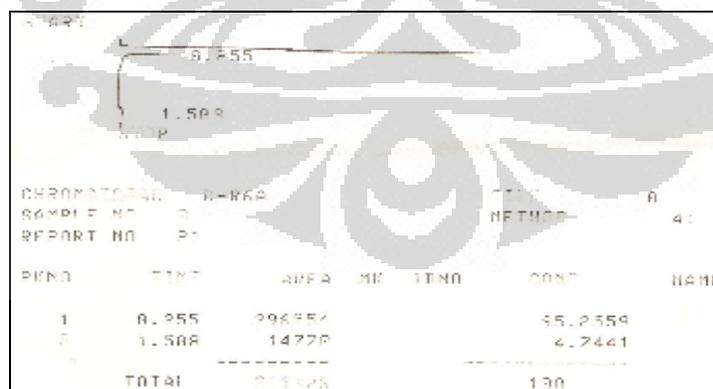
2 cm



3 cm



4cm



b. 3 elektroda

2 cm

- c. 5 elektroda
2 cm



3 cm

PERNYAIAN
KARTU

PERNYAIAN
KARTU NO 1
KARTU NO 1

NO	UANG	NO	NO	NO	NO
1	1.000	1000	1000	1000	1000
2	2.000	2000	2000	2000	2000
3	3.000	3000	3000	3000	3000
4	4.000	4000	4000	4000	4000
TOTAL		10000	10000	10000	10000

4 cm

PERNYAIAN
KARTU

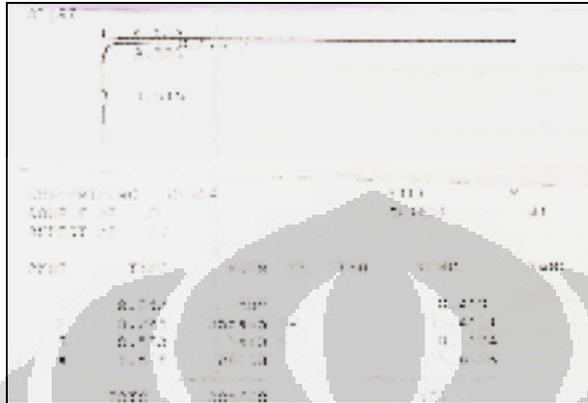
PERNYAIAN
KARTU NO 2
KARTU NO 2

NO	UANG	NO	NO	NO	NO
1	1.000	1000	1000	1000	1000
2	2.000	2000	2000	2000	2000
3	3.000	3000	3000	3000	3000
4	4.000	4000	4000	4000	4000
TOTAL		10000	10000	10000	10000

