



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN REAKTOR FLUIDISASI PLASMA NON-
TERMAL: UJI KINERJA GASIFIKASI BATUBARA DENGAN
CO₂**

SKRIPSI

**ALIFIANA PERMATA SARI
0706269584**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN REAKTOR FLUIDISASI PLASMA NON-
TERMAL: UJI KINERJA GASIFIKASI BATUBARA DENGAN
CO₂**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**ALIFIANA PERMATA SARI
0706269584**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI 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 : Alifiana Permata Sari

NPM : 0706269584

Tanda Tangan : 

Tanggal : 21 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Alifiana Permata Sari
NPM : 0706269584
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Rancang Bangun Reaktor Fluidisasi Plasma Non- Termal: Uji Kinerja Gasifikasi Batubara dengan CO₂

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

DEWAN PENGUJI

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

Penguji : Prof. Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc, PhD

Penguji : Dr. Ir. Nelson Saksono, MT

Penguji : Ir. Amien Rahardjo, MT

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 21 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala, karena berkat rahmat dan petunjuk-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ungkapan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof.Dr. Ir Setijo Bismo, DEA selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan penulis 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 kordinator skripsi Teknik Kimia FTUI dan pembimbing akademis;
4. Kedua orang tua tercinta yang selalu memberikan doa, dukungan moral, dan material sehingga skripsi ini dapat selesai;
5. Rizki Fitria. D, Hariri, Resuli Irawan, Friadi C S, Wilda N P, dan rekan-rekan riset grup Teknologi Intensifikasi Proses lainnya yang telah banyak membantu dan berbagi dalam perjalanan panjang pengerjaan skripsi ini;
6. Mang Ijal, Kang Jajat, Mas Heri, Mas Eko, Mas Opik, Mbak Tiwi, dan Pak Masturo yang telah banyak membantu dari awal hingga akhir;

Akhirnya penulis berharap agar skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 21 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 : Alifiana Permata Sari
NPM : 0706269584
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

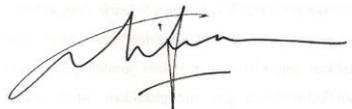
demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Rancang Bangun Reaktor Fluidisasi Plasma Non-Termal: Uji Gasifikasi
Batubara dengan CO₂**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan 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 : 21 Juni 2011
Yang menyatakan



(Alifiana Permata Sari)

ABSTRAK

Nama : Alifiana Permata Sari
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Rancang Bangun Reaktor Fluidisasi Plasma Non-Termal: Uji Kinerja Gasifikasi Batubara dengan CO₂.

Gasifikasi merupakan salah satu pemanfaatan batubara yang ramah lingkungan, tetapi masih memiliki kelemahan, yaitu menghasilkan partikulat. Penggunaan plasma pada gasifikasi diharapkan dapat mengatasi kekurangan gasifikasi dan dapat menghasilkan gas sintesis.

Pada penelitian ini dirancang sebuah reaktor fluidisasi plasma untuk gasifikasi batubara dengan jenis plasma yang digunakan adalah *dielectric barrier discharge*. Reaktor dirancang dengan ukuran diameter 10 cm dengan tinggi ruang fluidisasi 40 cm dan tinggi total 66 cm. Dilakukan uji kinerja reaktor untuk gasifikasi batubara menggunakan gas CO₂ dengan laju alir 20 liter/menit dan batubara jenis sub bituminus dengan tinggi unggun batubara 3 cm dan ukuran batubara 120-200 mesh. Hasilnya didapatkan konsentrasi hidrogen hingga 10,28 % dan CO adalah 28 ppm dengan produktivitas alat mencapai 0,00327 Liter/Joule.

Kata Kunci:

Batubara, *dielectric barrier discharge*, gasifikasi,

ABSTRACT

Name : Alifiana Permata Sari
Study Program : Teknik Kimia
Title : Reactor Design of Non-Thermal Plasma Fluidization: Performance Test Coal Gasification with CO₂.

Gasification is one of the environmentally friendly use of coal, but still has a weaknesses, which produces particulate and less economical. The use of plasma gasification is expected to overcome the lack of gasification by producing synthesis gas.

In this research designed a plasma reactor for gasification of coal fluidization with a type of plasma used is a dielectric barrier discharge. The reactor is designed with a diameter size of 10 cm, fluidization chamber with a height of 40 cm and a total height of 66 cm. Conducted performance tests using coal gasification reactor for CO₂ gas with flowrate of 20 liters/minute and sub-bituminous coal with coal size 120-200 mesh and coal bed height of 3 cm. The results obtained up to 10.28% concentration of hydrogen and CO is 28 ppm with the productivity of the reactor reached 0.00327 Liters / Joule.

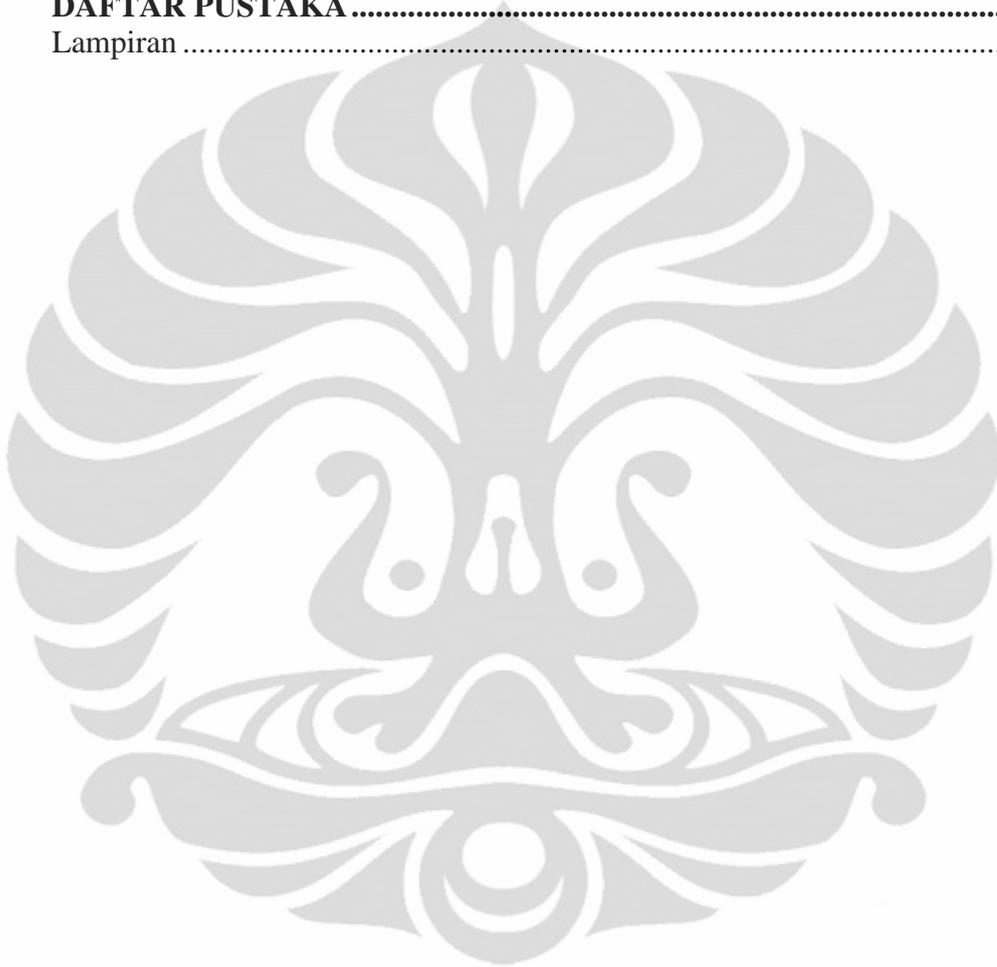
Key Words:

Coal, dielectric barrier discharge, gasification

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	x
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. Batubara.....	5
2.2. Plasma	6
2.2.1. Klasifikasi Plasma.....	8
2.2.2. Aplikasi Plasma dalam Penggunaannya	9
2.2.3. Pembangkitan Plasma Non Termal.....	10
2.3. Plasma <i>Dielectric Barrier Discharge</i> (DBD).....	12
2.4 Karbon Dioksida dalam Plasma	14
2.5. Gasifikasi.....	15
2.5.1. Moving Bed	17
2.5.2. <i>Fluidized Bed</i>	18
2.5.3. <i>Entrained Flow</i>	19
2.6. Mekanisme Gasifikasi Batu Bara dengan Plasma.....	20
2.7. Gasifikasi Batubara dalam Plasma Non Termal.....	23
2.8. Gasifikasi Batu Bara dengan Unggun Terfluidakan.....	24
2.9. Aplikasi Fluidisasi Plasma dalam Unggun Terfluidakan	25
BAB III METODE PENELITIAN	27
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	27
3.2. Rancang Bangun Alat.....	28
3.2.1. Perancangan Reaktor	30
3.2.2. Rangkaian Pembangkit Plasma.....	32
3.2.3. Penggunaan Alat Penunjang Lainnya	34
3.3. Prosedur Penelitian.....	36
3.3.1 Uji <i>Start-up</i> Alat	36
3.3.2. Variasi Kondisi Operasi Proses	36
3.3.3. Langkah Kerja Pengoperasian Reaktor Plasma	37
3.4 Prosedur Pengambilan Data Percobaan.....	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	40

4.1. Perancangan Reaktor.....	40
4.2. Analisis Batubara	43
4.3. Pengujian Awal Reaktor	44
4.3.1. Uji Kebocoran Alat	44
4.3.2. Pengujian Fluidisasi	45
4.3.3. Pengujian Plasma	46
4.4. Uji Kinerja Alat.....	47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	53
DAFTAR PUSTAKA	54
Lampiran	56

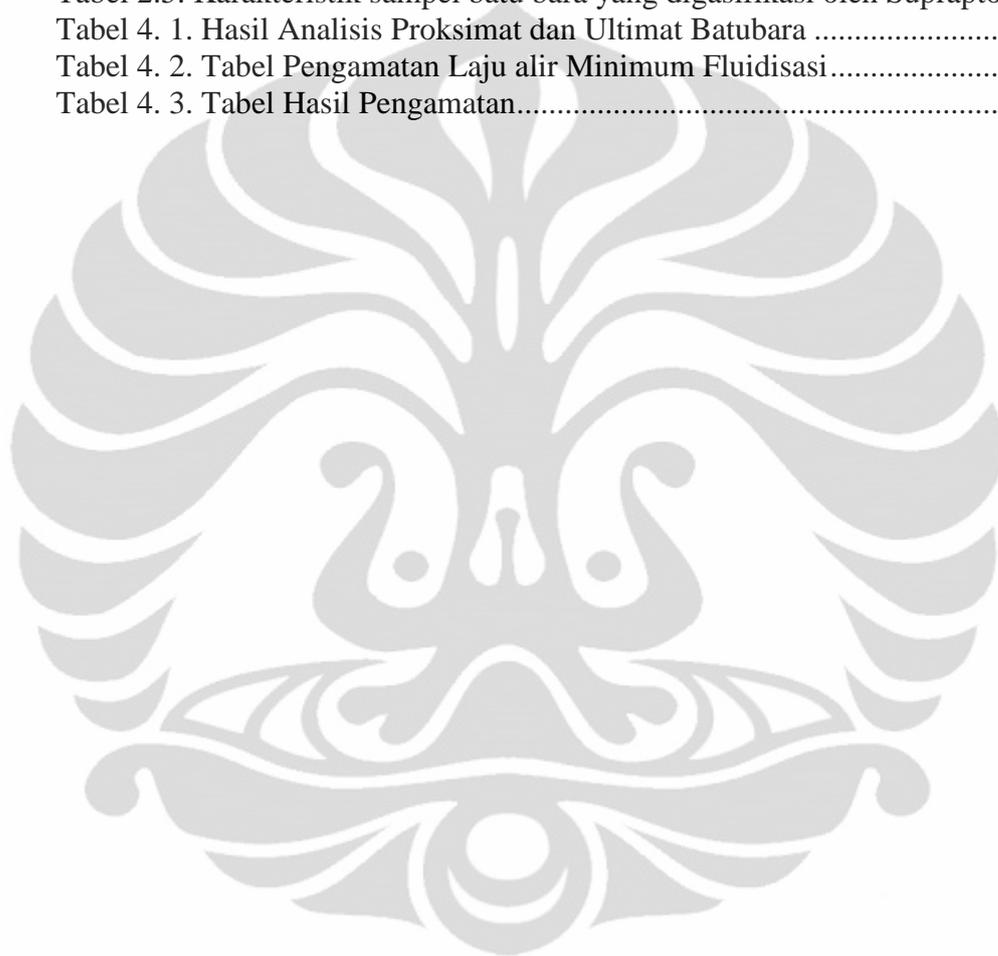


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Berbagai jenis partikel dan tumbukan pada ruang plasma (Yamamoto et al, 2007).....	7
Gambar 2.2. Kofigurasi Umum Elektroda <i>Dielectric Barrier Discharge</i> (Istadi, 2006)	13
Gambar 2.3. Diagram Produk dengan fungsi Rasio Oksigen dengan Batubara ...	16
Gambar 2.4. Gambar Gasifier <i>Moving Bed</i>	18
Gambar 2.5. Diagram Gasifier <i>Fluidized Bed</i>	19
Gambar 2.6. Diagram Gasifier <i>Entrained Flow</i>	20
Gambar 2.7. Proses Gasifikasi Karbon	21
Gambar 2.8. Komposisi Gas Sintesis pada Variasi Suhu Reaktor	24
Gambar 2.9. Komposisi produk dari gasifikasi dengan oksidan uap air (Suprpto, 2006)	25
Gambar 2.10. Skema Diagram Reaktor Plasma Fuidisasi (Chen, et al , 2005)	26
Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian	27
Gambar 3. 2. Skema Alat	29
Gambar 3. 3. Skema Reaktor Plasma.....	31
Gambar 3. 4. Gambar Elektroda yang digunakan ; (a) elektroda pipa ; (b) elektroda jala dengan kerangkanya	31
Gambar 3. 5. Penyusunan Elektroda untuk Reaktor	32
Gambar 3. 6. Skema Pembentukan Plasma dengan Trafo Tegangan Tinggi.....	33
Gambar 3. 7. <i>Neon Sign Transformer</i>	33
Gambar 3. 8. Regulator Tegangan	34
Gambar 3. 9. Alat ukur dalam sistem reaktor plasma, (a) ampermeter; (b) voltmeter; (c) flowmeter	34
Gambar 3. 10. Trap	35
Gambar 4. 1. Rincian Desain Reaktor Fluidisasi Plasma.....	40
Gambar 4. 2. Skema Alat Penelitian secara Keseluruhan	42
Gambar 4. 3. Alat penelitian yang digunakan.....	43
Gambar 4. 4. Contoh Hasil Pembacaan Kromatigrafi Gas	49
Gambar 4. 5. Grafik Pengaruh Tegangan Masukan Terhadap Konsentrasi.....	51
Gambar 4. 6. Grafik Pengaruh Tegangan Masukan Terhadap Produktivitas Reaktor	52

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Kandungan Karakteristik Batubara Berdasarkan Kelasnya	5
Tabel 2.2. Pembagian plasma berdasarkan suhu plasma	9
Tabel 2.3. Tabel Perbandingan Produk Pembakaran dengan Gasifikasi	17
Tabel 2.4. Karakteristik sampel batu bara Illinois (Rabovitser, 2006)	23
Tabel 2.5. Karakteristik sampel batu bara yang digasifikasi oleh Suprpto, 2006	25
Tabel 4. 1. Hasil Analisis Proksimat dan Ultimat Batubara	43
Tabel 4. 2. Tabel Pengamatan Laju alir Minimum Fluidisasi.....	46
Tabel 4. 3. Tabel Hasil Pengamatan.....	50



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki sumber daya alam energi yang melimpah. Contohnya seperti minyak bumi, batubara, gas alam, geothermal, dan sebagainya. Tetapi dari sekian banyaknya sumber energi yang dimiliki, kebutuhan energi Indonesia hanya difokuskan pada minyak bumi saja. Hal ini terbukti dari 48,4% kebutuhan energi nasional dipenuhi oleh minyak bumi. Sedangkan saat ini minyak cadangan minyak bumi di Indonesia sudah menipis dan dibuktikan dengan status Indonesia dari eksportir minyak bumi menjadi importer minyak bumi.

