



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN REAKTOR PLASMA NON-TERMAL
DAN UJI KINERJANYA UNTUK SINTESIS HIDROKARBON
DARI LPG MENGGUNAKAN SUMBER TEGANGAN
BOLAK-BALIK (AC)**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**KEVIN NALDO
0606076545**

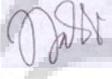
**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

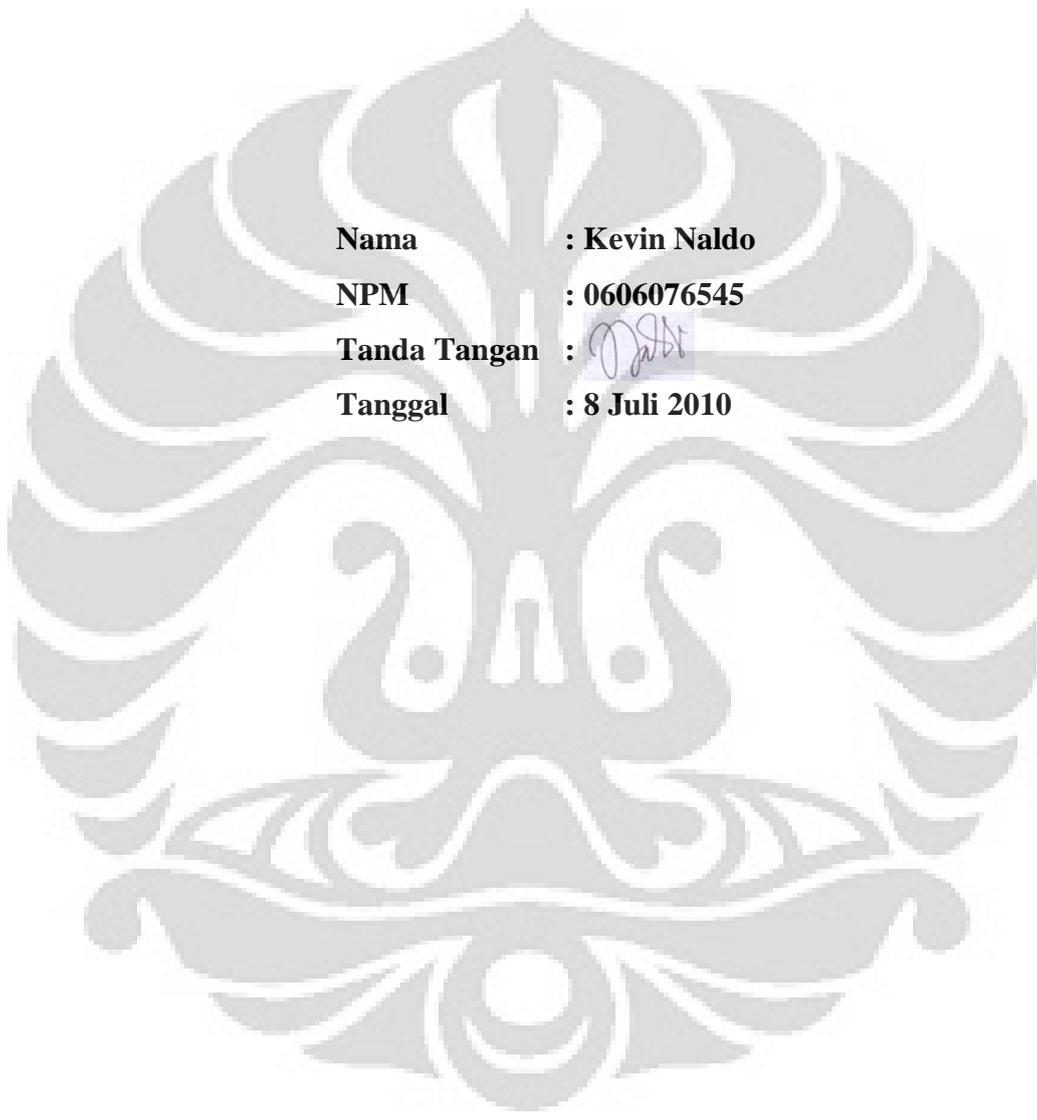
**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar**

Nama : Kevin Naldo

NPM : 0606076545

Tanda Tangan : 

Tanggal : 8 Juli 2010



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Kevin Naldo
NPM : 0606076545
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Rancang Bangun Reaktor Plasma Non-Termal dan Uji Kinerjanya untuk Sintesis Hidrokarbon dari LPG menggunakan Sumber Tegangan Bolak-Balik (AC)

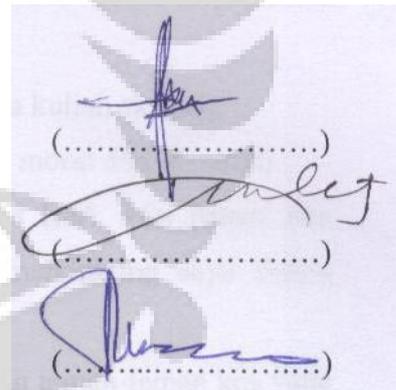
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof.Dr. Ir. Setijo Bismo, D.E.A.

Penguji : Ir. Yuliusman, M.Eng.

Penguji : Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc. Ph.D.



(.....)
(.....)
(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 8 Juli 2010

KATA PENGANTAR

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

1. Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, D.E.A., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, materi, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini;
2. Ir. Dijan Supramono, M.Sc., selaku dosen pembimbing akademik yang telah menyediakan waktu dan membantu kehidupan akademik perkuliahan penulis selama ini;
3. Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, D.E.A., selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI;
4. Ir. Yuliusman, M.Eng., selaku dosen kordinator mata kuliah skripsi;
5. Keluarga yang telah memberikan bantuan dukungan moral dan material;
6. *Kang Jajat, Mang Ijal, Mas Eko, Mas Taufik, Mas Heri, Mas Rinan, dan Mbak Tiwi* yang telah banyak membantu dan mendukung saya dalam pelaksanaan penelitian;
7. Reza, Ikhsan, Fathur, teman-teman Lab Separasi, dan teman-teman kos yang telah banyak membantu saya dalam penelitian dan penyelesaian skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap agar skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 8 Juli 2010

Penulis

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

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

Nama : Kevin Naldo
NPM : 0606076545
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

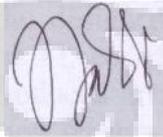
demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Rancang Bangun Reaktor Plasma Non-Termal
Untuk Sintesis Hidrokarbon dari LPG
Menggunakan Sumber Tegangan Bolak-Balik (AC)**

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 : 8 Juli 2010
Yang menyatakan



(Kevin Naldo)

ABSTRAK

Nama : Kevin Naldo
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Rancang Bangun Reaktor Plasma Non-Termal dan Uji Kinerjanya untuk Sintesis Hidrokarbon dari LPG menggunakan Sumber Tegangan Bolak-Balik (AC)

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan suatu rancang bangun reaktor plasma non-thermal DBD jenis pipa koaksial *shell and tube* dan menguji kinerjanya dalam mengkonversi elpiji. Variasi yang digunakan untuk melakukan uji kinerja reaktor adalah: laju alir umpan elpiji, tegangan listrik, dan volume reaktor. Reaktor DBD yang dirancang terbuat dari gelas *pyrex* (borosilikat) bervolume 29 dan 41 cm³ dan memiliki produktivitas propana optimum sebesar 44,7% yang dihasilkan pada kondisi tegangan primer NST 130 V_{AC} dan laju alir umpan elpiji 1500 cm³/menit menggunakan reaktor 1 (volume 29 cm³). Plasma non-thermal pada reaktor dibangkitkan oleh NST dengan sumber arus PLN.

Kata kunci:
Elpiji, plasma non-thermal, DBD, hidrokarbon

ABSTRACT

Name : Kevin Naldo
Study Program : Chemical Engineering
Title : Design of Non-Thermal Plasma Reactor and Its Performance Test for Hydrocarbon Synthesis from LPG using Alternating Current Power Supply

The aim of present experiment is to design DBD non-thermal plasma reactor shell and tube coaxial pipe type and to do its performance test in converting LPG. The variations used in conducting performance test are: LPG feed flowrate, voltage, and reactor volume. The designed DBD reactors are made of pyrex (borosilicate) glass with 29 and 41 cc of volume and has 44,7% optimum productivity of propane which produced at 130 V_{AC} of primary NST and 1500 cc/minute LPG feed flowrate using reaktor 1 (29 cc volume). The non-thermal plasma is generated in reactor by NST, using electricity provided by State Electricity Enterprise (PLN) as power source.

Keywords:
LPG, non-thermal plasma, DBD, hydrocarbons

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Batasan Masalah	4
1.5. Sistematika Penulisan	5
2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Elpiji/LPG (<i>Liquified Petroleum Gas</i>).....	6
2.2. Konversi Elpiji menjadi Hidrokarbon Rantai Panjang.....	7
2.3. Plasma	8
2.3.1. Plasma Secara Umum	8
2.3.2. Karakteristik Plasma dan Aplikasinya	10
2.3.3. Jenis-Jenis Plasma	11
2.4. Gelas Borosilikat.....	16
2.5. Reaktor Plasma	18
2.6. Konversi Elpiji dengan Metode Plasma Non-Termal	20
2.6.1. <i>Treatment</i> Awal Elpiji	21
2.6.2. <i>State of The Art</i> Rancang Bangun Reaktor Plasma Non-Termal DBD	23
3. METODOLOGI PENELITIAN.....	28
3.1. Diagram Alir Penelitian	20
3.2. Rancangan Penelitian	29
3.2.1. Rancang Bangun Sistem Reaktor Plasma DBD.....	29
3.2.1.1. Pembuatan Reaktor Plasma DBD.....	30
3.2.1.2. Pembuatan Sumber Tegangan Tinggi Menggunakan NST	37
3.2.1.3. Penggunaan Alat Ukur	39
3.2.2. Preparasi Sampel	39
3.2.3. Uji <i>Start-Up</i> Alat	40
3.2.4. Uji Kinerja Reaktor Plasma Non-Termal	41
3.2.5. Pengambilan Sampel Gas	42
3.3. Prosedur Penelitian	43
3.3.1. Prosedur Uji Kinerja Reaktor Plasma.....	43
3.3.2. Prosedur Pemakaian <i>Gas Chromatography</i> (GC).....	45

3.4. Alat Uji yang digunakan.....	47
3.4.1. <i>CO Analyzer</i>	47
3.4.2. <i>H₂ Analyzer</i>	47
3.5. Data yang Diambil	47
4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	48
4.1. Rancang Bangun Reaktor Plasma Non-Termal DBD.....	49
4.1.1. Analisis Reaktor Plasma DBD Hasil Rancang Bangun.....	49
4.1.2. Pengujian Awal Reaktor Plasma DBD	52
4.1.3. Uji Fisik Plasma (Visual).....	54
4.2. Uji Kinerja Reaktor Plasma DBD untuk Konversi Elpiji	58
4.2.1. Pengaruh Tegangan terhadap Konsentrasi Produk.....	68
4.2.2. Pengaruh Laju Alir terhadap Konsentrasi Produk.....	71
4.2.3. Pengaruh Diameter Reaktor terhadap Konsentrasi Produk	73
5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	75
5.1. Kesimpulan.....	75
5.2. Saran.....	75
DAFTAR PUSTAKA.....	77
LAMPIRAN	80

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Spesifikasi Elpiji Propana	7
Tabel 2.2.	Perbedaan Fasa Padat, Cair, Gas, dan Plasma.....	9
Tabel 2.3.	Klasifikasi Plasma berdasarkan Temperatur.....	13
Tabel 2.4.	Karakteristik <i>Non-thermal Discharge</i>	14
Tabel 2.5.	Energi-Energi Foton dalam Spektrum Elektromagnetik	15
Tabel 2.6.	Komponen Penyusun Gelas Borosilikat	17
Tabel 2.7.	Perbandingan Karakteristik Fisik Gelas Borosilikat tipe A kelas I dan Pyrex.....	18
Tabel 4.1.	Pengujian Keselamatan Reaktor Plasma DBD (reaktor 1, diameter gelas dielektrik 12 mm) dengan Umpan Elpiji dan Sumber Listrik PLN.....	53
Tabel 4.2.	Fenomena yang Teramati Pada Pengoperasian Reaktor Plasma pada Beberapa Tegangan Untuk Kedua Reaktor Hasil Rancang Bangun ..	57
Tabel 4.3.	Data Konsumsi Energi Listrik Reaktor pada Pemakaian Sumber Listrik PLN.....	59
Tabel 4.4.	Komposisi Komponen Gas Reaktan (Elpiji) sebelum dikonversi dengan Reaktor DBD Hasil Analisis GC.....	60
Tabel 4.5.	Konsentrasi Produk Propana dan Butana dari Reaktor DBD menggunakan Analisis GC.....	61
Tabel 4.6.	Energi Ionisasi dari Molekul-Molekul Berbeda.....	70
Tabel 4.7.	Waktu Tinggal Umpan Elpiji pada Laju Alir dan Ukuran Reaktor Berbeda-Beda	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Reaksi-Reaksi yang Terjadi di dalam Reaktor Plasma	19
Gambar 2.2.	Pembentukan <i>Thiophenolate</i> dari <i>Thiolphenol</i> dalam Larutan Basa.....	22
Gambar 2.3.	Rancangan Tabung (<i>tube</i>) Ozone discharge oleh W. Siemens.....	23
Gambar 2.4.	Konfigurasi Dasar Reaktor Plasma DBD Planar	24
Gambar 2.5.	Sketsa Pembentukan <i>Microdischarge</i>	25
Gambar 2.6.	Reaktor DBD Cylindrical Packed Bed Hasil Rancangan Purushothama dkk.....	26
Gambar 2.7.	Skema Peralatan Eksperimen: 1,2. Silinder 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>	27
Gambar 3.1.	Diagram Alir Penelitian Reaktor Plasma Non-Termal	28
Gambar 3.2.	Skema Sistem Peralatan Plasma Non-termal DBD untuk Konversi Elpiji.....	29
Gambar 3.3.	Skema Melintang Reaktor DBD	30
Gambar 3.4.	Skema Melintang Reaktor Plasma DBD Jenis Pipa Koaksial Tunggal.....	31
Gambar 3.5.	Gelas Dielektrik	32
Gambar 3.6.	Elektroda Batang <i>SS-316</i>	32
Gambar 3.7.	Elektroda Jala <i>SS-304</i>	33
Gambar 3.8.	Selongsong <i>Acrylic</i>	33
Gambar 3.9.	Skema lubang aliran gas pada <i>baffle</i> : (a) Dua buah <i>baffle</i> penyekat atas-bawah; (b) dua buah <i>baffle</i> dengan lubang aliran gas dekat lingkaran luar (tabung <i>acrylic</i>); dan (c) dua buah <i>baffle</i> dengan lubang aliran gas dekat lingkaran dalam (tabung <i>pyrex</i>).....	34
Gambar 3.10.	Dua Jenis <i>Nipple</i> : bagian masukan reaktan (a); bagian keluaran produk (b)	35
Gambar 3.11.	Regulator Tegangan: (a) Tampak depan; (b) Tampak atas	38
Gambar 3.12.	<i>Neon Sign Transformer</i> (NST)	38
Gambar 3.13.	Tiga Jenis Alat Ukur: (a) <i>Amperemeter</i> ; (b) <i>Voltmeter</i> ; (c) <i>Flowmeter</i>	39
Gambar 3.14.	<i>Bubbler</i> KOH: (a) <i>bubbler</i> yang digunakan; (b) skema kerja <i>bubbler</i>	40
Gambar 3.15.	<i>CO Analyzer</i>	47
Gambar 3.16.	<i>H₂ Analyzer</i>	47
Gambar 4.1.	Dua buah reaktor plasma hasil rancang bangun: (a) reaktor 1 dengan diameter gelas dielektrik 12 mm dan komponen-komponennya; (b) reaktor 2 dengan diameter gelas dielektrik 14 mm.....	49
Gambar 4.2.	Skematis Aliran Gas Dalam Rancangan Reaktor Plasma DBD dan Komponen-Komponen Reaktor.....	50
Gambar 4.3.	Pembentukan Pijar Api Plasma pada Bagian Bawah Reaktor DBD	55

