



UNIVERSITAS INDONESIA

**UJI KINERJA REAKTOR PLASMA NON-TERMAL UNTUK
BIOMASSA DAN PADATAN PLASTIK**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**MASTA DEVITA
0405060431**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 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 : Masta Devita

NPM : 0405060431

Tanda Tangan



Tanggal : 26 Juni 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Masta Devita
NPM : 04050431
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Uji Kinerja Reaktor Plasma Non-Termal untuk Biomassa dan Padatan Plastik

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 I: Ir. Sutrasno K., MSc., PhD.

Pembimbing II: Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA.

Penguji : Dr. Ir. Nelson Saksono, MT.

Penguji : Ir. Yuliusman, MSc.

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 7 Juli 2009

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Ir. Sutrasno K., MSc., PhD. dan Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- (3) sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 26 Juni 2009

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Masta Devita

NPM : 0405060431

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

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

Uji Kinerja Reaktor Plasma Non-Termal untuk Biomassa dan Padatan Plastik

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 26 Juni 2009

Yang menyatakan



(Masta Devita)

v

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	i
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 RUMUSAN MASALAH	3
1.3 TUJUAN RANCANGAN	3
1.4 BATASAN MASALAH	4
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 SAMPAH DAN PENGELOLAANNYA SECARA UMUM	6
2.1.1 Definisi Sampah	6
2.1.2 Jenis-jenis Sampah	7
2.1.3 Pengelolaan Sampah	8
2.2 KANDUNGAN BERBAGAI SAMPAH PADAT ORGANIK	9
2.2.1 Karbohidrat	12
2.2.2 Ligno-selulosa	16
2.2.3 Poliester	17
2.2.4 Polipropilena	18
2.3 PLASMA SECARA UMUM	18
2.3.1 Sifat-sifat Plasma	19
2.3.2 Contoh Plasma Industri atau Komersial	23
2.4 TEKNOLOGI PLASMA SECARA UMUM DAN APLIKASINYA	25
2.4.1 Teknologi Plasma Sebagai <i>Cleaning Technology</i>	25
2.4.2 Aplikasi Plasma Untuk Mengatasi Gas Buangan	26
2.5 TEKNOLOGI PLASMA NON-TERMAL DAN APLIKASINYA	27
2.6 PROSES GASIFIKASI PLASMA	28
2.6.1 Metode Gasifikasi Plasma	29
2.6.2 Prinsip Kerja Gasifikasi Plasma	31
2.6.3 Keuntungan Gasifikasi Plasma	32
BAB 3 METODE PENELITIAN	33
3.1 PERSIAPAN ALAT DAN BAHAN	34
3.1.1 Reaktor Plasma Non-Termal	35
3.1.2 Plasmatron Yang Berbasis <i>Ballast</i> Lampu CFL 220V/23W	36

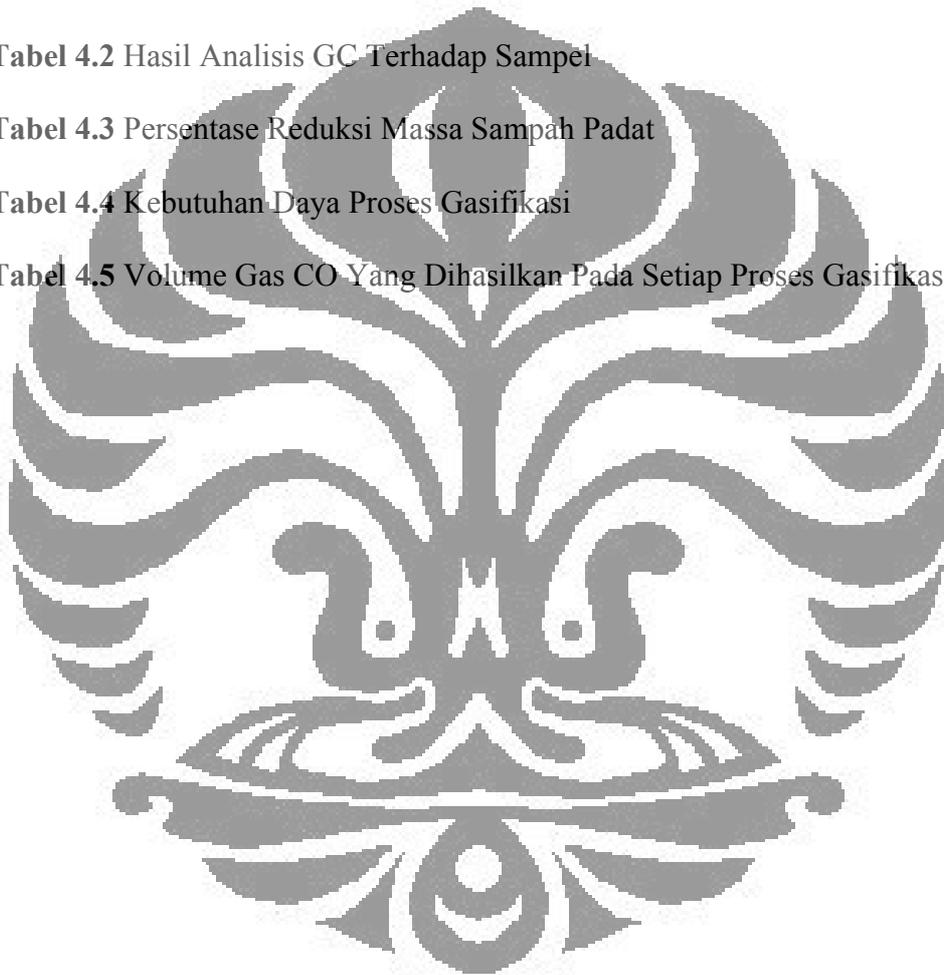
3.1.3	Elektrode Tegangan Tinggi	37
3.1.4	Elektrode Massa (<i>Ground</i>)	37
3.2	PERSIAPAN SAMPAH PADAT	38
3.3	PROSES GASIFIKASI PLASMA	39
3.3.1	Alat dan Bahan	39
3.3.2	Prosedur Penelitian	40
3.4	ANALISIS GAS PRODUK	41
3.5	PENGOLAHAN DATA	44
3.5.1	Kinerja Pembentukan Gas Sintesis	44
3.5.2	Persentase Reduksi Sampah Padat	45
3.5.3	Kebutuhan Daya	45
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		46
4.1	DATA YANG DICATAT SAAT PROSES GASIFIKASI	46
4.2	DATA ANALISIS KROMATOGRAFI GAS	47
4.3	PENGOLAHAN DATA	50
4.3.1	Persentase Reduksi Massa Sampah Padat	50
4.3.2	Kebutuhan Daya Proses Gasifikasi	52
4.3.3	Pengolahan Data Analisis GC	55
BAB 5 KESIMPULAN		60
DAFTAR REFERENSI		xii
LAMPIRAN		xiv

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Selembar Kertas	11
Gambar 2.2 Fruktosa, Salah Satu Jenis Monosakarida	13
Gambar 2.3 Gambaran Proyeksi Haworth Struktur Glukosa	13
Gambar 2.4 Bentuk Rantai D-Glukosa	14
Gambar 2.5 Struktur Kimia (a) Laktosa, (b) Sukrosa, (c) Maltosa	14
Gambar 2.6 Struktur Amilosa	15
Gambar 2.7 Struktur Kimia Amilopektin	16
Gambar 2.8 Polipropilena	18
Gambar 2.9 Petir Merupakan Salah Satu Fenomena Plasma Bumi	20
Gambar 2.10 Tingkatan Plasma Berdasarkan Densitas Elektron & Temperatur	21
Gambar 2.11 Teknologi Plasma Sebagai <i>Cleaning Technology</i>	26
Gambar 2.12 Sistem Kerja Reaktor CRS	26
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	34
Gambar 3.2 Rangkaian Peralatan Yang Digunakan Pada Penelitian	35
Gambar 3.3 Plasmatron Yang Berbasis <i>Ballast</i> lampu CFL 220V/23W	36
Gambar 3.4 <i>Tungsten Rod</i> Sebagai Elektrode Tegangan Tinggi	37
Gambar 3.5. <i>Ground</i> Yang Berupa Pelat Grafit	38
Gambar 4.1 Kromatogram Hasil Analisis GC Terhadap Sampel S-1	47
Gambar 4.2 Diagram Persentase Reduksi Massa Sampah Padat	51
Gambar 4.3 Diagram Kebutuhan Daya Proses Gasifikasi	53
Gambar 4.4 Diagram Volume Gas CO Pada Proses Gasifikasi	56

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tingkatan Parameter Plasma	19
Tabel 2.2 Bentuk Umum Plasma	20
Tabel 2.3 Klasifikasi plasma	23
Tabel 4.1 Data Yang Dicatat Saat Proses Gasifikasi	47
Tabel 4.2 Hasil Analisis GC Terhadap Sampel	49
Tabel 4.3 Persentase Reduksi Massa Sampah Padat	50
Tabel 4.4 Kebutuhan Daya Proses Gasifikasi	53
Tabel 4.5 Volume Gas CO Yang Dihasilkan Pada Setiap Proses Gasifikasi	55



ABSTRAK

Nama : Masta Devita
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Uji Kinerja Reaktor Plasma Non-Termal untuk Biomassa dan Padatan Plastik

Penelitian ini dilakukan untuk menguji kinerja reaktor plasma non-thermal dalam proses gasifikasi sampah padat. Uji kinerja dilakukan dengan dua parameter utama, yaitu kinerja pembentukan gas sintesis dan kebutuhan daya. Proses dilakukan terhadap empat jenis sampah padat, yaitu daun-daunan, serbuk kayu, kertas, dan plastik pada dua kondisi operasi reaktor, yaitu vakum dan diisi gas nitrogen. Penelitian ini memperoleh hasil bahwa kinerja pembentukan gas sintesis adalah rata-rata sebesar 30,67%. Pada kondisi operasi reaktor yang diisi gas nitrogen, kinerja proses lebih baik daripada kondisi operasi reaktor yang vakum. Karena, gas nitrogen merupakan media plasma yang ikut terionisasi sehingga kinerja proses menjadi lebih baik. Sementara, kebutuhan daya hanya sedikit yaitu rata-rata sebesar 47190,6 kWh, yaitu jauh lebih sedikit daripada daya yang dibutuhkan pada plasma termal. Dari hasil uji kinerja dengan dua parameter tersebut, dapat disimpulkan bahwa reaktor plasma non-thermal juga dapat digunakan untuk proses gasifikasi sampah padat.

Kata kunci:

Sampah padat, gasifikasi, plasma non-thermal, gas sintesis, daya

ABSTRACT

Name : Masta Devita
Study Program: Teknik Kimia
Title : Performance Test of Non-Thermal Plasma Reactor for Biomassa and Solid Plastics

This experiment testing non-thermal plasma reactor in solid waste gasification process. The testing does with two main parameter, that are syngas creation and power needed. The process does to four solid waste, that are leaves, saw dust, papers, and plastics, in two reactor operation condition, that are vacuum and nitrogen gas filling. The result of syngas creation is 30,67%. The reactor operation condition with nitrogen gas filling has a better performance than vacuum condition. It is because the nitrogen gas is a plasma medium which get ionitated so the process get better. In otherwise, the average of power needed is 47190,6 kWh, more less than power needed in thermal plasma process. The conclusion is non-thermal plasma can use to solid waste gasification process.

Keywords:

Solid waste, gasification, non-thermal plasma, syngas, power

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Berdasarkan data terakhir yang dikeluarkan oleh Dinas Kebersihan DKI Jakarta, jumlah total produksi sampah padat DKI Jakarta adalah 22.265 m³ per hari atau sekitar 6.000 ton per hari dengan jumlah penduduk (tidak termasuk wilayah Kepulauan Seribu) tercatat sebanyak 7.438.008 jiwa dan tingkat kepadatan 11.244 jiwa/km². Jumlah sampah yang sangat banyak ini akan terus meningkat dan dapat menjadi masalah jika tidak dikelola dengan baik. Dari sampah-sampah tersebut akan hidup berbagai mikroorganisme penyebab penyakit (bakteri patogen) dan juga binatang serangga pemindah/penyebarkan penyakit (vektor). Oleh karena itu diperlukan sistem pengelolaan sampah padat yang efektif dan efisien pada peralatan pengolahan sampah padat yang digunakan.

Berbagai teknologi dan metode untuk pengelolaan sampah padat yang efektif telah digunakan. Secara umum, sistem pengelolaan sampah padat yang paling sering digunakan adalah *landfilling* (tanah urug) dan *incineration* (insinerasi, pembakaran). Namun keduanya memiliki efek membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan. Masalah utama yang ditimbulkan oleh *landfilling* adalah polusi air tanah, sementara diskusi tentang penggunaan insinerasi semakin meluas karena adanya substansi beracun pada gas keluaran (terutama dioksin dan kongenernya) (Moustakas, 2005).

Global Anti-Incinerator Alliance (GAIA) menyebutkan bahwa emisi gas beracun yang dihasilkan pada insinerasi antara lain SO_x, NO_x, dioksin, dan furan. Dioksin dapat menyebabkan gangguan kesehatan yang sangat luas, diantaranya kanker, kerusakan sistem kekebalan, reproduksi, permasalahan pertumbuhan, dan sebagainya. Lebih jauh lagi GAIA menyebutkan bahwa insinerasi juga merupakan sumber utama pencemar PCB (*polychlorinated biphenil*) dan para kongenernya, merkuri (Hg, raksa), logam berat lainnya seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), arsen (As) dan kromium (Cr), senyawa-senyawa hidrokarbon-halogen (organoklorida non-dioksin), gas-gas penyebab hujan asam, partikulat-partikulat yang dapat mengganggu fungsi paru-paru, gas-gas efek rumah kaca (CO₂ dan CH₄),

dan senyawa-senyawa lainnya yang belum teridentifikasi dalam bentuk emisi dan abu di udara. Oleh karena itu penggunaan insinerator pada pengolahan sampah padat sangat tidak dianjurkan.

Alternatif pengolahan sampah padat pengganti insinerator adalah teknologi gasifikasi plasma. Teknologi gasifikasi plasma menjadi alternatif yang menjanjikan karena proses pengolahannya yang ramah lingkungan, yang mengolah sampah tanpa menghasilkan produk yang membahayakan lingkungan hidup, serta menghasilkan gas produk berupa gas sintesis (*syngas*) yang memiliki nilai ekonomis sebagai sumber energi. Teknologi gasifikasi plasma akan menghasilkan gas yang lebih sedikit daripada insinerasi, dan prosesnya dengan reaktivitas kimia yang sangat kuat dapat mengurangi kontaminan gas beracun seperti SO_x, NO_x, dioksin, furan, dan lainnya (Cubas, 2004).

Pada teknologi gasifikasi plasma, sampah padat akan dimasukkan ke dalam reaktor, dan busur api listrik akan mengionisasi gas dalam reaktor untuk membangkitkan plasma yang akan meng-gasifikasi sampah padat yang ada dalam reaktor. Jika pada insinerator akan dihasilkan banyak CO₂ dan substansi beracun lainnya (SO_x, NO_x, dioksin, furan, dan lainnya), maka dalam reaktor dengan jumlah O₂ terbatas ini, molekul organik (sampah-sampah organik dan kertas) akan diubah menjadi campuran gas panas bertekanan dengan kandungan gas utama CO dan H₂ yaitu gas sintesis yang memiliki nilai ekonomis sebagai sumber energi. Gas sintesis bisa dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin gas untuk menghasilkan listrik, dan gas hidrogen yang dimurnikan juga bisa langsung digunakan sebagai bahan bakar. Uap sebagai produk samping juga dapat digunakan kembali untuk menghasilkan listrik. Sementara sampah anorganik akan mencair dan terkumpul di bagian dasar ruang pengolahan sebagai ampas/sisa yang tidak berbahaya dan dapat digunakan kembali untuk industri logam atau campuran aspal.

Penelitian ini akan menguji kinerja reaktor plasma non-termal dalam proses gasifikasi sampah padat. Gasifikasi plasma dengan keuntungan-keuntungannya yang telah dijelaskan sebelumnya merupakan aplikasi dari plasma termal dalam pengolahan sampah padat. Teknologi plasma termal telah banyak dikembangkan, dan aplikasinya dalam mengolah sampah padat telah digunakan

secara luas karena banyaknya keuntungan-keuntungan yang diperoleh bila dibandingkan dengan teknologi-teknologi pengolahan sampah padat yang selama ini digunakan (misalnya insinerator dengan kekurangan-kekurangan seperti yang dijelaskan sebelumnya). Dengan menguji kinerja reaktor plasma non-termal dalam proses gasifikasi sampah padat, diharapkan dapat diketahui apakah kinerjanya dapat dibandingkan dengan plasma termal. Selain itu, karena perbedaan antara plasma non-termal dengan plasma termal terdapat pada suhu operasinya, dengan demikian, satu keuntungan lagi dapat diperoleh yaitu daya yang dibutuhkan proses tidak terlalu besar, sehingga lebih menghemat biaya.

Penelitian ini akan menggunakan *prototype* reaktor plasma non-termal hasil rekayasa dan rancang-bangun dari tim bimbingan Bpk. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA. dengan volume ruang pengolahan 0,45 L, dimana alat pembangkit plasma (plasmatron) yang digunakan adalah rangkaian yang berbasis *ballast* lampu CFL 220V/23W. Reaktor ini akan digunakan untuk proses gasifikasi empat jenis sampah padat, yaitu daun-daunan, serbuk kayu, kertas, dan plastik, pada dua kondisi operasi reaktor, yaitu vakum dan diisi gas nitrogen. Kinerja reaktor dianalisis dengan parameter utama kinerja pembentukan gas sintesis.

1.2 RUMUSAN MASALAH

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Apakah reaktor plasma non-termal yang digunakan pada penelitian ini mampu meng-gasifikasi sampah padat dalam skala laboratorium.
2. Apakah teknologi pengolahan sampah padat dengan gasifikasi plasma non-termal memiliki kinerja yang dapat dibandingkan dengan atau lebih baik daripada plasma termal.
3. Bagaimana pengaruh variasi-variasi yang dilakukan pada penelitian ini terhadap kinerja tersebut.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan yang akan dicapai pada penelitian ini adalah:

1. Uji kinerja reaktor plasma non-termal dalam proses gasifikasi sampah padat sebagai alternatif dari plasma termal.

2. Mengkaji gas-gas produk gasifikasi plasma berbagai sampah padat (sebagai variasi), khususnya untuk gas-gas produk yang memiliki nilai ekonomis sebagai sumber energi (CO dan H₂ sebagai gas sintesis).
3. Mengetahui pengaruh variasi kondisi operasi reaktor terhadap kinerjanya.

