



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN REAKTOR FLUIDISASI PLASMA NON-
TERMAL: UJI KINERJA GASIFIKASI BATUBARA DENGAN
UDARA DAN OKSIGEN**

SKRIPSI

**HARIRI
0706269804**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN REAKTOR FLUIDISASI PLASMA NON-
TERMAL: UJI KINERJA GASIFIKASI BATUBARA DENGAN
UDARA DAN OKSIGEN**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**HARIRI
0706269804**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Hariri

NPM : 0706269804

Tanda Tangan : 

Tanggal : 21 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Hariri
NPM : 0706269804
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Rancang Bangun Reaktor Fluidisasi Plasma Non-Termal: Uji Kinerja Gasifikasi Batubara Dengan Udara dan Oksigen

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

DEWAN PENGUJI

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

Penguji : Prof. Ir. Sutrasno Kartoharjo, MSc, PhD

Penguji : Dr. Ir. Nelson Saksano, MT

Penguji : Ir. Amien Rahardjo, MT

(.....)

(.....)

(.....)

(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 21 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas karunianya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Berkat rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “**Rancang Bangun Reaktor Fluidisasi Plasma Non-Termal: Uji Kinerja Gasifikasi Batubara dengan Udara dan Oksigen**” sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran dalam penyusunan skripsi ini;
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI;
3. Bapak Ir. Yuliusman, M.Eng. selaku koordinator skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI;
4. Ibu Ir. Dewi Trisnantini M.T., PhD selaku pembimbing akademis;
5. Ayah, Ibu, Kak Tati, Kak Lala, Kak Dede, Lindi dan semua keluarga yang selalu memberi dukungan dan semangat selama mengerjakan skripsi ini;
6. Rekan satu bimbingan: Alifiana Permata Sari, Rizki Fitria Darmayanti, dan Resuli Irawan yang sudah membantu dalam pencarian sumber dan saling bertukar wawasan serta informasi yang ada;
7. Seluruh teman Laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses: Deni F, Iryandi, Mila, Priyadi, Vica, Wilda, dan Bu Menik serta seluruh rekan-rekan riset grup Teknologi Intensifikasi Proses dan Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam yang telah banyak memberi semangat dan hiburan terutama pada saat melakukan penelitian;

8. Mbak Tiwi, Mang Ijal, Kang Jajat, Mas Taufik, Mas Heri, Mas Eko, Mas Mugeni, Mas Sri, Mas Rinan, dan Pak Masturo yang telah banyak membantu penelitian dari awal hingga akhir;
9. Ilul, Edi, Sukma, Faldi, Adit, Andre, Hilman, Babas, Riezqa, Udin, Tangguh, Ajo, Irfan, Skripsi dan teman-teman Teknik Kimia, khususnya angkatan 2007 karena telah memberikan pengalaman yang indah selama kuliah di DTK FTUI;
10. Semua teman-teman yang tidak dapat disebutkan satu demi satu, yang selalu memberikan informasi dan bantuan semangat; serta
11. Semua pihak yang telah membantu penyusunan makalah skripsi ini secara langsung maupun tidak langsung;

Penulis menyadari bahwa dalam skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sehingga dapat menyempurnakan skripsi ini dan melakukan perbaikan di masa yang akan datang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi para pembaca dan dunia pendidikan dan ilmu pengetahuan.

Depok, Juni 2011



Penulis

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

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

Nama : Hariri
NPM : 0706269804
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 Noneklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

“Rancang Bangun Reaktor Fluidisasi Plasma Non-Termal: Uji Kinerja Gasifikasi Batubara dengan Udara dan Oksigen”

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada tanggal: Juni 2011

Yang menyatakan,



(Hariri)

ABSTRAK

Nama : Hariri
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Rancang Bangun Reaktor Fluidisasi Plasma Non-Termal: Uji Kinerja Gasifikasi Batubara Dengan Udara dan Oksigen

Perpaduan antara unggun terfluidakan dan plasma dalam gasifikasi batubara diharapkan dapat menghasilkan konversi batubara yang besar. Penelitian ini berkonsentrasi pada perancangan dan pengujian kinerja reaktor DBD (*Dielectric Barrier Discharge*) plasma untuk gasifikasi batubara dalam unggun terfluidakan. Reaktor yang dibangun berukuran diameter 10 cm dan tinggi total 66 cm dengan tinggi ruang fluidisasi sebesar 40 cm. Gas yang dihasilkan akan dianalisis menggunakan GC (*Gas Chromatography*) dan *CO analyzer* dengan melakukan variasi pada tegangan masukan NST (*Neon Sign Transformer*) dan jenis oksidator. Pada penggunaan oksidator udara diperoleh penurunan konsentrasi udara seiring dengan peningkatan tegangan masukan NST sedangkan pada oksigen diperoleh gas hidrogen 0,01% dengan produktivitas reaktor 267,161 L/kWh.

Kata kunci: gasifikasi batubara, fluidisasi, plasma, reaktor DBD

ABSTRACT

Name : Hariri
Study Program : Chemical Engineering
Title : Fluidization Non-Thermal Plasma Reactor Design: Performance Test of Coal Gasification by Air and Oxygen

The combination of fluidized bed and plasma in coal gasification is expected to produce large coal conversion. This study focuses on designing and testing the performance of the DBD (*Dielectric Barrier Discharge*) plasma reactor for coal gasification in fluidized bed. The reactor was built in diameter of 10 cm; total height of 66 cm and fluidization space's height of 40 cm. Gas resulted are analyzed using GC (*Gas Chromatography*) and CO analyzer by setting variations on the input voltage of NST (*Neon Sign Transformer*) and the type of oxidizing agents. When using air as oxidizing agent, it derives air concentration decreased with increasing input voltage of NST, while, when using oxygen, it is obtained that hydrogen's concentration is 0.01% with reactor's productivity is 267.161 L/kWh.

Keywords: coal gasification, fluidization, plasma, DBD reactor

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Plasma	5
2.1.1 Definisi Plasma	5
2.1.2 Parameter Plasma	6
2.1.3 Jenis-Jenis Plasma	7
2.1.4 Karakteristik Plasma dan Aplikasinya	8
2.2 Dielectric Barrier Discharge (DBD)	11
2.3 Batubara	11
2.4 Gasifikasi Batubara dalam Unggun Terfluidakan	14
2.5 Gasifikasi Batubara dengan Plasma	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1 Diagram Alir Penelitian	22
3.2 Rancang Bangun Sistem Reaktor Plasma	24
3.2.1 Pembuatan Reaktor	25
3.2.2 Rangkaian Pembangkit Plasma	27
3.2.3 Penggunaan Alat Ukur	28
3.3 Preparasi Sampel	29
3.4 Prosedur Penelitian	30
3.4.1 Uji <i>Start-up</i> Alat	30

3.4.2 Variasi Kondisi Operasi Proses.....	31
3.4.3 Langkah Kerja Pengoperasian Reaktor Plasma	31
3.5 Prosedur Pengambilan Data Percobaan.....	32
3.6 Lokasi Penelitian.....	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	36
4.1 Rancang Bangun Reaktor.....	36
4.2 Uji Kinerja Awal Reaktor.....	39
4.2.1 Analisis Keselamatan Reaktor Plasma	40
4.2.2 Pengamatan Fenomena Fluidisasi	41
4.2.3 Pengamatan Fenomena Plasma	42
4.3 Uji Kinerja Reaktor untuk Gasifikasi Batubara.....	45
4.3.1 Uji Kinerja dengan Oksidator Udara.....	45
4.3.2 Uji Kinerja dengan Oksidator Oksigen.....	47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	51
5.1 Kesimpulan.....	51
5.2 Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA	52
Lampiran A: Data Penelitian.....	54
Lampiran B: Contoh Perhitungan.....	56
Lampiran C: Hasil Analisis Batubara.....	58

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Perbedaan fasa padat, cair, gas, dan plasma.....	6
Tabel 2. 2. Potensial ionisasi dan berat statistik untuk spesies berbeda	7
Tabel 2. 3. Jenis-jenis plasma dalam industri.....	9
Tabel 2. 4. Karakteristik <i>non-thermal discharge</i>	10
Tabel 2. 5. Kandungan karakteristik batubara berdasarkan kelasnya	12
Tabel 2. 6. Data kualitas contoh batubara Indonesia	13
Tabel 2. 7. Karakteristik sampel batubara yang digasifikasi oleh Suprpto.....	15
Tabel 2. 8. Karakteristik Sampel Batubara Illinois.....	20
Tabel 3. 1. Daftar peralatan utama gasifikator plasma	25
Tabel 3. 2. Hasil analisis proksimat dan ultimat dari sampel batubara	29
Tabel 4. 1. Fenomena plasma yang teramati pada beberapa tegangan	44
Tabel 4. 2. Hasil analisis gas produk menggunakan GC oksidator udara.....	46
Tabel 4. 3. Hasil analisis gas produk menggunakan GC oksidator oksigen	48
Tabel 4. 4. Harga ΔG_f^{298} dari masing-masing komponen.....	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Berbagai jenis partikel dan tumbukan pada ruang plasma.....	5
Gambar 2. 2. Skema pembangkit plasma <i>dielectric barrier discharge</i>	11
Gambar 2. 3. Persentase jenis batubara di Indonesia.....	13
Gambar 2. 4. Komposisi produk dari gasifikasi lignit dengan berbagai oksidan..	15
Gambar 2. 5. Komposisi produk dari gasifikasi berbagai jenis batubara	16
Gambar 2.6. (a) Pengaruh waktu terhadap komposisi gas, (b) Pengaruh waktu terhadap efisiensi gasifikasi	17
Gambar 2. 7. Proses Gasifikasi Karbon	17
Gambar 2. 8. Reaktor Gasifikasi menggunakan DBD	20
Gambar 2. 9. Komposisi gas sintesis pada variasi suhu reaktor.....	21
Gambar 2. 10. Konsumsi energi pada proses gasifikasi dengan DBD	21
Gambar 3. 1. Diagram alir penelitian.....	22
Gambar 3. 2. Skema rancangan penelitian.....	23
Gambar 3. 3. Susunan rangkaian gasifikator plasma	24
Gambar 3. 4. Gambaran penampang melintang reaktor	26
Gambar 3. 5. Skema rancang bangun reaktor <i>dielectric barrier discharge</i>	27
Gambar 3. 6. Skema pembentukan plasma dengan trafo tegangan tinggi	27
Gambar 3. 7. Regulator Tegangan	28
Gambar 3. 8. <i>Neon Sign Transformer</i>	28
Gambar 3. 9. Alat ukur (a) ampermeter; (b) voltmeter; (c) flowmeter	29
Gambar 3. 10. Alat analisis gas produk, (a) <i>CO analyzer</i> ; (b) GC TCD.....	35
Gambar 4. 1. Rancangan desain reaktor DBD	36
Gambar 4. 2. (a) <i>Trap</i> ; (b) <i>Gas sampling</i>	39
Gambar 4. 3. Gambar keseluruhan reaktor beserta penjelasannya	39
Gambar 4. 4. Skema fenomena fluidisasi di dalam reaktor	41
Gambar 4. 5. Hasil analisis GC pada tegangan masukan NST 190 V.....	45
Gambar 4. 6. Hasil analisis GC pada tegangan masukan NST 190 V dengan O ₂ ..	48

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki potensi sumber daya alam yang tinggi. Salah satu sumber daya alam tersebut adalah batubara. Menurut *World Energy Council*, pada akhir tahun 2007 Indonesia memiliki cadangan batubara terbukti sebesar 4,3 miliar ton atau 0,5% dari total cadangan batubara terbukti dunia. Akhir-akhir ini batubara berperan semakin baik sebagai sumber energi primer maupun pembangkit tenaga listrik. Tahun 2006, batubara memberikan kontribusi sebesar 26% sebagai pemasok energi primer, kedua terbesar setelah minyak yang sebesar 34,4%. Peran ini diperkirakan akan meningkat menjadi 29% pada 2030. Sedangkan sebagai pembangkit listrik batubara memberikan kontribusi paling besar (41%) diantara sumber energi lainnya seperti gas (20,1%), *hydro* (16%), nuklir (14,8%), dan minyak (5,8%) (Kementerian Keuangan, 2010). *International Energy Agency* (IEA) memperkirakan batubara dunia dapat dieksploitasi setidaknya hingga 133 tahun ke depan jika dilihat dari tingkat produksi saat ini. Waktu tersebut lebih lama dibandingkan cadangan minyak dan gas terbukti yang diperkirakan hanya dapat dieksploitasi sekitar 42 dan 60 tahun kedepan (Ermina, 2008).

Terkait dengan hal tersebut, pemerintah mengeluarkan Kebijakan Energi Nasional (KEN) melalui PP No. 5 Tahun 2006 sebagai pembaruan Kebijakan Umum Bidang Energi (KUBE) tahun 1998. KEN mempunyai tujuan utama untuk menciptakan keamanan pasokan energi nasional secara berkelanjutan dan pemanfaatan energi secara efisien, serta terwujudnya bauran energi (*energy mix*) yang optimal pada tahun 2025. Menurut kebijakan tersebut pemanfaatan batubara sebagai sumber energi ditargetkan menjadi 33% pada tahun 2025 yang sebelumnya sebesar 15,34% pada tahun 2006 (Pusat Litbang Teknologi Mineral dan Batubara, 2006).

Salah satu upaya untuk mendukung pencapaian sasaran bauran energi nasional yang dicanangkan pemerintah, dilakukan kajian batubara secara nasional. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui kondisi sumberdaya, perusahaan, dan

pemanfaatan batubara beserta permasalahannya, yang dapat digunakan untuk membuat langkah-langkah yang diperlukan. Sampai saat ini pemanfaatan batubara masih terkendala dengan pembakaran batubara konvensional yang sering kali tidak sempurna. Pembakaran yang tidak sempurna tersebut memproduksi lebih banyak karbon monoksida (CO) yang toksik dan partikulat yang berbahaya bagi pernapasan. Oleh karena itu, diperlukan suatu terobosan teknologi yang dapat mengeliminasi permasalahan tersebut.

Salah satu teknologi yang cukup populer untuk memanfaatkan batubara adalah dengan teknologi gasifikasi. Gasifikasi batubara mulai dicanangkan oleh Departemen ESDM untuk diaplikasikan pada mesin diesel sistem *dual fuel* pada PLTU. Gasifikasi batubara menjadi karbon monoksida dan hidrogen memberikan nilai tambah bagi pemanfaatan batubara. Suprpto (2006) melakukan gasifikasi batubara kualitas rendah pada 900°C dalam unggun terfluidakan dengan berbagai jenis oksidator. Hasilnya terdapat gas hidrogen sebagai produk utama yang paling diinginkan. Gasifikasi dengan unggun terfluidakan memiliki kelebihan cocok untuk batubara yang dihaluskan, memiliki nilai konversi yang tinggi, dan abu bertitik leleh rendah. Namun, gasifikasi batubara dengan unggun terfluidakan memiliki beberapa kelemahan, yaitu tergantung dengan ukuran partikel dan kelembaban serta masih menghasilkan tar.

Gasifikasi plasma dapat digunakan untuk mengatasi kelemahan gasifikasi yang disebutkan di atas dan telah terbukti efektif menghasilkan konsentrasi gas sintesis yang lebih tinggi dibandingkan gasifikasi termal biasa. Gas sintesis (CO dan H₂) yang dihasilkan mencapai 93% dari volume gas produk. Kelebihan lain dari gasifikasi plasma adalah mampu menguraikan tar dan karbon tak terbakar lain, tidak bermasalah dengan ukuran partikel sehingga tidak perlu preparasi umpan secara mekanis, dan mampu menangani umpan dengan tingkat kelembaban yang tinggi (Matveev, et al, 2009).

Penelitian gasifikasi lignit dengan reaktor DBD (*Dielectric Barrier Discharge*) plasma nontermal berhasil memproduksi 54,1% H₂, 33,7% CO₂, 4,1% CO, dan 2,4% CH₄ (Rabovitser, et al, 2006). Penggunaan plasma dalam *fluidized bed* selama ini baru diteliti untuk rekayasa material serbuk dan mutasi benih tanaman. DBD digunakan untuk mutasi benih *pimiento* dan *coxcomb* pada 315-

320 K tekanan atmosfer. Hasilnya buah *pimiento* yang berwarna gelap dan kurus menjadi lebih terang dan berisi sedangkan bunga *coxcomb* menjadi lebih besar (Chen, et al, 2005). Mengingat masih terdapatnya kekurangan pada teknologi gasifikasi pada unggun terfluidakan dan gasifikasi plasma nontermal, maka dilakukan sebuah terobosan berupa perpaduan gasifikasi plasma dalam unggun terfluidakan.

Dalam penelitian ini akan dirancang sebuah sistem gasifikator plasma dalam unggun terfluidakan. Perpaduan unggun terfluidakan dan plasma diharapkan dapat menghasilkan konversi batubara yang besar serta mengurangi jumlah tar yang terbentuk. Plasma nontermal yang akan digunakan adalah DBD karena suhunya rendah, yaitu di kisaran suhu ruangan hingga 700°C. Sistem ini akan dioperasikan pada tekanan atmosfer, karena lebih hemat energi sehingga diharapkan penggunaan plasma akan layak untuk dipertimbangkan sebagai pengganti sistem pembakaran batubara konvensional yang banyak digunakan, yang juga beroperasi pada tekanan atmosfer.

1.2 Perumusan Masalah

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

1. Bagaimana menghasilkan reaktor gasifikasi plasma dengan unggun terfluidakan yang dapat digunakan pada batubara.
2. Bagaimana pengaruh variasi tegangan dan jenis oksidator pada proses konversi batubara.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang dan membuat suatu reaktor DBD plasma untuk gasifikasi batubara dalam unggun terfluidakan. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menguji kinerja awal reaktor gasifikasi batubara dalam unggun terfluidakan serta pengaruh tegangan dan jenis oksidator terhadap komposisi gas produk.

1.4 Batasan Masalah

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

1. Batubara yang digunakan adalah batubara jenis *sub bituminous* yang didapatkan dari PT. Indonesia Power UBP Suralaya dan dihaluskan dengan ukuran 120 – 200 mesh.
2. Oksidator yang digunakan adalah udara yang berasal dari kompresor dan oksigen dari tabung oksigen medis.
3. Jenis reaktor plasma yang digunakan adalah *dielectric barrier discharge* yang dirancang sendiri.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang dilakukan dalam penulisan skripsi ini adalah:

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi literatur-literatur yang mengandung teori yang berhubungan dengan plasma non termal, batubara, gasifikasi batubara dengan plasma dalam unggun terfluidakan.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisi metode, alat, dan prosedur yang akan digunakan untuk melakukan intensifikasi proses dan kinerja reaktor gasifikasi batubara dalam unggun terfluidakan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang data hasil percobaan, pengolahan, serta pembahasan dari percobaan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan kesimpulan dan saran terhadap penelitian yang telah dilaksanakan secara menyeluruh.