Gambar 4.4.	<i>Pie Chart</i> Komposisi Umpan Elpiji Sebelum dikonversi dengan Plasma DBD	61
Gambar 4.5.	Diagram Batang Pengaruh Tegangan Primer NST terhadap Konsentrasi Propana dan Butana pada Laju Alir Umpan Elpiji 500 cc/menit untuk Reaktor 1 (diameter dielektrik 12 mm)	63
Gambar 4.6.	Diagram Batang Pengaruh Tegangan Primer NST terhadap Konsentrasi Propana dan Butana pada Laju Alir Umpan Elpiji 1500 cc/menit untuk Reaktor 1 (diameter dielektrik 12 mm)	64
Gambar 4.7.	Diagram Batang Pengaruh Tegangan Primer NST terhadap Konsentrasi Propana dan Butana pada Laju Alir Umpan Elpiji 500 cc/menit untuk Reaktor 2 (diameter dielektrik 14 mm)	65
Gambar 4.8.	Diagram Batang Pengaruh Tegangan Primer NST terhadap Konsentrasi Propana dan Butana pada Laju Alir Umpan Elpiji 1500 cc/menit untuk Reaktor 2 (diameter dielektrik 14 mm)	66
Gambar 4.9.	Diagram Batang Hubungan Tegangan Primer NST terhadap Konsentrasi Propana yang diproduksi pada Laju Alir Umpan Elpiji dan Ukuran Reaktor Berbeda-beda	67
Gambar 4.10.	Diagram Batang Hubungan Tegangan Primer NST terhadap Konsentrasi Butana yang Terdekomposisi pada Laju Alir Umpan Elpiji dan Ukuran Reaktor Berbeda-beda.....	67
Gambar 4.11.	Pengaruh Daya Masukan Terhadap Konversi CH ₄ dan CO ₂ dan Selektivitas CO dan H ₂ berdasarkan Penelitian Wang dkk	69
Gambar 4.12.	Skema Melintang <i>Tube</i> Reaktor Plasma DBD	73

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan pertumbuhan penduduk dan peningkatan kegiatan industri, maka kebutuhan bahan bakar minyak (BBM), khususnya di Indonesia terus meningkat. Hal ini ternyata membawa permasalahan sendiri. Indonesia mengalami defisit bahan bakar minyak (BBM) sebesar 360 ribu barel per hari atau setara dengan 33 persen dari total kebutuhan BBM. Permasalahan produksi migas ini berpangkal dari menurunnya kuantitas produksi minyak mentah dari 1.600 juta barel hingga 900 juta barel per hari (Lestarini, 2010). Sementara itu, kebalikannya, produksi gas alam maupun produk turunannya seperti gas-gas kondensat yang dijadikan produk elpiji semakin meningkat. Sehingga dengan demikian pemanfaatan elpiji semakin terbuka untuk dapat disintesis menjadi bahan bakar cair bagi kendaraan bermotor atau mesin-mesin lainnya yang membutuhkan bahan bakar cair, bahan baku industri petrokimia, atau industri lainnya yang menggunakan bahan baku yang berbasis hidrokarbon dari minyak mentah (*crude oil*). Potensi ini dapat diusahakan dengan teknologi baru yang dapat mensintesis hidrokarbon rantai panjang (yang merupakan penyusun utama bahan bakar yang berasal dari minyak bumi), yaitu dengan menggunakan teknologi plasma non-termal.

Sejak tahun 1980, plasma non-termal (plasma dingin) telah diinvestigasi sebagai metode suhu rendah alternatif yang menjanjikan dan telah diusulkan untuk berbagai penggunaan dalam mensintesis produk dari sejumlah reaktan. Hal ini terkait dengan cukup tingginya tingkat konversi kimia pada kondisi temperatur rendah bahkan dalam temperatur ruangan (Yamamoto dan Okubo, 2004). Selain itu, proses plasma merupakan metode yang efektif dalam biaya yang murah, lebih ramah lingkungan karena metode ini tidak menghasilkan limbah buang, serta dalam sejumlah penelitian terbukti tidak memiliki risiko bahaya (Zhu, Zhang, Gong, 1999).

Plasma dingin dapat dibangkitkan menggunakan beberapa jenis susunan eksperimen, namun reaktor DBD merupakan jenis yang menjanjikan karena beberapa alasan: (1) Konfigurasi DBD membutuhkan konsumsi energi yang rendah untuk menginduksi reaksi kimia dalam gas pada suhu yang relatif rendah ($T < 200^{\circ}\text{C}$); (2) Reaktor DBD dapat dioperasikan pada suhu ruangan dan tekanan atmosfer; (3) Desain reaktor memungkinkan proses *scale-up* untuk beroperasi dengan gas yang bervolume lebih besar; (4) Reaktor DBD menunjukkan densitas elektron dan ekstensi *glow discharge* yang tinggi (Rico, Hueso, & Gonzalez-Elipe 2010).

Usaha yang paling awal terhadap konversi plasma-kimia dari senyawa karbon sederhana yang mengandung gas, seperti CO, CO₂, CH₄ menjadi molekul organik yang lebih kompleks dicatat terjadi sekitar paruh kedua dari abad ke-19 (Yun, 2003). Pengaktifan metana oleh medan listrik telah dilakukan lebih dari 62 tahun yang lalu oleh Glocker dan Lind dan pada tahun 1974 dilakukan oleh Holloban dan Bell. Proses yang telah dilakukan dengan baik adalah konversi langsung dari metana menjadi asetilena menggunakan plasma busur termal dan proses ini telah dikembangkan dan digunakan lebih dari 40 tahun oleh Huls dan dikomersialisasi oleh DuPont (Yun, 2003). Liu et.al (2002) juga telah mempelajari konversi sistem CH₄/H₂/O₂, CH₄/O₂, CH₄/H₂O, dan CH₄/CO₂ menggunakan *DC Corona Discharge*. Produk terbesar hidrokarbon etana sebesar 32% diperoleh pada laju alir terendah (laju alir 10 cc/menit, waktu tinggal $\approx 2,3$ s) (Zhang, Yang, Liu, & Tan, 2002).

Pada penelitian ini dilakukan evaluasi terhadap konversi langsung gas elpiji. Produk yang diharapkan adalah hidrokarbon rantai panjang maupun rantai pendek. Meskipun penelitian tentang konversi elpiji belum pernah dilakukan sebelumnya, namun berdasarkan penelitian-penelitian menggunakan hidrokarbon yang telah dilakukan, diharapkan hal serupa juga terjadi untuk konversi langsung elpiji menggunakan reaktor plasma DBD.

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dalam penelitian ini diusulkan pembuatan rancang-bangun dan uji kinerja reaktor plasma non-termal dengan tipe pelepasan korona *Dielectric Barrier Discharge* (DBD) jenis pipa koaksial *shell and tube* yang terdiri dari elektroda batang berongga di bagian dalam dan

elektroda jala pada bagian luar yang di antaranya terdapat bahan dielektrik yang terbuat dari gelas borosilikat. Mula-mula, dilakukan pembuatan reaktor yang dirancang untuk menghasilkan plasma non-termal (plasma dingin) yang diharapkan dapat mensintesis sejumlah komponen hidrokarbon dari elpiji. Elektroda bagian dalam berbentuk batang berongga, terbuat dari bahan *stainless steel* ANSI 316 berdiameter 0.25 inci, sedangkan elektroda bagian luar berbentuk jala terbuat dari *stainless steel* ANSI 304 berukuran 60 *mesh* yang digulung menyelubungi tabung dielektrik. Kemudian keduanya dihubungkan dengan pembangkit listrik tegangan tinggi (HVT). HVT ini akan membangkitkan plasma pada *discharge gap* dalam reaktor plasma, yaitu ruang antara elektroda jala dan elektroda batang yang terhalang oleh penghalang dielektrik. Hal ini memungkinkan pembangkitan spesi aktif plasma pada tekanan atmosfer tanpa sistem vakum yang mahal dalam reaktor plasma. Spesi aktif yang dimaksud antara lain ultraviolet atau foton yang dapat dilihat, partikel bermuatan, termasuk elektron, ion-ion dan radikal bebas, dan spesi netral yang sangat reaktif, seperti atom reaktif (misalnya oksigen, fluor, ozon, nitrogen oksida, dan sebagainya). Adanya spesi aktif ini memungkinkan umpan akan terkonversi menjadi plasma yang berenergi tinggi dimana reaksi selanjutnya terhadap gas reaktan dapat terjadi menjadi produk hidrokarbon sintesis yang diinginkan. Selanjutnya, dilakukan uji kinerja untuk produktivitas reaktor plasma non-termal hasil rancangan tersebut, sehingga diperoleh data tentang seberapa besarkah reaktor plasma DBD ini dapat mengkonversi gas elpiji.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana menghasilkan rancang-bangun suatu prototipe Reaktor Plasma Non-Termal DBD yang memiliki kinerja optimum untuk konversi gas elpiji dalam skala laboratorium?
2. Bagaimana kinerja reaktor plasma DBD untuk reaksi konversi dengan menggunakan umpan elpiji (propana dan butana) menjadi produk hidrokarbon rantai panjang (butana, pentana, dan seterusnya), hidrokarbon

rantai pendek (metana dan etana), maupun hidrokarbon rantai rangkap (etena, dan sebagainya)?

3. Bagaimana pengaruh variasi operasi, seperti laju alir umpan, tegangan listrik, dan volume reaktor terhadap kinerja Reaktor Plasma Non-Termal DBD dalam pengkonversian gas elpiji?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Melakukan rancang bangun reaktor plasma non-termal (plasma dingin) jenis pipa koaksial *shell and tube* jenis *Dielectric Barrier Discharge* (DBD).
2. Menguji kinerja prototipe reaktor plasma dingin jenis pipa koaksial *shell and tube* hasil rancang bangun.
3. Menentukan kondisi operasi optimal reaktor plasma hasil rancang bangun.

1.4 Batasan Masalah

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

1. Gas elpiji yang akan dikonversi adalah gas yang berasal dari elpiji kaleng (*cartridge*) 250 g produksi Iwatani dan tabung elpiji 12 kg produksi Pertamina.
2. Alat yang digunakan untuk pengkonversi gas elpiji adalah suatu prototipe reaktor plasma non-termal DBD tipe pipa koaksial *shell and tube* dalam skala laboratorium dengan sistem kontinu, sebagai hasil rancangan Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA.
3. Reaktor plasma menggunakan catudaya dari transformator tegangan tinggi (HVT), menggunakan sumber listrik PLN.
4. Parameter kinerja reaktor adalah adanya gas elpiji yang terkonversi dan karakteristik produk gas yang dihasilkan.
5. Pengujian kandungan dan komposisi produk gas dilakukan dengan metode analisis kualitatif menggunakan *gas chromatography* (GC).
6. Variasi yang dilakukan adalah variasi tegangan masukan HVT untuk pembangkit tegangan tinggi, ukuran reaktor plasma, dan laju alir umpan.

7. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses Departemen Teknik Kimia UI, pada suhu ruang dan tekanan atmosfer.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang dilakukan dalam penulisan skripsi ini adalah :

BAB 1 PENDAHULUAN

Berisi latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tinjauan pustaka yang mengandung teori-teori yang berhubungan dengan plasma dan memberikan konsep-konsep dalam perumusan penyelesaian masalah.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Menjelaskan metode, peralatan, dan prosedur yang digunakan dalam rancang-bangun prototipe reaktor plasma non-termal untuk konversi gas elpiji.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Memaparkan data hasil penelitian dan analisis terhadap data hasil percobaan, hasil pengolahan data, maupun fenomena-fenomena yang terjadi selama proses penelitian.

BAB 5 KESIMPULAN

Berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil penelitian.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Elpiji/LPG (*Liquified Petroleum Gas*)

Elpiji, yang berasal dari pelafalan singkatan bahasa Inggris LPG (*liquified petroleum gas*, arti harafiah: "gas minyak bumi yang dicairkan"), adalah campuran dari berbagai unsur hidrokarbon yang berasal dari gas alam. Dengan menambah tekanan dan menurunkan suhunya, gas alam berubah menjadi cair. Komponennya didominasi propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}). Elpiji juga mengandung hidrokarbon ringan lain dalam jumlah kecil, misalnya etana (C_2H_6) dan pentana (C_5H_{12}) ("Elpiji" Wikipedia, 2010). Komposisi penyusun utama elpiji adalah propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}) yang memiliki perbandingan 30% propana dan 70% butana (persen volume) serta selebihnya ditambahkan sejumlah kecil odoran/pembau yaitu senyawa sulfur *mercaptan* ("Mengenal Elpiji" Pertamina, 2010).

Dalam kondisi atmosfer, elpiji akan berbentuk gas. Volume elpiji dalam bentuk cair lebih kecil dibandingkan dalam bentuk gas untuk berat yang sama. Oleh karena itu, elpiji dipasarkan dalam bentuk cair dalam tabung-tabung logam bertekanan. Untuk memungkinkan terjadinya ekspansi panas (*thermal expansion*) dari cairan yang dikandungnya, tabung elpiji tidak diisi secara penuh, hanya sekitar 80-85% dari kapasitasnya. Rasio antara volume gas bila menguap dengan gas dalam keadaan cair bervariasi tergantung komposisi, tekanan, dan temperatur, tetapi biasanya sekitar 250:1 ("Elpiji" Wikipedia, 2010).

Tekanan dimana elpiji berbentuk cair, dinamakan tekanan uapnya, bervariasi tergantung komposisi dan temperatur. Sebagai contoh, dibutuhkan tekanan sekitar 220 kPa (2,2 bar) bagi butana murni pada 20 °C (68 °F) agar mencair, dan sekitar 2,2 MPa (22 bar) bagi propana murni pada 55 °C (131 °F).

Menurut spesifikasinya, elpiji dibagi menjadi tiga jenis yaitu elpiji campuran, elpiji propana, dan elpiji butana. Spesifikasi masing-masing elpiji tercantum dalam keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi Nomor:

25K/36/DDJM/1990. Elpiji yang dipasarkan Pertamina adalah elpiji campuran (“Elpiji” Wikipedia, 2010).