1.4 BATASAN MASALAH

Batasan-batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Reaktor yang digunakan adalah *prototype* reaktor plasma non-termal hasil rekayasa dan rancang-bangun dari tim penelitian bimbingan Bpk. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA., dengan plasmatron yang digunakan adalah rangkaian yang berbasis *ballast* lampu CFL 220V/23W.
2. Parameter yang utama digunakan untuk analisis kinerja reaktor plasma non-termal dalam proses gasifikasi sampah padat adalah kinerja pembentukan gas sintesis (CO dan H₂).
3. Variasi sampah padat adalah daun-daunan, serbuk kayu, kertas, dan plastik.
4. Variasi kondisi operasi reaktor adalah vakum dan diisi gas nitrogen.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penulisan skripsi ini adalah:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini akan dijelaskan latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan-batasan masalah, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini akan menguraikan berbagai teori literatur yang menjadi dasar penjelasan pada penelitian seperti mengenai sampah dan pengolahannya secara umum, kandungan senyawa organik pada sampah padat yang menjadi variasi pada penelitian ini, plasma secara umum, teknologi plasma dan aplikasinya, teknologi plasma non-termal dalam proses gasifikasi sampah padat, dan sebagainya.

BAB III METODE PENELITIAN

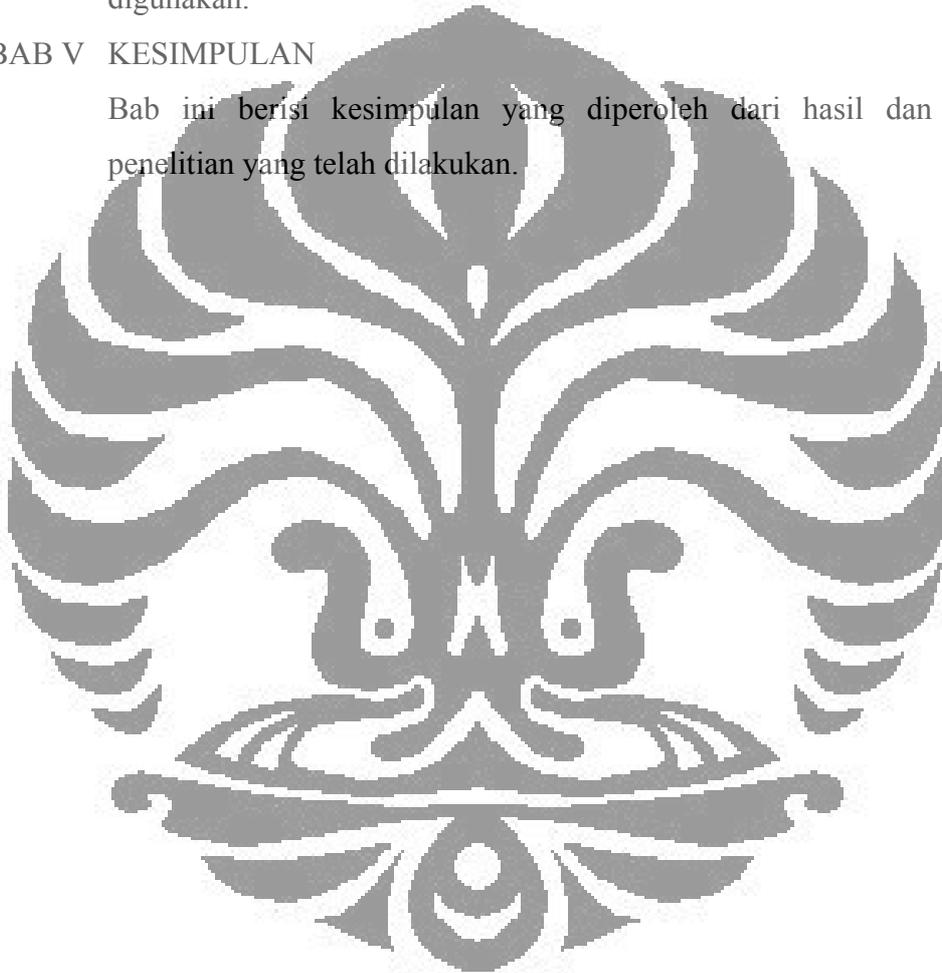
Pada bab ini akan dibahas tahap-tahap penelitian, alat (reaktor, plasmatron, dan lain-lain) dan bahan yang digunakan dalam penelitian, serta prosedur penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi hasil yang diperoleh dari penelitian ini, pengolahan data-data tersebut, dan analisisnya berdasarkan metode penelitian yang digunakan.

BAB V KESIMPULAN

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil dan analisis penelitian yang telah dilakukan.



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dibahas mengenai aspek teori penelitian dari literatur sebagai dasar dan arahan/pijakan pada penelitian ini, yaitu yang berhubungan dengan sampah dan pengolahannya secara umum, kandungan senyawa organik pada sampah padat yang menjadi variasi pada penelitian ini, plasma secara umum, teknologi plasma dan aplikasinya, teknologi plasma non-termal dalam proses gasifikasi sampah padat, dan sebagainya. Bab ini dibuat juga untuk mendukung analisis penelitian untuk mencapai tujuan mengetahui kinerja reaktor plasma non-termal pada gasifikasi sampah padat untuk lebih jauh dapat dibandingkan dengan plasma termal yang telah berkembang selama ini.

2.1 SAMPAH DAN PENGELOLAANNYA SECARA UMUM (Soekidjo N., 2003)

2.1.1 Definisi Sampah

Sampah adalah sesuatu bahan atau benda padat yang sudah tidak dipakai lagi oleh manusia atau benda padat yang sudah digunakan lagi dalam suatu kegiatan manusia dan dibuang. Para ahli kesehatan masyarakat Amerika membuat batasan, sampah (*waste*) adalah sesuatu yang tidak digunakan, tidak dipakai, tidak disenangi, atau sesuatu yang dibuang yang berasal dari kegiatan manusia dan tidak terjadi dengan sendirinya.

Dari batasan ini jelas bahwa sampah adalah merupakan hasil suatu kegiatan manusia yang dibuang karena sudah tidak berguna. Sehingga bukan semua benda padat yang tidak digunakan dan dibuang disebut sampah misalnya benda-benda alam, benda-benda yang keluar dari bumi akibat dari gunung meletus, banjir, pohon dihutan yang tumbang akibat angin ribut, dan sebagainya.

Dengan demikian sampah mengandung prinsip-prinsip sebagai berikut :

- Adanya sesuatu benda atau bahan padat.
- Adanya hubungan langsung/tidak langsung dengan kegiatan manusia.
- Benda atau bahan tersebut tidak dipakai lagi.

2.1.2 Jenis-jenis Sampah

Kalau kita berbicara sampah, sebenarnya meliputi 3 jenis sampah yakni sampah padat, sampah cair, dan sampah dalam bentuk gas (*fume, smoke*). Tetapi seperti telah disebutkan di atas bahwa dalam konteks ini hanya akan dibahas sampah padat. Sedangkan sampah cair yang berupa antara lain air limbah dan sampah dalam bentuk gas yang menimbulkan polusi udara seperti asap kendaraan, asap pabrik, dan sebagainya tidak dibahas.

Sampah padat (selanjutnya akan disebut sampah saja) dapat dibagi menjadi berbagai jenis, yakni:

- a. Berdasarkan zat kimia yang terkandung didalamnya, sampah dibagi menjadi:
 - Sampah anorganik adalah sampah yang umumnya tidak dapat membusuk, misalnya logam/besi, pecahan gelas, plastik, dan sebagainya.
 - Sampah organik adalah sampah yang pada umumnya dapat membusuk, misalnya sisa-sisa makanan, daun-daunan, buah-buahan, dan sebagainya.
- b. Berdasarkan dapat tidaknya dibakar:
 - Sampah yang mudah terbakar, misalnya kertas, karet, kayu, plastik, kain bekas, dan sebagainya.
 - Sampah yang tidak dapat terbakar, misalnya kaleng-kaleng bekas, besi/logam bekas, pecahan gelas, kaca, dan sebagainya.
- c. Berdasarkan karakteristik sampah:
 - *Garbage* yaitu jenis sampah hasil pengolahan atau pembuatan makanan, yang umumnya mudah membusuk, dan berasal dari rumah tangga, restoran, hotel, dan sebagainya.
 - *Rubish* yaitu sampah yang berasal dari perkantoran, perdagangan, baik yang mudah terbakar seperti kertas, karton, plastik, dan sebagainya maupun yang tidak mudah terbakar, seperti kaleng bekas, klip, pecahan kaca, gelas, dan sebagainya.
 - *Ashes* (abu) yaitu sisa pembakaran dari bahan-bahan yang mudah terbakar, termasuk abu rokok.

- Sampah jalanan (*street sweeping*) yaitu sampah yang berasal dari pembersihan jalan yang terdiri dari campuran bermacam-macam sampah, daun-daunan, kertas, plastik, pecahan kaca, besi, debu, dan sebagainya.
- Sampah industri yaitu sampah yang berasal dari industri atau pabrik-pabrik.
- Bangkai binatang (*dead animal*) yaitu bangkai binatang yang mati karena alam, ditabrak kendaraan, atau dibuang orang.
- Bangkai kendaraan (*abandoned vehicle*) adalah bangkai mobil, sepeda, sepeda motor, dan sebagainya.
- Sampah pembangunan (*construction waste*) yaitu sampah dari proses pembangunan gedung, rumah, dan sebagainya, yang berupa puing-puing, potongan-potongan kayu, besi, beton, bambu, dan sebagainya.

2.1.3 Pengelolaan Sampah

Sampah erat kaitannya dengan kesehatan masyarakat karena dari sampah-sampah tersebut akan hidup berbagai mikroorganisme penyebab penyakit (bakteri patogen) dan juga binatang serangga sebagai pemindah/penyebarkan penyakit (vektor). Oleh sebab itu sampah harus dikelola dengan baik sampai sekecil mungkin tidak mengganggu atau mengancam kesehatan masyarakat.

Pengelolaan sampah yang baik bukan saja untuk kepentingan kesehatan tetapi juga untuk keindahan lingkungan. Yang dimaksud pengelolaan sampah disini adalah meliputi pengumpulan, pengangkutan sampai dengan pemusnahan atau pengolahan sampah sedemikian rupa sehingga sampah tidak mengganggu kesehatan masyarakat dan lingkungan hidup. Cara-cara pengelolaan sampah antara lain sebagai berikut:

1. Pengumpulan dan pengangkutan sampah

Pengumpulan sampah menjadi tanggung jawab dari masing-masing rumah tangga atau institusi yang menghasilkan sampah. Oleh sebab itu, mereka ini harus membangun atau mengadakan tempat khusus untuk mengumpulkan sampah. Kemudian dari masing-masing tempat pengumpulan sampah tersebut harus diangkut ke tempat penampungan

sementara (TPS) sampah, selanjutnya ke tempat penampungan akhir (TPA).

Mekanisme, sistem, atau cara pengangkutannya untuk daerah perkotaan adalah tanggung jawab pemerintah daerah setempat yang didukung oleh partisipasi masyarakat produksi sampah, khususnya dalam hal pendanaan. Sedangkan untuk daerah pedesaan pada umumnya sampah dapat dikelola oleh masing-masing keluarga tanpa memerlukan TPS maupun TPA. Sampah rumah tangga daerah pedesaan umumnya didaur ulang menjadi pupuk.

2. Pemusnahan dan pengolahan sampah

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

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

2.2 KANDUNGAN BERBAGAI SAMPAH PADAT ORGANIK

(www.wikipedia.org)

Sampah padat organik mengandung senyawa organik. Senyawa organik adalah senyawa kimia yang molekulnya mengandung karbon. Di antara beberapa

golongan senyawa organik adalah senyawa alifatik, rantai karbon yang dapat diubah gugus fungsinya; hidrokarbon aromatik, senyawaan yang mengandung paling tidak satu cincin benzena; senyawa heterosiklik yang mencakup atom-atom nonkarbon dalam struktur cincinnya; dan polimer, molekul rantai panjang gugus berulang. Perbedaan antara kimia organik dan anorganik adalah ada/tidaknya ikatan karbon-hidrogen.

Pada penelitian ini dilakukan variasi sampah padat yang akan di-gasifikasi dengan menggunakan reaktor plasma non-termal. Variasi sampah padat tersebut adalah daun-daunan, serbuk kayu, kertas, dan plastik, dimana keempatnya merupakan sampah padat organik. Tujuan penelitian ini adalah untuk melihat kinerja plasma non-termal dalam pengolahan sampah padat, yang lebih lanjut akan dibandingkan dengan kinerja plasma termal yang selama ini telah berkembang. Uji kinerja dilakukan dengan parameter utama yaitu kinerja pembentukan gas sintesis (CO dan H_2). Oleh karena itu perlu diketahui kandungan yang terdapat dalam setiap variasi sampah padat untuk memudahkan analisis penelitian, yaitu sebagai berikut:

1. Daun-daunan

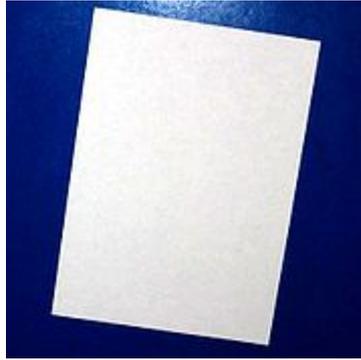
Daun-daunan merupakan bagian dari tumbuhan. Tumbuhan memiliki dinding sel. Dinding-dinding sel sebagian besar terbentuk oleh polimer karbohidrat (pektin, selulosa, hemiselulosa, dan lignin sebagai penyusun penting).

2. Serbuk kayu

Serbuk kayu mengacu kepada kayu. Kayu adalah bagian keras tanaman yang digolongkan kepada pohon dan semak belukar. Secara kimia, kayu tersusun atas beberapa bagian utama yaitu selulosa dan lignin.

3. Kertas

Kertas adalah bahan yang tipis dan rata, yang dihasilkan dengan kompresi serat yang berasal dari pulp. Serat yang digunakan biasanya adalah alami, dan mengandung selulosa dan hemiselulosa.



Gambar 2.1 Selembar Kertas

4. Plastik

Istilah plastik mencakup produk polimerisasi sintetik atau semi-sintetik. Mereka terbentuk dari kondensasi organik atau penambahan polimer dan bisa juga terdiri dari zat lain. Ada beberapa polimer alami yang termasuk plastik. Plastik dapat dikategorisasikan dengan banyak cara tapi paling umum dengan melihat tulang-punggung polimernya (*vinyl{chloride}*, *polyethylene*, *acrylic*, *silicone*, *urethane*, dan lain-lain).

Pengembangan plastik berasal dari penggunaan material alami (seperti: permen karet, *shellac*) sampai ke material alami yang dimodifikasi secara kimia (seperti: karet alami, *nitrocellulose*), dan akhirnya ke molekul buatan-manusia (seperti: *epoxy*, *polyvinyl chloride*, *polyethylene*).

Plastik dapat digolongkan berdasarkan sifat fisiknya, yaitu:

- Termoplastik

Termoplastik merupakan jenis plastik yang bisa didaur-ulang/dicetak lagi dengan proses pemanasan ulang. Contoh: polietilen (PE), polistiren (PS), alkilbensulfonat (ABS), polikarbonat (PC)

- Termoset

Termoset merupakan jenis plastik yang tidak bisa didaur-ulang/dicetak lagi. Pemanasan ulang akan menyebabkan kerusakan molekul-molekulnya. Contoh: resin epoksi, bakelit, resin melamin, urea-formaldehida

Setelah mengetahui kandungan yang terdapat dalam setiap jenis sampah padat tersebut di atas, maka kandungan-kandungan tersebut akan dibahas lebih lanjut pada subsubbab berikut.

2.2.1 Karbohidrat

Karbohidrat atau sakarida (gula) adalah golongan besar senyawa organik yang paling melimpah di bumi. Karbohidrat memiliki berbagai fungsi dalam tubuh makhluk hidup, terutama sebagai bahan bakar (misalnya glukosa), cadangan makanan (misalnya pati pada tumbuhan dan glikogen pada hewan), dan materi pembangun (misalnya selulosa pada tumbuhan, kitin pada hewan dan jamur).

Secara biokimia, karbohidrat adalah polihidroksil-aldehida atau polihidroksil-keton, atau senyawa yang menghasilkan senyawa-senyawa ini bila dihidrolisis. Karbohidrat mengandung gugus fungsi karbonil (sebagai aldehida atau keton) dan banyak gugus hidroksil. Pada awalnya, istilah karbohidrat digunakan untuk golongan senyawa yang mempunyai rumus $(CH_2O)_n$, yaitu senyawa-senyawa yang n atom karbonnya tampak terhidrasi oleh n molekul air. Namun demikian, terdapat pula karbohidrat yang tidak memiliki rumus demikian dan ada pula yang mengandung nitrogen, fosforus, atau sulfur.

Bentuk molekul karbohidrat paling sederhana terdiri dari satu molekul gula sederhana yang disebut monosakarida, misalnya glukosa, galaktosa, dan fruktosa. Banyak karbohidrat merupakan polimer yang tersusun dari molekul gula yang terangkai menjadi rantai yang panjang serta dapat pula bercabang-cabang, disebut polisakarida, misalnya pati, kitin, dan selulosa. Selain monosakarida dan polisakarida, terdapat pula disakarida (rangkaiannya dua monosakarida) dan oligosakarida (rangkaiannya beberapa monosakarida).

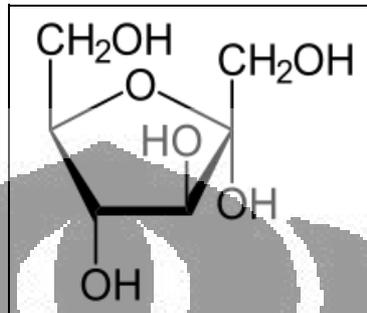
Secara umum karbohidrat dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Monosakarida

Monosakarida merupakan karbohidrat paling sederhana karena molekulnya hanya terdiri atas beberapa atom C dan tidak dapat diuraikan dengan cara hidrolisis menjadi karbohidrat lain. Monosakarida dibedakan

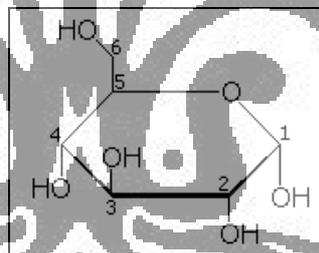
menjadi aldosa dan ketosa. Contoh dari aldosa yaitu glukosa dan galaktosa. Contoh ketosa yaitu fruktosa.

Dengan beberapa pengecualian (misalnya deoksiribosa atau gula amino), monosakarida memiliki rumus kimia umum $(\text{CH}_2\text{O})_n$.



