



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN REAKTOR PLASMA NON-TERMAL
DAN UJI KINERJA REAKSI DEKOMPOSISI LPG
(STUDI KASUS : PERBANDINGAN PENGGUNAAN SUMBER
ARUS LISTRIK AC DAN INVERTER)**

SKRIPSI

**REZA SAPUTRA
0606076740**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN REAKTOR PLASMA NON-TERMAL
DAN UJI KINERJA REAKSI DEKOMPOSISI LPG
(STUDI KASUS : PERBANDINGAN PENGGUNAAN SUMBER
ARUS LISTRIK AC DAN INVERTER)**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**REZA SAPUTRA
0606076740**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Reza Saputra

NPM : 0606076740

Tanda Tangan :

Tanggal : 25 Juni 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Reza Saputra
NPM : 0606076740
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Rancang Bangun Reaktor Plasma Non-Termal dan Uji Kinerja Reaksi Dekomposisi LPG
(Studi Kasus : Perbandingan Penggunaan Sumber Arus Listrik AC dan Inverter)

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 : Ir. Sutrasno Kartoharjono, MSc, PhD

Penguji : Ir. Eva Fathul Karamah, MT



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 5 Juli 2010

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan YME, karena atas berkat dan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik dan tepat waktu. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mendapat gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis sepenuhnya menyadari bahwa, tanpa adanya bantuan, bimbingan dan doa dari berbagai pihak, mulai dari penulis menjadi mahasiswa Universitas Indonesia hingga penyusunan skripsi, sangat sulit bagi penulis untuk dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu penulis mengucapkan 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 kepala Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
- (3) Bapak Dr. Slamet, MT. selaku pembimbing akademis.
- (4) Bapak Ir. Yuliusman, M.Eng. selaku kordinator skripsi Teknik Kimia FTUI.
- (5) Kedua orang tua dan adik-adik yang selalu memberikan semangat, doa, dukungan moral, dan material sehingga skripsi ini dapat selesai.
- (6) Kevin, Iksan dan Fatur teman satu topik yang telah bersama-sama berjuang melakukan penelitian dan menyusun skripsi.
- (7) Seluruh teman sejawat laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses : Sarah, Monic, Linda, Eka, Farhan, Rizki, Bondan, Jainal, Bagus, Bu Menik, Mba Ani dan Mba Novi serta seluruh rekan-rekan riset grup Teknologi Intensifikasi Proses lainnya yang telah banyak memberi semangat dan hiburan terutama pada saat melakukan penelitian.
- (8) Seluruh teman angkatan 2006 yang bersama-sama menyusun skripsi, yang saling memberikan semangat dan berbagai banyak info dalam penyusunan skripsi.

- (9) Mbak Tiwi, Mang Ijal, Kang Jajat, Mas Heri, Mas Eko, dan Mas Opik yang telah banyak membantu penelitian dari awal hingga akhir.
- (10) Teman-teman laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro FTUI atas kesempatan menguji sejumlah komponen elektronik dan banyak masukan terkait komponen elektronik didalam penyusunan skripsi.
- (11) Seluruh teman–teman Teknik Kimia 2007, dan 2008 atas semangatnya dan seluruh bantuan lainnya m8enyelesaikan skripsi ini.
- (12) Berbagai pihak lainnya yang tidak dapat penulis disebutkan secara rinci yang turut membantu dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa makalah skripsi ini masih jauh dari sempurna dengan segala keterbatasan yang ada. Oleh karena itu, semua saran dan kritik yang membangun sangat saya harapkan.

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

Depok, 24 Juni 2010

Penulis

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

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

Nama : Reza Saputra
NPM : 0606076740
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**Rancang Bangun Reaktor Plasma Non-Termal dan Uji Kinerja Reaksi
Dekomposisi LPG
(Studi Kasus : Perbandingan Penggunaan Sumber Arus Listrik AC dan
Inverter)**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 25 Juni 2010

Yang Menyatakan

(Reza Saputra)

ABSTRAK

Nama : Reza Saputra
Program studi : Teknik Kimia
Judul : Rancang Bangun Reaktor Plasma Non-Termal dan Uji Kinerja Reaksi Dekomposisi LPG
(Studi Kasus : Perbandingan Penggunaan Sumber Arus Listrik AC dan Inverter)

Reaktor *Dielectric barrier Discharge* (DBD) merupakan reaktor plasma non-thermal yang sejak tahun 1980 diinvestigasi sebagai metode alternatif yang menjanjikan dalam berbagai penggunaan untuk mensintesis sejumlah reaktan. Pada penelitian ini dilakukan rancang bangun reaktor DBD mengkonversi LPG menjadi hidrokarbon lain dengan jenis pipa koaksial berbentuk *shell and tube*. Reaktor dirancang mudah dan murah dalam pembuatan dan perawatan; dapat beroperasi pada suhu kamar dan tekanan atmosferik; dan dapat menggunakan sumber energi listrik searah (DC) yang dirubah menjadi listrik bolak-balik (AC). Kinerja reaktor hasil rancangan terhadap variabel tegangan dan laju alir berpengaruh terhadap besarnya konversi reaksi yang terjadi, sedangkan variabel diameter *discharge gap* berpengaruh terhadap type reaksi yang terjadi. Pengaruh sumber listrik DC ialah jumlah energi listrik yang diterima oleh reaktor yang lebih besar dibanding sumber listrik arus AC.

Kata Kunci :

LPG, plasma non-thermal, reaktor DBD, dekomposisi hidrokarbon

ABSTRACT

Name : Reza Saputra
Study Program : Chemical Engineering
Title : Design of non-Thermal Plasma Reactor and Performance Test of LPG Decomposition Reaction
(Case Study : Comparing Using Main AC Source and DC Inverter)

Reactor *dielectric barrier discharge* (DBD) is a type of non-thermal plasma reactor that since 1980 has already been investigated as alternative methode that promising for synthesizes some reactans. Therefore in this reserch will be made design of reactor DBD to convert LPG become other hydrocarbon with type of coaxial pipe from sheel and tube. This reactor is designed for the ease of construction and maintenance; able to operate at ambient temperature and atmospheric pressure; and can be generate with DC electric current and then change to AC electric current by Inverter. Reactor performance from current and flow rate variable is influence to the corvertian that happen, meanwhile diameter variable influence to type of reaction that occur. The influence of electric source are from DC electric current will give more energy beside from AC electric source.

Keywords:

LPG, non-thermal plasma, DBD reactor, convection hydrocarbon

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Penulisan	4
2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Karakteristik Umum LPG	6
2.2. Konversi LPG dan Gas C-condensate	7
2.3 Plasma	8
2.3.1 Plasma Secara Umum	8
2.3.2 Klasifikasi Plasma	9
2.3.3 Aplikasi Plasma dalam Penggunaannya	11
2.4 Plasma Non-Termal	12
2.4.1 Spesi-Spesi yang Mencapai Permukaan	12
2.4.2 Persamaan Jumlah Kerapatan	13
2.4.3 Interaksi Heterogen dengan Permukaan	14
2.5 Pembangkitan Plasma Non-Thermal	15
2.5.1 Plasma Arus Searah Tunak (Steady DC Plasma)	15
2.5.2 Plasma Tak-Tunak (AC Discharge / Pulses Corona Discharge)	17
2.5.3 Plasma Frekuensi Radio (Radio Frequency/RF Plasma)	18
2.5.4 Induksi Plasma pada Gelombang Mikro	18
2.6. Reaktor Plasma	18
2.7 Inverter	20
2.8 Proses Dekomposisi LPG dengan Metode Non-Termal Plasma	21
2.8.1 Treatment Awal LPG	22
2.8.2 State of The Art Rancang Bangun Reaktor Plasma DBD	23
3. METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1. Diagram Alir Penelitian	29
3.2 Rancang Bangun Sistem Reaktor Plasma	30
3.2.1 Pembuatan Reaktor Plasma Non-termal DBD	31
3.2.2 Perangkaian Inverter dan Pembangkit Plasma	36

3.2.3 Penggunaan Alat Ukur dan Uji.....	38
3.3 Preparasi Sampel	39
3.4 Prosedur Penelitian.....	40
3.4.1 Uji Start-up Alat dan Keselamatan Kerja.....	40
3.4.2 Variasi Kondisi Operasi Proses	42
3.4.3 Langkah Kerja Pengoperasian Reaktor Plasma.....	42
3.4.4 Prosedur Penggunaan Alat Uji.....	43
3.5 Prosedur Pengambilan Data Percobaan	46
3.6 Data yang Diambil.....	46
4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	47
4.1 Analisis Rancang Bangun Reaktor Plasma.....	47
4.2 Pengujian Kinerja Awal Reaktor.....	50
4.2.1 Analisis Keselamatan Reaktor Plasma DBD.....	50
4.2.2 Analisis Uji Fisik Plasma DBD	51
4.2.3 Konsumsi Daya Reaktor.....	54
4.2.2 Uji Kualitatif Awal Produk Reaktor	55
4.3 Uji Kinerja Reaktor Plasma DBD untuk Konversi LPG	56
4.3.1 Analisis Pengaruh Tegangan Terhadap Konversi.....	61
4.3.2 Analisis Pengaruh Laju Alir Terhadap Konversi.....	62
4.3.3 Analisis Pengaruh Geometri Reaktor Terhadap Konversi.....	63
4.4 Perbandingan Penggunaan Sumber Arus Listrik AC dan Inverter.....	64
5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	67
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran	67
DAFTAR PUSTAKA.....	69
LAMPIRAN.....	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Tingkatan Materi hingga plasma sebagai jenis materi ke-4	8
Gambar 2.2	Karakteristik tegangan dan arus pembangkit plasma tipe <i>discharge</i> DC dengan tekanan menengah	15
Gambar 2.3	Bentuk <i>corona discharge</i> tipe positif dan negatif	16
Gambar 2.4	Berbagai bentuk reaktor plasma nontermal koaksial	17
Gambar 2.5	Reaksi yang terjadi dalam suatu Reaktor Plasma	19
Gambar 2.6	Diagram Alir Kerja Inverter	21
Gambar 2.7	Reaksi thiophenolate dari thiophenol dalam larutan basa	22
Gambar 2.8	Konfigurasi dasar Reaktro Plasma DBD.....	24
Gambar 2.9	Skesa pembentukan micro-discharge.....	25
Gambar 2.10	Prinsip konstruksi modul DBD dengan keterangan: 1,pemisah dielectric; 2,pemisah; 3,plat metal ter-grounded-kan; 4,tabung PFTE; 5,plat elektroda <i>stainless steel</i>	27
Gambar 2.11	Skema Peralatan Eksperimen: 1,2. Tabung Gas (CH_4 and CO_2); 3,4. Pengatur laju alir massa; 5. <i>Gas mixer</i> ; 6. Reaktor DBD; 7. Sumber tenaga pembangkitan plasma; 8. <i>Oscillograph</i> ; 9 Kromatograf gas; 10. <i>Cold trap</i> (Wang, Yan, Jin, & Cheng, 2009).....	28
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	30
Gambar 3.2	Skema Alat Percobaan.....	30
Gambar 3.3	Susunan Rangkaian Reaktor Plasma DBD (a) sisi depan; (b) sisi belakang.....	31
Gambar 3.4	<i>Nipple</i> bagian : (a) keluaran produk; (b) masukan reaktan	33
Gambar 3.5	Skema melintang antara dua elektroda dan bahan dielektrik.	34
Gambar 3.6	Skema pola lubang <i>baffle</i> ; (a) lubang <i>baffle</i> bagian luar; (b) lubang <i>baffle</i> bagian dalam; (c) lubang <i>baffle</i> bagian jembatan.....	35
Gambar 3.7	Hasil pembuatan reaktor <i>dielectric barrier discharge</i>	36
Gambar 3.8	Skema Inverter dengan Trafo Tegangan Tinggi	36
Gambar 3.9	UPS sebagai sumber energi listrik pembangkitan plasma.....	37
Gambar 3.10	Regulator Tegangan	37
Gambar 3.11	<i>Neon Sign Transformer</i>	38
Gambar 3.12	Alat ukur dalam sistem reaktor plasma, (a) ampermeter; (b) voltmeter; (c) flowmeter; <i>power analyzer</i>	38
Gambar 3.13	(a) <i>Gastrap</i> dan (b) <i>CO Analyzer</i>	39
Gambar 3.14	Bubbler KOH, (a) <i>Housing filter</i> sebagai wadah terjadinya <i>bubbler</i> ; (b) skema kerja <i>bubbler</i>	40
Gambar 4.1	Skematis Aliran Dalam Rancangan Reaktor Plasma	49
Gambar 4.2	Pembentukan lucutan pijar api plasma.....	53
Gambar 4.3	Diagram Batang Hubungan Pengaruh Tegangan Primer NST Terhadap Konsentrasi Propana dan Butana Pada Reaktor 12 mm Laju Alir 500 cc/min tiap reaktor uji.....	58
Gambar 4.4	Diagram Batang Hubungan Pengaruh Tegangan Primer NST Terhadap Konsentrasi Propana dan Butana Pada Reaktor 14 mm Laju Alir 500 cc/min tiap reaktor uji.....	59

- Gambar 4.5 Diagram Batang Hubungan Pengaruh Tegangan Primer NST Terhadap Konsentrasi Propana dan Butana Pada Reaktor 12 mm Laju Alir 1500 cc/min tiap reaktor uji..... 60
- Gambar 4.6 Diagram Batang Hubungan Pengaruh Tegangan Primer NST Terhadap Konsentrasi Propana dan Butana Pada Reaktor 14 mm Laju Alir 1500 cc/min tiap reaktor uji..... 60



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Bentuk Umum Plasma.....	9
Tabel 2.2	Tingkatan Parameter Plasma	10
Tabel 2.3	Pembagian Plasma Berdasarkan Suhu.....	11
Tabel 2.4	Energi-energi foton dalam spektrum elektromagnetik.....	12
Tabel 2.5	Proses produksi radikal dan ion dari H ₂ O (g) dalam reaktor plasma non-thermal.....	23
Tabel 4.1	Fenomena yang Teramati Pada Pengoperasian Reaktor Plasma pada Beberapa Tegangan Untuk Kedua Reaktor Hasil Rancang Bangun.....	52
Tabel 4.2	Pengukuran konsumsi daya reaktor sumber listrik inverter	54
Tabel 4.3	Pengujian kualitatif reaktor 1 dengan umpan LPG dan sumber listrik PLN	56
Tabel 4.4	Komposisi Komponen Gas Reaktan (Elpiji) sebelum dikonversi dengan Reaktor DBD menggunakan analisis GC.....	57
Tabel 4.5	Waktu Tinggal Umpan Elpiji pada Laju Alir dan Ukuran Reaktor Berbeda-Beda.....	61
Tabel 4.6	Energi Ionisasi dari Molekul-Molekul Berbeda	62
Tabel 4.7	Waktu Tinggal Umpan Elpiji pada Laju Alir dan Ukuran Reaktor Berbeda-Beda.....	63
Tabel 4.8	Perbandingan daya dan konsumsi energi reaktor.....	64
Tabel 4.9	Perbandingan Hasil Konversi Antar Sumber Listrik	65

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ketersediaan sumber energi dan adanya teknologi yang dapat mengubah sumber energi menjadi bentuk yang bermanfaat bagi masyarakat, merupakan salah satu faktor pemacu pertumbuhan perekonomian dunia. Hal ini telah tercatat dalam sejarah revolusi industri yang dimulai dari penemuan mesin uap yang merupakan salah satu bentuk teknologi konversi energi. Setelah itu penemuan dan pemanfaatan teknologi baru yang dapat meningkatkan produktivitas terus meningkat jumlahnya. Dimana penemuan dan pemanfaatan tersebut berakibat meningkatkan kebutuhan manusia akan energi, terutama bahan bakar seperti minyak bumi yang siap pakai dan langsung dapat digunakan untuk berbagai mesin yang dimiliki saat ini.

Bertolak belakang dengan meningkatnya kebutuhan manusia, minyak bumi diperkirakan akan mulai mengalami penurunan produksi pada tahun 2010 (Scientific America, 2009). Hal tersebut justru menjadi kebalikannya terhadap produksi gas alam maupun produk turunannya seperti gas-gas kondensat yang dijadikan suatu produk LPG. Indonesia sendiri telah melewati masa puncak produksi pada tahun 1995-1996 sebesar 1,3 juta barrel per hari, dan kini produksi minyak bumi hanya dikisaran 900 ribuan barrel per hari. Sehingga Indonesia mengalami defisit bahan bakar minyak (BBM) sebesar 360 ribu barel per hari atau setara dengan 33 persen dari total kebutuhan BBM. (economy.okezone.com, 2009)

Salah satu sumber energi yang dapat dijadikan alternatif untuk pemenuhan kebutuhan bahan bakar tersebut berasal dari LPG. Hal ini didasari kemampuan Indonesia untuk memproduksi LPG dapat ditingkatkan sehingga kelebihan tersebut dapat digunakan untuk dijadikan bahan bakar kendaraan. Hal lainnya yang mendasari pemanfaatan LPG ini ialah harga dari LPG yang jauh lebih murah dibanding bahan bakar yang berasal dari minyak bumi. Sehingga menciptakan peluang untuk dimanfaatkan lebih lanjut.

Hal lainnya yang mendasari pemanfaatan LPG karena merupakan salah satu bentuk dari hidrokarbon yang dalam tekanan atmosfer berbentuk gas, sehingga sangat cocok untuk diteliti pemanfaatan dari teknologi plasma terhadap proses sintesis pada hidrokarbon baik memecah hidrokarbon ataupun perangkaian hidrokarbon. Sehingga menciptakan peluang untuk pengembangan reaktor plasma untuk dimanfaatkan lebih lanjut dalam hal proses sistesis terhadap senyawa hidrokarbon.

Sehingga diharapkan menjadi terbuka pemanfatan lebih lanjut reaktor plasma untuk mengolah senyawaan hidrokarbon, dalam hal ini LPG untuk menjadi bahan bakar cair bagi kendaraan bermotor atau mesin-mesin lainnya yang membutuhkan bahan bakar cair, bahan baku petrokimia, atau industri lainnya yang menggunakan bahan baku yang berbasis hidrokarbon dari *crude oil*.

Selama dekade terakhir ini, teknologi *non-thermal plasma* (NTP) yang merupakan teknologi reaktor non-konvensional telah diusulkan untuk berbagai penggunaan dalam mensintesa sejumlah reaktan. Hal ini terkait dengan cukup tingginya tingkat konversi kimia pada kondisi temperatur rendah bahkan dalam temperatur ruangan (Yamamoto dan Okubo, 2007). Selain itu proses plasma lebih efektif secara biaya, lebih ramah lingkungan karena metode ini tidak menghasilkan limbah buang serta dalam sejumlah penelitian terbukti tidak beresiko bahaya (Zhang, Zhu, Gong, 1999).

Salah satu skema reaktor untuk menciptakan kondisi plasma non-termal ialah jenis reaktor plasma *dielectric barrier discharge* (DBD). Jenis skema reaktor tersebut membangkitkan plasma tanpa menciptakan *spark* (lucutan) plasma diantara dua lektroda akibat terhalang material dielektrik. Skema tersebut memberikan banyak keuntungan diantaranya jenis reaktor DBD membutuhkan konsumsi energi yang rendah untuk memicu terjadinya reaksi kimia dalam gas reaktan pada suhu yang relatif rendah ($T < 100^{\circ}\text{C}$); dapat dioperasikan pada suhu ruangan dan tekanan atmosfer; dari aspek desain, reaktor dimungkinkan untuk *scale-up* sehingga beroperasi dengan gas yang bervolume lebih besar; reaktor DBD menunjukkan densitas elektron dan ekstensi *glow discharge* yang tinggi (Rico, Hueso, & Gonzalez-Elipe 2010)

Sehingga dengan latar belakang tersebut, diusulkan untuk penggunaan salah satu teknologi plasma yang dapat diaplikasikan untuk mensintesa sejumlah komponen hidrokarbon yang berasal dari butane LPG, yakni reaktor plasma jenis *Dielectric Barrier Discharge (DBD)* jenis pipa koaksial *shell* dan *tube* yang terdiri dari elektroda logam di bagian dalam dan luar yang di antaranya terdapat gelas dielektrik dengan bahan borosilikat. Reaktor DBD tersebut dirancang untuk menghasilkan plasma non-termal (plasma dingin) dengan menggunakan elektroda Stenless Stell berbentuk tabung dan jaring, serta memiliki skema aliran gas *W* yang berarti mengalir dua kali didalam ruang kaya muatan plasma diantara elektroda dan 1 kali diruang terpengaruh muatan plasma diluar elektroda. Elektroda akan memberikan umpan lucutan listrik, sehingga umpan akan bereaksi dengan elektron yang berenergi tinggi sehingga reaksi terhadap gas reaktan dapat terjadi untuk selanjutnya menjadi produk hidrokarbon sintesa yang diinginkan.

1.2 Perumusan Masalah

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

1. Bagaimana merancang suatu reaktor Non-thermal plasma (NTP) berbasis Dielectric Barrier Discharge untuk mensintesa LPG menjadi hidrokarbon rantai pendek dan rantai panjang dengan menggunakan sumber listrik DC.
2. Bagaimana kondisi operasi dari proses sintesa LPG menjadi hidrokarbon lain dan mengetahui variabel optimal dalam prosesnya.
3. Bagaimana pengaruh variable operasi seperti laju alir, tegangan listrik dan geometri reaktor terhadap kinerja reaktor plasma DBD dengan uji konversi LPG menjadi hidrokarbon lain.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Merancang suatu skema reaktor NTP *Dielectric Barrier Discharge* dengan tipe pipa koaksial *shell and tube* skala laboratorium menggunakan sumber energi listrik DC untuk mendekomposisi LPG.
2. Menguji kinerja rancangan reaktor plasma DBD untuk konversi LPG dengan sejumlah variabel dan melihat pengaruhnya.

3. Melihat pengaruh penggunaan sumber listrik yang berasal dari sumber listrik searah (DC) yang dirubah menjadi listrik bolak-balik (AC) menggunakan inverter terhadap penggunaan sumber listrik AC secara langsung.

1.4 Batasan Masalah

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

1. Senyawa hidrokarbon yang akan dikonversi adalah gas yang berasal dari tabung LPG yang ada dipasaran.
2. Reaktor plasma sumber listrik DC dari aki dan dirubah menjadi AC dengan inverter.
3. Parameter kinerja reaktor adalah terbentuknya plasma dengan sejumlah parameter pengamatan yang ada.
4. Gas LPG yang terkonversi berdasarkan karakteristik produk gas yang dihasilkan merupakan salah satu pengujian langsung kinerja reaktor.
5. Pengujian kandungan produk gas dilakukan dengan metode analisis kualitatif menggunakan *gas chromatography* (GC).

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang dilakukan dalam penulisan makalah seminar ini adalah :

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi literatur-literatur yang mengandung teori yang berhubungan dengan rancang bangun reaktor NTP Dielectric Barrier Discharge dengan sumber energi listrik DC untuk mensintesa LPG.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisi metode, alat, dan prosedur yang akan digunakan untuk melakukan intensifikasi proses dan kinerja reaktor NTP Dielectric

Barrier Discharge dengan sumber energi listrik DC untuk mensintesa LPG menjadi hidrokarbon rantai pendek dan rantai panjang.