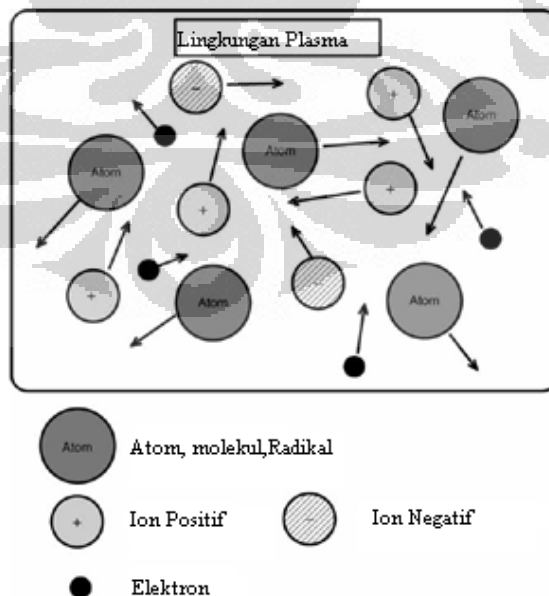
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Plasma

2.1.1 Definisi Plasma

Semua zat berubah dari padat menjadi cair dan dari cair ke gas ketika energi atau panas ditambahkan. Perubahan ini disebut perubahan fasa dan terjadi pada temperatur konstan. Ketika energi ditambahkan ke gas, elektron muncul dari partikel netral dan menjadi ion. Keadaan di mana banyak ion dan elektron yang bercampur disebut "plasma" (Gambar 2.1). Perubahan dari gas menjadi plasma didasarkan pada reaksi ionisasi. Energi yang dibutuhkan untuk reaksi berada dalam kisaran 1-50 eV, yang umumnya jauh lebih banyak daripada energi panas laten pada perubahan fasa (0,01 eV). Oleh karena itu, perubahan dari gas menjadi plasma tidak sepenuhnya diklasifikasikan ke dalam perubahan fasa. Namun, plasma sering disebut keadaan keempat dari suatu materi, dimana padat, cair, dan gas adalah ketiga keadaan lainnya dari suatu zat (Yamamoto, et al, 2007). Plasma sebagai zat keempat ini ditemukan pada tahun 1928 oleh ilmuwan Amerika, Irving Langmuir (1881-1957) dalam eksperimennya melalui lampu filamen tungsten.



Gambar 2. 1. Berbagai jenis partikel dan tumbukan pada ruang plasma (Yamamoto, et al, 2007)

Plasma dalam teknologi plasma dapat didefinisikan sebagai gas yang terionisasi, terdiri dari partikel neutron, ion positif, ion negatif dan elektron yang merespon medan magnetik secara kuat. Plasma juga dapat dikatakan sebagai atom yang kehilangan elektron karena beberapa atau semua elektron di orbit atom terluar telah terpisah dari atom atau molekul yang mengakibatkan 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 (majari magazine, 2009).

Tabel 2. 1. Perbedaan fasa padat, cair, gas, dan plasma

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

(Sumber: Lieberman, et al, 1994)

2.1.2 Parameter Plasma

Besaran fisik seperti kerapatan dan temperatur dalam plasma diakui sebagai parameter plasma dan digunakan untuk menentukan karakteristik plasma (Yamamoto, et al, 2007). Beberapa jenis kepadatan dan temperatur terdapat pada plasma, yaitu jumlah kerapatan elektron n_e , jumlah kerapatan ion n_i , jumlah kerapatan molekul gas n_g , temperatur elektron T_e , temperatur ion T_i , dan temperatur gas T_g . Karena temperatur plasma didefinisikan hanya bila energi dari

setiap partikel mengikuti distribusi Maxwell, maka fungsi distribusi energi dari partikel-partikel dalam plasma, $f(v)$, merupakan informasi yang sangat penting dalam mencirikan plasma. Selanjutnya, panjang Debye, frekuensi sudut plasma, ketebalan selubung ion, dan potensi ruang plasma juga merupakan parameter penting untuk menggambarkan keadaan plasma.

Tabel 2. 2. Potensial ionisasi dan berat statistik untuk spesies berbeda

Species	Ionization potentials (ϵ_i , eV)	Statistical weights	
		g_o	g_i
He	24.6	1	2
Li	5.39	2	1
Na	5.14	2	1
K	4.34	2	1
Cs	3.89	2	1
Ne	21.56	1	6
Ar	15.76	1	6
H ₂	15.6	—	—
O ₂	12.05	3	4
O	13.61	9	4
N ₂	15.6	1	2
NO	9.26	8	1
CO	14.1	1	2
CO ₂	14.4	—	—
H ₂ O	12.6	—	—
OH	13.8	—	—

(Sumber: Yamamoto, et al, 2007)

2.1.3 Jenis-Jenis Plasma

Plasma ada di alam sekitar kita dalam berbagai bentuk, seperti petir, matahari, aurora, ionosfer, bintang, dan juga di lingkungan manusia, seperti pengelasan listrik, mesin lucutan listrik, cahaya pucat di *pantograph* kereta api, api, cahaya *fluorescent*, dan lampu neon (Wikipedia, 2009). Ada beberapa cara untuk mengklasifikasi plasma ini. Plasma dapat diklasifikasikan sebagai berada dalam suatu keadaan kesetimbangan atau tidak. Kesetimbangan didefinisikan sebagai keadaan dimana suhu elektron, ion, dan partikel alami adalah sama dan kesetimbangan ionisasi terjadi. Dalam *non-equilibrium plasma*, temperatur elektron biasanya lebih tinggi daripada suhu partikel netral (Chen, 1974).

1. Plasma berkesetimbangan. Apabila T_g sama dengan T_e dan T_i . Sebagai contoh, plasma termal *arc discharge* tekanan atmosferik.

2. Plasma tak setimbang. Apabila T_g lebih besar dari T_e dan T_i . Sebagai contoh, plasma lucutan cahaya tekanan rendah dan plasma pulsa tegangan tinggi tekanan atmosferik.

Plasma juga dapat diklasifikasikan berdasarkan perbandingan antara suhu gas plasma T_g dengan suhu pembakaran ($T_c > 1000\text{ }^\circ\text{C}$) atau tidak (Meichsner, 2005), yaitu:

1. Plasma termal. $T_g \geq T_c$. Sebagai contoh, *spraying arc discharge plasma*, nyala api, dan plasma untuk insinerasi sampah.
2. Plasma non-termal. $T_g \ll T_c$. Sebagai contoh, *discharge lamp*, *plasma display monitor*, korona, plasma, dan pengolahan gas buang.

2.1.4 Karakteristik Plasma dan Aplikasinya

Plasma berbeda dari gas biasa yang tidak terionisasi yang berdampak pada beberapa hal berikut (Nicholson, 1986):

1. Aktivasi kimia sangat tinggi. Plasma menghasilkan radikal dengan mudah ketika gas reaktif dimasukkan ke dalamnya, dan keadaan sangat reaktif dapat diperoleh dengan energi tinggi plasma. Bidang plasma kimia, plasma perbaikan lingkungan, dan pengolahan plasma seperti deposisi uap kimia (*Chemical Vapor Deposition/ CVD*) memanfaatkan karakteristik ini.
2. Menghantarkan listrik. Arus listrik dapat dihantarkan melalui plasma karena banyak partikel bermuatan listrik yang terdapat dalam plasma, seperti ion dan elektron. Dengan menggunakan fitur ini, parameter plasma dapat dikontrol dan plasma dapat dipanaskan ke suhu tinggi.
3. Energi tinggi dan suhu tinggi (gas atau elektron). Plasma dengan suhu $(10-100) \times 10^6\text{ }^\circ\text{C}$ akan membuat reaksi fusi nuklir menjadi mungkin. Diharapkan bahwa jenis sumber energi ini dapat digunakan pada abad 21. Selain itu, bahan dapat dipanaskan secara cepat pada suhu tinggi menggunakan plasma bersuhu $10.000\text{ }^\circ\text{C}$. Di daerah yang bersuhu lebih rendah, plasma ini digunakan dalam pengolahan mekanis seperti plasma pengelasan, pemotongan, *electrical discharge machining*, plasma penyemprotan, dan sebagainya.

4. Radiasi elektromagnetik dan emisi cahaya. Banyak jenis gelombang elektromagnetik kuat dipancarkan dari plasma karena temperatur tinggi ionisasi. Hal ini dapat digunakan sebagai sumber cahaya, sebuah layar elektronik, dan analisis optik.

Dalam aplikasinya pada proses-proses industri, plasma dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu plasma termal (plasma panas) dan plasma non-termal (plasma dingin) dengan penjelasan sebagai berikut:

Tabel 2. 3. Jenis-jenis plasma dalam industri

Plasma	Keadaan	Contoh
Plasma temperatur tinggi (<i>Equilibrium plasma</i>)	$T_e = T_i = T_h,$ $T_p = 10^6 K - 10^8 K$ $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$	Plasma fusi laser
Plasma temperatur rendah (<i>Quasi Equilibrium plasma</i>)	$T_e \approx T_i \approx T_h,$ $T_p = 2 \times 10^3 K - 3 \times 10^4 K$ $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$	Arc plasma; <i>atmospheric RF discharge</i>
Plasma non-termal (<i>Non equilibrium plasma</i>)	$T_e \geq T_h \approx 3 \times 10^2 K - 4 \times 10^2 K$ $n_e \geq 10^{10} m^{-3}$	<i>Corona discharge</i>

$T_e =$ suhu elektron, $T_i =$ suhu ion, $T_h =$ suhu netral, $T_p =$ suhu plasma, $n_e =$ kerapatan electron
(Sumber: Yamamoto, et al, 2007)

1. Plasma termal (plasma suhu tinggi)

Memiliki ciri suhu tinggi, densitas energi tinggi, kesamaan suhu antara partikel berat (atom, molekul, ion) dan elektron. Plasma tipe ini memiliki sifat mobilitas yang jauh lebih tinggi yang menyebabkan energi yang diberikan kepada plasma ditangkap oleh elektron yang dipindahkan ke partikel-partikel berat dengan tumbukan elatis. Karena densitas jumlah elektron tinggi, jika dikaitkan dengan operasi pada tekanan atmosferik, frekuensi tumbukan elastis menjadi sangat tinggi dan kesetimbangan termal tercapai dengan cepat serta dapat mencapai suhu 20.000°C atau lebih untuk di daerah inti pijar plasma, serta untuk daerah marginal akan turun secara cepat sehingga daerah marginal ini sebagai daerah operasinya akan memiliki suhu sekitar 5000 K (Huang H and Tang L, 2004). Contoh plasma termal adalah plasma dari arus DC atau *radio frequency (RF)*

inductively coupled discharges (Kogelschatz, 2004). Plasma matahari juga termasuk salah satu contoh plasma termal.

2. Plasma non-termal (plasma dingin)

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

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

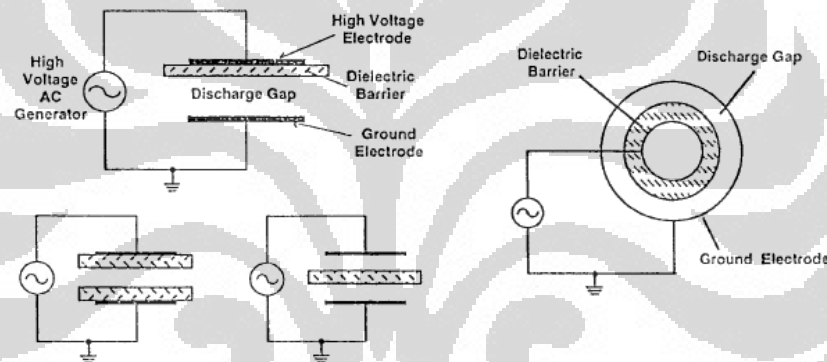
Tabel 2. 4. Karakteristik *non-thermal discharge*

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

(Sumber: Istadi, 2006)

2.2 Dielectric Barrier Discharge (DBD)

DBD, yang beroperasi pada tekanan 0,1 – 10 bar merupakan jenis lucutan plasma AC. DBD dihasilkan di antara dua elektroda yang terdapat penghalang dielektrik diantaranya. Plasma DBD dapat dipertahankan pada tegangan 1-100 kV dengan frekuensi 50 Hz – 1 MHz. Arus listrik dihalangi oleh dielektrik. Pembawa muatan berhenti di permukaan dielektrik sehingga menghasilkan medan listrik eksternal. Kerapatan arus pada filament berkisar antara 100–1000 A.cm⁻², kerapatan elektronnya 10¹⁴ – 10¹⁵ cm⁻³, dan energi elektron 1–10 eV. Aplikasi DBD antara lain untuk memompa laser CO₂, produksi metanol dari campuran metana/ oksigen, remediasi gas buang, dan gasifikasi. DBD menjadi pilihan untuk mengoperasikan plasma nontermal pada tekanan atmosfer dan mudah di-*scale-up*.



Gambar 2. 2. Skema pembangkit plasma *dielectric barrier discharge* (Istadi, 2006)

2.3 Batubara

Batubara merupakan bahan bakar padat yang terbentuk secara alamiah akibat pembusukan sisa tanaman purba dalam waktu jutaan tahun. Oleh karena itu, karakteristik dan kualitas batubara sangat bervariasi dan tidak homogen dibandingkan dengan bahan bakar yang telah mengalami proses pengolahan dalam pabrik, seperti misalnya bahan bakar minyak. Selain tingkat pembatubaraan atau peringkat (*rank*), kualitas suatu endapan batubara juga dipengaruhi oleh lingkungan pengendapannya. Batubara peringkat yang lebih tinggi seperti batubara bituminus dan antrasit mempunyai nilai kalor tinggi dan kadar air rendah. Sebaliknya, batubara peringkat rendah seperti lignit dan batubara subbituminus mempunyai kadar air tinggi dan nilai kalor rendah. Di samping itu, lingkungan pengendapan dan cara penambangan dapat memengaruhi kadar abu serta karakteristik abu (komposisi dan titik leleh abu). Selain itu, batubara

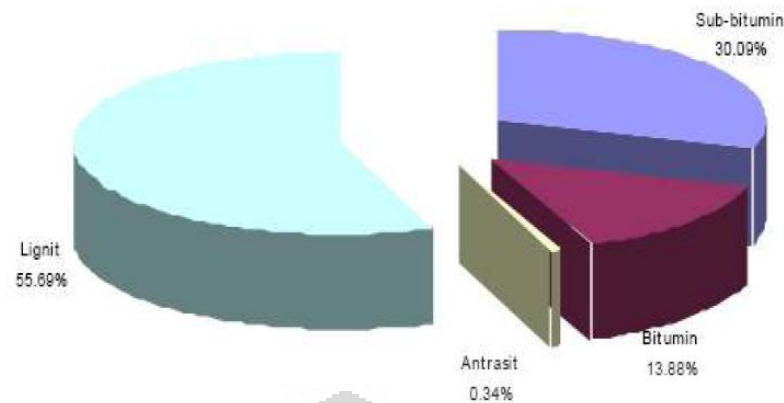
peringkat rendah umumnya mempunyai kecenderungan swabakar yang tinggi dan mempunyai sifat fisik yang rendah (mudah hancur). Hal ini mengakibatkan kualitas endapan batubara bervariasi dari satu lokasi ke lokasi lainnya, atau bahkan dapat bervariasi dari lapisan satu ke lapisan lainnya pada daerah atau cekungan geologis yang sama (Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara, 2009).

Batubara diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama yakni antrasit, bitumen dan lignit, meskipun tidak jelas pembatasan diantaranya. Pengelompokannya lebih lanjut adalah semiantrasit, semi-bitumen, dan sub-bitumen. Antrasit merupakan batubara tertua jika dilihat dari sudut pandang geologi, yang merupakan batubara keras, tersusun dari komponen utama karbon dengan sedikit kandungan bahan yang mudah menguap dan hampir tidak berkadar air. Lignit merupakan batubara termuda dilihat dari pandangan geologi. Batubara ini merupakan batubara lunak yang tersusun terutama dari bahan yang mudah menguap dan kandungan air dengan kadar *fixed carbon* yang rendah. *Fixed carbon* merupakan karbon dalam keadaan bebas, tidak bergabung dengan elemen lain. Bahan yang mudah menguap merupakan bahan batubara yang mudah terbakar yang menguap apabila batubara dipanaskan. Berikut data kandungan lignit dibandingkan dengan jenis batubara lain.

Tabel 2. 5. Kandungan karakteristik batubara berdasarkan kelasnya

Parameter	Lignit Lunak	Lignit	Sub-bitumen	Bitumen	Antrasit
Air, %-b ^s	56,7	38,7	31,2	3,7	1,0
C, %-b [#]	70,30	71,40	73,40	82,60	92,20
H, %-b [#]	4,85	4,79	4,86	4,97	3,30
N, %-b [#]	0,74	1,34	1,16	1,55	0,15
S, %-b [#]	0,27	0,60	0,31	1,50	0,98
O, %-b [#]	23,84	21,87	20,27	9,38	3,37
H/C (molar)	0,82	0,80	0,79	0,72	0,43
O/C (molar)	0,25	0,23	0,21	0,09	0,03
Q _{bruto} , MJ/kg	227,5	28,5	29,4	30,6	35,7

Cadangan batubara terbesar di Indonesia berupa lignit. Jumlah batubara di Indonesia sebesar 39,16 milyar ton dengan kadar abu yang rendah yaitu kurang dari 10% dan kadar belerang yang rendah yaitu kurang dari 1%.



Gambar 2.3. Persentase jenis batubara di Indonesia

Reaktivitas batubara dipengaruhi oleh beberapa variabel, termasuk sifat-sifatnya yang tidak hanya dihubungkan dengan struktur fisik atau parameter proses. Variabel ini antara lain: kelas batubara, struktur pori-pori, dan struktur kimia batubara. Selain reaktivitas, faktor yang juga berkaitan dengan struktur fisiknya atau dianggap mempengaruhi laju reaksi pada kondisi di mana reaksi terjadi, antara lain adalah: konsentrasi gas reaktif, tekanan, dan jumlahnya sendiri. (Lemaigen, et al, 2002).