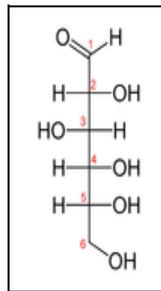
Gambar 2.2 Fruktosa, Salah Satu Jenis Monosakarida

Fruktosa adalah gula sederhana (monosakarida) yang ditemukan di banyak jenis makanan dan merupakan salah satu dari tiga gula darah penting bersama dengan glukosa dan galaktosa.



Gambar 2.3 Gambaran Proyeksi Haworth Struktur Glukosa (α -D-glukopiranos))

Glukosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, berat molekul 180,18) adalah heksosa—monosakarida yang mengandung enam atom karbon. Glukosa merupakan aldehida (mengandung gugus $-\text{CHO}$). Lima karbon dan satu oksigennya membentuk cincin yang disebut "cincin piranosa", bentuk paling stabil untuk aldosa berkarbon enam. Dalam cincin ini, tiap karbon terikat pada gugus samping hidroksil dan hidrogen kecuali atom kelimanya, yang terikat pada atom karbon keenam di luar cincin, membentuk suatu gugus CH_2OH . Struktur cincin ini berada dalam kesetimbangan dengan bentuk yang lebih reaktif, yang proporsinya 0.0026% pada pH 7.

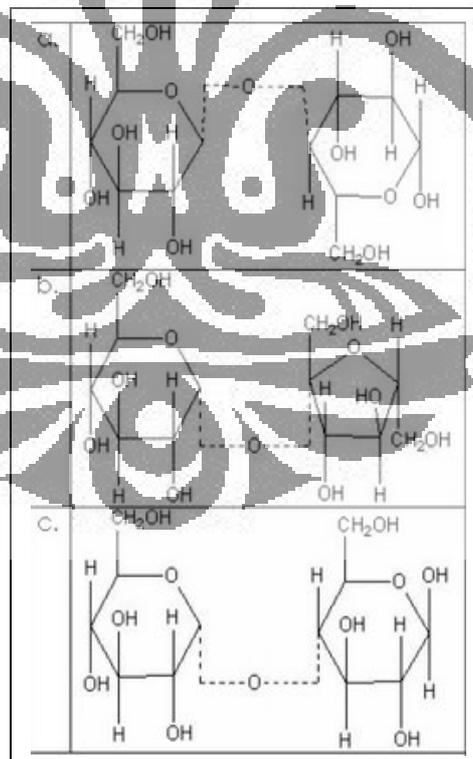


Gambar 2.4 Bentuk Rantai D-Glukosa

Glukosa dan fruktosa diikat secara kimiawi menjadi sukrosa. Pati, selulosa, dan glikogen merupakan polimer glukosa umum (polisakarida).

2. Disakarida dan oligosakarida

Disakarida merupakan karbohidrat yang terbentuk dari dua molekul monosakarida yang berikatan melalui gugus -OH dengan melepaskan molekul air. Contoh dari disakarida adalah sukrosa, laktosa, dan maltosa.



Gambar 2.5 Struktur Kimia (a) Laktosa: Galaktosa-Glukosa, (b) Sukrosa: Glukosa-Fruktosa, (c) Maltosa: Glukosa-Glukosa

3. Polisakarida

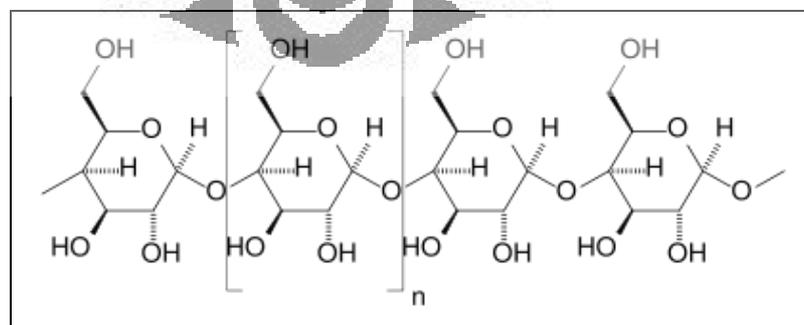
Polisakarida merupakan karbohidrat yang terbentuk dari banyak sakarida sebagai monomernya. Rumus umum polisakarida yaitu $C_6(H_{10}O_5)_n$. Contoh polisakarida adalah selulosa, glikogen, dan amilum.

Pati atau amilum adalah karbohidrat kompleks yang tidak larut dalam air, berwujud bubuk putih, tawar dan tidak berbau. Pati merupakan bahan utama yang dihasilkan oleh tumbuhan untuk menyimpan kelebihan glukosa (sebagai produk fotosintesis) dalam jangka panjang.

Pati tersusun dari dua macam karbohidrat, amilosa dan amilopektin, dalam komposisi yang berbeda-beda. Amilosa memberikan sifat keras (*pera*) sedangkan amilopektin menyebabkan sifat lengket. Amilosa memberikan warna ungu pekat pada tes iodin sedangkan amilopektin tidak bereaksi. Penjelasan untuk gejala ini belum pernah bisa tuntas dijelaskan.

Amilosa:

Amilosa merupakan polisakarida, polimer yang tersusun dari glukosa sebagai monomernya. Tiap-tiap monomer terhubung dengan ikatan 1,6-glikosidik. Amilosa merupakan polimer tidak bercabang yang bersama-sama dengan amilopektin menjadi komponen penyusun pati. Dalam masakan, amilosa memberi efek keras atau "pera" bagi pati atau tepung.

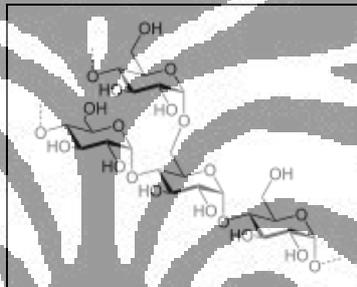


Gambar 2.6 Struktur Amilosa

Amilopektin:

Amilopektin merupakan polisakarida yang tersusun dari monomer α -glukosa (baca: alfa glukosa). Amilopektin merupakan molekul raksasa dan mudah ditemukan karena menjadi satu dari dua senyawa penyusun pati, bersama-sama dengan amilosa.

Walaupun tersusun dari monomer yang sama, amilopektin berbeda dengan amilosa, yang terlihat dari karakteristik fisiknya. Secara struktural, amilopektin terbentuk dari rantai glukosa yang terikat dengan ikatan 1,6-glikosidik, sama dengan amilosa. Namun demikian, pada amilopektin terbentuk cabang-cabang (sekitar tiap 20 mata rantai glukosa) dengan ikatan 1,4-glikosidik.



Gambar 2.7 Struktur Kimia Amilopektin

2.2.2 Ligno-selulosa

Ligno-selulosa terutama tersusun atas lignin, selulosa, dan hemiselulosa. Kandungannya bervariasi tergantung pada jenis dan umur tanaman.

1. Lignin

Lignin adalah salah satu komponen penyusun tanaman. Secara umum, tanaman terbentuk dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Berbeda dengan selulosa yang terutama terbentuk dari gugus karbohidrat, lignin terbentuk dari gugus aromatik yang saling dihubungkan dengan rantai alifatik, yang terdiri dari 2-3 karbon.

2. Selulosa

Selulosa $(C_6H_{10}O_5)_n$ adalah polimer berantai panjang polisakarida karbohidrat, dari beta-glukosa. Selulosa merupakan komponen struktural utama dari tumbuhan dan tidak dapat dicerna oleh manusia.

3. Hemiselulosa

Hemiselulosa merujuk pada polisakarida yang mengisi ruang antara serat-serat selulosa dalam dinding sel tumbuhan. Secara biokimiawi, hemiselulosa adalah semua polisakarida yang dapat diekstraksi dalam larutan basa (alkalis). Namanya berasal dari anggapan, yang ternyata diketahui tidak benar, bahwa hemiselulosa merupakan senyawa prekursor (pembentuk) selulosa.

Monomer penyusun hemiselulosa biasanya adalah rantai D-glukosa, ditambah dengan berbagai bentuk monosakarida yang terikat pada rantai, baik sebagai cabang atau mata rantai, seperti D-mannosa, D-galaktosa, D-fukosa, dan pentosa-pentosa seperti D-xilosa dan L-arabinosa.

4. Pektin

Pektin merupakan golongan polimer heterosakarida yang diperoleh dari dinding sel tumbuhan darat. Pektin pada sel tumbuhan merupakan penyusun lamela tengah, lapisan penyusun awal dinding sel. Penyusun utama biasanya polimer asam D-galakturonat, yang terikat dengan α -1,4-glikosidik. Asam galakturonat memiliki gugus karboksil yang dapat saling berikatan dengan ion Mg^{2+} atau Ca^{2+} sehingga berkas-berkas polimer berlekatan satu sama lain.

2.2.3 Poliester

Poliester merupakan salah satu polimer sintesis yang terbuat Purified Terephthalic Acid (PTA) atau dimetil ester dimethyl terephthalate (DMT) dan Mono Etilena Glikol (MEG). Dengan pangsa pasar sebesar 18% dari semua bahan plastik yang diproduksi, poliester berada di urutan ketiga setelah polietilena (33.5%) dan polipropilena (19,5%).

Bahan-bahan mentah utamanya adalah sebagai berikut:

- *Purified Terephthalic Acid* – PTA – CAS-No.: 100-21-0
Sinonim: 1,4 *Dibenzenedicarboxylic acid*,

Sum formula: $C_6H_4(COOH)_2$, berat mol: 166,13

- *Dimethylterephthalate* – DMT- CAS-No: 120-61-6

Sinonim: 1,4 *Dibenzenedicarboxylic acid dimethyl ester*

Sum formula: $C_6H_4(COOCH_3)_2$, berat mol: 194,19

- Mono Etilena Glikol – MEG – CAS No.: 107-21-1

Sinonim: 1,2 *Ethandiol*

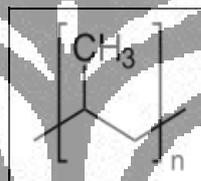
Sum formula: $C_2H_6O_2$, berat mol: 62,07

- Polietilena Tereftalat CAS-No.: 25038-59-9

Sinonim/ singkatan: poliester/ PET, PES

Sum formula: $H-[C_{10}H_8O_4]_n-60-120 OH$, berat unit mol: 192,17

2.2.4 Polipropilena



Gambar 2.8 Polipropilena

Nama sistematis	: poly(propene)	
Nama lain	: Polipropilena; Polipropena; Polipropena	25
	[USAN]; Polimer propena; Polimer propilena;	
	homopolimer 1-Propena	
Rumus molekul	$(C_3H_6)_x$	

2.3 PLASMA SECARA UMUM (www.wikipedia.org)

Di dalam ilmu fisika dan ilmu kimia, plasma adalah gas yang terionisasi secara parsial, dimana proporsi tertentu dari elektron berada dalam keadaan bebas daripada berikatan dengan atom atau molekul. Plasma juga dapat dikatakan sebagai atom yang kehilangan elektron karena beberapa atau semua elektron di orbit atom terluar telah terpisah dari atom atau molekul. Hasilnya adalah sebuah koleksi ion dan elektron yang tidak lagi terikat satu sama lain. Kemampuan muatan positif dan muatan negatif untuk sedikit berpindah dengan bebas membuat plasma bersifat induktif secara listrik sehingga memberikan respon yang kuat pada bidang elektromagnetik. Oleh karena itu plasma mempunyai sifat tidak sama

dengan padatan, cairan atau gas dan dianggap sebagai satu keadaan materi yang berbeda. Plasma berbentuk gas netral seperti awan, sebagai contoh, dalam kasus bintang. Seperti gas, plasma tidak mempunyai bentuk dan volum terbatas kecuali dalam kotak tertutup, tetapi tidak sama dengan gas, dalam pengaruh medan magnet, plasma mungkin membentuk struktur seperti kawat pijar, sinar dan lapisan ganda. Bentuk plasma secara umum dapat dilihat pada Tabel 2.1.

2.3.1 Sifat-sifat Plasma

Parameter plasma berlaku pada nilai yang bervariasi oleh banyak kelas suatu besaran, tetapi sifat plasma dengan parameter berlainan mungkin saja sangat serupa (lihat Gambar 2.9). Tabel 2.1 memaparkan parameter dari plasma terestrial/plasma bumi dan plasma kosmik. Disebabkan cakupan parameternya yang luas, plasma memiliki bentuk yang beragam baik di bumi maupun di ruang angkasa. Tabel 2.2 memberikan contoh bentuk plasma paling umum yang ada di bumi dan ruang angkasa umumnya. Petir merupakan bentuk umum plasma bumi yang sering terjadi dan paling mudah diamati.

Tabel 2.1 Tingkatan Parameter Plasma

Karakter	Plasma Terestrial	Plasma Kosmik
Ukuran (meter)	10^{-6} m (plasma lab) s.d 10^2 m (petir)	10^{-6} m s.d (pelindung pesawat ruang angkasa) 10^{26} m (intergalactic nebula)
Umur (detik)	10^{-12} (plasma yang dihasilkan oleh laser) s.d 10^7 (cahaya fluoresensi)	10^1 (api matahari) s.d 10^{17} (plasma intergalaksi)
Densitas (partikel per meter kubik)	10^7 m ⁻³ s.d 10^{32} m ⁻³ (inertial confinement plasma)	10^0 m ⁻³ (medium intergalaksi) s.d 10^{30} m ⁻³ (inti bintang)
Temperatur (K)	~ 0 K (crystalline non-neutral plasma) s.d 10^8 K (plasma fusi magnetik)	10^2 K (aurora) s.d 10^7 K (inti matahari)
Medan magnetik (tesla)	10^{-4} T (plasma lab) s.d 10^3 T (pulsed-power plasma)	10^{-12} T (medium intergalaksi) s.d 10^{11} T (dekat neutron stars)

Sumber: <http://www.wikipedia.org/plasmaphysics.html>



Gambar 2.9 Petir Merupakan Salah Satu Fenomena Plasma Bumi (Plasma Terrestrial)

Tabel 2.2 Bentuk Umum Plasma

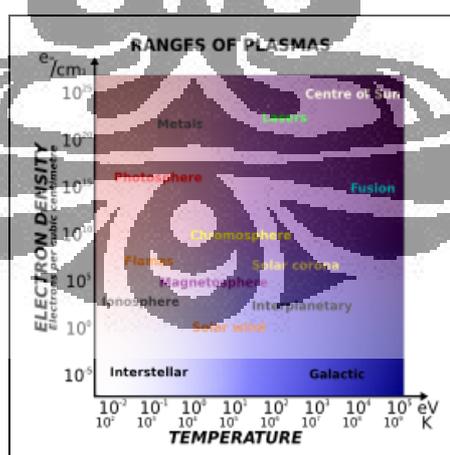
Plasma Buatan	Plasma Terrestrial	Plasma Ruang Angkasa dan Astrofisika
<ul style="list-style-type: none"> • TV plasma • Lampu fluoresensi kompak • Tempat pembuangan gas roket • Area pelindung panas pesawat ruang angkasa ketika mengorbit ke bumi • Ozonator • Bunga api listrik pada obor las • Bola plasma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

Sumber: <http://www.wikipedia.org/plasmaphysics.html>

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

Derajat ionisasi:

Untuk terjadinya plasma, ionisasi sangat diperlukan. Istilah "kepadatan plasma" biasanya mengacu pada "kerapatan elektron", yaitu jumlah elektron bebas per unit volum. Derajat ionisasi plasma adalah jumlah dari atom yang telah kehilangan (atau mendapatkan) elektron, dan dikontrol sebagian besar oleh temperatur. Bahkan gas yang terionisasi secara parsial dimana sekitar 1% partikel gas mengalami ionisasi dapat mempunyai karakteristik plasma (misalnya memberikan reaksi terhadap medan magnet dan sangat konduktif secara listrik). Derajat ionisasi, α didefinisikan sebagai $\alpha = n_i / (n_i + n_a)$ dimana n_i adalah jumlah kerapatan ion dan n_a adalah jumlah kerapatan atom netral. Kerapatan elektron berhubungan dengan derajat ionisasi oleh keadaan muatan rata-rata $\langle Z \rangle$ dari ion melalui $n_e = \langle Z \rangle n_i$ dimana n_e adalah jumlah kerapatan elektron. Gambar 2.10 menggambarkan tingkatan plasma berdasarkan densitas electron dan temperturnya.



Gambar 2.10 Tingkatan Plasma Berdasarkan Densitas Elektron dan Temperatur

Temperatur plasma pada umumnya diukur dalam kelvin atau elektronvolt, dan merupakan ukuran tidak resmi energi kinetik termal setiap partikel. Dalam

banyak kasus, elektron cukup dekat pada keseimbangan termal dimana temperturnya secara relatif dirumuskan dengan baik, bahkan ketika ada penyimpangan signifikan dari energi fungsi distribusi Maxwellian, sebagai contoh disebabkan oleh radiasi UV, partikel berenergi, atau bidang listrik yang kuat. Oleh karena perbedaan massa yang besar, elektron sampai pada keseimbangan termodinamika di antara elektron-elektron sendiri lebih cepat daripada elektron sampai pada keseimbangan dengan ion atau atom netral. Karena alasan ini "temperatur ion" mungkin saja sangat berbeda dari (biasanya lebih rendah dari) "temperatur elektron". Hal ini sangat umum dalam teknologi plasma terionisasi dengan rendah, dimana ion seringkali dekat dengan suhu lingkungan.

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

1. Plasma termal: $T_{elektron} \sim T_{gas}$
Suhu elektron dan gas berada dalam keadaan kesetimbangan (quasi-equilibrium) akibat pemanasan Joule (Joule heating)
Contoh : plasma matahari
2. Plasma non-termal : $T_{elektron} > T_{gas}$
 $T_{elektron} \sim 1 \text{ eV } (\sim 10000 \text{ K})$; $T \sim \text{suhu ruang}$
Contoh : Aurora borealis

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

Tabel 2.3 Klasifikasi Plasma

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

Rendah (<i>Quasi-Equilibrium Plasma</i>)	$n_e \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}$	<i>atmospheric RF discharge</i>
Plasma Non-Termal (<i>Non-Equilibrium Plasma</i>)	$T_e \geq T_h, T_p \approx 3 \times 10^2 - 4,5 \times 10^2 \text{ K}$ $n_e \approx 10^{10} \text{ m}^{-3}$	<i>Corona discharge</i>

Keterangan: T_e =Temperatur elektron, T_i =Temperatur ion, T_h =Temperatur neutral, T_p =Temperatur plasma, n_e =densitas elektron

Sumber: H. Huang, 2006

Derajat ionisasi plasma dikendalikan oleh temperatur. Sebuah plasma kadang-kadang disebut dengan "panas" jika hampir sepenuhnya terionisasi, atau "dingin" jika hanya fraksi kecil (sebagai contoh 1%) molekul gas yang terionisasi. Bahkan di dalam plasma dingin temperatur elektron bisa mencapai beberapa ribu derajat celsius.