BAB IV PEMBAHASAN PENELITIAN

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

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

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



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam berbagai kegiatan yang manusia pasti membutuhkan sumber energi dan sumber tenaga yang saat ini umumnya disediakan oleh berbagai macam energi primer yang berbasis hidrokarbon. Namun energi tersebut terkadang tidak tersedia dalam jumlah yang mencukupi dan jenis yang dibutuhkan memiliki beragam jenis. Terutama jenis energi hidrokarbon berbentuk cair yang penggunaannya saat ini paling besar sebagai sumber utama bahan bakar kendaraan bermotor. Sehingga dilakukan suatu upaya untuk menjamin ketersediaan bahan bakar tersebut dengan memanfaatkan banyaknya hidrokarbon yang berbasis gas untuk dikonversi menjadi hidrokarbon yang berbasis cair yakni C-rantai panjang (C_{8+}).

2.1 Karakteristik Umum LPG

LPG adalah salah satu produk turunan dari senyawa hidrokarbon yang memiliki komponen utama propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}) lebih kurang 99% dan selebihnya mengandung senyawa hidrokarbon ringan dan berat yang lain dalam jumlah kecil, metana (CH_4), etana (C_2H_6) dan pentana (C_5H_{12}), dalam bentuk tercairkan akibat peningkatan tekanan sehingga merubah fase molekulnya. Komposisi material utama memiliki perbandingan antara propana (C_3H_8) 30% dan butana (C_4H_{10}) 70% volume serta selebihnya ditambahkan oleh sejumlah kecil persentase odoran/pembau yakni senyawaan sulfur yakni mercaptant (sppbe.pertamina.com/files/faq.asp).

Sumber LPG dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yakni : *Natural Gas* (Gas Alam) yakni merupakan campuran senyawa-senyawa hidrokarbon ringan dan sebagian kecil hidrokarbon berat dan *Refinery Gas* (Gas Hasil Kilang) sebagian besar hidrokarbon berat dan sebagian kecil hidrokarbon ringan, serta tidak mengandung senyawa-senyawa impurities. Dalam kondisi atmosferis LPG berupa gas dan dapat dicairkan pada tekanan min 5 kg/cm^2 pada suhu ambient, namun volume dalam bentuk cairnya lebih kecil dari pada dalam bentuk gas, untuk berat yang sama. (Pertamina, 2009).

Dalam penggunaan LPG yang merupakan suatu gas yang mudah terbakar, dibutuhkan pengetahuan mengenai sifat-sifat umumnya untuk mencegah bahaya-bahaya yang mungkin timbul. Berikut sejumlah sifat-sifat umum LPG:

- a) Pada tekanan atmosfer dan temperatur kamar berbentuk gas, dimana gas tersebut lebih berat dari udara. Butana dalam bentuk gas mempunyai berat jenis dua kali berat jenis udara, sedang propana mempunyai berat jenis satu setengah kali berat jenis udara.
- b) LPG menghambur/*defuse* dalam udara secara perlahan, kecuali ada angin.
- c) LPG dalam udara dapat membentuk campuran yang *flammable* (mudah terbakar).
- d) Tekanan LPG dalam kemasannya cukup besar, sehingga kebocoran Elpiji akan membentuk gas secara cepat dan mengubah volume menjadi lebih besar dan bersifat *flammable*.
- e) LPG tidak korosif terhadap *steel*, *copper* dan aluminium serta tidak mempunyai sifat pelumasan terhadap metal.
- f) LPG adalah pelarut yang baik, khususnya terhadap karet.
- g) Dalam bentuk gas maupun cair LPG tidak berbau dan tidak berwarna, sehingga perlu diberi zat pembau (*odour*) untuk mendeteksi bila ada kebocoran dengan menambahkan merkaptan (*Ethyl Merchaptan*) sebagai *odour*.

2.2. Konversi LPG dan Gas C-*condensate*

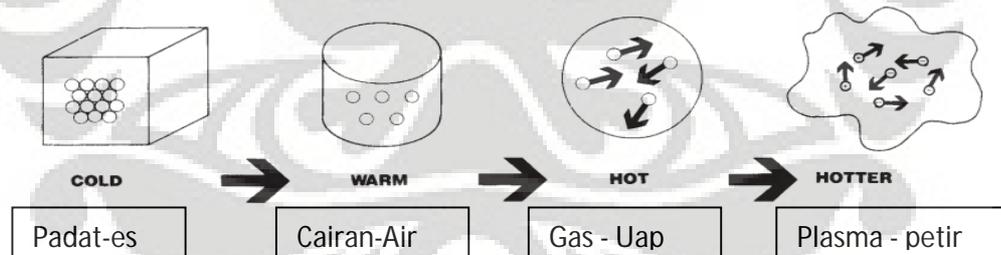
Pemakaian hidrokarbon baik yang berasal langsung dari gas alam maupun turunan dari minyak bumi telah sejak lama digunakan untuk berbagai industri. Namun pemenuhan produk turunan hidrokarbon tertentu khususnya untuk kebutuhan bahan bakar dan bahan baku industri sering terkendala dalam hal jumlah ketersediannya. Sehingga teknologi proses konversi dari bahan dasar hidrokarbon atau jenis stok yang melimpah dari salah jenis produk hidrokarbon menjadi jenis produk lainnya dapat menjadi solusi untuk permasalahan tersebut. Salah satu teknologi tersebut ialah dengan mengkonversi LPG yang sudah cukup banyak beredar dan diproduksi saat ini menjadi senyawa hidrokarbon lainnya seperti methane atau bensin dengan teknologi plasma.

Beberapa bentuk aplikasi teknologi plasma ini telah diusulkan oleh beberapa peneliti di dunia untuk meningkatkan efisiensi perubahan metana dan karbon dioksida. Contoh bahwa perubahan gas metana dan CO_2 menjadi hidrokarbon C_2 walaupun mempunyai kendala dalam hal tingkat konversinya yang sangat rendah (sekitar 5,7%) tapi selektifitasnya sudah cukup baik (sekitar 70-80%) (Ouni, 2009). Hal ini merupakan salah satu contoh aplikasi/manfaat teknologi plasma untuk keperluan reaksi kimia.

2.3 Plasma

2.3.1 Plasma Secara Umum

Plasma secara harfiah adalah sebuah bentuk materi ke empat, yakni merupakan hasil dari gas yang dipanaskan atau diberi serangan elektron sampai pada kondisi dimana sebagian dari gas tersebut terionisasi menjadi elektron yang terpisah dan ion-ion yang bergerak bebas yang merespon secara kuat medan magnetik (yang dapat dilihat pada Gambar 2.1 dibawah ini). 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.



Gambar 2.1. Tingkatan Materi hingga plasma sebagai jenis materi ke-4 (Lawrence Livermore National Laboratory, California, USA.)

Suatu plasma sifat konduktivitas elektrik bervariasi sesuai dengan derajat ionisasinya, dimana derajat atau tingkat ionisasi plasma adalah proporsi dari atom-atom yang kehilangan atau mendapatkan elektron, dan biasanya dikendalikan oleh suhu. Tingkat ionisasi plasma adalah proporsi dari atom-atom yang kehilangan atau mendapatkan elektron, dan biasanya dikendalikan oleh suhu. 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). Dengan penjelasan diatas, maka pada Tabel 2.1 dijabarkan bentuk umum dan contoh masing-masing dari bentuk plasma yang dikenal selama ini.

Tabel 2.1 Bentuk Umum Plasma

Bentuk umum plasma		
Plasma buatan	Plasma terrestrial	Plasma ruang angkasa dan astrofisika
<ul style="list-style-type: none"> • TV plasma • Lampu fluoresensi • Area pelindung panas pesawat ruang angkasa ketika mengorbit ke bumi • Ozonator • Bunga api listrik pada obor las • Bola plasma • Bunga api yang dihasilkan oleh <i>Tesla coil</i> • Plasma yang digunakan pada fabrikasi semikonduktor 	<ul style="list-style-type: none"> • Petir • St. Elmo's fire • Ionosfer • Aurora 	<ul style="list-style-type: none"> • Matahari dan bintang • Angin matahari • Area antar planet • Area antar sistem galaksi • Area antar bintang dalam satu kelompok

Sedangkan pemanfaatan plasma sebagai bagian dari teknologi plasma dengan melibatkan pemutusan elektron terhadap atom reaktan melalui proses ionisasi dengan membuat atom tersebut menjadi partikel neutron, ion positif, ion negatif dan elektron yang merespon medan magnetik secara kuat. Energi pemutusan dapat berupa panas, listrik ataupun cahaya. Sehingga keseluruhan partikel yang terionisasi (bermuatan) tersebut itulah yang membentuk kondisi plasma.

2.3.2 Klasifikasi Plasma

Dalam membuat klasifikasi plasma agar jelas pemisahan jenis-jenis plasma yang ada selama ini digunakan parameter utama, yakni :

a. Derajat Ionisasi

Derajat ionisasi didefinisikan sebagai kepadatan jumlah ion dibagi dengan jumlah partikel netral. Semua partikel netral terionisasi dalam plasma ketika

derajat ionisasi sama dengan satu. Di sisi lain, tidak ada partikel netral yang terionisasi ketika derajat ionisasi sama dengan nol. Sehingga Plasma yang diklasifikasikan berdasarkan perbedaan dalam derajat ionisasi tersebut ialah:

- 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*

Plasma juga diklasifikasikan sesuai keadaannya apakah berada dalam suatu keadaan kesetimbangan (*equilibrium*) atau tidak. Kesetimbangan didefinisikan sebagai keadaan dimana suhu elektron, ion, dan partikel alami adalah sama serta kesetimbangan ionisasi berhasil didapatkan. Sedangkan pada kondisi non-equilibrium plasma temperatur elektron lebih tinggi daripada suhu partikel netral. Berikut contohnya pengklasifikasian ini :

- Plasma Berkesetimbangan (*Equilibrium Plasma*): apabila T_g (suhu gas plasma) sama dengan T_g dan T_i (suhu ion). Sebagai contoh, plasma termal *arc discharge* tekanan atmosferik.
- Plasma tak Berkesetimbangan (*Non-Equilibrium Plasma*): apabila T_g lebih besar dari T_g dan T_i . Sebagai contoh, *glow discharge* plasma pada tekanan rendah dan plasma denyut bertegangan tinggi pada kondisi tekanan atmosferik .

c. Suhu gas Plasma

Plasma juga diklasifikasikan berdasarkan suhu gas plasma (T_g) apakah mencapai setinggi suhu pembakaran ($T_c > 500^\circ \text{C}$) atau tidak. Temperatur plasma pada umumnya diukur dalam kelvin atau elektronvolt, dan merupakan satu ukuran informal dari energi gerak termal setiap partikel. Berikut pada Tabel 2.3 pembagian plasma berdasarkan suhu :

Tabel 2.3 Pembagian Plasma Berdasarkan Suhu

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

2.3.3 Aplikasi Plasma dalam Penggunaannya

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

1) Plasma Termal

Memiliki ciri suhu tinggi, densitas energi tinggi, kesamaan suhu antara partikel berat (atom, molekul, ion) dan electron. Plasma tipe ini memiliki sifat mobilitas yang sangat tinggi menyebabkan energi yang diberikan kepada plasma ditangkap oleh elektron yang dipindahkan ke partikel-partikel berat dengan tumbukan elatis. Karena densitas jumlah electron tinggi, dikaitkan dengan operasi pada tekanan atmosferik, frekuensi tumbukan elatis 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.

2) Plasma Non-termal

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

kimia. Keberadaan spesi-spesi aktif ini memungkinkan dilakukannya reaksi proses pada permukaan material yang tidak dapat dilakukan dengan cara lain.

2.4 Plasma Non-Termal

Plasma non-thermal atau tak berkesetimbangan (*non-equilibrium*) mempunyai karakteristik antara lain densitas energi lebih rendah, terdapat perbedaan suhu besar antara elektron dan partikel yang lebih berat. Plasma jenis ini menghasilkan spesi-spesi aktif yang lebih beragam, dan lebih besar energinya dibandingkan dengan spesi yang biasa dihasilkan pada reaktor kimia.

2.4.1 Spesi-Spesi yang Mencapai Permukaan

Terdapat dua cara suatu spesi mencapai permukaan padatan yang terpapar plasma: gas kerja atau gas umpan yang dapat dipantulkan, di-*adsorp*, di-*absorp*, atau bereaksi secara kimiawi dengan permukaan; dan spesi aktif, yang dihasilkan secara langsung atau tidak langsung dari tumbukan elektron-netral dan rangkaian reaksi kimia dalam plasma. Spesi aktif yang dihasilkan plasma dihasilkan dalam jumlah yang lebih besar dan mencapai konsentrasi yang lebih tinggi daripada spesi yang sama yang dihasilkan dalam reaktor kimia konvensional. Terdiri dari foton, spesi netral, dan partikel bermuatan.

a) Foton

Foton dihasilkan dari *discharge* pijar plasma (*arc/torch*) dalam spektrum panjang gelombang yang luas pada spektrum elektromagnetik seperti disajikan dalam Tabel 2.4 dimana semakin tinggi suatu energi foton membuatnya dapat mengionisasi dan mengeksitasi atom-atom, menggantung molekul-molekul hidrokarbon panjang, dan memutus ikatan-ikatan molekular membentuk potongan-potongan molekular yang lebih kecil. Namun karena tidak bermuatan, foton tidak terpengaruh oleh medan listrik atau magnet yang dapat hadir dalam selubung, dan mencapai permukaan dengan energi aslinya.

Tabel 2.4 Energi-energi foton dalam spektrum elektromagnetik

Daerah Spektral	Kisaran panjang gelombang (nm)	Kisaran energi (eV)
Infra merah	$730 \leq \lambda \leq 10^6$	$0,00124 \leq E' \leq 1,70$
Tampak	$380 \leq \lambda \leq 730$	$1,59 \leq E' \leq 3,26$
Ultraviolet	$13 \leq \lambda \leq 397$	$3,12 \leq E' \leq 95,3$

b) Spesi Netral Aktif

Melalui tumbukan elektron netral dan reaksi kimia dalam plasma, plasma dapat menghasilkan beberapa jenis spesi-spesi netral aktif yang mempunyai energi yang mampu berinteraksi dengan permukaan. Diantaranya adalah spesi atom-atom reaktif secara kimiawi seperti H, O, F, Cl, dan lainnya serta radikal bebas yakni potongan molekular yang dihasilkan dalam plasma dengan sekurang-kurangnya satu elektron yang tidak berpasangan. Semua spesi aktif ini dapat berinteraksi dengan kuat dengan permukaan.

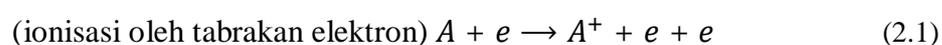
c) Partikel-partikel bermuatan

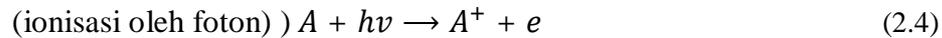
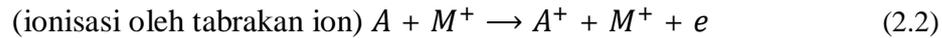
Plasma yang diionisasi secara parsial oleh ionisasi tumbukan elektron netral akan menghasilkan partikel-partikel bermuatan yang dapat dipercepat pada permukaan lingkungan oleh selubung medan listrik. Ion-ion positif cenderung untuk membentur permukaan lingkungan dengan energi yang lebih tinggi daripada elektron atau ion-ion negatif. Partikel-partikel bermuatan yang dihasilkan dari plasma diantaranya elektron yang dihasilkan dalam plasma oleh ionisasi tumbukan elektron netral. Ion-ion dapat positif atau negatif, dengan ion positif dihasilkan oleh ionisasi dan pertukaran muatan sedangkan ion negatif dihasilkan dalam jumlah yang signifikan pada plasma tekanan atmosferik dengan perlekatan elektron.

2.4.2 Persamaan Jumlah Kerapatan

Ketika gas menjadi plasma, fenomena ionisasi di mana elektron keluar dari partikel netral terjadi. Ionisasi mengikuti hukum aksi massa seperti reaksi kimia. Energi dari reaksi ionisasi, yang dinyatakan dalam *elektronvolt* (eV) atau dalam istilah sederhana disebut potensial ionisasi. Gas-gas paling umum seperti udara, N₂, O₂, CO, CO₂, atau gas mulia seperti Ar, He, dan Xe, memiliki potensi ionisasi relatif tinggi dan dengan demikian mereka tidak mengalami ionisasi termal sampai suhu lebih dari 4000 K.

Ionisasi sering disebabkan oleh benturan partikel kecepatan tinggi dan partikel netral. Proses ini disebut reaksi ionisasi. Terdapat sejumlah reaksi ionisasi utama yakni sebagai berikut:





2.4.3 Interaksi Heterogen dengan Permukaan

Interaksi heterogen dengan permukaan meliputi reaksi kimia atau interaksi spesi-spesi aktif, gas kerja, partikel-partikel individual, partikel bermuatan, atau radiasi elektromagnetik dengan permukaan. Interaksi ini dapat meliputi reaksi kimia heterogen antara dua atau lebih dari empat fasa materi: padatan, liquid, gas dan plasma.

Interaksi-interaksi heterogen penting dalam industri biasanya melibatkan tiga keadaan materi, dimana gas-gas netral dan plasma bereaksi dengan permukaan padat. Interaksi heterogen dengan permukaan terlibat dalam proses-proses industri berikut:

1. *Pembersihan atau aktivasi plasma* dari suatu permukaan, dimana pemaparan pada spesi aktif plasma menghasilkan kenaikan energi permukaan, penysisihan kontaminan, atau perubahan struktur kimia molekul permukaan.
2. *Perlakuan difusi termal plasma*, seperti pada ion *nitriding*, *boronizing*, dan lain-lain. Pada proses ini, plasma mengirim ion-ion ke permukaan panas negatif. Ion-ion tersebut dipindahkan dengan difusi termal ke dalam material untuk membentuk lapisan permukaan yang relatif tebal, yang ketebalannya dapat mencapai satu milimeter atau lebih.
3. *Implantasi sinar ion (ion beam)*, dimana ion-ion berenergi satu arah, sinar monoenergetik menembus bagian bawah material dan tertanam dalam lapisan sub-permukaan.
4. *Implantasi ion plasma*, dimana ion-ion berenergi dihasilkan oleh percepatan sepanjang selubung plasma yang melingkupi bidang kerja dan tertanam di bawah permukaan.

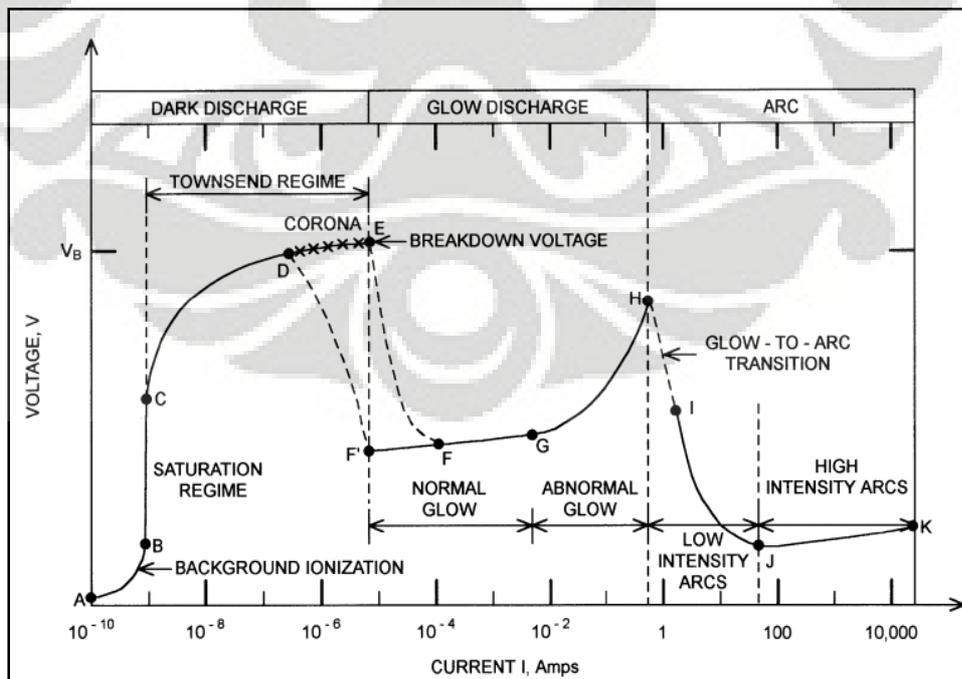
5. *Deposisi percikan (sputter) pada film tipis*, dimana atom-atom percikan ion berenergi dari suatu target, di-redeposit sebagai film tipis.
6. *Plasma Chemical Vapor Deposition (PCVD)*, dimana spesi aktif dari plasma dan gas kerja netral bereaksi membentuk film tipis.
7. *Plasma etching*, dimana ion-ion atau spesi-spesi aktif dari plasma bertindak sebagai promotor reaksi kimia antara gas kerja netral dan substrat.

2.5 Pembangkitan Plasma Non-Thermal

Dalam rangka untuk menghasilkan plasma, elektron harus dihilangkan dari partikel gas netral. Energi yang dibutuhkan untuk *discharge* listrik umumnya digunakan untuk mengionisasi gas. Terdapat sejumlah metode dalam proses pembangkitan plasma, berikut penjelasannya masing-masing :

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

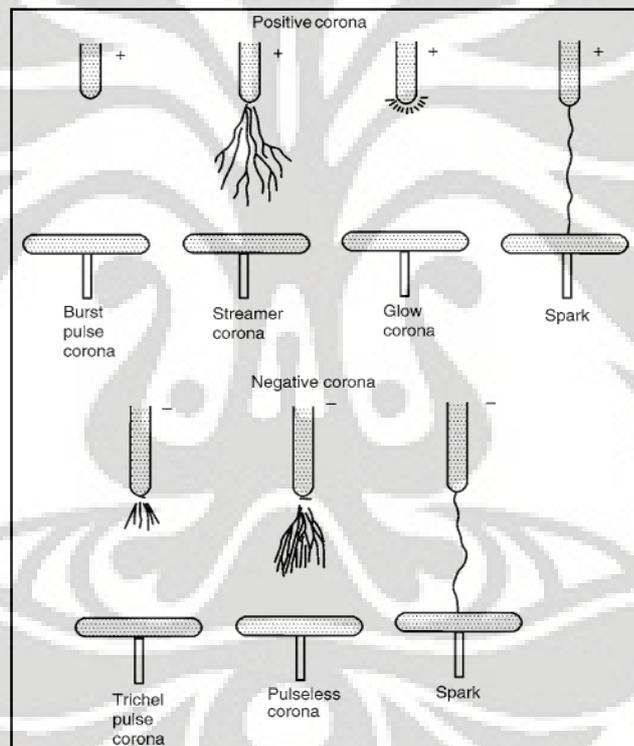
Lucutan arus searah (DC) diinduksi dengan memberikan tegangan DC diantara elektroda dan melakukan ionisasi gas dengan memutuskan isolasi gas. Lucutan listrik DC terutama diklasifikasikan berdasarkan daerah pemutusan elektrik, seperti pada Gambar 2.2 dibawah.