Sesuai dengan Keputusan Dirjen Migas No. 25K/36/DDJM/1990 tanggal 14 Mei 1990 tentang Spesifikasi Bahan Bakar Gas Elpiji untuk Keperluan Dalam Negeri, Tabel 2.1 di bawah berikut menunjukkan spesifikasi elpiji propana (C3). Elpiji butana memiliki spesifikasi yang sama persis dengan elpiji propana ini, dengan perbedaan hanyalah pada komposisi butana (C4) sebesar 97,5% dan C5 sebesar 2,5%. Elpiji campuran sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya mempunyai komposisi 70% butana dan 30% propana dengan spesifikasi yang sama pula dengan propana.

Tabel 2.1 Spesifikasi Elpiji Propana

Karakteristik Pengujian	Minimum	Maksimum	Metode
<i>Specific Gravity</i> pada 60/60 °F	Akan dilaporkan		ASTM D-1657
Tekanan Uap 100 °F, psig	-	210	ASTM D-1267
<i>Weathering test</i> 36 °F,%vol	95	-	ASTM D-1837
<i>Copper Corrosion</i> 1 hr, 100 °F	-	No.1	ASTM D 1838
Total Sulfur, gr/100 ft ³	-	15 (sebelum ditambahkan etil atau butil merkaptan)	ASTM D-2784
Komposisi: ▪ C3 total % volume	95		ASTM D-2163
▪ C4 dan fraksi lebih berat % volume		2,5	
Etil atau butil merkaptan yang ditambahkan, ml/100 AG		50	

Sumber: “Mengenal Elpiji”, Pertamina, 2010

2.2 Konversi Elpiji menjadi Hidrokarbon Rantai Panjang

Pemakaian gas hidrokarbon baik langsung dari gas alam maupun turunan dari minyak bumi telah sejak lama digunakan untuk berbagai industri petrokimia dan berbagai industri pengolahan primer lainnya serta transportasi. Namun, semakin lama pemakaian gas ini semakin meningkat dengan semakin

berkembangnya teknologi dan bertambahnya jumlah penduduk. Oleh karena itu, dibutuhkan upaya untuk menjaga kestabilan produksi agar dapat menunjang kehidupan manusia, baik dalam kegiatan industri maupun transportasi.

Peningkatan produksi gas hidrokarbon menjadi sebuah keharusan untuk memenuhi kebutuhan akan bahan baku dan bahan bakar bagi banyak pihak. Sehingga, teknologi proses konversi dari bahan baku yang cukup melimpah saat ini menjadi salah satu alternatif untuk memenuhi kebutuhan akan gas hidrokarbon tersebut. Salah satu teknologi tersebut ialah dengan mengkonversi elpiji yang sudah cukup banyak diproduksi saat ini menjadi senyawa hidrokarbon lainnya seperti methane atau bahan bakar minyak dengan menggunakan teknologi plasma.

Beberapa bentuk aplikasi teknologi plasma telah diusulkan oleh beberapa peneliti di dunia untuk meningkatkan efisiensi pengubahan metana dan karbon dioksida. Sebagai contoh, pengubahan gas metana dan CO_2 menjadi hidrokarbon C_2 (etana) mempunyai kendala dalam hal tingkat konversinya yang sangat rendah (sekitar 5,7%) walaupun selektivitasnya sudah cukup baik (sekitar 70-80%). Hal ini merupakan salah satu contoh aplikasi teknologi plasma untuk keperluan reaksi kimia. Keunggulan utamanya ialah teknologi reaktor plasma dapat digunakan untuk konversi kimia pada temperatur rendah bahkan temperatur ruangan (Yun, 2003). Berdasarkan penelitian ini diharapkan hal yang sama berlaku dalam usaha mengkonversi elpiji menjadi hidrokarbon rantai panjang.

2.3 Plasma

2.3.1 Plasma Secara Umum

Semua zat berubah dari padat menjadi cair dan dari cair ke gas ketika energi atau panas ditambahkan. Perubahan ini disebut perubahan fasa dan terjadi pada temperatur konstan. Ketika energi ditambahkan ke gas, elektron muncul dari partikel netral dan menjadi ion. Keadaan di mana banyak ion dan elektron yang bercampur disebut "plasma." Perubahan dari gas menjadi plasma terjadi berdasarkan reaksi ionisasi. Energi yang dibutuhkan untuk berlangsungnya reaksi berada dalam kisaran 1-50 eV, yang umumnya jauh lebih banyak daripada energi panas laten pada perubahan fasa (0,01 eV). Oleh karena itu, perubahan dari gas menjadi plasma tidak sepenuhnya diklasifikasikan ke dalam perubahan fasa.

Namun, plasma sering disebut keadaan keempat dari suatu materi, dimana padat, cair, dan gas adalah ketiga keadaan lainnya dari suatu zat (Yamamoto dan Okubo, 2004). Plasma sebagai zat keempat ini ditemukan pada tahun 1928 oleh ilmuwan Amerika, Irving Langmuir (1881-1957) dalam eksperimennya melalui lampu filamen tungsten.

Tabel 2.2 Perbedaan Fasa Padat, Cair, Gas, dan Plasma

Karakteristik	Padat	Cair	Gas	Plasma
Fasa	Memiliki bentuk dan volume tertentu	Fase dengan bentuk tidak jelas namun memiliki volume tertentu	Volume dan bentuknya tidak jelas	Volume dan bentuknya tidak jelas
Partikel pembentuk	Tersusun dalam jarak paling dekat (kompak)	Tersusun dalam jarak agak renggang	Tersusun dalam jarak paling renggang	Tersusun dari gas-gas yang terionisasi
Kemampuan berpindah	Tidak dapat berpindah dengan bebas	Dapat berpindah dengan bebas	Dapat berpindah dengan bebas	Tercipta karena adanya perpindahan muatan listrik
Energi pergerakan	Rendah	Lebih tinggi daripada padatan	Tinggi	Sangat tinggi
Perubahan bentuk	Dapat dilakukan secara paksa	Terjadi berdasarkan bentuk wadahnya	Terjadi berdasarkan wadah dan kontainernya	Bentuknya tidak jelas
Suhu (T)	$T < 0^{\circ}\text{C}$	$0 < T < 100^{\circ}\text{C}$	$T > 100^{\circ}\text{C}$	$T > 100.000^{\circ}\text{C}$

Sumber: Lieberman dan Lichtenberg, 2005.

Seperti yang telah dituliskan sebelumnya, plasma sering disebut sebagai keadaan materi keempat. Plasma berbeda dari keadaan materi berenergi lebih rendah lainnya, seperti padatan, cairan, dan gas. Perbedaan antara keempat materi tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.2 di atas.

Plasma dalam teknologi plasma dapat didefinisikan sebagai gas yang terionisasi, terdiri dari partikel neutron, ion positif, ion negatif dan elektron yang merespon medan magnetik secara kuat. Plasma juga dapat dikatakan sebagai atom yang kehilangan elektron karena beberapa atau semua elektron di orbit atom

terluar telah terpisah dari atom atau molekul yang mengakibatkan sebuah koleksi ion dan elektron yang tidak lagi terikat satu sama lain. Untuk menghilangkan elektron dari atom dibutuhkan suatu energi, energi tersebut berasal dari panas, listrik, ataupun cahaya. Partikel-partikel ini terionisasi (bermuatan) sehingga terbentuklah plasma.

2.3.2 Karakteristik Plasma dan Aplikasinya

Plasma berbeda dari gas biasa yang tidak terionisasi yang berdampak pada beberapa hal berikut:

1. Aktivasi kimia sangat tinggi. Plasma menghasilkan radikal dengan mudah ketika gas reaktif dimasukkan ke dalamnya, dan keadaan sangat reaktif dapat diperoleh dengan energi tinggi plasma. Bidang plasma kimia, plasma perbaikan lingkungan, dan aplikasi plasma seperti *Chemical Vapor Deposition*) memanfaatkan karakteristik ini.
2. Menghantarkan listrik. Arus listrik dapat dihantarkan melalui plasma karena banyak partikel bermuatan listrik yang terdapat dalam plasma, seperti ion dan elektron. Dengan menggunakan sifat ini, parameter plasma dapat dikontrol dan plasma dapat dipanaskan ke suhu tinggi.
3. Energi tinggi dan suhu tinggi (suhu gas maupun elektron). Plasma dengan suhu $(10-100) \times 10^6$ °C akan membuat reaksi fusi nuklir menjadi mungkin. Diharapkan bahwa jenis sumber energi ini dapat digunakan pada abad ke-21. Selain itu, bahan dapat dipanaskan secara cepat pada suhu tinggi menggunakan plasma bersuhu 10.000 °C. Di daerah yang bersuhu rendah, plasma ini digunakan dalam pengolahan mekanis seperti plasma pengelasan, pemotongan, *electrical discharge machining*, plasma penyemprotan, dan sebagainya.
4. Radiasi elektromagnetik dan emisi cahaya. Banyak jenis gelombang elektromagnetik kuat dipancarkan dari plasma karena temperatur tinggi ionisasi. Hal ini menyebabkannya dapat digunakan sebagai sumber cahaya, sebuah layar elektronik, dan analisis optik.

2.3.3 Jenis-Jenis Plasma

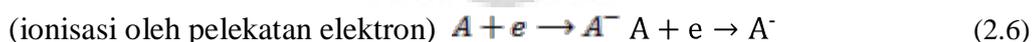
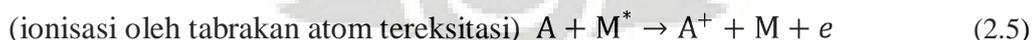
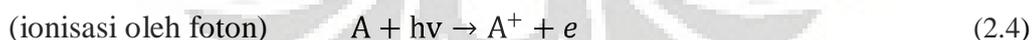
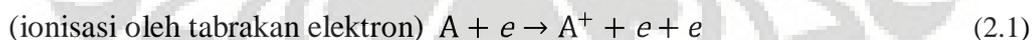
Plasma ada di alam sekitar kita dalam berbagai bentuk, seperti petir, matahari, aurora, ionosfer, bintang, dan juga di lingkungan manusia, seperti pengelasan listrik, mesin lucutan listrik, cahaya pucat di *pantograph* kereta api, api, cahaya *fluorescent*, dan lampu neon (*Plasma (physics)*, n.d.).

Terdapat beberapa cara untuk mengklasifikasi plasma ini. Salah satunya adalah berdasarkan derajat ionisasi. Derajat ionisasi didefinisikan sebagai kepadatan jumlah ion dibagi dengan jumlah partikel netral. Semua partikel netral terionisasi dalam plasma ketika derajat ionisasi adalah satu. Di sisi lain, tidak ada partikel netral terionisasi ketika derajat ionisasi adalah nol.

Berikut pengklasifikasian plasma berdasarkan perbedaan derajat ionisasi:

- a) Plasma terionisasi sempurna: derajat ionisasinya adalah $> 90\%$. Partikel netral memiliki sedikit efek pada plasma.
- b) Plasma terionisasi lemah: derajat ionisasinya adalah $< 1\%$. Efek elektron dominan.
- c) Plasma terionisasi sebagian: memiliki karakter campuran dari plasma terionisasi sepenuhnya dan plasma terionisasi lemah.

Reaksi ionisasi pada plasma terjadi disebabkan oleh benturan partikel kecepatan tinggi dan partikel netral. Berbagai jenis reaksi ionisasi yang terjadi pada plasma adalah sebagai berikut (Yamamoto dan Okubo, 2004):



Pada plasma yang dihasilkan secara artifisial (buatan), terdapat metode lain untuk mengklasifikasikan plasma, yaitu berdasarkan metode pembangkitan (generasi). Di antara berbagai metode pembangkitan plasma, klasifikasi berikut dapat digunakan:

- a) Plasma lucutan listrik.
- b) Plasma akibat gelombang-mikro.
- c) Plasma akibat gelombang-kejut.
- d) Plasma akibat *Magneto hydrodynamic* (MHD).
- e) Plasma akibat pancaran partikel energi tinggi (elektron dan ion).
- f) Plasma akibat pembakaran.
- g) Plasma akibat laser.

Plasma juga dapat diklasifikasikan sebagai berada dalam suatu keadaan kesetimbangan atau tidak. Kesetimbangan didefinisikan sebagai keadaan dimana suhu elektron, ion, dan partikel alami adalah sama dan kesetimbangan ionisasi terjadi. Dalam *non-equilibrium plasma*, temperatur elektron biasanya lebih tinggi daripada suhu partikel netral. Berikut pembagian plasma berdasarkan keadaan kesetimbangan:

- a) Plasma berkesetimbangan (*Equilibrium Plasma*): apabila T_e (suhu gas plasma) sama dengan T_e dan T_i (suhu ion). Sebagai contoh, plasma termal *arc discharge* tekanan atmosferik.
- b) Plasma tak setimbang (*Non-Equilibrium Plasma*): apabila T_e lebih besar dari T_e dan T_i . Sebagai contoh, plasma lucutan cahaya tekanan rendah dan plasma berdenyut tegangan tinggi tekanan atmosferik.

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

- a) Plasma termal (plasma suhu tinggi)

Memiliki ciri suhu tinggi, densitas energi tinggi, kesamaan suhu antara partikel berat (atom, molekul, ion) dan elektron. Plasma jenis ini memiliki sifat mobilitas yang jauh lebih tinggi yang menyebabkan energi yang diberikan kepada plasma ditangkap oleh elektron yang dipindahkan ke partikel-partikel berat dengan tumbukan elatis. Karena densitas jumlah elektron tinggi, jika dikaitkan dengan operasi pada tekanan atmosferik, frekuensi tumbukan elastis menjadi sangat tinggi dan kesetimbangan termal tercapai dengan cepat serta dapat

mencapai suhu 20.000°C atau lebih untuk di daerah inti pijar plasma, serta untuk daerah marjinal akan turun secara cepat sehingga daerah marjinal ini sebagai daerah operasinya akan memiliki suhu sekitar 5000 K (H.Huang dan L.Tang, 2007).

Contoh plasma termal adalah plasma dari arus DC atau *radio frequency (RF) inductively coupled discharges* (Kogelschatz, 2003). Plasma matahari juga termasuk salah satu contoh plasma termal. Tabel 2.3 di bawah ini menampilkan klasifikasi plasma berdasarkan temperatur.