2.3.2 Contoh Plasma Industri atau Komersial

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

1. *Low Pressure Discharges*

- Plasma yang dihasilkan dari proses lompatan berpijar (*Glow Discharge Plasmas*): plasma bukan-termal yang dibangkitkan oleh aplikasi dari DC atau medan listrik frekuensi rendah RF (<100 kHz) ke celah antara dua elektroda logam. Mungkin plasma paling umum; ini adalah jenis plasma yang dibangkitkan di dalam cahaya tabung neon.
- Plasma yang dihasilkan dari proses kapasitif (*Capacitively Coupled Plasma*): serupa dengan plasma pelepasan pijar, tetapi dibangkitkan dengan medan listrik frekuensi tinggi RF sekitar 13.56 MHz. Plasma jenis ini digunakan secara luas dalam mikro-fabrikasi dan industri rangkaian terintegrasi untuk penggoresan plasma serta deposisi lebih lanjut uap kimia dengan plasma.
- Plasma yang dihasilkan dari proses induktif (*Inductively Coupled Plasma*): serupa dengan CCP dan serupa dalam aplikasi tetapi

elektroda terdiri dari satu kumparan terbungkus di sekitar volume pelepasan muatan yang secara induktif membangkitkan plasma.

- Plasma yang dihasilkan dari proses termal (*Wave Heated Plasma*): serupa dengan CCP dan ICP dalam hal tipikal RF (atau gelombang mikro), tetapi dipanaskan baik dengan cara elektrostatik dan elektromagnetik. Contohnya adalah pelepasan *helicon*, resonansi elektron siklotron (*Electron Cyclotron Resonance*), dan resonansi ion siklotron (*Ion Cyclotron Resonance*). Hal ini secara khusus memerlukan suatu medan magnet koaksial untuk propagasi gelombang.

2. Atmospheric Pressure

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

2.4 TEKNOLOGI PLASMA SECARA UMUM DAN APLIKASINYA

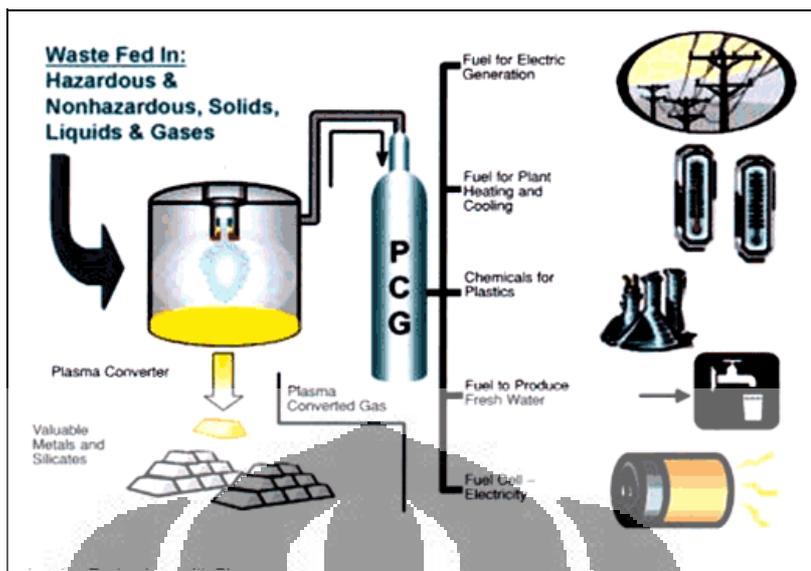
(www.freepatentsonline.com)

Plasma dalam teknologi plasma dapat didefinisikan sebagai gas yang terionisasi, terdiri dari partikel neutron, ion positif, ion negatif, dan elektron yang merespon secara kuat medan magnetik. Plasma juga dapat dikatakan sebagai atom yang kehilangan elektron karena beberapa atau semua elektron di orbit atom terluar telah terpisah dari atom atau molekul. Hasilnya adalah sebuah koleksi ion dan elektron yang tidak lagi terikat satu sama lain. Untuk menghilangkan elektron dari atom dibutuhkan suatu energi, energi tersebut berasal dari panas, listrik ataupun cahaya. Partikel-partikel ini terionisasi (bermuatan) sehingga terbentuklah plasma.

Teknologi plasma memiliki beberapa keunggulan, diantaranya, plasma merupakan teknologi yang ramah lingkungan. Terdapat beberapa aplikasi plasma yang telah dikenal luas diantaranya teknologi plasma dalam AC, teknologi plasma pada TV, teknologi plasma pada pengolahan sampah, dan teknologi plasma sebagai *cleaning technology*.

2.4.1 Teknologi Plasma Sebagai *Cleaning Technology*

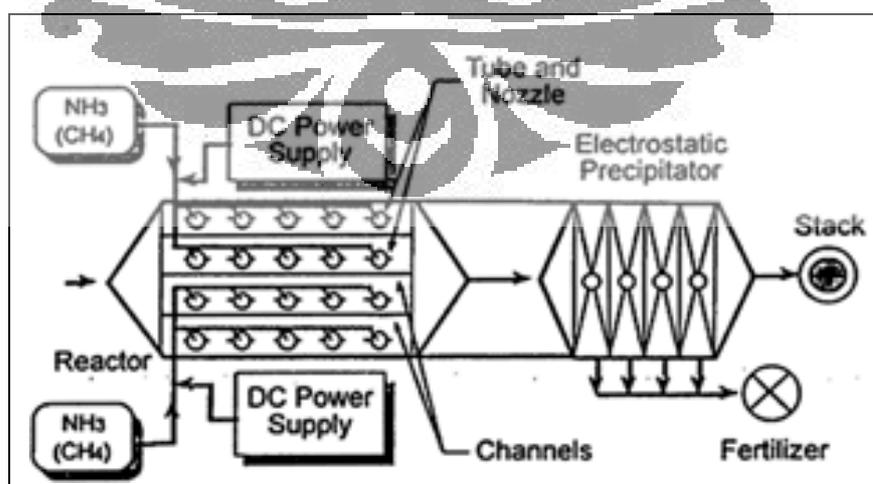
Aplikasi teknologi plasma sebagai *cleaning technology* merupakan salah satu aplikasi yang erat kaitannya dengan Teknik Kimia. Sebagai mana kita ketahui, efek negatif dari perkembangan industri adalah munculnya polusi yang menyebabkan kerusakan alam. Di sinilah teknologi plasma dapat berperan sebagai salah satu teknologi untuk membersihkan limbah yang dihasilkan oleh suatu industri. Aplikasi teknologi plasma dapat menghilangkan polutan dalam limbah bahkan dapat menghasilkan produk yang memiliki nilai guna. Sebagaimana digambarkan dalam Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Teknologi Plasma Sebagai *Cleaning Technology*

2.4.2 Aplikasi Plasma Non-Termal untuk Mengatasi Gas Buangan NO_x dan SO_x

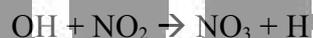
Gas buang yang mengandung NO_x dan atau SO_x, akan dikontakkan dengan plasma. Akibatnya akan terbentuk radikal yang menyebabkan terjadinya reaksi kompleks yang mengonversi NO_x dan atau SO_x menjadi produk tertentu. Mekanisme ini terjadi di dalam reaktor plasma penghilangan NO_x dan atau SO_x. Salah satu contohnya adalah sebagai berikut:



Gambar 2.12 Sistem Kerja Reaktor CRS Dari Contoh Sistem Reaktor Penghilangan NO Yang Dikembangkan oleh McMaster University

Gas buang dimasukkan ke dalam reaktor. Kemudian dikontakkan dengan plasma yang akan dibangkitkan pada bagian *tube* dan *nozzle*. *Tube* dan *nozzle* ini terletak pada *channels*. Ketika terjadi kontak antara gas buang dengan plasma, maka akan terbentuk radikal. Gas aditif seperti ammonia (NH₃) atau hidrokarbon seperti metana (CH₄) perlu ditambahkan untuk turut membangkitkan radikal sehingga menyebabkan reaksi pembentukan partikulat. Selain itu, penambahan gas aditif juga disesuaikan dengan produk akhir yang diharapkan terbentuk.

Contoh Reaksi: (*HO₂, OH, H*, adalah radikal yang teraktifkan oleh plasma)



Setelah melewati *channels* kemudian ditangkap oleh pengendap elektrostatik. Beberapa produk yang ditangkap dapat dimanfaatkan untuk pupuk seperti ammonium nitrat (NH₄)NO₃.

2.5 APLIKASI TEKNOLOGI PLASMA NON-TERMAL

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

Aplikasi plasma non termal dalam konteks pengolahan makanan berfungsi sebagai perawatan/perlakuan antimikroba untuk buah, sayuran, dan makanan lainnya dengan permukaan yang mudah pecah. Makanan ini tidak cocok disterilkan dengan bahan kimia, panas atau alat pengolah makanan konvensional lainnya (http://www.wikipedia.org/Nonthermal_plasma.htm).

Dalam konteks *bio-medical*, plasma non termal digunakan untuk sterilisasi jaringan otot hidup, meningkatkan penggumpalan darah, sterilisasi kulit tumbuhan, dan *Treatment of Human Melanoma, Macrophages, and Leishmania Major promastigote cell lines* (Fridman dkk., 2005)

Aplikasi dari plasma non-termal lainnya adalah untuk mengatasi gas buangan SO_x dan NO_x. Gas buang yang mengandung NO_x dan atau SO_x, akan

dikontakkan dengan plasma. Akibatnya akan terbentuk radikal yang menyebabkan terjadinya reaksi kompleks yang mengonversi NO_x dan atau SO_x menjadi produk tertentu. Mekanisme ini terjadi di dalam reaktor plasma penghilangan NO_x dan/atau SO_x (<http://www.freepatentsonline.com/6852200.html>).

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

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

2.6 PROSES GASIFIKASI PLASMA

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

Plasma reaktor akan dioperasikan pada kondisi *sub-stoichiometric* atau tanpa oksigen yang masuk dalam plasma reaktor, sehingga tidak terjadi proses pembakaran. Jadi sistem gasifikasi plasma ini bukanlah sebuah insinerator atau tungku pembakaran lainnya. Dengan suhu yang dapat mencapai 10.000 °C, plasma dapat menguraikan berbagai senyawa beracun dalam waktu 1/1.000 detik. Sehingga dapat mengeliminasi proses pembentukan senyawa lain dan

pembentukan gas beracun yang biasanya terjadi pada sebuah pembakaran dari insinerator.

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

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

5. Bahan bakar kaya energi yang disebut gas sintesis (*syngas*), yang digunakan untuk menghasilkan “listrik hijau” dari sumber yang berkelanjutan dan terbarukan.
6. Zat padat inert yang bermanfaat secara komersil yang biasa disebut “*slag*”. *Slag* dapat digunakan sebagai bahan pembuat jalan dan material bangunan.

Saat ini jenis plasma yang umumnya digunakan untuk proses gasifikasi plasma adalah plasma termal. Penelitian ini akan menguji kinerja plasma non-termal dalam meng-gasifikasi sampah padat untuk dapat dibandingkan dengan plasma termal yang telah berkembang.

2.6.1 Metode Gasifikasi Plasma

Ada dua metode yang digunakan pada gasifikasi plasma, yaitu “busur plasma” dan “obor plasma”.

Unit gasifikasi plasma “busur plasma” beroperasi pada prinsip yang sama dengan mesin las-busur, di mana sebuah busur listrik dibentuk antara dua elektroda. Busur berenergi tinggi menghasilkan temperatur yang tinggi, gas yang terionisasi tinggi. Busur plasma tersebut ditutup dalam sebuah ruangan. Material limbah dimasukkan ke dalam ruangan tersebut dan panas yang tinggi dari plasma

menyebabkan terjadinya pemecahan molekul-molekul organik (seperti minyak, pelarut, dan cat) menjadi atom-atom dasarnya. Dalam sebuah proses yang terkontrol dengan baik, atom-atom ini membentuk gas-gas yang tidak berbahaya seperti CO₂. Padatan seperti kaca dan logam meleleh membentuk material, yang sama seperti lava yang membeku, di mana logam beracun akan terenkapsulasi. Dengan teknologi busur plasma, tidak lagi ada pembakaran dan insinerasi serta debu yang terbentuk.

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

Gas yang terbakar dibersihkan dengan sistem *off-gas* dan dioksidasi menjadi CO₂ dan H₂O pada oksidator keramik. Potensi terjadinya polusi udara sedikit dikarenakan penggunaan pemanasan elektrik dalam ketidakterediaan oksigen bebas. Bagian anorganik dari limbah tetap terjaga dalam bentuk *slag* yang stabil dan tahan luluh.

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

2.6.2 Prinsip Kerja Gasifikasi Plasma

Dasar dari plasma dan pembentukan plasma sangatlah sederhana. Pertama, sebuah arus bertegangan tinggi dilewatkan antara dua elektroda yang menghasilkan “busur plasma” intensitas tinggi. Hal ini menyebabkan elektron dari udara sekitar tertarik dan mengubah gas menjadi plasma atau sebuah medan pancaran energi.

Proses ini sama dengan proses yang terjadi pada lampu fluoresensi dan lampu neon, dimana listrik tegangan rendah lewat di antara elektroda-elektroda dalam sebuah tabung lampu yang tertutup yang mengandung gas inert yang menyebabkan tereksitasinya elektron pada gas. Gas tersebut kemudian menghasilkan energi cahaya yang menerangi tabung. Busur plasma dapat menjadi sangat panas sehingga dapat melelehkan logam dan digunakan pada pemotongan logam.

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

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

karbon monoksida. Reaksi *reforming* ini memiliki kemungkinan untuk membentuk *fuel gas*.

2.6.3 Keuntungan Gasifikasi Plasma

Beberapa keuntungan didapatkan dengan pemanfaatan gasifikasi plasma dalam pengolahan sampah padat, diantaranya adalah sebagai berikut:

- Gasifikasi plasma memberikan sebuah solusi limbah yang berkelanjutan untuk semua jenis limbah, termasuk limbah padat perkotaan, limbah B3, bahkan limbah radioaktif, yang menghasilkan keuntungan ekonomi dan lingkungan yang nyata.
- Gasifikasi plasma tidak menghasilkan partikel debu ringan maupun partikel debu berat.
- Gasifikasi plasma diisi dengan limbah bebas, dan digerakkan oleh listrik, dan dapat dimatikan dengan hanya membuka saklar.
- Unit gasifikasi plasma tidak membutuhkan waktu 24/36 jam pembakaran bahan bakar yang mahal seperti insinerator pada umumnya untuk mencapai temperatur yang diinginkan.
- Sistem gasifikasi plasma hanya membutuhkan sedikit perawatan dan tidak seperti pembangkit tradisional, sistem ini tidak perlu dimatikan untuk melakukan perawatan dan pembersihan sementara.
- Gasifikasi plasma sebagai sistem skala besar memiliki tingkat efisiensi yang sama dengan sistem dengan skala yang lebih kecil.
- Gasifikasi plasma dapat memberikan tingkat fleksibilitas yang tinggi dalam waktu yang lama dan dapat beroperasi pada kapasitas kurang dari 100% sehingga ada fleksibilitas jika terjadi kekurangan aliran limbah.
- Gasifikasi plasma menghasilkan gas produk yang 90% kandungannya terdiri dari gas sintesis (*syngas*) yang memiliki nilai ekonomis.
- Gasifikasi plasma non-termal tidak membutuhkan energi/daya yang sangat besar seperti pada plasma termal dikarenakan perbedaan suhu yang sangat menonjol di antara keduanya. Hal inilah yang akan menjadi salah satu parameter uji kinerja reaktor plasma non-termal yang dilakukan pada penelitian ini.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Teknologi plasma merupakan salah satu metode pengolahan sampah padat sebagai pengganti insinerator. Teknologi plasma telah mengeliminasi kekurangan insinerator yang banyak mengandung substansi beracun pada gas keluarannya. Selain itu, teknologi plasma juga memberikan gas produk berupa gas sintesis (CO dan H_2) yang memiliki nilai ekonomis sebagai sumber energi.

Penelitian ini telah merancang-bangun sebuah reaktor plasma non-termal yang akan diuji kinerjanya dalam proses gasifikasi sampah padat. Selain untuk mengetahui kinerja, penelitian ini juga dilakukan untuk membandingkan kinerja plasma non-termal tersebut terhadap plasma termal, dan menjawab pertanyaan apakah plasma non-termal dapat dijadikan sebagai alternatif pengganti plasma termal yang masih membutuhkan banyak energi pada proses operasinya. Pertanyaan ini dapat dijawab dengan parameter utama yaitu kinerja pembentukan gas sintesis.