Untuk itu perlu digunakan sumber energi lain untuk memenuhi kebutuhan energi nasional, salah satunya adalah batubara. Pemerintah pun sudah merencanakan diversifikasi energi sampai 2025 di mana digunakan batubara untuk memenuhi kebutuhan energi nasional hingga 33%. Hal ini direncanakan karena cadangan batubara di Indonesia masih banyak untuk memenuhi kebutuhan energi nasional hingga 80 tahun ke depan.

Salah satu cara yang digunakan untuk memanfaatkan batubara adalah dengan gasifikasi. Gasifikasi merupakan suatu proses yang mengubah bahan padat menjadi gas. Bahan padat yang digunakan merupakan bahan bakar padat, sehingga batubara dapat digunakan. Gasifikasi yang dilakukan dapat mengubah batubara menjadi gas karbon monoksida dan hidrogen, sehingga hal ini dapat dijadikan sebagai nilai tambah untuk pemanfaatan batubara, meskipun kurang ekonomis dan masih menghasilkan partikulat berbahaya. Penelitian mengenai gasifikasi batubara dengan unggun terfluidakan sudah banyak dilakukan. Salah satunya adalah penelitian yang dilakukan Suprpto, 2006, di mana diteliti gasifikasi batu bara kualitas rendah pada 900°C dilakukan pada berbagai jenis oksidator. Didapatkan bahwa oksidasi dengan uap air memberikan komposisi gas hidrogen paling besar sebagai produk utama yang paling diinginkan. Sehingga diketahui kelemahan dari metode ini adalah tergantung dengan ukuran partikel dan kelembaban serta masih

menghasilkan tar. Metode ini cocok untuk batubara yang dihaluskan, memiliki nilai konversi yang tinggi, dan cocok untuk batu bara dengan abu bertitik leleh rendah.

Plasma dapat digunakan untuk mengatasi kelemahan yang ada pada gasifikasi tersebut. Plasma sendiri sudah banyak diaplikasikan dalam industri, terutama dalam pengolahan limbah, yaitu digunakan sebagai *gas cleaner*, *water purifier*, *solid waste treatment*, *electrostatic precipitator*, dan lain lain. Untuk itu, dengan adanya penggunaan plasma pada gasifikator diharapkan dapat mengurai karbon tak terbakar lainnya sehingga konsentrasi sintesis gas yang didapat lebih tinggi dibandingkan gasifikasi termal biasa.

Plasma yang digunakan merupakan plasma nontermal. Hal ini dilakukan karena plasma nontermal memiliki kelebihan dari segi penggunaan daya listrik yang lebih rendah dibanding plasma termal. Selain itu ketika mencapai suhu yang tidak terlalu tinggi akan diiringi dengan munculnya banyak jenis spesies aktif di dalamnya dalam jumlah yang besar. Kelebihan lainnya adalah generatornya berukuran lebih kecil dan lebih ringan.

(Zhukov, et. al., 1990 and Ardelyan, et. al., 2008)

Penggunaan plasma dalam fluidized bed selama ini baru diteliti untuk rekayasa material serbuk dan mutasi benih tanaman. DBD digunakan untuk mutasi benih *coxcomb* pada 315-320 K tekanan atmosfer. Hasilnya bunga *coxcomb* dan tingginya menjadi lebih besar (Chen, et. al., 2005). Penggunaan glow discharge plasma tekanan atmosfer untuk melapisi serbuk kalsium karbonat dengan hexametildisiloksan. Pelapisan dengan metode ini terbukti dapat mengubah sifat serbuk tersebut dari superhidrofilik menjadi superhidrofobik secara merata. (Chen, et. al., 2006)

Pada penelitian ini akan dibuat sebuah sistem gasifikator plasma. Plasma yang akan digunakan adalah plasma non termal DBD, karena dapat digunakan pada suhu rendah dan tekanan lingkungan. DBD memberikan hasil yang mendekati corona discharge. Corona discharge kontinyu dapat menjadi proses paling efektif untuk reaktor pengolahan batu bara (Ardelyan, et. al., 2008). Perpaduan unggun terfluidakan dan plasma diharapkan dapat menghasilkan konversi batu bara yang besar serta mengurangi jumlah tar yang terbentuk.

Sistem yang akan dibuat ini nantinya akan diuji menggunakan beberapa macam gas umpan, yaitu gas CO₂, oksigen, dan udara. Tetapi pada pembahasan ini hanya akan dibahas mengenai uji kinerja reaktor gasifikator yang dihasilkan dengan menggunakan gas CO₂.

1.2. Perumusan Masalah

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

1. Bagaimana merancang reaktor gasifikasi plasma untuk batubara dengan unggun terfluidakan
2. Bagaimana pengaruh variasi tegangan pada konversi produk yang dihasilkan
3. Bagaimana komposisi H₂ setelah keluar dari gasifikator plasma

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat dan merancang reaktor gasifikasi plasma untuk batubara dengan unggun terfluidakan. Setelah didapatkan sebuah reaktor gasifikasi plasma, akan dilakukan uji kinerja gasifikator batubara dalam unggun terfluidakan menggunakan gas CO₂.

1.4. Batasan Masalah

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

1. Batubara yang digunakan adalah jenis sub bituminous yang didapat dari PT Indonesia Power UBP Suralaya, Komplek PLTU Suralaya
2. Pembangkit plasma yang digunakan adalah dielectric barrier discharge
3. Variabel kontrolnya adalah waktu, sistem yang digunakan, laju alir, dan gas umpan yang digunakan
4. Gas umpan yang digunakan adalah gas CO₂
5. Variabel bebas yang divariasikan adalah tegangan pada pembangkit plasma yang digunakan
6. Sumber listrik yang digunakan adalah listrik PLN

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang dilakukan dalam penulisan makalah seminar ini adalah :

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi literatur-literatur yang mengandung teori yang berhubungan dengan plasma (khususnya plasma nontermal), karakteristik batu bara, gasifikasi batu bara dengan plasma, dan unggun terfluidakan.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisi metode, alat, dan prosedur yang akan digunakan untuk melakukan intensifikasi proses dan kinerja sistem untuk reaktor plasma non termal untuk gasifikasi batubara dalam unggun terfluidakan serta metode untuk pengolahan data hasil pengujian laboratorium.

BAB IV PENGOLAHAN DATA DAN PEMBAHASAN

Membahas tentang hasil yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan.

BAB V KESIMPULAN

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

LAMPIRAN

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Batubara

Batubara diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama yakni antrasit, bitumen dan lignit, meskipun tidak jelas pembatasan di antaranya. 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. Dalam batubara terdapat *fixed carbon*. 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 batubara berdasarkan karakteristiknya

Tabel 2.1. 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	1,555	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

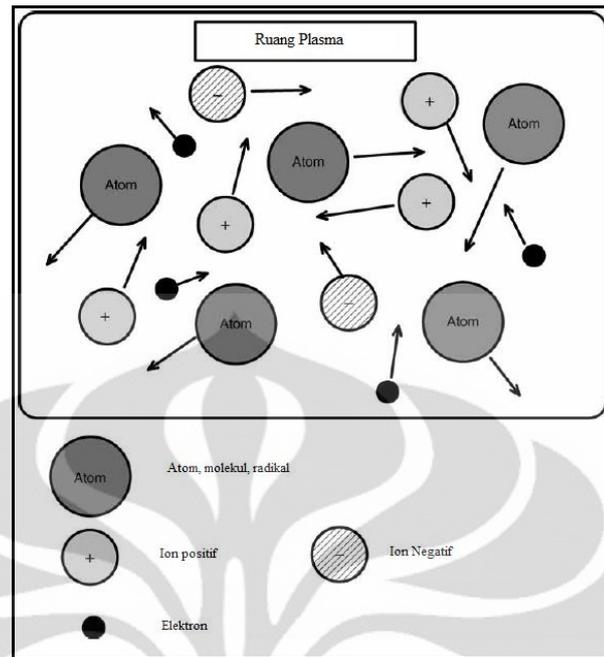
Batubara jenis sub bituminous merupakan jenis batubara dengan cadangan kedua terbesar di Indonesia, yaitu sebesar 33,09%. Batubara jenis ini memiliki karakteristik berwarna coklat tua sampai hitam, lembut dan rapuh di ujung bawah, dan relatif kuat pada ujung atas. Batubara ini memiliki kadar air 15-30% menurut

beratnya dan non-coking (sedikit mengalami pembengkakan pada saat pemanasan). Batubara ini memiliki densitas air yang rendah dan kadar air tinggi membuat beberapa jenis sub-bituminous batubara rentan terhadap pembakaran spontan jika tidak disimpan dengan baik.

Reaktivitas batu bara dipengaruhi oleh beberapa variabel, termasuk sifat-sifatnya yang tidak hanya dihubungkan dengan struktur fisik atau parameter proses. Variabel ini antara lain: kelas batu bara, struktur pori-pori, dan struktur kimia batu bara. 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)

2.2. Plasma

Perubahan fasa terjadi ketika sebuah zat berubah dari padat menjadi cair, dan cair menjadi gas saat ditambahkan panas dengan kondisi suhu konstan. Saat energi ditambahkan ke gas, elektron akan muncul dari partikel netral dan berubah menjadi ion. Kondisi di mana terdapat banyak elektron dan ion yang bercampur disebut plasma. Perubahan ini didasarkan pada reaksi ionisasi. Perubahan gas menjadi plasma tidak sepenuhnya diklasifikasikan sebagai perubahan fasa. Hal ini dikarenakan energi yang dibutuhkan untuk berubah menjadi plasma berkisar 1-50 eV, sedangkan energi panas laten pada saat perubahan fasa berkisar 0,01 eV. Namun, plasma sering disebut keadaan keempat dari suatu materi, di mana 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)

Secara harfiah plasma adalah gas yang diionisasi atau diberi serangan elektron sampai pada kondisi di mana sebagian dari gas tersebut terionisasi dan dapat menghantarkan arus listrik serta terdiri dari partikel neutron, ion positif, ion negatif, electron dan atom-atom atau molekul netral yang merespon secara kuat medan magnetik. Pada keadaan tersebut gas mempunyai viskositas seperti liquid pada tekanan atmosferik dan muatan listrik netral (memiliki jumlah kerapatan ion n_i sama dengan jumlah kerapatan elektron n_e) dan memberikan konduktivitas listrik relatif tinggi yang besarnya mendekati konduktivitas logam. Konduktivitas elektrik tersebut bervariasi sesuai dengan derajat ionisasinya, di mana derajat atau tingkat ionisasi plasma adalah berbanding lurus dengan atom-atom yang kehilangan atau mendapatkan elektron, dan biasanya dikendalikan oleh suhu.

Teknologi plasma melibatkan pembentukan bunga api listrik dengan melewati arus listrik melalui suatu gas dalam proses yang disebut *electrical breakdown*. Karena tahanan listrik sepanjang sistem, dihasilkan sejumlah panas dalam jumlah yang signifikan, yang mengambil elektron dari molekul-molekul gas menghasilkan suatu aliran gas yang terionisasi, atau plasma (Gomez et al, 2009).

Plasma secara khas mengambil bentuk gas netral seperti awan, sebagai contoh, dalam kasus bintang. Seperti gas, plasma tidak mempunyai bentuk dan

volume terbatas kecuali dalam kotak tertutup, tetapi tidak sama dengan gas, dalam pengaruh medan magnet, plasma mungkin membentuk struktur seperti kawat pijar, sinar dan lapisan ganda.

2.2.1. Klasifikasi Plasma

Ada beberapa parameter utama yang digunakan untuk mengklasifikasikan plasma, yaitu:

a. Derajat Ionisasi

Derajat ionisasi didefinisikan sebagai kepadatan jumlah ion dibagi dengan jumlah partikel netral. Derajat ionisasi sama dengan satu ketika semua partikel netral terionisasi dalam plasma, dan derajat ionisasi sama dengan nol jika tidak ada partikel netral yang terionisasi. Berdasarkan derajat ionisasinya, plasma dibagi menjadi:

- Plasma terionisasi sempurna: Derajat ionisasi adalah $> 90\%$. Partikel netral memiliki sedikit efek pada plasma.
- Plasma terionisasi lemah: Derajat ionisasi adalah $< 1\%$. Efek elektron dominan.
- Plasma terionisasi sebagian: Memiliki karakter campuran dari plasma terionisasi sepenuhnya dan plasma terionisasi lemah.

b. Kondisi Equilibrium

Kesetimbangan (Equilibrium) didefinisikan sebagai keadaan di mana suhu elektron, ion, dan partikel alami adalah sama dan kesetimbangan ionisasi berhasil didapatkan sedangkan pada kondisi non-equilibrium plasma temperatur elektron biasanya lebih daripada suhu partikel netral.

Berdasarkan kondisi kesetimbangannya, plasma dibagi menjadi:

- Equilibrium plasma
Sebagai contoh, plasma termal *arc discharge* tekanan atmosferik.
- Non-Equilibrium Plasma
Sebagai contoh, glow discharge plasma pada tekanan rendah dan plasma pulsar tegangan tinggi pada kondisi tekanan atmosferik .

c. Suhu plasma

Plasma juga diklasifikasikan berdasarkan suhu gas plasma (T_g) apakah mencapai setinggi suhu pembakaran ($T_c > 500 \text{ }^\circ \text{C}$) atau tidak. Pembagiannya dapat dilihat pada Tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2.2. Pembagian plasma berdasarkan suhu plasma

Plasma	Keadaan	Contoh
Plasma Temperatur Tinggi (Equilibrium Plasma)	$T_e \approx T_i \approx T_g$, $T_p = 10^6 - 10^8 \text{ K}$ $n_e \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}$	<i>Laser fusion plasma</i>
Plasma Temperatur Rendah (Quasi-Equilibrium Plasma)	$T_e \approx T_i \approx T_g$, $T_p = 2 \times 10^4 \text{ K}$ $n_e \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}$	<i>Arc plasma, plasma torches, RF inductively coupled discharges</i>
Plasma Non Termal (Non Equilibrium Plasma)	$T_e \gg T_i \approx T_g = 300 \text{ K}$ $n_e \approx 10^{10} \text{ m}^{-3}$	<i>Glow, corona, APPJ, DBD, MHCD, OAUGDP, plasma needle</i>

(Sumber: Nehra et al., 2008)

2.2.2. Aplikasi Plasma dalam Penggunaannya

Sehingga dari jenis-jenis pengklasifikasian plasma diatas, didapat dua jenis utama plasma yakni :

a. Plasma Termal

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 menyebabkan energi yang diberikan kepada plasma ditangkap oleh electron yang dipindahkan ke partikel-partikel berat dengan tumbukan elatis. Karena densitas jumlah elektron tinggi, dikaitkan dengan operasi pada tekanan atmosferik, frekuensi tumbukan elastis sangat tinggi dan kesetimbangan termal tercapai dengan cepat serta dapat mencapai suhu 20.000°C atau lebih untuk didaerah 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).

Thermal plasma dapat dibangkitkan dengan metode DC electrical discharge yang menghasilkan densitas energi pijar plasma yang tinggi serta dengan penggunaan aliran gas yang cepat sebagai mediumnya, maka dapat

UNIVERSITAS INDONESIA

membentuk plasma jet. Sehingga sangat cocok untuk menjadi jenis plasma yang dipilih untuk incenerator ini. Aplikasi plasma termal digunakan antara lain:

- ✓ Teknik pelapisan, seperti penyemprotan (*spraying*) plasma, deposisi uap kimia plasma termal (TPCVD), termasuk aplikasi peleburan bersih dan peleburan kembali pada tungku besar.
- ✓ Pembuatan bubuk halus, dalam kisaran nanometer
- ✓ Metalurgi ekstraktif termasuk operasi peleburan.
- ✓ Penghancuran dan pengolahan bahan beracun dan berbahaya.

b. Plasma Non-termal

Memiliki sifat densitas energi lebih rendah, terdapat perbedaan suhu besar antara elektron dan partikel yang lebih berat. Elektron dengan energi yang cukup bertumbukan dengan gas latar (*background*) menghasilkan disosiasi, eksitasi dan ionisasi tingkat rendah tanpa peningkatan entalpi gas yang cukup besar. Hasilnya, suhu electron melampaui suhu partikel-partikel berat hingga beberapa derajat perpangkatan dan karenanya memungkinkan untuk mempertahankan suhu keluaran (*discharge*) pada suhu yang jauh lebih rendah, bahkan pada suhu ruang. Plasma jenis ini menghasilkan spesi-spesi aktif yang lebih beragam, dan atau lebih besar energinya dibandingkan dengan spesi yang biasa dihasilkan pada reaktor kimia. Keberadaan spesi-spesi aktif ini memungkinkan dilakukannya reaksi proses pada permukaan material yang tidak dapat dilakukan dengan cara lain.