Gambar 2.2 Karakteristik tegangan dan arus pembangkit plasma tipe *discharge* DC dengan tekanan menengah. (Roth, Industrial Plasma Engineering, 2001)

a) *Corona DC Discharge*

Corona Discharge terdiri dari daya listrik yang relatif rendah yang terjadi pada kondisi tekanan atmosfer dengan plasma dihasilkan oleh medan listrik yang kuat serta bentuk elektroda kabel berdiameter kecil, jarum, atau elektroda berbentuk tajam/runcing. Proses terjadi pada kondisi tegangan tinggi dan arus listrik yang digunakan biasanya dalam kisaran 1-100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Korona muncul dalam bentuk serabut samar redup yang memancarkan cahaya yang keluar dari ujung elektroda dan wilayah plasma untuk korona terbatas hanya disekitar elektroda. Terdapat dua jenis utama *corona discharge* yakni *corona* positif dan *corona* negatif yang dipengaruhi oleh polaritas dari medan dan konfigurasi dari susunan geometri elektroda seperti pada Gambar 2.3 dibawah.



Gambar 2.3 Bentuk *corona discharge* tipe positif dan negatif (Yamamoto et al., 2004)

b) *DC Glow Discharge*

Proses pembangkitan plasma menggunakan dua pelat sejajar dipasang dalam sebuah wadah yang bertekanan dalam kisaran 10-100 Pa, tegangan yang diberikan 100-1000 V dengan arus dalam satuan mA/cm^2 antara pelat, sehingga muncul lecutan plasma, dimana fenomena tersebut disebut *DC glow discharge*. Plasma jenis ini dibangkitkan oleh lecutan yang disebabkan oleh tabrakan elektron sekunder kepada media, yang dipicu oleh foton ion atau dampak pada katoda.

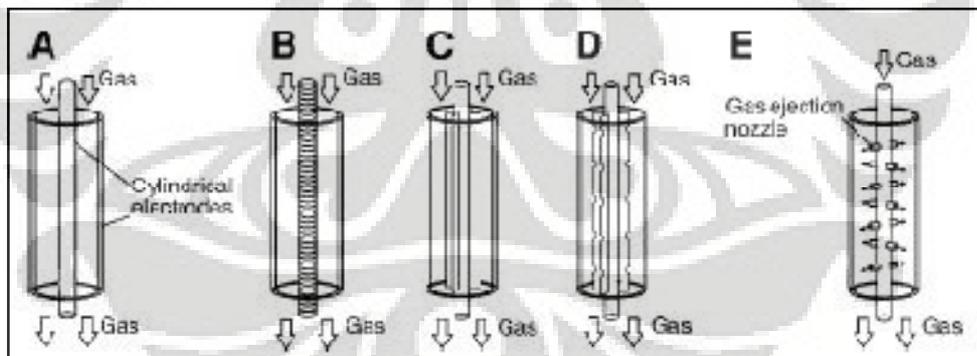
Plasma yang terjadi berjenis nonthermal plasma, dengan suhu elektron tinggi, dan ion-ion dan partikel netral bersuhu rendah.

c) *DC Arc Discharge*

Arc discharge ditandai oleh tegangan rendah dan arus yang sangat tinggi dalam kisaran 10 hingga 1000 A. Lecutan ditopang oleh termal elektron yang dipancarkan dari katoda. Perangkat ini digunakan untuk pembangkitan plasma termal gas dan ion di mana suhu berada dalam kondisi kesetimbangan atau plasma thermal. Thermal plasma jet dapat diperoleh ketika anoda untuk melepaskan bunga api listrik dirancang dalam bentuk jenis nosel. Ada banyak metode untuk meningkatkan suhu gas bahkan untuk tingkat yang lebih tinggi salah satunya memanfaatkan medan magnet untuk meningkatkan kerapatan plasma.

2.5.2 Plasma Tak-Tunak (AC Discharge / Pulses Corona Discharge)

Metode lain pembangkitan plasma yaitu *intermiten discharge* dan *AC discharge*. *AC discharge* frekuensi rendah berperilaku seperti *DC discharge*. Berbagai reaktor plasma telah diteliti oleh banyak peneliti dengan berbagai bentuk dari fisik reaktor dan serta konfigurasi dari lucutan listriknya, dan sebagian ditunjukkan dalam gambar berikut:



Gambar 2.4 Berbagai bentuk reaktor plasma nonthermal koaksial (Yamamoto et al., 2004)

Gambar diatas menunjukkan beberapa jenis-jenis reaktor plasma koaksial dengan menggunakan sumber Listrik AC tegangan tinggi atau penggunaan metode denyut (*pulse*) diterapkan pada ruangan antara bagian luar dan dalam elektroda di mana plasma dihasilkan dibagian tersebut dan proses dekomposisi plasmanya terjadi pada daerah tersebut.

- ✓ Gambar A adalah reaktor plasma tipe koaksial yang paling standar.

- ✓ Gambar B menunjukkan sebuah reaktor bentuk-baut (*bolt type*). Plasma yang dihasilkan dari ujung-ujung tajam dari elektroda.
- ✓ Gambar C dan D menunjukkan *vane-type* dan *scallop-type center electrodes*, di mana menghasilkan plasma dari ujung-ujung tajam elektroda ini.
- ✓ Gambar E menunjukkan *corona-shower-type* di mana gas yang digunakan disuntikkan keluar dari pusat elektroda nozzle.

2.5.3 Plasma Frekuensi Radio (*Radio Frequency/RF Plasma*)

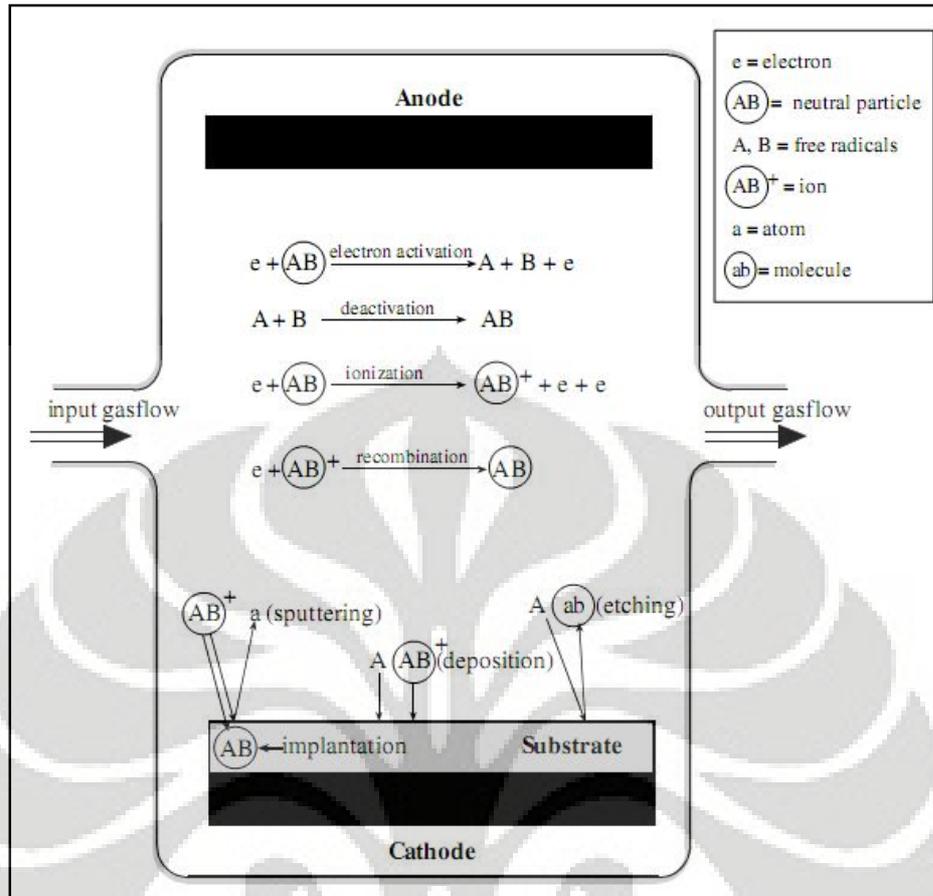
Plasma frekuensi tinggi atau *radio frequency discharge* (RF) ialah kondisi terjebaknya ion dan elektron ruang interelectrode akibat pengaruh frekuensi dalam rentang MHz yang menyebabkan perubahan arah gerakan ion dan elektron tersebut. Elektroda yang dihasilkan oleh plasma RF tidak kontak dengan gas terkontaminasi sehingga hanya plasma bersih yang dapat diperoleh. RF plasma dapat dihasilkan dengan baik *inductively couple plasma* atau *capacitive coupled plasma*.

2.5.4 Induksi Plasma pada Gelombang Mikro

Proses pembangkitan plasma yang diinduksi didalam ruang oleh radiasi dari microwave dengan frekuensi dari *microwave* adalah 2,45 GHz. Ketika medan magnet transversal diterapkan pada medan listrik, elektron berotasi disekitar garis-garis medan magnet. Frekuensi rotasi (frekuensi siklotron) tersebut disesuaikan dengan yang diterapkan pada medan listrik, dimana rotasi elektron dipercepat karena resonansi.

2.6. Reaktor Plasma

Reaktor plasma ialah tempat terjadinya reaksi kimia antara gas yang menjadi reaktan dan plasma yang terbentuk didalam reaktor, sehingga komponen utamanya ialah sepasang elektroda untuk menciptakan pemutusan elektrik. Ketika terjadi pemutusan elektrik tersebut, elektron didalam plasma akan menjadi bergerak sangat cepat dan bertabrakan antara elektron dan atom. Hasil tabrakan menghasilkan kondisi terionisasi yang membentuk ion dan radikal bebas. Yang akan ditunjukkan melalui ilustrasi pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Reaksi yang terjadi dalam suatu reaktor plasma (The Fourth State of Matter, Eliezer)

Hal utama dalam membangkitkan fluks elektron dan ion didalam reaktor plasma ialah dengan mengatur pembangkitannya. Dissosiasi molekular akan membangkitkan radikal bebas yang dapat saling berkombinasi untuk membentuk material lainnya atau kembali ke bentuk aslinya. Jika suatu produk pada reaksi permukaan mudah terevaporasi maka akan meninggalkan permukaan dan jika sebaliknya deposisi akan terjadi dan lapisan film akan bertambah, sedangkan untuk produk yang tetap berada pada permukaan atau dibawah permukaannya, hasilnya berupa implantasi.

Faktor rancang bangun akan menghasilkan kondisi proses saling berbeda yakni dengan melakukan variasi pada parameter operasi (variasi external) diantaranya laju alir gas, komposisi gas, tekanan didalam reaktor, kekuatan listrik dan frekuensi, magnet dan arah medan magnet external (terkadang digunakan untuk memastikan dan mengarahkan partikel yang bermuatan didalam plasma), temperatur masukan, dan geometry reaktor.

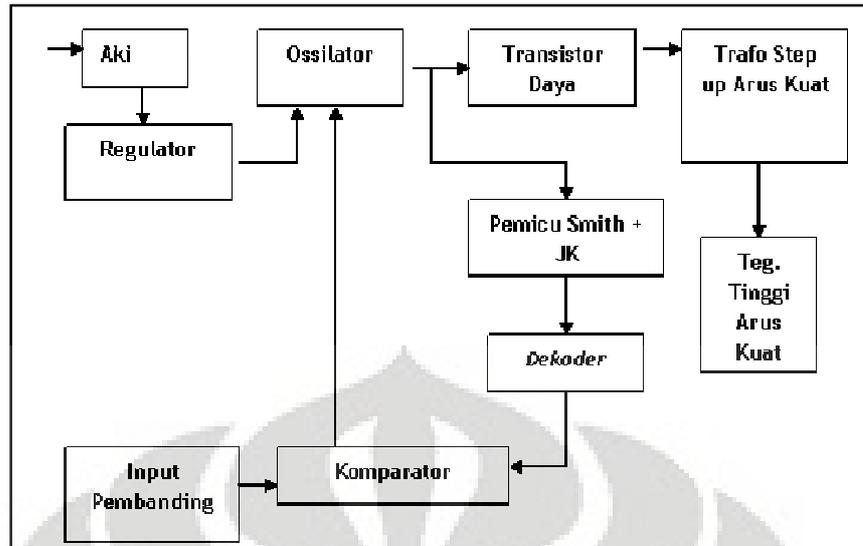
Proses yang terjadi ditentukan oleh internal variabel yang merupakan hasil dari seluruh variabel external tadi. Variabel internal ialah densitas dan flux dari elektron serta ion, suhu elektron dan ion, serta molekul gas netral dan produksi radikal bebas didalam reaktor (Eliezer dan Eliezer, 2001).

Sehingga dengan banyaknya properti yang tidak saling berhubungan pada plasma ini, seperti temperatur, ion dan elektron yang terenergiakan, dan keberadaan plasma pada kondisi yang sangat beragam terhadap densitas, tekanan dan suhu menyebabkan penggunaan plasma menjadi unik dan khusus terhadap satu hal pada suatu industri tidak dapat berfungsi pada banyak hal.

2.7 Inverter

Inverter merupakan alat untuk mengubah masukan arus searah yang berasal dari sumber listrik DC menjadi arus bolak balik (AC) dengan dilakukannya penstabilan pada frekuensi, tegangan dan arus tertentu yang diinginkan. Sehingga dapat digunakannya sumber arus listrik searah (DC) sebagai sumber energi dalam aplikasi yang membutuhkan arus listrik bolak-balik (AC).

Prinsip dasar kerja inverter ialah dengan menghidup-matikan sumber arus DC dengan frekuensi tertentu, lalu keluarannya diperhalus sehingga menghasilkan arus bolah-balik yang sama dengan keluaran arus listrik AC. Sehingga arus listrik yang dihasilkan oleh inverter ini akan bersifat *intermittent* atau berubah-ubah sesuai kemampuan yang terkandung dari sumber utama penghasil listriknya. Selanjutnya untuk mengubah jenis aliran listrik dari suatu sumber listrik DC menjadi AC pada alat inverter ini proses diagram alir inverter seperti pada Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6 Diagram Alir Kerja Inverter

2.8 Proses Dekomposisi LPG dengan Metode Non-Termal Plasma

Usaha pertama dalam memanfaatkan proses konversi kimia menggunakan teknik plasma terhadap gas berkomponen karbon sederhana seperti CO, CO₂, CH₄ telah dilakukan sejak pertengahan abad ke-19. Proses non-thermal plasma merupakan plasma yang bekerja pada temperatur rendah dimana sebagian besar energi listriknya digunakan untuk menghasilkan elektron yang bertenaga (Kogelschatz, 2002). Elektron yang bertenaga selanjutnya akan memproduksi radikal bebas yang akan bertindak untuk mengkonversi dan mereaksikan reaktan LPG yang komponen utamanya terdiri dari Butane dan Propane.

Bentuk dekomposisi yang diharapkan terjadi pada LPG akan sesuai dengan proses umum konversi hidrokarbon dengan mekanisme yang terjadi berupa pembentukan "ion karbonium" dan "radikal bebas". Hal ini terkait dengan kondisi ikatan hidrokarbon yang berupa ikatan kovalen dengan pemakaian bersama elektron bersama oleh atom-atom pembentuk ikatan. Sehingga suatu atom karbon yang berkoordinasi secara tetrahedral yang memiliki simetri yang tepat dengan 4 atom hydrogen dan secara eksperimen, setiap hydrogen pada CH₄ dapat dilepaskan dari karbon dengan energi yang sama. Hal ini berdasarkan empat orbital hibrid sp³ bertumpang tindih dengan orbital 1s hydrogen, menghasilkan empat ikatan sigma yang memiliki panjang dan kuat ikatan yang sama.

Parameter utama dari proses dekomposisi ialah terjadinya perubahan komposisi senyawa dari masukan LPG berupa peningkatan dan pengurangan

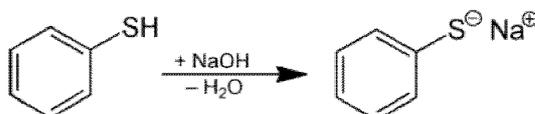
komposisi sejumlah senyawa hidrokarbon tertentu dibanding konsentrasi awal dari reaktan. Hal ini menandakan bahwa telah terjadinya reaksi pemutusan dan perangkaian secara acak, dimana perubahan konsentrasi menjadi parameter utama bahwa proses reaksi plasma dapat terjadi dan berhasil dalam mengkonversi reaktan masukan.

Plasma non-thermal yang digunakan yakni yang berjenis *dielectric barrier discharge/DBD* (lucutan dengan rintangan tahanan listrik), dengan zat rintangan listriknya berupa kaca boronsilikat diantara dua elektroda sumber utama *discharge*. Jenis reaktor plasma DBD ini memiliki banyak keuntungan antara lain menciptakan daerah yang kaya dengan elektron, tidak terbentuknya spark (nyala/pijar listrik), reaksi terjadi pada kondisi atmosferik, tidak dibutuhkan kontrol suhu dan tekanan, instalasi yang mudah untuk dibuat, dan sedikit membutuhkan perawatan.

2.8.1 Treatment Awal LPG

LPG yang digunakan secara spesifikasinya mengandungi senyawa pencampur selain hidrokarbon salah satunya mercaptan yang merupakan turunan senyawa sulfur, sehingga dapat membuat umur dari reaktor dapat berkurang akibat pengaruh korosi dan terbentuknya padatan jika terbawa gas reaktan untuk bereaksi secara plasma. Sehingga dibutuhkan sejumlah treatment awal untuk membersihkan senyawa tambahan tersebut yakni mengalirkan gas LPG melewati larutan basa kuat untuk menghilangkannya.

Mercaptan merupakan nama sederhana dan nama umum dari golongan senyawaan thiol, yakni senyawa yang terdiri dari ikatan sulfur-hidrogen dan analog dengan grup alkohol. Senyawaan grup *thiol* terkadang disebut juga sebagai grup *sulfhydryl*. Relatif seperti alkohol, *thiol* merupakan jenis asam lemah, dengan rentang $pK_a \sim 10.4$ sehingga jika direaksikan dengan basa kuat maka secara spontan akan terjadi reaksi redoks asam-basa menghasilkan disulfide (R-S-S-R) (wikipedia.com). Berikut skema reaksi umum antara *thiol* dan basa :



Gambar 2.7. Reaksi thiophenolate dari thiophenol dalam larutan basa (wikipedia.com)

Sehingga basa kuat yang dipilih ialah KOH yang merupakan basa kuat sehingga jika bereaksi dengan merkaptan akan bereaksi dan menghasilkan garam karena terjadi reaksi antara asam basa yang melaluinya namun tidak bereaksi dengan hidrokarbon.

KOH yang digunakan ialah yang memiliki kemolaran yang tidak tinggi, sehingga dapat memberikan keuntungan karena tingginya kadar pelarut KOH yang berupa H₂O dapat menjadi ikutan kedalam reaktan yang masuk ke reaktor plasma. Ikutan H₂O dapat menjadi tambahan suplai senyawa radikal untuk proses konversi ini. Dimana molekul H₂O digunakan karena dapat dengan mudah menyerap energi dari elektron sehingga secara langsung menurunkan tegangan yang ada di wilayah diantara dua elektroda tersebut yang berakibat perbedaan tegangan akan meningkat sehingga peristiwa pemutusan tegangan (breakdown voltage) akan terjadi sehingga proses pembentukan plasma akan lebih mudah. Berikut reaksi produksi radikal untuk H₂O pada Tabel 2.5 :

Tabel 2.5 Proses produksi radikal dan ion dari H₂O(g) dalam reaktor plasma non-thermal (Chae et al, 2000)

Reaksi	Proses	Yield awal (per 100 eV)
$e + H_2O \rightarrow e + H + OH$	Disosiasi	3.58
$e + H_2O \rightarrow 2e + H + OH^+$	Disosiasi ionisasi	0.67
$e + H_2O \rightarrow 2e + H^+ + OH$	Disosiasi ionisasi	0.57
$e + H_2O \rightarrow 2e + H_2O^+$	Ionisasi molecular	1.99

Dalam memudahkan aliran gas LPG terkontak dengan KOH serta keluaran kontak ini dapat membawa ikutan H₂O, digunakan konfigurasi aliran berupa *bubbler*, dimana pada alat tersebut akan terdapat aliran gas yang berasal dari bawah dan naik keatas melalui air yang ada didalam alat tersebut. Sehingga akan membawa sejumlah molekul uap air yang terbawa dari alat tersebut untuk selanjutnya dibawa menuju reaktor.

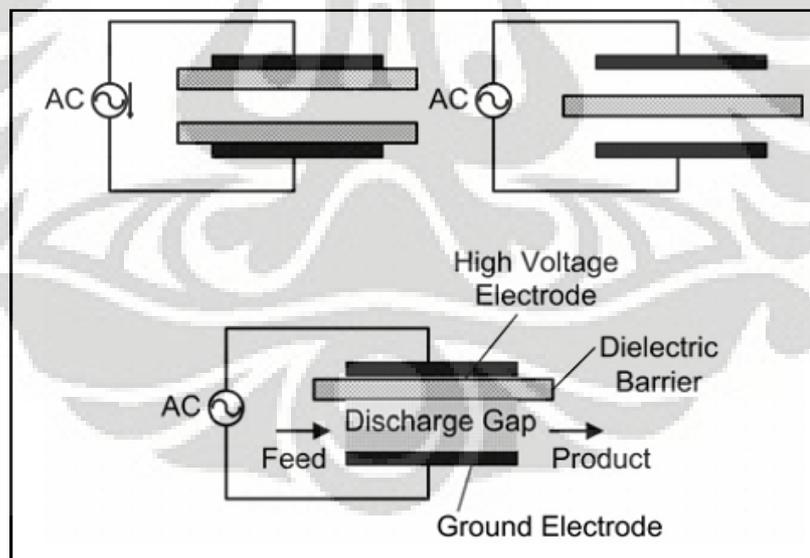
2.8.2 State of The Art Rancang Bangun Reaktor Plasma DBD

Reaktor DBD telah dikembangkan sejak tahun 1857 yang berfokus kepada pengembangan produksi ozone. Pengembangan reaktor ini terus berlanjut dan sejak sekitar 10 tahun belakangan, produksi ozone menjadi aplikasi utama industri yang menggunakan basis reaktor DBD dan telah terpasang ratusan fasilitas pembuatan ozone yang merupakan bagian dari pengolahan air. Sehingga dengan

dinamika tersebut DBD terkadang disebut sebagai “ozonizer discharge” (Kogelschatz, 2002)

Reaktor DBD untuk membangkitkan plasma non-termal menjanjikan untuk dikembangkan dengan sejumlah alasan diantaranya : (i) konfigurasi DBD membutuhkan sedikit energi daya untuk memicu terjadinya reaksi kimia dan fisika terhadap gas pada suhu yang relatif rendah ($T < 200\text{ }^{\circ}\text{C}$); (ii) reaktor plasma dapat dioperasikan pada tekanan atmosfer; (iii) rancangan reaktor terfasilitasi untuk dilakukannya *scale-up* untuk dioperasikan dengan volume gas yang lebih besar; (iv) peralatan berbasis DBD telah terbukti secara teknologi dalam produksi ozon; (v) sejumlah penelitian menunjukkan tingginya densitas elektron dan adanya perluasan daerah pancaran *discharge* (Rico et al., 2010)

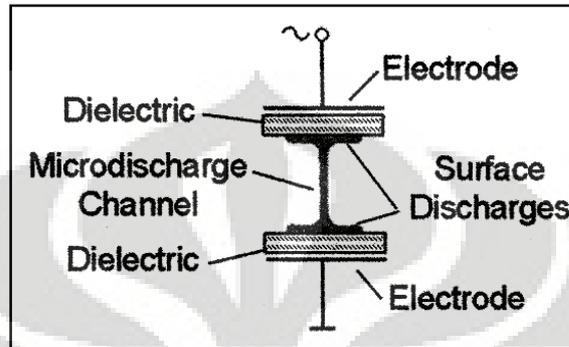
Untuk penelitian konversi gas LPG dan Sintesis C-rantai panjang dengan menggunakan bahan gas yang sama atau C-condensat, jenis reaktor plasma nonthermal tipe DBD (*dielectric barrier discharge*). Konfigurasi dasar reaktor plasma jenis DBD dapat dilihat di Gambar 2.8, dengan suatu rangkaian dua elektroda tegangan tinggi yang salah satu atau keduanya diberi penghalang dielektrik.