Penelitian ini merupakan langkah awal dalam pengembangan aplikasi teknologi plasma untuk pengolahan sampah padat. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui apakah teknologi plasma non-termal memiliki kinerja yang dapat dibandingkan atau lebih baik daripada teknologi plasma termal. Reaktor yang digunakan akan diuji kinerjanya melalui analisis gas produk yang dihasilkan melalui proses gasifikasi sampah padat di dalam reaktor tersebut. Gas produk diambil sebagai sampel, dan akan dianalisis dengan parameter-parameter yang utama, yaitu kinerja pembentukan gas sintesis yang dilihat dari kinerja pembentukan CO dan H_2 . Dengan demikian, metode penelitian yang digunakan adalah tahap-tahap penelitian yang dapat mendukung tercapainya tujuan tersebut. Tahap-tahap penelitian tersebut adalah mengikuti diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

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

- 3.1. Persiapan Alat dan Bahan
- 3.2. Persiapan Sampah Padat
- 3.3. Proses Gasifikasi Sampah Padat
- 3.4. Analisis Gas Produk Gasifikasi Sampah Padat
- 3.5. Pengolahan Data

3.1 PERSIAPAN ALAT DAN BAHAN

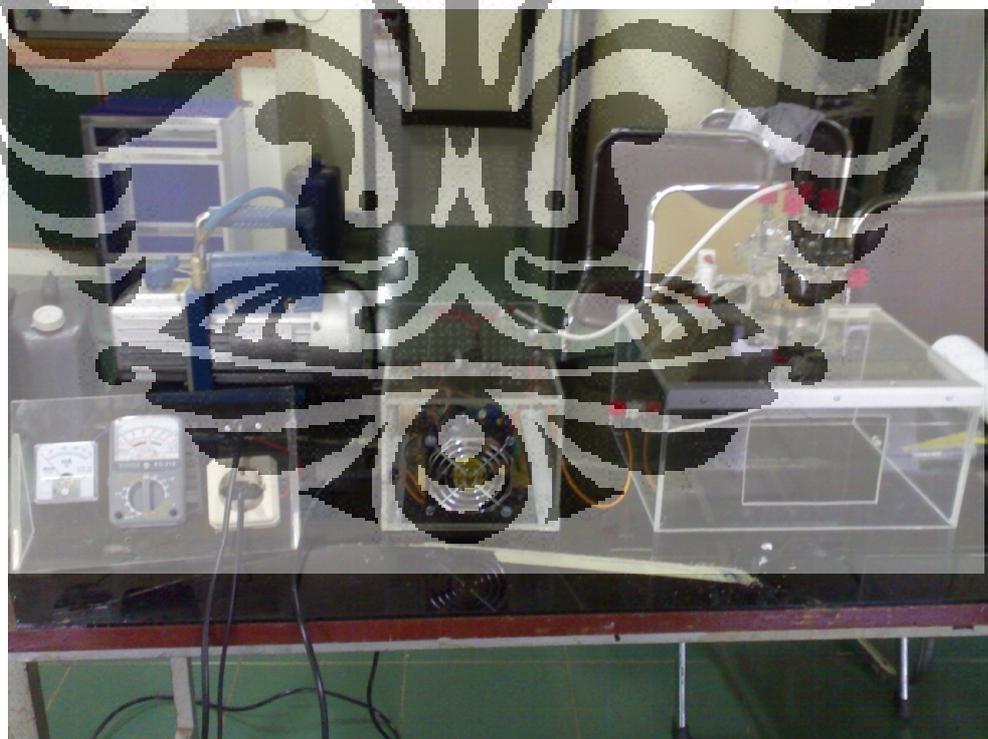
Tahap pertama yang dilakukan adalah menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan pada penelitian. Alat dan bahan yang terutama harus disiapkan adalah:

- Reaktor plasma non-termal
- Rangkaian pembangkit plasma (plasmatron) yang berbasis *ballast* lampu CFL 220V/23W

- Elektrode tegangan tinggi
- Elektrode massa (*ground*)

3.1.1 Reaktor Plasma Non-Termal

Alat yang paling utama harus dipersiapkan adalah reaktor tempat berlangsungnya reaksi. Reaktor telah dirancang-bangun sebelumnya oleh tim peneliti. Pengecekan reaktor dilakukan dengan metode air sabun. Udara dari kompresor dialirkan ke dalam reaktor dengan salah satu valve terbuka sedikit untuk melewati udara, kemudian meneteskan air sabun ke setiap bagian yang berpotensi bocor, lalu mengatasinya bila terdapat kebocoran. Sebuah lembaran *silicon seal* juga dapat ditambahkan pada tutup reaktor untuk mengurangi kebocoran. Reaktor yang digunakan dirangkai dengan peralatan lainnya, dan dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3.2 Rangkaian Peralatan Yang Digunakan Pada Penelitian

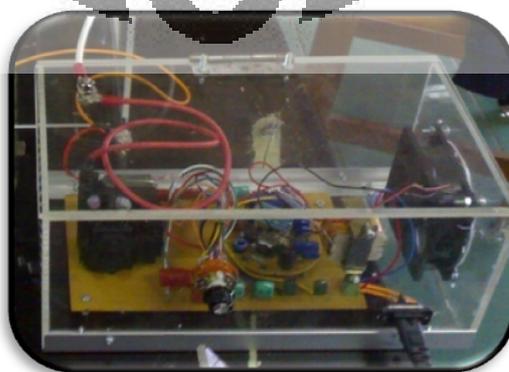
Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa reaktor terbuat dari bahan gelas tahan panas agar fenomena-fenomena yang terjadi selama reaksi berlangsung

dapat terlihat dengan jelas. Pada bagian atas (tutup) reaktor terdapat elektrode tegangan tinggi (elektrode saja) yang merupakan *tungsten rod*, yang akan dijelaskan kemudian. Tutup reaktor dilapisi dengan *silicon seal* dan juga digunakan *stainless steel* sebagai pengunci. Sedangkan pada bagian bawah reaktor terdapat elektrode massa (*ground*) berupa pelat grafit dimana sampah padat ditempatkan, yang akan dijelaskan kemudian. Pada reaktor terdapat dua buah valve, yang terdapat pada bagian atas dan bawah reaktor. Valve bagian atas reaktor akan tersambung dengan tabung sampel gas produk (*gas trap*) dan valve bagian bawah tersambung dengan pompa vakum ataupun tabung gas nitrogen (sesuai variasi kondisi operasi reaktor yang akan dilakukan).

Penelitian dilakukan dengan operasi *batch* dengan suhu reaksi plasma non-termal yaitu sekitar 300-450K pada tekanan atmosferik.

3.1.2 Plasmatron Yang Berbasis *Ballast* Lampu CFL 220V/23W

Alat utama selanjutnya yang harus dipersiapkan adalah rangkaian pembangkit plasma (plasmatron). Plasmatron yang digunakan adalah plasmatron yang berbasis *ballast* lampu CFL 220V/23W. Pemilihan pemakaian plasmatron tipe ini adalah berdasarkan penelitian yang dilakukan sebelumnya oleh tim peneliti. Pengecekan plasmatron dilakukan dengan menyalakan plasmatron selama 10 menit, dan melihat apakah terdapat kebocoran listrik (*short*) baik pada *flyback* maupun sirkuit. Plasmatron berbasis *ballast* lampu CFL 220V/23W ini dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Plasmatron Yang Berbasis *Ballast* Lampu CFL 220V/23W

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa plasmatron terdiri dari *ballast* lampu CFL 220V/23W yang dirangkai dengan *flyback* atau *Integrated High Voltage Transformator* untuk menaikkan tegangan pada plasmatron.

3.1.3 Elektrode Tegangan Tinggi

Elektrode tegangan tinggi ini atau selanjutnya akan disebut dengan elektrode saja terdapat pada tutup reaktor. Elektrode ini akan dihubungkan dengan plasmatron ketika proses gasifikasi plasma berlangsung. Elektrode yang digunakan adalah *tungsten rod*. *Tungsten* adalah suatu unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang **W** dan nomor atom 74. Nama unsur ini diambil dari bahasa Latin *wolframium*. Logam transisi yang sangat keras dan berwarna kelabu sampai putih ini ditemukan pada mineral seperti *wolframit* dan *schelit*. *Tungsten* memiliki titik lebur yang lebih tinggi dibandingkan zat non-alloy lainnya. Hal ini menjadi salah satu alasan mengapa *tungsten rod* yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3.4 *Tungsten Rod* Sebagai Elektrode Tegangan Tinggi

3.1.4 Elektrode Massa (*Ground*)

Elektrode massa (*ground*) adalah elektrode yang ditempatkan di dasar reaktor. *Ground* yang digunakan terbuat dari grafit karena grafit relatif paling tahan terhadap dampak plasma dan listrik tegangan tinggi. Grafit juga disebut sebagai timbal hitam. Grafit, sebagaimana berlian, adalah bentuk alotrop karbon, karena kedua senyawa ini mirip namun struktur atomnya mempengaruhi sifat kimiawi dan fisiknya. Grafit berwarna kelabu. Akibat delokalisasi elektron

antarpermukannya-lah, maka grafit dapat berfungsi sebagai konduktor listrik. Pada pelat grafit inilah ditempatkan sampah padat yang akan di-gasifikasi plasma.

Alat dan bahan lainnya yang harus disiapkan dapat dilihat pada subbab 3.3.



Gambar 3.5 *Ground* Yang Berupa Pelat Grafit

3.2. PERSIAPAN SAMPAH PADAT

Setelah menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan pada penelitian ini, tahap selanjutnya yang harus dilakukan adalah menyiapkan sampah padat yang akan di-gasifikasi plasma. Sampah padat ini terdiri dari empat jenis sampah organik, yaitu daun-daunan, serbuk kayu, kertas, dan plastik.

- *Daun-daunan*

Daun-daunan yang akan di-gasifikasi plasma pada penelitian ini diperoleh dari sekitar lingkungan Universitas Indonesia. Daun-daunan merupakan sampah organik yang sebagian besar terbentuk oleh polimer karbohidrat (pektin, selulosa, hemiselulosa, dan lignin sebagai penyusun penting).

- *Serbuk kayu*

Serbuk kayu yang dimaksudkan disini adalah serbuk gergaji yang diperoleh dari pengrajin kayu yang berada di sekitar lingkungan Universitas Indonesia. Serbuk gergaji merupakan kayu yang tersusun atas beberapa bagian utama yaitu selulosa dan lignin.

- *Kertas*

Kertas yang dimaksudkan disini adalah kertas bekas pakai (bekas fotokopi) yang diperoleh dari layanan jasa fotokopi yang ada di sekitar lingkungan Universitas Indonesia. Kertas merupakan serat alami yang mengandung selulosa dan hemiselulosa.

- *Plastik*

Plastik yang dimaksudkan disini adalah kantong plastik kresek hitam yang diperoleh dari sekitar lingkungan Universitas Indonesia. Plastik merupakan polimer polietilen (PE), polistiren (PS), ABS, polikarbonat (PC).

3.3. PROSES GASIFIKASI PLASMA

Setelah semua alat dan bahan, serta sampah padat yang akan di-gasifikasi plasma telah disiapkan, maka tahap selanjutnya adalah melakukan proses gasifikasi plasma tersebut. Proses gasifikasi plasma dilakukan dengan menggunakan reaktor plasma non-termal dengan plasmatron yang berbasis *ballast* lampu CFL 220V/23W selama 10 menit.

Berikut adalah alat dan bahan, serta prosedur untuk melakukan gasifikasi sampah padat dengan reaktor plasma non-termal.

3.3.1 Alat dan Bahan

Alat:

- 1 unit reaktor plasma non-termal untuk tempat berlangsungnya proses gasifikasi plasma
- 1 unit plasmatron yang berbasis *ballast* lampu CFL 220V/23W
- 1 buah elektrode berupa *tungsten rod*
- Elektrode massa (*ground*) yang berupa pelat grafit
- *Gas trap* untuk mengambil sampel gas produk
- *Gas chromatography* yang terdapat di laboratorium Rekayasa Reaksi Kimia dan Konversi Gas Alam Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia untuk menganalisis gas produk
- Pompa vakum untuk membuat kondisi operasi vakum pada reaktor
- *Vacuum gauge* untuk mengetahui kondisi tekanan di dalam reaktor

- *Voltmeter* dan *amperemeter* untuk mengukur voltase dan arus input
- *Stopwatch* untuk menghitung waktu berlangsungnya proses
- Timbangan untuk menimbang massa sampah padat

Bahan:

- Sampah padat berupa daun-daunan, serbuk kayu, kertas, dan plastik
- Gas nitrogen untuk pengisi reaktor sebagai variasi kondisi operasi

3.3.2 Prosedur Proses Gasifikasi Sampah Padat

1. Memastikan kabel sumber tegangan dan *ground* telah tersambung dengan baik dan benar.
2. Meletakkan sampah padat yang akan di-gasifikasi sebanyak 0,35 gr di atas plat grafit.
3. Mengisolasi reaktor dengan menutup rapat tutup reaktor dan semua valve yang berhubungan dengan reaktor.
4. Memastikan elektroda *tungsten rod* (1 buah) yang akan digunakan telah terpasang pada tutup reaktor dengan jarak elektrode-*ground* sejauh 2 cm.
5. Memasang kabel tegangan tinggi keluaran plasmatron pada elektrode *tungsten rod*.
6. Menghubungkan *gas trap* dengan valve bagian atas reaktor dimana valve pada *gas trap* berada dalam keadaan tertutup.
7. Membuat reaktor dalam keadaan vakum; menghubungkan pompa vakum dengan valve bagian bawah reaktor, membuka valve, kemudian memvakum reaktor sampai tekanannya mendekati 0 atm absolut, lalu menutup kembali valve tersebut. Langkah ini dilakukan hanya ketika melakukan variasi kondisi operasi reaktor yang vakum.
8. Menghubungkan tabung gas nitrogen dengan valve bagian bawah reaktor, membuka valve, kemudian mengalirkan gas nitrogen ke dalam reaktor sampai reaktor terisi penuh, kemudian menghentikan aliran gas nitrogen, lalu menutup kembali valve tersebut. Langkah ini dilakukan hanya ketika melakukan variasi kondisi operasi reaktor yang diisi gas nitrogen.
9. Mengatur plasmatron sehingga plasmatron menggunakan kapasitor 1000nF dengan memutar *rotary switch* yang terdapat pada plasmatron.

10. Membuka valve reaktor bagian atas (yang terhubung dengan *gas trap*) dan valve pada *gas trap* agar gas produk yang akan terbentuk selama proses berlangsung dapat masuk ke dalam *gas trap*.
11. Memulai proses gasifikasi plasma dengan menyalakan plasmatron selama 10 menit dan mengamati fenomena yang terjadi.
12. Mencatat voltase dan arus input yang terbaca pada *voltmeter* dan *amperemeter*.
13. Mematikan plasmatron (setelah 10 menit).
14. Menutup kembali valve reaktor bagian atas dan valve pada *gas trap* kemudian mencabut *gas trap* dari reaktor.
15. Membuka tutup reaktor, mendeteksi keberadaan CO dengan menggunakan *CO detector*, dan menimbang massa sisa sampah padat, lalu membersihkan *pelat* grafit.
16. Menganalisis gas produk gasifikasi plasma yang berada di dalam *gas trap* dengan menggunakan GC.
17. Mengulangi langkah 1-15 untuk variasi sampah padat lainnya.

3.4 ANALISIS GAS PRODUK

Setelah melalui proses gasifikasi sampah padat, selanjutnya sampel gas produk yang berada di dalam *gas trap* akan dianalisis menggunakan GC. Sampel gas produk pada *gas trap* diambil satu kali untuk setiap satu kali proses gasifikasi plasma, yaitu sebanyak 1 mL menggunakan *syringe*. Satu kali proses gasifikasi adalah setiap satu jenis sampah padat yang di-gasifikasi pada setiap satu kali variasi kondisi operasi reaktor (vakum atau diisi gas nitrogen).

Prosedur menganalisis gas produk gasifikasi sampah padat dengan menggunakan GC adalah sebagai berikut:

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 *valve* utama dari kencang menjadi kendur, sehingga tekanan akan langsung naik.
 - Membuka *valve* 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 *valve* dalam keadaan tertutup (posisi *valve* longgar).
 - Membuka *valve* induk di tabung dengan memutar ke arah kiri (arah kebalikan jarum jam) dan lihat tekanan gas, yang menunjukkan tekanan dalam tabung.
 - Membuka *valve* regulator perlahan-lahan ke arah kanan (searah jarum jam), lalu atur tekanan gas yang diinginkan.
 - Memastikan instalasi gas baik dari tabung sampai perpipaan tidak bocor (cek kebocoran menggunakan pipa sabun). Untuk gas-gas yang beracun dan mudah terbakar (CO , H_2 , CH_4), langkah ini harus dilakukan terlebih dahulu sebelum langkah pertama menggunakan gas inert N_2 .
4. Prosedur menutup gas
 - Menutup *valve* induk di tabung dengan memutar ke arah kanan (searah jarum jam) tunggu hingga tekanan gas di *pressure gauge* menunjukkan \emptyset .
 - Menutup *valve* di regulator pelan-pelan ke arah kiri (arah kebalikan jarum jam) sampai *valve* longgar dan tunggu tekanan gas di *pressure gauge* sampai menunjukkan angka \emptyset .
5. Prosedur menyalakan GC
 - Memastikan tekanan *primary* 600 kPa, *carrier gas* \pm 150 kPa.
 - Mengatur suhu menjadi 130 – 100 – 100 °C.

- Menunggu hingga stabil (hingga lampu pada GC berkedip-kedip).
 - Menyalakan *current* pada 6 mA.
6. Prosedur menyalakan *chromatopac* (dengan kolom *porapak*)
- Menghubungkan *chromatopac* dengan GC, tekan: *shift down* bersama dengan I,N,I, lalu tekan *enter*, akan muncul *initialize* pada kertas recorder.
 - Mengatur tinta di sebelah kiri, tekan: *shift down* bersama dengan *plot*, lalu tekan *enter*, untuk mengatur gunakan “*coarse*” kemudian tekan kembali *shift down* bersama dengan *plot*, lalu tekan *enter*.
 - Input *attenuasi*.
Jika *attenuasi* kecil maka segala *impurities* akan terlihat *peak*-nya, sehingga digunakan *attenuasi* yang agak besar, tekan: *attn* bersama dengan angka 7, lalu tekan *enter*.
 - Mengatur kecepatan kertas, tekan: *speed* bersama dengan angka 10, lalu tekan *enter*.
 - Mengatur *stop time*, tekan: *stop time* bersama dengan angka 3 lalu tekan *enter*.
 - Untuk melihat parameter-parameter yang ada, tekan: *shift down* bersama dengan *print* dan *width*, lalu tekan *enter*.
 - Mengetahui apakah GC sudah stabil (garis lurus), tekan: *shift* bersama dengan *plot*, lalu tekan *enter*. Kestabilan juga dapat dilihat dari tekan: *print* bersama *ctrl* dan *width* secara bersamaan. Nilai yang keluar harus lebih besar dari 100, jika belum mencapai, maka *coarse* atau *fine* diputar untuk mendapatkan hasil yang diinginkan.
7. Prosedur mematikan GC
- Mematikan *current*.
 - Menurunkan temperatur menjadi 30-30-30 kemudian GC dibuka agar pendinginan terjadi lebih cepat.
 - Setelah suhu kolom menjadi 80 (pada *indicator*) kemudian GC baru dapat dimatikan.
8. Prosedur mematikan aliran gas
- Sesuai dengan prosedur menutup gas.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, penelitian ini melakukan variasi sampah padat sebanyak empat jenis, yaitu daun-daunan, serbuk kayu, kertas, dan plastik, dengan variasi kondisi reaktor, yaitu vakum dan diisi gas nitrogen. Dengan demikian akan diperoleh delapan buah sampel gas produk untuk delapan kali proses gasifikasi plasma. Kedelapan sampel inilah yang akan digunakan sebagai data yang akan diolah untuk mengetahui kinerja reaktor plasma non-termal dengan parameter-parameter yang akan dijelaskan selanjutnya.

3.5 PENGOLAHAN DATA

Setelah melakukan analisis gas produk gasifikasi plasma non-termal dengan menggunakan GC, maka langkah selanjutnya adalah mengolah data yang telah diperoleh untuk melakukan uji kinerja. Parameter-parameter utama yang digunakan untuk mengetahui kinerja tersebut adalah:

- Kinerja pembentukan gas sintesis
- Reduksi massa sampah padat
- Kebutuhan daya

3.5.1 Kinerja Pembentukan Gas Sintesis

Kinerja pembentukan gas sintesis dilakukan dengan melihat kinerja pembentukan CO dan H₂ berdasarkan jenis sampah padat yang di-gasifikasi plasma, serta kondisi operasi reaktor yang vakum dan diisi gas nitrogen.