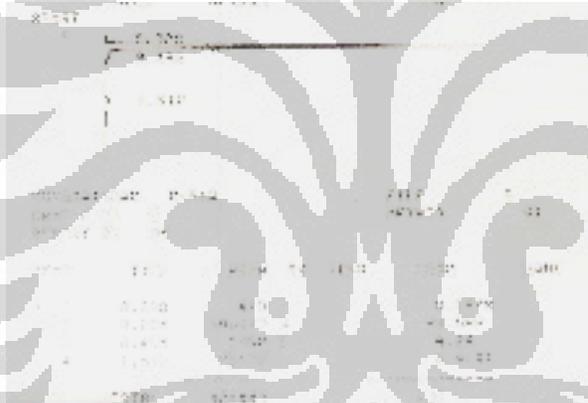
II. Plasmatron 65 W

a. 1 elektroda

2 cm



3 cm

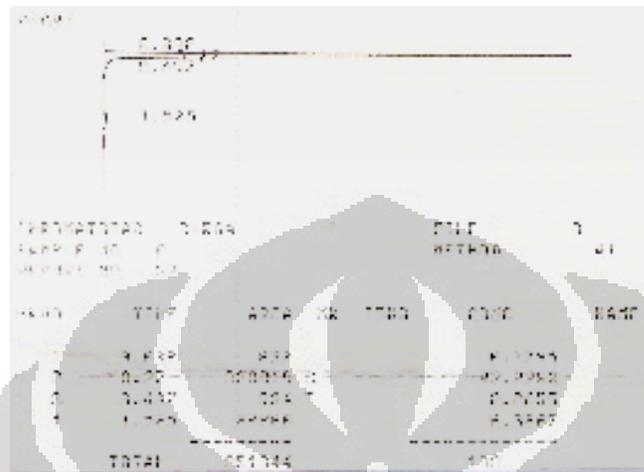


4 cm

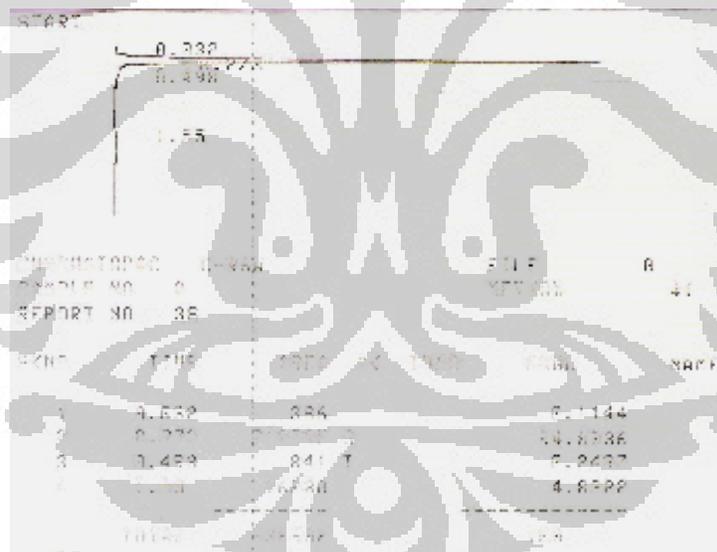


b. 3 elektroda

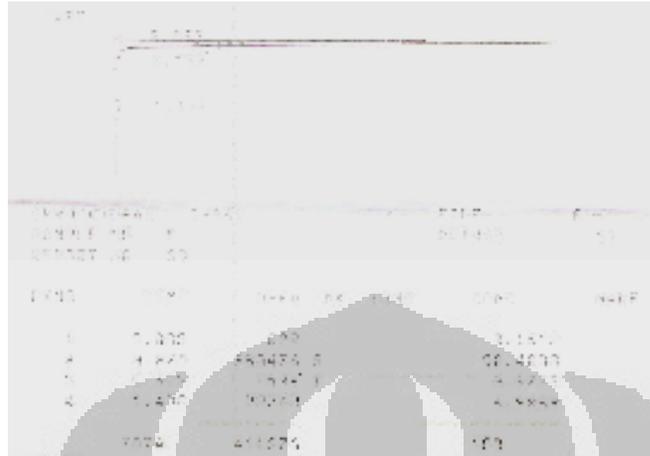
2cm



3 cm

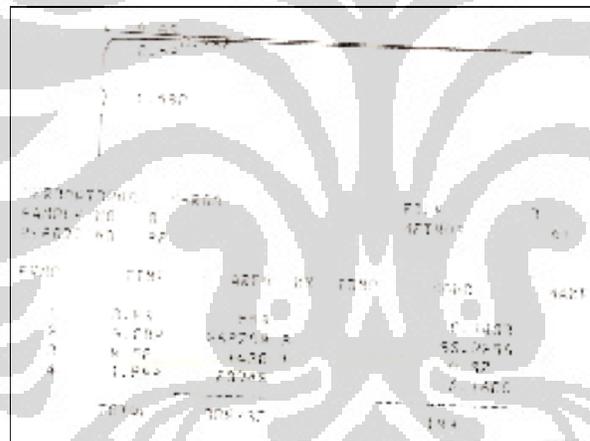


4 cm



c. 5 elektroda