Gambar 2.8 Konfigurasi dasar Reaktro Plasma DBD. (Istiadi, 2006)

Daerah diantara kedua elektroda baik salah satu atau kedua yang telah dilapisi dielektrik akan terjadi fenomena berupa lompatan listrik yang disebut *dishcharge*, sehingga celah antar ruang tersebut disebut *discharge gap* (celah lucutan listrik). *Discharge* terjadi saat adanya perbedaan tegangan antara kedua

elektroda dengan fenomena yang terjadi berupa jutaan *micro-discharge* dalam durasi nanosekon (ilustrasi pada Gambar 2.9). Sehingga tiap *discharge* tunggal tidak dapat dilihat dengan mata telanjang manusia, sehingga efek yang ditimbulkan hanyalah berupa pendar cahaya tipis (*silent glow*) (The Clean Air Technology Center (CATC) U.S. Environmental Protection Agency, 2005).



Gambar 2.9 Skema pembentukan micro-discharge (Kogelschatz, 2002)

Aspek geometri dari reaktor yakni berupa ukuran panjang, ketebalan dan diameter baik jarak pisah antar elektroda akan menentukan besarnya konstanta dielektrik sehingga menentukan jumlah arus listrik yang dapat dilewatkan melalui dielektrik. Selanjutnya dielektrik tersebut mendistribusikan *discharge* mikro ke seluruh permukaan elektroda disamping untuk menjamin tidak ada *spark* atau pijar plasma di dalam ruang discas namun tetap memastikan dapat terjadinya reaksi kimia diruang antar elektroda. Hal ini terjadi karena meningkatnya jumlah ion, elektron dan radikal yang terbentuk akibat pemutusan rantai oleh elektron yang dihasilkan dari perpindahan elektron antar kedua elektroda pada tekanan atmosfer terjadi pada kondisi discas mikro (Kogelschatz, 2002).

Sehingga dengan pengaruh aspek geometri terhadap besarnya arus listrik yang dapat dilewatkan dielektrik memberikan salah satu keuntungan plasma reaktor jenis DBD berupa energi rata-rata elektron dapat diatur dengan mengubah susunan jarak antar elektroda didalam reaktor ini dan menjadi sangat potensial untuk reaksi-reaksi kimia organik maupun anorganik karena sifat-sifat non-equilibrium, tenaga input rendah, serta kemampuan mempengaruhi reaksi kimia dan fisika pada suhu yang relatif rendah (Kogelschatz, 2002).

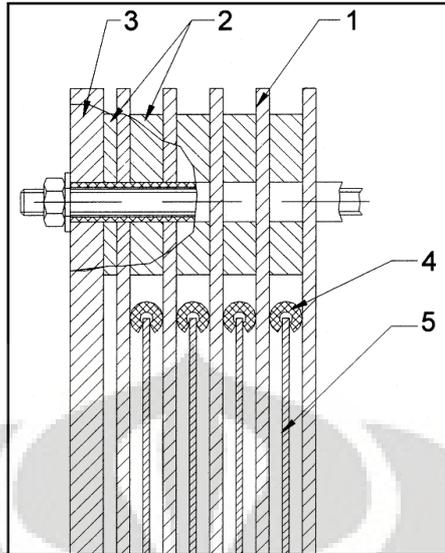
Untuk sumber energi listrik, rancangan reaktor DBD ini harus menggunakan listrik yang berjenis AC (listrik bolak-balik). Hal ini diakibatkan

energi listrik yang berasal dari sumber listrik searah (DC) tidak dapat menginduksi *koupling* kapasitif dielektrik dan hanya dapat dilakukan oleh medan listrik yang berasal dari listrik AC. Sehingga dengan sumber listrik yang berasal dari aki pada percobaan ini harus menggunakan inverter sehingga dapat berubah dari arus DC menjadi arus AC (The Clean Air Technology Center (CATC) U.S. Environmental Protection Agency, 2005).

Proses dekomposisi LPG ini berupa proses pemecahan gas (*gas breakdown*) menghasilkan elektron-elektron yang dipercepat oleh medan listrik membentuk plasma. Dalam reaktor plasma, elektron berenergi tinggi bertumbukan dengan molekul-molekul gas menghasilkan eksitasi, ionisasi, pelipatgandaan elektron, dan pembentukan atom-atom dan senyawa metastabil. Selanjutnya atom-atom aktif dan senyawa metastabil akan bertumbukan dengan molekul-molekul sehingga akan terjadi reaksi kimia.

Salah satu aspek yang akan dipenuhi dari penelitian ini ialah menciptakan suatu reaktor plasma yang mudah untuk dibuat, menggunakan material yang cukup sederhana, dan mudah dalam penggunaan. Hal ini untuk memanfaatkan keunggulan reaktor DBD yaitu dapat memproduksi sejumlah besar volume plasma non-termal pada kondisi atmosfer.

Salah satu penelitian sebelumnya menyebutkan agar dapat beroperasi pada kondisi ambient, digunakan design reaktor berbentuk simetrik tanpa menggunakan skema alat pendingin (Francke, 2002). Design reaktor tersebut dibuat dengan bentuk *rectangular* (persegi) dengan panjang dan ukuran yang sama untuk ukuran material dielectric barrier (Gambar 2.10). Dengan jarak ruang kosong didalam reaktor berukuran 5 mm, elektroda keduanya tetap dengan bagian tengah berbentuk tabung menggunakan material PTFE, serta secara total memiliki sebanyak 18 x 2 celah discharge sehingga total volume yang terbentuk 3.671 cc (Francke, 2002).



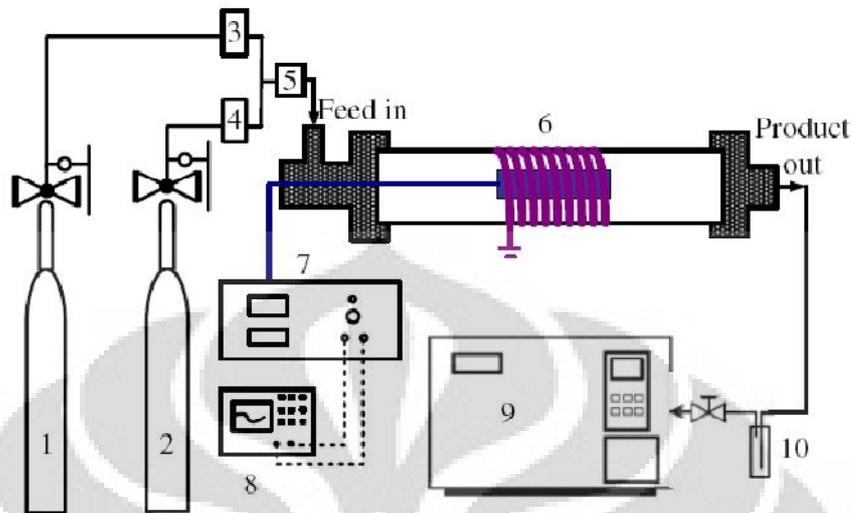
Gambar 2.10 Prinsip konstruksi modul DBD dengan keterangan: 1, pemisah dielectric; 2, pemisah; 3, plat metal ter-grounded-kan; 4, tabung PFTE; 5, plat elektroda *stainless steel*. (Francke, 2002).

Pada penelitian Francke et al tersebut untuk volume *discharge* yang diberikan diatas akan berpengaruh terhadap kebutuhan tegangan kerja dan jumlah modul yang dibutuhkan untuk membuat rangkaian modul. Sehingga dipilihlah jarak yang sekecil mungkin untuk dapat bekerja pada tegangan moderat yang nantinya sebagai tegangan kerja reaktor, sehingga lebih mudah diatur dan menghasilkan wilayah *discharge* yang seragam. Dilain pihak dengan banyaknya jumlah modul yang digunakan akan mempersulit dalam perangkaian dan meningkatkan tahanan aliran. Maka dipilih jarak 4 mm sebagai *discharge gap* untuk mengkompromikan kedua aspek tersebut.

Penelitian lainnya mengenai efek daya masukan, waktu tinggal, dan *discharge gap* terhadap kinerja reaktor DBD untuk mengkonversi metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) menjadi *syngas* (CO dan H_2) serta produk samping yaitu etilena (C_2H_6) dengan mekanisme *dry reforming* (Wang, Yan, Jin, & Cheng, 2009). Umpan masukan adalah CH_4 dan CO_2 dengan perbandingan mol 1:1 serta dilakukan pada suhu kamar dan tekanan sekitar (*ambient*).

Konfigurasi reaktor DBD berbentuk *coaxial* dengan material dielektrik tabung sebagai tabung luar reaktor berbahan kaca kuarsa dengan ID 6,4 mm. Sebuah kawat dililitkan di sekeliling tabung sebagai elektroda luar, dan sebuah batang *stainless steel* berfungsi sebagai elektroda dalam dengan diameter 2,5 atau 6 mm. Sebagai hasilnya, *discharge gap* yang terbentuk adalah sebesar 0,2 mm.

Gambar 2.11 di bawah ini menunjukkan skema peralatan yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 2.11 Skema Peralatan Eksperimen: 1,2. Tabung Gas (CH_4 and CO_2); 3,4. Pengatur laju alir massa; 5. *Gas mixer*; 6. Reaktor DBD; 7. Sumber tenaga pembangkitan plasma; 8. *Oscillograph*; 9 Kromatograf gas; 10. *Cold trap* (Wang, Yan, Jin, & Cheng, 2009)

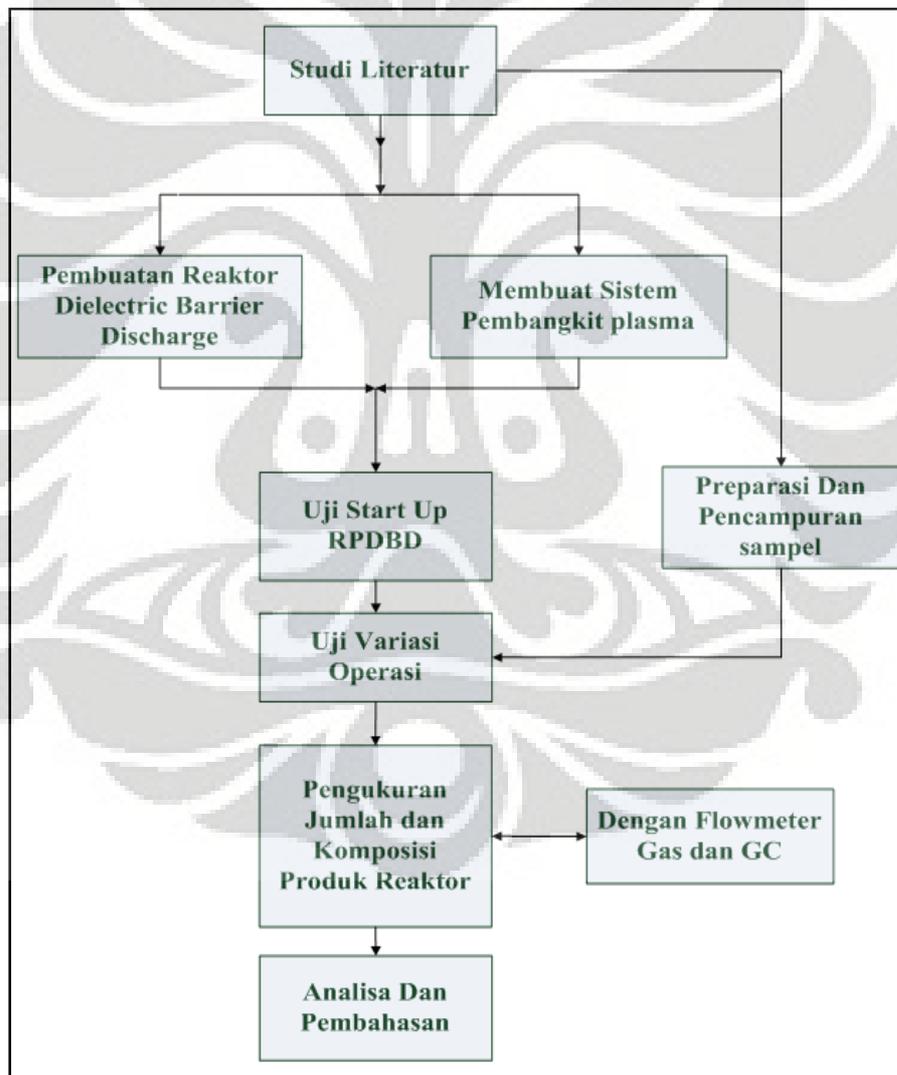
Dari hasil penelitian Wang et.al. disimpulkan bahwa konversi CH_4 dan CO_2 serta selektivitas ke CO dan H_2 meningkat seiring peningkatan daya masukan, gas umpan harus berada dalam reaktor plasma dalam waktu yang cukup lama untuk menyelesaikan reaksi atau dengan kata lain waktu tinggal gas umpan harus cukup lama dalam reaktor, dan *discharge gap* hanya mempunyai pengaruh kecil terhadap konversi dimana produk gas H_2 lebih bergantung pada daya masukan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan rancangan penelitian ini dititikberatkan pada perancangan alat reaktor plasma non-thermal, prosedur penelitian, dan analisis yang telah dilakukan terhadap penelitian ini.

3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian akan dibagi dalam beberapa tahap, yang dirangkum seperti diagram alir berikut ini :



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Rancang Bangun Sistem Reaktor Plasma

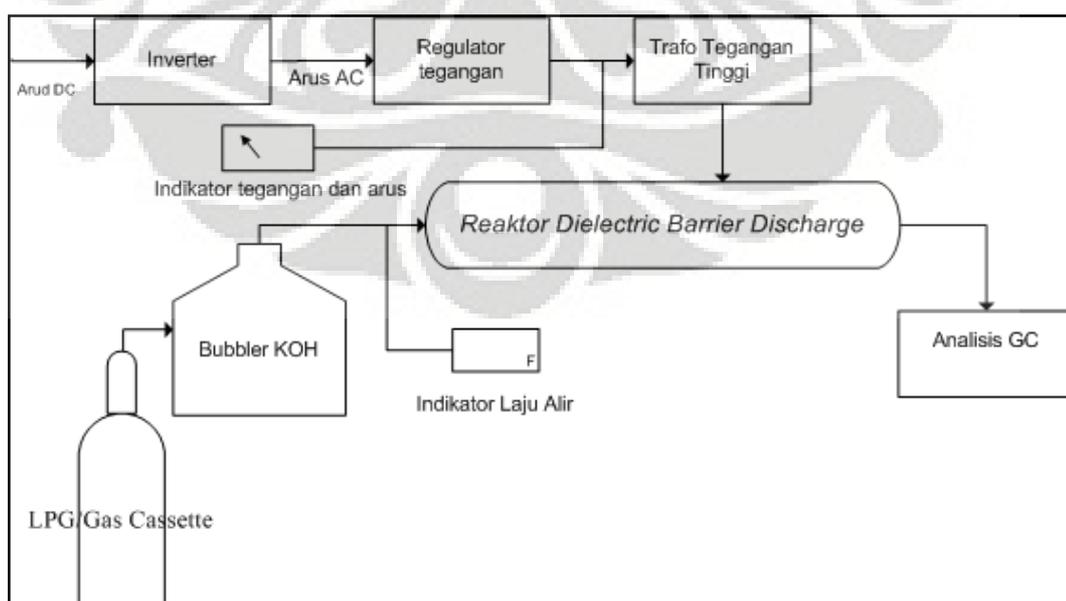
Pada penelitian ini rancang bangun utama yang akan dibuat ialah Sistem Reaktor Plasma Non-termal. Inti dari sistem tersebut ialah suatu reaktor plasma tipe DBD dapat bekerja menggunakan sumber tenaga listrik DC namun dengan prinsip inverter dapat dirubah menjadi listrik AC. Perangkat penunjang lainnya akan melengkapi kerja dari reaktor tersebut, dan berikut jabaran sistem tersebut yang terdiri dari :

- 1) Reaktor plasma
- 2) Inverter untuk mengubah arus DC menjadi arus AC
- 3) Regulator Tegangan
- 4) Trafo tegangan tinggi
- 5) Indikator laju alir dan pengukur tegangan.
- 6) *Bubbler* LPG dan KOH
- 7) Gas trap untuk menyimpan produk untuk dianalisis GC.

Serta bahan yang digunakan ialah :

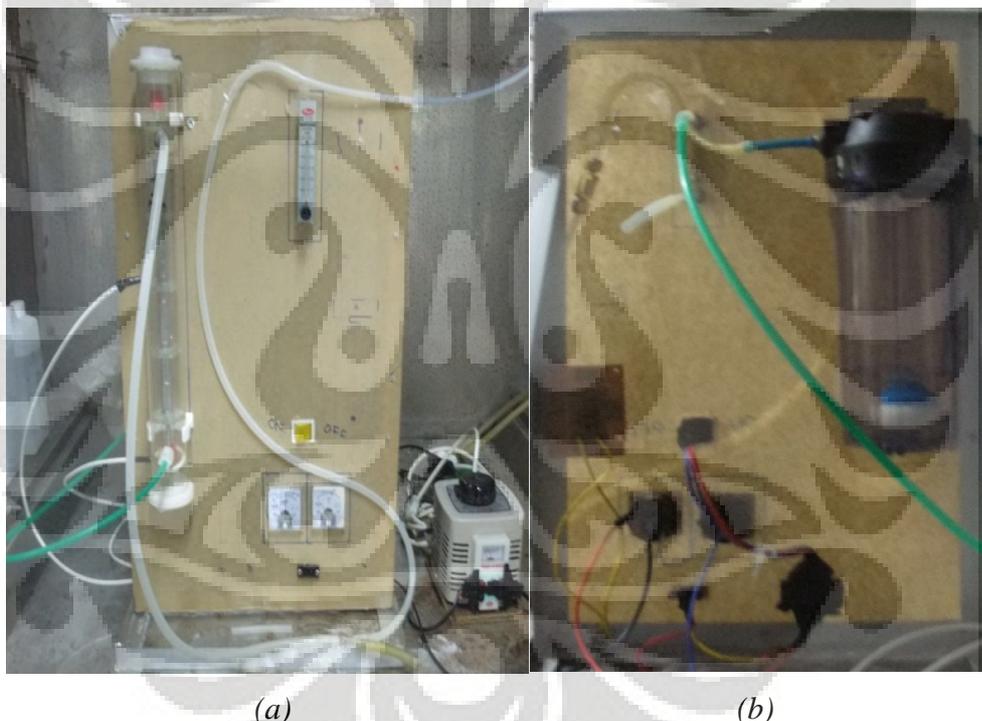
- 1) LPG 12 kg produksi Pertamina.
- 2) *Gas Cartridge* dominan Butane 250 gr
- 3) KOH 0,5 M

Sehingga inverter, reaktor dan komponen lainnya akan disusun menurut skema pada Gambar 3.2 berikut ini :



Gambar 3.2 Skema Alat Percobaan

Keterangan dari skema tersebut, gas reaktan dialirkan menuju reaktor dengan melewati bubbler KOH yang diatur alirannya agar keluaran gas pada bubbler langsung terkontak dengan aliran tersebut. Selanjutnya umpan melalui pengukur laju alir, sedangkan untuk sumber arus listrik diatur dengan menggunakan regulator tegangan untuk mengatur tegangan yang akan dibangkitkan menjadi plasma oleh trafo tegangan tinggi. Dan hasil produk langsung diuji dengan *gas chromatograph*. Seluruh skema rancangan sistem reaktor plasma non-thermal DBD diletakkan didalam rumah asam, karena mempertimbangkan gas reaktan dan produk hasil plasma ialah gas mudah terbakar sehingga diperlukan tempat yang memiliki kemampuan membuang sisa gas keluaran reaktor yang tidak terpakai. Berikut Gambar 3.3 memperlihatkan sistem reaktor plasma non-thermal yang akan diuji pada penelitian ini :



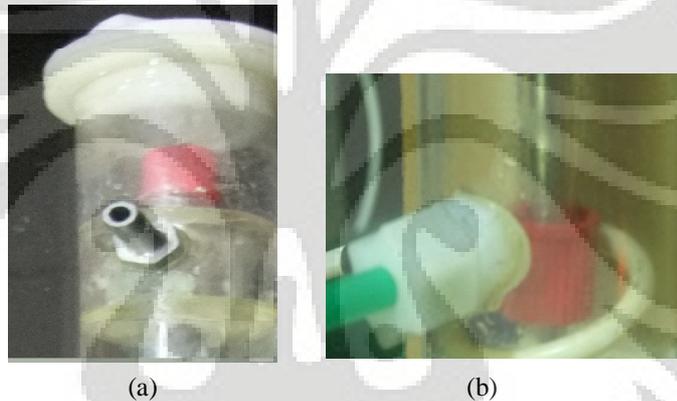
Gambar 3.3 Susunan Rangkaian Reaktor Plasma DBD (a) sisi depan; (b) sisi belakang

3.2.1 Pembuatan Reaktor Plasma Non-thermal DBD

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

- a. 2 Tabung gelas borosilikat dengan diameter luar 14 dan 12 mm, ketebalan masing-masing 0,5 mm serta panjang 36,5 cm sebagai *tube* yang berfungsi sebagai material dielektrik.