2.2.3. Pembangkitan Plasma Non Termal

Untuk menghasilkan plasma, elektron harus dihilangkan dari partikel gas netral. Energi yang dibutuhkan untuk *discharge* listrik umumnya digunakan untuk mengionisasi gas. Beberapa metode dalam pembangkitan plasma, yaitu:

➤ **Plasma Arus Searah Tunak (*Steady DC Plasma*)**

Lucutan arus searah (DC) diinduksi dengan memberikan tegangan DC di antara elektroda dan melakukan ionisasi gas dengan memutuskan isolasi gas. Lucutan listrik DC terutama diklasifikasikan kedalam beberapa tipe yakni *Corona Discharge*, *glow discharge*, dan *arc discharge*. Serta terdapat tipe lain yakni *Sparks* yang merupakan jenis lain lucutan listrik, di mana menghasilkan plasma dengan periode pendek.

- *Corona DC Discharge*

Corona Discharge terdiri dari daya listrik yang relatif rendah yang terjadi pada kondisi mendekati tekanan atmosfer. Korona selalu dihasilkan oleh medan listrik yang kuat diasosiasikan dengan kabel berdiameter kecil, jarum, atau elektroda berbentuk tajam/runcing. Hal ini biasanya diinduksikan dengan tegangan tinggi dari beberapa kilovolt hingga puluhan kilovolt. Arus listrik biasanya dalam kisaran 1-100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Korona muncul dalam bentuk serabut samar redup yang memancar cahaya yang keluar dari ujung elektroda dan wilayah plasma untuk korona terbatas hanya disekitar elektroda.

Terdapat dua kondisi utama bagi pembangkitan korona ini :

- a. Distribusi medan listrik tak seragam dan kekuatan (dV/dr) nya lebih dari inisiasi medan listrik korona.
- b. Gradien maksimum dari potensial listrik (dV/dr) berkurang oleh generasi korona.

Dalam medan listrik tak seragam, kekuatan medan listrik maksimum di dalam ruang di dekat elektroda, sehingga korona diinduksi pada daerah ini terlebih dahulu. Terdapat dua jenis utama *corona discharge* yakni *corona* positif dan *corona* negatif yang dipengaruhi oleh polaritas dari medan dan konfigurasi dari susunan geometri elektroda. Untuk jenis *corona* positif pada susunan jarum dan plate elektroda lecutan (*discharge*) dimulai dengan adanya denyutan lompatan dari *corona* dan menuju proses pembentukan aliran *corona*, pancaran *corona* dan *spark discharge* seiring terjadinya penambahan tegangan. Sedangkan untuk jenis *corona* negatif dengan susunan yang sama bentuk awal akan berupa *Trichel pulse corona*, dilanjutkan dengan bentuk *corona* tanpa denyut dan *spark discharge* seiring dengan peningkatan tegangan yang digunakan.

- *DC Glow Discharge*

Proses pembangkitan plasma menggunakan dua pelat sejajar dipasang dalam sebuah wadah yang bertekanan dalam kisaran 10-100 Pa. Ketika tegangan yang diberikan 100-1000 V antara pelat, lecutan terjadi dan disebut sebagai *DC glow discharge*. Arus yang sesuai dalam kisaran

mA/cm^2 . Discharge ini ditopang oleh lecutan yang disebabkan oleh tabrakan elektron sekunder kepada media, yang dipicu oleh foton ion atau dampak pada katoda. Perangkat ini mudah untuk membangun dalam menghasilkan plasma. Plasma ini disebut nonequilibrium atau nonthermal plasma, di mana suhu elektron tinggi, dan ion-ion dan partikel netral bersuhu rendah.

- *DC Arc Discharge*

Ketika tegangan dalam rentang 10 V diterapkan untuk jenis elektroda batang-ganda di mana awalnya dua elektroda berada dalam kontak dan terpisah, lecutan listrik yang sangat intens terjadi dalam tekanan atmosfer. Lecutan ini disebut *arc discharge*. *Arc discharge* ditandai oleh tegangan rendah dan arus yang sangat tinggi setinggi. 10-1.000 A. Lecutan ditopang oleh termal elektron yang dipancarkan dari katoda. Perangkat memerlukan kapasitas yang besar, tetapi perangkat ini sangat sederhana. Perangkat ini digunakan untuk generasi plasma termal gas dan ion di mana suhu berada dalam kondisi kesetimbangan. Thermal plasma jet dapat diperoleh ketika anoda untuk melepaskan bunga api listrik dirancang dalam bentuk jenis nosel.

➤ **Plasma Tak-Tunak**

- AC atau Pulse Corona Discharge

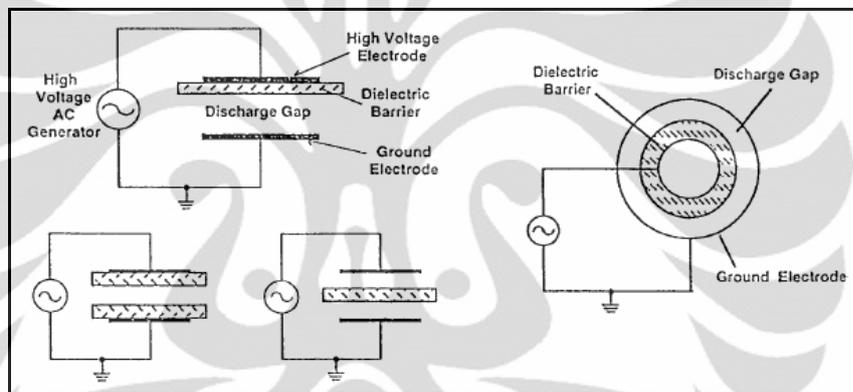
Metode lain untuk menghasilkan plasma yaitu *intermiten discharge* dan *AC discharge*. *AC discharge* frekuensi rendah berperilaku seperti *DC discharge*. Akhir-akhir ini, plasma jenis ini secara luas digunakan untuk penerapan perlindungan lingkungan. Berbagai reaktor plasma telah diteliti oleh banyak peneliti dengan berbagai bentuk dari fisik reaktor dan serta konfigurasi dari lucutan listriknya.

2.3. Plasma Dielectric Barrier Discharge (DBD)

Dielectric-barrier discharge (DBD) atau juga disebut sebagai *barrier discharge* atau *silent discharge* sudah banyak diaplikasikan di dunia industri. Karakteristik utama dari DBD adalah bahwa plasma non equilibrium dapat disediakan pada tekanan tinggi, seperti tekanan atmosfer. Pada DBD, hal ini akan

didapat lebih mudah dibandingkan jenis plasma lainnya. Fleksibilitas DBD mencakup bentuk geometris, medium operasi, dan parameter operasi.

Tipe konfigurasi elektroda planar dan silinder pada DBD dapat dilihat pada Gambar 2.2. Karakteristik DBD adalah adanya satu atau lebih lapisan insulasi di antara elektroda logam. Sebuah debit yang memiliki satu atau dua batasan memiliki kemiripan dengan debit yang berada di antara elektroda logam. Perbedaan antara keduanya adalah DBD tidak dapat beroperasi pada arus DC karena kapasitas dari dielektrik yang menyebabkan dibutuhkannya medan listrik bolak balik untuk menghasilkan arus. DBD dapat dioperasikan dengan arus gelombang sinusoidal atau persegi di antara frekuensi baris dan gelombang mikro atau dengan bentuk khusus gelombang berdenyut.



Gambar 2.2. Kofigurasi Umum Elektroda *Dielectric Barrier Discharge* (Istadi, 2006)

DBD, yang beroperasi pada tekanan 0,1 – 10 bar merupakan jenis lucutan plasma AC. DBD dihasilkan di antara dua elektroda yang terdapat penghalang dielektrik (berbentuk gelas/kaca) di antaranya. 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 methanol dari campuran metana/oksigen, remediasi gas buang, dan gasifikasi. DBD menjadi pilihan untuk mengoperasikan plasma nontermal pada tekanan atmosfer dan mudah di-*scale-up*

2.4 Karbon Dioksida dalam Plasma

Konversi materi bernilai murah, seperti karbon dioksida, menjadi gas yang memiliki nilai sudah banyak dilakukan (Woolf, 2004; Yamaji, 1997). Emisi CO₂ yang dihasilkan menimbulkan permasalahan lingkungan, salah satunya adalah efek rumah kaca. Beberapa penelitian dilakukan untuk mengurangi emisi CO₂ dengan menggunakan plasma, diantaranya RF plasma (Savinov et al., 1999), corona (Wen and Jiang, 2001; Maezono and Chang, 1990), dielectric barrier discharge (Li et al., 2004), glow discharge (Wang et al, 1999; Buser and Sullovan, 1970), and thermal plasma (Kobayashi et al, 2002),

Penelitian telah membuktikan bahwa plasma CO₂ dapat menghasilkan banyak spesies oksigen aktif dan spesies plasma aktif lainnya untuk reaksi selanjutnya dengan reaktan lain, seperti metana, alkana rendah, dan lainnya. Reaksi-reaksi ini mengarah pada pembentukan zat kimia yang lebih bernilai, seperti etilen, propilen, dan oksigenat. Dari hasil penelitian diketahui bahwa CO₂ merupakan katalis yang sangat baik untuk konversi alkana rendah menjadi alkana (Liu, et al, 2000)

Pada dekomposisi CO₂, reaksi umumnya dimulai dengan tumbukan antara CO₂ dan e. Eliasson (1991) menjelaskan pentingnya elektron untuk inisiasi reaksi kimi pada plasma non equilibrium. Dengan mereaksikan dengan e, inisiasi reaksi plasma dapat dibagi menjadi dua jenis reaksi :

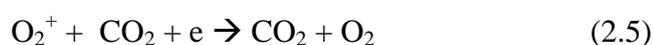
- a. Reaksi langsung yang menghasilkan CO dan O₂,



- b. Reaksi intermediet yang memproduksi spesi dan ion intermediet yang berenergi tinggi. Diantara spesi dan ion radikal, O, O₂⁺, dan CO⁺ mempunyai peran penting untuk mengarahkan reaksi. Dibandingkan reaksi langsung e dengan CO₂, O₂ dapat diproduksi dari spesi radikal dan ion tersebut via O₃.



Atau proses rekombinan



CO^+ memiliki peran yang signifikan dalam produksi CO dengan reaksi:



2.5. Gasifikasi

Gasifikasi merupakan suatu proses yang mengubah bahan padat menjadi gas. Bahan padat yang dimaksud adalah bahan bakar padat termasuk didalamnya, biomass, batubara, dan arang. Gas yang dimaksud adalah gas-gas yang keluar dari proses gasifikasi dan umumnya berbentuk CO, CO₂, H₂, dan CH₄. Gasifikasi sendiri dikatakan sebagai suatu proses konversi bahan bakar karbon menjadi produk gas C yang memiliki nilai kalor yang berguna. Berbeda dengan pembakaran, dimana gas buang yang dihasilkan dari pembakaran tidak memiliki nilai kalor yang signifikan untuk digunakan (Highman, van der Burgt, 2003). Pada proses gasifikasi, jumlah udara/bahan bakar (Air Fuel Ratio) yang digunakan selama proses adalah kurang dari 1,5. Karena gasifikasi merupakan proses konversi bahan padat yang mengandung karbon, maka semua hidrokarbon dapat digasifikasi, termasuk batubara, untuk menghasilkan gas sintesis.

Alat gasifikasi dapat dibedakan berdasarkan jenisnya, yaitu :

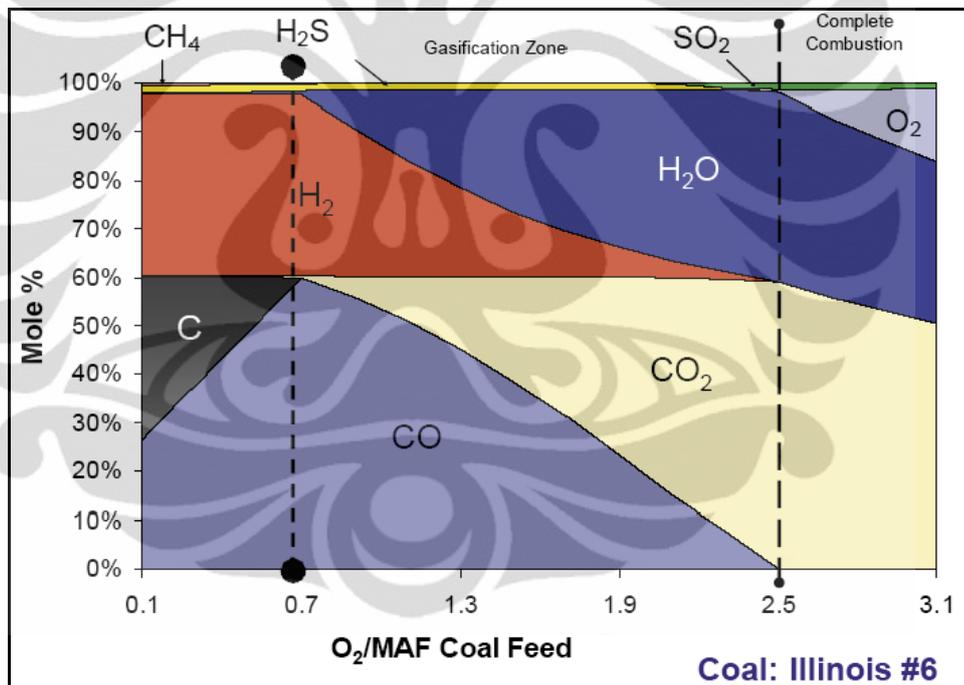
- a. Metode Fluidisasi
 - Gasifikasi unggun tetap (fixed bed gasification)
 - Gasifikasi unggun bergerak (moving bed gasification)
 - Gasifikasi unggun tefluidisasi (fluidized bed gasification)
 - Entrained bed
- b. Arah Aliran
 - Gasifikasi aliran searah (downdraft gasification), di mana arah aliran sama-sama ke bawah
 - Gasifikasi aliran berlawanan (updraft gasification), di mana arah aliran padatan ke bawah sedangkan aliran gas ke atas
- c. Berdasarkan gas yang diperlukan untuk gasifikasi
 - Gasifikasi udara,
 - Gasifikasi uap

Gasifikasi adalah proses di mana bahan mudah terbakar teroksidasi sebagian atau terbakar sebagian. Produk gasifikasi adalah gas sintesis. Secara umum, reaksi gasifikasi karbon pada batu bara adalah sebagai berikut:



Namun, keberadaan unsur-unsur lain dalam batu bara dan udara akan mengakibatkan terbentuknya polutan-polutan yang tak diinginkan pada pembakaran maupun gasifikasi batu bara konvensional. Polutan tersebut adalah tar, char, NO_x, SO_x, dan hidrokarbon.

Karena gasifikasi berkaitan dengan oksidasi sebagian, maka proses gasifikasi berada di daerah operasi *oxygen lean*. Seperti Gambar 2.3, stoikiometri rasio oksigen dengan batubara untuk pembakaran, empat kali dari stoikiometri rasio oksigen dengan batubara pada gasifikasi. Untuk batubara Illinois #6.