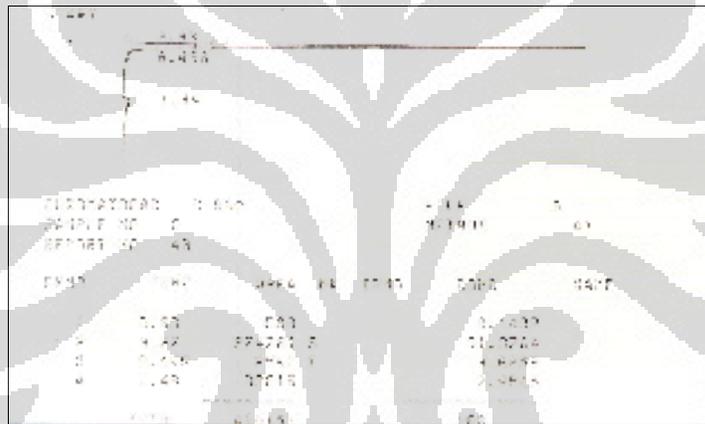
2 cm



3 cm



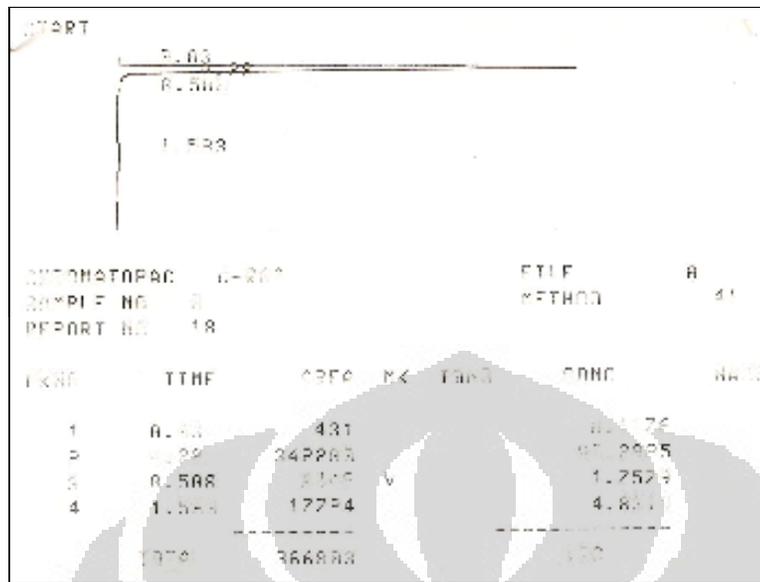
4 cm



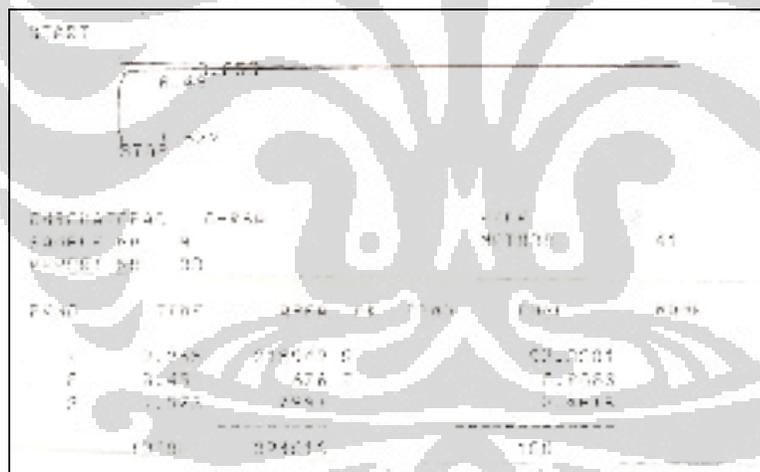
Kondisi Optimum Sampel: Serbuk Gergaji

23 W

Elektroda Wolfram

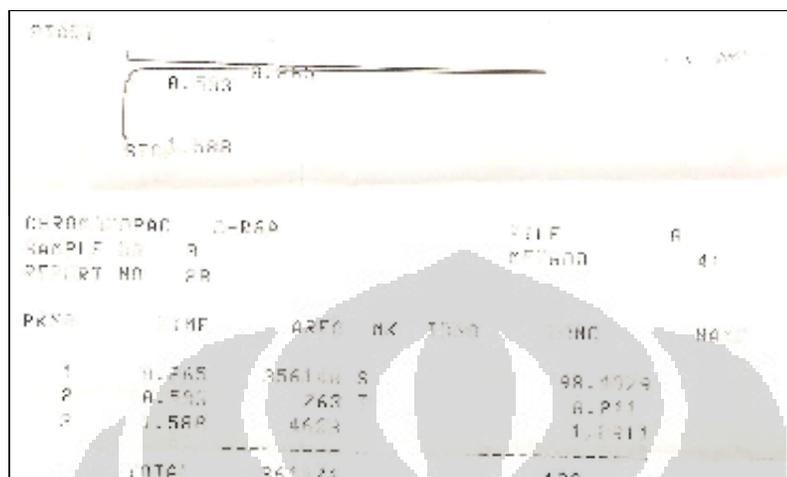


Elektroda Tembaga

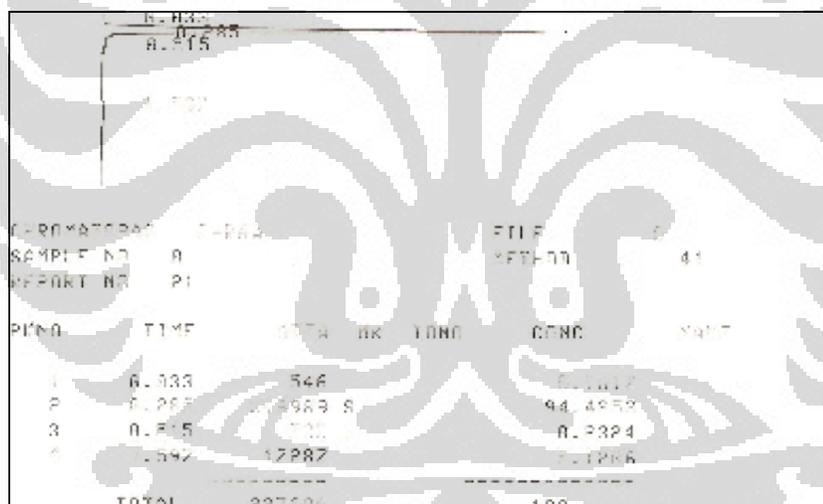