- b. 2 buah elektroda berbentuk batang (elektroda tengah) yang terbuat dari *stainless steel* ANSI 316 dengan ukuran diameter luar 6,5 mm dan panjang 38 cm
- c. 2 buah elektroda berbentuk jala (elektroda luar) yang terbuat dari *stainless steel* dengan jenis ANSI 304
- d. 2 buah tabung acrylic dengan panjang 42,5 cm dan ketebalan 2 mm serta diameter 50 mm sebagai *shell*.
- e. 2 *nipple* dari bahan *stainless steel* pada bagian atas reaktor (keluaran produk) dan bahan plastik pada bagian bawah reaktor (masukan reaktan) yang berfungsi sebagai tempat masukan gas umpan dan keluaran produk hasil reaktor. Masing-masing memiliki ukuran 15,1 mm dan diameter lubang 5,5 mm. Berikut gambar dari masing-masing nipple tersebut :



Gambar 3.4 *Nipple* bagian : (a) keluaran produk; (b) masukan reaktan

- f. *Baffle* dari bahan acrylic sebagai penyekat dan penyangga bagian tengah reaktor yang terdiri dari elektroda dan tabung *tube* tempat terjadinya reaksi utama.
- g. Selang *silicon* untuk mengalirkan gas produk dan selang *polyurethane* untuk mengalirkan gas umpan.
- h. *Klem* (penyangga) reaktor untuk menaruh di tatakan reaktor.
- i. Tutup reaktor berbahan *teflon* yang memiliki ulir untuk membuka-tutup, dengan tepi tutup direkatkan dengan lem epoksi untuk menutup tabung dengan rapat agar tidak ada gas yang bocor dari *shell* reaktor.

Pemilihan material reaktor DBD yang digunakan pada rancangan reaktor ini berdasarkan kemudahan dalam penyediaan material dan bahan yang akan digunakan untuk membangun suatu reaktor plasma. Seperti material acrylic

sebagai selongsong, material *stainless steel* sebagai elektroda dan *nipple*, dan plastik untuk salah satu bagian *nipple*. Keseluruhan material tersebut cukup mudah didapatkan dan tidak membutuhkan pemesanan ukuran khusus serta dalam tahap perakitan dapat dilakukan dengan mudah. Sehingga sesuai dengan keinginan awal dalam pembuatan reaktor yang dapat menggunakan material yang lebih murah, mudah untuk dibuat dan didapatkan serta gampang dalam pengoperasian.

Skema utama rancangan reaktor plasma DBD ini ialah dengan jenis pipa koaksial, menggunakan dua elektroda terdiri dari elektroda berbentuk batang sebagai elektroda tengah, dikelilingi oleh material dielektrik untuk membuat ruang *discharge gap* yakni kaca borosilikat dan selanjutnya ditutup oleh elektroda berbentuk jala. Besar *discharge gap* yang diharapkan ialah pada rentang sekitar 4 mm berdasarkan rentang tegangan operasi pada kisaran moderat dan waktu tinggal yang diinginkan, seperti penjelasan penelitian Francke. et al, 2002 pada bab Tinjauan Pustaka. Maka digagas besar *discharge gap* pada rentang dibawah nilai tersebut yakni dipilih rentang 1,75 mm dengan menggunakan diameter gelas reaktor sebesar 12 mm dan 2,75 mm dengan menggunakan diameter gelas reaktor sebesar 14 mm. Berikut langkah perhitungannya :

- Reaktor 1

$$D = 12 \text{ mm (diameter luar gelas borosilikat)}$$

$$t = 1 \text{ mm (tebal gelas borosilikat)}$$

$$d = D - 2t = 12 \text{ mm} - (2 \times 1 \text{ mm}) = 10 \text{ mm (diameter dalam gelas borosilikat)}$$

$$D_g = (d - s)/2 = (10 \text{ mm} - 6,5 \text{ mm})/2 = 1,75 \text{ mm (discharge gap untuk reaktor 1)}$$

- Untuk reaktor 2.

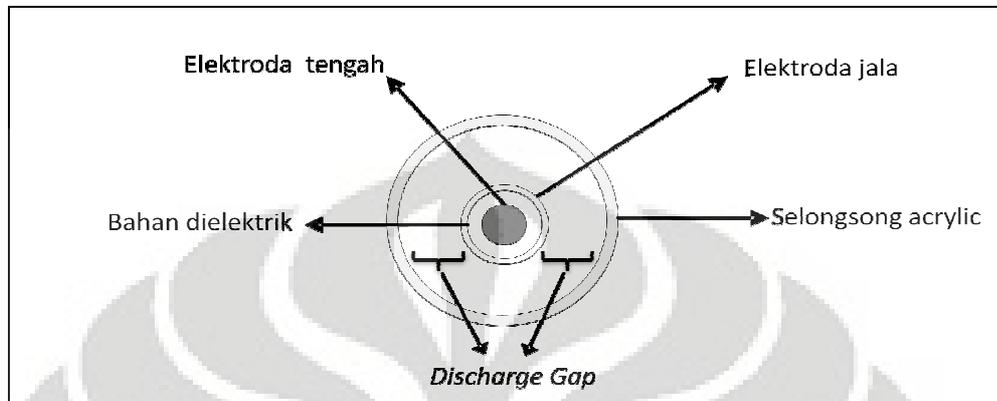
$$D = 14 \text{ mm (diameter luar gelas borosilikat)}$$

$$t = 1 \text{ mm (tebal gelas borosilikat)}$$

$$d = D - 2t = 14 \text{ mm} - (2 \times 1 \text{ mm}) = 12 \text{ mm (diameter dalam gelas borosilikat)}$$

$$D_g = (d - s)/2 = (12 \text{ mm} - 6,5 \text{ mm})/2 = 2,75 \text{ mm (discharge gap untuk reaktor 2)}$$

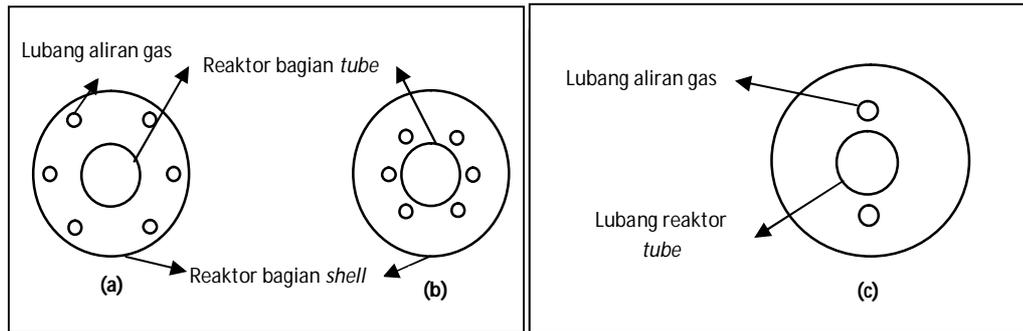
Material dielektrik yang digunakan ialah bahan gelas borosilikat sebagai bahan dielektrik karena mempunyai ketahanan panas yang cukup tinggi seperti halnya kaca kuarsa namun memiliki harga yang jauh lebih murah dibanding kuarsa. Berikut Gambar 3.5 yang menunjukkan penampang melintang reaktor :



Gambar 3.5 Skema melintang antara dua elektroda dan bahan dielektrik.

Daerah diantara elektroda inti dan elektroda jala merupakan daerah utama pembentukan material plasma yang terbentuk akibat loncatan elektron dari kedua elektroda bertabrakan dengan atom dan molekul berasal dari gas reaktan. Kondisi pembentukan tersebut terjadi secara acak dan terus-menerus sepanjang elektroda menghasilkan elektron yang berasal dari sumber arus listrik. Sehingga daerah itulah yang menjadi daerah puncak terjadinya reaksi plasma yang disebut *discharge gap*.

Daerah lainnya yang berada disetiap sisi dari elektroda merupakan medan lokal yang bermuatan tinggi akibat mengalirnya aliran listrik sepanjang elektroda, dan mempengaruhi reaktan yang mengalir disekitarnya. Sehingga dilakukan pemanfaatan terhadap wilayah sekitaran elektroda dengan membuat pola aliran gas reaktan menjadi turbulen sehingga meningkatkan kemungkinan gas mengalir disekitar elektroda. Hal tersebut dilakukan dengan pembuatan *buffle* yang berlubang untuk mengarahkan aliran gas reaktan, seperti Gambar 3.6 berikut ini :

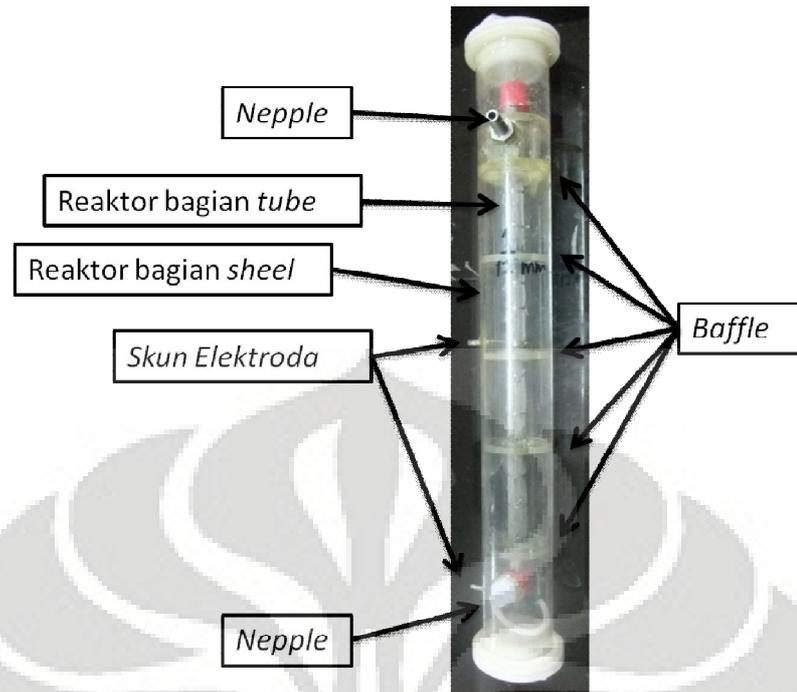


Gambar 3.6 Skema pola lubang *baffle*; (a) lubang *baffle* bagian luar; (b) lubang *baffle* bagian dalam; (c) lubang *baffle* bagian jembatan

Selanjutnya masing-masing komponen tersebut dirangkai, dengan tahap pengerjaan sebagai berikut :

1. Pembuatan bagian tube dan SS bagian dalam tube, dimana kaca borsiklat dan SS untuk bagian dalamnya telah ada selanjutnya dipasangkan dengan menggunakan penutup dan silikon pembatas sebagai pencegah kebocoran.
2. Pemotongan acrylic sebagai *shell* dengan panjang 50 cm.
3. Pembuatan penutup kedua sisi ujung *shell* yang terbuat dari teflon serta baffle pemegang kaca bagian dalam dengan yang terbuat dari acrylic.
4. Pemasangan SS berbentuk jala menutup kaca borosiklat dan diikat dengan kawat SS.
5. Melakukan pengeleman untuk tiap komponen yang harus direkatkan, yakni kaca borosiklat dengan seluruh baffle dan 2 baffle paling atas dengan acrylic bagian shell.
6. Pemasangan sumber masukan listrik yang disambungkan dengan jala SS untuk bagian tengah dan bagian ujung SS yang berbentuk tabung.
7. Penutupan reaktor dengan penutupnya dengan melakukan pengeleman terhadap tutup reaktor menggunakan lem epoksi.
8. Pemasangan *klem* penyangga reaktor di tatakan reaktor dengan menggunakan baut dan mur.

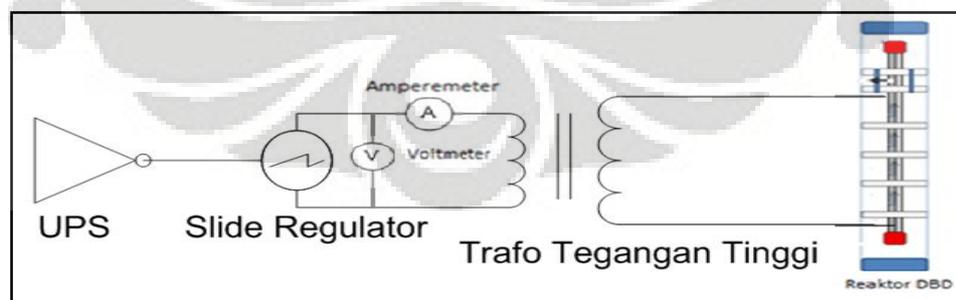
Sehingga keseluruhan peralatan tersebut selanjutnya dirangkai sesuai dengan skema rancang bangun reaktor pada Gambar 3.7 dibawah ini :



Gambar 3.7 Hasil pembuatan reaktor *dielectric barrier discharge*

3.2.2 Perangkaian Inverter dan Pembangkit Plasma

Pada penelitian ini sumber listrik utama untuk pembangkitan plasma menggunakan sumber arus DC yang dengan inverter mengubah arus listrik DC ke AC yang menghasilkan keluaran arus AC pada nilai tegangan 220 Volt. Keluaran inverter langsung akan disambungkan kerangkaian pengatur tegangan listrik sebelum dihubungkan dengan Trafo Tegangan Tinggi untuk membangkitkan plasma pada reaktor hasil rancang bangun. Sehingga memiliki skema alat seperti pada Gambar 3.8 berikut ini :



Gambar 3.8 Skema Inverter dengan Trafo Tegangan Tinggi

Kelengkapan alat untuk menciptakan plasma ini sebagai berikut :

1. UPS sebagai sumber energi listrik yang digunakan (Gambar 3.9), dengan sumber utama listrik berasal dari aki yang ada didalam alat UPS tersebut

dan selanjutnya dirubah menjadi arus listrik AC dengan prinsip kerja inverter dengan merek dagang *ersys UPS 600 VA*.



Gambar 3.9 UPS sebagai sumber energi listrik pembangkitan plasma

2. Regulator tegangan sebagai trafo yang dapat mengatur tegangan keluaran dari UPS 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 seperti terlihat pada Gambar 3.10)



Gambar 3.10 Regulator Tegangan

3. Trafo tegangan tinggi untuk menaikkan tegangan masukan dari inverter mencapai tegangan munculnya plasma oleh trafo yang berjenis *neon sign transformer* (NST) merek *Standard Electric Works Hongkong* tipe T1522 yang dapat dilihat pada Gambar 3.11. Dengan spesifikasi tegangan masukan 120 – 240 V menjadi tegangan tinggi, dengan rentang 2 – 15 kV pada 30 – 120 mA.

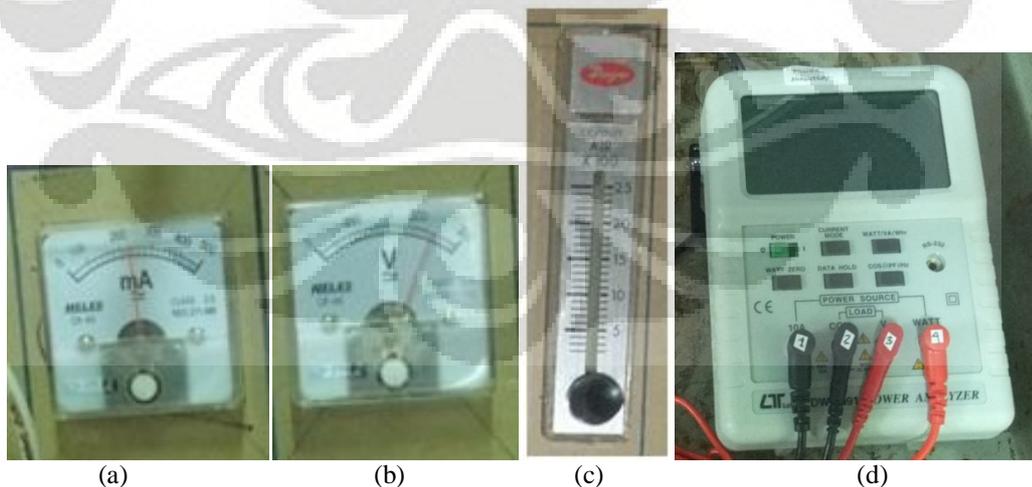


Gambar 3.11 Neon Sign Transformer

4. 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 trafo regulator dengan UPS dan NST.

3.2.3 Penggunaan Alat Ukur dan Uji

Sejumlah alat ukur digunakan untuk mengetahui kondisi laju alir reaktan dan perubahan tegangan saat berlangsungnya percobaan reaktor plasma. Alat ukur untuk membaca tegangan dan arus listrik digunakan Voltmeter dengan jenis panel bermerek *HELES* dengan rentang 0 – 300 V, dan Amperemeter dengan jenis panel bermerek *HELES* dengan rentang 0 – 500 mA. Sedangkan untuk laju alir reaktan digunakan flowmeter dengan batas laju alir 500-2500 cc/menit.



Gambar 3.12 Alat ukur dalam sistem reaktor plasma, (a) amperemeter; (b) voltmeter; (c) flowmeter; power analyzer

Sedangkan tambahan alat pengambilan data ialah alat ukur multimeter digital *Power Analyzer* yang digunakan adalah merek dagang *Lutron DW-6091*

yang mampu melakukan pengukuran tegangan, arus, daya, dan konsumsi energi sekaligus dalam 1 alat.

Untuk pengujian awal kandungan gas reaktan dan gas produk reaktor, digunakan alat uji digunakan CO *analyzer* (Gambar 3.13) memiliki rentang pengukuran gas CO dari 0 hingga 1000 ppm dan karbon dioksida (0 – 15 %). Sedangkan saat pengujian yang lebih detail pada pengujian uji reaksi LPG digunakan *gas chromatograph* (GC) jenis TCD untuk mengetahui kandungan hidrokarbon LPG yang mengalami perubahan komposisi. Dalam pengujian GC digunakan alat *gastrap* untuk penangkap gas produk sebelum diuji kedalam GC karena letak GC tidak berada dalam 1 lab pembuatan sistem reaktor plasma sehingga sampel produk yang keluar secara terus-menerus (*continue*) dapat ditangkap dan bawa ke tempat analisis GC.



Gambar 3.13 (a) Gastrap dan (b) CO Analyzer

3.3 Preparasi Sampel

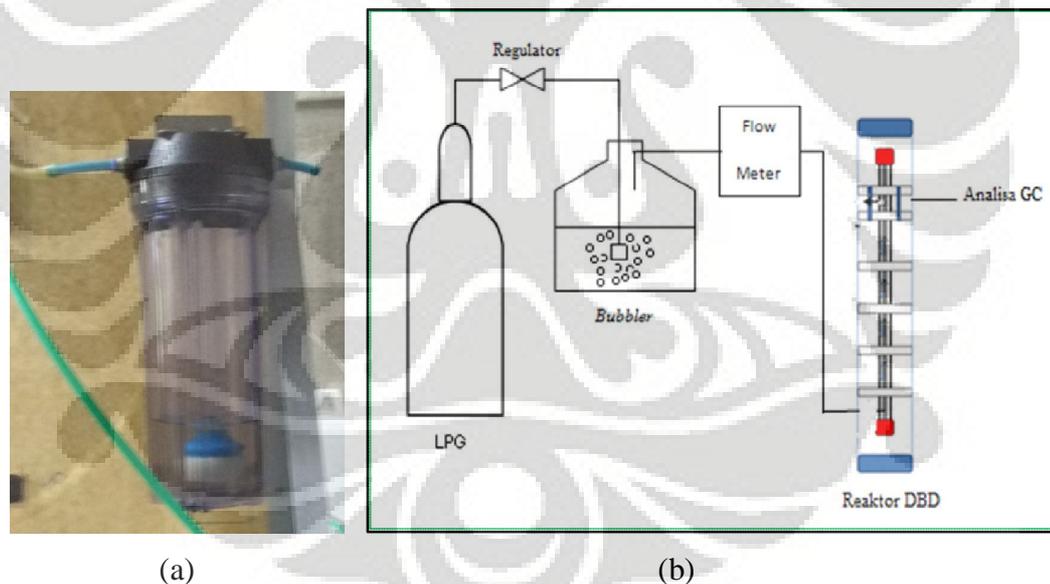
Mercaptan yang berasal dari LPG terlebih dahulu akan dihilangkan atau dikurangi untuk mencegah masuknya kandungan senyawaan sulfur ikut masuk kedalam reaktor dan mengganggu proses reaksi plasma. Sehingga digunakan alat *bubbler* untuk mengkontakkan aliran LPG dengan larutan KOH sehingga kandungan mercaptan yang ada bereaksi dengan basa kuat tersebut dan terendapkan disana. Sedangkan aliran gas LPG akan terus masuk kedalam reaktor ditambah sejumlah kandungan air yang terurai dari reaksi mercaptan dengan KOH, sehingga terdapat sejumlah kecil air murni (H_2O_l) yang ikut terbawa oleh aliran gas input yang digunakan.

Larutan KOH 0,5 M dibuat dengan melarutkan 14 gram KOH padatan kemudian dilarutkan dalam labu takar 500 mL dengan aquadest. Selanjutnya

larutan tersebut langsung dimasukkan kedalam wadah *housing filter* sebagai tempat kontak aliran gas dengan larutan KOH dengan prinsip kerja *bubbler*.

Hal ini terjadi karena saat buih gas yang berjalan dari arah bawah keluaran pipa dari bagian bawah *bubbler* ke bagian atas air dan sepanjang perjalanan buih tersebut akan membawa sejumlah kecil kandungan air yang terbentuk pada lapisan tipis disekiling buih gas yang mengalir tersebut. Maka dengan kondisi gas tersebut yang merupakan gas uji yakni LPG diharapkan tidak bereaksi apapun dengan air tersebut sehingga tidak berpengaruh secara proses didalam reaktor plasma nantinya.

Namun untuk penelitian awal yang menggunakan gas LPG *cartridge*, awalnya menggunakan campuran KOH 0,5 M dengan zeolit untuk menyerap kandungan mercaptan dan pengotor lainnya. Namun akibat berkurangnya laju alir gas reaktan LPG *cartridge* yang dapat keluar dari campuran KOH dan zeolit, maka penggunaan zeolit dihentikan dan penggunaan LPG *cartridge* diganti dengan LPG 12 kg agar tekanan masuk dapat dipertahankan sehingga laju alir menjadi stabil.



Gambar 3.14 Bubbler KOH, (a) *Housing filter* sebagai wadah terjadinya *bubbler*; (b) skema kerja *bubbler*

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Uji *Start-up* Alat dan Keselamatan Kerja

Sebelum dilakukan uji *start-up* alat, terlebih dahulu dilakukan uji kebocoran reaktor. Uji kebocoran reaktor dilakukan dengan cara sederhana yaitu metode air sabun. Caranya udara dari kompresor dialirkan ke dalam reaktor

dengan kondisi seluruh reaktor telah tertutup serta membiarkan *nipple* produk dibiarkan terbuka agar aliran udara kompresor dapat keluar dari reaktor. Kemudian meneteskan air sabun ke area yang berpotensi bocor sehingga jika terindikasi bocor dengan ciri munculnya buih, maka tempat munculnya buih diberi lem tambahan.

Jika terdapat kebocoran maka dilakukan upaya penambahan atau penggantian *silicon seal* yang lebih rapat dan penguncian yang lebih erat. Pada permukaan tutup reaktor juga ditambahkan lembaran silikon tipis untuk mengurangi kebocoran.

Uji kebocoran lainnya ialah memastikan regulator dan seluruh sambungan selang dari tabung LPG 12 kg produksi tidak terdapat kebocoran. Untuk regulator diuji dengan memeriksa pemasangan regulator telah pada posisinya, ketika mengalirkan gas akan terdengar suara aliran didalamnya dan terbaca tekanan tabung LPG. Sedang untuk sambungan selang memastikan sambungan antar selang tidak bocor dengan cara uji kebocoran metode air sabun pada titik-titik sambungan saluran selang. Selama reaktor bekerja, dipastikan tidak ada bau LPG yang menyebar terlalu kuat di area sekitar pelaksanaan penelitian.