Tabel 2.6. Data kualitas contoh batubara Indonesia

Parameter (as received)	Allied Indo Coal	Kaltim Prima Coal	Kideco	Multi Harapan Utama	PTBA	Anugerah Bara Kaltim	Sari Andara Persada
	Parambahan	Prima	Mandau, Payau, Melawan	Busang	Lumut	Anugerah	Muara Bungo
Kadar Air, %	11	9,5	18 (adb)	16	12	14-18	10,11 (adb)
Kadar Abu, %	9	3,8	2,0	4,72	3,70 - 9,26	2,81 - 4,69	19,48 (adb)
Nilai Kalor, kal/g	7.000	6.240-6.294	5.600 - 6.250	6.040	6.021 - 6.947	6.200 - 6.400	5.949
Sulfur, %	1	0,54	0,15	0,94	0,22 - 1,44	0,28 - 0,66	0,83 (adb)
HGI	45 - 50	48	48 - 50	45	45 - 55	46 - 49	48
Deformasi awal abu, °C	-	-	1.150-1.200	-	-	1.200	1.300
Indeks Slagging	-	-	-	-	-	-	-
Indeks Fouling	-	-	-	-	-	-	-
Parameter (as received)	Danau Mas Hitam	Fajar Bumi Sakti	Gunung Bayan Pratama	Indominco Mandiri	Mandiri Inti Perkasa	Kartika Selabumi Mining	Lana Harita Indonesia
			Bayan	Bontang	Blok A		Block III
Kadar Air, %	14	8 (adb)	3 - 6 (adb)	15,5 - 17,00	19,5	8	-
Kadar Abu, %	13 - 19 (adb)	7 (adb)	6 - 15 (adb)	4,5-5,5 (adb)	4,65 (adb)	3,78	7,0 (adb)
Nilai Kalor, kal/g	5.900 - 6.500 (adb)	6.700 (adb)	6.000 - 7.500	6.100 - 6.500 (adb)	6.210	7.889	6.977
Sulfur, %	1,0 (adb)	0,8-2,56 (adb)	0,8-2,56 (adb)	0,5-0-0,80 (adb)	0,70 (adb)	0,85	1,16 (adb)
HGI	40 - 60	42 - 46	45 - 50	45 - 46	47	80	43
Deformasi awal abu, °C	1.280	-	1.250	-	1.490	1.220	> 1.200
Indeks Penerakan	-	-	-	-	-	rendah*	rendah*
Indeks Fouling	-	-	-	-	-	rendah*	medium*
Nilai Muai Bebas	-	-	-	-	-	9	-

Catatan: adb = air dried basis (dasar kering udara)

* = dihitung berdasarkan komposisi dan titik leleh abu

(Sumber: Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara, 2009)

2.4 Gasifikasi Batubara dalam Unggun Terfluidakan

Gasifikasi adalah suatu proses perubahan bahan bakar padat secara termokimia menjadi gas. Pada saat ini gasifikasi batubara digunakan sebagai cara alternatif pengganti bahan bakar minyak. Salah satunya karena udara yang diperlukan lebih rendah dari udara yang digunakan untuk proses pembakaran bahan bakar minyak. Gasifikasi batubara pertama kali diusulkan untuk dijadikan cara alternatif oleh presiden Amerika Serikat Jimmy Carter pada tahun 1970. Proyek tersebut termasuk dalam program *Synthetic Fuels Corporation*. Usulan itu muncul ketika itu karena pada tahun 1970 harga minyak yang diimpor terus-menerus mengalami peningkatan. Alasan lain adalah karena gasifikasi batubara lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan pembakaran minyak. Namun pada tahun 1980an proyek itu mengalami kendala karena pada tahun 1980 harga bahan bakar minyak mengalami penurunan. Berikut merupakan prinsip kerja umum yang terdapat dalam gasifikasi:

1. Proses Fisika

Beberapa proses fisis yang terjadi pada gasifikasi adalah sebagai berikut:

- a. Pemanasan, yaitu proses penambahan batubara dengan oksigen dan uap air, kemudian dipanaskan/dikompresi sampai suhunya tinggi.
- b. Pengeringan, yaitu pelepasan uap air dari padatan batubara.
- c. Pemanasan lanjut: Batubara dipanaskan kembali sampai suhunya sangat tinggi.
- d. Devolatilisasi, yaitu pengeluaran volatil (senyawa dengan struktur benzena) yang terdapat pada batubara sampai hanya tersisa arang saja.
- e. Pembakaran arang agar tidak ada lagi udara yang tersisa.

2. Proses Kimia

Selama reaksi, oksigen (O_2) mengoksidasi karbon dari batubara dan mereduksi uap air (H_2O) sehingga menghasilkan karbon monoksida (CO) dan gas hidrogen (H_2). Reaksi tersebut dapat ditulis sebagai berikut:



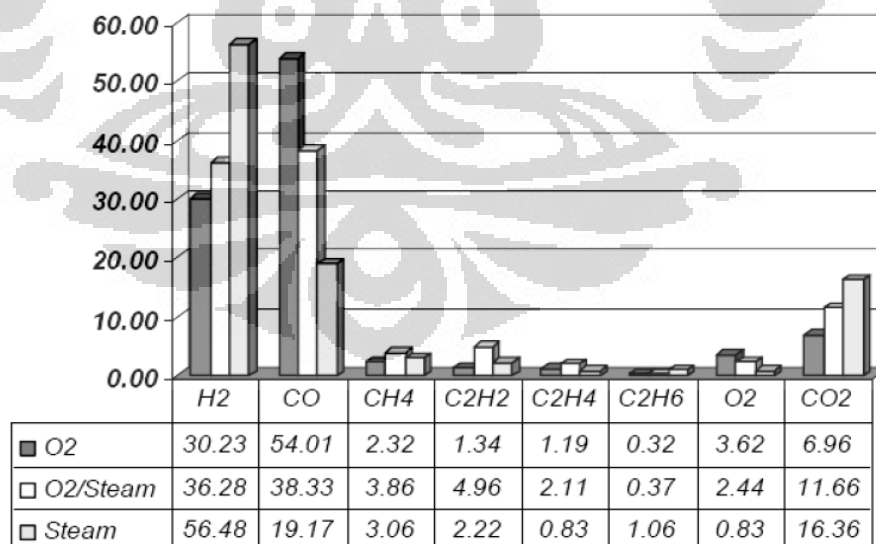
Gasifikasi batubara dengan unggun terfluidakan telah banyak diteliti. Berikut hanya akan dibahas penelitian terkini dari modifikasi unggun terfluidakan yang mampu menghasilkan komposisi hidrogen sangat tinggi, yaitu di atas 55%. Teknologi modifikasi tersebut antara lain penggunaan uap air murni, katalis, dan

pipa hisap. Pada tahun 2006, Suprpto melakukan penelitian pada dua jenis lignit dan satu jenis sub-bitumen dengan ukuran 48 - 65 mesh yang digasifikasi pada unggun terfluidakan dengan berbagai jenis oksidator. Oksidator yang digunakan adalah oksigen, oksigen+uap air, dan uap air. Pemanasan awal dilakukan hingga 900°C dan rasio C/O = 0,5, C/uap = 1 serta waktu gasifikasi 1 jam.

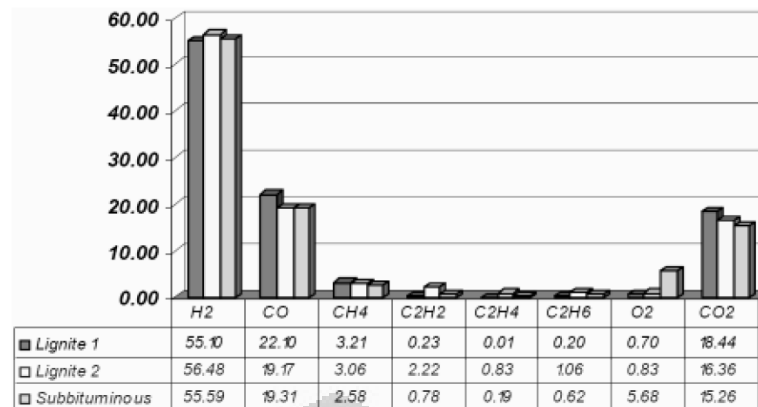
Tabel 2. 7. Karakteristik sampel batubara yang digasifikasi oleh Suprpto, 2006

Parameter	Lignit 1	Lignit 2	Sub-bitumen
kelembaban total, % ar	33,75	32,28	n a
kelembaban, % adb	15,35	22,07	17,73
abu, % adb	4,42	0,98	0,83
volatil, % adb	40,68	37,80	40,07
karbon tetap, % adb	39,55	31,75	41,37
nilai kalor, kal/g adb	5.431	4.873	5.752
sulfur, % adb	0,14	0,17	0,11
karbon, % adb	57,55	50,69	59,91
hidrogen, % adb	6,06	6,60	6,33
nitrogen, % adb	0,77	0,49	1,00
oksigen, % adb	31,06	41,07	32,20

Hasilnya uap air memberikan komposisi hidrogen terbesar pada produk dan lignit memberikan komposisi hidrogen yang paling besar.

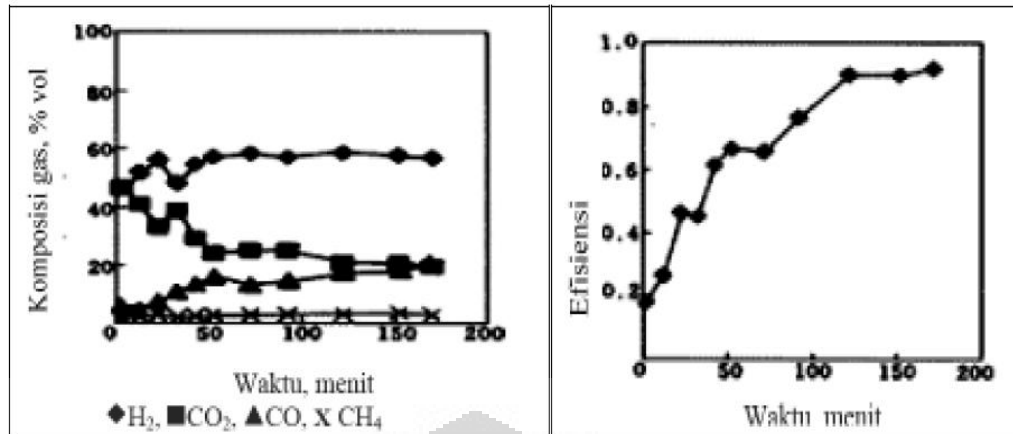


Gambar 2. 4. Komposisi produk dari gasifikasi lignit dengan berbagai oksidan (Suprpto, 2006)



Gambar 2. 5. Komposisi produk dari gasifikasi berbagai jenis batubara (Suprpto, 2006)

Penelitian dilakukan untuk menggasifikasi batubara sub-bitumen dari Australia dalam unggun terfluidakan sirkulasi internal (tinggi 2,7 m x diameter 0,3 m) yang dilengkapi pipa hisap (tinggi 0,9 m x diameter 0,1 m). Ke dalam unggun ditambahkan katalis tunggal dan campuran garam alkali dan logam transisi, yaitu K_2CO_3 , $Ni(NO_3)_2$, K_2SO_4 , dan $Ni(NO_3)_2 + K_2SO_4$. Reaktor ini dioperasikan pada tekanan atmosfer. Variabel yang divariasikan adalah temperatur ($750 - 900^\circ C$), rasio O_2 /batubara (0,3 - 0,5), dan rasio uap air/ batubara (0,3 - 0,8) pada kondisi dengan dan tanpa katalis. Hasilnya pada variasi tanpa katalis diperoleh komposisi 32 - 46% H_2 , 19 - 26% CO , 13- 20% CO_2 , dan 5 - 10% CH_4 dengan nilai kalori 9,9 - 12,1 MJ/m^3 . Katalis $Ni(NO_3)_2 + K_2SO_4$ memberikan hasil terbaik pada penelitian ini, yaitu 56% H_2 (Lee, et al, 1998). Kemudian percobaan gasifikasi batubara menggunakan gasifikator unggun bergerak yang dilengkapi pipa hisap dilakukan pada suhu reaksi sekitar $870^\circ C$ yang secara komparatif rendah untuk jenis gasifikator batubara. Oksidan yang digunakan adalah udara dan uap air dengan rasio volume 3:1. Diperoleh produk gas kalori medium yang kaya gas hidrogen. Produk gas mengandung 60% vol H_2 dengan nilai kalori mencapai 10 MJ/Nm^3 . Efisiensi maksimum gasifikasi batubara mencapai 92%. Hasil penelitian diilustrasikan pada grafik di bawah ini (Suwondo, 2007).



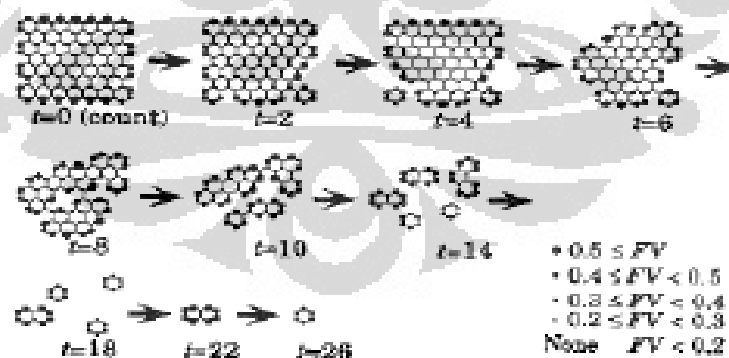
Gambar 2. 6. (a) Pengaruh waktu terhadap komposisi gas, (b) Pengaruh waktu terhadap efisiensi gasifikasi (Suwondo, 2007)

2.5 Gasifikasi Batubara dengan Plasma

Beragam penelitian menunjukkan adanya hasil gasifikasi yang beragam antara 0 - 100% konversi. Dengan menggunakan analisis yang didasarkan pada orbital molekular. Beberapa fenomena terobservasi pada gasifikasi aktual:

1. Gasifikasi dimulai pada tepi atom karbon
2. Sisi yang berbentuk zigzag lebih reaktif daripada sisi yang biasa
3. Laju reaksi meningkat dengan naiknya konversi
4. Laju reaksi tergantung pada ukuran kristalit, tetapi tidak sensitif terhadap bentuk kristalit

Gambar berikut ini adalah mekanisme gasifikasi batubara:

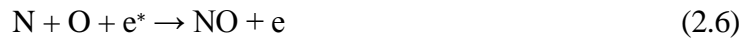


Gambar 2. 7. Proses Gasifikasi Karbon

FV: valensi bebas pada atom karbon, t: waktu gasifikasi

Dari penelitiannya dan referensi sebelumnya, Xiaojun He dan kawan-kawan mengusulkan mekanisme gasifikasi batubara pada plasma dalam medium udara dan uap air, yang terdiri dari 24 tahapan reaksi berikut ini:

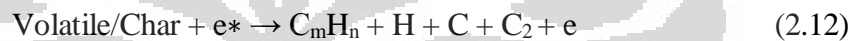
a) Spesies aktif udara plasma pada tahap inisiasi



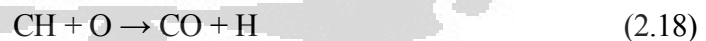
b) Spesies aktif pada tahap ketika uap air mulai dimasukkan



c) Spesies aktif yang terbentuk saat penambahan batubara



d) Gas yang terbentuk pada sistem



e) Ionisasi CO

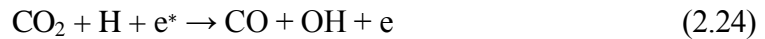


f) Konversi tiap spesi



g) Disosiasi gas





Tanda bintang menunjukkan elektron yang benergi tinggi, m dan n adalah jumlah atom dalam molekul. Pada proses gasifikasi batubara dengan medium udara dan air, secara umum dapat dibagi menjadi empat langkah. Langkah pertama terdiri dari dua tahap, reaksi a) sampai b). Pada tahap pertama ini, udara pada plasma teraktivasi oleh elektron menjadi N_2^+ , O_2^+ , O^+ , N, O dan NO. Pada tahap 2 setelah air dimasukkan, molekul air terdisosiasi menjadi radikal OH dan H pada reaksi b). Beberapa radikal dengan cepat bereaksi atau berkombinasi dengan spesies aktif lain membentuk spesies baru seperti radikal NH dan atom O melalui reaksi b) yang merupakan reaksi rekombinasi. Pada langkah kedua yang terdiri dari reaksi c) ketika dilakukan penambahan batubara, batubara akan mengalami dekomposisi dan disosiasi cepat untuk melepas senyawa volatil dan char, termasuk gas hidrokarbon C_mH_n serta atom C dan H tereksitasi. Pada langkah ketiga yang terdiri dari reaksi d), gas seperti CO, H_2 , dan CO_2 terbentuk dari reaksi kompleks (reaksi paralel atau rantai). Pada langkah keempat yang terdiri dari reaksi e) sampai f), radikal CN terbentuk pada reaksi e) melalui konversi atom C. Kemudian spesies CN tersebut terkonversi menjadi atom C dan N_2 pada reaksi f). Salah satu hal terpenting adalah terkonversinya CO_2 dan H_2 menjadi gas lain seperti CO, radikal OH, radikal H, elektron dan spesies lain yang akan terlibat lagi pada reaksi b) sampai e). Hal inilah yang menyebabkan proses gasifikasi dapat terjaga secara terus-menerus (He, et. al, 2003).