Gambar 2.3. Diagram Produk dengan fungsi Rasio Oksigen dengan Batubara

(Sumber : *The Gas Turbine Handbook*)

Berdasarkan Gambar 2.3, terlihat bahwa produk yang dihasilkan berubah secara signifikan antara produk hasil pembakaran dengan gasifikasi. Perubahan ini dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Tabel Perbandingan Produk Pembakaran dengan Gasifikasi

	Pembakaran	Gasifikasi
Karbon	CO ₂	CO
Hidrogen	H ₂ O	H ₂
Nitrogen	NO, NO ₂	HCN, NH ₃ , atau N ₂
Sulfur	SO ₂ atau SO ₃	H ₂ S, COS
Air	H ₂ O	H ₂

(Sumber : *The Gas Turbine Handbook*)

Nitrogen dan sulfur yang berikatan dengan bahan bakara pada proses gasifikasi berperan pada konsekuensi ke lingkungan. Nitrogen yang berikatan dengan bahan bakar biasanya terkonversi menjadi NO_x pada proses pembakaran, akan terkonversi menjadi N₂, NH₃, atau HCN pada proses gasifikasi. Produk NH₃, atau HCN dihasilkan memiliki konsentrasi yang rendah. Ini akan mengurangi emisi NO_x secara signifikan. Sedangkan untuk sulfur, pada gasifikasi akan terkonversi menjadi H₂S dan COS dengan konsentrasi yang cukup rendah.

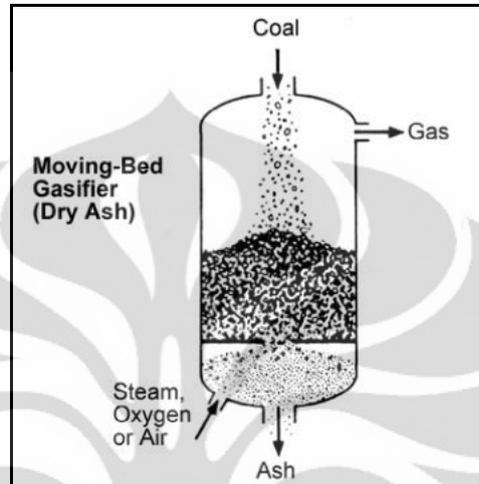
Perbedaan mendasar dari pembakaran dan gasifikasi lainnya adalah jumlah panas yang dilepaskan oleh reaksi kimia. Pada pembakaran, seluruh energi dilepas sebagai panas (asumsikan seluruh energi terkonversi), sedangkan pada gasifikasi sebagian besar energinya tidak dilepas sebagai panas. Energi ini akan berada pada produk gas sintesis yang dihasilkan.

Jenis gasifikasi fluidisasi yang umum digunakan ada 3, yaitu *moving bed*, *fluidized bed*, dan *entrained flow*. Ketiga jenis ini memiliki kelemahan dan kelebihan masing-masing, sehingga penggunaannya tergantung pada kebutuhan.

2.5.1. Moving Bed

Jenis batubara yang digunakan untuk jenis ini berukuran agak besar. Pada gasifier *moving bed*, alirannya merupakan *counter current*, di mana batubara masuk melalui bagian atas reaktor dan udara atau oksigen masuk dari bagian bawah, seperti pada Gambar 2.4. Ketika batubara turun ke bagian bawah reaktor, batubara akan tergasifikasi dan sisa abu yang ada akan jatuh ke bagian dasar reaktor. Karena jenis alirannya, maka panas reaksi untuk gasifikasi berasal

sebagai *pre-heat* batubara sebelum memasuki ruang gasifikasi. Akibatnya, suhu gas sintesis yang dihasilkan akan lebih rendah dari suhu yang dibutuhkan untuk konversi menyeluruh batubara. Karena menghasilkan abu, maka titik leleh abu harus tinggi agar abu tidak meleleh dan menyubut aliran.



Gambar 2.4. Gambar Gasifier *Moving Bed*
(Sumber: *The Gas Turbine Handbook*)

Waktu tinggal batubara pada gasifier ini berorde jam. Karakteristik yang dimiliki gasifier ini adalah:

- Kebutuhan oksidan rendah
- Jumlah gas metana yang dihasilkan pada produk cukup tinggi
- Digunakan untuk mengatasi caking coal
- Menghasilkan cairan hidrokarbon seperti tar

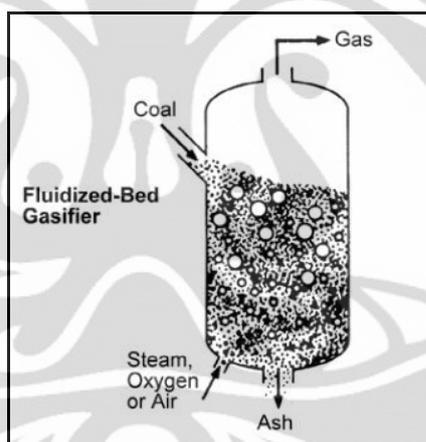
2.5.2. *Fluidized Bed*

Pada gasifier jenis ini, ukuran batubara yang digunakan lebih kecil dibandingkan moving bed. Sebuah gasifikasi fluidized bed merupakan reaktor back-mixed atau well-stirred di mana ada campuran konsisten dari partikel batubara baru bercampur dengan partikel yang lebih tua, sebagian gasifikasi dan sepenuhnya gasifikasi. Pencampuran juga mendorong suhu seragam di seluruh bed. Aliran gas ke dalam reaktor (oksidan, uap, syngas daur ulang) harus cukup untuk mengapung partikel batubara dalam bed tetapi tidak begitu hingga keluar dari bed. Namun, karena partikel-partikel gasifikasi, mereka akan menjadi lebih

UNIVERSITAS INDONESIA

kecil dan ringan dan akan keluar dari reaktor. Hal ini juga penting bahwa suhu di dalam bed kurang dari suhu fusi abu awal dari batubara untuk menghindari aglomerasi partikel. Biasanya badai hilir gasifier akan menangkap partikel yang lebih besar yang keluar dan partikel-partikel ini didaur ulang kembali ke bed. Secara keseluruhan, waktu tinggal partikel batubara dalam fluidized bed gasifier lebih pendek daripada yang dari gasifier tidur bergerak.

Tipe gasifier ini memasukan bahan bakarnya dari samping dan oksidan dari bawah, seperti pada Gambar 2.5. Oksidan, selain berfungsi sebagai reaktan, juga berfungsi sebagai media lapisan mengambang dari batubara yang digasifikasi. Sehingga fungsi oksidan bersifat komplementer, atau harus melengkapi fungsi lainnya. Akibatnya tingkat konversi karbon pada tipe ini hanya sekitar 97%, tidak setinggi moving bed dan entrained flow yang dapat mencapai 99% (Highman, van de Burgt, 2003).



Gambar 2.5. Diagram Gasifier *Fluidized Bed*
(Sumber: *The Gas Turbine Handbook*)

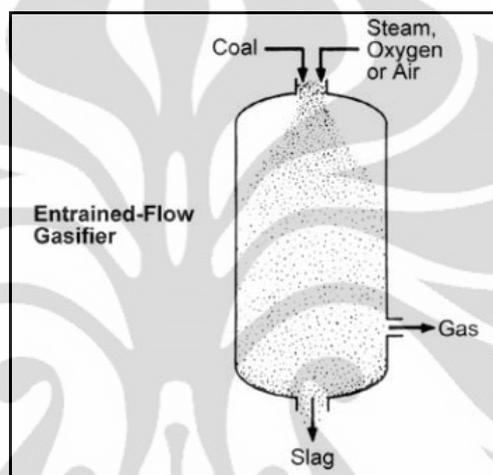
2.5.3. *Entrained Flow*

Pada gasifier jenis ini digunakan batubara dengan ukuran yang lebih halus dibandingkan dua jenis gasifier sebelumnya. Gambar gasifier jenis ini dapat dilihat pada Gambar 2.6. Batubara dengan ukuran halus dimasukkan ke dalam bed bersamaan dengan oksidan yang digunakan (dapat berupa udara, air, atau uap). Waktu tinggal di bed sangat singkat, dengan orde detik. Suhu operasi yang digunakan berada pada suhu yang cukup tinggi sehingga menghasilkan konversi

karbon yang tinggi. Karena suhu yang cukup tinggi, maka akan menghasilkan kerak.

Karakteristik dari gasifier ini adalah:

- Suhu operasi yang tinggi
- Kemungkinan adanya kerak pada gas sintesis yang dihasilkan
- Dibutuhkan jumlah oksidan yang cukup besar
- Dapat melakukan gasifikasi tanpa ada pengaruh karakteristik batubara



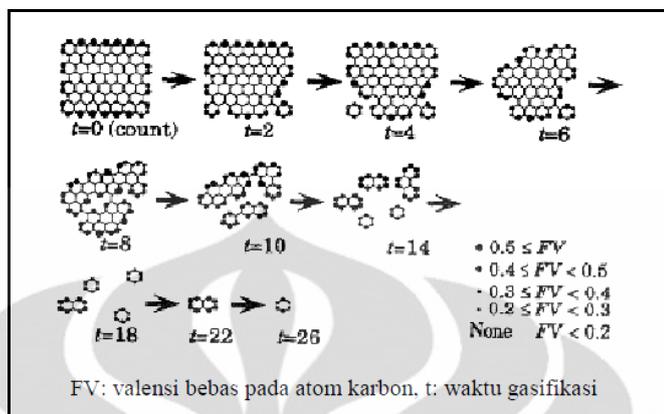
Gambar 2.6. Diagram Gasifier *Entrained Flow*
(Sumber: *The Gas Turbine Handbook*)

2.6. Mekanisme Gasifikasi Batu Bara 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:

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

Mekanisme gasifikasi batu bara dapat dilihat pada Gambar 2.7 di bawah ini.



Gambar 2.7. Proses Gasifikasi Karbon

(Sumber: Slaviskaya, et al, 2009)

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, diketahui bahwa spesies antara yang paling berpengaruh pada proses gasifikasi adalah atom C, atom H, radikal CH, radikal OH, dan ion CO⁺ (He, et al, 2003). Efek dari radikal CH, radikal OH, dan ion CO⁺ lebih kompleks daripada efek dari atom C dan H. Dari penelitiannya dan referensi sebelumnya, Xiaojun He dan kawan-kawan mengusulkan mekanisme gasifikasi batu bara pada plasma dalam medium udara dan uap air, yang terdiri dari 24 tahapan reaksi berikut ini:

a) Spesies aktif udara plasma pada tahap inisiasi



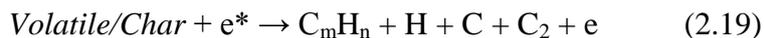
b) Spesies aktif pada tahap ketiak uap air mulai dimasukkan



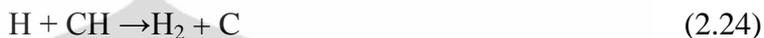
c) Spesies aktif yang terbentuk saat penambahan batu bara



UNIVERSITAS INDONESIA



d) Gas yang terbentuk pada sistem



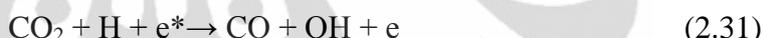
e) Ionisasi CO



f) Konversi tiap spesi



g) Disosiasi gas



Pada reaksi di atas, tanda bintang menunjukkan elektron yang benergi tinggi, m dan n adalah jumlah atom dalam molekul. Pada proses gasifikasi batu bara dengan medium udara dan air, secara umum dapat dibagi menjadi empat langkah. Langkah pertama terdiri dari dua tahap, reaksi 1 sampai 9. 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 7. Beberapa radikal dengan cepat bereaksi atau berkombinasi dengan spesies aktif lain membentuk spesies baru seperti radikal NH dan atom O melalui reaksi 8 dan 9 yang merupakan reaksi rekombinasi. Pada langkah kedua yang terdiri dari reaksi 10 dan 11 ketika dilakukan penambahan batu bara, batu bara 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 12 sampai 17, gas

seperti CO, H₂, dan CO₂ terbentuk dari reaksi kompleks (reaksi paralel atau rantai). Pada langkah keempat yang terdiri dari reaksi 18 sampai 24, radikal CN terbentuk pada reaksi 19 dan 20 melalui konversi atom C. Kemudian spesies CN tersebut terkonversi menjadi atom C dan N₂ pada reaksi 21. Salah satu hal terpenting adalah terkonversinya CO₂ dan H₂ menjadi gas lain seperti CO, radikal OH, radikal H, elektron dan spesies lain yang akan terlibat lagi pada reaksi 7 sampai 18. Hal inilah yang menyebabkan proses gasifikasi dapat terjaga secara terus-menerus.

2.7. Gasifikasi Batubara dalam Plasma Non Termal

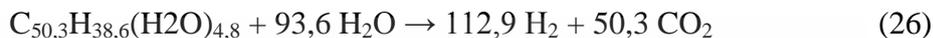
Beberapa penelitian untuk gasifikasi batubara dengan menggunakan plasma non termal sudah pernah dilakukan. Rabovitser (2006) menyebutkan bahwa pernah dilakukan penelitian yang menunjukkan plasma pada tekanan dan suhu rendah menunjukkan peningkatan reaktivitas batubara. Gasifikasi bahan bakar padat mendekati suhu ruangan diobservasi pada frekuensi 2,45 GHz tekanan rendah (600 – 3000 Pa) dengan microwave discharge. Reaktor yang digunakan batch dan continuous pada suhu 100oC. Hasil utama dari produk adalah H₂, CO, CO₂, CH₄, dan C₂H₆. H₂ dan CO merupakan produk yang paling dominan. Penambahan uap air meningkatkan produksi gas sintesis.

Rabovitser melakukan penelitian gasifikasi batu bara dengan reaktor DBD yang dioperasikan pada suhu 300 – 700oC dan tekanan 1 – 70 atm. Spesifikasi batu bara Illinois yang digunakan dapat dilihat pada tabel berikut

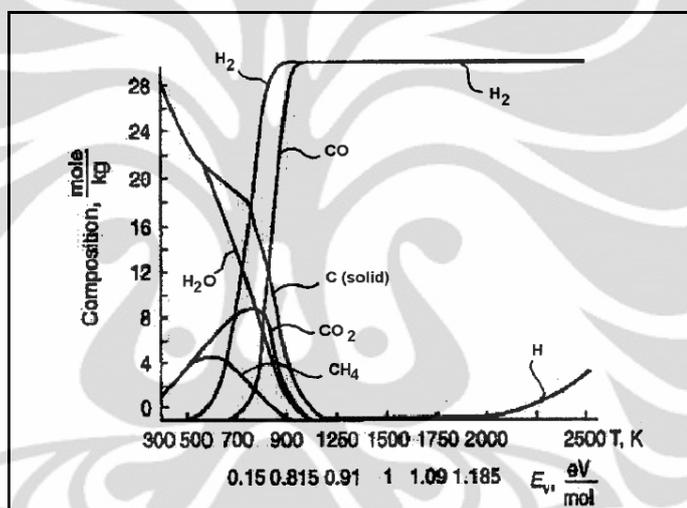
Tabel 2.4. Karakteristik sampel batu bara Illinois (Rabovitser, 2006)

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		
Volatil	0,3686	0,4005	Hidrogen	0,6042	0,6565
Sulfur	0,0045	0,0049	Nitrogen	0,0389	0,0423
Karbon (BD)	0,4047	0,4397	Klorin	0,0107	0,0116
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			

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



Reaksi tersebut bersifat endotermis dengan entalpi 7.673 kJ/kg batu bara. HHV dari hidrogen yang diproduksi dari reaksi di atas adalah sebesar 32.354 kJ/kg batu bara. Komposisi gas yang dihasilkan pada berbagai suhu dapat dilihat pada grafik di bawah ini. Pada suhu 800K diperoleh komposisi tertinggi hidrogen.



Gambar 2.8. Komposisi Gas Sintesis pada Variasi Suhu Reaktor (Rabovitser,2006)

2.8. Gasifikasi Batu Bara dengan Unggun Terfluidakan

Gasifikasi batu bara dengan unggun terfluidakan telah banyak diteliti, bahkan dikomersialisasikan sejak tahun 1960. 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.