Tabel 2.3 Klasifikasi Plasma berdasarkan Temperatur

Jenis Plasma	Temperatur	Contoh
Plasma temperatur tinggi (<i>Equilibrium plasma</i>)	$T_e = T_i = T_h,$ $T_p = 10^6 K - 10^8 K;$ $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$	Plasma fusi laser
Plasma temperatur rendah/plasma termal (<i>Quasi-Equilibrium plasma</i>)	$T_e \approx T_i \approx T_h,$ $T_p = 2 \times 10^3 K - 3 \times 10^4 K;$ $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$	Plasma busur; <i>atmospheric RF discharge</i>
Plasma non-termal (<i>Non-equilibrium plasma</i>)	$T_e \geq T_h,$ $T_p \approx 3 \times 10^2 K - 4,5 \times 10^2 K;$ $n_e \approx 10^{10} m^{-3}$	<i>Corona discharge</i>

Keterangan: T_e = suhu elektron, T_i = suhu ion, T_h = suhu netral, T_p = suhu plasma, n_e = kerapatan elektron. *Sumber: H.Huang dan L.Tang, 2007.*

b) Plasma non-termal (plasma dingin)

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

Plasma jenis ini menghasilkan spesi-spesi aktif yang lebih beragam, dan lebih besar energinya dibandingkan dengan spesi yang biasa dihasilkan pada reaktor kimia. Keberadaan spesi-spesi aktif ini memungkinkan dilakukannya proses pada permukaan material yang tidak dapat dilakukan dengan cara lain atau tidak praktis maupun tidak ekonomis jika dilakukan dengan metode lain. Aplikasi plasma ini antara lain pada modifikasi permukaan lokal karena ion, atom dan molekul tetap relatif dingin dan tidak menyebabkan kerusakan termal pada permukaan yang disentuh. Plasma jenis ini dihasilkan melalui berbagai jenis seperti pancaran pijar (*glow discharge*), *corona discharge*, dan *dielectric barrier discharge (DBD)* yang mempunyai densitas energi berkisar antara 10^{-4} hingga puluhan watt per cm^{-3} (Bardos dan Barankova, 2009). Perbedaan antara ketiga jenis pancaran plasma non-termal ini dapat dilihat pada Tabel 2.4 di bawah. Contoh plasma non-termal adalah *Aurora Borealis* dan *Aurora Australis*.

Tabel 2.4 Karakteristik *Non-thermal Discharge*

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

Sumber: Lieberman dan Lichtenberg, 2005.

Penggunaan plasma non-termal ini berkaitan dengan beberapa kelebihan yang dimiliki plasma non-termal jika dibandingkan dengan plasma termal, antara lain:

- Sehubungan dengan temperatur proses, plasma non-termal memiliki temperatur di bawah 450 K, sehingga memiliki tingkat bahaya yang lebih rendah jika dibandingkan dengan plasma termal yang memiliki temperatur di atas 1000 K.
- Reaktor dan segala perangkat yang digunakan untuk membangkitkan plasma non-termal lebih sederhana daripada perangkat yang digunakan

untuk membangkitkan plasma termal, walaupun waktu terjadinya konversi berjalan lebih lambat.

- Kebutuhan listrik jika menggunakan plasma non-termal lebih sedikit daripada plasma termal, dimana plasma termal lebih membutuhkan uap air dan oksigen karena merupakan reaksi sub-nuklir.

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, plasma non-termal menghasilkan spesi-spesi aktif yang lebih beragam, dan lebih besar energinya dibandingkan dengan spesi yang biasa dihasilkan pada reaktor kimia. Terdapat dua cara spesi untuk mencapai permukaan padatan yang terpapar plasma: (1) gas kerja atau gas umpan dapat dipantulkan, diadsorpsi, diabsorpsi, atau bereaksi secara kimiawi dengan permukaan; dan (2) spesi aktif dihasilkan secara langsung atau tidak langsung dari tumbukan elektron-netral dan rangkaian reaksi kimia dalam plasma. Spesi aktif dihasilkan dalam jumlah yang lebih besar dan mencapai konsentrasi yang lebih tinggi oleh plasma daripada spesi yang sama yang dihasilkan dalam reaktor kimia konvensional. Spesi aktif plasma ini dihasilkan dari *discharge* pijar industri atau plasma pijar (*arc*) yang 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 ditampilkan pada Tabel 2.5 di bawah ini.

Tabel 2.5 Energi-Energi Foton dalam Spektrum Elektromagnetik

Daerah Spektral	Kisaran panjang gelombang, λ (nm)	Kisaran energi, E (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	$13 \leq \lambda \leq 397$	$3,12 \leq E \leq 95,3$

Sumber: Yamamoto dan Okubo, 2004

Semakin tinggi energi suatu 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.

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 yang reaktif secara kimiawi seperti H, O, F, Cl serta radikal bebas, yaitu 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 ini dapat berupa 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 Gelas Borosilikat

Gelas borosilikat adalah jenis gelas yang tersusun dari silika dan boron oksida. Gelas borosilikat dikenal mempunyai koefisien ekspansi termal yang sangat rendah ($\approx 5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ pada 20°C), membuatnya tahan akan panas yang tinggi, lebih tinggi dibandingkan gelas pada umumnya.

Gelas borosilikat pertama kali dikembangkan oleh seorang berkebangsaan Jerman, Otto Schott pada abad ke-19 dan dijual dengan nama "Duran" pada tahun

Universitas Indonesia

1893. Setelah *Corning Glass Works* memperkenalkan kata “Pyrex” pada tahun 1915, hal ini menjadi istilah lazim untuk gelas borosilikat di negara-negara berbahasa Inggris (“*Borosilicate Glass*”, Wikipedia, 2010).

Selain kuarsa, sodium karbonat, dan kalsium karbonat yang biasa digunakan dalam pembuatan gelas, boron digunakan dalam pembuatan gelas borosilikat. Umumnya, komposisi gelas yang diproduksi adalah 70% silika, 10% boron oksida, 8% sodium oksida, 8% potasium oksida, dan 1% kalsium oksida. Meskipun lebih susah dibuat dibanding gelas tradisional pada umumnya (*Corning* melakukan perubahan besar dalam proses operasinya untuk membuat gelas Pyrex), gelas borosilikat dapat diproduksi dengan ekonomis. Daya tahannya yang kuat, ketahanannya akan panas dan bahan kimia menyebabkan penggunaan yang luas pada peralatan laboratorium kimia, peralatan memasak, lampu, dan pada beberapa hal, di jendela.

Sebagaimana dijelaskan sebelumnya, gelas borosilikat mempunyai koefisien ekspansi termal yang rendah, sekitar sepertiga dari gelas biasa. Hal ini mengurangi tekanan material (*material stress*) yang diakibatkan perbedaan temperatur, sehingga menyebabkannya tidak mudah pecah. Hal ini juga menyebabkannya menjadi populer untuk digunakan pada kaca teleskop, dimana deviasi bentuk yang sangat kecil sangat diperlukan. Gelas borosilikat juga digunakan dalam pemrosesan limbah radioaktif tingkat tinggi, dimana limbah ditahan di dalam gelas melalui proses yang disebut vitrifikasi. Tabel 2.6 di bawah menampilkan komponen penyusun gelas borosilikat.

Tabel 2.6 Komponen Penyusun Gelas Borosilikat

Elemen	Nomor atom	Fraksi
B	5	0,040064
O	8	0,539562
Na	11	0,028191
Al	13	0,011644
Si	14	0,377220
K	19	0,003321

Sumber: “*Borosilicate Glass*”, Wikipedia, 2010

Titik peleburan (pada suhu dimana viskositas mendekati $10^{7.6}$ poise) dari Pyrex jenis 7740 adalah $820\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($1.510\text{ }^{\circ}\text{F}$). Gelas borosilikat mempunyai densitas sebesar $2,23\text{ g/cm}^3$ dan energi eksitasi rata-rata sebesar 134 eV . Tabel 2.6 di atas menampilkan komponen penyusun gelas borosilikat dan fraksi-fraksinya (berdasarkan berat).

Meskipun memiliki daya tahan panas yang lebih tinggi dibandingkan gelas jenis lain, gelas borosilikat dapat retak atau pecah ketika dikenai variasi suhu yang tidak seimbang. Ketika pecah, gelas borosilikat cenderung untuk pecah menjadi pecahan-pecahan besar bukannya hancur.

Tabel 2.7 di bawah ini menunjukkan perbandingan antara gelas borosilikat kelas A, tipe I yang memenuhi spesifikasi E438 ASTM dan gelas Pyrex tipe 7740.

Tabel. 2.7 Perbandingan Karakteristik Fisik Gelas Borosilikat tipe A kelas I dan Pyrex

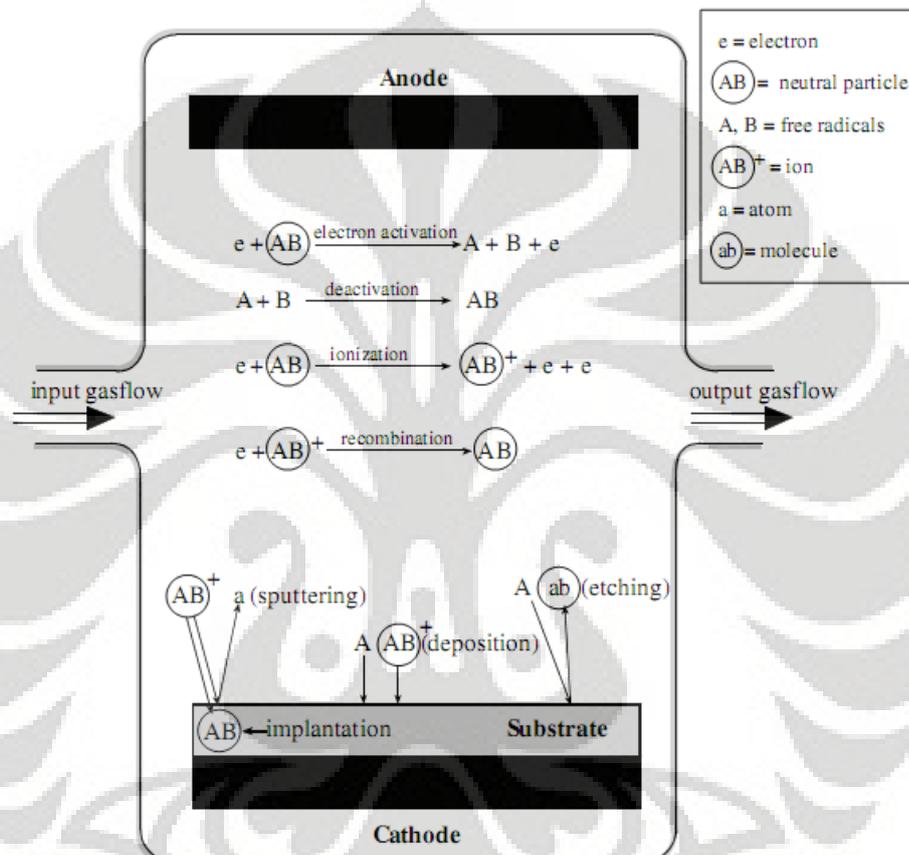
Karakteristik Fisik Utama	Tipe I, Kelas A	Pyrex
Koefisien Linear Ekspansi	$32\text{-}33 \times 10^{-7}\text{ cm/cm/}^{\circ}\text{C}$	$32.5 \times 10^{-7}\text{ cm/cm/}^{\circ}\text{C}$
Strain Point		510°C
Titik Penguatan (Annealing Point)	$560^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$	560°C
Softening Point	$815\text{-}820^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$	821°C
Densitas, setelah dikuatkan (annealed)	$2.23\text{-}2.24 \pm 0.02\text{ g/cm}^3$	2.23 g/cm^3
Indeks Refraktif		1.474 pada <i>Sodium D Line</i>
Batas Suhu		490°C (perlakuan ekstrem) 230°C (perlakuan normal)
Kejut Panas (Thermal Shock) Maksimum		160°C

Sumber: “*Borosilicate Glass*”, Wikipedia, 2010

2.5 Reaktor Plasma

Reaktor plasma adalah tempat terjadinya reaksi kimia antara gas yang menjadi reaktan dan plasma yang terbentuk di dalam reaktor. Komponen utamanya adalah sepasang elektroda untuk menciptakan pemutusan elektrik (*electric discharge*) dalam reaktor. Ketika terjadi pemutusan elektrik tersebut, elektron di dalam plasma akan menjadi bergerak sangat cepat dan terjadi

tumbukan antara elektron dan molekul-molekul dari gas reaktan, memecahnya menjadi atom-atom. Hasil tumbukan selanjutnya antara elektron dan atom tersebut berupa ionisasi yang membentuk ion dan radikal bebas (yang berasal dari atom dan molekul yang berpartisipasi dalam reaksi kimia). Gambar 2.1 berikut di bawah menunjukkan ilustrasi reaksi-reaksi yang terjadi di dalam reaktor plasma.



Gambar 2.1 Reaksi-Reaksi yang Terjadi di dalam Reaktor Plasma

Sumber: Eliezer dan Eliezer, 2001

Hal yang penting di dalam reaktor plasma adalah pengaturan pembangkitan fluks elektron dan ion di dalam reaktor plasma. Disosiasi molekular akan membangkitkan radikal bebas yang dapat saling berkombinasi untuk membentuk material lainnya atau kembali ke bentuk aslinya. Di dalam wadah reaktor, pada bagian katoda, radikal dan ion dapat terabsorpsi, terikat, atau terpisahkan. Jika produk pada reaksi permukaan mudah terevaporasi maka akan meninggalkan permukaan. Jika produknya tidak mudah terevaporasi, deposisi

akan terjadi dan lapisan film akan terbentuk. Untuk produk yang tetap berada pada permukaan atau di bawah permukaan, hasilnya berupa implantasi.

Reaktor didesain berbeda agar hanya menghasilkan proses yang diinginkan. Untuk mencapai tujuan ini, terdapat banyak parameter operasi (variasi eksternal) di antaranya: laju alir gas, komposisi gas, tekanan di dalam reaktor, kekuatan listrik dan frekuensi, magnitudo dan arah medan magnet eksternal (terkadang digunakan untuk memastikan atau mengarahkan partikel yang bermuatan di dalam plasma), temperatur masukan, dan geometri reaktor (Eliezer dan Eliezer, 2001).

Proses yang terjadi ditentukan oleh variabel internal yang merupakan hasil dari seluruh variabel eksternal tadi. Variabel internal adalah densitas dan fluks elektron dan ion, suhu elektron dan ion, molekul gas netral, dan radikal bebas yang diproduksi di dalam reaktor.

Dengan banyaknya parameter yang terkait dan kompleksitas medium plasma, penggunaan komputer modern dan analisis numerik canggih sangat diperlukan untuk pengembangan proses plasma, khususnya di industri. Properti yang tidak seragam dari plasma seperti temperatur, ion dan elektron yang berenergi, dan keberadaan plasma pada kondisi yang sangat beragam akan densitas, tekanan dan suhu menyebabkan penggunaan plasma menjadi khas dan khusus terhadap praktik suatu industri.

2.6 Konversi Elpiji dengan Metode Plasma Non-Termal

Usaha pertama dalam memanfaatkan proses konversi kimia menggunakan teknik plasma terhadap gas berkomponen karbon sederhana seperti CO, CO₂, CH₄ menjadi molekul organik yang lebih kompleks telah dilakukan sejak pertengahan abad ke-19 (Yun, 2003). Proses plasma non-termal menggunakan plasma yang bekerja pada temperatur rendah dimana sebagian besar energi listriknya digunakan untuk menghasilkan partikel bermuatan (Kogelschatz, 2003). Partikel bermuatan ini selanjutnya akan menghasilkan elektron-elektron yang saling bertumbukan dan membangkitkan spesi aktif sehingga reaksi kimia (yang mengkonversi elpiji) dapat terjadi.