Rabovitser pada tahun 2006 melakukan penelitian gasifikasi batubara dengan reaktor DBD yang dioperasikan pada suhu 300 - 700°C dan tekanan 1 - 70 atm. Spesifikasi batubara Illinois yang digunakan dapat dilihat pada tabel berikut:

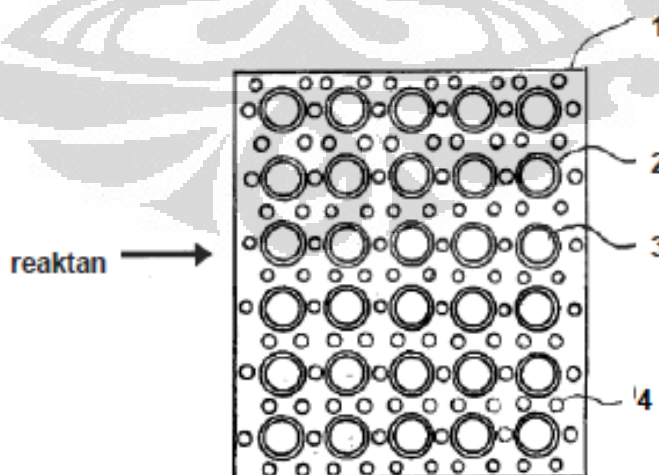
Tabel 2. 8. Karakteristik Sampel Batubara Illinois (Rabovitser, 2006)

Analisis Proksimat (% berat)			Analisis Ultimat (% berat)		
Parameter	Awal	Kering	Parameter	Awal	Kering
Kelembaban	0,0797	0	Kelembaban	0,0797	0
Abu	0,1425	0,1548	Karbon	0,6042	0,6565
Volatil	0,3686	0,4005	Hidrogen	0,0389	0,0423
Sulfur	0,0045	0,0049	Nitrogen	0,0107	0,0116
Karbon (BD)	0,4047	0,4397	Klorin	0,0005	0,0005
HHV (kJ/kg)	25.258	27.799	Sulfur	0,0445	0,0483
HHV (Btu/lb)	10.999	11.952	Abu	0,1425	0,1548
LHV (kJ/kg)	24.528	24.528	Oksigen (BD)	0,0791	0,0860
LHV (Btu/lb)	10.545	10.545			

Batubara dihaluskan dengan dicampur uap air untuk pemanasan awal hingga mencapai suhu 300°C. Kemudian batubara tersebut dimasukkan ke dalam reaktor plasma dan diberikan lagi uap air sebagai oksidan. Reaksi global yang terjadi pada batubara sampel adalah sebagai berikut:

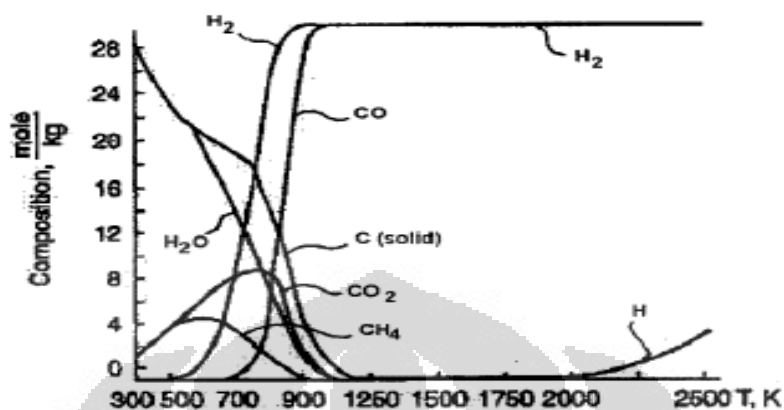


Reaksi tersebut bersifat endotermis dengan entalpi 7.673 kJ/kg batubara. Reaktor DBD yang digunakan terdiri dari balok baja (1) berisi silinder-silinder dielektrik (2) yang di dalamnya terdapat elektroda tegangan tinggi (3). Silinder tersebut dikelilingi oleh batang-batang baja (4) sebagai elektroda tegangan rendah. Reaktor ini dioperasikan pada tegangan di minimal 1 kV.



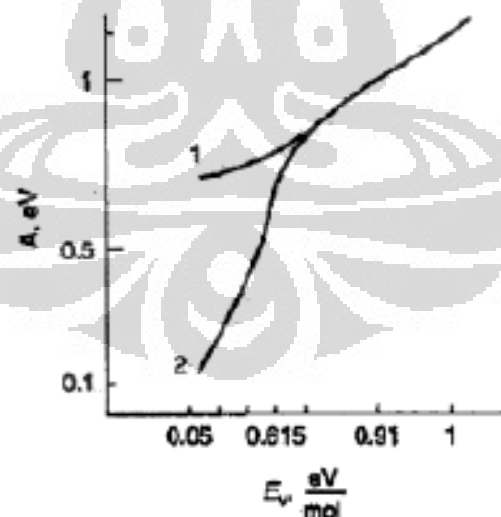
Gambar 2. 8. Reaktor gasifikasi menggunakan DBD (Rabovitser, 2006)

Komposisi gas yang dihasilkan pada berbagai suhu dapat dilihat pada grafik di bawah ini. Pada suhu 800K diperoleh komposisi tertinggi hidrogen.



Gambar 2. 9. Komposisi gas sintesis pada variasi suhu reaktor (Rabovitser, 2006)

Hasil analisis termodinamik menunjukkan bahwa proses ini menurunkan konsumsi energi dibandingkan gasifikasi pada suhu tinggi. Konsumsi energi pada proses ini (gambar 2.10) hanya 0,1 eV/molekul (>110 kJ/mol gas sintesis) pada input energi proses 5 - 10 kJ/mol dan temperatur 500 - 600°C untuk konversi tak sempurna. Konsumsi energi meningkat menjadi 0,7 - 0,9 eV/molekul (70 - 90 kJ/mol gas sintesis) untuk konversi sempurna, lebih rendah dibandingkan dengan proses *catalytic reforming*.



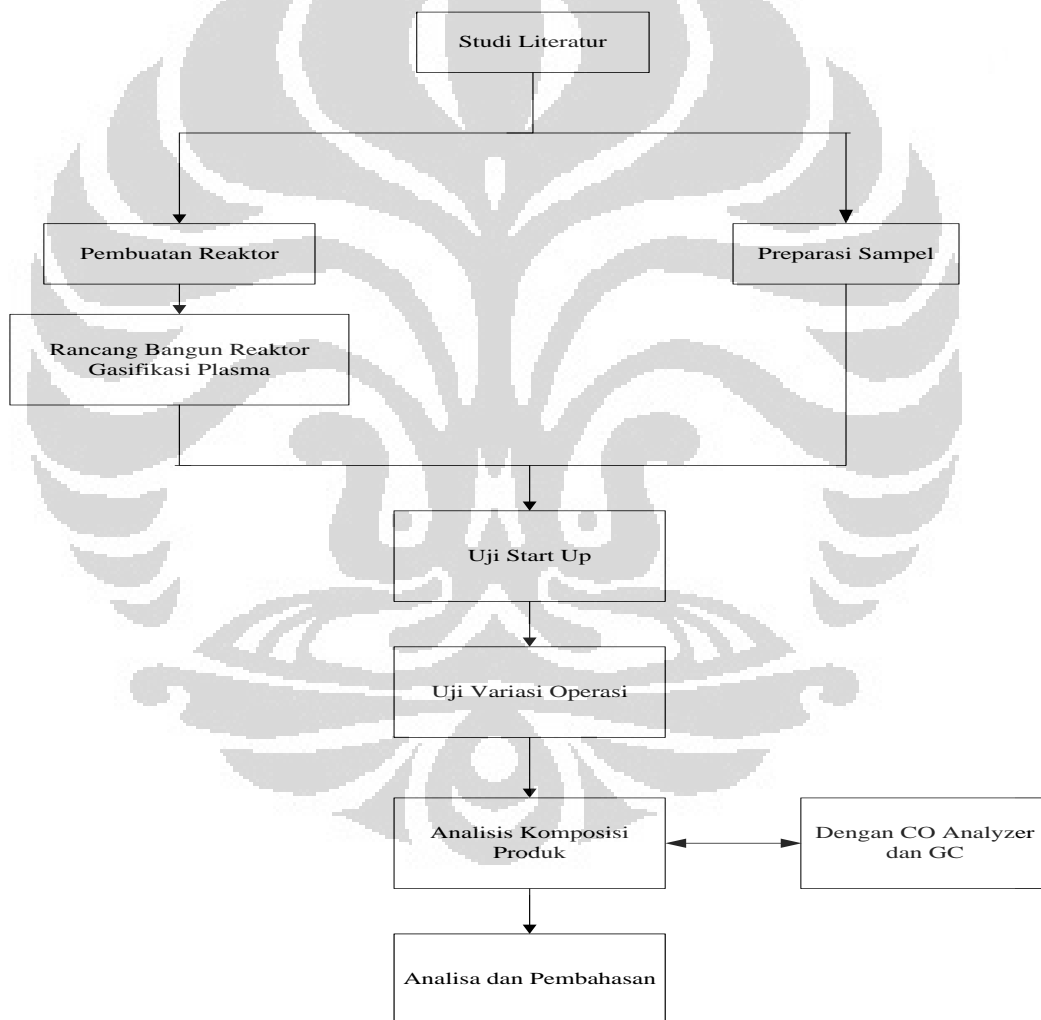
Gambar 2. 10. Konsumsi energi pada proses gasifikasi dengan DBD (Rabovitser, 2006)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian akan dibagi dalam beberapa tahap, dimulai dengan tahap pra-penelitian yaitu melakukan studi literatur mengenai hal-hal yang berhubungan dengan reaktor plasma dilanjutkan perancangan, fabrikasi, dan pengujian. Lalu melakukan pengujian variabel yang menjadi objek utama penelitian. Berikut diagram alir penelitian:



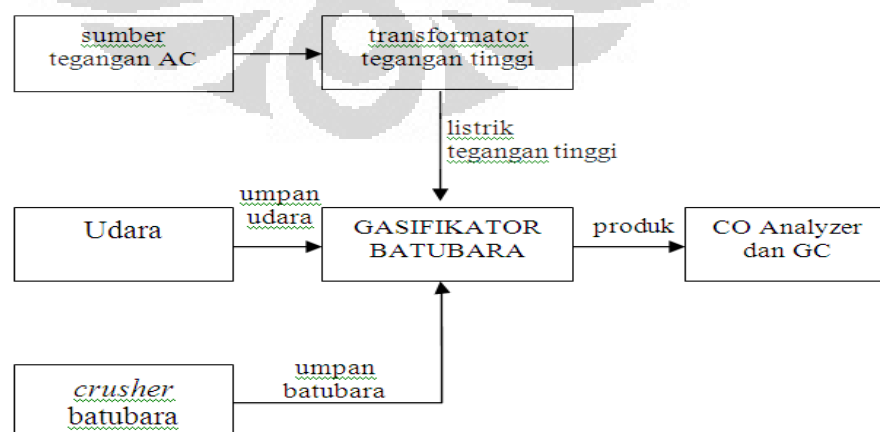
Gambar 3. 1. Diagram alir penelitian

Tahap awal penelitian adalah studi literatur. Dalam tahap ini dilaksanakan pengumpulan referensi berupa penelitian terdahulu yang terkait dan data sekunder. Referensi tersebut digunakan dalam estimasi penentuan rincian dari rancangan reaktor gasifikasi, kondisi operasi, dan utilitas pendukung operasi serta estimasi penentuan jenis sampel yang akan diumpangkan. Selain itu, ditentukan pula teknik pengolahan data dan cara menginterpretasikannya.

Tahap kedua adalah perancangan reaktor gasifikasi plasma beserta dengan *fluidized bed*. Sementara itu dilakukan pula analisis karakteristik sampel batubara yang akan menjadi masukan. Adapun karakterisasi batubara yang akan dilakukan adalah analisis proksimat dan ultimat. Kemudian dilakukan preparasi sampel melalui penghalusan batubara. Setelah itu reaktor yang telah dirangkai diuji untuk mengetahui apakah rangkaian tersebut sudah aman dan memenuhi kondisi yang diinginkan.

Tahap ketiga adalah uji variasi dan observasi hasil. Dalam tahap ini akan diamati efek dari variasi tegangan dan jenis oksidator. Kemudian ditentukan kondisi operasi yang dapat mengoptimalkan gas produk. Tahap akhir adalah penyusunan laporan. Tahap ini terdiri dari analisis dan pembahasan hasil penelitian yang kemudian disimpulkan kondisi optimal dan efek dari variasi.

Pada penelitian ini akan disusun rangkaian sistem gasifikator batubara unggul terfluidakan dalam medan plasma *dielectric barrier discharge* beserta peralatan utilitas pendukung. Berikut adalah skema rangkaian komponen peralatan yang digunakan pada penelitian ini:



Gambar 3. 2. Skema rancangan penelitian

3.2 Rancang Bangun Sistem Reaktor Plasma

Pada penelitian ini rancang bangun yang akan dibuat ialah sistem gasifikator batubara menggunakan plasma non termal dalam unggun terfluidakan. Inti dari sistem tersebut ialah suatu reaktor plasma tipe DBD yang dapat memfluidisasikan batubara dengan menggunakan sumber tenaga listrik PLN. Perangkat penunjang lainnya yang akan melengkapi kerja dari reaktor tersebut terdiri dari:

1. Reaktor plasma
2. Regulator Tegangan
3. Trafo tegangan tinggi
4. Indikator laju alir dan pengukur tegangan.
5. *Bubbler* udara
6. Gas trap untuk menyimpan produk untuk dianalisis GC
7. Trap untuk menghambat dan menampung abu/debu batubara yang ikut lolos dari filter reaktor.

Serta bahan yang digunakan ialah :

1. Batubara yang berasal dari PT. Indonesia Power UBP Suralya
2. Udara yang berasal dari kompresor dan oksigen dari tabung oksigen medis.

Serta tiap alat dihubungkan dengan saluran selang plastik yang menyalurkan udara ke dalam reaktor. Komposisi gas keluaran reaktor akan dianalisis menggunakan *CO analyzer* dan *Gas Chromatography (GC)*. Berikut gambar keseluruhan sistem gasifikator batubara unggun terfluidakan dalam medan plasma *dielectric barrier discharge* yang akan diuji pada penelitian ini:


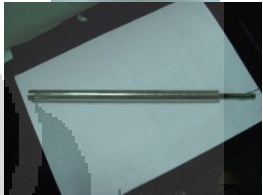


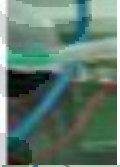



Gambar 3. 3. Susunan rangkaian gasifikator plasma

3.2.1 Pembuatan Reaktor

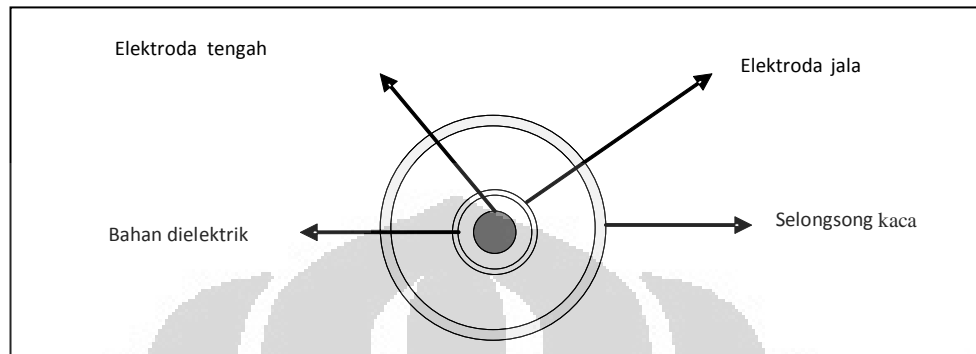
Peralatan utama ialah gasifikator *dielectric barrier discharge* yang terdiri dari komponen-komponen utama sebagai berikut:

Tabel 3. 1. Daftar peralatan utama gasifikator plasma

No	Komponen Alat	Keterangan	Kegunaan	Gambar
1.	5 bagian tabung gelas kaca	dimensi total diameter 10 cm dan tinggi 66 cm	Bahan reaktor	
2.	1 buah elektroda stainless steel ANSI 304	ukuran 5/8 in dan panjang 22 cm	Elektroda tengah	
3.	1 buah elektroda berbentuk jala stainless steel ANSI 316 beserta penyangganya	Ukuran diameter 1,75 cm dengan tinggi 15 cm	Anoda	
4.	2 buah filter ukuran 200 mesh	Diameter 10 cm	Filter batubara	
5.	Selang plastik	Diameter 1/4 in	Untuk mengalirkan gas	
6.	Trap	Berbahan kaca	Perangkap debu batubara yang lolos dari filter	

Pemilihan material reaktor yang digunakan pada rancangan reaktor ini berdasarkan kekuatan bahan dalam menahan kondisi operasi yang terjadi dalam reaktor dan juga kemudahan untuk pengamatan. Seperti material kaca sebagai selongsong, material *stainless steel* sebagai elektroda, dan plastik untuk selang. Skema utama rancangan reaktor plasma DBD ini ialah menggunakan dua elektroda dengan 1 elektroda berbentuk batang sebagai elektroda tengah dan

dikelilingi oleh material dielektrik yakni kaca dan selanjutnya ditutup oleh elektroda berbentuk jala. Dipilihnya bahan kaca sebagai bahan dielektrik karena mempunyai ketahanan panas yang cukup tinggi. Berikut gambaran penampang melintang reaktor:



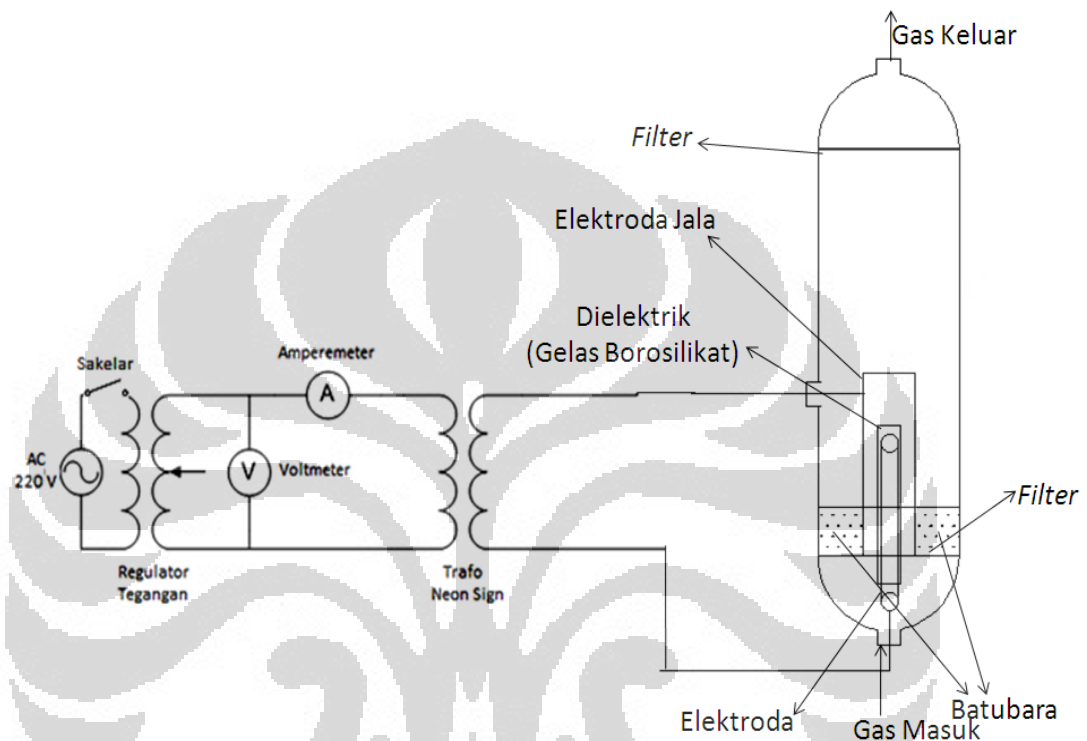
Gambar 3. 4. Gambaran penampang melintang reaktor

Daerah diantara elektroda inti dan elektroda jala merupakan daerah utama pembentukan material plasma yang terbentuk akibat loncatan elektron dari kedua elektroda bertabrakan dengan atom dan molekul berasal dari gas reaktan. Kondisi pembentukan tersebut terjadi secara acak dan terus-menerus sepanjang elektroda menghasilkan elektron yang berasal dari sumber arus listrik. Sehingga daerah itulah yang menjadi daerah puncak terjadinya reaksi plasma yang disebut *discharge gap*. Daerah lainnya yang berada disetiap sisi dari elektroda merupakan medan lokal yang bermuatan tinggi akibat mengalirnya aliran listrik sepanjang elektroda, dan mempengaruhi reaktan yang mengalir disekitarnya. Selanjutnya masing-masing komponen tersebut dirangkai, dengan tahap pengerjaan sebagai berikut :

1. Pemesanan reaktor kaca yang terdiri dari 5 bagian yang sesuai dengan desain.
2. Pemasangan filter pada bagian bawah dan atas ruang fluidisasi.
3. Pemasangan elektroda *stainless steel* ANSI 304 ke dalam reaktor dan dikencangkan dengan tambahan karet silicon.
4. Pemasangan elektroda berbentuk jala *stainless steel* ANSI 316 beserta penyangganya pada ruang fluidisasi.
5. Menggabungkan masing-masing bagian reaktor dengan menggunakan ring *stainless* dan mengencangkannya.
6. Memasang reaktor pada *frame acrylic*.