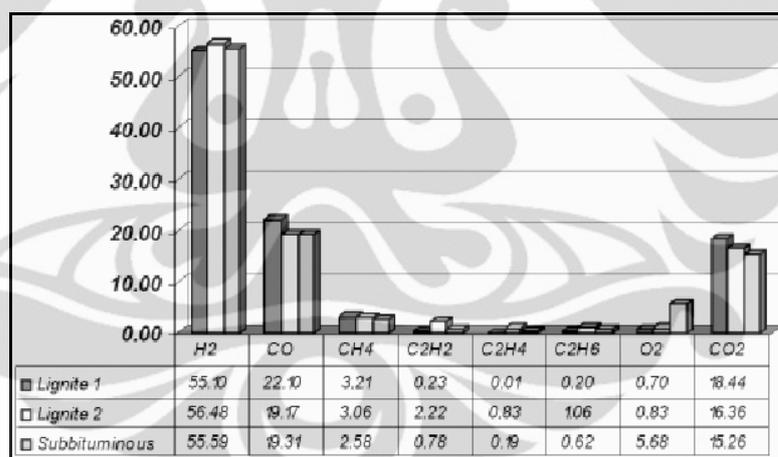
Pada tahun 2006, Suprpto melakukan penelitian pada dua jenis lignit dan satu jenis sub-bitumen dengan ukuran 48 – 65 mesh yang digasifikasi pada unggun terfluidakan dengan berbagai jenis oksidan. Oksidan yang digunakan adalah oksigen, oksigen+uap air, dan uap air. Pemanasan awal dilakukan hingga 900oC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

UNIVERSITAS INDONESIA

Tabel 2.5. Karakteristik sampel batu bara yang digasifikasi oleh Suprpto, 2006

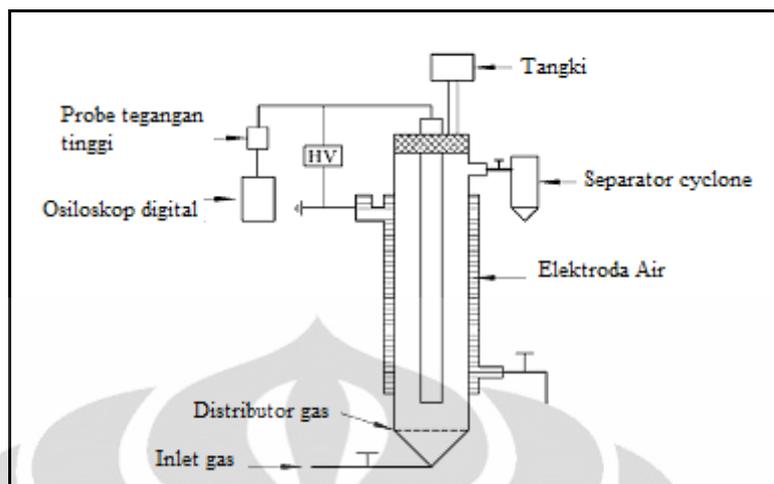
Parameter	Lignit 1	Lignit 2	Sub-bitumen
kelembaban total, % ar	33,75	32,28	na
kelembaban, % adb	15,35	22,07	17,73
abu, % adb	4,42	0,98	0,83
volatil, % adb	40,68	37,80	40,07
karbon tetap, % adb	39,55	31,75	41,37
nilai kalor, kal/g adb	5,431	4,873	5,752
sulfur, % adb	0,14	0,17	0,11
karbon, % adb	57,55	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 2 memberikan komposisi hidrogen yang paling besar.

**Gambar 2.9.** Komposisi produk dari gasifikasi dengan oksidan uap air (Suprpto, 2006)

2.9. Aplikasi Fluidisasi Plasma dalam Unggun Terfluidakan

Penggunaan plasma pada reaktor fluidisasi sudah pernah dilakukan sebelumnya. Pada tahun 2005, Chen et al melakukan penelitian mengenai penggunaan fluidisasi plasma untuk mutasi biji tanaman. Biji tanaman yang digunakan adalah biji *pimento* dan *coxcomb*. Desain alat yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.10.



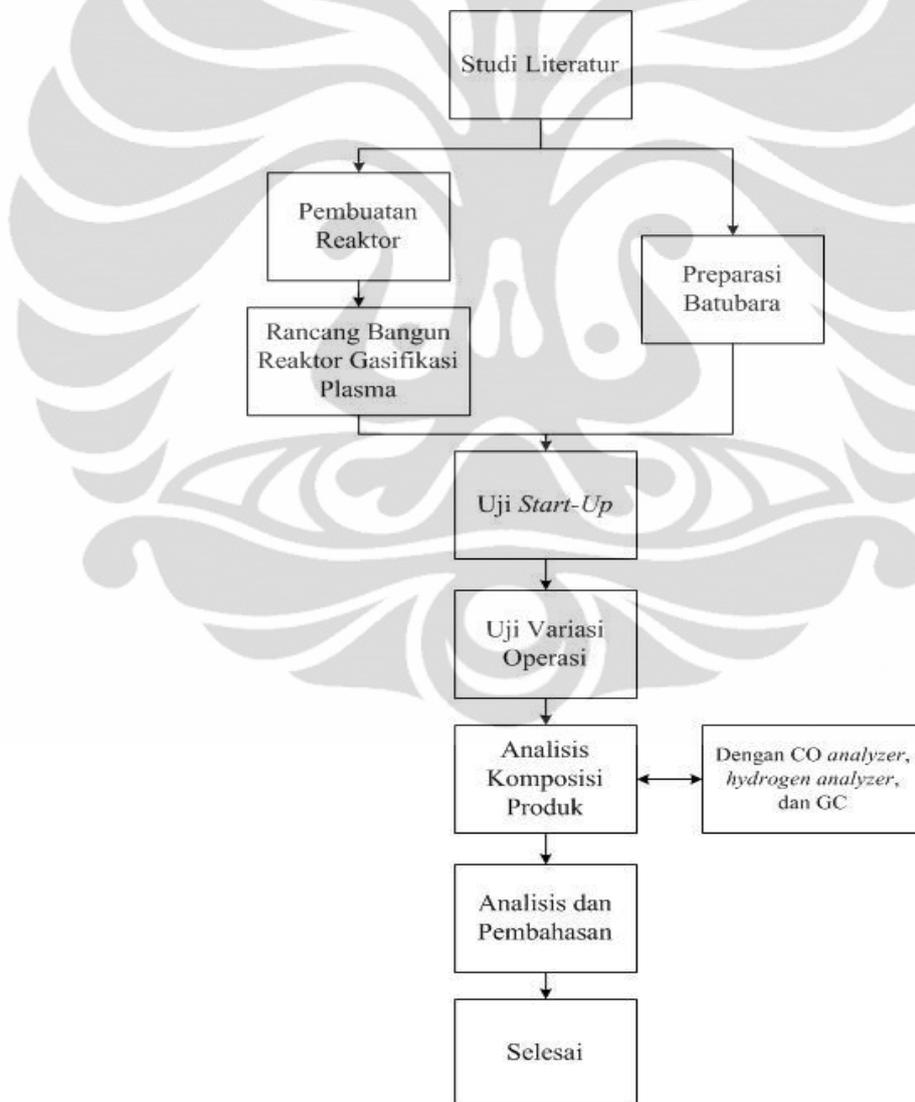
Gambar 2.10. Skema Diagram Reaktor Plasma Fuidisasi (Chen, et al , 2005)

Jenis plasma yang digunakan adalah plasma DBD dengan satu buah elektroda cairan. Hasil dari penelitian ini adalah diketahui adanya mutasi pada biji *coxcomb*, di mana ukuran bungan dan tingginya menjadi hampir dua kali lebih besar. Sedangkan untuk biji *pimento* tidak terdapat perbedaan yang signifikan. Hal ini dikarenakan selubung biji *pimento* lebih tebal.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian yang dilakukan memiliki beberapa tahapan, termasuk tahap awal sebelum dilakukan penelitian, yaitu studi literature. Tahapan penelitian yang akan dilakukan berupa perancangan reaktor, pembuatan reaktor, dan pengujian reaktor yang dihasilkan. Diagram alir penelitian secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian

Sebelum dimulai penelitian, tahap awal yang akan dilakukan adalah studi literatur. Pada tahap ini akan dilakukan studi dan pengumpulan referensi mengenai penelitian-penelitian sebelumnya. Pengumpulan data ini nantinya akan digunakan sebagai referensi mengenai perincian reaktor yang akan dibuat dan kondisi operasi yang akan digunakan.

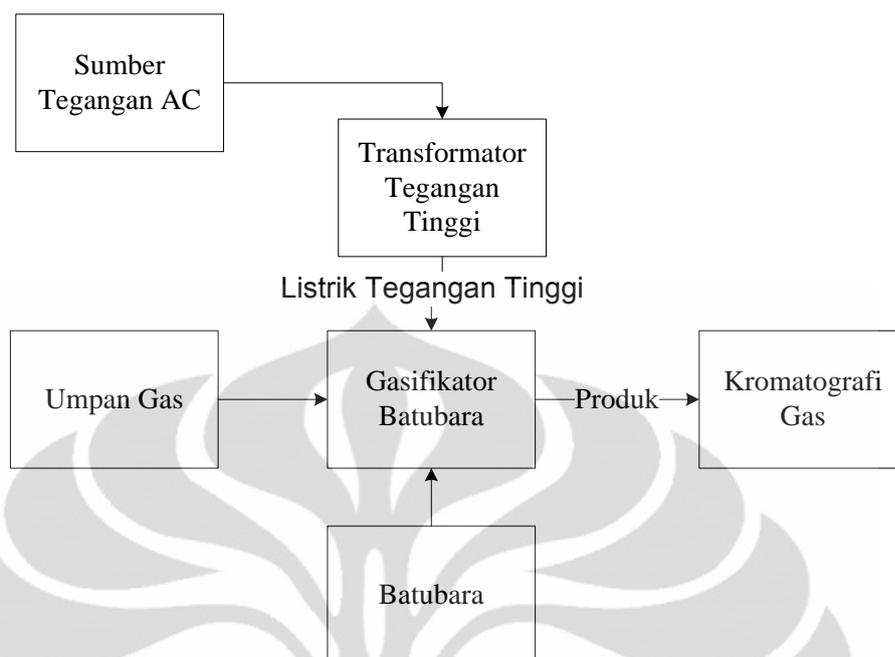
Tahapan selanjutnya adalah perancangan reaktor fluidisasi plasma non-termal. Pada tahap ini dilakukan perincian mengenai reaktor yang akan dibuat, seperti desain dan ukuran yang akan digunakan. Selain itu, juga dilakukan preparasi bahan yang akan digunakan, yaitu penghalusan batubara, serta analisis batubara. Analisis yang akan dilakukan adalah analisis proksimat dan ultimat. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui kandungan apa saja yang ada pada batubara tersebut.

Tahap ketiga adalah pengujian alat yang akan digunakan. Pengujian ini akan berupa uji kebocoran, uji plasma, dan uji fluidisasi. Setelah dilakukan pengujian, maka reaktor dianggap sudah siap untuk digunakan.

Tahap keempat adalah uji variasi operasi pada reaktor yang telah siap digunakan. Pada tahap ini, pengujian dilakukan melihat efek tegangan terhadap produk gas yang dihasilkan. Kemudian gas produk yang dihasilkan akan dianalisis untuk mengetahui kandungan yang ada sertadibuat kesimpulan mengenai hasil penelitian yang telah digunakan.

3.2. Rancang Bangun Alat

Pada penelitian ini akan disusun sebuah reaktor gasifikasi plasma untuk batubara dalam unggun terfluidakan. Jenis plasma yang akan digunakan adalah plasma *Dielectric Barrier Discharge* (DBD). Alat-alat yang akan digunakan terdiri atas satu buah reaktor utama, yaitu reaktor fluidisasi plasma serta alat-alat pendukungnya. Skema rangkaian komponen peralatan yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 3.2



Gambar 3. 2. Skema Alat

Alat utama yang digunakan adalah sebuah reaktor fluidisasi plasma untuk batubara dalam unggun terfluidakan. Pada alat ini akan terjadi fluidisasi batubara dalam medan plasma yang dibangkitkan dari sumber listrik PLN. Reaktor ini akan bekerja dibantu oleh alat-alat pendukung lainnya, seperti :

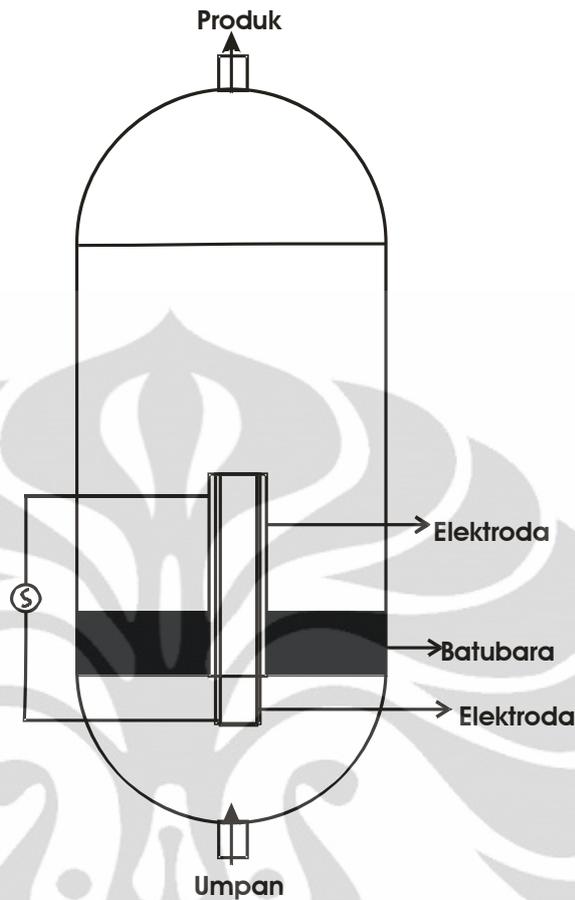
- a. Trafo tegangan tinggi
- b. Regulator tegangan
- c. Pengukur laju alir, arus, dan tegangan
- d. Trap untuk menampung pengotor yang ikut bersama aliran gas produk, termasuk abu batubara
- e. Gas sampler untuk menampung gas produk yang dihasilkan
- f. Kromatografi gas dan *hidrogen analyzer* untuk menganalisis kandungan gas produk

Untuk bahan yang akan digunakan pada penelitian ini adalah batubara yang didapat dari PLTU Suralaya dan gas CO₂ yang berfungsi sebagai gas umpan.