Bentuk konversi yang diharapkan terjadi pada elpiji diharapkan mengikuti proses umum konversi hidrokarbon dengan mekanisme berupa pembentukan ion karbonium dan radikal bebas. Hal ini erat kaitannya dengan kondisi ikatan hidrokarbon, yaitu berupa ikatan kovalen dengan pemakaian elektron bersama oleh atom-atom pembentuk ikatan. Pada ikatan ini atom karbon memiliki bentuk tetrahedral yang mempunyai ikatan dengan empat atom hidrogen yang saling bersimetri. Berdasarkan eksperimen, setiap atom hidrogen pada ikatan CH_4 dapat dilepaskan dari atom karbon dengan energi yang sama. Hal ini terjadi karena pada ikatan ini terdapat empat orbital hibrid sp^3 yang saling tumpang tindih dengan orbital $1s$ hidrogen, menghasilkan empat ikatan sigma yang memiliki panjang dan kuat ikat yang sama.

Proses konversi pada penelitian ini ditandai dengan adanya perubahan komposisi elpiji sebagai reaktan dimana diharapkan terjadi peningkatan ataupun pembentukan suatu komponen hidrokarbon tertentu dan berkurangnya komponen hidrokarbon lainnya. Terjadinya hal tersebut menandakan bahwa telah terjadi konversi dimana pada proses konversi ini terjadi reaksi pemutusan maupun penyambungan kembali rantai hidrokarbon. Perubahan konsentrasi komponen hidrokarbon elpiji menjadi parameter utama keberhasilan reaksi plasma dalam mengkonversi elpiji sebagai reaktan.

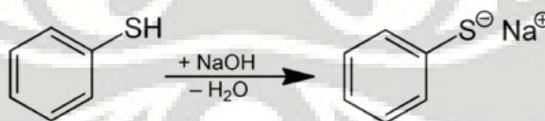
Plasma non-termal yang digunakan pada penelitian adalah reaktor plasma *dielectric barrier discharge* (DBD) dengan bahan dielektrik penghalang listrik berupa kaca borosilikat yang berada di antara dua elektroda tegangan tinggi sebagai sumber utama *discharge* yang dibangkitkan menggunakan sumber listrik AC. 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 pengontrolan suhu dan tekanan, instalasi yang mudah untuk dibuat, dan perawatan yang murah.

2.6.1 Treatment Awal Elpiji

Elpiji yang lazim terdapat dalam tabung 12 kg Pertamina memiliki zat pencampur selain hidrokarbon, yaitu merkaptan berfungsi sebagai zat tambahan

untuk memberikan bau yang khas, sehingga kebocoran gas dapat dideteksi dengan cepat (“Mengenal Elpiji”, Pertamina, 2010). *Mercaptan* merupakan senyawa turunan dari sulfur yang bersifat asam, sehingga keberadaannya dalam reaktor dapat mengakibatkan korosi pada elektroda dan pembentuk *sludge* yang menghambat aliran gas produk. Oleh karena itu, dibutuhkan sejumlah *treatment* (perlakuan) awal untuk membersihkan *mercaptan* tersebut. *Treatment* yang dilakukan berupa mengontakkan umpan elpiji ke dalam larutan basa kuat untuk membersihkan *mercaptan*, sehingga elpiji yang masuk ke dalam reaktor diharapkan sudah terbebas dari *mercaptan* ataupun masih mengandung *mercaptan* namun dalam jumlah yang sangat kecil.

Mercaptan merupakan nama umum dari golongan senyawa thiol, yaitu senyawa yang terdiri dari ikatan sulfur-hidrogen. Gugus fungsi thiol ini terkadang disebut juga sebagai grup *sulphydryl*. *Mercaptan* yang lazim digunakan sebagai aditif pada elpiji pasaran adalah etil *mercaptan* dan butil *mercaptan* dengan rumus kimia C_2H_5SH dan C_3H_7SH . Jika dibandingkan dengan alkohol, thiol relatif merupakan jenis asam lemah, dengan perbandingan untuk metilthiol mempunyai $pK_a \sim 10,4$ sedangkan butanol 15. Sehingga, jika *mercaptan* dikontakkan dengan basa kuat maka secara spontan akan terjadi reaksi oksidasi asam-basa yang menghasilkan disulfida organik (R-S-S-R) yang didahului dengan pembentukan *thiolate* (“Thiol”, Wikipedia, 2010). Gambar 2.2 di bawah berikut menunjukkan skema reaksi umum antara thiolfenol dan basa kuat (NaOH).



Gambar 2.2 Pembentukan *Thiophenolate* dari *Thiophenol* dalam Larutan Basa (“Thiol”, Wikipedia, 2010)

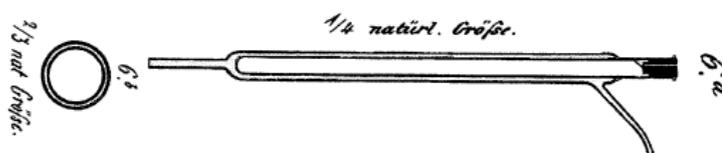
Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan basa kuat (yang dipilih adalah KOH) yang diharapkan dapat mengabsorpsi *mercaptan* karena terjadi kontak antara asam (*mercaptan*) dan basa kuat (KOH). KOH yang digunakan memiliki kemolaran yang tidak tinggi (0,5 M), sehingga diharapkan dapat memberikan keuntungan karena tingginya kadar pelarut KOH yaitu $H_2O_{(l)}$ menyebabkan sebagian kecil $H_2O_{(l)}$ dapat terbawa masuk bersama aliran elpiji

reaktan yang masuk ke reaktor plasma. Sebagian kecil $H_2O_{(l)}$ ini diharapkan dapat menjadi tambahan suplai senyawa radikal untuk proses konversi ini dimana molekul H_2O dapat dengan mudah menyerap energi dari elektron yang dibangkitkan reaktor plasma sehingga secara langsung menurunkan tegangan yang terdapat pada wilayah di antara dua elektroda tersebut yang berakibat perbedaan tegangan akan meningkat sehingga peristiwa pemutusan tegangan (*breakdown voltage*) akan terjadi dan proses pembentukan plasma akan lebih mudah. Hal ini berpengaruh terhadap penurunan konsumsi energi reaktor.

Pemakaian KOH pada penelitian ini adalah dengan *bubbler*, berupa housing yang berisi pipa tunggal sebagai *diffuser* yang akan menggelembungkan umpan elpiji (akibat kontak dengan larutan KOH). Sehingga, dengan pembentukan gelembung ini aliran gas elpiji yang berada dalam kesetimbangan antara elpiji dan sebagian kecil air tanpa *mercaptan* akan keluar dari *bubbler* menuju reaktor plasma DBD.

2.6.2 State of The Art Rancang Bangun Reaktor Plasma Non-Termal DBD

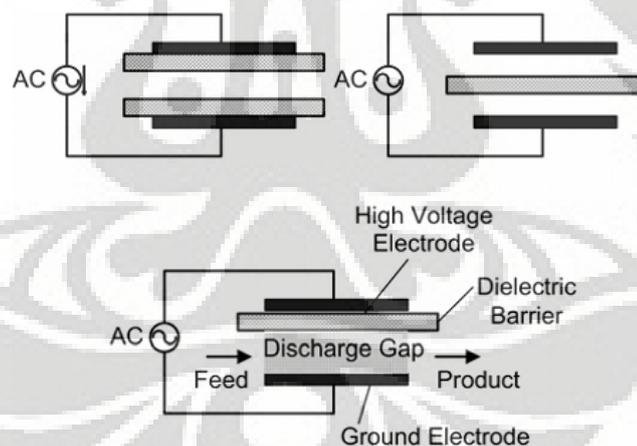
Reaktor Plasma *Dielectric Barrier Discharge* (DBD) telah diketahui lebih dari seabad. Percobaan pertama tentang reaktor ini dilaporkan oleh Siemens pada tahun 1857 (Kogelschatz, 2003). Ia memfokuskan penelitian pada pembangkitan ozon yang dilakukan dengan mengalirkan oksigen atau udara ke dalam reaktor DBD berupa celah (*gap*) annular antara dua tabung kaca koaksial dengan medan listrik pada amplitudo tertentu. Ide baru dari peralatan *discharge* ini adalah elektrodanya ditempatkan di luar ruang *discharge* dan tidak dikontakkan pada plasma (Gambar 2.3 di bawah). Pada tahun-tahun berikutnya Wemer von Siemens menyatakan bahwa konfigurasi *discharge* untuk pembangkitan ozon yang dilakukannya adalah salah satu penemuannya yang penting.



Gambar 2.3 Rancangan Tabung (*tube*) Ozone *discharge* oleh W. Siemens, 1857 (Kogelschatz, 2003)

Beberapa tahun kemudian, Andrews dan Tait pada tahun 1860 mengajukan nama “*silent discharge*” untuk reaktor ini, yang masih digunakan pada literatur sains Inggris, Jerman, dan Perancis. Pembentukan ozon dan nitrogen oksida menggunakan DBD menjadi isu riset yang penting selama beberapa dekade. Pengembangan reaktor ini terus berlanjut dan sejak sekitar 10 tahun belakangan, produksi ozon menjadi aplikasi utama industri yang menggunakan basis reaktor DBD dan telah terpasang ratusan fasilitas pembuatan ozon yang merupakan bagian dari pengolahan air. Sehingga dengan dinamika tersebut DBD terkadang disebut sebagai *ozonizer discharge* (Kogelschatz, 2003)

Sebagaimana telah dibahas sebelumnya, pada penelitian konversi elpiji dan sintesis C-rantai panjang ini digunakan reaktor plasma non-termal DBD. Reaktor plasma DBD ini terdiri dari dua elektroda, elektroda pertama berbentuk batang logam dan elektroda kedua adalah kawat logam yang digulung menyelimuti batang logam, yang di antaranya terdapat penghalang dielektrik yang membentuk *gap* (celah). Konfigurasi dasar reaktor plasma jenis DBD dapat dilihat pada Gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2.4 Konfigurasi Dasar Reaktor Plasma DBD Planar

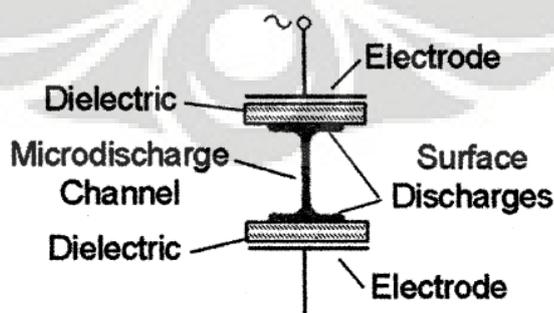
Sumber: Istadi, 2006

Di dalam reaktor DBD terjadi emisi yang terjadi pada ruang antara kedua elektroda, yang disebut ruang *discharge* (*discharge gap*). Fenomena *discharge* (loncatan listrik) terjadi ketika tegangan yang melewati penghalang dielektrik melewati efek insulasi dari dielektrik dan terjadilah jutaan *micro-discharge*. Durasi *discharge* ini sangat cepat, yang dihitung dalam nanosekon. 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). Oleh karena itu, plasma DBD dikenal juga dengan nama *silent-discharge*.

Aspek geometri dari reaktor yaitu ukuran panjang, diameter, jarak pisah antar elektroda serta konstanta dielektrik dan ketebalan dielektrik dengan kombinasi waktu derivatif dari tegangan terpakai, dU/dt , menentukan besar arus yang dapat dilewatkan dielektrik (Kogelschatz, 2003). Agar dapat mengalirkan arus dalam jumlah yang cukup dalam *discharge gap*, medan listrik yang terbentuk harus cukup tinggi untuk menyebabkan pemutusan gas (*gas breakdown*). Pada frekuensi yang sangat tinggi, pembatasan arus oleh dielektrik menjadi kurang efektif. Oleh karena itu, reaktor DBD normalnya beroperasi pada frekuensi sekitar 10 MHz.

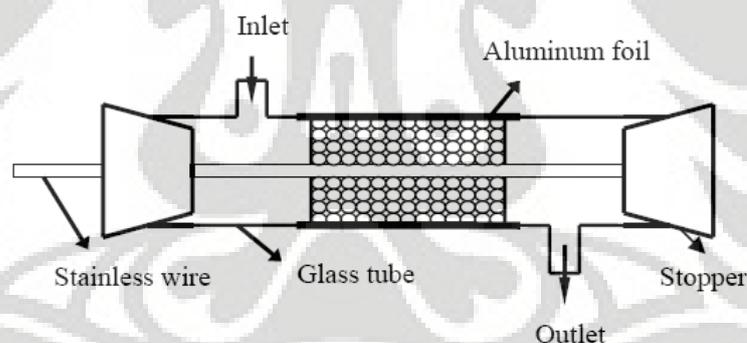
Selanjutnya, bahan dielektrik tersebut mendistribusikan *discharge* listrik mikro ke seluruh permukaan elektroda untuk menjamin tidak ada lucutan api (*spark*) atau busur api (*arc*) di dalam ruang *discharge*, namun tetap memastikan terjadinya reaksi kimia di ruang antar elektroda. Hal ini terjadi karena meningkatnya jumlah ion, elektron dan radikal yang terbentuk akibat pemutusan rantai oleh elektron yang dihasilkan dari perpindahan elektron antar kedua elektroda. Ketika medan listrik dalam *discharge gap* cukup tinggi untuk menghasilkan breakdown, terjadilah *micro-discharge* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5 di bawah ini.



Gambar 2.5 Sketsa Pembentukan *Microdischarge* (Kogelschatz, 2003)

Sehingga, salah satu keuntungan plasma reaktor jenis DBD adalah bahwa energi rata-rata elektron dapat diatur dengan mengubah densitas gas dan susunan jarak antar elektroda di dalam reaktor (Istadi, 2006). Hal ini menjadi sangat potensial untuk reaksi-reaksi kimia organik maupun anorganik karena sifat-sifat *non-equilibrium*, *input* tenaga rendah, serta kemampuan mempengaruhi reaksi kimia dan fisika pada temperatur yang relatif rendah dari reaktor DBD.

Pada tahun 2006, Purushothama et.al. (2006) membuat rancangan reaktor DBD jenis *cylindrical packed bed DBD reactor*. Reaktor ini dibuat dari tabung kaca dengan diameter dalam (ID) 17,5 mm, diameter luar (OD) 23 mm, dan panjang 360 mm. Sebuah batang *stainless steel* berdiameter 2 mm dan panjang 448 mm tersusun secara koaksial dalam tabung kaca yang berfungsi sebagai elektroda pusat. *Aluminium foil* diselubungkan pada tabung kaca sepanjang 250 mm yang berfungsi sebagai elektroda luar. Bagian dalam antara elektroda pusat dan elektroda luar diisi dengan butiran kaca yang memiliki diameter 3 mm dan konstanta dielektrik 10 untuk 223 mm. Gambar 2.6 di bawah ini menunjukkan gambar rancangan reaktor DBD Purushothama dkk.