7. Pemasangan sumber masukan listrik yang disambungkan dengan jala SS untuk bagian tengah dan bagian ujung bawah pipa SS untuk bagian elektroda tengah.

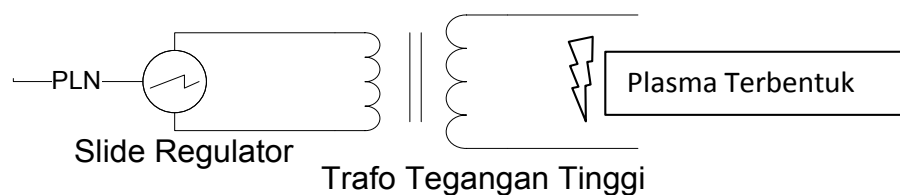
Sehingga keseluruhan peralatan tersebut selanjutnya dirangkai sesuai dengan skema rancang bangun reaktor dibawah ini :



Gambar 3. 5. Skema rancang bangun reaktor *dielectric barrier discharge*

3.2.2 Rangkaian Pembangkit Plasma

Pada penelitian ini sumber listrik utama untuk pembangkitan plasma menggunakan sumber listrik PLN 220 Volt. Keluaran tersebut langsung akan disambungkan kerangkaian pengatur tegangan listrik yakni *slide regulator* sebelum dihubungkan dengan Trafo Tegangan Tinggi (HVTR). Sehingga memiliki skema alat sebagai berikut :



Gambar 3. 6. Skema pembentukan plasma dengan trafo tegangan tinggi

Kelengkapan alat untuk menciptakan plasma ini sebagai berikut :

1. Regulator Tegangan sebagai pengatur tegangan keluaran dari listrik PLN sebelum masuk ke trafo tegangan tinggi sehingga dapat mengatur terbentuknya plasma didalam reaktor plasma. Spesifikasi alat yang dipakai adalah *voltage regulator* TDGC₂ 0,5 kVA OKI dengan *output indicator* memiliki rentang antara 0 – 250 V.



Gambar 3. 7. Regulator Tegangan

2. Trafo tegangan tinggi untuk menaikkan tegangan masukan dari inverter mencapai tegangan munculnya plasma oleh trafo yang berjenis *Neon Sign Transformer* (NST) merek *Standard Electrics Works Hongkong* tipe T1522. Dengan spesifikasi tegangan masukan 120 – 240 V menjadi tegangan tinggi, dengan rentang 2 – 15 kV pada 30 – 120 mA dan frekuensi 50 Hz.



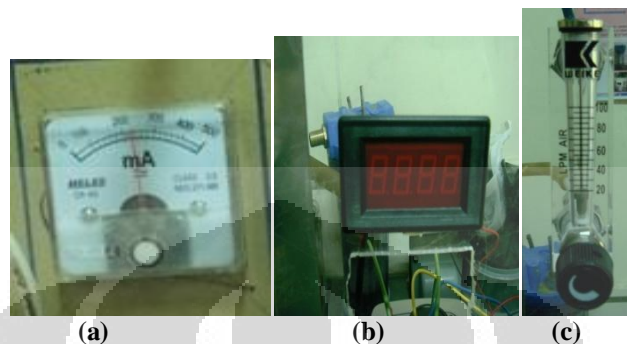
Gambar 3. 8. Neon Sign Transformer

3. Kabel tegangan tinggi sebagai penghubung keluaran trafo dengan reaktor plasma berjenis kabel *neon sign* yang sanggup menyalurkan tegangan hingga rentang 20 kV dan kabel listrik tegangan normal 220 V untuk menghubungkan listrik antara regulator tegangan dengan NST.

3.2.3 Penggunaan Alat Ukur

Sejumlah alat ukur digunakan untuk mengetahui kondisi laju alir reaktan dan perubahan tegangan saat berlangsungnya percobaan reaktor plasma. Alat ukur

untuk membaca tegangan dan arus listrik digunakan Voltmeter digital sedangkan Amperemeter dengan jenis panel bermerek *HELES* dengan rentang 0 – 500 mA. Sedangkan untuk laju alir reaktan digunakan flowmeter dengan batas laju alir 20-100 L/menit.



Gambar 3. 9. Alat ukur dalam sistem reaktor plasma, (a) amperemeter; (b) voltmeter; (c) flowmeter

3.3 Preparasi Sampel

Sampel batubara dipreparasi agar halus menjadi partikel dengan ukuran antara 120 - 200 mesh. Karakteristik batubara yang digunakan dianalisis dengan jasa analisis proksimat dan ultimat. Berikut merupakan hasil analisis proksimat dan ultimat dari sampel batubara yang didapatkan dari PT. Indonesia Power UBP Suralya.

Tabel 3. 2. Hasil analisis proksimat dan ultimat dari sampel batubara

Parameter	Unit	Hasil	Metode
<i>Total Moisture</i>	%, ar	27,5	ASTM D 3302-10
Analisis proksimat :			
- <i>Moisture in Analysis</i>	%, adb	14,8	ASTM D.3173-08
- <i>Ash Content</i>	%, adb	1,9	ASTM D.3174-04
- <i>Volatile Matter</i>	%, adb	44,8	ISO 562-2010
- <i>Fixed Carbon</i>	%, adb	38,5	ASTM D.3172-07
- <i>Total Sulfur</i>	%, adb	0,18	ASTM D. 4239-10
Analisis ultimat :			
Karbon (C)	%, adb	62,02	ASTM D 3178-02
Hidrogen (H)	%, adb	5,47	ASTM D 3178-02
Nitrogen (N)	%, adb	0,69	ASTM D 3179-02
Oksigen (O)	%, adb	29,70	ASTM D 3176-02

Alat dan bahan:

1. Pengalus/ ulekan
2. Saringan (120 dan 200 mesh)
3. Batubara

Prosedur preparasi sampel batubara adalah sebagai berikut:

1. Menghaluskan batubara dengan ulekan sampai berbentuk butiran.
2. Menyaring batubara dengan saringan bertingkat 120 dan 200 mesh.
3. Menghaluskan lagi batubara yang tidak lolos dari mesh sampai jumlah sampel yang dibutuhkan tercukupi.

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Uji *Start-up* Alat

Sebelum dilakukan uji start-up alat, terlebih dahulu dilakukan uji kebocoran reaktor. Uji kebocoran reaktor dilakukan dengan cara sederhana yaitu metode air sabun. Caranya udara dari kompresor dialirkan ke dalam reaktor dengan kondisi seluruh reaktor telah tertutup serta membiarkan lubang produk dibiarkan terbuka agar aliran udara kompresor dapat keluar dari reaktor. Kemudian meneteskan air sabun ke area yang berpotensi bocor sehingga jika terindikasi bocor dengan ciri munculnya buih, maka tempat munculnya buih diberi lem tambahan. Jika terdapat kebocoran maka dilakukan upaya penambahan atau penggantian *silicon seal* yang lebih rapat dan penguncian yang lebih erat. Pada permukaan tutup reaktor juga ditambahkan lembaran *silicon* tipis untuk mengurangi kebocoran.

Setelah menyusun peralatan sebagai satu sistem, perlu dilakukan pengujian start-up alat untuk mengetahui kinerja reaktor plasma non-termal. Uji start up ialah dengan mengalirkan sejumlah kecil umpan ke dalam reaktor untuk direaksikan. Jika tidak terjadi permasalahan, baik kebocoran, pembangkitan plasma yang berhasil, maupun aspek lainnya berarti reaktor sudah dapat dioperasikan dengan normal. Selain itu juga akan diuji fenomena hidrodinamika seperti profil fluidisasi dan plasma yang terjadi di dalam reaktor.

3.4.2 Variasi Kondisi Operasi Proses

Setelah dilakukan uji start up, yaitu uji hidrodinamika awal seperti uji kebocoran dan hidrodinamika lanjut seperti profil fluidisasi dan plasma, maka reaktor sudah siap digunakan. Selanjutnya dilakukan operasi proses yang akan dilakukan untuk pengamatan produk hasil gasifikasi batubara terhadap variabel – variabel (baik terikat maupun bebas) yang telah ditentukan sebelumnya. Variabel – variabel yang digunakan dalam penelitian ini secara garis besar dapat dibedakan menjadi tiga yaitu variabel bebas, variabel kontrol, dan variabel terikat. Variabel bebas pada penelitian ini meliputi tegangan listrik yang diatur oleh regulator tegangan dan jenis dari oksidator. Variabel kontrol pada penelitian ini adalah ukuran batubara 120 – 200 mesh, laju alir oksidator 30 liter/menit, dan waktu fluidisasi 5 menit. Adapun variabel terikat pada penelitian ini adalah komposisi gas produk. Berikut variabel-variabel bebas proses yang akan divariasikan:

1. Pengaruh perbedaan keluaran regulator tegangan yang digunakan untuk pembangkitan plasma, dengan variasi beberapa tegangan yakni 190, 200, 210 dan 220 Volt AC.
2. Pengaruh jenis oksidator yang digunakan pada percobaan ini, yaitu udara dan oksigen.

Setiap variasi variabel bebas dilakukan dalam jangka waktu 5 menit, hal ini dilakukan karena reaksi dengan bantuan plasma berjalan dengan cepat. Serta hal utama yang diharapkan teruji pada waktu tersebut ialah kondisi produk yang dihasilkan telah stabil dan tidak berubah-ubah lagi.

3.4.3 Langkah Kerja Pengoperasian Reaktor Plasma

Untuk mengoperasikan reaktor hasil rancangan ini, berikut adalah usulan tahapan yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Alirkan oksidator masuk ke dalam reaktor disertai pengaturan laju alir pada 30 L/menit.
2. Tunggu aliran gas memenuhi seluruh ruang reaktor dengan perhitungan waktu tunggu berdasarkan laju alir berbanding volume reaktor.
3. Regulator tegangan dinyalakan, diputar sampai tegangan 190 volt AC, menyalakan *stopwatch* dan mencatat tegangan dan arus.

4. Nyalakan reaktor selama 5 menit dan setelah terpenuhi, tutup keluaran *gas trap*.
5. Bawa gas trap yang telah terisi produk hasil reaktor plasma untuk diuji dengan *gas chromatography*.
6. Cek kandungan CO dengan menggunakan *CO analyzer*.
7. Lakukan *flushing* reaktor dengan menggunakan aliran udara ambient yang dapat berasal dari kompresor atau sumber lainnya untuk menghilangkan sisa gas didalam reaktor.
8. Ulangi langkah 2 - 6, dengan menaikkan tegangan menjadi 200, 210, dan 220 volt AC untuk percobaan variasi tegangan.
9. Ulangi langkah 1 - 8, dengan mengubah jenis oksidator untuk percobaan variasi jenis oksidator.

3.5 Prosedur Pengambilan Data Percobaan

Data tentang tegangan dan arus listrik diukur dengan menggunakan voltmeter dan ampermeter yang tersambung ke rangkaian pembangkitan plasma. Sedangkan untuk data laju alir oksidator diukur menggunakan flowmeter sebelum masuk reaktor. Data utama yang akan didapatkan dari percobaan ini adalah komposisi produk pada tiap kondisi variabel bebas yang diujikan. Selain itu untuk data masukan oksidator dilakukan pengukuran untuk mengetahui flowrate sehingga didapat lama waktu tinggal di dalam reaktor dan terakhir melakukan pengukuran konsentrasi dari hasil gas keluaran reaktor yang diukur dengan menggunakan GC dan *CO analyzer*. Berikut prosedur pengoperasian GC merujuk pada petunjuk penggunaan GC yang digunakan pada Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Alam Departemen Teknik Kimia UI:

Preparasi GC

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

Prosedur mengalirkan gas Argon

1. Pastikan tekanan input dan output di regulator berada pada angka \emptyset dan tidak ada kebocoran pada sambungan-sambungannya.

2. Buka valve utama dari kencang menjadi kendur, sehingga tekanan akan langsung naik
3. Buka valve regulator dari kendur menjadi kencang sehingga tekanan akan naik perlahan-lahan

Prosedur membuka tabung gas

1. Pastikan tekanan input dan output di regulator, jarum pressure gauge menunjukkan 0 (tertutup) dan valve dalam keadaan tertutup (posisi valve longgar)
2. Buka valve induk di tabung dengan memutar ke arah kiri (arah kebalikan jarum jam) dan lihat tekanan gas, yang menunjukkan tekanan dalam tabung
3. Buka valve regulator perlahan-lahan ke arah kanan (searah jarum jam), lalu atur tekanan gas yang diinginkan
4. Pastikan instalasi gas baik dari tabung sampai perpipaan tidak bocor (cek kebocoran menggunakan pipa sabun)
5. Untuk gas-gas yang beracun dan mudah terbakar (CO , H_2 , CH_4), langkah 4 harus dilakukan terlebih dahulu sebelum langkah 1 menggunakan gas inert N_2

Prosedur Menutup Gas

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

Prosedur Menyalakan GC

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

Prosedur menyalakan chromatopac

1. Menghubungkan chromatopac dengan GC, tekan: *shift down* bersama dengan I,N,I ,lalu tekan enter,akan muncul initialize.
2. Mengatur tinta di sebelah kiri, tekan: *shift down* bersama dengan plot, lalu tekan enter, untuk mengatur gunakan “*coarse*” kemudian tekan kembali *shift down* bersama dengan plot, lalu tekan enter.
3. Input *attenuasi*. Jika *attenuasi* kecil maka segala *impurities* akan terlihat “*peak*”nya, sehingga digunakan *attenuasi* yang agak besar, tekan: *attn* bersama dengan angka 7, lalu tekan enter.
4. Mengatur kecepatan kertas, tekan: *speed* bersama dengan angka 10, lalu tekan *enter*.
5. Mengatur *stop time*, tekan: *stop time* bersama dengan angka 5 lalu tekan *enter*.
6. Untuk melihat parameter-parameter yang ada, tekan: *shift down* bersama dengan *print* dan *width*, lalu tekan *enter*.
7. Mengetahui apakah GC sudah stabil (garis lurus), tekan: *shift* bersama dengan *plot*, lalu tekan *enter*. Kestabilan juga dapat dilihat dari tekan: *print* bersama *ctrl* dan *width* secara bersamaan. Nilai yang keluar harus lebih besar dari 100, jika belum mencapai, maka *coarse* atau *fine* diputar untuk mendapatkan hasil yang diinginkan.

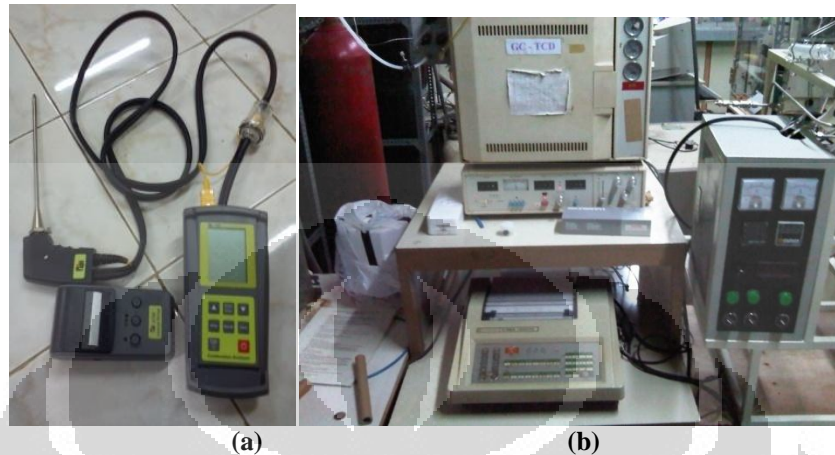
Prosedur mematikan GC

1. Mematikan *current*.
2. Menurunkan temperatur menjadi 30 – 30 - 30 kemudian GC dibuka agar pendinginan terjadi lebih cepat.
3. Setelah suhu kolom menjadi 60 (pada indikator) kemudian GC baru dapat dimatikan.
4. Matikan aliran *gas carrier* dengan menutup regulator tabung gas tersebut.

Alat *CO analyzer* yang digunakan adalah *Gas Analyzer TPI 709*, yang dapat mendeteksi gas CO₂ dan CO. Prosedur penggunaannya adalah sebagai berikut.

1. Menyiapkan *gas analyzer* dengan menyambungkan selang probe ke monitor serta menyambungkan kabel kuning ke monitor.
2. Menyalakan *gas analyzer* untuk mengecek kadar CO pada kondisi normal.

3. Memasukkan selang probe ke aliran gas produk sehingga kadar emisinya tertangkap oleh probe yang kemudian dibaca oleh sensor dalam *CO analyzer*.
4. Mengulangi percobaan pada variasi lainnya.



Gambar 3. 10. Alat analisis gas produk, (a) *CO analyzer*; (b) GC TCD

3.6 Lokasi Penelitian

Aktivitas utama penelitian ini akan dilakukan di Laboratorium intensifikasi Proses lantai 2, Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Sedangkan untuk pengujian analisa kandungan gas akan digunakan metode *gas chromatography* dan dilakukan di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Alam Departemen Teknik Kimia UI.