Penghitungan volume gas CO dan H₂ yang terbentuk menggunakan persamaan hasil kalibrasi GC seperti yang terlihat pada persamaan (3.1) dan (3.2).

- Penghitungan volume gas CO

$$y = 3.10^{-6}x + 0,2 \quad (3.1)$$

dimana: y = volume gas CO, mL
 x = luas area gas CO yang terbaca pada GC

- Penghitungan volume gas H₂

$$y = -0,05767 + 4,6879.10^{-7}x \quad (3.2)$$

dimana: y = volume gas H₂, mL
 x = luas area gas H₂ yang terbaca pada GC

3.5.2 Persentase Reduksi Massa

Reduksi massa sampah padat yang dimaksudkan disini adalah pengurangan (selisih) massa sampah padat yang terjadi sebelum dan setelah proses gasifikasi plasma. Rumus yang digunakan untuk menghitung persentase reduksi massa tersebut dapat dilihat pada persamaan (3.3).

$$\%W = (W_0 - W_1) * 100\% / W_0 \quad (3.3)$$

dimana: %W = persentase reduksi massa sampah padat
 W_0 = massa sebelum proses berlangsung, gr
 W_1 = massa yang tersisa setelah proses, gr

3.5.3 Kebutuhan Daya

Kebutuhan daya diperoleh dari data voltase dan arus input yang diperoleh ketika proses gasifikasi plasma berlangsung, yang dihitung dengan menggunakan persamaan (3.4).

$$P = V * I \quad (3.4)$$

dimana: P = daya, dalam satuan watt
 V = voltase input, dalam satuan volt
 I = arus input, dalam satuan ampere

Parameter-parameter tersebut di atas dievaluasi untuk setiap 0,35 gr sampah padat yang di-gasifikasi plasma dengan setiap kondisi operasi reaktor yang vakum dan diisi nitrogen (delapan data, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya). Dari evaluasi inilah dapat diketahui kinerja reaktor plasma non-termal dalam mem-gasifikasi sampah padat, yang lebih lanjut dapat dibandingkan dengan kinerja plasma termal.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses gasifikasi sampah padat ini dilakukan dengan menggunakan reaktor plasma non-termal dengan rangkaian pembangkit plasma (plasmatron) yang berbasis *ballast* lampu CFL 220V/23W. Proses gasifikasi dilakukan selama 10 menit untuk empat jenis sampah padat organik, yaitu daun-daunan, serbuk kayu, kertas, dan plastik, pada dua kondisi operasi reaktor, yaitu vakum dan diisi gas nitrogen. Setiap sampel gas produk diambil dan dianalisis dengan menggunakan kromatografi gas (GC). Selain itu terdapat juga data-data yang diperoleh pada saat proses gasifikasi berlangsung, yaitu voltase dan arus input, serta massa sampah padat yang tersisa setelah proses gasifikasi. Seluruh analisis GC dan data yang dicatat ini diolah sesuai metode penelitian, dan dapat dilihat pada bab ini.

Bab ini berisi data-data dan pembahasan sebagai berikut:

- Data yang dicatat saat proses gasifikasi
- Data analisis GC terhadap sampel gas produk gasifikasi
- Pengolahan data analisis GC, yaitu perhitungan volume gas CO dan H₂
- Pengolahan data yang dicatat saat proses gasifikasi, yaitu perhitungan persentase reduksi massa sampah padat dan perhitungan kebutuhan daya proses

4.1. DATA YANG DICATAT SAAT PROSES GASIFIKASI

Proses gasifikasi dilakukan untuk empat jenis sampah padat organik, yaitu daun-daunan, serbuk kayu, kertas, dan plastik, pada dua kondisi operasi reaktor, yaitu vakum dan diisi gas nitrogen. Sehingga terdapat 8 kali proses gasifikasi dan 8 data yang dicatat saat proses gasifikasi. Setiap satu kali proses gasifikasi diambil sampel gas produknya dan dianalisis dengan menggunakan GC yang hasilnya dapat dilihat pada subbab 4.2. Setiap sampel adalah S-1 sebagai sampel pertama sampai dengan S-8 sebagai sampel terakhir. Data-data yang dicatat saat proses gasifikasi adalah voltase dan arus input, serta massa sampah padat yang tersisa setelah proses gasifikasi, yang dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4.1 Data Yang Dicatat Saat Proses Gasifikasi

Sampel	Jenis Sampah Padat	Kondisi Operasi Reaktor	Data-data yang dicatat		
			Voltase (V)	Arus (mA)	Wsisa (gr)
S-1	daun-daunan	vakum	220	150	0,29
S-2	serbuk kayu	vakum	210	170	0,28
S-3	kertas	vakum	210	110	0,28
S-4	plastik	vakum	210	100	0,29
S-5	daun-daunan	diisi gas nitrogen	210	225	0,25
S-6	serbuk kayu	diisi gas nitrogen	210	225	0,29
S-7	kertas	diisi gas nitrogen	210	200	0,30
S-8	plastik	diisi gas nitrogen	210	200	0,31

Data ini akan digunakan untuk perhitungan persentase reduksi sampah padat dan perhitungan kebutuhan energi/daya proses pada subbab 4.3.

4.2 DATA ANALISIS KROMATOGRAFI GAS

Data yang diperoleh dari analisis GC berupa kromatogram yang akan diolah pada subbab 4.4. Data analisis GC ini diperoleh dengan mengikuti prosedur yang sesuai dengan metode penelitian. Data analisis GC tersebut dapat dilihat pada gambar berikut.

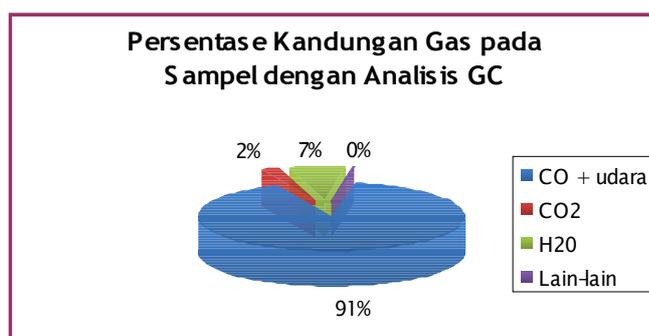
**Gambar 4.1** Kromatogram Hasil Analisis GC Terhadap Sampel S-1

Pada kromatogram di atas dapat terlihat bahwa terdapat empat buah puncak (*peak*) yang terbentuk. Kromatogram menganalisis gas sampel S-1 (daun-daunan pada kondisi operasi reaktor yang vakum) sebanyak 1 mL. Pada *peak* pertama terbaca dengan *retention time* 0,027 merupakan gas-gas lainnya yang tidak dibahas pada penelitian ini. *Peak* kedua, dengan *retention time* 0,307 adalah gas CO. Namun, *peak* gas CO dan udara adalah sama. Jadi, dengan penggunaan *CO detector* dapat dipastikan bahwa terdapat kandungan gas CO pada sampel, yang dihasilkan dari proses gasifikasi pada penelitian ini. Dengan *peak* yang sama ini, artinya gas CO dan udara berbagi satu *peak* bersama-sama, sehingga untuk mengetahui luas area gas CO pada sampel, luas area vakum harus diketahui terlebih dahulu. Karena untuk menghitung volume gas CO pada sampel, luas area gas CO yang terbaca pada analisis GC harus dikurangi dengan luas area vakum tersebut.

Peak ketiga dengan *retention time* 0,562 adalah gas CO₂, dan *peak* keempat adalah gas H₂O dengan *retention time* 1,672. Gas CO₂ dan H₂O dapat terbentuk karena pada kondisi reaktor yang vakum (yang adalah vakum ringan), masih memungkinkan adanya kandungan gas O₂ walaupun hanya sedikit sekali. Dengan adanya gas O₂, dapat memungkinkan terjadinya pembakaran hidrokarbon yang menghasilkan CO₂ dan H₂O dengan reaksi umum sebagai berikut:



Dari kromatogram dapat digambarkan sebuah *pie chart* yang memperlihatkan persentase kandungan gas-gas tersebut. Dapat dilihat bahwa kandungan campuran gas CO dan udara memiliki persentase terbesar, yaitu sekitar 91%.



Kromatogram hasil analisis GC terhadap sampel lainnya dapat dilihat pada lampiran. Dari kromatogram hasil analisis GC ini diperoleh data berupa luas area gas CO dan H₂ yang rumus perhitungannya dapat dilihat pada lampiran. Data-data tersebut dapat dilihat pada tabel di bawah.

Tabel 4.2 Hasil Analisis GC Terhadap Sampel

Sampel	Luas Area Gas	
	Gas CO	Gas H ₂
S-1	52315,67	-
S-2	24538,67	-
S-3	27119,67	-
S-4	2989,67	-
S-5	101632,00	-
S-6	101658,00	-
S-7	3135,67	-
S-8	-28818,30	-

Melihat hasil yang diperoleh dari analisis GC untuk setiap sampel gas produk setiap proses gasifikasi yang berlangsung, tidak ada satu sampel pun yang terdapat gas H₂. Pada kalibrasi GC terhadap gas-gas (dapat dilihat pada lampiran), diperoleh hasil bahwa gas CO memiliki *retention time* 0,287 dan gas H₂ memiliki *retention time* 0,237. Dengan hasil ini dapat memungkinkan pembacaan yang sama antara gas CO dan H₂ tersebut.

Pada saat proses gasifikasi berlangsung, terjadi perubahan tekanan. Misalnya pada kondisi operasi awal reaktor yang vakum dengan tekanan mendekati nol atmosfer absolut, setelah proses berlangsung tekanannya akan bertambah. Tekanan yang bertambah ini artinya volume gas dalam reaktor yang berkurang. Volume yang berkurang ini menyebabkan jarak antarmolekul yang semakin dekat, dan molekul semakin sering terjadi tumbukan dan saling tarik-menarik. Sehingga ikatan antarmolekul pun semakin mungkin terjadi. Antara molekul CO dan H₂ akan terjadi ikatan van der Waals, sehingga keberadaan gas CO akan mempengaruhi keberadaan gas H₂. Hal inilah yang menjadi penyebab gas H₂ tidak terbaca pada analisis GC.

Dari seluruh analisis dan data yang telah diberikan sejauh ini, dapat dikatakan bahwa gas CO dianggap sebagai gas produk utama, yang digunakan pada evaluasi kinerja selanjutnya. Dan pada proses gasifikasi plasma non-termal yang dilakukan penelitian ini, pembentukan gas sintesis (CO dan H₂) yang optimal belum dapat dicapai. Hal ini dapat juga dikarenakan rangkaian peralatan yang digunakan pada penelitian ini masih sederhana dan berskala laboratorium. Berbeda dengan teknologi plasma termal yang telah diaplikasikan dan banyak diteliti, dimana rangkaian peralatannya lebih kompleks dengan *scrubber*, *gasifier*, dan sebagainya yang memisahkan gas produk dengan lebih baik dan pembentukan gas sintesisnya pun lebih optimal.

4.3 PENGOLAHAN DATA

4.3.1 Persentase Reduksi Massa Sampah Padat

Data yang dicatat saat proses gasifikasi berlangsung dapat dilihat pada subbab 4.1. Data-data tersebut akan diolah untuk memperoleh persentase reduksi massa sampah padat, dengan menggunakan persamaan (3.3) seperti yang telah disebutkan pada metode penelitian.

$$\%W = (W_0 - W_1) * 100\% / W_0 \quad (3.3)$$

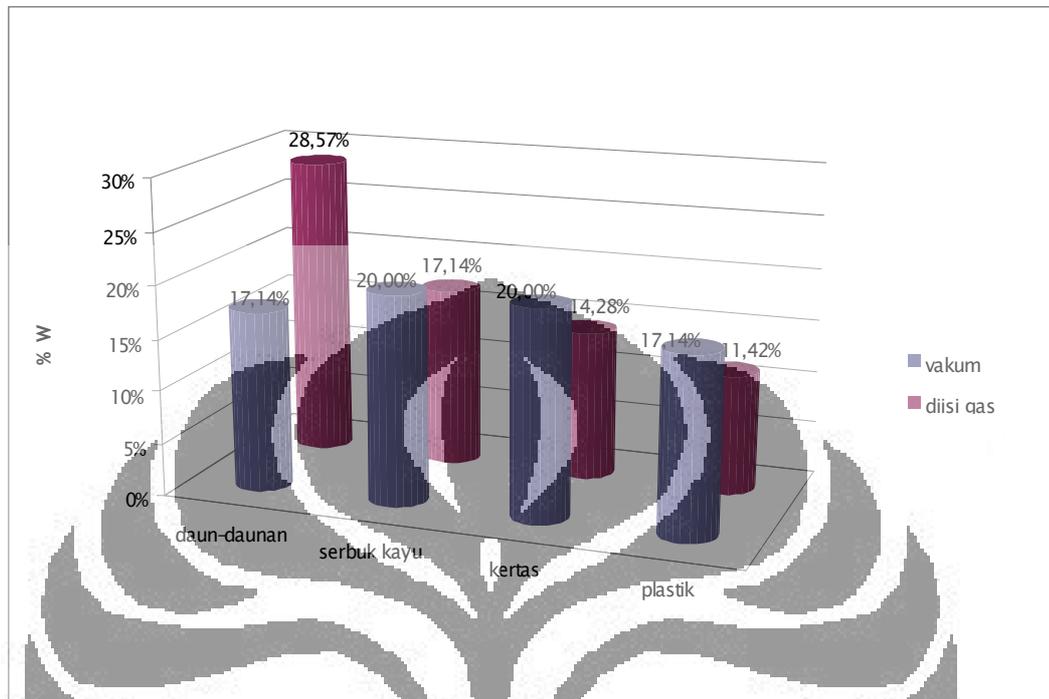
dimana: %W = persentase reduksi massa sampah padat
 W₀ = massa sebelum proses berlangsung, gr
 W₁ = massa yang tersisa setelah proses, gr

Pengolahan data berupa perhitungan dengan rumus yang sesuai dengan metode penelitian yang hasilnya dapat dilihat pada tabel berikut dan dapat digambarkan dengan diagram seperti pada Gambar 4.2.

Tabel 4.3 Persentase Reduksi Massa Sampah Padat

Sampel	%W
S-1	17.14%
S-2	20.00%
S-3	20.00%
S-4	17.14%
S-5	28.57%
S-6	17.14%

S-7	14.28%
S-8	11.42%



Gambar 4.2 Diagram Persentase Reduksi Massa Sampah Padat

Dari diagram tersebut dapat dilihat bahwa pada kondisi operasi reaktor yang vakum, persentase reduksi massa terbesar terjadi pada proses terhadap serbuk kayu dan kertas yaitu sebesar 20%, dan 17% reduksi terjadi pada proses terhadap daun-daunan dan plastik. Hasil ini tidak menunjukkan suatu perbedaan yang mencolok diantara keempat jenis sampah padat tersebut. Pada kondisi operasi yang diisi gas nitrogen, persentase reduksi terbesar terjadi pada proses dengan urutan terhadap daun-daunan, serbuk kayu, kertas, dan terakhir plastik. Dan jika dibandingkan antara kondisi operasi reaktor yang vakum dan diisi gas nitrogen untuk setiap jenis sampah padat, pada daun-daunan persentase reduksi massa untuk kondisi vakum (17,14%) lebih sedikit daripada kondisi reaktor diisi gas nitrogen (28,57%). Daun-daunan berbeda dengan tiga jenis sampah lainnya, yang persentase reduksi massa pada kondisi vakumnya lebih banyak daripada kondisi yang diisi gas nitrogen.

Dari hasil tersebut, yang dapat dilihat adalah bahwa pada setiap proses gasifikasi yang dilakukan, selalu menghasilkan reduksi massa. Reduksi massa sampah padat merupakan salah satu parameter kinerja proses gasifikasi. Dengan

adanya reduksi massa, berarti telah terjadi suatu proses gasifikasi yang mengubah sampah padat menjadi gas-gas produk. Perbedaan persentase reduksi ini dapat dikarenakan perbedaan kinerja setiap proses gasifikasi. Tidak ada urutan yang berarti di setiap jenis sampah padat untuk setiap kondisi operasi reaktor. Pada dasarnya seluruh sampah padat ini nantinya diharapkan dapat berubah seluruhnya menjadi gas produk. Hal ini dikarenakan sampah padat yang digunakan pada penelitian ini merupakan sampah organik yang mengandung senyawa organik. Senyawa organik adalah senyawa kimia yang molekulnya mengandung karbon, hidrogen, dan oksigen. Sehingga yang terjadi secara umum adalah sebagai berikut:

Senyawa organik → gasifikasi plasma → gas-gas produk

Pada penelitian ini tidak dilakukan uji bobot tetap sehingga massa sampah padat awal yang ditimbang dapat dimungkinkan masih mengandung air. Sampah padat ini merupakan biomassa (sampah padat organik) yang banyak mengandung air, dan pada tahap persiapan sampah padat tidak dilakukan pengeringan terlebih dahulu terhadap sampah padat tersebut. Sehingga, dapat dimungkinkan pula bahwa pengurangan massa yang terjadi adalah pengurangan massa air yang teruapkan karena temperatur plasma yang cukup untuk menguapkan kandungan air tersebut. Kandungan air yang teruapkan ini dapat dimungkinkan juga menjadi salah satu sumber gas H₂O yang terdapat pada gas produk seperti yang terbaca pada analisis GC.

4.3.2 Kebutuhan Daya Proses Gasifikasi

Kebutuhan daya setiap satu kali proses gasifikasi diperoleh dari perhitungan dengan persamaan (3.4) yang sesuai dengan metode penelitian. Data-data yang diolah merupakan data voltase dan arus input yang dicatat saat proses gasifikasi berlangsung, dan dengan waktu gasifikasi selama 10 menit maka persamaan tersebut menjadi seperti yang terdapat pada persamaan (4.1).