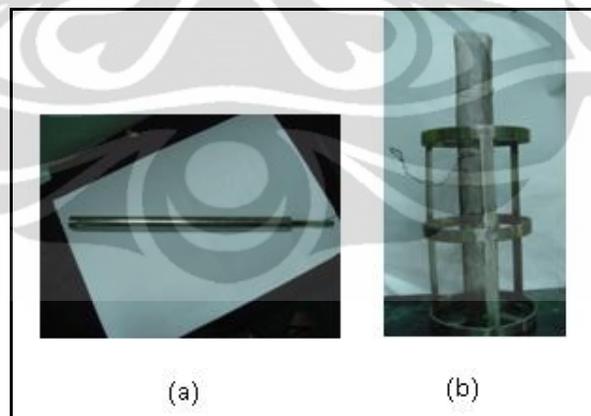
3.2.1. Perancangan Reaktor

Alat utama yang digunakan merupakan reaktor fluidisasi yang memiliki medan plasma di dalamnya. Plasma yang digunakan merupakan jenis plasma non termal DBD. Komponen-komponen yang akan digunakan pada reaktor ini adalah :

- a. Reaktor fluidisasi dengan ukuran OD= 10 cm dengan tinggi keseluruhan= 48 cm (Gambar 3.3). Reaktor yang dirancang terdiri atas 5 bagian , yaitu 2 bagian untuk ruang fluidisasi, 1 penutupan bagian atas, 1 penutup bagian bawah, dan 1 bagian penyangga bagian fluidisasi. Reaktor ini akan dibuat berbahan dasar kaca borosilikat. Bahan ini dipilih karena memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap panas jika dibandingkan dengan *acrylic*.
- b. 1 buah elektroda berbentuk pipa yang terbuat dari bahan stainless steel dengan jenis SS 304 dengan diameter 5/8 in dan tinggi 22 cm. Elektroda ini akan diletakkan pada bagian tengah reaktor .
- c. 1 buah elektroda berbentuk jala yang terbuat dari bahan stainless steel dengan jenis SS 316 dengan diameter 1,75 cm dan tinggi 15 cm beserta dengan kerangkanya. Elektroda ini akan diletakkan mengelilingi elektroda pipa yang berada di tengah.
- d. Saringan berukuran 200 mesh untuk menahan batubara yang digunakan dan diletakkan pada bagian atas reaktor dan bagian bawah reaktor



Gambar 3. 3. Skema Reaktor Plasma

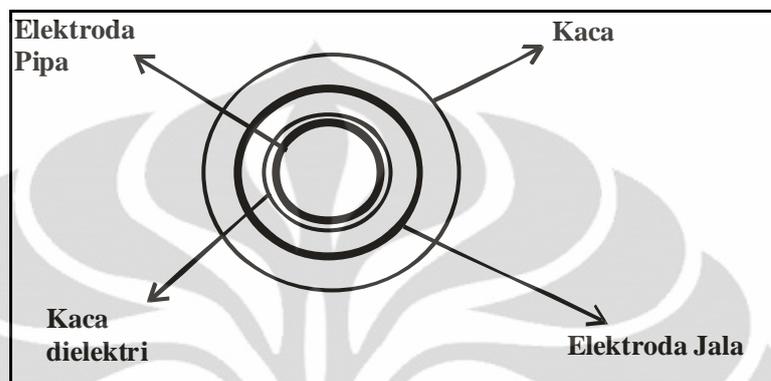


Gambar 3. 4. Gambar Elektroda yang digunakan ; (a) elektroda pipa ; (b) elektroda jala dengan kerangkanya

Untuk elektroda yang digunakan, penyusunan elektroda sesuai dengan Gambar 3.5. Elektroda pipa, akan diletakkan di bagian dalam kaca dielektrik dan elektroda jala akan diletakkan di bagian luar kaca dielektrik mengelilingi elektroda pipa. Daerah antara elektroda jala dengan kaca dielektrik inilah akan

UNIVERSITAS INDONESIA

terbentuk medan plasma akibat adanya loncatan elektron antar elektroda. Elektron ini nantinya akan bertabrakan dengan atom serta molekul yang dimiliki oleh gas umpan dan batubara. Pembentukan medan plasma ini terjadi secara terus menerus selama elektroda masih dialiri listrik. Daerah sekitar medan plasma akan menjadi medan bermuatan tinggi yang juga akan mempengaruhi gas umpan dan batubara.



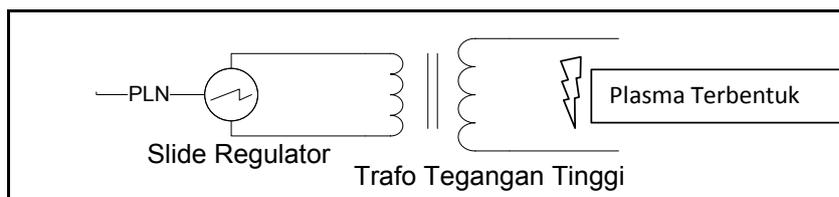
Gambar 3. 5. Penyusunan Elektroda untuk Reaktor

Setelah reaktor kaca dibuat, selanjutnya dilakukan perangkaian reaktor fluidisasi plasma. Langkah-langkah yang akan dilakukan adalah :

- a. Pemasangan filter pada bagian atas dan bawah bagian ruang fluidisasi
- b. Pemasangan elektroda pipa SS 304 pada bagian tengah reaktor.
- c. Pemasangan elektroda jala SS 316 beserta kerangkanya pada bagian luar kaca dielektrik
- d. Penyusunan kelima bagian reaktor dengan menggunakan ring dan dikencangkan
- e. Pemasangan reaktor pada frame akrilik yang sudah dibuat

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

Alat-alat yang dibutuhkan untuk menciptakan plasma ini adalah:

1. Trafo Tegangan Tinggi

Berfungsi 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 50Hz.



Gambar 3. 7. Neon Sign Transformer

2. Regulator Tegangan

Digunakan 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 0,5kVA OKI dengan *output indicator* memiliki rentang antara 0 – 250 V.



Gambar 3. 8. Regulator Tegangan

3. Kabel Tegangan Tinggi

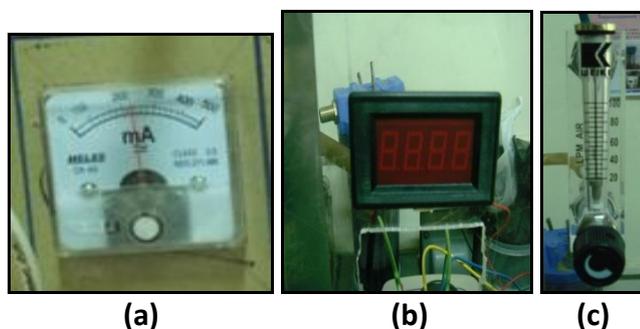
Kabel tegangan tinggi sebagai penghubung keluaran trafo dengan reaktor plasma berjenis kabel *neon sign* yang sanggup menyalurkan tegangan hingga rentang 20 kV dan kabel listrik tegangan normal 220 V untuk menghubungkan listrik antara regulator tegangan dengan NST.

3.2.3. Penggunaan Alat Penunjang Lainnya

Selain alat-alat yang disebutkan sebelum, terdapat juga alat-alat penunjang lainnya, yaitu:

1. Alat ukur

Alat ukur yang akan digunakan terdiri atas 3 jenis, yaitu indikator laju alir, tegangan, dan arus. Untuk indikator laju alir digunakan flowmeter merk WEIKE dengan batas laju alir 20-100 L/menit. Sedangkan unruk alat ukur tegangan digunakan voltmeter digita dan untuk pengukur arus digunakan amperemeter dengan jenis panel bermerek HELES dengan rentang 0 – 1000 mA.



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

2. Trap

Trap digunakan untuk menahan pengotor yang ikut bersamaan dengan aliran gas produk. Hal ini untuk dilakukan agar gas yang akan dianalisis bersih dari berbagai macam pengotor, termasuk abu yang berasal dari batubara.



Gambar 3. 10. Trap

3.3 Preparasi Batubara

Batubara yang akan digunakan pada penelitian ini harus memiliki diameter yang sangat kecil karena untuk dilakukan fluidisasi. Untuk itu diperlukan preparasi batubara sebelum dilakukan uji kerja alat. Ukuran batubara yang digunakan berkisar antara ukuran 120 mesh hingga 200 mesh. Selain itu, juga dilakukan jasa analisis untuk melakukan analisis ultimat dan proksimat pada batubara

Alat dan bahan:

- Pengalus/uleman
- Saringan (120 dan 200 mesh)
- Batubara

Prosedur preparasi sampel batubara adalah sebagai berikut:

1. Menghaluskan batubara dengan uleman sampai berbentuk butiran.
2. Menyaring batubara dengan saringan bertingkat 120 dan 200 mesh.
3. Mengulagi langkah awal hingga jumlah sampel yang dibutuhkan tercukupi.

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1 Uji *Start-up* Alat

Sebelum dilakukan penelitian dengan menggunakan reaktor yang sudah dirangkai, perlu dilakukan uji *start-up* alat terlebih dahulu, yaitu uji kebocoran reaktor. Uji kebocoran reaktor dilakukan dengan cara sederhana yaitu metode air sabun. Prosedurnya yang dilakukan antara lain:

Bahan :

1. Air Sabun

Prosedur :

1. Siapkan air sabun, kemudian alirkan udara ke reaktor
2. Gunakan air sabun pada bagian sambungan, baik sambungan pipa maupun sambungan reaktor.
3. Kemudian tutup sebentar aliran keluar gas. Adanya kebocoran akan ditunjukkan dengan adanya gelembung sabun yang terbentuk. Jika terdapat kebocoran, segera perbaiki sambungan dengan menggunakan lem atau mengganti *silicon seal* hingga reaktor tidak lagi bocor
4. Ulangi hingga sambungan-sambungan yang ada dan alat tidak mengalami kebocoran

Setelah menyusun peralatan sebagai satu sistem, perlu dilakukan uji alat untuk mengetahui kinerja reaktor plasma non-termal. Pengujian dilakukan 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 siap digunakan untuk penelitian.

3.3.2. Variasi Kondisi Operasi Proses

Setelah dilakukan pengujian awal pada reaktor, maka reaktor sudah siap untuk digunakan pada penelitian. Kondisi operasi yang digunakan akan sesuai dengan variable-variabel yang sudah ditentukan sebelumnya. Variabel kontrol yang digunakan adalah sistem yang sama, umpan gas yang sama, yaitu CO₂, dan waktu menyala plasma, yaitu 5 menit. Variabel bebas pada penelitian ini meliputi tegangan listrik yang diatur oleh regulator tegangan. Adapun variabel terikat pada penelitian ini adalah komposisi gas produk. Berikut variabel-variabel bebas proses yang akan divariasikan

3.3.3. Langkah Kerja Pengoperasian Reaktor Plasma

1. Alirkan oksidator masuk ke dalam reaktor disertai pengaturan laju alir pada 20 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 yang digunakan. Catat 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 chromatograph*.
6. Lakukan *flushing* reaktor dengan menggunakan aliran udara ambient yang dapat berasal dari kompresor atau sumber lainnya untuk menghilangkan sisa gas didalam reaktor.
7. Ulangi langkah 2-6, dengan memvariasikan tegangan yang digunakan

3.4 Prosedur Pengambilan Data Percobaan

Data tentang tegangan dan arus listrik diukur dengan menggunakan dua voltmeter dan ampermeter yang tersambung ke rangkaian pembangkitan plasma. Sedangkan untuk data laju alir gas umpan diukur menggunakan flowmeter sebelum masuk reaktor. Data utama yang akan didapatkan dari percobaan ini adalah komposisi produk pada tiap kondisi variabel bebas yang diujikan. Kemudian melakukan pengukuran konsentrasi dari hasil gas keluaran reaktor yang diukur dengan menggunakan GC. Berikut prosedur pengoperasian GC dalam rangka pengambilan data percobaan sampel.

Prosedur mengalirkan gas Argon

- 1)Pastikan tekanan input dan output di regulator berada pada angka 0 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 bersamadengan 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

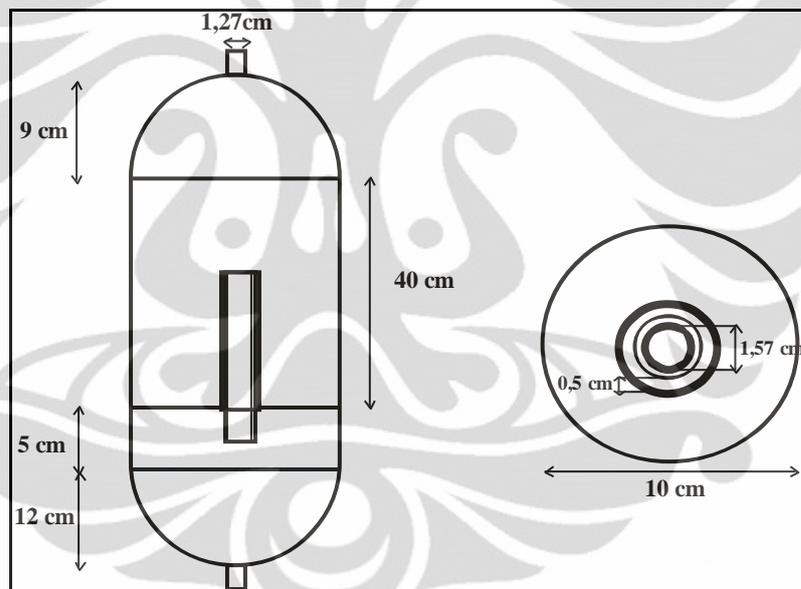
- 1) Mematikan current.
- 2) Menurunkan temperature menjadi 30-30-30 kemudian GC dibuka agar pendinginan terjadi lebih cepat.
- 3) Setelah suhu kolom menjadi 60 (pada indicator) kemudian GC baru dapat dimatikan.
- 4) Matikan aliran *gas carrier* dengan menutup regulator tabung gas tersebut

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan diuraikan mengenai proses perancangan reaktor, pengamatan fenomena fluidisasi dan plasma, serta pembahasan singkat mengenai pengujian awal kinerja reaktor plasma non termal untuk gasifikasi batubara dalam unggun terfluidakan, yaitu analisis pengaruh variasi kondisi operasi terhadap konversi gas yang dihasilkan.

4.1. Perancangan Reaktor

Pembahasan ini akan difokuskan pada perancangan reaktor fluidisasi plasma untuk batubara. Rincian rancangan reaktor dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1. Rincian Desain Reaktor Fluidisasi Plasma

Reaktor yang digunakan merupakan reaktor fluidisasi yang disisipkan plasma di dalamnya. Reaktor yang digunakan merupakan sebuah reaktor fluidisasi berbentuk silinder dengan 2 buah elektroda di dalamnya. Reaktor yang digunakan memiliki diameter luar sebesar 10 cm dengan tinggi ruang fluidisasi adalah 40 cm dengan tinggi total reaktor adalah 66 cm. Reaktor ini terdiri atas 5 bagian, yaitu 2 bagian untuk ruang fluidisasi, 1 bagian penutup atas, 1 bagian penutup bawah, dan 1 bagian penyangga ruang fluidisasi. Penyangga ruang fluidisasi ini berfungsi sebagai penyeimbang ruang fluidisasi agar dapat berdiri. Pada bagian penutup

bawah terdapat keluaran pipa yang berfungsi sebagai jalur masuk umpan gas ke reaktor. Sedangkan pada bagian penutup atas terdapat jalur pipa yang berfungsi sebagai jalur keluar produk gas dari reaktor.

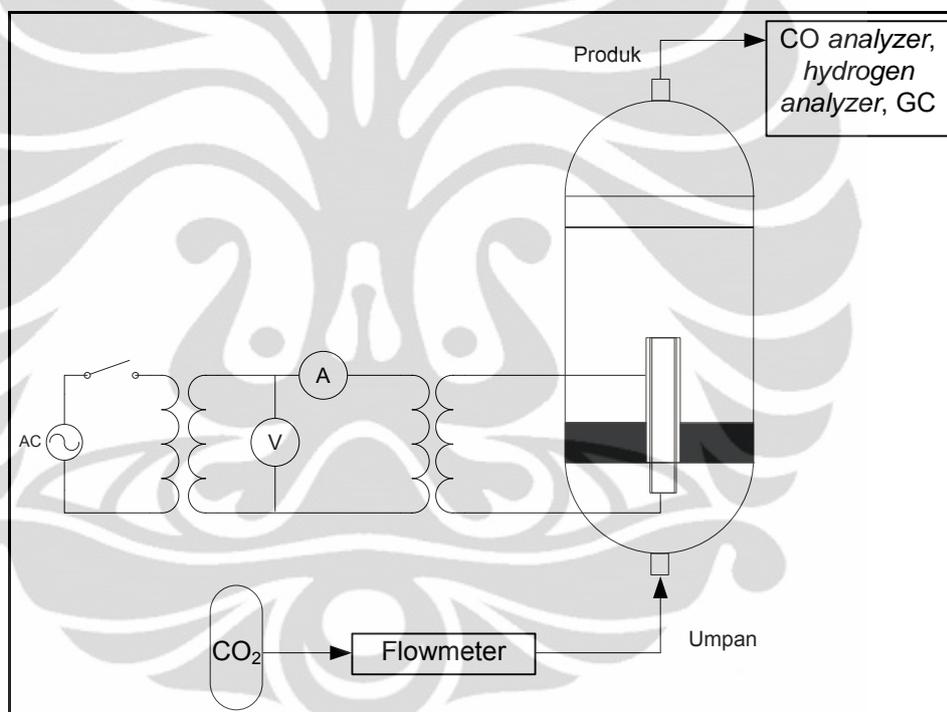
Plasma yang digunakan berjenis DBD, di mana terdapat suatu dielektrik di antara kedua elektroda yang digunakan untuk membangkitkan plasma. Yang berfungsi sebagai dielektrik adalah kaca yang akan menyelubungi pipa elektroda yang berada di tengah.