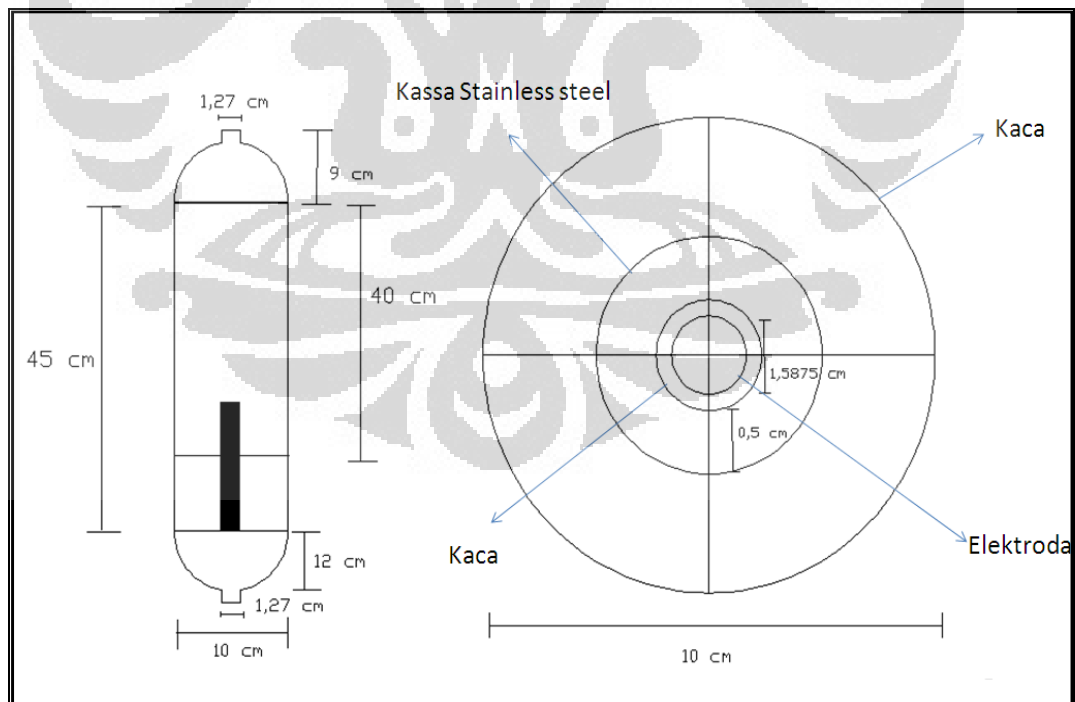
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

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

4.1 Rancang Bangun Reaktor

Penelitian ini akan difokuskan dalam pembuatan reaktor DBD untuk gasifikasi batubara dalam unggun terfluidakan. Sehingga dalam desainnya nanti akan mempertimbangkan fenomena fluidisasi dan gasifikasi dari batubara dalam medan plasma. Setelah itu, reaktor akan diuji kinerjanya dengan membandingkan penggunaan dua oksidator yang berbeda, yaitu udara dan oksigen. Dengan perbandingan tersebut diharapkan dapat ditarik sebuah kesimpulan mengenai fenomena fluidisasi dan gasifikasi batubara sehingga nantinya dapat dilakukan optimalisasi pada desain gasifikator tersebut dan layak untuk diaplikasikan dalam skala industri. Secara garis besar reaktor DBD yang ini rancang adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 1. Rancang desain reaktor DBD

Prinsip utama perancangan reaktor DBD adalah adanya penghalang (*barrier*) di antara kedua elektrodanya dan elektron akan bergerak dari potensial tinggi ke potensial rendah. Di reaktor ini, media yang berfungsi sebagai penghalang adalah kaca dielektrik. Dengan adanya penghalang ini maka akan terjadi loncatan listrik dari kawat jala menuju elektroda SS atau sebaliknya. Adapun reaktor ini memiliki ukuran diameter 10 cm dan tinggi 66 cm dengan tinggi ruang fluidisasi sebesar 40 cm. Berikut ini akan dijelaskan kelengkapan alat-alat dari reaktor beserta analisis kegunaannya:

1. Selongsong reaktor

Bahan yang digunakan adalah kaca dengan ketebalan 3,8 mm. Tujuan penggunaan bahan ini adalah karena bahan ini lebih tahan panas dan juga tahan terhadap tegangan listrik tinggi. Kaca ini berwarna transparan sehingga dapat diamati fenomena fluidisasi dan plasma yang terjadi dalam reaktor. Ketebalan kaca tersebut dibuat untuk meminimalisir kemungkinan pecah pada saat proses gasifikasi batubara dalam medan plasma berlangsung.

2. Elektroda tegangan tinggi

Elektroda ini terbuat dari bahan *stainless steel* ANSI 304. Pemilihan bahan ini karena kemampuannya dalam menghantarkan listrik untuk menghasilkan plasma dan relatif ekonomis.

3. Kaca dielektrik

Bahan dielektrik yang digunakan dalam penelitian ini adalah gelas borosilikat (“pyrex” atau “duran”). Alasan bahan yang digunakan adalah selain karena bahan ini tahan panas, tahan terhadap tegangan listrik tinggi dan relatif ekonomis. Selain itu kaca dielektrik ini akan mendistribusikan plasma agar tidak terkonsentrasi di beberapa titik saja. Di dalam kaca ini nantinya akan diletakkan elektroda tegangan tinggi sehingga proses plasma terjadi di antara permukaan terluar kaca dengan elektroda jala.

4. Elektroda jala

Elektroda ini terbuat dari bahan *stainless steel* ANSI 316. Elektroda ini akan disusun mengelilingi/ membungkus kaca dielektrik dengan jarak sekitar 3 mm. Daerah inilah yang merupakan daerah utama pembentukan

material plasma yang terbentuk akibat loncatan elektron dari kedua elektroda bertabrakan dengan atom dan molekul berasal dari oksidator dan batubara. Kondisi pembentukan tersebut terjadi secara acak dan terus-menerus sepanjang elektroda menghasilkan elektron yang berasal dari sumber arus listrik. Sehingga daerah itulah yang menjadi daerah puncak terjadinya reaksi plasma yang disebut *discharge gap*. Elektroda jala tersebut memiliki ukuran lubang 16 mesh sehingga nantinya batubara yang terfluidisasi dapat masuk di antara elektroda jala dan kaca dielektrik. Untuk memastikan elektroda jala tersebut tetap mempertahankan *discharge gap* digunakan sebuah penyangga karena menurut penelitian terdahulu jarak optimal antar elektroda adalah 3 - 5 mm.

5. Kabel Tegangan Tinggi

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

6. *Filter*/ Distributor

Yang dimaksud dengan *filter* di sini adalah distributor yang berperan sebagai penyangga padatan sekaligus *filter* sehingga padatan batubara tetap berada dalam ruang fluidisasi. *Filter* yang digunakan dalam reaktor ini berjumlah 2 buah yang berukuran 200 mesh. *Filter* ini dipasang pada dasar dan atap ruang fluidisasi. Namun, pada kenyataannya masih terdapat abu batubara yang tetap lolos dan terbawa dengan gas produk sehingga diperlukan alat tambahan yang berupa *trap*.

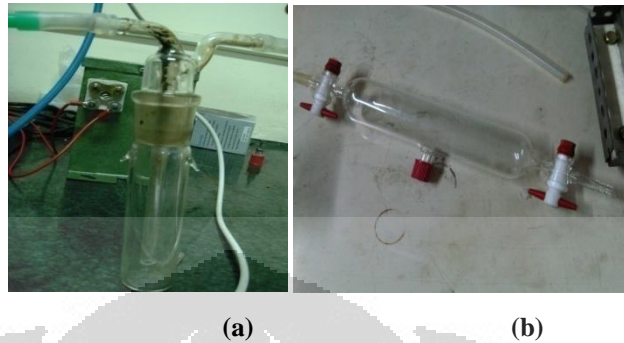
7. *Trap*

Trap ini terbuat dari bahan kaca yang berfungsi sebagai perangkap abu batubara yang lolos terbawa gas produk. *Trap* ini akan menampung abu batubara tersebut sehingga gas keluaran telah bebas dari abu batubara dan siap untuk dianalisis baik menggunakan GC maupun *CO analyzer*.

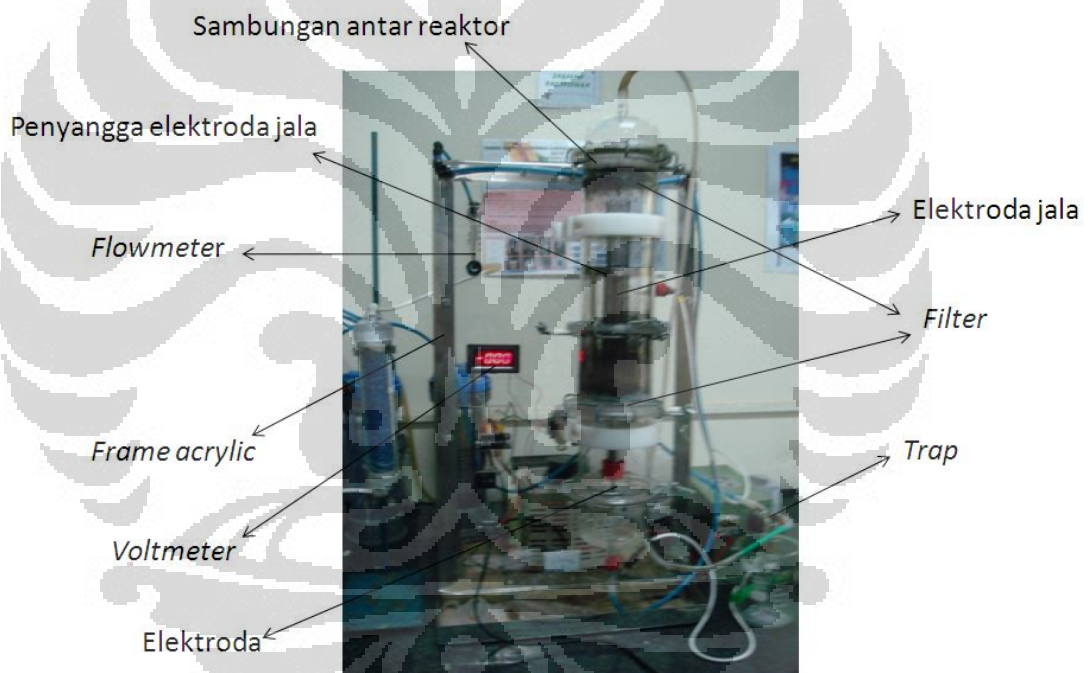
8. *Gas sampling*

Gas sampling digunakan untuk menangkap gas produk keluaran reaktor untuk kemudian disuntikkan menggunakan *syringe* ke GC. *Gas sampling*

memiliki dua valve yang digunakan untuk memerangkap gas. Nantinya gas diambil melalui selang yang telah melewati trap seperti telah dijelaskan di atas.



Gambar 4. 2. (a) *Trap* ; (b) *Gas sampling*



Gambar 4. 3. Gambar keseluruhan reaktor beserta penjelasannya

4.2 Uji Kinerja Awal Reaktor

Setelah melakukan perakitan reaktor maka reaktor siap diuji kinerjanya baik fenomena fluidisasainya maupun fenomena plasmanya. Uji fisik reaktor ini dilakukan setelah memastikan tidak terdapat kebocoran pada reaktor yang dibuat dengan metode gelembung sabun. Tujuannya ialah untuk mengamati fenomena fisik plasma DBD yang terlihat secara kasat mata terutama fenomena fluidisasi dan plasma.

4.2.1 Analisis Keselamatan Reaktor Plasma

Aspek keselamatan merupakan salah satu aspek terpenting dalam pengoperasian reaktor plasma sehingga aspek ini harus diperhatikan dan didahulukan dalam penelitian ini. Berikut adalah beberapa analisis keselamatan yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Uji Kebocoran

Uji kebocoran yang dilakukan sebagaimana telah diterangkan pada bagian metodologi, dilakukan sebagai bagian melihat aspek keamanan untuk memastikan bahwa reaktor dapat bekerja dengan aman dan tidak tercampurnya gas didalam reaktor dengan pengotor dari luar selama proses reaktor bekerja. Pengujian dengan metoda gelembung sabun memastikan bahwa tidak terdapat kebocoran yang berarti seluruh penyambungan material penyusun reaktor dan sambungan seluruh aliran gas yang berkaitan dengan reaktor telah kedap dan tersambung sempurna. Hal ini memastikan bahwa reaktor selama bekerja tidak akan terkontaminasi oleh masuknya udara dari luar atau bocornya gas dari dalam sistem reaktor. Sehingga tingkat keamanan dan kemurnian proses dapat dipertahankan selama di dalam sistem reaktor plasma. Namun, pada kenyataannya sangat sulit untuk membuat sambungan antar reaktor tidak bocor karena banyaknya sambungan antar reaktor dan sambungan tersebut akan selalu dibuka apabila ingin melakukan penggantian batubara. Sehingga akhirnya diputuskan untuk mengelem sambungan antar reaktor dengan lem silicon setiap kali akan dipasang. Hal ini akan meminimalisir kemungkinan terjadinya kebocoran di antara sambungan bagian reaktor.

2. Pembuangan Gas Produk

Salah satu keputusan yang didapat dari hasil analisis keselamatan ialah pembuangan gas produk ke *gas exhaust*. Pembuangan gas produk ke *gas exhaust* dikarenakan gas hasil gasifikasi tersebut belum diketahui jenis gasnya dan menurut literatur akan terbentuk gas CO dan H₂. Dimana gas CO memiliki dampak bahaya bagi manusia dalam kadar tertentu sedangkan H₂ merupakan gas yang mudah terbakar, dan dengan tipe reaktor kontinu menyebabkan gas produk terus mengalir sehingga harus disediakan saluran pembuang gas dapat mengalirkan gas keluar dari laboratorium tempat pengujian berlangsung.

4.2.2 Pengamatan Fenomena Fluidisasi

Reaktor ini dirancang untuk gasifikasi batubara dalam unggun terfluidakan dan medan plasma. Oleh karena itu perlu dipastikan adanya fenomena fluidisasi batubara dalam reaktor ini sebelum dilakukannya gasifikasi menggunakan plasma. Fluidisasi merupakan salah satu teknik pengontakan fluida baik gas maupun cairan dengan butiran padat. Pada fluidisasi kontak antara fluida dan partikel padat terjadi dengan baik karena permukaan kontak yang luas. Bila cairan atau gas dilewatkan pada unggun partikel padat pada kecepatan rendah dari bawah ke atas maka unggun tidak akan bergerak. Bila kecepatan fluida yang melewati unggun dinaikkan maka perbedaan tekanan di sepanjang unggun akan meningkat pula. Pada saat perbedaan tekanan sama dengan berat unggun dibagi luas penampang maka unggun tersebut akan mulai bergerak dan melayang - layang ke atas. Partikel-partikel padat ini akan bergerak-gerak dan mempunyai perilaku sebagai fluida. Keadaan unggun seperti ini dikenal sebagai unggun terfluidakan (Satrio, 2008).

Salah satu fenomena fluidisasi yang bisa teramati adalah pada saat fluidisasi tersebut mulai terjadi yang ditandai dengan adanya unggun yang mulai bergerak dan melayang-layang ke atas. Pada fenomena tersebut dapat diamati kecepatan minimum yang diperlukan untuk terjadi fluidisasi atau yang sering disebut sebagai kecepatan minimum fluidisasi. Yang dimaksud dengan kecepatan minimum fluidisasi adalah kecepatan superfisial fluida minimum dimana fluidisasi mulai terjadi.



Gambar 4. 4. Skema fenomena fluidisasi di dalam reaktor

Pengamatan ini dilakukan dengan menaikkan laju alir gas secara perlahan sampai akhirnya teramati adanya partikel batubara yang mulai bergerak dan

melayang-layang ke atas dan mencatat laju alir pada flowmeter. Pada pengamatan ini batubara yang digunakan berukuran 120 – 200 mesh dengan tinggi batubara sekitar 3 cm. Namun, pada saat teramati adanya fenomena fluidisasi pengukuran laju alir tidak dapat dilakukan karena keterbatasan flowmeter yang memiliki range ukuran 20 – 100 liter/menit. Oleh karena itu, pengukuran laju alir dilakukan dengan bantuan alat *bubble soap*.

Pada *bubble soap*, laju alir gas diukur dengan mengamati waktu yang dibutuhkan gelembung sabun untuk mencapai puncak *bubble soap* yang memiliki volume 500 mililiter. Setelah dilakukan beberapa kali pengamatan hasil laju alir tersebut di rata-rata dan didapatkan laju alir minimum fluidisasi adalah 1,96 liter/menit. Hasil pengamatan ini mendekati dengan hasil perhitungan laju alir minimum fluidisasi secara teoritis yang didapatkan sebesar 1,46 liter/menit. Adapun perhitungan laju alir minimum fluidisasi secara teoritis dapat dilihat pada lampiran.

4.2.3 Pengamatan Fenomena Plasma

Setelah melakukan pengamatan fenomena fluidisasi, tahapan selanjutnya adalah melakukan fenomena plasma yang terjadi dalam reaktor. Fenomena yang diamati ialah aspek visualisasi pembentukan plasma ketika reaktor dihidupkan sehingga memastikan bahwa reaktor hasil rancang bangun dapat menghasilkan plasma. Fenomena ini penting untuk mengetahui pada tegangan berapa plasma telah terbentuk, dimana titik dimana plasma telah terbentuk berarti telah terputusnya ikatan atom dan molekul dari reaktan gas sehingga mulai terionisasi. Pengamatan ini dilakukan dengan laju alir gas sebesar 30 liter/menit, batubara berukuran 120 – 200 mesh dengan tinggi batubara sekitar 3 cm.

Saat reaktor dinyalakan, tegangan listrik yang diterapkan dinaikkan secara perlahan. Hal ini dilakukan untuk menyelidiki tegangan minimal yang dibutuhkan untuk memunculkan plasma DBD. Tegangan ini juga dikenal dengan istilah *breakdown voltage* (tegangan kerusakan). *Breakdown voltage* merupakan kondisi dimana energi listrik yang diaplikasikan mampu mengeksitasi dan mengionisasi gas - gas dalam ruang plasma. Kondisi ini ditandai dengan munculnya *microdischarge* dalam ruang plasma DBD yang ditandai dengan terdengar bunyi dengungan dan terlihatnya pendar warna pada reaktor.