Untuk Inverter dan Trafo Tegangan Tinggi, uji kebocoran dilakukan dengan menyalakan kedua alat yang telah dibuat selama 10 menit dalam kondisi standar, Jika tidak terjadi kebocoran dan arus pendek maka sirkuit yang dibuat sudah baik serta dari hasil pengukuran tegangan dan arus telah mencapai yang diharapkan yakni nilai tegangan dan arus telah sesuai dengan kondisi operasi dan tidak berubah sepanjang pengoperasian alat.

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

3.4.2 Variasi Kondisi Operasi Proses

Setelah dilakukan uji pendahuluan dan reaktor sudah siap digunakan. Selanjutnya dilakukan operasi proses yang akan dilakukan untuk pengamatan produk hasil konversi LPG terhadap variabel-variabel (baik terikat maupun bebas) yang telah ditentukan sebelumnya. Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini secara garis besar dapat dibedakan menjadi dua yaitu variabel bebas dan variabel terikat. Variabel bebas pada penelitian ini meliputi tegangan listrik yang dihasilkan inverter, *flowrate* dari reaktan LPG dan variasi geometri antara dua bentuk ukuran reaktor. Adapun variabel terikat pada penelitian ini adalah kuantitas perubahan konsentrasi antara reaktan dan produk reaktor plasma. Berikut variabel-variabel bebas proses yang akan divariasikan:

1. Pengaruh perbedaan tegangan keluaran inverter digunakan untuk pembangkitan plasma yang terjadi, dengan variasi 2 tegangan yakni 130 dan 170 Volt AC.
2. Pengaruh *flowrate* reaktan yang digunakan pada percobaan ini. Variasi laju alir yakni sebanyak 2 variasi laju alir yakni 500 cc/min dan 1500 cc/min.
3. Pengaruh ukuran geometri reaktor terhadap konversi reaktan hasil reaktor plasma. Ukuran geometri ini ialah sesuai ukuran diameter reaktor yakni 12 mm dan 14 mm.

Setiap variasi variabel bebas dilakukan dalam jangka waktu 5 menit, hal ini dilakukan karena reaksi dengan bantuan plasma berjalan dengan cepat dan penelitian dilakukan secara kontinyu. Serta hal utama yang diharapkan teruji pada waktu tersebut ialah kondisi produk yang dihasilkan telah stabil dan tidak berubah-ubah lagi. Selain itu hal ini akan mempermudah perhitungan dalam konsumsi energi listrik yang dibutuhkan dalam reaksi karena energi adalah besarnya daya pembangkit plasma dikali dengan waktu yang diperlukan untuk melakukan percobaan.

3.4.3 Langkah Kerja Pengoperasian Reaktor Plasma

Prosedur pengoperasian reaktor plasma dilakukan sesuai langkah berikut, namun dalam setiap memulai selalu menghidupkan *exhaust fan* rumah asam

tempat ditaruhnya reaktor dan memastikan seluruh sambungan listrik dan kabel dalam rangkaian pembangkitas plasma tertutup dengan baik lakban hitam.

1. Mengecek seluruh sambungan selang, kabel, peralatan listrik, dan peralatan indikator laju alir serta pengukur arus dan tegangan terpasang dengan benar.
2. Alirkan gas LPG masuk kedalam *bubbler* yang berisi KOH 0,5 M untuk mengurangi mercaptan dan pengotor lainnya yang masuk kedalam reaktor.
3. Buka regulator tabung LPG sehingga gas dapat mengalir disertai pengaturan laju alir pada 500 cc/menit.
4. Tunggu aliran gas LPG memenuhi seluruh ruang reaktor dengan perhitungan waktu tunggu berdasarkan laju alir berbanding volume reaktor.
5. Regulator tegangan dinyalakan, diputar sampai tegangan 170 volt AC. Stopwatch dan mencatat tegangan dan arus.
6. Nyalakan reaktor selama 5 menit dan setelah terpenuhi, tutup keluaran *gas trap*.
7. Bawa gas trap yang telah terisi produk hasil reaktor plasma untuk diuji dengan *gas cromatograph*.
8. Lakukan *flushing* reaktor dengan menggunakan aliran udara ambient yang dapat berasal dari kompresor atau sumber lainnya untuk menghilangkan sisa gas didalam reaktor.
9. Ulangi langkah 2-6, dengan menurunkan tegangan menjadi 130 volt AC untuk percobaan variasi tegangan
10. Ulangi langkah 2-7, dengan menaikkan laju alir menjadi 1500 cc/menit untuk percobaan variasi laju alir
11. Ulangi langkah 2-8, dengan mengganti reaktor yang digunakan jika telah selesai melakukan pengujian variabel tegangan dan laju alir.

3.4.4 Prosedur Penggunaan Alat Uji

Alat uji yang digunakan pengambilan data produk ialah CO *analyzer* dan *gas Cromatography* (GC). Untuk pengoperasian alat uji CO analyzer ialah langsung menghidupkan alat tersebut dan tunggu hingga waktu kalibarsinya telah

selesai yakni selama 60 detik. Setelah kalibrasi alat selesai, alat CO analyzer digunakan dengan mengalirkan salah satu aliran keluaran produk yang telah di cabangkan untuk masuk ke alat ini.

Untuk prosedur pengoperasian GC dalam rangka pengambilan data percobaan sampel dilakukan dengan sejumlah langkah kerja sesuai dengan SOP pengoperasian alat uji GC, yakni :

Preparasi GC

Panaskan GC kurang lebih 1 hari untuk GC yang sudah lama tidak dipakai dan kurang lebih 15 menit untuk GC yang sering dipakai untuk menstabilkan dan membersihkan kotoran-kotorannya terbawa dari pemakaian sebelumnya

Prosedur mengalirkan gas Argon

- Pastikan tekanan input dan output di regulator berada pada angka 0 dan tidak ada kebocoran pada sambungan-sambungannya.
- Buka valve utama dari kencang menjadi kendur, sehingga tekanan akan langsung naik dan 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 kearah 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, H₂, CH₄), langkah 4 harus dilakukan terlebih dahulu sebelum langkah 1 menggunakan gas inert N₂

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 diregulator 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) Hubungkan chromatopac dengan GC, tekan shift down sambil menekan tombol I,N,I dan lalu tekan enter hingga muncul initialize.
- 2) Atur tinta di sebelah kiri, tekan shift down bersamaan dengan tombol plot, lalu tekan enter, untuk mengatur gunakan “coarse” kemudian tekan kembali shift down bersama dengan plot, lalu tekan enter.
- 3) Lakukan input attenuasi. Jika attenuasi kecil maka segala impurities akan terlihat “peak”nya, sehingga digunakan attenuasi yang agak besar, tekan tombol attn bersama dengan angka 7, lalu tekan enter.
- 4) Atur kecepatan kertas, tekan: speed bersama dengan angka 10, lalu tekan enter.
- 5) Untuk 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) Untuk mengetahui apakah GC sudah stabil (garis lurus), tekan: shift bersama dengan plot, lalu tekan enter. Kestabilan juga dapat dilihat dengan langkah 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) Matikan current.
- 2) Turunkan 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.

Matikan aliran *gas carrier* dengan menutup regulator tabung gas tersebut.

3.5 Prosedur Pengambilan Data Percobaan

Data percobaan ialah seluruh fenomena dan hasil pencatatan kondisi pengoperasian reaktor plasma. Untuk fenomena, data yang diambil ialah data pengamatan kualitatif yang memiliki parameter sejumlah ciri terbentuknya plasma yang dapat teramati oleh peneliti yakni bunyi, dan nyala dari plasma, lucutan yang terjadi, dan perubahan bau dari reaktan.

Sedangkan data kuantitatif reaktan dilakukan pencatatan pengukuran terhadap keluaran langsung dari LPG yang telah dibersihkan dari mercaptan. Data percobaan ini adalah konsentrasi reaktan dan produk pada tiap kondisi variabel bebas yang diujikan. Selain itu untuk data masukan reaktan dilakukan pengukuran untuk mengetahui *flowrate* masing-masing sampel sehingga didapat lama waktu tinggal didalam reaktor dan terakhir melakukan pengukuran konsentrasi dari hasil gas keluaran reaktor yang diukur dengan menggunakan *CO analyzer* dan GC.

3.6 Data yang Diambil

Hasil pengukuran konsentrasi reaktan dan produk didata untuk dibandingkan satu sama lainnya untuk diketahui seberapa baik pengaruh variabel bebas terhadap proses reaksi plasma yang terjadi didalam reaktor. Data tersebut ialah hasil pengukuran GC produk kerja reaktor tiap 1 kali *running* penelitian yakni tiap 5 menit.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Rancang Bangun Reaktor Plasma

Pada penelitian ini, dihasilkan suatu reaktor plasma dengan menggunakan jenis *Dielectric Barrier Discharge* (DBD) atau Lucutan Plasma Terhalang Dielektrik (LPTD) dengan konfigurasi pipa koaksial *shell and tube* dan menggunakan sumber listrik DC yang selanjutnya dirubah oleh inverter menjadi arus AC untuk pembangkitan plasma. Dengan penggunaan sumber energi listrik DC menjadikan peruntukan reaktor dalam penggunaannya dapat dipindah-pindahkan, tidak terpaku terhadap sumber listrik statis seperti PLN, serta dapat digunakan dalam skala kecil.

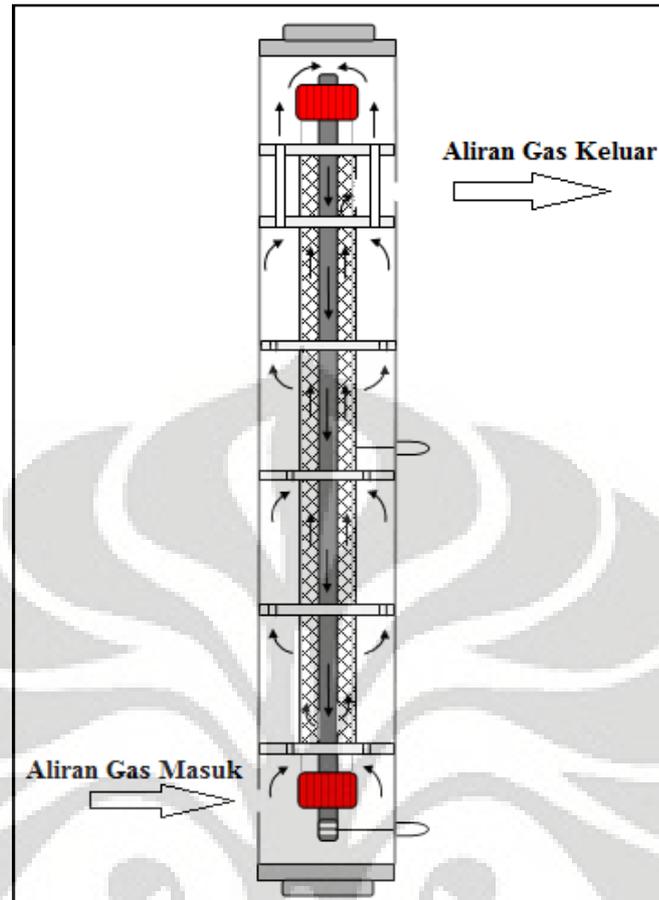
Rancangan reaktor yang dibangun memiliki konfigurasi aliran sebanyak 3 kali untuk aliran gas yang akan bereaksi didalam reaktor plasma, yakni 1 kali aliran diantara *shell* dan *tube*, 1 kali diantara kedua elektroda dan 1 kali didalam elektroda tengah. Jumlah aliran tersebut dibuat dengan latar belakang untuk meningkatkan waktu tinggal aliran gas umpan di dalam reaktor dengan membuat panjang lintasan gas yang melalui daerah reaksi plasma disepanjang elektroda menjadi lebih panjang dan lebih sering. Sehingga waktu terpapar antara gas reaktan dengan kondisi elektroda bermuatan listrik tinggi yang semakin lama akan meningkatkan jumlah energi yang diterima oleh gas reaktan agar semakin mudah menyelesaikan reaksi ketika gas reaktan bereaksi dengan plasma non-termal, sesuai dengan hasil penelitian (Wang, Yan, Jin, & Cheng, 2009).

Penejelasan lebih lanjut, dilihat dari pembuatan pola aliran zig-zag yang akan membuat tambahan waktu tinggal berdasarkan panjangnya jalur alir yang akan dilalui oleh gas reaktan sejak masuk kedalam rangkaian reaktor. Hal ini akibat terjadinya penambahan panjang jalur yang dilalui oleh gas reaktan pada laju alir yang tetap menyebabkan waktu persiapan gas reaktan sebelum masuk ke dalam bagian *discharge gap* menjadi lebih lama sehingga waktu kontak didaerah medan listrik tinggi pada wilayah elektroda jala lebih lama dan menerima lebih banyak energi tiap molekul gas reaktan.

Daerah paparan utama plasma pada hasil rancang bangun reaktor ini, yakni sepanjang daerah dalam *tube* yang berada diantara dua elektroda, yakni elektroda inti dan elektroda jala. Elektroda inti yang digunakan berupa batang *stainless steel* (SS) jenis SS-316 berongga dengan sisi bawah tertutup dan diberi ulir untuk baut. Elektroda jala terbuat dari *stainless steel* jenis SS-304 berukuran 60 *mesh* yang diselubungkan pada gelas dielektrik (borosilikat).

Material dielektrik yang digunakan ialah gelas boronsilikat, dengan sifat yang dapat tahan hingga suhu 200⁰C, *inert* dengan gas reaktan yang akan digunakan, serta mudah didapatkan dan dibentuk menjadi bentuk tabung untuk digunakan sebagai *tube* pada reaktor ini. Kedua elektroda tersebut terpisahkan oleh penghalang dielektrik yang membentuk ruangan paparan plasma yang disebut *discharge gap* dimana reaksi utama plasma terjadi. Rentang *discharge gap* ialah selisih diameter *tube* dan elektroda inti, yakni untuk reaktor dengan diameter dielektrik 12 mm, *discharge* sebesar 1,75 mm dan reaktor dengan diameter dielektrik 14 mm, *discharge* sebesar 2,75 mm dengan ketebalan dielektrik yang sama yakni 2 mm.

Untuk pengaturan arah aliran agar mendapatkan pencampuran sempurna pada aliran pertama, reaktor menggunakan sistem penyangga (*buffle*) yang akan membuat pola aliran gas didalam reaktor menjadi pola *zig-zag* dan membuat pencampuran yang lebih baik. Pengaturan pola aliran akan membuat arah gerakan gas menjadi lebih acak dan memicu untuk terus bertumbukan dengan daerah sekitaran elektroda yang terpengaruh dengan daerah muatan listrik. Sehingga akan memberikan perlakuan awal terhadap gas reaktan yang baru masuk reaktor untuk terpapar energi agar proses reaksi plasma dapat berlangsung lancar. Hal ini berkaitan dengan kondisi bahwa derajat ionisasi plasma dingin jauh lebih rendah daripada plasma termal yang mempunyai derajat ionisasi hampir 100%, karena disamping radikal bebas, metastabil, ion-ion dan elektron, masih banyak terdapat molekul yang tidak terionkan pada plasma dingin (Wang, et al, 2009).



Gambar 4.1 Skematis Aliran Dalam Rancangan Reaktor Plasma

Dampak lain dari penggunaan elektroda dengan konfigurasi sebanyak 3 aliran gas reaktan (Gambar 4.1) akan menyebabkan fenomena pendinginan elektroda yang lebih baik karena kontak gas yang lebih intensif, sehingga dengan elektroda yang lebih dingin akan sangat menguntungkan dilihat dari konsumsi energi dan umur pemakaian dielektrik menjadi lebih lama, yang dibuat dari bahan borosilikat, sehingga tidak mudah pecah karena adanya fenomena pemanasan setempat.

Pada penelitian ini akan fenomena yang diuji terhadap reaktor ialah uji nyala plasma fisik dan uji kinerja plasma menggunakan sumber energi listrik untuk konversi LPG menjadi hidrokarbon lainnya. Sehingga fenomena yang timbul akan dianalisis untuk mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja dari reaktor DBD yang telah dirancang terhadap proses reaksi plasma dalam mengkonversi gas reaktan sehingga diharapkan nantinya didapatkan kondisi operasi yang optimal.

4.2 Pengujian Kinerja Awal Reaktor

Pengujian awal terhadap reaktor merupakan hal yang pertama kali dilakukan untuk mengetahui apakah reaktor dapat membangkitkan plasma dengan sejumlah parameter yakni fenomena plasma yang terbentuk, perkiraan awal produk keluaran dan kualitas kualitatif dari plasma yang terjadi.

Umpan yang digunakan sejak dari pengujian awal hingga uji konversi ialah LPG gas *cardtrige* 250 g dominan 95% butane dan LPG tabung 12 kg yang memiliki komposisi 70% butane dan 30% butane. Reaktan dialirkan ke dalam reaktor dengan pertama kali dikontakkan dengan larutan KOH 0,5 M untuk menghilangkan pengotor mercaptan. Namun penggunaan LPG kaleng *cardtrige* 250 gr hanya digunakan pada awal percobaan dan dilanjutkan selama pengujian konversi menggunakan LPG 12 kg, hal ini akibat tekanan dari kaleng yang tidak kuat sehingga tidak dapat mempertahankan laju alirnya untuk waktu yang lama.

4.2.1 Analisis Keselamatan Reaktor Plasma DBD

Uji kebocoran yang dilakukan sebagaimana telah diterangkan pada bagian metodologi, dilakukan sebagai bagian melihat aspek keamanan untuk memastikan bahwa reaktor dapat bekerja dengan aman dan tidak tercampurnya gas didalam reaktor dengan pengotor dari luar selama proses reaktor bekerja. Hasil dari pengujian dengan metoda gelembung sabun memastikan bahwa tidak terdapat kebocoran yang berarti seluruh penyambungan material penyusun reaktor dan sambungan seluruh aliran gas yang berkaitan dengan reaktor telah kedap dan tersambung sempurna. Hal ini memastikan bahwa reaktor selama bekerja tidak akan terkontaminasi oleh masuknya udara dari luar atau bocornya gas dari dalam sistem reaktor. Sehingga tingkat keamanan dan kemurnian proses dapat dipertahankan selama didalam sistem reaktor plasma.

Salah satu keputusan yang didapat dari hasil analisis keselamatan ialah penempatan seluruh sistem reaktor plasma diletakkan di rumah asam dan seluruh sambungan listrik ditutup dengan lakban hitam. Penempatan reaktor plasma DBD diletakkan didalam rumah asam karena gas reaktan yang digunakan memiliki dampak bahaya bagi manusia dan mudah terbakar, dimana dengan tipe reaktor *continuoos* menyebabkan gas reaktan terus mengalir sehingga harus disediakan

saluran pembuang gas dapat mengalirkan gas keluar dari lab tempat pengujian berlangsung. Sehingga satu-satunya lokasi yang tersedia saluran gas pembuang dan disertai *exhaust-fan* ialah rumah asam. Sedangkan untuk penggunaan penutup lakban untuk mengurangi faktor resiko jika gas reaktan LPG yang telah keluar dari reaktor tidak terhisap sempurna oleh *exhaust-fan* aman terpapar dengan sambungan listrik yang bisa berpotensi muncul hubungan singkat. Sehingga penggunaan lakban menghilangkan resiko munculnya kebakaran akibat hubungan singkat pada kondisi terdapatnya paparan gas reaktan diatas batas konsentrasi yang dapat memicu kebakaran.

4.2.2 Analisis Uji Fisik Plasma DBD

Pengamatan kinerja paling awal yang dapat dianalisis terhadap reaktor plasma ini ialah seluruh fenomena plasma yang terjadi ketika reaktor plasma bekerja. Fenomena yang paling awal diamati ialah aspek visualisasi pembentukan plasma ketika reaktor dihidupkan sehingga memastikan bahwa reaktor DBD hasil rancang bangun dapat menghasilkan plasma untuk selanjutnya dapat diuji dengan mengkonversi gas reaktan. Fenomena ini penting untuk mengetahui pada tegangan berapa plasma telah terbentuk, dimana titik dimana plasma telah terbentuk berarti telah terputusnya ikatan atom dan molekul dari reaktan gas sehingga mulai terionisasi.

Pengamatan terhadap fenomena ini dilakukan dari tegangan 70 V hingga 220 V tegangan *input* NST atau rentang 4000 hingga 15000 V tegangan *output* trafo NST dan menggunakan laju alir dari 500-2500 cc/menit. Proses pengujian dilakukan dari tegangan rendah dan naik terus sehingga dapat diperhatikan fenomena yang terjadi pada tiap tegangan hingga terus dinaikkan sampai batas lucutan pijar plasma yang terbentuk menjadi liar/tidak terkontrol pada daerah luar elektroda jaring.

Pada tegangan 70 V *input* NST mulai terdengar bunyi pelan “dengung” plasma, yang menandakan bahwa proses pelepasan elektron sudah mulai terjadi. dan bunyi tersebut makin terdengar dengan peningkatan tegangan. Bunyi “dengung” plasma terdengar jelas pada tegangan 130 V *input* NST, yang berarti tegangan tersebut menjadi titik mulainya terjadi lucutan plasma secara kontinyu

antara kedua elektroda, sehingga menjadi titik tegangan awal pengujian kinerja konversi reaktor plasma terhadap gas reaktan LPG. Sehingga pada tegangan tersebut digunakan sebagai titik pengambilan data konversi pertama.

Proses pengamatan fenomena plasma terus dilanjutkan dengan menaikkan tegangan keluaran trafo regulator hingga lucutan pijar plasma menjadi tidak terkontrol. Hingga tegangan 170 V mulai muncul lucutan pijar plasma dan mulai tidak terkendali dimulai dari tegangan 180 V dengan konsentrasi pijar plasma pada sekitar ujung elektroda tengah dan kawat penghubung elektroda dengan sumber listrik trafo NST.

Berikut tabel hasil pengamatan fenomena fisik plasma pada tiap tegangan pada pengoperasian reaktor plasma DBD.

Tabel 4.1 Fenomena yang Teramati Pada Pengoperasian Reaktor Plasma pada Beberapa Tegangan Untuk Kedua Reaktor Hasil Rancang Bangun

Tegangan Primer NST	Tegangan Sekunder NST	Fenomena Plasma yang Teramati
70 V	± 4772 V	Terdengar bunyi dengungan pelan, tercium bau khas LPG dan belum ada tampilan cahaya sepanjang elektroda
130 V	± 8863 V	Bunyi dengung mudah terdengar, mulai tercium bau seperti aldehid
170 V	± 11590 V	Lucutan listrik sudah mulai terjadi, mulai muncul tampilan sepanjang elektroda.
180 V	± 12272 V	Lucutan listrik yang tidak lazim sangat sering terjadi.
220 V	± 15000 V	Lucutan listrik tidak terkontrol dengan yang bersifat merusak, berakibat pecahnya dielektrik reaktor 14 mm

Lucutan yang seharusnya untuk jenis reaktor plasma DBD ialah mengalir sepanjang wilayah *discharge gap* antar dua elektroda dalam bentuk *microdischarge* dan tidak tampak kasat mata dan teramati dalam bentuk bunyi “dengungan” dan terkadang memancarkan pancaran warna tertentu. Namun jika terjadi lucutan pijar plasma antara ujung teratas elektroda jala yang mengalir langsung ke elektroda batang melalui celah lubang keluaran produk gas yang tidak tertutupi tabung dielektrik (pada bagian keluaran reaktor, dekat *nipple* produk),

menandakan bahwa batas terbentuknya plasma sepanjang daerah discharge gap telah terlampaui.