Reaktor dibuat berbahan dasar kaca dengan tebal 3,8 mm. Digunakan material kaca sebab material kaca lebih tahan terhadap panas dan tegangan tinggi. Selain itu, dengan penggunaan kaca, maka fenomena fluidisasi dan plasma pada reaktor dapat diamati dari luar. Untuk kaca dielektrik, digunakan kaca borosilikat. Digunakan bahan ini karena kaca borosilikat tahan terhadap panas dan tegangan tinggi serta lebih ekonomis. Kaca ini nantinya akan menyelubungi elektroda tegangan tinggi, dan berada di antara kedua elektroda. Sehingga dibutuhkan bahan yang tahan panas sebab reaksi plasma akan terjadi pada bagian bagian luar dielektrik dengan elektroda jala.

Elektroda yang digunakan berbahan dasar stainless steel. Untuk elektroda tegangan tinggi digunakan jenis SS 304, dan elektroda jala digunakan SS 316. Elektroda jala akan diletakkan dengan jarak 3 mm dari kaca dielektrik. Digunakan jenis SS 316 sebab elektroda ini nantinya akan bersentuhan langsung dengan medan plasma, sehingga digunakan material yang lebih baik dibandingkan dengan elektroda pipa yang diselubungi kaca dielektrik. Untuk mengalirkan aliran listrik ke elektroda, digunakan kabel tegangan tinggi untuk menghubungkan antara elektroda dengan trafo tegangan tinggi.

Untuk mencegah adanya batubara yang jatuh dan keluar dari reaktor, maka perlu digunakan filter/distributor. Filter ini akan diletakkan pada bagian atas ruang fluidisasi dan bagian bawah ruang fluidisasi. Ukuran filter yang digunakan adalah 200 mesh. Selain digunakan filter, juga digunakan trap yang berfungsi untuk menahan pengotor yang lolos dari filter yang sudah dipasang. Sebab penggunaan batubara rentan akan adanya abu yang sangat halus, sehingga tetap perlu digunakan trap pada aliran produk.

Reaktor ini didesain agar batubara yang terfluidisasi terkena plasma yang dihasilkan sehingga akan terjadi konversi pada keluaran reaktor. Sehingga untuk anodanya digunakan jala stainless steel berukuran 18 mesh. Ukuran ini dipilih agar batubara yang terfluidisasi dapat masuk ke medan plasma yang terbentuk dan terkena plasma. Saat terkena plasma, batubara yang ada akan mengalami proses konversi batubara menjadi gas yang akan menghasilkan produk gas pada akhirnya. Produk gas yang akan dihasilkan, nantinya akan dipengaruhi oleh gas yang digunakan sebagai umpan dan kandungan batubara yang digunakan sebagai bed di reaktor. Kandungan batubara yang ada juga akan mempengaruhi kondisi operasi yang akan digunakan.



Gambar 4. 2. Skema Alat Penelitian secara Keseluruhan

Alat penelitian dirangkai sesuai dengan skema yang ditunjukkan pada gambar 4.2. Gas umpan akan melewati flowmeter sebelum masuk reaktor untuk diatur laju alirnya. Gas produknya akan dianalisis menggunakan GC, *hydrogen analyzer*, dan *CO analyzer*. Gambar alat penelitian yang digunakan dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4. 3. Alat penelitian yang digunakan

4.2. Analisis Batubara

Jenis batubara yang digunakan pada penelitian ini adalah batubara jenis sub bituminus. Batubara ini didapatkan dari PT Indonesia Power di Suralaya. Spesifikasi batubara yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 4.1. di bawah ini.

Tabel 4. 1. Hasil Analisis Proksimat dan Ultimat Batubara

Parameter	Unit	Hasil
Kelembaban Total	%, ar	27.5
Analisis Proksimat :		
- Kelembaban	%, adb	14.8
- Abu	%, adb	1.9
- Volatile Matter	%, adb	44.8
- Karbon Tetap	%, adb	38.5
Total Sulfur	%, adb	0.18
Analisis Ultimat :		
Karbon (C)	%, adb	62.02
Hidrogen (H)	%, adb	5.47
Nitrogen (N)	%, adb	0.69
Oksigen (O)	%, adb	29.70

UNIVERSITAS INDONESIA

Dari hasil analisis batubara di atas, diketahui bahwa batubara yang digunakan memiliki kandungan air yang cukup tinggi, yaitu kelembaban total sebesar 27,5% dengan kelembabannya sebesar 14,8%. Kandungan abu di batubara ini cukup sedikit, yaitu 1,9%. Sedangkan kandungan volatile pada batubara ini cukup tinggi, yaitu 44,8%. Volatil ini merupakan bahan-bahan yang mudah menguap, biasanya mengandung metana, hidrokarbon, hidrogen, karbon monoksida, dan gas-gas yang tidak mudah terbakar, seperti karbon dioksida dan nitrogen. Bahan volatile ini merupakan indeks kandungan bahan bakar bentuk gas dalam batubara. Dari hasil analisis proksimat juga terlihat bahwa kandungan sulfur yang ada cukup sedikit, yaitu 0,18%.

Dari hasil analisis ultimat, terlihat bahwa kandungan hidrogen pada batubara adalah 5,47 %. Dengan adanya kandungan ini, maka ada kemungkinan produk gas yang dihasilkan berupa gas hidrogen. Selain itu kandungan oksigen pada batubara ini juga cukup tinggi, yaitu sekitar 29,7%. Keberadaan oksigen ini juga perlu diperhatikan, sebab jika terjadi spark pada medan plasma, dan terdapat oksigen, maka kemungkinan untuk adanya api sangat tinggi. Untuk itu, hasil analisis ini juga dapat mempengaruhi kondisi operasi yang akan digunakan pada penelitian. Selain oksigen, kandungan karbon yang ada cukup tinggi. Dengan adanya karbon, oksigen, dan hidrogen, maka dapat dimungkinkan terbentuknya gas CO, CO₂, dan gas hidrokarbon seperti metan pada produk yang dihasilkan. Selain itu, juga ada kemungkinan terbentuknya gas nitrogen karena batubara yang ada memiliki kandungan nitrogen, yaitu 0,69%.

4.3. Pengujian Awal Reaktor

Reaktor yang sudah dirangkai kemudian akan dilakukan uji fluidisasi dan plasma, serta uji kebocoran. Pengujian ini perlu dilakukan sebelum digunakannya reaktor untuk pengambilan data.

4.3.1. Uji Kebocoran Alat

Uji kebocoran ini perlu dilakukan untuk mengantisipasi kebocoran yang dapat terjadi pada reaktor. Cara pengujiaannya sudah dijelaskan pada bab

sebelumnya. Uji kebocoran ini perlu dilakukan agar gas-gas yang dapat menimbulkan bahaya bocor ke lingkungan sehingga dapat menimbulkan bahaya ketika dilakukannya penelitian. Selain itu, gas produk yang dihasilkan seharusnya langsung dibuang ke exhaust fan, agar gas-gas berbahaya seperti CO yang mungkin dihasilkan tidak terkonsentrasi pada satu tempat saja.

4.3.2. Pengujian Fluidisasi

Reaktor yang digunakan merupakan reaktor fluidisasi plasma, sehingga perlu dilakukan pengujian fenomena fluidisasi sebelum dilakukannya gasifikasi batubara dalam medan plasma. Fluidisasi merupakan suatu cara untuk mengkontakkan butiran padat dengan fluida gas ataupun cair. Ketika fluida dialirkan ke bawah unggun partikel padat pada kecepatan rendah, unggun tidak akan bergerak dan akan terjadi perbedaan tekanan sepanjang unggun dan akan meningkat seiring dengan kenaikan laju alir fluida. Unggun akan mulai bergerak dan melayang saat perbedaan tekanan sama dengan berat unggun dibagi luas penampang. Keadaan unggun di mana partikel-partikel padat akan bergerak-gerak dan berperilaku seperti fluida dikenal sebagai unggun terfluidakan.

Pengamatan dilakukan dengan tinggi unggun batubara yang digunakan adalah 3 cm dengan ukuran batubara 120-200 mesh. Dilakukan pengamatan hingga unggun batubara mulai bergerak. Laju alir fluida yang digunakan saat unggun mulai bergerak merupakan laju alir minimum fluidisasi.

Pengukuran laju alir minimum tidak dapat dilakukan menggunakan flowmeter yang ada karena memiliki rentang 20-100 liter/menit. Sehingga untuk mengukur laju alir minimum digunakan metode air sabun. Metode ini dilakukan dengan cara menghitung waktu yang dibutuhkan gelembung sabun untuk mencapai batas volume tertentu. Pengamatan dilakukan sebanyak lima kali dan kemudian didapat rata-rata laju alir minimum fluidisasi, yaitu sebesar 1,96 liter/menit. Hasil pengamatan dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4. 2. Tabel Pengamatan Laju alir Minimum Fluidisasi

Data	Waktu untuk 400 ml (s)
1	11,9
2	12,6
3	12,2
4	12,4
5	12,2
Rata-rata	1,96 L/menit

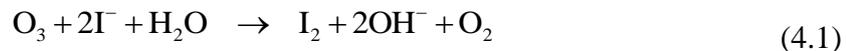
4.3.3. Pengujian Plasma

Setelah dilakukan pengujian fluidisasi, kemudian dilakukan uji plasma pada reaktor yang telah dirangkai. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan reaktor dapat menghasilkan plasma. Selain itu juga menentukan tegangan minimum untuk menghasilkan plasma. Tegangan ini merupakan kondisi di mana energi listrik dapat digunakan untuk mengeksitasi dan mengionisasi gas. Pada kondisi ini akan muncul debit plasma DBD yang ditandai dengan adanya bunyi dengungan dan warna fluoresen pada reaktor.

Pengamatan dilakukan dengan laju alir gas 20 liter/menit dan tinggi unggun 3 cm. Kemudian reaktor dinyalakan dan tegangan dinaikkan secara perlahan. Pada pengujian awal plasma, ditemukan bahwa pada tegangan 80 volt sudah muncul bunga api. Hal ini disebabkan pada bagian atas kaca dielektrik tidak ditutup dengan kaca sedangkan tinggi elektroda pipa sama dengan tinggi kaca dielektrik. Untuk mengatasi hal ini, maka elektroda pipa dipotong sepanjang 2 cm dan bagian atas *barrier* ditutup menggunakan karet silicon. Setelah dilakukan hal ini, bunga api tidak muncul lagi pada tegangan 80 volt.

Setelah tidak muncul spark hingga tegangan 120 volt, akan diuji berapa tegangan minimum yang dibutuhkan untuk plasma. Pengamatan plasma dilakukan dengan melihat efek warna fluoresen dan bunyi dengungan pada reaktor. Tetapi pengamatan ini sulit dilakukan karena tidak muncul warna fluoresen dan bunyi dengungan. Sehingga, untuk penentuan tegangan minimum ini dilakukan berdasarkan keberadaan ozon pada gas keluaran. Oksigen yang melewati medan plasma akan dikonversi menjadi ozon. Pengamatan ozon dilakukan berdasarkan bau dan menggunakan larutan KI 2%. Larutan KI akan menyerap ozon yang dihasilkan pada proses plasma. Ozon yang dihasilkan akan bereaksi dengan I⁻

dan H^+ menghasilkan I_2 . Munculnya I_2 akan ditandai dengan perubahan larutan dari bening menjadi kuning. Reaksi yang terjadi pada larutan KI adalah :



Berdasarkan hasil pengamatan yang dilakukan, diketahui bahwa tegangan minimum yang digunakan untuk memunculkan plasma adalah sekitar 140 volt.

Selain mengukur tegangan minimum yang dibutuhkan juga dilakukan pengamatan mengenai tegangan maksimum yang dapat digunakan. Tegangan maksimum yang dimaksud adalah tegangan di mana mulai adanya bunga api. Dari hasil pengamatan, didapatkan tegangan maksimum yang dapat digunakan adalah 220 volt. Pada tegangan ini sudah mulai muncul bunga api dari bagian ujung atas elektroda yang tidak tertutup oleh kaca. Pengamatan ini perlu dilakukan untuk menghindari timbulnya bunga api. Sebab pada saat penelitian ini digunakan gas oksigen, udara dan CO_2 , meskipun pada pembahasan ini hanya dibahas yang menggunakan gas CO_2 .

4.4. Uji Kinerja Alat

Uji kinerja alat akan dilakukan dengan menggunakan gas CO_2 sebagai gas umpan. Gas CO_2 digunakan sebagai umpan karena CO_2 dapat menghasilkan banyak spesi oksigen aktif dan plasma aktif ketika terkena plasma dan spesi-spesi aktif tersebut dapat digunakan untuk mereaksikan reaktan lain, yaitu batubara pada penelitian ini. Selain itu, dengan menggunakan CO_2 , akan ada kemungkinan terjadinya CO_2 reforming pada reaksinya. Batubara mengandung berbagai macam jenis hidrokarbon dan sangat dimungkinkan adanya metana pada batubara. Dengan demikian, sangat dimungkinkan adanya CO_2 reforming yang menghasilkan gas sintesis. Persamaan reaksinya adalah :



Produk gas yang dihasilkan akan dianalisis menggunakan kromatografi gas dan *hydrogen analyzer*. Pada pengujian ini akan dilihat jenis produk gas yang dihasilkan dan konsentrasinya. Pengujian dilakukan dengan variasi tegangan yang digunakan dengan laju alir gas umpan yang sama.

Data percobaan yang dibutuhkan antara lain :

1. Besarnya tegangan masukan

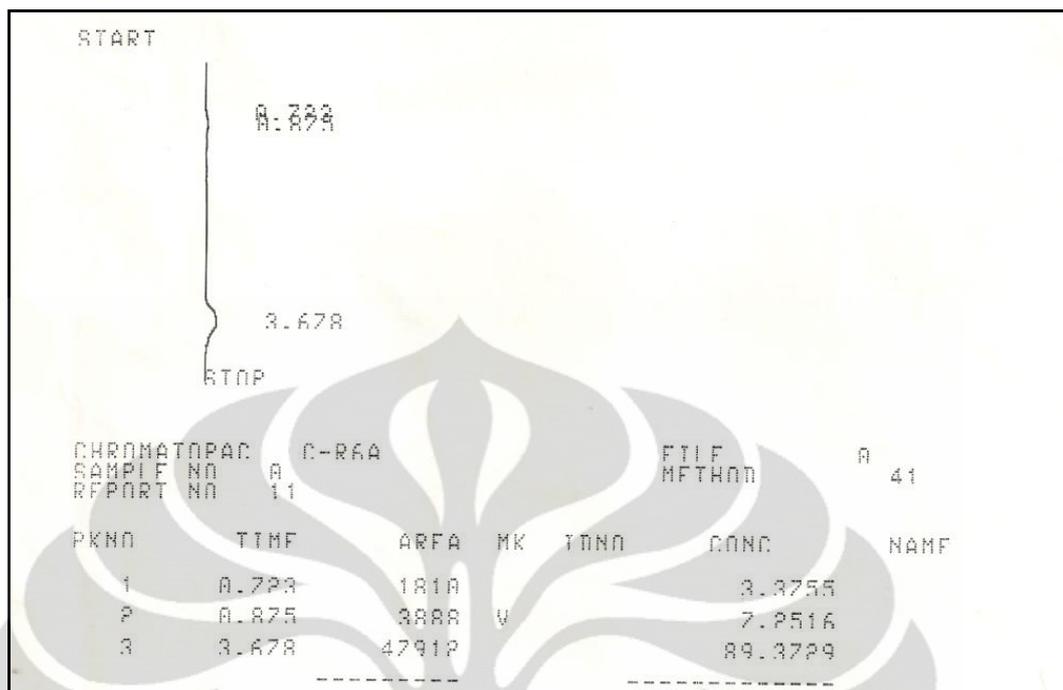
2. Besarnya arus yang mengalir
3. Konsentrasi gas yang dihasilkan

Pengamatan dilakukan dengan laju alir gas 20 liter/menit, dengan ukuran batubara 120-200 mesh dan tinggi unggun 3 cm, serta waktu penyalaan plasma adalah 5 menit.