Gambar 2.6 Reaktor DBD *Cylindrical Packed Bed* Hasil Rancangan Purushothama dkk (Purushothama et.al., 2006)

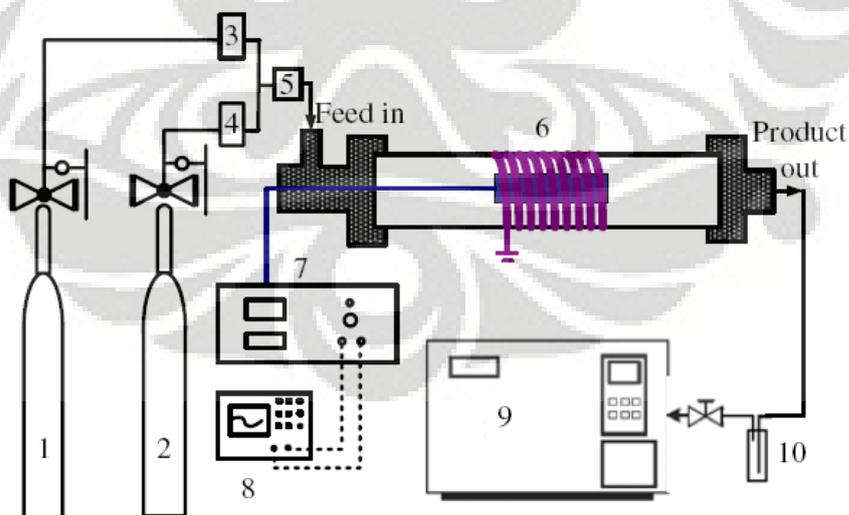
Pada penelitian Purushothama et.al. ini plasma non-termal digunakan untuk menghasilkan gas-gas oksidatif O_3 dan NO_2 yang digunakan untuk menyisihkan jelaga (*soot*) yang terdeposit pada *diesel particulate filter* (DPF). Dari hasil penelitian disimpulkan konversi gas-gas dalam reaktor DBD meningkat seiring peningkatan daya *discharge* dan penurunan frekuensi.

Wang, Yan, Jin, & Cheng (2009) melakukan penelitian dengan tujuan menginvestigasi pengaruh daya masukan, waktu tinggal, dan *discharge gap*

terhadap kinerja reaktor DBD yang digunakan untuk mengkonversi metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) menjadi *syngas* (CO dan H_2) dengan mekanisme *dry reforming*. Proses operasi ini menghasilkan produk samping (*by-product*) yaitu etilena (C_2H_6). Umpan masukan adalah CH_4 dan CO_2 dengan perbandingan mol 1:1. Penelitian dilakukan menggunakan reaktor DBD pada suhu kamar dan tekanan sekitar (*ambient*).

Pada penelitian Wang et.al. (2009) tersebut, reaktor DBD dibuat dari tabung kaca kuarsa sebagai media dielektrik 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 2.7 di bawah ini menunjukkan skema peralatan yang digunakan pada penelitian ini.

Dari hasil penelitian Wang et.al. tersebut 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.

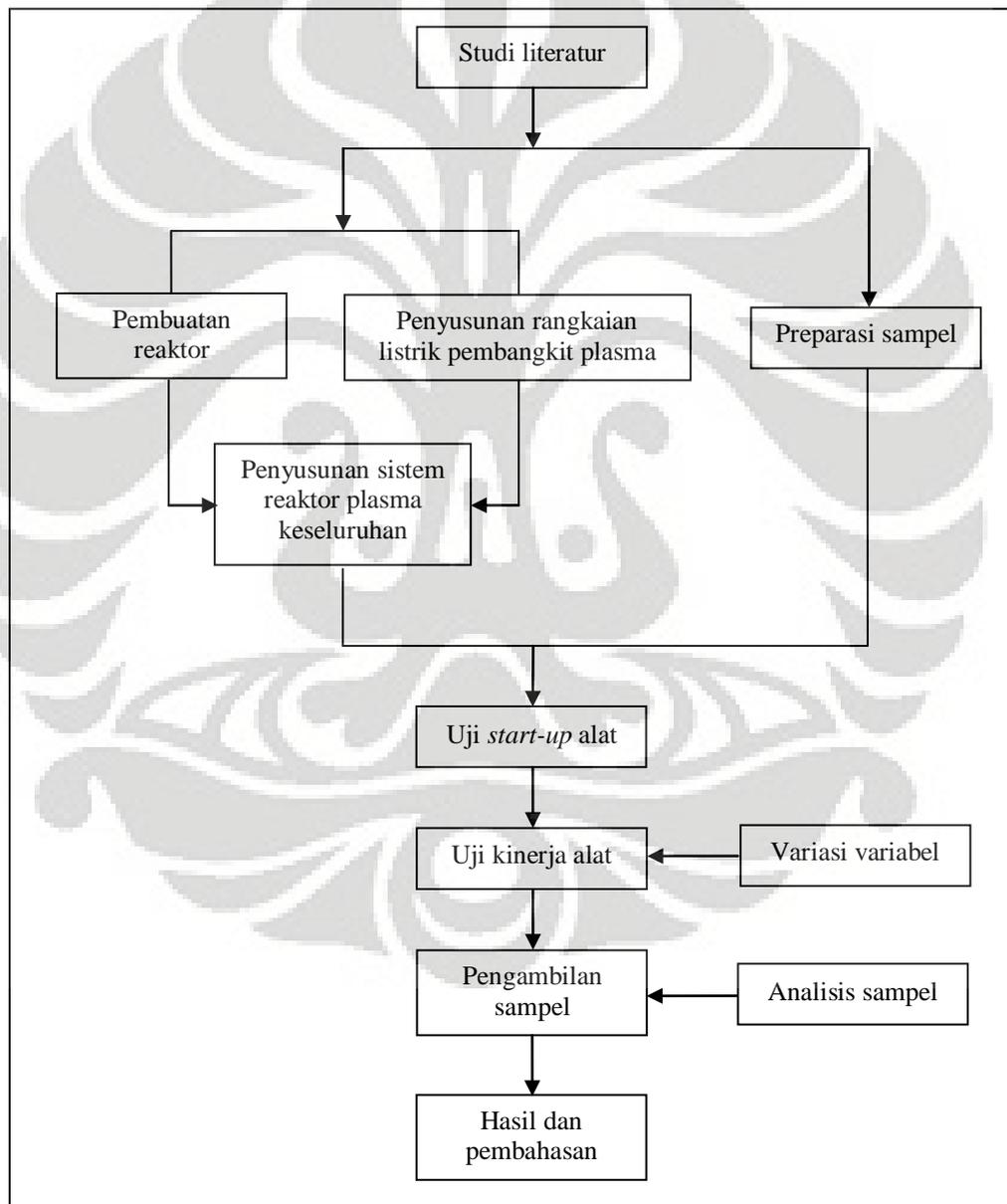


Gambar 2.7 Skema Peralatan Eksperimen: 1,2. Silinder Gas (CH_4 and CO_2); 3,4. Pengatur laju alir massa; 5. *Gas mixer*; 6. Reaktor DBD; 7. Sumber tenaga pembangkitan plasma; 8. *Oscillograph*; 9 Kromatograf gas; 10. *Cold trap* (Wang, Yan, Jin, & Cheng, 2009)

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan tentang diagram alir penelitian, rancangan penelitian, prosedur penelitian, pengolahan data, dan analisis yang dilakukan.

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Reaktor Plasma Non-Termal

3.2 Rancangan Penelitian

3.2.1 Rancang Bangun Sistem Reaktor Plasma DBD

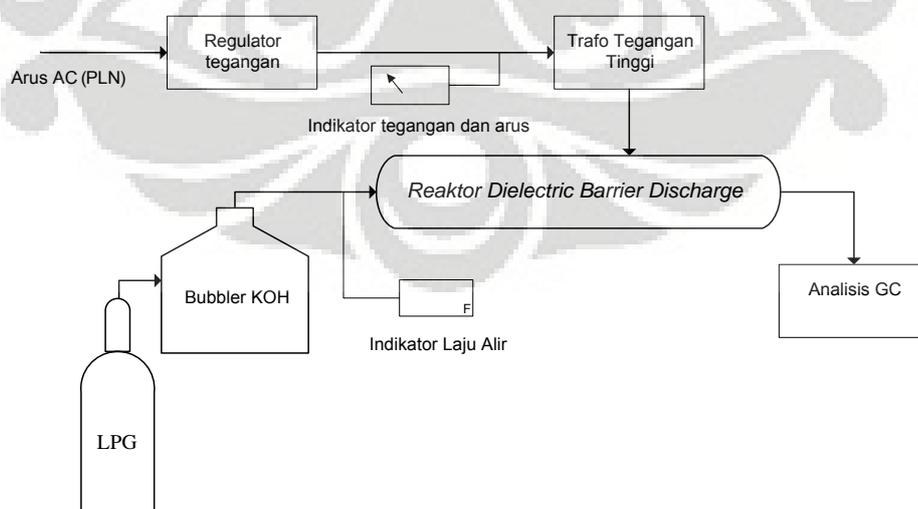
Peralatan yang dirancang adalah sistem reaktor plasma non-termal *Dielectric Barrier Discharge* (DBD) dengan jenis pipa koaksial berbentuk *shell and tube*. Perancangan sistem reaktor plasma ini dilakukan guna mendapatkan susunan rangkaian sistem reaktor plasma yang akan digunakan nantinya untuk melakukan penelitian. Rangkaian utama peralatan ini terdiri dari:

1. Reaktor plasma DBD
2. Regulator tegangan
3. Trafo tegangan tinggi (HVT) dari *Neon-Sign Transformer* (NST)
4. Indikator laju alir (*flowmeter*)
5. Indikator tegangan (*voltmeter*) dan kuat arus (*amperemeter*)
6. *Bubbler* berisi larutan KOH
7. Peralatan analisis *Gas Chromatography* (GC)

Bahan yang digunakan adalah:

1. Elpiji kaleng (*cartridge*) 250 g produksi Iwatani dan LPG 12 kg produksi Pertamina
2. Larutan KOH 0,5 M sebanyak 500 mL

Setelah perakitan reaktor dan sumber tegangan tinggi telah selesai, keseluruhan komponen disusun menurut skema pada Gambar 3.2 di bawah ini:



Gambar 3.2 Skema Sistem Peralatan Plasma Non-termal DBD untuk Konversi Elpiji

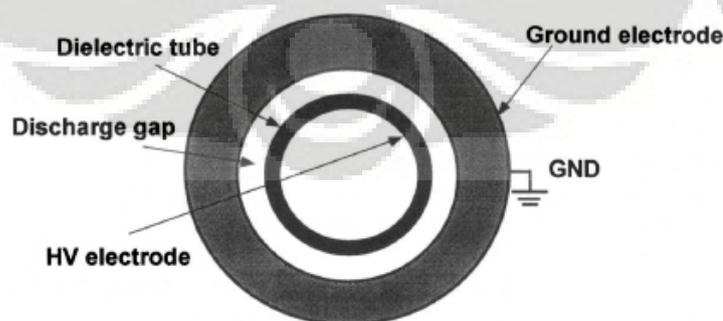
Elpiji sebagai reaktan dialirkan ke dalam *bubbler* KOH yang kemudian masuk ke dalam reaktor plasma DBD. Laju alir umpan diatur dengan menggunakan indikator laju alir, yaitu *flowmeter*. Listrik PLN masuk ke regulator tegangan untuk diatur tegangannya dan kemudian mengalir ke transformator tegangan tinggi (*High Voltage Transformer*, HVT) untuk dinaikkan tegangannya menjadi tegangan plasma (2-15 kV). Plasma yang dibangkitkan menggunakan HVT ini akan menyebabkan terjadinya reaksi yang akan mengkonversi umpan elpiji menjadi produk yang diinginkan. Sampel produk gas kemudian disimpan sementara ke *gas trap* untuk kemudian dianalisis menggunakan *Gas Chromatography* (GC).

3.2.1.1 Pembuatan Reaktor Plasma DBD

Perancangan alat pembangkit plasma jenis pipa koaksial ini didasarkan pada sejumlah kriteria sebagai berikut:

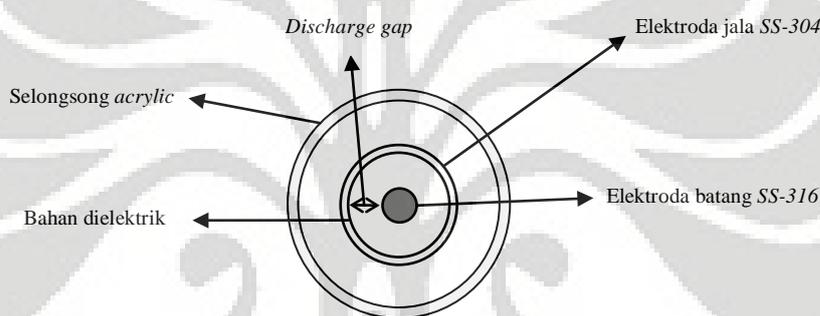
- Efisien, konsumsi daya listrik minimal, dan produktivitas tinggi.
- Mudah dalam hal pembuatan, pengoperasian, dan perawatannya.
- Biaya pengoperasian dan perawatan yang murah.

Pada perancangan reaktor ini diharapkan terjadi pembentukan produk hasil konversi dari umpan gas elpiji dengan reaktor plasma DBD yang dirancang. Reaktor plasma non-termal yang dirancang memiliki prinsip dasar seperti reaktor plasma jenis pipa yang tampak skemanya pada Gambar 3.3 di bawah ini.



Gambar 3.3 Skema Melintang Reaktor DBD (Zhou, Xue, Kogelschatz, & Eliasson, 1998)

Dengan dasar pengembangan dari reaktor plasma jenis pipa di atas, maka perlu dirancang reaktor plasma jenis pipa koaksial dengan pertimbangan teoritis untuk menghasilkan plasma secara efisien dengan konsumsi daya listrik minimal. Selanjutnya, dilakukan perancangan reaktor plasma yang sederhana dimana perakitan pipa koaksial dalam reaktor plasma dirancang untuk mengalirkan umpan sebanyak tiga kali siklus dalam reaktor berjenis *shell and tube*. Untuk itu, diputuskan pembuatan satu pipa koaksial tunggal (*tube*) dalam satu reaktor plasma, dengan konfigurasi pipa terletak di tengah selongsong (*shell*) *acrylic* seperti tampak pada skema melintang reaktor plasma pada Gambar 3.4 di bawah ini.



Gambar 3.4 Skema Melintang Reaktor Plasma DBD Jenis Pipa Koaksial Tunggal

Pada pipa koaksial tunggal ini gas elpiji umpan yang mengandung butana dan propana diharapkan dapat dikonversi menjadi produk gas hidrokarbon rantai panjang atau pendek dan beberapa pengotor pada medan listrik atau *corona discharge gap* antara elektroda bagian dalam dan luar. *Corona discharge* ini merupakan muatan listrik yang tampak seperti cahaya ungu-kebiruan tipis pada permukaan dan berdekatan dengan elektroda ketika gradien tegangan mencapai suatu nilai kritis, disebabkan oleh ionisasi yang terjadi di sekeliling gas yang melalui *gap* oleh tegangan tinggi.