Intensitas lucutan pijar plasma menjadi batas tegangan kritikal pengoperasian reaktor plasma agar reaktor tidak mengalami kerusakan karena tidak mampu menahan suhu ekstrim akibat pijar plasma tersebut. Hal ini terbukti dengan terjadinya kerusakan reaktor berupa pecahnya bagian dielektrik kaca boronsilikat pada reaktor 14 mm dan tegangan masukan dari trafo regulator maksimum yakni 220 V (sekitar tegangan 15 kV dari trafo NST) akibat lucutan pijar api plasma yang tidak terkendali disamping telatnyaantisipasi untuk mematikan sumber listrik (Gambar 4.2).



Gambar 4.2 Pembentukan lucutan pijar api plasma

Analisis terjadinya lucutan pijar plasma akibat terdapatnya jarak kontak sentuh yang tidak dilindungi oleh material *buffle* yakni bagian ujung reaktor antara kedua ujung elektroda yakni antara elektroda jala dan elektroda batang. Akibat terdapatnya ujung elektroda yang tidak ditutupi apapun, maka ketika perbedaan potensial tegangan yang tinggi menyebabkan gas sekitar elektroda akan terionisasi dan tereksitasi. Sehingga sifat konduktor gas akan meningkat yang mempermudah lompatan elektron dalam bentuk lucutan listrik.

Untuk mengatasinya dengan pemotongan nipple yang berlebih masuk kedalam reaktor dan penggantian nipple SS pada bagian masukan reaktor dengan

material non-SS. Sedangkan untuk pembuatan reaktor baru ukuran 14 mm dibuat dengan jarak antara ujung elektroda jala dan elektroda batang diperbesar dari sebelumnya dan tidak ada elektroda jala yang berlebih keluar dari *buffle* pembatas-nya. Dan ini terbukti dengan dilakukan pengujian uji plasma fisik kembali pada semua reaktor yang telah dimodifikasi *nipple* dan reaktor plasma yang baru dibuat dengan hasil pengamatan kualitatif lucutan listrik yang teramati menjadi lebih jarang terjadi.

Sehingga, untuk menjaga keamanan selama reaksi, kemunculan lucutan pijar api plasma dihindari maka untuk pengujian kinerja konversi reaktor, digunakan tegangan 170 V dimana titik tersebut sudah menjadi tegangan ekstrim dimulainya lucutan pijar plasma. Sehingga kedua tegangan yakni 130 dan 170 V tegangan primer trafo tegangan tinggi yang digunakan untuk pengujian konversi LPG menggunakan reaktor plasma DBD hasil rancang bangun ini, namun tegangan munculnya plasma dimulai pada tegangan 70 V keluaran trafo regulator.

4.2.3 Konsumsi Daya Reaktor

Sumber listrik yang digunakan untuk membangkitkan plasma pada reaktor LPTD ini ialah sumber listrik DC yang selanjutnya dirubah oleh inverter menjadi arus AC. Sumber listrik dan inverter tergabung menjadi 1 perangkat UPS dengan jenis *ersys UPS 600 VA*. Penggunaan sumber listrik DC yang selanjutnya dirubah menjadi AC berdasarkan analisis reaktor dapat bekerja sama maksimalnya dengan menggunakan sumber listrik AC langsung. Hal ini menjadikan peruntukan reaktor dapat menjadikan dalam penggunaannya dapat dipindah-pindahkan, tidak terpaku terhadap sumber listrik statis seperti PLN, serta dapat digunakan dalam skala kecil. Berikut hasil pengukuran konsumsi daya reaktor dengan sumber listrik inverter:

Tabel 4.2 Pengukuran konsumsi daya reaktor sumber listrik inverter selama 5 menit

Reaktor	V_{AC}	A_{AC}	Daya (W)	Konsumsi energi	Frekuensi
12 mm	130,2	0,16129	21	1,104	307
	170,2	0,146886	25	1,533	308
14 mm	130,3	0,345357	45	2,538	305
	170,3	0,317087	54	2,24	308

Seluruh hasil pengukuran menunjukkan konsumsi daya setelah dinyalakannya reaktor selama 5 menit dengan variasi voltase yang digunakan pada nilai 130 V dan 170 V. Semua kondisi pengujian dilakukan sesuai kondisi yang akan digunakan pada percobaan menggunakan reaktan LPG. Dilihat dari daya listrik tersebut, terjadi kenaikan hampir dua kali lipat antara daya reaktor 12 mm dan reaktor 14 mm. Hal ini membuktikan bahwa peningkatan geometri dari reaktor akan meningkatkan daya yang harus digunakan dalam pemakaiannya.

Selain naiknya daya yang dibutuhkan, kenaikan yang jelas terlihat lainnya ialah konsumsi energi, yakni akumulasi jumlah konsumsi energi listrik oleh reaktor selama 5 menit. Namun yang tidak mengikuti tren kenaikan ialah nilai arus listrik, dimana justru pada reaktor yang memiliki diameter yang lebih tinggi mengalami penurunan arus listrik. Hal ini diakibatkan meningkatnya luas permukaan reaktor, sehingga menghasilkan peningkatan hambatan yang harus dilalui oleh aliran listrik tersebut.

Namun hasil pengukuran tersebut masih terdapat perbedaan tiap pengambilan data, namun secara umum hasil pengukurannya memiliki tren peningkatan konsumsi listrik untuk pengoperasian pada tiap reaktor. Aspek utama analisis konsumsi energi dipengaruhi oleh besarnya tegangan yang masuk ke dalam reaktor, dimana semakin besar sumber energi yang masuk, maka konsumsi listrik akan meningkat pula sedangkan daya dari reaktor dipengaruhi oleh aspek geometri dari reaktor. Hal tersebut berarti bahwa peningkatan tegangan merupakan faktor utama dalam pembangkitan kondisi plasma oleh reaktor.

4.2.4 Uji Kualitatif Awal Produk Reaktor

Rancang bangun reaktor plasma DBD dalam melakukan reaksi kimianya menggunakan kondisi yang cukup ekstrim, yakni pada kondisi tegangan listrik menengah, yakni kisaran diatas 10 kV dan efek reaksi plasma yang merupakan jenis reaksi berantai dan kompleks dengan umpan gas yang dimasukkan, sangat mungkin terjadi sejumlah gas berbahaya pada produk gas keluarannya.

Hal ini berlandaskan hasil pengujian yang didapatkan dari penelitian bahwa *by-produk* seperti C₂-Hidrokarbon (C₂H₂, C₂H₄), *methane* dan CO₂ pada produk keluaran reaktor DBD relatif cukup tinggi, yakni mencapai 8% and 2.5%

(Rico, 2010). Sehingga terdapat kemungkinan untuk menghasilkan sejumlah gas berbahaya. Berikut hasil dari percobaan awal yang telah kami lakukan :

Tabel 4.3 Pengujian kualitatif reaktor 1 dengan umpan lpg dan sumber listrik PLN

Percobaan	Tegangan (V)	Arus (mA)	Flow Rate (L/menit)	Hasil Percobaan
1	250	250	0,75	CO belum terdeteksi, tercium bau seperti aldehid
			1	CO terdeteksi 132 ppm, bau seperti aldehid makin kuat
2	250	240	1	CO terdeteksi 73 ppm, bau seperti aldehid kuat
			1,5	CO terdeteksi 350 ppm, bau seperti aldehid kuat

Dari hasil tersebut sudah menunjukkan bahwa reaktor telah bekerja dan diperlukan pengujian lebih lanjut jika menginginkan hasil yang lebih terperinci. Terbentuknya CO disebabkan adanya oksigenat yang berasal dari larutan KOH yang berfungsi sebagai pelarut mercaptan akibat reaksi redoks asam basa. Sehingga saat aliran gas masuk, sejumlah kecil kandungan pelarut KOH yakni H₂O terbawa masuk akibat terjadinya reaksi kontak dengan gas masukan dimana kesetimbangan pelarut dengan zat terlarutnya bergeser sesuai asas hukum Rault. Maka akan ada sejumlah kecil partikel H₂O yang masuk kedalam reaktor, menciptakan terbentuknya oksigenat ketika bereaksi selama kondisi plasma selama didalam reaktor. Dengan kemungkinan reaksi ialah H₂O yang dalam kondisi plasma akan terpecah menjadi ion-ion OH⁻ sehingga ion tersebutlah yang bereaksi dengan LPG menjadi senyawaan CO pada produk keluarannya.

Namun tujuan utama mengalirkan LPG kedalam larutan KOH dimaksudkan untuk mereaksikan antara mercaptan yang ada dari sumber gas umpan LPG. Hal ini karena mercaptan ialah suatu persenyawaan asam, sehingga dengan penambahan suatu senyawa basa dalam alirannya akan membuat mercaptan akan bereaksi pada larutan tersebut secara redoks sehingga keluarannya diharapkan tanpa mercaptan lagi. Dan hal tersebut terbukti dengan intensitas bau mercaptan berkurang secara kualitatif dibanding tanpa kontak KOH.

4.3 Uji Kinerja Reaktor Plasma DBD untuk Konversi LPG

Uji konversi menggunakan gas LPG dilakukan untuk analisis kuantitatif terhadap kinerja reaktor DBD dalam bekerja untuk mengkonversi gas. Dengan

parameter utama terjadinya dekomposisi ialah perubahan komposisi antara gas masukan tanpa reaksi plasma yang terjadi dengan produk gas yang telah diplasmakan menggunakan reaktor ini. Sehingga data pertama yang didapatkan ialah hasil pengukuran analisis gas terhadap masukan LPG yang masuk kedalam reaktor dengan komposisi lengkap gas reaktan ialah sebagai berikut :

Tabel 4.4 Komposisi Komponen Gas Reaktan (Elpiji) sebelum dikonversi dengan Reaktor DBD menggunakan analisis GC

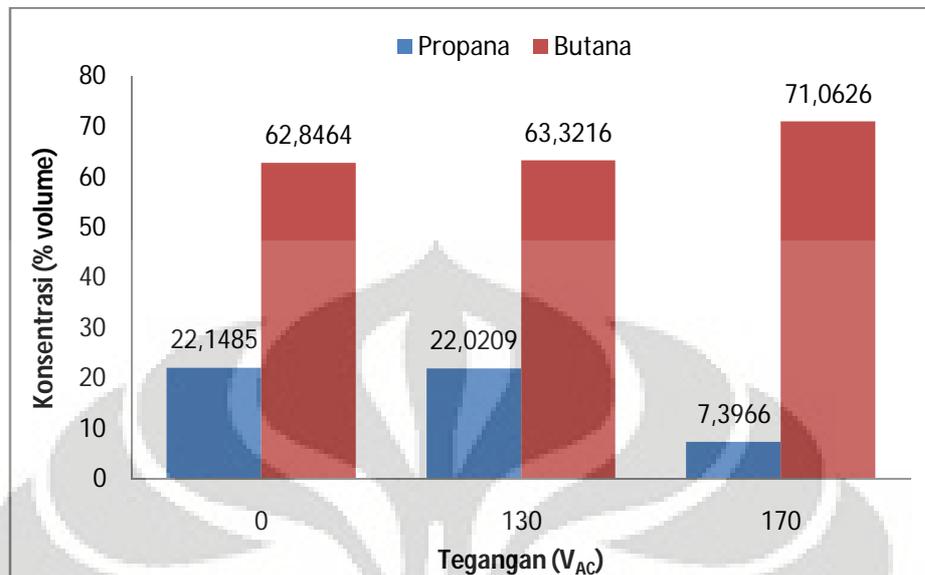
<i>No</i>	<i>Waktu</i>	<i>Area</i>	<i>Konsentrasi</i>
1	0.248	55649	22.1485
2	0.805	2411	0.9597
3	1.577	1786	0.7107
4	2.15	157905	62.8464
5	6.307	18062	7.1888
6	8.083	15442	6.1459
TOTAL		251255	100

Terdapat dua konsentrasi utama yang terbaca pada hasil uji GC dan sesuai dengan konsentrasi utama penyusun gas LPG yang digunakan dalam percobaan ini ialah butane dan berikutnya Propane. Hasil pembacaan tersebut diverifikasi dengan informasi situs resmi Pertamina sebagai produsen LPG, bahwa kandungan LPG penyusun utama ialah butane dan propane, sehingga melihat konsentrasi yang terbaca oleh hasil pembacaan GC maka pada waktu retensi 0,2 menit ialah Propane, dan waktu retensi menit ke 2 ialah Butane yang sesuai dengan spesifikasi utama LPG yang digunakan pada percobaan ini.

Dengan melihat bahwa komposisi tertinggi ialah 62,85 % dan 22,15 % serta sisanya ialah pengotor, menunjukkan bahwa kedua konsentrasi utama tersebut ialah butana dan propana. Pengotor lainnya tidak dapat diidentifikasi akibat kekurangan data pembandingan yang valid dan tidak memiliki standar maupun informasi lengkap terhadap kandungan gas pengotor tersebut dari produk LPG tabung 12 kg. Alasan penggunaan hanya dua konsentrasi ialah pengujian konversi utama hanya melihat dari komponen utama dari gas reaktan yang dapat diketahui jenisnya dan diketahui perubahan konsentrasinya.

Data utama yang digunakan untuk menganalisis konversi dari reaktor plasma DBD ini ialah hasil pengukuran GC dari sejumlah kondisi operasi yang telah dibahas pada bab metodologi penelitian. Selanjutnya data yang dicatat disajikan dengan bentuk grafik batang antara tegangan primer NST dan

konsentrasi komponen utama gas reaktan yakni propana dan butana serta tiap grafik dibuat pada kondisi laju alir yang tetap.

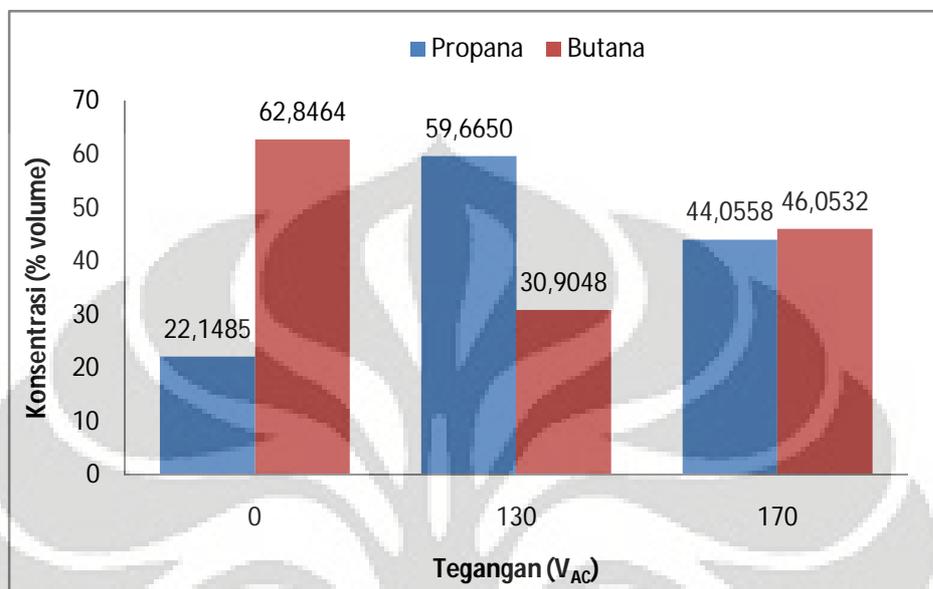


Gambar 4.3 Diagram Batang Hubungan Pengaruh Tegangan Primer NST Terhadap Konsentrasi Propana dan Butana Pada Reaktor 12 mm Laju Alir 500 cc/min.

Pada Gambar 4.3 diatas, tercatat fenomena terjadinya kecenderungan pengurangan konsentrasi propana dan peningkatan konsentrasi butana baik pada tegangan 130 dan 170 V_{AC} terhadap kondisi tanpa plasma pada tegangan 0 V_{AC} pada reaktor 12 mm. Hal ini diduga terjadi akibat peristiwa reaksi rekombinasi dari komponen hidrokarbon yang memiliki rantai yang lebih pendek dalam reaksi tersebut ialah komponen propana untuk membentuk komponen rantai yang lebih panjang yakni butana.

Terdapat kecenderungan bahwa pada laju alir reaktan 500 cc/menit dan diameter reaktor yang lebih kecil berpengaruh terhadap arah reaksi yang terjadi. Hal ini terkait dengan waktu tinggal yang dialami oleh gas reaktan lebih lama disamping kuat medan yang dialami oleh reaktan lebih tinggi sehingga jumlah energi yang diterima menjadi lebih banyak. Kondisi tersebut menyebabkan terus terjadinya ionisasi sehingga kecenderungan reaksi yang terjadi berupa rekombinasi hidrokarbon yang meningkatkan rantai yang lebih panjang (butana). Hal tersebut akibat energi pemutusan ionisasi yang telah terlampaui sehingga kondisi ionisasi menjadi jenuh yang menyebabkan berbagai komponen ion yang terbentuk merangkai kembali.

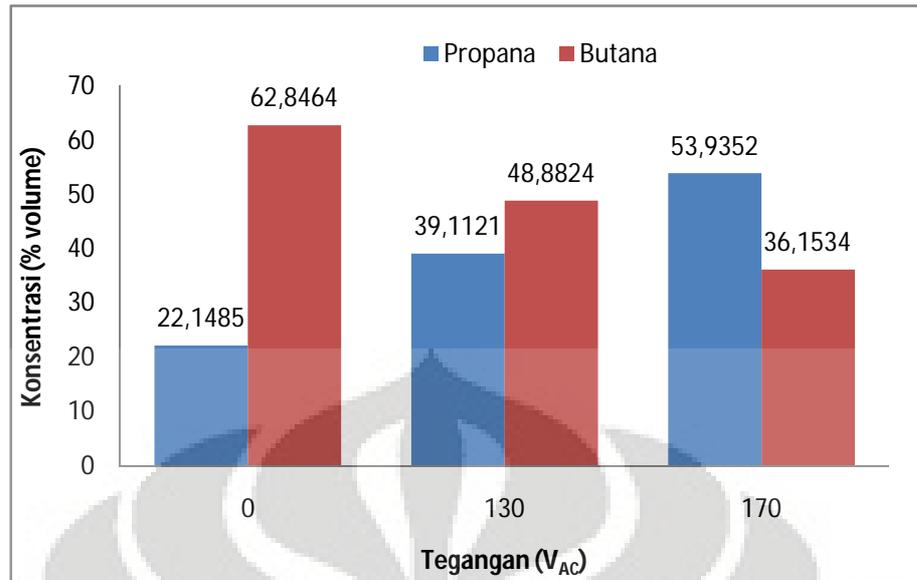
Namun hal tersebut tidak terjadi lagi baik pada laju alir yang sama namun diameter reaktor yang lebih besar yakni 14 mm, yang dapat dilihat pada Gambar 4.4, dimana fenomena yang terjadi ialah meningkatnya konsentrasi propana dan berkurangnya konsentrasi butana.



Gambar 4.4 Diagram Batang Hubungan Pengaruh Tegangan Primer NST Terhadap Konsentrasi Propana dan Butane pada Reaktor 14 mm Laju Alir 500 cc/min.

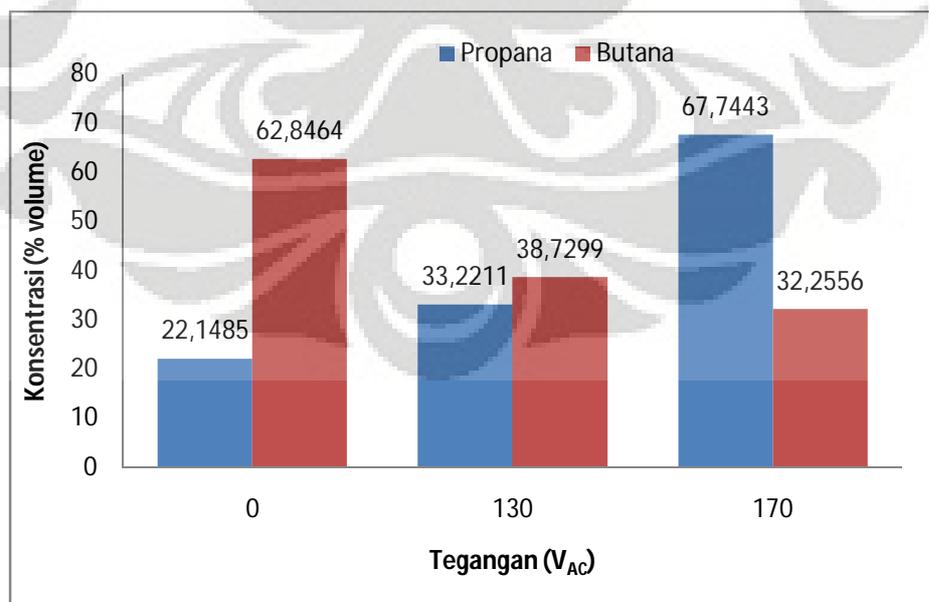
Diduga kuat, fenomena tersebut terjadi karena reaksi plasma terhadap senyawa hidrokarbon berupa reaksi pemutusan (*cracking*) terhadap rantai yang lebih panjang yakni butana. Peningkatan tegangan pada reaktor ini justru mengurangi konsentrasi propana yang meningkat. Hal ini besar dugaan akibat jumlah energi yang diterima oleh reaktan cukup tinggi diatas batas energi ionisasinya, namun tidak sampai membuat terjadi kondisi tinggi kandungan partikel ion untuk membuat terjadinya reaksi rekombinasi.

Untuk laju alir yang lebih tinggi, yakni 1500 cc/menit memiliki pola peningkatan konsentrasi propana dan berkurangnya konsentrasi butana. Fenomena tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.5 dibawah, dimana peningkatan tegangan akan berpengaruh terhadap peningkatan konversi gas reaktan. Hal tersebut terlihat dari meningkatnya perubahan masing-masing konsentrasi, dengan hasil propana makin banyak dihasilkan dan butana makin sedikit yang terbaca pada produk.



Gambar 4.5 Diagram Batang Hubungan Pengaruh Tegangan Primer NST Terhadap Konsentrasi Propana dan Butana pada Reaktor 12 mm Laju Alir 1500 cc/min.

Fenomena yang sama juga terjadi pada reaktor yang lebih besar, yakni diameter 14 mm dengan laju alir yang sama dengan fenomena berupa peningkatan konsentrasi propana, diikuti dengan berkurangnya konsentrasi butana. Hal ini pada gambar 4.6 dibawah ini. Pola saling terkaitnya antara propana dan butana pada reaksi plasma untuk mengkonversi LPG sudah jelas teramati, dimana jika salah satu komponen bertambah konsentrasinya maka komponen lainnya akan berkurang.