Namun pada pengujian ini, bunyi dengung sangat sulit untuk dideteksi begitu pula dengan pendar warna yang tidak muncul pada daerah sekitar elektroda. Oleh karena itu diputuskan pengamatan dilakukan dengan penciuman bau khas dari ozon. Dimana jika oksigen dilewatkan dalam medan plasma akan terkonversi menjadi ozon. Oksigen ini digunakan dalam penelitian ini sebagai oksidator yang berasal dari kompresor udara (20% oksigen) dan tabung oksigen medis (99% oksigen). Selain menggunakan penciuman bau ozon, pengamatan juga dilakukan dengan metode iodometri untuk penentuan keberadaan ozon. Pada metode ini gas akan dilewati dalam *bubbler* yang berisi larutan KI 2% dan apabila larutan KI yang semula berwarna bening berubah menjadi kuning muda menandakan adanya ozon dalam gas tersebut.

Berdasarkan pengamatan pada tegangan 130 V input NST tidak tercium adanya bau khas ozon dan saat dilanjutkan dengan pengujian metode iodometri larutan KI tidak berubah menjadi kuning muda atau masih bening. Kemudian saat tegangan dinaikkan pada 140 V input NST mulai tercium adanya bau khas ozon sehingga dilanjutkan dengan pengujian metode iodometri dan didapatkan larutan KI berubah menjadi kuning muda. Pada saat tegangan dinaikkan menjadi 190 V bau khas ozon yang tercium semakin menyengat. Adanya kandungan ozon pada tegangan 190 V input NST menandakan pada tegangan tersebut menjadi titik mulainya terjadi lucutan plasma secara kontinyu antara kedua elektroda, sehingga menjadi titik tegangan awal pengujian kinerja reaktor plasma. Proses pengamatan fenomena plasma terus dilanjutkan dengan menaikkan tegangan keluaran trafo regulator hingga lucutan pijar plasma menjadi tidak terkontrol. Hingga tegangan 220 V mulai muncul lucutan pijar plasma sesekali pada sekitar ujung elektroda tengah dan elektroda jala yang tidak terhalang bahan dielektrik. Berikut ditampilkan tabel hasil pengamatan fenomena fisik plasma pada tiap tegangan saat pengoperasian reaktor plasma.

Tabel 4. 1. Fenomena plasma yang teramati pada beberapa tegangan

No.	Tegangan Primer NST (V)	Perkiraan Tegangan Plasma ($\pm V$)	Fenomena yang Teramati
1.	130	8864	Belum tercium bau khas ozon dan larutan KI belum berubah menjadi kuning muda
2.	140	9545	Mulai tercium bau khas ozon dan larutan KI berubah menjadi kuning muda
3.	190	12954	Tercium bau khas ozon yang semakin menyengat
4.	220	15000	Muncul lucutan listrik antara elektroda jala dan ujung elektroda tengah yang tidak tertutupi kaca dielektrik

Lucutan yang seharusnya terjadi untuk jenis reaktor plasma DBD ialah mengalir sepanjang wilayah *discharge gap* antar dua elektroda dalam bentuk *microdischarge* dan tidak tampak kasat mata ataupun teramati dalam bentuk bunyi “gemicik” (*noise*) dan terkadang memancarkan pancaran warna tertentu. Namun ternyata terjadi lucutan plasma antara ujung teratas elektroda jala yang mengalir langsung ke elektroda batang melalui celah lubang tabung dielektrik. Hal ini menandakan bahwa batas terbentuknya plasma sepanjang daerah *discharge gap* telah terlampaui.

Analisis terjadinya lucutan pijar plasma akibat terdapatnya jarak kontak sentuh yang tidak dilindungi oleh kaca dielektrik yakni bagian ujung antara kedua ujung elektroda, yakni antara elektroda jala dan elektroda batang. Akibat terdapatnya ujung elektroda yang tidak ditutupi apapun, maka ketika perbedaan potensial tegangan yang tinggi menyebabkan gas sekitar elektroda akan terionisasi dan tereksitasi. Sehingga sifat konduktor gas akan meningkat yang mempermudah lompatan elektron dalam bentuk lucutan listrik. Untuk mengatasinya elektroda tengah tersebut dipotong sedikit dan pada ujung elektroda tengah ditutup dengan karet silicon untuk memutus lompatan elektron dari elektroda jala ke ujung elektroda tengah yang tidak tertutupi kaca dielektrik. Dan ini terbukti dengan dilakukan pengujian uji plasma fisik kembali pada reaktor yang telah dimodifikasi dengan hasil pengamatan kualitatif lucutan listrik yang teramati menjadi lebih jarang terjadi pada tegangan 220 V.

4.3 Uji Kinerja Reaktor untuk Gasifikasi Batubara

Uji kinerja reaktor gasifikasi batubara dalam unggun terfluidakan ini akan dilakukan dengan menggunakan dua jenis oksidator, yaitu udara dan oksigen. Dengan menggunakan dua oksidator tersebut diharapkan batubara dapat digasifikasi dengan bantuan medan fluidisasi dan plasma menjadi gas sintentis. Gas hasil keluaran reaktor akan dianalisis menggunakan GC dan *CO analyzer*.

4.3.1 Uji Kinerja dengan Oksidator Udara

Pada uji kinerja ini digunakan oksidator berupa udara yang didapatkan dari *compressor*. Sebelum masuk ke dalam reaktor, udara melalui flowmeter untuk diukur laju alirnya dan akan memfluidisasi batubara yang akhirnya berkontak dengan medan plasma di dalam reaktor. Gas keluaran reaktor akan melalui *trap* untuk memperangkap abu batubara yang lolos dari filter dan akhirnya gas siap dianalisis dengan GC dan *CO analyzer*. Adapun batubara yang digunakan berukuran 120 - 200 mesh dengan laju alir oksidator 30 liter/menit selama 5 menit. Pada pengujian ini dilakukan beberapa variasi tegangan masukan NST yaitu 190, 200, 210, dan 220 volt. Berikut ditampilkan gambar hasil GC pada tegangan masukan NST sebesar 190 V.



Gambar 4. 5. Hasil analisis GC pada tegangan masukan NST 190 V

Dari gambar di atas, didapatkan dua buah puncak, yaitu pada waktu 0,075 dan 0,975 dengan konsentrasi masing-masing sebesar 0,3223% dan 99,6777%. Untuk mengetahui jenis gas yang terbaca pada hasil analisis tersebut diperlukan data pembandingan yang pernah didapatkan dari GC tersebut. Dengan cara yang sama dilakukan analisis pada tegangan masukan NST lainnya. Berdasarkan analisis tersebut dapat dirangkum dalam tabel seperti yang terlihat di bawah ini.

Tabel 4. 2. Hasil analisis gas produk menggunakan GC dengan oksidator udara

No.	Tegangan Masukan NST (V)	Perkiraan Tegangan Plasma ($\pm V$)	Waktu (menit)	Konsentrasi (%)
1.	190	12954	0,075	0,3223
			0,975	99,677
2.	200	13636	0,1	0,4213
			0,983	99,5787
3.	210	14318	0,105	0,5673
			0,525	0,0649
			0,98	99,3677
4.	220	15000	0,108	0,8721
			1,012	99,1279

Hasil analisis GC tersebut menunjukkan terdapat dua komponen utama yang selalu terbaca dalam setiap variasi tegangan, yaitu pada waktu 0,1 dan 0,98. Berdasarkan data pembandingan pada GC tersebut dapat diidentifikasi bahwa pada waktu 0,98 adalah udara sedangkan pada waktu 0,1 belum dapat diidentifikasi karena kurangnya data pembandingan pada waktu tersebut.

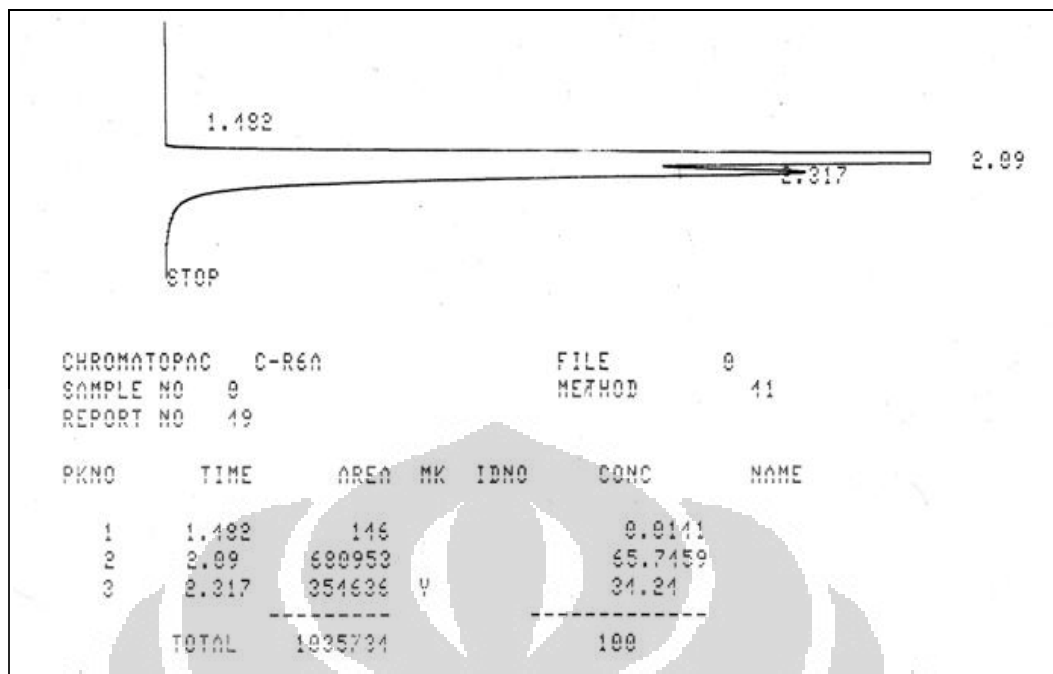
Pada tabel tersebut juga dapat dilihat terjadi kecenderungan pengurangan konsentrasi udara seiring dengan kenaikan tegangan masukan NST. Hal ini diduga akibat adanya konversi udara menjadi gas produk lainnya. Guanyun *et al.* (2003) melaporkan, semakin besar tegangan yang diaplikasikan maka akan semakin banyak gas yang tereksitasi ataupun terionisasi. Hal ini terkait dengan fakta bahwa derajat ionisasi meningkat seiring peningkatan daya masukan. Sehingga semakin banyak radikal dan molekul meta-stabil yang terbentuk untuk bereaksi dengan oksidator dan batubara. Hal lainnya yang terjadi dengan peningkatan tegangan

masukannya ialah semakin naiknya densitas dan temperatur plasma yang dihasilkan sehingga kekuatan plasma akan semakin meningkat. Oleh karena itu, semakin besar nilai tegangan maka proses konversi akan lebih baik dan menghasilkan gas produk lebih banyak.

Pada penelitian ini diharapkan adanya produk gas sintetis yang berupa CO dan H₂ seperti yang dijelaskan pada bagian tinjauan pustaka. Oleh karena itu, dilakukan pengujian gas CO menggunakan *CO analyzer* yang memiliki tingkat analisis lebih spesifik yaitu dalam rentang 0 – 10000 ppm. Namun pada pengujian tersebut tidak terdeteksi adanya gas CO pada setiap variasi tegangan di atas. Hal ini diduga karena terlalu besarnya dimensi reaktor dibandingkan dengan zona plasma yang terdapat dalam reaktor. Selain itu besarnya laju alir dari oksidator yang digunakan untuk melakukan fluidisasi menyebabkan waktu tinggal gas dalam reaktor menjadi sedikit. Dimana pada percobaan ini didapat waktu tinggal dari gas adalah 0,0029 detik. Sehingga oksidator dan batubara yang terfluidisasi hanya akan melewati zona medan plasma yang sedikit dengan waktu yang sangat cepat sehingga sangat sedikit terjadi konversi.

4.3.2 Uji Kinerja dengan Oksidator Oksigen

Pada uji kinerja ini digunakan oksidator berupa oksigen yang didapatkan dari tabung oksigen medis yang memiliki kemurnian sebesar 99%. Sebelum masuk ke dalam reaktor, oksigen melalui flowmeter untuk diukur laju alirnya dan akan memfluidisasi batubara yang akhirnya berkontak dengan medan plasma di dalam reaktor. Gas keluaran reaktor akan melalui trap untuk memperangkap abu batubara yang lolos dari filter dan akhirnya gas siap dianalisis dengan GC dan *CO analyzer*. Adapun batubara yang digunakan berukuran 120 - 200 mesh dengan laju alir oksigen 30 liter/menit selama 5 menit. Pada pengujian ini akan dilakukan beberapa variasi tegangan masukan NST, akan tetapi setelah percobaan pada tegangan masukan NST 190 V terjadi *spark* yang menyebabkan reaktor tidak dapat digunakan kembali. Sehingga pada uji kinerja reaktor dengan oksigen ini hanya menggunakan satu data. Berikut ditampilkan gambar hasil GC pada tegangan masukan NST sebesar 190 V dengan oksidator oksigen.



Gambar 4. 6. Hasil analisis GC pada tegangan masukan NST 190 V dengan oksidator oksigen

Dari gambar di atas, didapatkan tiga buah puncak, yaitu pada waktu 1,482, 2,09, dan 2,317 dengan konsentrasi masing-masing sebesar 0,0141%, 65,7459% dan 34,21%. Untuk mengetahui jenis gas yang terbaca pada hasil analisis tersebut diperlukan data pembandingan yang pernah didapatkan dari GC tersebut. Berdasarkan analisis tersebut dapat dirangkum dalam tabel seperti yang terlihat di bawah ini.

Tabel 4. 3. Hasil analisis gas produk menggunakan GC dengan oksidator oksigen

No.	Tegangan Masukan NST (V)	Perkiraan Tegangan Plasma (±V)	Arus (A)	Waktu (menit)	Konsentrasi (%)
1.	190	12954	0,5	1,482	0,0141
				2,09	65,7459
				2,317	34,21

Hasil analisis GC tersebut menunjukkan terdapat tiga komponen utama yang terbaca, yaitu pada waktu 1,48 ; 2,1 dan 2,32. Berdasarkan data pembandingan pada GC tersebut dapat diidentifikasi bahwa pada waktu 1,48 adalah hidrogen sedangkan pada waktu 2,1 adalah oksigen dan pada waktu 2,32 adalah nitrogen.

Pada penelitian ini juga dilakukan pengujian dengan menggunakan *CO analyzer* tetapi tidak terdeteksi adanya gas CO dalam gas produk reaktor ini.

Pada penelitian ini diharapkan adanya produk gas sintetis yang berupa CO dan H₂ seperti yang dijelaskan pada bagian tinjauan pustaka. Selama reaksi, oksigen (O₂) mengoksidasi karbon dari batubara dan mereduksi uap air (H₂O) sehingga menghasilkan karbon monoksida (CO) dan gas hidrogen (H₂). Reaksi tersebut dapat ditulis sebagai berikut:



Reaksi tersebut jika ditinjau dari aspek termodinamika, yaitu berdasarkan tinjauan energi bebas didapatkan bahwa total harga $\Delta Gf_{298} = -183,3354$ kJ/mol. Berdasarkan prinsip termodinamika, suatu reaksi kimia mungkin terjadi jika harga energi bebas reaksi bernilai negatif. Jika energi bebas bernilai positif, maka reaksi tidak dapat terjadi tanpa ada energi dari luar (Alimah et al, 2010). Adapun perhitungan energi bebas tersebut dilakukan seperti di bawah ini:

Tabel 4. 4. Harga ΔGf_{298} dari masing-masing komponen

Komponen	ΔGf_{298} , kcal/mol (Perry, 1999)
C	0
O ₂	0
H ₂ O	-54,6351
CO	-32,808
H ₂	0

$$\begin{aligned} \Delta Gf_{298} &= \sum \Delta Gf_{298} \text{ produk} - \sum \Delta Gf_{298} \text{ reaktan} & (4.2) \\ &= (0 + (3 \times (-32,808))) - ((3 \times 0) + 0 + (-54,6351)) \\ &= -98,424 + 54,6351 \\ &= -43,7889 \text{ kcal/mol} \\ &= -183,3354 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

Dapat dilihat pada data analisis GC tersebut komposisi oksigen pada gas produk sebesar 65,746 %, yang berarti telah terjadi pengurangan komposisi yang semula 99%. Hal ini menunjukkan adanya konversi dari oksigen tersebut akibat adanya medan plasma. Namun, karena tidak adanya CO yang terdeteksi, diduga oksigen tersebut terkonversi menjadi ozon dalam medan plasma. Sedangkan

karbon yang terdapat dalam batubara belum terkonversi akibat terlalu kecilnya waktu tinggal dari gas seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Selain itu pada reaktor ini, perbandingan volum zona plasma dengan volum reaktor cukup kecil, yaitu 1 : 24. Hal ini menyebabkan hanya sebagian kecil batubara yang dapat terfluidisasi dan tergasifikasi dalam zona plasma sehingga belum ada gas CO yang terdeteksi.

Selain itu juga didapatkan adanya gas hidrogen dengan konsentrasi sebesar 0,0141%. Adanya gas hidrogen sesuai dengan reaksi kimia yang disebutkan di atas. Dengan menganggap laju alir produk sama dengan laju alir oksidator didapatkan laju gas hidrogen sebesar 0,423 liter/menit ($0,0141 \times 30$ liter/menit). Sehingga dapat dihitung produktivitas reaktor ini dalam menghasilkan gas produk seperti berikut ini:

$$\text{Produktivitas Reaktor} = \frac{190 \text{ V} \times 0,5 \text{ A}}{0,423 \text{ L/menit}} = 13,475 \frac{\text{kJ}}{\text{L}} = 267,161 \text{ L/kWh}$$

Pada penelitian ini juga didapatkan komposisi gas nitrogen yang cukup besar, yaitu sekitar 34 - 38 % mol. Hal ini diduga berasal dari kandungan nitrogen yang berada dalam batubara dimana berdasarkan analisa proksimat terdapat kandungan nitrogen sebesar 0,69 % adb. Dugaan lainnya adanya kemungkinan terjadi difusi gas nitrogen yang berasal dari udara ke dalam reaktor melalui celah sambungan antar reaktor. Hukum Fick menyebutkan penyebab terjadinya difusi adalah karena adanya perbedaan konsentrasi komponen. Akibat perbedaan ini komponen akan berpindah ke berbagai arah hingga konsentrasi mencapai kesetimbangan. Arah difusi terjadi dari konsentrasi tinggi (udara yang mengandung nitrogen $\pm 79\%$) ke konsentrasi rendah (gas di dalam reaktor yang tidak mengandung nitrogen). Selain itu juga diduga terdapat kesalahan pada analisis GC yang digunakan sehingga perlu dikonfirmasi kandungan nitrogen tersebut pada penelitian selanjutnya.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Reaktor DBD plasma untuk gasifikasi batubara dalam unggun terfluidakan dibuat dengan ukuran diameter 10 cm dan tinggi 66 cm dengan tinggi ruang fluidisasi sebesar 40 cm.
2. Laju fluidisasi minimum pada penelitian ini sebesar 1,96 liter/menit dan plasma mulai muncul pada perkiraan tegangan plasma sebesar ± 9545 V.
3. Pada penggunaan oksidator udara diperoleh penurunan konsentrasi udara seiring dengan peningkatan tegangan masukan NST.
4. Pada penggunaan oksidator oksigen diperoleh gas hidrogen dengan konsentrasi 0,01% dengan produktivitas reaktor sebesar 267,161 L/kWh.