Plasma dibangkitkan pada reaktor ini menggunakan dua elektroda, yang berbentuk batang dan jala. Kedua elektroda ini terbuat dari bahan *stainless steel*, sedangkan penghalang dielektriknya terbuat dari gelas *pyrex* dengan bahan borosilikat. Kedua elektroda dihubungkan dengan sumber tegangan tinggi yaitu NST. Arus listrik masukan akan dinaikkan oleh transformator tegangan tinggi

yang diatur lewat regulator tegangan, sehingga keluarannya menghasilkan tegangan yang tinggi, yaitu sekitar 2-15 kV.

Komponen-komponen utama yang diperlukan dalam pembuatan reaktor plasma DBD ini adalah sebagai berikut:

1. Tabung gelas dielektrik sebanyak 2 buah sebagai *tube*

Penghalang dielektrik terbuat dari gelas jenis *pyrex* dari bahan borosilikat (Gambar 3.5) berbentuk tabung (*tube*). Borosilikat dipilih karena mempunyai ketahanan panas yang cukup tinggi dengan harga relatif murah dan mempermudah pengamatan karena tidak berwarna (bening). Tabung *pyrex* ini memiliki spesifikasi: panjang 36,5 cm, diameter luar (OD) 12 mm dan diameter dalam (ID) 10 mm untuk reaktor 1 dan OD 14 mm dan ID 12 mm untuk reaktor 2 dengan tebal kaca 1 mm.



Gambar 3.5 Gelas Dielektrik

2. Elektroda Tegangan Tinggi sebanyak 2 buah

Terdapat dua elektroda yang digunakan pada reaktor ini, yaitu elektroda batang dan elektroda jala. Elektroda batang terbuat dari bahan *stainless steel* ANSI 316 berbentuk pipa berongga dengan salah satu sisinya tertutup dan diberi ulir untuk pemasangan baut sebagai tempat pemasangan kabel tegangan tinggi yang dihubungkan ke NST (Gambar 3.6). Pada jarak 53 mm dari ujung berulir (ujung yang tertutup, bagian bawah reaktor) dibuat dua lubang sebagai tempat keluaran gas. Elektroda batang yang diperlukan adalah 2 buah dengan ukuran sama. Batang *stainless steel* ini memiliki spesifikasi panjang 38 cm dan diameter luar 6,5 mm.



Gambar 3.6 Elektroda Batang SS-316

Elektroda kedua yang berbentuk jala terbuat dari *stainless steel* ANSI 304 (Gambar 3.7) berukuran 60 *mesh* yang digulung menyelubungi tabung *pyrex*. Elektroda ini terhubung dengan sumber tegangan tinggi (NST) pada bagian tengah *tube* reaktor dengan melilitkan kawat *stainless steel*, menyisakan lilitan kawat pada bagian tengah sebagai tempat sambungan kabel tegangan tinggi ke NST dengan melubangi selongsong *acrylic*.



Gambar 3.7 Elektroda Jala SS-304

3. Selongsong (*shell*) berupa tabung *acrylic* sebanyak 2 buah

Selongsong reaktor dirancang berbentuk tabung silinder yang terbuat dari *acrylic*. Pertimbangan pemilihan bahan *acrylic* dikarenakan untuk memudahkan dalam pemasangan, bahan yang cukup kuat, dan memudahkan penglihatan bagian dalam reaktor jika nantinya terdapat kerusakan komponen-komponen di dalamnya (karena bening). Spesifikasi selongsong *acrylic* (Gambar 3.8) yang digunakan adalah sebagai berikut:

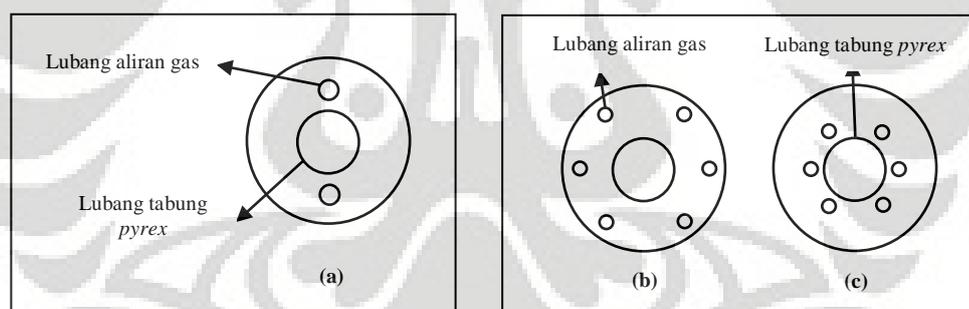


- Tinggi = 42,5 cm
- Ketebalan = 2 mm
- Diameter luar = 50 mm
- Diameter dalam (ID) = 46 mm

Gambar 3.8 Selongsong Acrylic

4. *Baffle* sebagai penyekat aliran gas

Terdapat dua jenis *baffle* yang digunakan pada penelitian ini, yaitu dua *baffle* sebagai penyekat bagian atas (di antara *nipple* keluaran reaktor) dan empat *baffle* sebagai pengatur aliran gas umpan, dalam hal ini elpiji sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.9 di bawah ini. *Baffle* berguna dalam mengatur agar lintasan gas umpan lebih panjang sehingga waktu kontak antara gas umpan dan *tube* reaktor lebih lama dalam selongsong reaktor. Dengan lamanya waktu kontak elpiji dalam reaktor ini, maka ia diharapkan dapat mendinginkan bagian *tube* reaktor (gelas dielektrik) tempat terjadinya reaksi utama dan mencegah gelas dielektrik tersebut dari kerusakan (pecah) akibat panas yang dihasilkan ketika reaktor dinyalakan. *Baffle* ini terbuat dari *acrylic* dan juga berfungsi sebagai pemegang bagian dalam reaktor (*tube*) agar dapat berdiri dengan kokoh. Semua *baffle* ini memiliki diameter lingkaran luar 46 mm, diameter lubang tempat memasukkan tabung *pyrex* (bagian tengah *baffle*) 12 mm dan 14 mm, dan ketebalan 3 mm. Selain itu, jarak antara 2 *baffle* teratas adalah 27, 2 mm sebagai ruang keluaran produk.

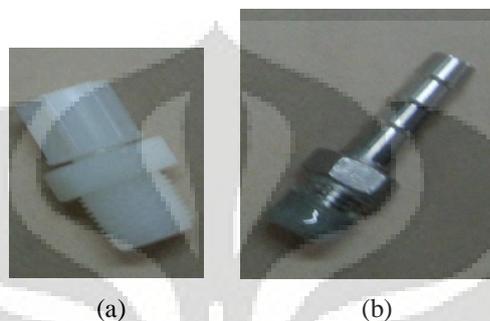


Gambar 3.9 Skema lubang aliran gas pada *baffle*: (a) Dua buah *baffle* penyekat atas-bawah; (b) dua buah *baffle* dengan lubang aliran gas dekat lingkaran luar (tabung *acrylic*); dan (c) dua buah *baffle* dengan lubang aliran gas dekat lingkaran dalam (tabung *pyrex*)

5. *Nipple* dan selang masing masing sebanyak 4 buah

Nipple yang dipergunakan pada reaktor ini ada dua jenis, yaitu untuk umpan masukan dan keluaran reaktor (Gambar 3.10) yang berjumlah masing-masing dua buah. Keduanya memiliki ukuran ulir yang sama, yaitu 0,25 inci. Untuk *nipple* umpan masukan reaktan (bagian bawah) menggunakan *nipple* plastik berwarna putih untuk ukuran selang 8 mm dengan bahan selang *polyurethane*. Sedangkan untuk keluaran produk (di bagian atas) menggunakan *nipple* terbuat dari *stainless*

steel dan selang berbahan *silicon*. *Nipple stainless steel* dipasang pada bagian atas reaktor dengan jarak 62,3 mm dari tutup reaktor atas sedangkan *nipple* plastik dipasang pada bagian bawah reaktor dengan jarak 50 mm dari tutup bawah reaktor. Kedua *nipple* memiliki diameter 15,1 mm dengan diameter lubang 5,5 mm.



Gambar 3.10 Dua Jenis *Nipple* : bagian masukan reaktan (a); bagian keluaran produk (b)

6. Tutup Reaktor sebanyak 4 buah

Sebagai penutup reaktor untuk bagian atas dan bawah digunakan tutup berbahan teflon yang kemudian direkatkan menggunakan lem epoksi (merek *araldite*) ke tabung selongsong *acrylic* untuk mengisolasi gas agar tidak keluar (bocor) dari reaktor. Tutup reaktor ini dapat dibuka tutup dengan memutarnya karena menggunakan ulir layaknya penutup botol minuman untuk mempermudah pembongkaran bagian dalam reaktor (elektroda batang dan *tube* reaktor) ketika pembersihan dan perawatan.

7. Kabel Tegangan Tinggi

Berfungsi untuk menghubungkan kedua elektroda tegangan tinggi (batang dan jala) pada reaktor dengan HVT. Selain itu, digunakan pula kabel listrik penghubung instalasi listrik.

8. Klem (pemegang) Reaktor

Digunakan untuk menaruh reaktor pada tatakan reaktor sebanyak 4 buah.

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

1. Perakitan bagian *tube* reaktor dengan cara memasukkan elektroda batang ke dalam tabung borosilikat. Pada kedua ujung tabung borosilikat (dalam *screw cap* yang berwarna merah) dipasang pembatas *silicon* sebagai pencegah kebocoran gas, sehingga gas dari luar hanya masuk ke dalam *tube* reaktor melalui rongga elektroda batang.
2. Pembuatan lubang elektroda batang pada bagian dekat ujung yang memiliki ulir dan baut (bagian bawah dekat masukan) dengan bor pada jarak 53 mm dari ujung tersebut. Lubang ini berfungsi sebagai tempat keluar gas ketika gas mengalir turun dari bagian atas elektroda batang ke dalam rongga yang terdapat di dalamnya. Gas akan keluar dan mengalir ke atas sepanjang bagian dalam kaca borosilikat melalui lubang ini.
3. Pemotongan tabung *acrylic* sebagai selongsong (*shell*) dengan panjang 42,5 cm. Melubangi tabung *acrylic* sejauh 62,3 mm dan 50 mm (untuk masing-masing *nipple* SS dan *nipple* plastik) dari tutup reaktor sebagai lubang pemasangan *nipple*.
4. Pembuatan tutup reaktor (*shell*) dari teflon serta *baffle* dari *acrylic* sebagai pemegang bagian *tube* reaktor dan sebagai pengatur arah aliran gas dalam selongsong *acrylic*. Melubangi lubang aliran gas sebanyak 6 lubang tiap *baffle*.
5. Pemasangan elektroda jala yang digulung menyelimuti kaca borosilikat dan kemudian diikat dengan kawat *stainless steel*.
6. Pengeleman seluruh *baffle* (4 *baffle* pengatur aliran dan 2 *baffle* bagian atas) dengan kaca borosilikat yang telah diselimuti elektroda jala dengan mengatur jarak antar *baffle* dan kemudian memasukkannya ke dalam tabung selongsong *acrylic*. Lalu, mengelem kedua *baffle* teratas (dekat keluaran produk) ke selongsong *acrylic*.
7. Pengeleman *nipple* plastik dan *nipple stainless steel* ke lubang yang telah dipersiapkan pada selongsong *acrylic*. *Nipple stainless steel* pada bagian atas (keluaran) dan *nipple* plastik pada bagian bawah (masukan).
8. Pemasangan sumber masukan listrik (skun) berupa kawat *stainless steel* yang dililitkan ke elektroda jala pada bagian tengah reaktor dan kabel tegangan tinggi pada bagian ujung bawah elektroda batang yang berulir. Kedua skun

ini kemudian dihubungkan ke bagian sekunder NST menggunakan kabel tegangan tinggi untuk membangkitkan plasma pada reaktor.

9. Pengeleman tutup reaktor menggunakan lem epoksi (merek *araldite*).
10. Pemasangan klem penyangga reaktor di tatakan reaktor dengan menggunakan baut dan mur. Klem ini berguna untuk memegang bagian atas dan bagian bawah reaktor sehingga reaktor dapat ditegakkan dengan sempurna pada bidang tatakan reaktor selama pengoperasian.

3.2.1.2 Pembuatan Sumber Tegangan Tinggi Menggunakan NST

Pada penelitian ini, sumber tegangan tinggi sebagai pembangkit plasma adalah dengan menggunakan transformator tegangan tinggi (HVT). Sumber tegangan ini menggunakan *neon sign transformer* (NST) yang umumnya digunakan sebagai sumber daya bagi papan iklan atau *neon sign*. Alat ini mampu mengkonversi tegangan dengan rentang 120–240 V menjadi tegangan tinggi yang memiliki rentang 2–15 kV pada 30–120 mA. NST merupakan transformator berinti besi, biasanya disatukan di dalam aspal untuk perlindungan dan isolasi. Bagian intinya mempunyai suatu lilitan magnetis yang membatasi arus keluaran, memungkinkannya untuk beroperasi dengan tak terbatas pada kondisi hubungan pendek. NST juga dapat beroperasi dengan tanpa muatan.

Pada operasionalnya, arus listrik masukan dari PLN akan dinaikkan tegangannya oleh transformator yang diatur lewat regulator tegangan, sehingga keluarannya menghasilkan tegangan yang tinggi, yang nantinya cukup untuk menghasilkan *discharge* untuk mengoperasikan reaktor plasma. Konsumsi daya yang diperlukan dapat diukur dengan menggunakan *voltmeter* dan *amperemeter* yang dirangkai pada keluaran regulator tegangan.

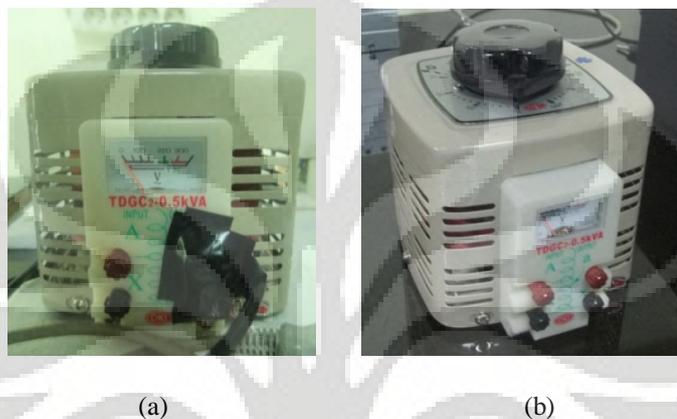
Kelengkapan alat sistem sumber tegangan tinggi menggunakan NST terdiri dari:

1. Regulator tegangan

Berfungsi sebagai pengatur tegangan keluaran yang diinginkan agar terbentuk plasma di dalam reaktor plasma dengan cara mengetahui adanya bunyi dengung yang terdengar dari dalam reaktor plasma (menandakan awal pelepasan korona) serta kemudian dari adanya pelepasan korona yang terbentuk di dalam

reaktor plasma (belum terbentuk *spark* yang terlampau besar/*arc*) akibat induksi medan elektromagnetis.