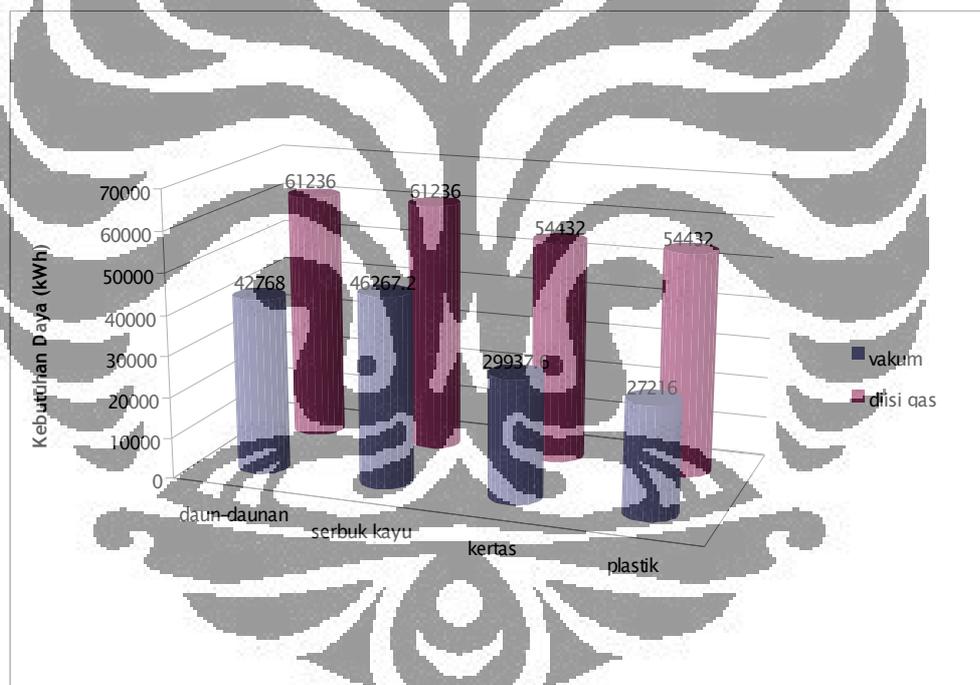
$$P = V * I * 1\text{jam}/60\text{menit} * 10\text{menit} \quad (4.1)$$

dimana: P = daya, dalam satuan watt-hour
 V = voltase input, dalam satuan volt
 I = arus input, dalam satuan ampere

Hasil perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel di bawah dan dapat digambarkan dengan diagram seperti pada Gambar 4.3.

Tabel 4.4 Kebutuhan Daya Proses Gasifikasi

Sampel	Kebutuhan Daya (kWh)
S-1	42768,0
S-2	46267,2
S-3	29937,6
S-4	27216,0
S-5	61236,0
S-6	61236,0
S-7	54432,0
S-8	54432,0



Gambar 4.3 Diagram Kebutuhan Daya Proses Gasifikasi

Dari diagram kebutuhan proses gasifikasi pada kondisi operasi reaktor yang vakum, untuk setiap jenis sampah padat terlihat bahwa proses pada serbuk kayu membutuhkan daya yang terbesar, disusul dengan daun-daunan, kertas, dan yang terakhir plastik yang paling sedikit membutuhkan daya. Sementara pada kondisi operasi reaktor yang diisi gas nitrogen, proses pada serbuk kayu dan daun-daunan membutuhkan daya yang sama (61236 kWh), yaitu lebih besar dari daya

yang dibutuhkan proses pada kertas dan plastik (keduanya sebesar 54432 kWh). Hasil ini tidak memberikan perbedaan yang berarti untuk setiap jenis sampah padat yang berbeda. Sementara jika dibandingkan antara kondisi operasi yang vakum dan diisi gas nitrogen dapat terlihat bahwa untuk setiap jenis sampah, daya yang dibutuhkan proses pada kondisi operasi reaktor yang diisi gas nitrogen lebih besar daripada proses pada kondisi vakum.

Jika dianalisis keempat jenis sampah padat ini pada kondisi operasi reaktor yang vakum. Serbuk kayu membutuhkan daya terbanyak, karena untuk dapat melakukan reaksi-reaksi penguraian senyawa organiknya, dibutuhkan energi panas yang cukup banyak. Demikian pula dengan daun-daunan dan kertas, ketiga jenis sampah padat ini mengandung senyawa organik ligno-selulosa. Ketiga jenis sampah padat ini banyak mengandung air dan ikatan yang cukup kompleks sehingga untuk melakukan pemutusan ikatannya dibutuhkan daya yang lebih banyak. Sementara plastik adalah satu-satunya jenis sampah pada penelitian ini yang tidak mengandung ligno-selulosa, ikatannya sederhana, dan kebutuhan dayanya yang paling sedikit diantara keempat jenis sampah padat tersebut, hal ini dapat dikarenakan plastik merupakan polietilena, polipropilena, atau poliester dimana tidak dibutuhkan energi panas yang terlalu banyak untuk melakukan reaksi penguraiannya.

Pada reaktor dengan kondisi operasi yang diisi gas nitrogen, tekanannya lebih besar daripada kondisi vakum yang mendekati nol atmosfer absolut. Sehingga, tegangan yang dibutuhkan untuk melakukan proses juga lebih besar, dan lebih banyak pula arus yang mengalir. Dengan demikian, proses gasifikasi menjadi lebih optimal karena intensitas plasma yang dihasilkan lebih baik.

Jika dibandingkan dengan teknologi plasma termal, maka daya yang dibutuhkan proses gasifikasi dengan teknologi plasma non-termal ini jauh lebih sedikit. Hal ini dikarenakan perbedaan suhu operasi yang sangat berbeda antara plasma termal (> 1100 K) dan plasma non-termal (< 600 K).

4.3.3 Pengolahan Data Analisis GC

Data yang diperoleh dari analisis GC dapat dilihat pada subbab 4.2. Data-data tersebut akan diolah untuk memperoleh volume gas CO dan H₂ dari setiap

sampel yang diambil setiap satu kali proses gasifikasi. Perhitungan volume gas CO dan H₂ tersebut menggunakan persamaan (3.1) dan (3.2) yang terdapat pada metode penelitian.

- Penghitungan volume gas CO

$$y = 3.10^{-6}x + 0,2 \quad (3.1)$$

dimana: y = volume gas CO, mL
 x = luas area gas CO yang terbaca pada GC

- Penghitungan volume gas H₂

$$y = -0,057662 + 4,6879.10^{-7}x \quad (3.2)$$

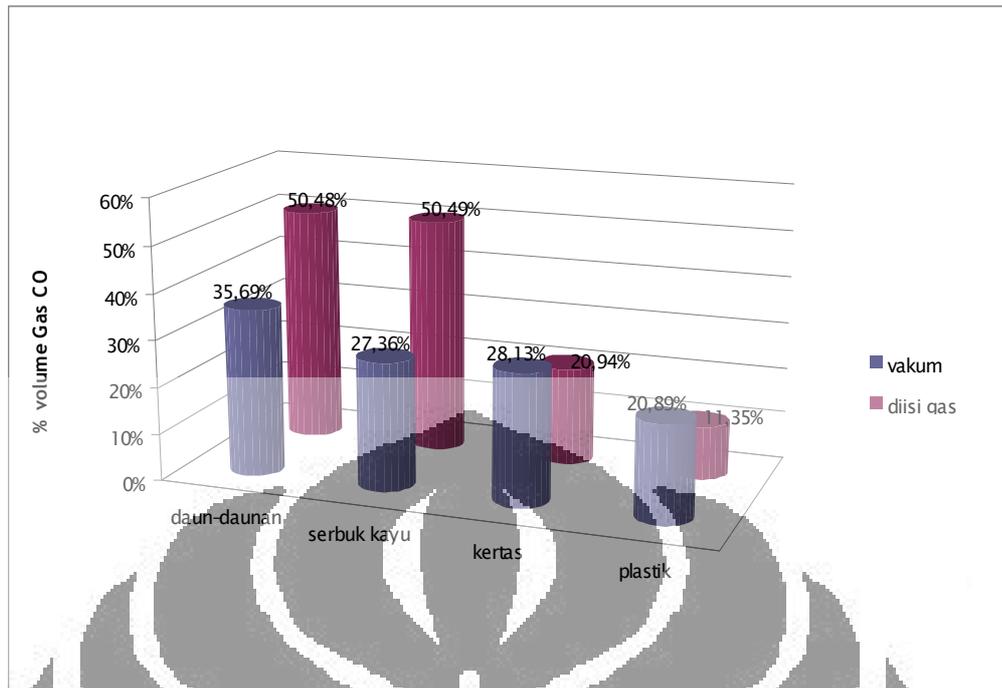
dimana: y = volume gas H₂, mL
 x = luas area gas H₂ yang terbaca pada GC

Namun seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa evaluasi kinerja hanya akan dilakukan pada gas CO saja, yang dianggap sebagai gas produk yang utama. Pengolahan data berupa perhitungan yang dapat dijelaskan pada lampiran yang hasilnya dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4.5 Volume Gas CO Yang Dihasilkan Pada Setiap Proses Gasifikasi

Sampel	Volume Gas CO (mL)
S-1	0,356947
S-2	0,273616
S-3	0,281359
S-4	0,208969
S-5	0,504896
S-6	0,504974
S-7	0,209407
S-8	0,113545

Tabel tersebut di atas dapat digambarkan dengan diagram sebagai berikut.



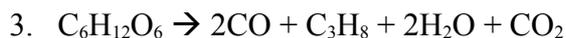
Gambar 4.4 Diagram Volume Gas CO Yang Dihasilkan Pada Proses Gasifikasi

Volume gas CO pada produk gasifikasi yang diperoleh di atas merupakan persentase volume yang dihitung dengan sampel sebanyak 1 mL.

Dari diagram tersebut di atas dapat dilihat bahwa pada kondisi operasi reaktor yang vakum, volume gas CO yang dihasilkan terbanyak adalah pada proses terhadap daun-daunan, kemudian kertas, serbuk kayu, dan terakhir plastik. Sedangkan pada kondisi operasi reaktor yang diisi gas nitrogen, volume gas CO yang dihasilkan terbanyak pada serbuk kayu, kemudian daun-daunan, kertas, dan terakhir juga plastik.

Plastik selalu menghasilkan volume gas CO yang paling sedikit diantara keempatnya. Plastik merupakan polimer sintetik poliester atau polipropilena. Sementara tiga jenis sampah lainnya mengandung senyawa organik ligno-selulosa yang merupakan polisakarida dengan monomer glukosa (karbohidrat) dengan rumus molekul yang umum $C_6H_{12}O_6$. Ada beberapa kemungkinan reaksi penguraian senyawa organik pada saat proses gasifikasi berlangsung. Adanya beberapa kemungkinan reaksi seperti di bawah ini menyebabkan perbedaan gas-gas produk yang dihasilkan pada setiap proses. Reaksi-reaksi tersebut adalah:

1. $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CO + C_3H_8 + 2H_2O + 1/2O_2$
2. $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CO + C_3H_8 + 3OH + 1/2H_2$



Dari ketiga kemungkinan reaksi di atas dapat terlihat bahwa pada reaksi pertama dihasilkan gas CO, C₃H₈, H₂O, dan O₂ dan tidak dihasilkan gas H₂ dan CO₂. Pada reaksi kedua dihasilkan gas H₂, dan pada reaksi ketiga dihasilkan gas CO₂. Jadi suatu reaksi tidak terjadi 100% melainkan terjadi reaksi-reaksi lainnya. Sehingga hal ini dapat menjawab pula mengapa gas H₂ tidak terbaca pada analisis GC dan mengapa terdapat gas CO₂ atau H₂O yang dihasilkan pada proses gasifikasi ini.

Plastik merupakan polimer sintetik poliester atau polipropilena. Poliester terdiri dari *purified terephthalic acid* (PTA, C₆H₄(COOH)₂) atau *dimetil ester dimethyl terephthalate* (DMT, C₆H₄(COOCH₃)₂) dan *mono etilena glikol* (MEG, C₂H₆O₂), dan polipropilena memiliki rumus molekul (C₃H₆)_x. Pada saat proses gasifikasi berlangsung senyawa organik tersebut akan terurai dengan beberapa kemungkinan reaksi pula.

1. $\text{C}_3\text{H}_6 \rightarrow \text{C}_3\text{H}_4 + \text{H}_2$
2. $\text{C}_3\text{H}_6 + 3/2\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO} + 3\text{H}_2$

Sementara reaksi-reaksi pembentukan gas sintesis yang mungkin terjadi adalah sebagai berikut:

1. $\text{C} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$
2. $\text{CO} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$
3. $\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$
4. $\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Selain itu, dari setiap hidrokarbon yang terbentuk pada reaksi-reaksi tersebut di atas, dapat terjadi pula reaksi pembakaran dengan O₂. Pada reaksi tersebut, O₂ dapat berasal dari reaktor yang walaupun telah di-vakum atau diisi gas nitrogen, masih tetap terdapat sedikit O₂, ataupun terbentuk pada saat proses berlangsung dengan reaksi-reaksi tersebut di atas.

Pembakaran adalah suatu runutan reaksi kimia antara suatu bahan bakar dan suatu oksidan, disertai dengan produksi panas yang kadang disertai cahaya dalam bentuk pendar atau api. Dalam hal ini bahan bakar yang dimaksud adalah

hidrokarbon dan oksidan (zat pengoksidasi) adalah O_2 . Rumus umum pembakaran hidrokarbon dapat dilihat pada persamaan reaksi (4.2).



Dalam suatu reaksi pembakaran lengkap, suatu senyawa bereaksi dengan zat pengoksidasi, dan produknya adalah senyawa dari tiap elemen dalam bahan bakar dengan zat pengoksidasi.



Pada penelitian ini, reaksi pembakaran yang mungkin terjadi adalah pada hidrokarbon C_3H_8 pada biomassa dan C_3H_6 pada plastik polipropilena:

1. Biomassa : $C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + \text{panas}$
2. Plastik : $C_3H_6 + 9/2O_2 \rightarrow 3CO_2 + 3H_2O + \text{panas}$

Dari reaksi tersebut di atas terbentuk gas CO_2 dan H_2O yang mungkin menjadi salah satu sumber terbacanya gas-gas tersebut pada analisis GC. Selain itu pula dapat terjadi pembakaran tidak sempurna sehingga dimungkinkan semakin banyaknya gas-gas produk (CO_2 dan H_2O) yang dihasilkan.

Contoh yang lebih sederhana dapat diamati pada pembakaran hidrogen dan oksigen, yang dapat pula terjadi pada saat proses berlangsung dapat dilihat pada persamaan reaksi (4.3).



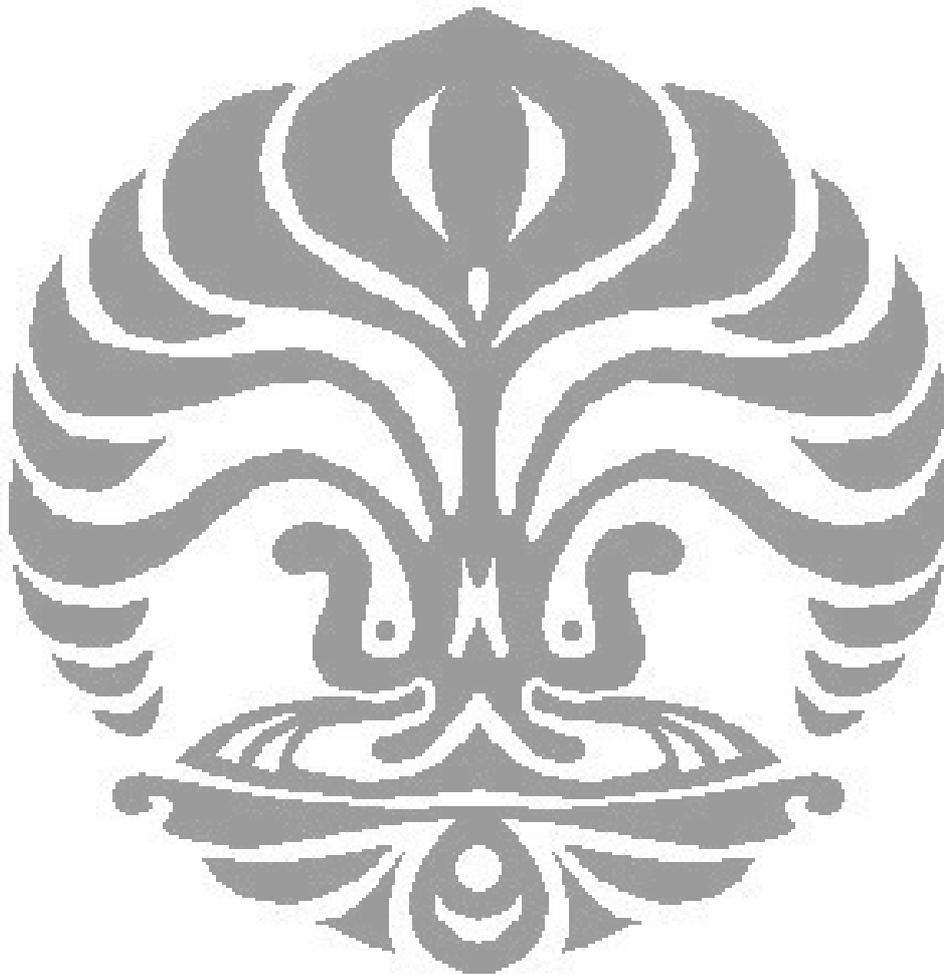
Reaksi tersebut di atas juga dapat menyebabkan gas H_2 tidak terbaca pada analisis GC dan gas H_2O menjadi salah satu gas produk.

Selain itu pada saat proses berlangsung dengan kondisi operasi yang diisi gas nitrogen, dapat juga terjadi reaksi seperti terlihat pada persamaan reaksi (4.4).



Dalam kenyataannya, proses pembakaran tidak pernah sempurna, dapat ditemukan baik karbon yang tak terbakar maupun senyawa karbon (CO dan lainnya). Jika udara digunakan sebagai oksidan, beberapa nitrogen akan teroksidasi menjadi berbagai jenis nitrogen oksida (NO_x) yang kebanyakan berbahaya.

Kemudian, untuk setiap jenis sampah padat berbeda, jika dibandingkan antara kondisi operasi reaktor yang vakum dan diisi gas nitrogen, setelah diambil harga rata-rata, volume gas CO pada kondisi vakum lebih sedikit bila dibandingkan dengan pada kondisi reaktor yang diisi gas nitrogen. Hal ini dikarenakan nitrogen merupakan media plasma. Dengan adanya media plasma, plasma menjadi bergerak secara dinamis sehingga lebih banyak sampah yang dapat di-gasifikasi.



BAB 5 KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil dan analisis pada penelitian ini adalah:

1. Reaktor plasma non-termal mampu meng-gasifikasi sampah padat.
2. Gas produk yang utama pada proses gasifikasi plasma non-termal pada penelitian ini adalah gas CO.
3. Kinerja pembentukan gas CO pada proses gasifikasi plasma non-termal pada penelitian ini belum optimal, yaitu rata-rata hanya sekitar 30,67%.
4. Kinerja proses gasifikasi plasma dengan kondisi operasi reaktor yang diisi gas nitrogen lebih baik dari kondisi yang vakum.
5. Gas nitrogen merupakan media yang ikut terionisasi sehingga meningkatkan kinerja plasma dalam meng-gasifikasi sampah padat.
6. Daya yang dibutuhkan pada proses gasifikasi plasma non-termal pada penelitian ini cukup kecil, yaitu rata-rata sekitar 47190,6 kWh.
7. Teknologi gasifikasi plasma non-termal dapat dikembangkan lebih lanjut untuk menjadi alternatif pengganti pengolahan sampah padat dengan plasma termal.