65 W

Elektroda Wolfram

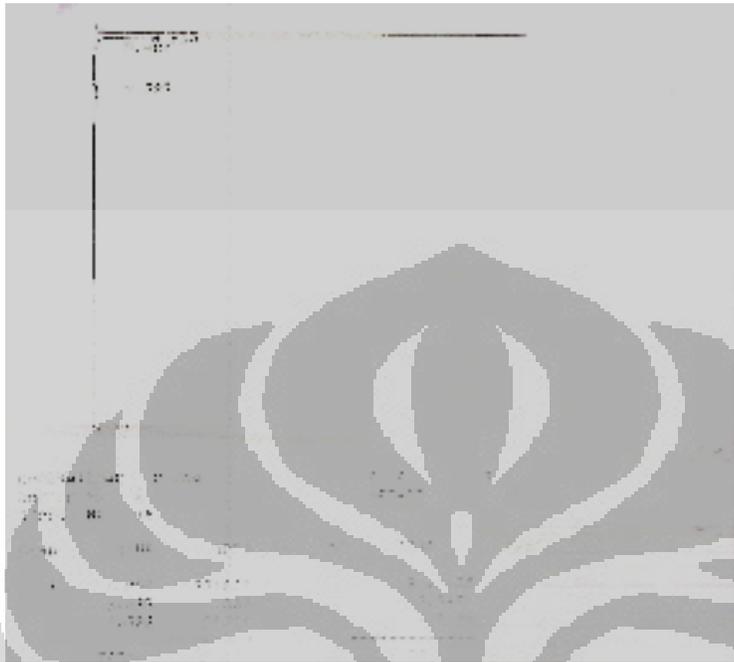


Elektroda Tembaga



Reaktor diisi dengan gas nitrogen, elektroda Wolfram.

23 W



65 watt

PKNO	TIME	AREA	MG	COND	COND	NAME
1	0.937	1010			0.2749	
2	0.972	317000			84.5718	
3	0.512	9600	M		2.6816	
4	1.582	46500			12.5517	
TOTAL		870480			100	