Gambar 4.6 Diagram Batang Hubungan Pengaruh Tegangan Primer NST Terhadap Konsentrasi Propana dan Butane pada Reaktor 14 mm Laju Alir 1500 cc/min.

Jika melihat fenomena tersebut, laju alir yang lebih tinggi membuat reaksi pemutusan menjadi dominan dan lebih stabil untuk mengdekomposisi masing-masing reaktan. Hal tersebut terkait dengan waktu tinggal didalam ruang *discharge gap* yang lebih sebentar sehingga energi yang diberikan kepada gas reaktan lebih sebentar sehingga yang bereaksi dengan molekul aktif hasil pembangkitan plasma hanya membuat terjadinya reaksi pemutusan rantai hidrokarbon. Penjelasan lebih rinci akan pada tiap variabel uji yang berhasil diamati terhadap konversi gas LPG yang merupakan bagian dari uji kinerja reaktor plasma DBD ini.

4.3.1 Analisis Pengaruh Tegangan Terhadap Konversi

Dari seluruh hasil fenomena konversi, peningkatan tegangan akan meningkatkan konversi terhadap gas reaktan LPG, dengan indikator meningkatnya selisih perubahan konsentrasi masing-masing komposisi reaktan yakni propana dan butana. Hal ini terkait dengan fakta bahwa derajat ionisasi meningkat seiring peningkatan daya masukan. Dan kemudian, semakin banyak radikal dan molekul meta-stabil yang terbentuk untuk bereaksi dengan gas reaktan. Hal lainnya yang terjadi dengan peningkatan tegangan masukan ialah, semakin naiknya densitas dan temperatur plasma yang dihasilkan sehingga kekuatan plasma akan semakin meningkat. Oleh karena itu, semakin besar nilai tegangan maka proses konversi akan lebih baik dan menghasilkan gas produk lebih banyak.

Sebagaimana hasil pengujian Istadi dan Amin (2007), konversi metana meningkat seiring peningkatan tegangan *discharge*. Dan hasil penelitian Wang, Yan, Jin, & Cheng (2009), konversi dari CH_4 dan CO_2 dan selektivitas terhadap CO dan H_2 meningkat seiring peningkatan daya masukan, sementara selektivitas terhadap C_2H_6 menurun dengan cukup tajam. C_2H_6 dalam hal ini merupakan produk samping (*by-product*). Jadi, hal ini menunjukkan semakin banyak *syngas* (produk utama) dan lebih sedikit produk samping terbentuk pada daya masukan yang lebih besar.

Penjelasannya peningkatan tegangan meningkatkan selektivitas produk dengan energi ionisasi yang tinggi akibat energi saat daya masukan tinggi akan

mengionisasi lanjut zat yang memiliki energi ionisasi yang lebih rendah. Sehingga hasil awal ionisasi akan bereaksi dengan zat yang memiliki energi yang lebih tinggi, dalam hal ini CO dan H₂.

Tabel 4.6 Energi Ionisasi dari Molekul-Molekul Berbeda

Molekul gas	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	CO	H ₂	O ₂	H ₂ O
Energi ionisasi (eV)	12,98	11,56	10,95	10,53	10,28	13,79	14,01	15,43	12,1	12,6

Keterangan: 1 eV = 96,487 kJ/mol

Sumber: Wang et.al., 2009

Dari penjelasan diatas, maka peningkatan tegangan secara khusus akan meningkatkan konversi, dalam hal ini konversi komponen butana menjadi komponen propana. Namun secara umum meningkatkan perubahan konsentrasi terhadap komponen kedua gas tersebut.

4.3.2 Analisis Pengaruh Laju Alir Terhadap Konversi

Laju alir umpan ialah parameter langsung yang berhubungan dengan waktu tinggal umpan didalam reaktor, dalam hal ini daerah discharge gap tempat terjadinya reaksi plasma, sehingga menjadi salah satu parameter yang menentukan dalam kinerja reaktor DBD. Semakin tinggi laju alir reaktan, maka waktu tinggal reaktan dalam reaktor akan semakin sebentar dan sebaliknya untuk laju alir reaktan yang lebih kecil.

Dalam menghitung waktu tinggal ini ditunjukkan pada rumus 4.1 di bawah:

$$\text{Waktu Tinggal (s)} = \frac{L}{F/A} \quad (4.1)$$

dengan L adalah panjang elektroda, F laju alir umpan, dan A adalah luas *cross-sectional area*. Sehingga diperoleh waktu tinggal umpan dalam reaktor pada laju alir umpan dan ukuran reaktor berbeda yang ditampilkan pada Tabel 4.7 di bawah.

Tabel 4.7 Waktu Tinggal Umpan Elpiji pada Laju Alir dan Ukuran Reaktor Berbeda-Beda

No	Panjang Gelas Dielektrik, L (cm)	Diameter Dalam Reaktor, D (cm)	Laju Alir Umpan Elpiji, F (cc/detik)	Luas <i>Cross Sectional-Area</i> , A (cm ²) [$\pi(D/2)^2$]	Volume Reaktor, cm ³ [A x L]	Waktu tinggal <i>discharge</i> (detik) [L/(F/A)]
1	36,5	1	8,33	0,785	28,7	3,44
2	36,5	(Reaktor 1)	25	0,785	28,7	1,15
3	36,5	1,2	8,33	1,13	41,3	4,95
4	36,5	(Reaktor 2)	25	1,13	41,3	1,65

Dari hasil fenomena pengujian konversi LPG, pada laju alir yang lebih tinggi (1500 cc/min) pola perubahan konsentrasi tiap komponen utama LPG lebih baik dan stabil terutama untuk memutus rantai hidrokarbon yang lebih panjang menjadi rantai yang lebih pendek. Sedangkan pada laju alir yang lebih rendah (500 cc/min) pola perubahan konsentrasi tidak stabil, yakni pada diameter reaktor yang lebih kecil terjadi peristiwa rekombinasi pembentukan butana namun pada reaktor yang lebih besar, peristiwa pemutusan rantai hidrokarbon berlangsung sesuai pola pada laju alir yang lebih tinggi.

4.3.3 Analisis Pengaruh Geometri Reaktor Terhadap Konversi

Geometri reaktor yang menjadi variabel uji ialah diameter reaktor atau diameter *tube* yang secara tidak langsung menguji jarak *discharge gap* dan volume reaktor. Semakin besar diameter reaktor maka semakin besar pula *discharge gap* dan meningkatnya volume reaktor. Hal ini berarti berpengaruh terhadap jumlah luasan area tempat terjadinya reaksi plasma.

Dari hasil pengamatan uji konversi LPG, pengaruh diameter reaktor antara ukuran 12 mm dan 14 mm terlihat jelas pada laju alir 500 cc/menit, yakni pada ukuran 12 mm terjadi reaksi rekombinasi hidrokarbon dengan indikator meningkatnya konsentrasi butana dan berkurangnya konsentrasi propana. Sedangkan pada laju alir dan tegangan lainnya, reaksi yang terjadi ialah reaksi pemutusan hidrokarbon.

Hal tersebut dipengaruhi oleh energi medan listrik dengan semakin kecil *discharge gap* maka energi yang ditimbulkan dari tumbukan-tumbukan antar molekul, elektron, dan spesi-spesi aktif dalam reaktor akan semakin besar pula, semakin kecilnya waktu tinggal dan pengaruh gelas dielektrik. Namun pengaruh

gelas elektrik tidak dapat diamati karena tidak menjadi variabel uji kinerja konversi. Sehingga dengan meningkatnya energi yang ditimbulkan maka reaksi yang terjadi akan menjadi arah reaksi rekombinasi hidrokarbon. Sedangkan pengurangan energi yang ditimbulkan namun diatas energi batas *discharge* menyebabkan reaksi pemutusan hidrokarbon.

4.4 Perbandingan Penggunaan Sumber Arus Listrik AC dan Inverter

Untuk perbandingan yang akan diuji ialah pengaruh penggunaan sumber arus listrik antara sumber arus DC yang dirubah menjadi arus AC menggunakan inverter dengan sumber arus AC langsung. Variabel yang akan dianalisis pengaruhnya ialah variabel konsumsi energi reaktor dan perbandingan hasil konversi antar dua sumber listrik tersebut. Sehingga yang menjadi variabel bebas hanya sumber tenaga listrik yang dilakukan.

4.4.1 Perbandingan Konsumsi Energi Reaktor Antar Sumber Listrik

Perbandingan konsumsi energi akan menganalisa dari aspek masukan energi listrik yang diberikan ke reaktor untuk membangkitkan plasma. Masukan energi tersebut akan menjelaskan jumlah energi yang dihasilkan dari masing-masing sumber energi. Berikut hasil pengukuran kedua sumber energi dari inverter dan sumber listrik PLN sebagai sumber listrik AC yang umum digunakan.

Tabel 4.8 Perbandingan daya dan konsumsi energi reaktor

Reaktor	tegangan	Daya (W)		Konsumsi energi	
		Listrik PLN	Inverter	Listrik PLN	Inverter
1	130	11	21	0,9	1,104
	170	18	25	1,581	1,533
2	130	10,43	45	0,841	2,538
	170	17	54	1,408	2,57

Dari hasil perbandingan daya dari kedua sumber listrik untuk memasok energi pembangkitan plasma, hasil yang lebih besar dihasilkan oleh sumber listrik inverter. Hal ini karena spesifikasi inverter menghasilkan arus yang lebih besar dan frekuensi yang lebih besar. Peningkatan daya tersebut akan meningkatkan secara umum konsumsi energi dari reaktor pada tiap tegangan, sehingga jumlah energi yang akan disalurkan oleh kedua elektroda akan meningkat. Hal ini terjadi

akibat sumber energi inverter bersifat berlebih menghasilkan energi listrik karena pengaruh frekuensi yang dihasilkannya serta sifat dari reaktor yang cenderung menghisap energi listrik selama proses pembangkitan plasma.

Sehingga penggunaan sumber energi inverte cenderung untuk menghabiskan daya yang terkandung dari sumber aki. Sehingga lebih boros dan mengurangi masa pakai dari aki. Namun untuk mengatasi hal tersebut dapat menggunakan sumber aki yang berdaya lebih besar agar efek menghisap energi dari reaktor dapat di-*supply* oleh aki dengan daya yang lebih besar.

4.4.2 Perbandingan Hasil Konversi Antar Sumber Listrik

Pada analisis bagian ini, akan berfokus melihat pengaruh penggunaan energi listrik terhadap hasil konveri yang terjadi pada tiap tegangan, laju alir dan geometri reaktor. Berikut merupakan hasil perbandingan langsung kedua sumber listrik dan hasil konversi masing-masing :

Tabel 4.9 Perbandingan Hasil Konversi Antar Sumber Listrik

Jenis Reaktor	Laju Alir (cc/menit)	Tegangan (V)	Konsentrasi Propana (C3H8)		Konsentrasi Butana (C4H10)		
			Listrik PLN	Listrik Inverter	Listrik PLN	Listrik Inverter	
1	500	170	1.20	7,3966	74.85	71,0626	
		130	65.35	22,0209	26.26	63,3216	
	1500	170	61.91	53,9352	28.77	36,1534	
		130	66.94	39,1121	21.49	48,8824	
	2	500	170	43.27	44,0558	45.30	46,0532
			130	54.62	59,6650	35.52	30,9048
1500		170	57.43	67,7443	34.49	32,2556	
		130	40.35	33,2211	47.64	38,7299	

Terlihat bahwa secara umum senyawaan butane terkonversi lebih tinggi pada reaktor yang menggunakan sumber arus listrik DC yang dirubah menjadi AC dengan menggunakan inverter dibanding dengan menggunakan sumber listrik AC langsung. Namun hal berbeda terjadi pada perbedaan konversi yang terjadi pada propana, dimana tidak terdapat kecenderungan yang sama, ada yang nilai konversi lebih tinggi menggunakan inverter dan ada yang lebih tinggi menggunakan listrik PLN. Namun secara kecenderungan, dominan konversi akan lebih tinggi pada sumber listrik inverter.

Penjelasan hal tersebut terkait dengan lebih tingginya energi listrik yang disediakan oleh sumber listrik inverter dibanding sumber listrik PLN yang masuk ke dalam reaktor untuk membangkitkan plasma. Sehingga jumlah energi *discharge* yang diberikan tiap luas wilayah *discharge gap* lebih besar terhadap gas reaktan yang melalui wilayah reaksi tersebut. Lebih tingginya energi karena inverter, dalam hal ini UPS menghasilkan listrik dengan nilai ampere dan frekuensi yang lebih besar, dimana berdasarkan sifat listrik, suatu listrik yang memiliki arus dan frekuensi yang lebih besar akan memberikan energi yang lebih besar dibanding dengan arus dan frekuensi yang lebih rendah.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini, kesimpulan hasil rancang bangun reaktor plasma jenis non-termal dengan metoda *dielectric barrier discharge* (DBD) ialah :

- 1) Hasil rancangan reaktor memiliki konfigurasi aliran sebanyak 3 kali dengan skema aliran *U* dengan volume reaktor 28,7 cc dan 41,3 cc.
- 2) Reaktor plasma non-termal jenis DBD dapat digunakan untuk mengkonversi LPG menjadi hidrokarbon lain.
- 3) Tegangan pembangkitan plasma untuk pengujian konversi LPG menggunakan reaktor plasma dimulai pada tegangan 70 V pada tegangan keluaran trafo regulator dan batas munculnya pijar api plasma pada tegangan 170 V tegangan keluaran trafo regulator.
- 4) Konversi LPG yang terjadi berupa perubahan konsentrasi propana dan butana yang saling berkaitan dipengaruhi laju alir reaktan, tegangan masukan reaktor dan jarak discharge reaktor.
- 5) Konsumsi energi pada reaktor 12 mm sebesar 1,1 – 1,5 Whr dan reaktor 14 mm sebesar 2,5 Whr
- 6) Sumber listrik yang berasal dari UPS/Inverter memberikan jumlah energi listrik yang lebih besar dibanding sumber listrik arus AC akibat lebih tingginya nilai frekuensi arus yang dihasilkan.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian rancang bangun reaktor plasma DBD, terdapat sejumlah kekurangan yang selanjutnya diperlukan penyempurnaan pada penelitian selanjutnya. Berikut saran peneliti untuk penyempurnaan yang bisa dilakukan :

- 1) Perlunya dilakukan perbaikan rancangan reaktor plasma yang meliputi : pencegahan lucutan listrik yang tidak terkontrol, mekanisme preparasi gas reaktan yang lebih tepat guna dan penyediaan alat uji yang tersambung langsung

- 2) Perlunya dilakukan study lebih lanjut dan komprehensif terhadap optimalisasi kinerja reaktor dan konversi gas reaktan.



DAFTAR PUSTAKA

- Anonim.** (2004). *Bubblers*. <http://www.ilpi.com/inorganic/glassware/bubbler.html>. Diakses 18 Oktober 2009.
- Bardos, Ladislav** dan Barankova, Hana. (2009). Plasma Processes at Atmospheric and Low Pressures. *Vacuum* 83. 522-527.
- Eliezer, S** dan Eliezer, Y. (2001). *The Fourth State of Matter: An Introduction to Plasma Science* (2nd ed.). Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing.
- EPA.** (Februari 2005). Using Non-Thermal Plasma to Control Air Pollutants. *EPA-456/R-05-001*
- Francke, K.P.,** R. Rudolph dan H. Miessner. (2003). Design and Operating Characteristics of a Simple and Reliable DBD Reactor for Use with Atmospheric Air. *Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 23, No. 1, March 2003.*
- Gomez, E.,** D. Amutha Rani., C.R. Cheeseman., D. Deegan., M. Wise., A.R. Boccaccini. (2009). "Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review", *Journal of Hazardous Materials* 161. 614–626.
- Istadi,** dan Amin, N.A.S. (2007). Catalytic-Dielectric Barrier Discharge Plasma Reactor For Methane And Carbon Dioxide Conversion. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 2(2-3), 2007, 37-44.
- Istadi.** (2006). Aplikasi Teknologi Hibrid Katalisis-Plasma Dalam Pengembangan Reaktor Kimia Masa Depan. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 1(2), 2006, 15-20.
- Kogelschatz,** Ulrich. (2003). Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 23, No.1, March 2003, 1-46.*
- Lieberman, Michael A.,** dan Lichtenberg, Allan J. (2005). *Principles Of Plasma Discharges And Materials Processing* (2nd Ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.

- Meichsner, J.** (2005). Low Temperature Plasmas. *J Meichsner: Low Temperature Plasmas, Lect. Notes Phys.* 670, 95-116.
- Rico, V.J.,** Hueso, J.L., Cotrino, J., & Gonzalez-Elipe, A.R. (2010). Evaluation of Different Dielectric Barrier Discharge Plasma Configurations As an Alternative Technology for Green C1 Chemistry in the Carbon Dioxide Reforming of Methane and the Direct Decomposition of Methanol. *J. Phys. Chem. A* 2010, 114 4009-4016.
- Roth, J Reece.** (2001). *Industrial Plasma Engineering Volume 2: Applications to Nonthermal Plasma Processing.* Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing.
- Wang, Q.,** Yan, B.H., Jin, Y., Cheng, Yi. (2009). Investigation of Dry Reforming of Methane in a Dielectric Barrier Discharge Reactor. *Plasma Chem Plasma Process* (2009) 29:217–228.
- Yamamoto, Toshiaki** dan Okubo, Masaaki. (2004). Non-thermal Plasma Technology. *Handbook of Environmental Engineering, Volume 5:Advanced Physicochemical Treatment Technologies.* Totowa, NJ: The Humana Press Inc.
- Yun Yang.** (2003). Direct Non-oxidative Methane Conversion by Non-thermal Plasma: Experimental Study. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 23, No. 2, June 2003.
- Zhu Ai-min,** Zhang Xiu-ling, Gong Wei-min, Zhang Bao-an. (1999). Synergism of Plasma and Catalyst on the Dehydrogenative Coupling of Methane. *Plasma Science & Technology*, Vol. 1, No. 1.
- Plasma (physics). (n.d.). 2 Juni, 2010.
[http://www.wikipedia.org/wiki/Plasma_\(physics\).html](http://www.wikipedia.org/wiki/Plasma_(physics).html)
- Pertamina. (n.d.). 24 Mei 2010
sppbe.pertamina.com/files/faq.asp

LAMPIRAN

Seluruh hasil pengambilan data GC pada penelitian reaktor plasma non-termal DBD ini menggunakan gas umpan elpiji dari sumber tabung LPG 12 kg produksi dengan sumber listrik DC yang dirubah menjadi AC dengan menggunakan inverter. Berikut hasil pengambilan data:

1. Hasil pencatatan data pembacaan GC gas LPG tanpa menyalakan reaktor sebagai data komposisi gas reaktan. Data ini menjadi rujukan utama pembandingan tiap perubahan konsentrasi gas produk.

No	Time	Area	MK	IDNO	Concentration	Name
1	0.248	55649	S		22.1485	
2	0.805	2411	T		0.9597	
3	1.577	1786			0.7107	
4	2.15	157905	V		62.8464	
5	6.307	18062			7.1888	
6	8.083	15442	V		6.1459	

2. Hasil pencatatan data kromatogram GC pada :

- Reaktor 1 (diameter gelas dielektrik 12 mm)
- Laju alir umpan: 500 cc/menit
- Tegangan: 170 V_{AC}

No	Time	Area	MK	IDNO	Concentration	Name
1	0.242	3684			7.3966	
2	0.658	108	v		0.2181	
3	0.817	592	v		1.2009	
4	1.563	3099			6.2819	
5	2.33	35052	sv		71.0626	
6	6.465	3624			7.3463	
7	8.233	3183	v		6.4539	
8	10.067	20			0.0396	

3. Hasil pencatatan data kromatogram GC pada :

- Reaktor 1 (diameter gelas dielektrik 12 mm)
- Laju alir umpan: 500 cc/menit
- Tegangan: 130 V_{AC}

No	Time	Area	MK	IDNO	Concentration	Name
1	0.03	830			0.3121	
2	0.26	58540	sv		22.0209	
3	0.665	200	t		0.075	
4	0.815	2673	tv		1.007	
5	1.583	1802			0.6778	
6	2.138	168338	v		63.3216	
7	6.275	18001			6.7713	
8	8.024	15457	v		5.8143	

4. Hasil pencatatan data kromatogram GC pada :

- Reaktor 1 (diameter gelas dielektrik 12 mm)
- Laju alir umpan: 1500 cc/menit
- Tegangan: 170 V_{AC}

No	Time	Area	MK	IDNO	Concentration	Name
1	0.038	589			0.5686	
2	0.257	55826	sv		53.9352	
3	0.815	464	t		0.4482	
4	1.675	1309			1.2643	
5	2.335	37421	sv		0.6778	
6	2.138	168338			36.1534	
7	8.208	4123	v		3.6471	

5. Hasil pencatatan data kromatogram GC pada :

- Reaktor 1 (diameter gelas dielektrik 12 mm)
- Laju alir umpan: 1500 cc/menit
- Tegangan: 130 V_{AC}

No	Time	Area	MK	IDNO	Concentration	Name
1	0.037	311			0.5207	
2	0.263	23325	sv		39.1121	
3	0.822	380	t		0.6374	
4	1.75	526			0.8824	
5	2.347	29011	v		48.8824	
6	6.4823	3271			5.4874	
7	8.217	2812	v		4.716	

6. Hasil pencatatan data kromatogram GC pada :

- Reaktor 2 (diameter gelas dielektrik 14 mm)

- Laju alir umpan: 500 cc/menit
- Tegangan: 170 V_{AC}

No	Time	Area	MK	IDNO	Concentration	Name
1	0.032	44			0.2312	
2	0.255	8365	sv		44.0558	
3	0.817	99			0.5241	
4	1.892	212			1.1184	
5	2.377	8744	v		46.0532	
6	6.532	840			4.4219	
7	8.233	683	v		3.5951	

7. Hasil pencatatan data kromatogram GC pada :

- Reaktor 2 (diameter gelas dielektrik 14 mm)
- Laju alir umpan: 500 cc/menit
- Tegangan: 130 V_{AC}

No	Time	Area	MK	IDNO	Concentration	Name
1	0.042	233			0.7829	
2	0.263	17757	sv		59.665	
3	0.818	105	t		0.3528	
4	1.857	333			1.12	
5	2.38	9198	v		30.9048	
6	5.573	42			0.1411	
7	6.442	1126	v		3.7831	
8	8.24	967	v		3.2502	

8. Hasil pencatatan data kromatogram GC pada :

- Reaktor 2 (diameter gelas dielektrik 14 mm)
- Laju alir umpan: 1500 cc/menit
- Tegangan: 170 V_{AC}

No	Time	Area	MK	IDNO	Concentration	Name
1	0.255	1970			67.7443	
2	2.375	938			32.2556	

9. Hasil pencatatan data kromatogram GC pada :

- Reaktor 2 (diameter gelas dielektrik 14 mm)
- Laju alir umpan: 1500 cc/menit
- Tegangan: 130 V_{AC}

No	Time	Area	MK	IDNO	Concentration	Name
1	0.267	4709			33.2211	
2	1.272	3976			28.049	
3	2.392	5490			38.7299	