Sebelum masuk ke dalam reaktor, gas CO_2 akan melalui flowmeter terlebih dahulu untuk pembacaan dan pengaturan laju alir gas umpan. Kemudian gas akan berkontak dengan batubara sehingga akan terfluidisasi dan batubara akan berkontak dengan medan plasma. Gas keluaran reaktor akan melalui *trap* terlebih dahulu untuk menghilangkan abu yang lolos dari filter. Gas yang sudah bersih abu kemudian akan dianalisis menggunakan kromatografi gas atau *hydrogen analyzer*.

Untuk melihat kinerja reaktor gasifikasi plasma ini akan dilihat konsentrasi gas produk yang dihasilkan. Dengan adanya pengaruh batubara pada reaktor, terdapat beberapa jenis gas yang dapat terbentuk pada produk berdasarkan hasil analisis batubara yang sudah dilakukan sebelumnya. Di antaranya adalah gas hidrogen, CO, CO_2 , CH_4 , dan gas nitrogen.

Pengamatan dilakukan dengan variasi tegangan masukan NST, yaitu 170, 190, 200, dan 210 volt. Hasil pembacaan kromatografi gas untuk kondisi operasi pada tegangan 200 volt, arus 0,6 A, dan dengan waktu plasma menyala 5 menit dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 4. Contoh Hasil Pembacaan Kromatografi Gas

Dari Gambar 4.3, didapatkan bahwa pada pembacaan kromatografi gas, didapatkan 3 buah puncak, yaitu pada waktu 0,723 , 0,875 , dan 3,678. Berdasarkan pembacaan ini, didapatkan bahwa terdapat gas hidrogen, yang ditunjukkan ada puncak 0,875, karena gas hidrogen muncul pada waktu 08-0,9. Kemudian juga terbaca, bahwa terdapat gas CO₂ yang terbaca pada puncak pada waktu 3,678 (Gas CO₂ terbaca pada puncak 3,6-3,8). Sedangkan untuk puncak pada waktu 0,723 diabaikan karena tidak diketahui jenis gas yang dihasilkan.

Dari pembacaan di atas, diketahui bahwa produk yang dihasilkan pada 200 volt adalah gas hidrogen dan karbon dioksida. Terdapat kemungkinan terbentuknya karbon dioksida sebagai hasil produk gasifikasi, tetapi pembacaan konsentrasi pada kromatografi gas tidak dapat membedakan antara gas karbon dioksida hasil produk dengan gas karbon dioksida sebagai umpan yang tidak terkonversi. Sehingga pada pembacaan gas karbon dioksida akan diabaikan dan dianggap sebagai gas umpan yang tidak terkonversi.

Pada pembacaan ini, tidak didapatkan gas CO. Sedangkan gas karbon dioksida pada medan plasma menghasilkan gas CO, sesuai dengan persamaan reaksi di bawah ini.



Untuk itu perlu dibuktikan keberadaan CO dengan menggunakan CO analyzer. Hasilnya didapatkan bahwa pada tegangan masukan NST 200 volt (didapatkan gas produk yang mengandung gas CO dengan konsentrasi cukup rendah, yaitu 28 ppm. Hasil konsentrasi CO yang didapatkan ini sangatlah rendah jika dibandingkan dengan gas hidrogen yang dihasilkan. Gas CO merupakan gas yang tidak stabil dan akan mudah kembali membentuk gas CO₂ ketika bertemu dengan oksigen. Sehingga sangat dimungkinkan gas CO yang terbentuk akan kembali membentuk gas CO₂. Akibatnya gas CO yang ada pada aliran produk memiliki konsentrasi yang cukup kecil.

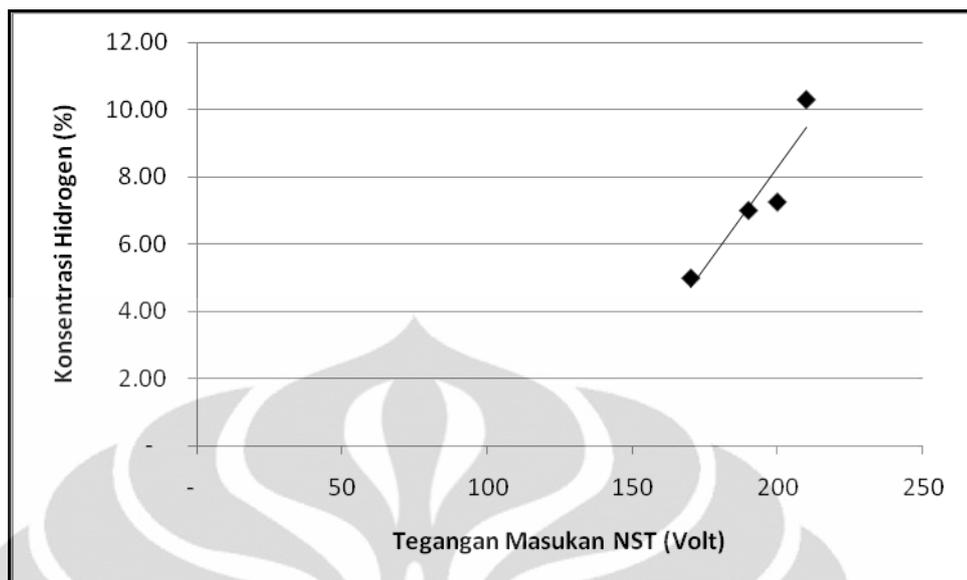
Pengamatan dilakukan pada tegangan yang berbeda. Hasil pengamatan yang didapat, dapat dilihat pada tabel 4.3 di bawah ini.

Tabel 4. 3. Tabel Hasil Pengamatan

Tegangan masukan NST (Volt)	Perkiraan Tegangan Plasma (\pmVolt)	Arus (A)	% Hidrogen	Produktivitas (Liter/Joule)
170	10.625	0,36	5,00	0,00327
190	11.875	0,50	7,00	0,00295
200	12.500	0,60	7,25	0,00242
210	13.125	0,65	10,28	0,00301

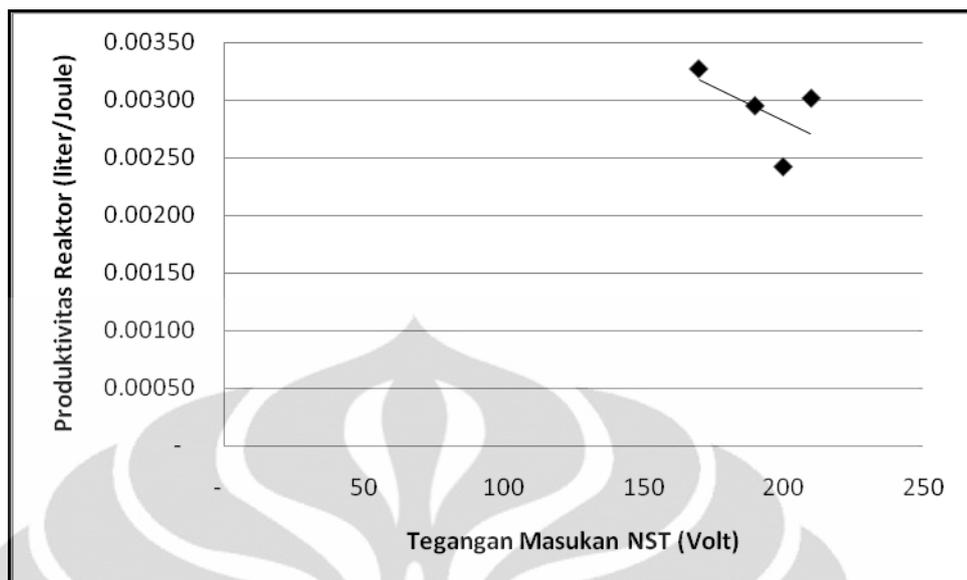
Data yang diamati dan dicatat adalah tegangan masukan NST yang digunakan, arus yang mengalir, dan konsentrasi produk yang dihasilkan. Hal ini dilakukan untuk melihat pengaruh tegangan terhadap konsentrasi gas hidrogen yang dihasilkan. Laju alir produk gas dianggap sama dengan laju alir gas umpan, yaitu 20 liter/menit.

Berdasarkan hasil pengamatan di atas, kemudian dibuat grafik konsentrasi hidrogen terhadap tegangan masukan yang digunakan dan grafik produktivitas terhadap tegangan masukan. Ini untuk melihat pengaruh tegangan masukan yang digunakan terhadap konsentrasi hidrogen yang didapat dan produktivitas reaktor yang dihasilkan.



Gambar 4. 5. Grafik Pengaruh Tegangan Masukan Terhadap Konsentrasi Hidrogen yang dihasilkan

Dari hasil uji kerja diatas, dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya tegangan masukan NST yang digunakan, maka konsentrasi hidrogen yang dihasilkan semakin besar. Pada tegangan masukan NST 170 volt, hidrogen sudah dihasilkan, yaitu sebesar 5 %. Dengan bertambahnya tegangan masukan yang digunakan, terjadi peningkatan konsentrasi hidrogen pada gas yang didapatkan. Didapatkan bahwa konsentrasi CO₂ tertinggi didapat pada tegangan masukan tertinggi, yaitu pada 210 volt dengan konsentrasi hidrogen sebesar 10,28 %. Hal ini terlihat dari grafik di atas bahwa kecenderungan grafik semakin meningkat seiring dengan meningkatnya tegangan masukan NST.



Gambar 4. 6. Grafik Pengaruh Tegangan Masukan Terhadap Produktivitas Reaktor

Dari gambar 4.5, terlihat bahwa dengan adanya kenaikan tegangan masukan NST, maka produktivitas reaktor memiliki kecenderungan semakin menurun. Diketahui bahwa produktivitas tertinggi adalah 0,00327 Liter/Joule dengan tegangan masukan NST 170 volt. Produktivitas terendah adalah 0,00242 Liter/Joule dengan tegangan masukan NST 200 volt. Hal ini disebabkan peningkatan konsentrasi hidrogen lebih rendah dibandingkan dengan kenaikan tegangan masukan NST, sehingga produktivitas reaktor cenderung menurun.

Dari hasil uji gasifikasi plasma, diketahui bahwa reaktor fluidisasi plasma ini dapat menghasilkan gas hidrogen dan CO pada produknya. Adanya gas hidrogen dan karbon monoksida menimbulkan adanya kemungkinan terjadi proses *fischer tropesch*. Proses *fischer tropesch* merupakan proses reaksi kimia di mana campuran karbon monoksida dan hidrogen terkonversi menjadi hidrokarbon cair. Sehingga ada kemungkinan penggunaan reaktor ini untuk gasifikasi batubara dengan CO₂ dapat menghasilkan suatu hidrokarbon cair. Untuk itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk membuktikan hal ini.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

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

1. Pada penelitian ini diperoleh reaktor fluidisasi plasma non-termal berukuran diameter luar reaktor 10 cm dan tinggi reaktor 66 cm dengan tinggi ruang fluidisasi 40 cm.
2. Laju alir minimum u untuk reaktor fluidisasi plasma penelitian ini adalah 1,96 liter/menit.
3. Produk yang dihasilkan pada uji kerja reaktor fluidisasi plasma batubara dengan menggunakan gas CO_2 adalah gas hidrogen dan CO
4. Konsentrasi hidrogen tertinggi yang didapat adalah 10,28%
5. Produktivitas alat tertinggi yang didapat adalah 0,00327 Liter/Joule

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

1. Dalam melakukan penelitian lanjutan, desain reaktor yang digunakan menggunakan diameter yang lebih kecil. Hal ini dilakukan untuk memperkecil ruang kosong yang ada dan memperkecil laju alir gas umpan yang digunakan.
2. Membuat desain dielektrik yang tertutup untuk mencegah terjadinya bunga api
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui adanya proses *fischer tropesch* pada reaktor ini

DAFTAR PUSTAKA

- Ardelyan, N. V., Kosmachevskii, K. V., Bychkov, V. L., Denisiuk, S. V., Esakov, I. I., Khodataev, K. V., et al. (2009). On Application of Non-Equilibrium Plasma to Pulverized Coal Conversion. *5th International Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPEC)* (pp. 44-45). Virginia: Applied Plasma Technologies.
- Chen, G. L., Fan, S. H., Li, C. L., Gu, W. C., Feng, W. R., Zhang, G. L., et al. (2005). A Novel Atmospheric Pressure Plasma Fluidized Bed and Its Application in Mutation of Plant. *Chinese Physics Lett* , 22 (8), 1980-1983.
- Conrads, H., & Schmidt, M. (1999). Plasma Generation and Plasma Sources. *Plasma Sources Science and Technology* .
- He, X., Tengcai, M., Jieshan, Q., Tianjun, S., Zongbin, Z., Ying, Z., et al. (2004). Mechanism of Coal Gasification in a Steam Medium under Arc Plasma Conditions. *Plasma Sources Science and Technology* , 13, 446-453.
- Indarto, A. (2006). Kinetic of CO₂ Reduction by Gliding Arc Plasma. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution* , 4 (1), 191-194.
- Istadi. (2006). Aplikasi Teknologi Hibrid Katalisis-Plasma Dalam Pengembangan. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis* , 2 (2-3), 15-20.
- Kim, Y., Rosocha, L., Anderson, G., & Ziock, H. (2009). Non-thermal Plasma Effects on Coal Gasification. *5th International Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPEC)* (pp. 55-56). Virginia: Applied Plasma Technologies.
- Kogelschatz, U. (2000). *Fundamentals and Applications of Dielectric-Barrier Discharges*.
- Liu, C.-j., Xia, Q., Zhang, Y.-p., Li, Y., Zou, J.-j., Xu, G.-h., et al. (2000). Converting of Carbon Dioxide Into More Valuable Chemicals Using Catalytic Plasmas. *Preprints of Division of Fuel Chemistry of American Chemical Society* , 694-697.
- Nehra, V., Kumar, A., & Dwivedi, H. K. (2008). Atmospheric Non-Thermal Plasma Sources. *International Journal of Engineering* , 2 (1), 53-68.

- Phillips, J. (2006). Different Types of Gasifiers and Their Integration with Gas Turbines. In R. Dennis, *The Gas Turbine Handbook* (pp. 67-76). Morgantown: National Energy Technology Laboratory, U.S. Department of Energy.
- Rabovitser, I. K., Nester, S., & Bryan, B. (2010). *Plasma Assisted Conversion of Carbonaceous Materials Into Synthesis Gas*. United States Patent.
- Rahardjo, B. S. (2007). Gasifier Batubara Unggun Bergerak (Moving-bed) Dilengkapi Pipa Hisap (Draft Tube). *Jurnal Teknologi*, XXI (4), 295-298.
- Slavinskaya, N. A., & Petrea, D. M. (2009). Chemical Kinetic Modeling in Coal Gasification Overview. *5th International Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPEC)* (pp. 37-43). Virginia: Applied Plasma Technologies.
- Suparpto, S. *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.
- Westinghouse Plasma Coal Gasification & Vitrification Technology. (2002). *Power Generation Conference*. Pennsylvania.
- Yamamoto, T., & Okubo, M. (2007). Nonthermal Plasma Technology. In L. K. Wang, Y. T. Hung, & N. K. Shamma, *Handbook of Environmental Engineering, Volume 5: Advanced Physicochemical Treatment Technologies* (pp. 135-293). New Jersey: The Humana Press Inc.

LAMPIRAN

Lampiran 1 : Hasil Analisis Proksimat dan Ultimat Batubara

Certificate No. 11308/DBBPAAE
Date: June 7, 2011


SUCOFINDO
Jl. Arteri Tol Cibitung No. 1, Cibitung Bekasi 17520, Indonesia
Phone/Facs: +62 21 88321176/88321166
Email: jum.cbt@sucofindo.co.id

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
SUCOFINDO
BP


1901203
SCI-2007AC

Lampiran 2 : Perhitungan Produktivitas

Tegangan masukan NST (Volt)	Perkiraan Tegangan Plasma (Volt)	Arus (A)	Daya(watt)	% Hidrogen	Jumlah Hidrogen (Liter)	Produktivitas (Joule/Liter)	Produktivitas (L/joule)
170	10.625	0,36	18.360	5,00	60,00	306,000	0,00327
190	11.875	0,50	28.500	7,00	84,00	339,286	0,00295
200	12.500	0,60	36.000	7,25	87,00	413,793	0,00242
210	13.125	0,65	40.950	10,28	123,36	331,955	0,00301