DAFTAR REFERENSI

- Bardos, Ladislav dan Barankova, Hana. (2009). Plasma Processes at Atmospheric and Low Pressures. *Vacuum* 83. 522-527.
- Gomez, E. et.al. (2008). Thermal Plasma Technology For The Treatment Of Wastes: A Critical Review. *Journal of Hazardous Material*.
- Grothaus, Michael G. dan Fanick, E. Robert. (1996). Harmful Compounds Yield to Nonthermal Plasma Reaktor. *Southwest Research Institute*.
- H. Huang, L. Tang. (2007). Treatment Of Organik Waste Using Thermal Plasma Pyrolysis Technology. *Energy Conversion and Management*, 48, 1331–1337
- McConney, J. dan Bennett, G. (2002). "Data Validation Standard Operating Procedures for Chlorinated Dioxin/Furan Analysis by High Resolution Gas Chromatography/High Resolution Mass Spectrometry", United State Environmental Protection Agency (US EPA) Region IV, Revision 3.0, Athens, Georgia, 30605-2720.
- Notoatmodjo, Soekidjo. (2003). Prinsip-Prinsip Dasar Ilmu Kesehatan Masyarakat. Cet. ke-2, Mei. Jakarta : Rineka Cipta.
- US EPA. (2003). "Waste Incinerator Dioxin Control and Emission Standards" paragraf 2 dari the *Air Pollution Control Act*, Environmental Protection Administration.
- LaBarge, William, et.al. (2005, Feb 8). Non-thermal plasma reaktor gas treatment system. United States Patent. 6852200 B2. May 15, 2009.
- <http://www.freepatentsonline.com/6852200.html>
- Michael, Hutagalung. (2007). Teknologi pengolahan sampah. *MajariMagazine*. December 20, 2008.
- <http://www.majarimagazine.com/topics/teknologi/teknologi-pengolahan-sampah.html>
- Nonthermal plasma*. (n.d). March 3, 2009.

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

Pemilihan dan Strategi Penerapan Teknologi Pengolahan Sampah Terpadu, Studi Kasus di DKI Jakarta. April 20, 2009. <http://www.dml.or.id>

Perspectives on Plasmas. (n.d). 20 February, 2009. <http://www.plasma.org>

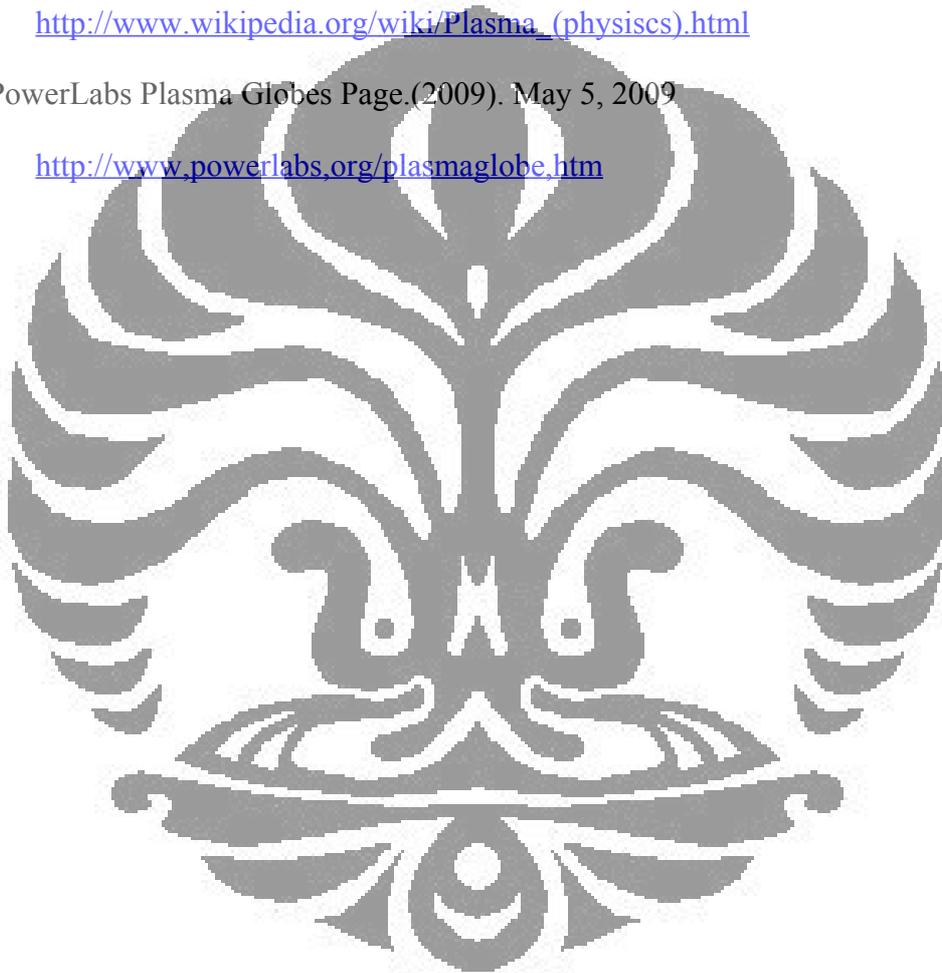
Plasma Gasification. (n.d). <http://www.plasmagasification.com>

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

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

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

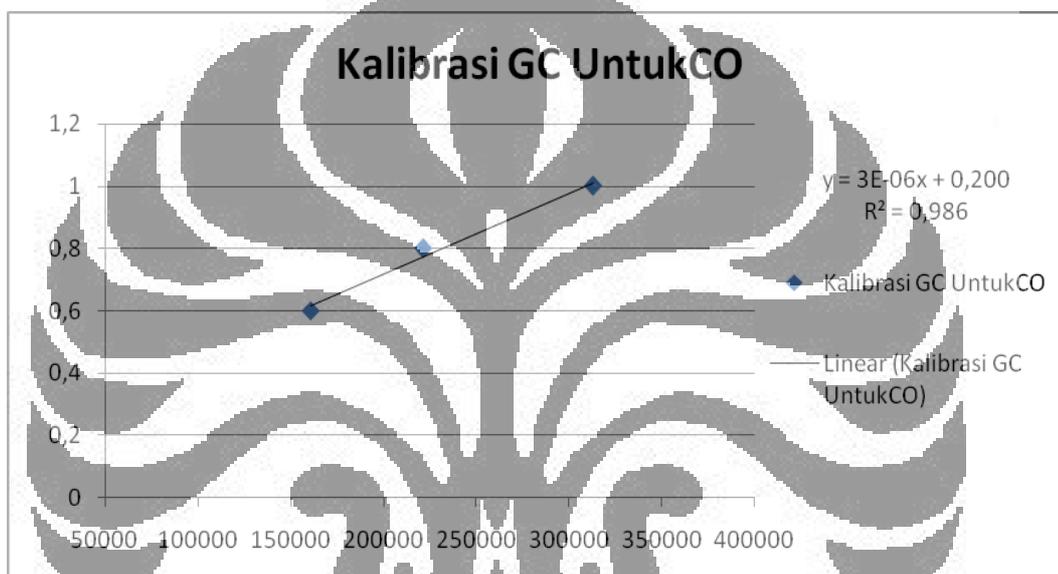
<http://www.powerlabs.org/plasmaglobe.htm>



Lampiran 1. Kalibrasi CO Dan H₂ serta Perhitungan Volume Gas Produk

1. Hasil Kalibrasi Gas CO

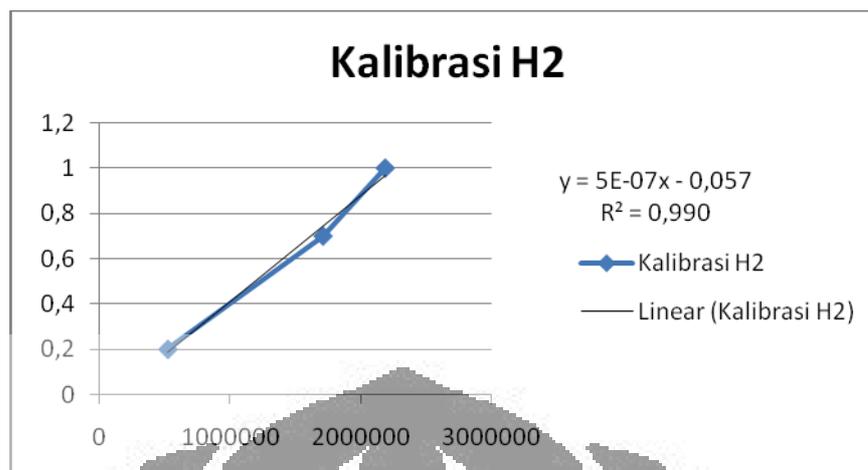
Volume (mL)	Area			
	1	2	3	Rata-rata
1	272084	272334	393513	312643,6667
0,8	246303	204981	211823	221035,6667
0,6	157656	159612	163795	160354,3333



2. Hasil Kalibrasi Gas H₂

Volume (mL)	Area			
	1	2	3	Rata-rata
1	1907558	2321412	2335304	2188091
0,7	1713888	1785486	1635275	1711550
0,2	545129	542134	479807	522357

(lanjutan)



Dari kedua grafik kalibrasi di atas dihasilkan dua buah persamaan untuk menghitung kadar *syngas* (gas CO dan H₂) yang dihasilkan dari proses gasifikasi plasma, yaitu:

- Untuk menghitung kadar gas CO:

$$\text{kadar CO} = 3 \times 10^{-6} (\text{Luas area CO}) + 0,2$$

- Untuk menghitung kadar gas H₂:

$$\text{kadar H}_2 = 5 \times 10^{-7} (\text{Luas area H}_2) - 0,057$$

Pada bagian analisa telah dikatakan bahwa gas H₂ tidak terbaca pada analisis GC, sehingga yang dihitung hanya kadar gas CO saja. Dimana, puncak area dari gas CO berhimpit dengan puncak area dari udara. Sehingga dalam perhitungannya, untuk mencari luas kadar gas CO yang sebenarnya, maka luas puncak yang terbaca pada analisis GC dikurangi dengan luas area udara vakum yang telah dikalibrasi sebelumnya.

Contoh perhitungan:

- Pada kondisi vakum:

$$\text{Luas area CO} = \text{Luas area keseluruhan} - \text{luas area udara vakum}$$

$$\text{Luas area udara vakum yang telah dikalibrasi} = 313823,3333$$

- Pada kondisi *gas blanket* (Nitrogen):

$$\text{Luas area CO} = \text{Luas area keseluruhan} - \text{luas area udara}$$

$$\text{Luas area udara yang telah dikalibrasi} = 230174$$

Lampiran 2. Plasma yang Terbentuk dan Peralatan yang Digunakan

1. Plasma yang Terbentuk pada Saat Proses Gasifikasi Limbah Padat Berlangsung

- Pada kondisi operasi vakum



- Pada kondisi operasi reaktor diisi gas nitrogen



(lanjutan)

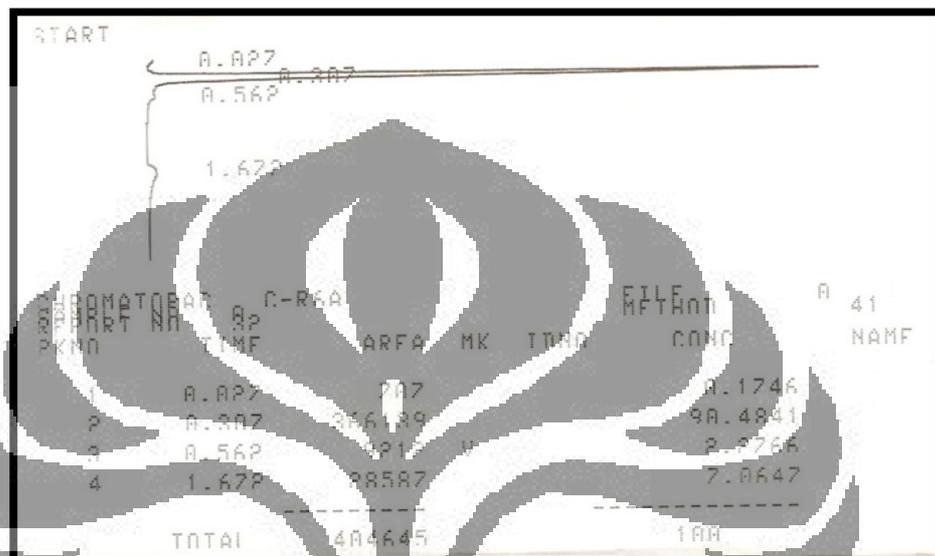
2. Peralatan yang Digunakan



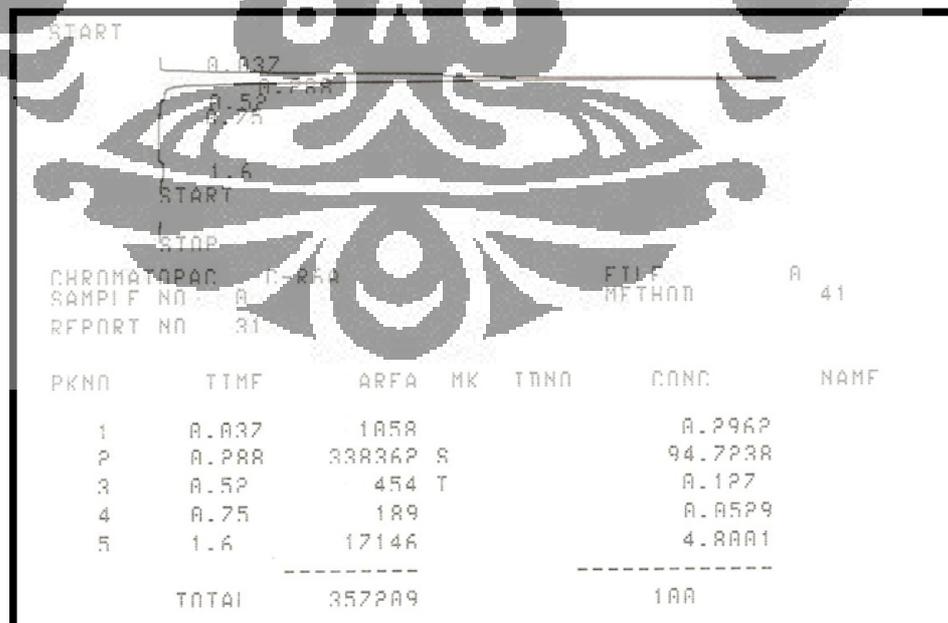
Lampiran 3. Kromatogram

1. Pada Kondisi Operasi Vakum

- Sampah daun-daunan



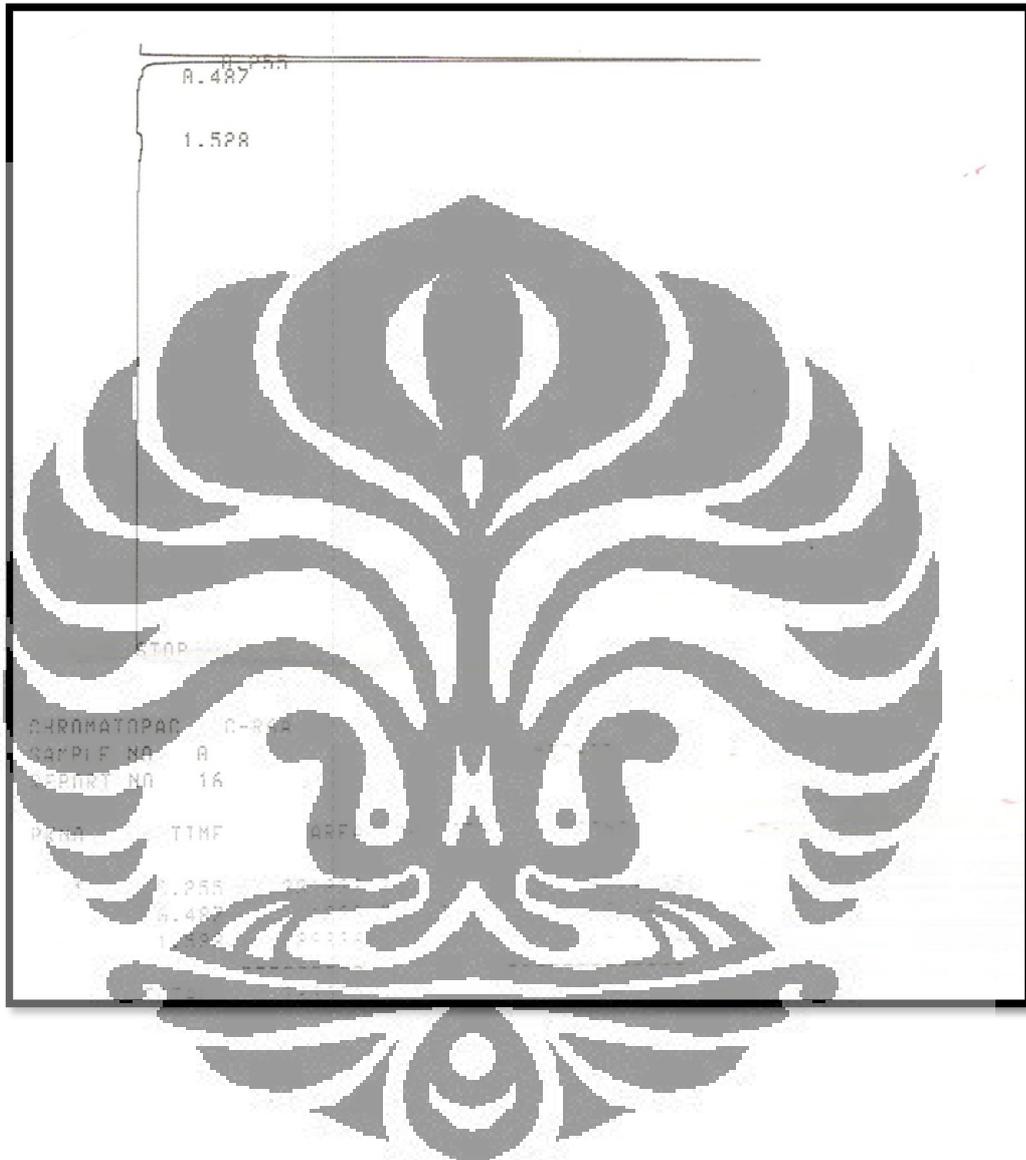
- Sampah serbuk kayu



(lanjutan)

2. Pada Kondisi Operasi Diisi Gas N₂

- Sampah daun-daunan



(lanjutan)

- Sampah serbuk kayu