5.2 Saran

Dari hasil pengujian kinerja reaktor DBD plasma yang telah dibuat, masih diperlukan penyempurnaan lebih lanjut untuk menghasilkan kinerja yang lebih optimal. Saran untuk peningkatan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Diperlukan perubahan rancangan reaktor dengan memperluas zona plasma atau memperkecil volume reaktor.
2. Diperlukan sebuah sistem sirkulasi gas dalam reaktor sehingga waktu tinggal dalam reaktor menjadi lebih besar.
3. Diperlukan penelitian lebih lanjut dan komprehensif terhadap optimalisasi kinerja reaktor.

DAFTAR PUSTAKA

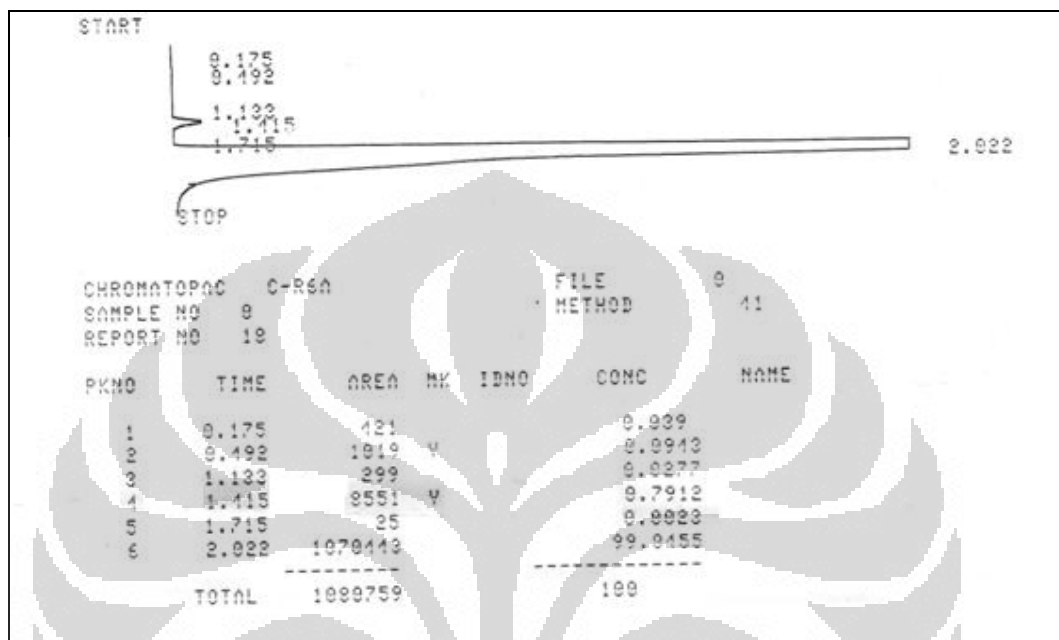
- Alimah, Siti., Priambodo, Dedy., dan Dewita, Erlan, 2010. Aspek Termodinamika Produksi Hidrogen Dengan Proses Steam Reforming Gas Alam. *M. P. J*, 1-8.
- Anonym. 2002. *Westinghouse Plasma Coal Gasification and Vitrification Technology*. Power Generation Conference, Pennsylvania.
- Anonym. 2006. *Batubara Indonesia*. Pusat Litbang Teknologi Mineral dan Batubara, Jakarta.
- Ardelyan, N. V., Kosmachevskii, K.V., Bychkov, V. L., Denisiuk, S.V., Esakov I.I., Khodataev, K.V., Grachev, L.P., and Ravaev A.A 2009. On Application of Non-Equilibrium Plasma to Pulverized Coal Conversion. In: I. Matveev, ed. *5th International Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPAC)*. 44-45.
- Arivanto Budi dan Indarto. 2006. *Studi Karakteristik Fluidisasi dan Aliran Dua Fase Padat – Gas (Pasir Besi – Udara) pada Pipa Lurus Vertikal*. Media Teknik No. 2 Tahun XXVIII. No.ISSN 0216-3012.
- Balia, M.L. 2009. Kebutuhan Energi Listrik Nasional: Harapan dan Tantangan. In: *National Seminar of Clean Energy*, 1-5.
- Chen, G., Chen, S., Zhou, M., Feng, W., Gu, W., and Yang S., 2006. Application of a Novel Atmospheric Pressure Plasma Fluidized Bed in The Powder Surface Modification. *Journal of Physics (Applied Physics)*, 5211-5215.
- Chen, G., Fan, S., Li, C., Gu, W., Feng, W., Zhang G., Wang, J., Latif, K., Zhang, S., Wang, Z., Han, E., Fu, Y., and Yang, S. 2005. A Novel Atmospheric Pressure Plasma Fluidized Bed and Its Application in Mutation of Plant Seeds. *China Physics Letter*, 1980-1983.
- He, X., Ma, T., Qiu, J., Sun, T., Zhao, Z., Zhou, Y., and Zhang, J. 2003. Mechanism Of Coal Gasification in a Steam Medium Under Arc Plasma Conditions. *Plasma Sources Sciences and Technology*, 446-453.
- Istadi. 2006. Aplikasi Teknologi Hibrid Katalisis-Plasma Dalam Pengembangan Reaktor Kimia Masa Depan. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 15-20.

- Kim, Y., Rosocha, L., Anderson, G., and Ziock, H. 2009. Non-Thermal Plasma Effects on Coal Gasification. In: I. Matveev, ed. *5th International Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPEC)*, 55-56.
- Kogelschatz, U. 2003. Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. *Plasma Chemistry Plasma Processing*, 1-46.
- Lee, J. M., Kim, Y. J., and Kim, S. D., 1998. Catalytic Coal Gasification in an Internally Circulating Fluidized Bed Reaktor with Draft Tube. *Applied Thermal Engineering*.
- Lieberman, M.A.; Lichtenberg, A.J. 1994. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Matveev, S. Matveeva, and E. Kirchuk, 2009. Plasma Assisted Combustion Technologies. *Applied Plasma Technologies*.
- Ermina, Miranti. 2008. *Prospek Industri Batubara di Indonesia*. Economic Review, No. 214, Jakarta.
- Perry, Robert.H., & Green, Don. W., 1999. *Chemical Engineers's Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Rabovitser, I. K., Nester, S., and Bryan B. 2006. *Plasma Assisted Conversion of Carbonaceous Materials into Synthesis Gas*. United States Patent Application Publication, 1-11.
- Satrio, Agus. M, 2008. Fluidisasi. *Modul-1.05 Laboratorium Operasi Teknik Kimia*, 1-9.
- Slavinskaya, N. A. and Petrea, D. M., 2008. Chemical Kinetic Modeling in Coal Gasification Overview. In: I. Matveev, ed. *5th International Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPEC)*, 37-43.
- Suprpto, S., 2006. *Low Rank Coal Gasification Using Fluidized Bed Technology*. R & D Centre for Mineral and Coal Technology, Ministry of Energy and Mineral Resources, The Republic of Indonesia.
- Suwondo, B.S., 2007. Gasifier Batubara Unggun Bergerak (Moving-bed) Dilengkapi Pipa Hisap (Draft Tube). *Jurnal Teknologi*, 295-298.

Lampiran A: Data Penelitian

Scan Data Gas Chromatography:

1. Data GC pada penggunaan oksigen medis

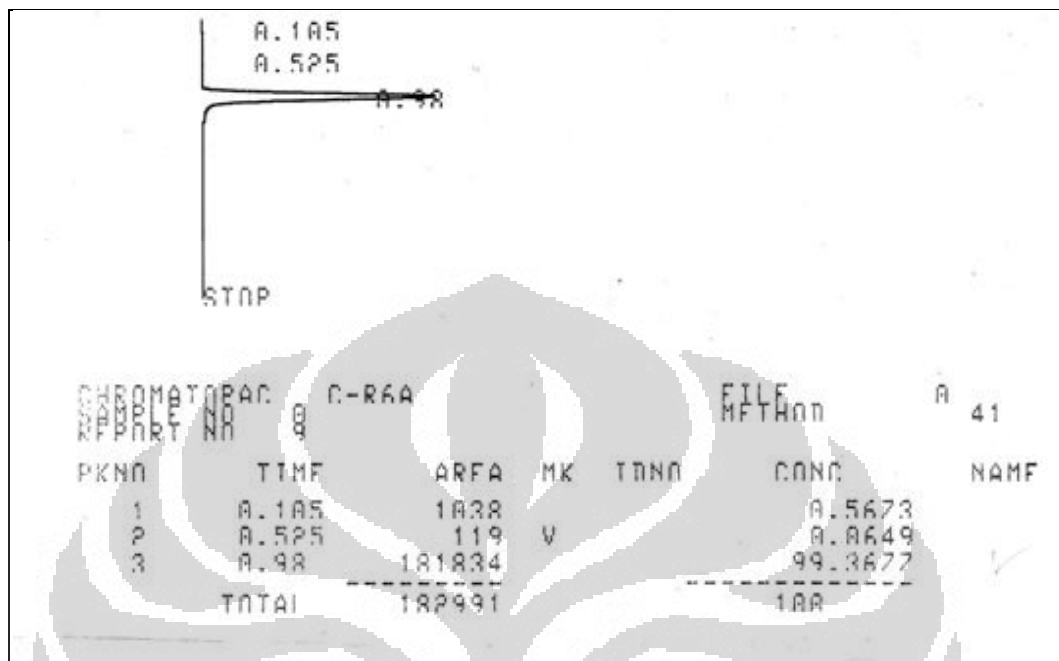


2. Data GC pada tegangan masukan 200 V dengan oksidator udara

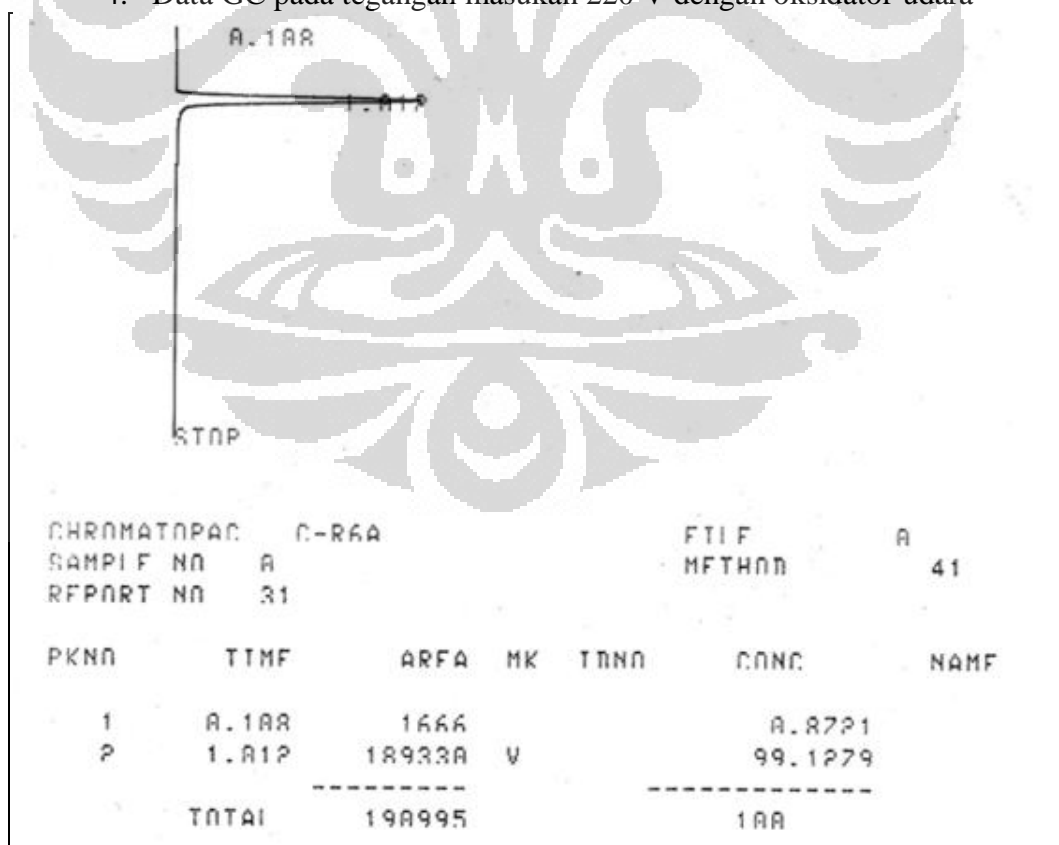


Lampiran A: lanjutan

3. Data GC pada tegangan masukan 210 V dengan oksidator udara



4. Data GC pada tegangan masukan 220 V dengan oksidator udara



Lampiran B: Contoh Perhitungan

Perhitungan laju fluidisasi minimum:

Diketahui:

- $\rho_{Gas} = 1,2 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_{solid} = 960 \text{ kg/m}^3$
- $d_{solid} = 74 \times 10^{-6} \text{ m}$
- $\mu_{Gas} = 1,5 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$

Jawab:

Wen dan Yu (1966) dalam Hetsroni (1982) menyajikan persamaan matematis untuk menentukan kecepatan fluidisasi minimum berdasarkan bilangan Reynold (Re) dan Archimedes (Ar).

$$Ar = \frac{\rho_G (\rho_s - \rho_G) g d_s^3}{\mu_G^2} \quad (\text{B.1})$$

Untuk $Ar < 10^3$, maka ditentukan $Re_{mf} = 7,5 \times 10^{-4} Ar$, sehingga kecepatan fluidisasi minimum teoritik dapat ditentukan sebagai berikut:

$$U_{mf} = 0,00075 \frac{(\rho_s - \rho_G) g d_s^2}{\mu_G} \quad (\text{B.2})$$

Sehingga dapat dihitung nilai Ar sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Ar &= \frac{\rho_G (\rho_s - \rho_G) g d_s^3}{\mu_G^2} \\ &= \frac{1,2 \text{ kg/m}^3 \times (960 - 1,2) \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times (74 \cdot 10^{-6} \text{ m})^3}{(1,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{ms}})^2} \\ &= 20,3 \end{aligned}$$

Karena $Ar < 10^3$, maka kecepatan fluidisasi minimum:

$$U_{mf} = 0,00075 \frac{(\rho_s - \rho_G) g d_s^2}{\mu_G} \quad (\text{B.3})$$

$$\begin{aligned} &= 0,00075 \frac{1,2 \text{ kg/m}^3 \times (960 - 1,2) \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times (74 \cdot 10^{-6} \text{ m})^2}{(1,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{ms}})} \\ &= 3,09 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q &= U_{mf} \cdot A = 3,09 \cdot \frac{10^{-3} \text{ m}}{\text{s}} \times \frac{\pi (0,1 \text{ m})^2}{4} = 2,42 \cdot \frac{10^{-5} \text{ m}^3}{\text{s}} \\ &= \mathbf{1,46 \text{ liter/menit}} \end{aligned}$$

Lampiran B: Lanjutan**Perhitungan waktu tinggal dalam reaktor:**

$$\text{Waktu tinggal (s)} = \frac{L}{F/A} \quad (\text{B.4})$$

Dengan L adalah panjang reaktor, yaitu 66 cm

F adalah laju alir, yaitu 30 Liter/menit = 1.800.000 cm³/s

A adalah luas *cross sectional area*, yaitu 78,5 cm²

Maka waktu tinggal dalam reaktor tersebut adalah

$$\frac{L}{F/A} = \frac{66 \text{ cm}}{\frac{1800000 \text{ cm}^3/\text{s}}{78,5 \text{ cm}^2}} = 0,0029 \text{ s}$$

Perhitungan perbandingan volume zona plasma dan volume reaktor:

Dimana volume zona plasma yang dimaksud adalah zona di antara elektroda tengah yang berdiameter 1,575 cm dengan elektroda jala yang berdiameter 2,575 cm.

Volume zona plasma : Volume reaktor

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\pi D^2}{4} \times L \right) - \left(\frac{\pi D^2}{4} \times L \right) : \frac{\pi D^2}{4} \times L \quad (\text{B.5}) \\ & \left(\frac{\pi \times 2,5875^2}{4} \times 15 \right) - \left(\frac{\pi \times 1,5875^2}{4} \times 15 \right) : \frac{\pi \times 10^2}{4} \times 15 \\ & 78,835 - 29,67 : 1177,5 \\ & 49,165 : 1177,5 \\ & 1 : 24 \end{aligned}$$

Lampiran C: Hasil Analisis Batubara

REPORT OF ANALYSIS

The sample was submitted by client with the following identification :

CLIENT : HARIRI.
 ADDRESS : Departemen Teknik Kimia Kampus UI.
 DEPOK.
 TYPE OF SAMPLE : COAL.
 DATE OF RECEIVED : 24/05/2011.
 TEST REQUIRED : Total Moisture, Proximate Analysis, Total Sulfur and Ultimate Analysis.
 DESCRIPTION OF SAMPLE : Form : Boulder.
 Weight/Volume : ± 4.22 kg. Top size ± 40 mm.
 Packing : Plastic bag.
 SAMPLE IDENTIFICATION : --
 DATE OF ANALYSIS : 24/05/2011 to 01/06/2011.
 YOUR REFERENCE : --

Result:

Parameter	Unit	Results	Method
Total Moisture	%, ar	27.5	ASTM D 3302-10
Proximate Analysis :			
- Moisture in Analysis	%, adb	14.8	ASTM D.3173-08
- Ash Content	%, adb	1.9	ASTM D.3174-04
- Volatile Matter	%, adb	44.8	ISO 562-2010
- Fixed Carbon	%, adb	38.5	ASTM D.3172-07
Total Sulfur	%, adb	0.18	ASTM D. 4239-10
Ultimate Analysis :			
Carbon (C)	%, adb	62.02	ASTM D 3178-02
Hydrogen (H)	%, adb	5.47	ASTM D 3178-02
Nitrogen (N)	%, adb	0.69	ASTM D 3179-02
Oxygen (O)	%, adb	29.70	ASTM D 3176-02

This Certificate/report is issued under our General Terms and Conditions, copy of which is available upon request or may be accessed at www.sucofindo.co.id

SBU General Services

CBT.35.1119.11.20

Muhidin

Universitas Indonesia