Seperti tampak pada Gambar 3.11 di bawah, spesifikasi alat yang dipakai adalah *voltage regulator* TDGC₂-0,5kVA OKI dengan *output indicator* memiliki rentang antara 0 – 250 V. Dari spesifikasi di atas, maka dapat diketahui bahwa regulator tegangan ini membutuhkan daya sebesar 500 Watt.



Gambar 3.11 Regulator Tegangan: (a) Tampak depan; (b) Tampak atas

2. Transformator tegangan tinggi (*neon sign* HVT)

Trafo ini berfungsi sebagai penaik tegangan (*set-up*) sehingga menghasilkan energi yang cukup agar reaktor dapat menghasilkan plasma. Dapat dilihat pada Gambar 3.12 di bawah ini, transformator yang digunakan pada penelitian ini adalah NST dengan merek *Standard Electric Works Hongkong* tipe T1522 dengan tegangan masukan 220 V dan tegangan keluaran maksimal 15.000 V. Alat ini bekerja pada frekuensi 50 Hz dan daya 450 VA (maksimum).



Gambar 3.12 Neon Sign Transformer

3. Kabel tegangan tinggi

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

3.2.1.3 Penggunaan Alat Ukur

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



Gambar 3.13 Tiga Jenis Alat Ukur: (a) *Amperemeter*; (b) *Voltmeter*; (c) *Flowmeter*

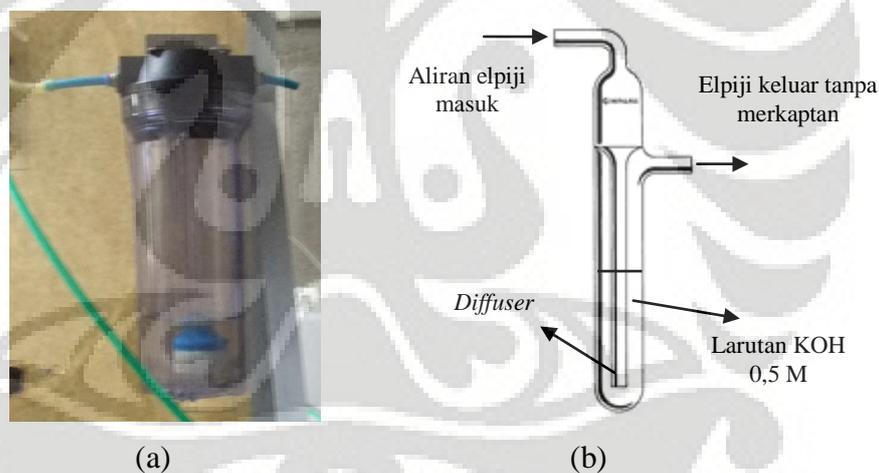
3.2.2 Preparasi Sampel

Sampel yang digunakan adalah gas elpiji yang berasal dari tabung elpiji 12 kg pertamina. Persiapan yang dilakukan adalah menguji aspek keselamatan penggunaan tabung gas. Oleh karena itu, digunakan regulator gas untuk mencegah kebocoran gas.

Sebelum memasuki reaktor plasma, gas elpiji terlebih dahulu dilewatkan melalui *bubbler* yang berisikan larutan KOH 0,5 M (Gambar 3.14a). Larutan

KOH 0,5 M dibuat dengan melarutkan 14 gram padatan KOH dalam 500 mL *aquadest* menggunakan labu ukur.

Larutan KOH ini berguna sebagai pengabsorpsi merkaptan yang kandungannya cukup tinggi dalam gas umpan. Prinsip kerja *bubbler* ini adalah dengan cara mengkontakkan aliran elpiji ke larutan KOH sehingga kandungan merkaptan (yang bersifat asam) yang terdapat pada elpiji akan terendapkan pada larutan KOH yang bersifat basa. Sementara itu, aliran elpiji tanpa merkaptan mengalir keluar dari *bubbler* dan masuk ke dalam reaktor plasma DBD ditambah sejumlah kandungan air $H_2O_{(l)}$ yang terurai dari reaksi antara merkaptan dan larutan KOH. Adanya kandungan sejumlah air ini diharapkan dapat meningkatkan jumlah partikel radikal untuk menyerang partikel butana dan propana yang terkandung dalam elpiji. Hal ini karena molekul air dapat menyerap elektron-elektron yang diaktifkan oleh plasma dengan mudah yang berpengaruh pada penurunan kebutuhan arus pada reaktor.



Gambar 3.14 *Bubbler* KOH: (a) *bubbler* yang digunakan; (b) skema kerja *bubbler*

3.2.3 Uji *Start-Up* Alat

Sebelum dilakukan uji *start-up* alat, terlebih dahulu dilakukan uji kebocoran reaktor. Uji kebocoran reaktor dilakukan dengan cara sederhana yaitu metode busa air sabun. Caranya udara dari kompresor dialirkan ke dalam reaktor (semua reaktor tertutup, kecuali *nipple* bagian keluaran terbuka sedikit) dan kemudian air sabun diteteskan ke area yang berpotensi bocor. Area yang

berpotensi bocor antara lain skun elektroda (terminal penghubung kedua elektroda pada reaktor dan NST menggunakan kabel tegangan tinggi), pengeleman *nipple* ke tabung *acrylic*, dan pengeleman tutup reaktor. Jika terdapat kebocoran maka dilakukan upaya pengeleman kembali yang lebih merata dan diuji kebocoran kembali.

Untuk pembangkit tegangan tinggi, uji kebocoran dilakukan dengan menyalakannya selama 10 menit dalam kondisi standar. Jika tidak terjadi kebocoran listrik atau pun hubungan singkat, berarti instalasi listrik yang dibuat sudah cukup bagus dan layak digunakan.

Setelah menyusun keseluruhan peralatan sebagai satu sistem, perlu dilakukan pengujian *start-up* alat untuk mengetahui kinerja reaktor plasma non-termal. Uji *start-up* dilakukan dengan mengalirkan sejumlah kecil umpan ke dalam reaktor untuk direaksikan dan kemudian reaktor dinyalakan. Jika tidak terjadi permasalahan, seperti kebocoran, hubungan singkat, dan sebagainya maka pembangkitan plasma sudah berhasil. Hal ini berarti reaktor sudah bekerja dengan baik dan dapat dioperasikan dengan normal. Pengujian ini berguna untuk mengecek adanya cacat pada alat dan sekaligus sebagai *troubleshooting*. Pada pengujian ini juga dilakukan pengamatan terhadap fenomena munculnya plasma pada reaktor DBD dan penentuan tegangan operasional reaktor dengan cara menentukan tegangan minimum dan tegangan maksimum dimana reaktor dapat bekerja.

3.2.4 Uji Kinerja Reaktor Plasma Non-Termal

Pada tahapan ini dilakukan proses konversi gas elpiji secara kontinu. Proses ini dilakukan dengan beberapa variasi, yaitu: tegangan listrik, laju alir umpan, dan diameter reaktor (diameter gelas dielektrik) untuk mengevaluasi pengaruh variasi tersebut terhadap kinerja reaktor plasma.

Setelah dilakukan uji pendahuluan dan reaktor sudah siap digunakan, selanjutnya dilakukan proses pengoperasian 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 masukan yang akan dinaikkan tegangannya oleh NST, laju alir reaktan (elpiji), dan variasi geometri berupa ukuran reaktor. Sedangkan variabel terikat pada penelitian ini adalah produk gas yang dihasilkan reaktor plasma yang dianalisis menggunakan GC. Berikut penjelasan variabel-variabel bebas proses yang akan divariasikan:

1. Pengaruh perbedaan tegangan masukan HVT yang digunakan untuk pembangkitan plasma yang terjadi, dengan variasi 2 tegangan yakni 130 dan 170 Volt AC.
2. Pengaruh laju alir reaktan yang digunakan pada percobaan ini. Variasi laju alir yakni sebanyak 2 variasi yaitu 500 cc/min dan 1500 cc/min.
3. Pengaruh ukuran geometri reaktor. Variasi ukuran geometri yang dimaksud adalah variasi ukuran diameter *tube* reaktor (gelas borosilikat) yaitu 12 mm dan 14 mm.

Lama proses setiap variasi variabel bebas dilakukan selama 5 menit, hal ini dilakukan karena reaksi dengan bantuan plasma berjalan dengan cepat dan penelitian dilakukan secara kontinu. Dengan waktu reaksi selama 5 menit ini diharapkan kondisi produk yang dihasilkan telah stabil (komposisinya) dan tidak berubah-ubah lagi.

Kinerja reaktor plasma ini ditinjau berdasarkan kemampuan reaktor dalam mengkonversi gas propana dan butana yang terkandung dalam elpiji sebagai komponen utama dalam elpiji. Hal ini dilakukan dengan melakukan analisis kualitatif terhadap produk gas yang telah dianalisis menggunakan GC. Sebelum melakukan analisis GC, terlebih dahulu dilakukan uji dinamis guna menentukan kondisi operasi yang optimal dari reaktor plasma. Parameter yang diperhatikan pada uji dinamis ini adalah tegangan, laju alir, dan lama waktu reaksi yang optimal untuk penentuan kondisi operasi ketika sampel produk akan dianalisis menggunakan GC. Hasil uji dinamis inilah yang menjadi dasar penentuan nilai variasi tegangan dan laju alir yang digunakan pada variasi di atas.

3.2.5 Pengambilan Sampel Gas

Pada tahap ini, sampel produk gas dari hasil konversi menggunakan

plasma non-termal diambil setelah reaktor dijalankan selama beberapa menit. Gas ini kemudian disimpan pada tabung sampel gas (*gas trap*). Jumlah sampel gas yang diambil adalah sebanyak 1 ml menggunakan alat suntik (*syringe*) dari tabung sampel gas. Kemudian gas langsung diuji menggunakan analisis *Gas Chromatography* di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA) Departemen Teknik Kimia.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Prosedur Uji Kinerja Reaktor Plasma

Dalam melakukan uji kinerja reaktor plasma DBD, digunakan alat dan bahan sebagai berikut:

- Alat:
 - Reaktor plasma non-termal untuk tempat berlangsungnya reaksi
 - 1 unit pembangkit (generator) plasma berupa NST
 - 1 unit regulator tegangan sebagai pengubah tegangan masukan NST
 - 1 unit masing-masing *amperemeter*, *voltmeter*, dan *flowmeter*
 - Selang *silicon* sebagai penyambung antara reaktor dan *gas trap*, reaktor dan tabung elpiji
 - Regulator tabung elpiji untuk mengatur laju alir elpiji yang dibutuhkan
 - 1 buah *housing* berisi *diffuser* dan larutan KOH sebagai pengabsorpsi merkaptan dari umpan elpiji (*bubbler*)
 - Kabel tegangan tinggi sebagai penghubung reaktor dan pembangkit plasma
 - 1 buah steker penghubung pembangkit plasma dan listrik PLN
 - 1 unit GC untuk menganalisis produk gas hasil konversi

- Bahan:
 - Gas elpiji yang berasal dari tabung LPG 12 kg Pertamina
 - Larutan KOH 0,5 M sebanyak 500 mL sebagai pengabsorpsi merkaptan

Prosedur uji kinerja reaktor plasma DBD adalah sebagai berikut:

1. Pastikan kabel sumber tegangan 220 V, tegangan tinggi, regulator tegangan, kabel pada *amperemeter* dan *voltmeter*, dan kabel-kabel lainnya telah tersambung dengan baik. Isolasi kabel pada bagian dekat *amperemeter*, *voltmeter*, dan kedua ujung sambungan kabel HVT dengan cara menutupnya dengan lakban isolasi kabel berwarna hitam.
2. Hubungkan tabung elpiji ke *bubbler* KOH menggunakan selang *silicon*, buka regulator gas elpiji sehingga gas dapat mengalir ke *bubbler* KOH dan kemudian ke dalam reaktor melalui *flowmeter*.
3. Atur laju alir pada 500 cc/menit.
4. Pasang reaktor 1 (diameter 12 mm) pada tatakan reaktor.
5. Tunggu hingga aliran elpiji memenuhi seluruh ruang reaktor dengan perhitungan waktu tunggu berdasarkan laju alir dibagi volume reaktor.
6. Nyalakan regulator tegangan dengan cara memutarnya hingga *voltmeter* menunjukkan tegangan 170 Volt AC, dan persiapkan *stopwatch* untuk mengetahui lamanya waktu reaksi.
7. Persiapkan *gas trap* dan hubungkan pada selang *silicon* keluaran reaktor, buka penuh kedua *valve*-nya.
8. Nyalakan reaktor selama 5 menit dengan memperhatikan waktu menggunakan *stopwatch*.
9. Setelah 5 menit, tutup rapat kedua *valve* pada *gas trap* dan segera bawa *gas trap* yang telah berisi produk gas hasil untuk diuji menggunakan GC.
10. Lakukan pembilasan (*flushing*) reaktor dengan menggunakan aliran udara *ambient* yang berasal dari kompresor untuk menghilangkan sisa gas hasil reaksi yang ada di dalam reaktor.
11. Lakukan langkah 2-10 dengan menurunkan tegangan menjadi 130 Volt AC sebagai variasi tegangan.
12. Lakukan langkah 2-11 dengan menaikkan laju alir menjadi 1500 sccm sebagai variasi laju alir.
13. Lakukan langkah 2-12 dengan mengganti reaktor menjadi reaktor 2 (diameter 14 mm) sebagai variasi ukuran reaktor.

3.3.2 Prosedur Pemakaian *Gas Chromatography* (GC)

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 memanaskan agar kotoran-kotorannya terbawa.

Prosedur mengalirkan gas Argon:

1. Pastikan tekanan input dan output di regulator berada pada angka 0 (nol) dan tidak ada kebocoran pada sambungan-sambungannya.
2. Buka *valve* utama dari kencang menjadi kendur, sehingga tekanan akan langsung naik.
3. Buka *valve regulator* dari kendur menjadi kencang sehingga tekanan akan naik perlahan-lahan.

Prosedur membuka tabung gas:

1. Pastikan tekanan *input* dan *output* di *regulator*; jarum *pressure gauge* menunjukkan 0 dan *valve* dalam keadaan tertutup (posisi *valve* longgar).
2. Buka *valve* induk di tabung dengan memutarnya ke arah kiri (arah kebalikan jarum jam) dan lihat tekanan gas, yang menunjukkan tekanan dalam tabung.
3. Buka *valve* regulator perlahan-lahan ke arah kanan (searah jarum jam), lalu atur tekanan gas yang diinginkan.
4. pastikan instalasi gas baik dari tabung sampai perpipaan tidak bocor (cek kebocoran menggunakan pipa sabun).
5. Untuk gas-gas yang beracun dan mudah terbakar (CO, 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 0
2. tutup *valve* di regulator pelan-pelan ke arah kiri (arah kebalikan jarum jam) sampai *valve* longgar dan tunggu tekanan gas di *pressure gauge* sampai menunjukkan angka 0

Prosedur menyalakan GC:

1. Pastikan tekanan *primary* 600 kPa, *carrier gas* \pm 150-180 kPa.
2. Atur suhu menjadi 130 – 100 – 100 (°C).
3. Tunggu hingga stabil (ketiga lampu berkedip-kedip).
4. Nyalakan *current* sebesar 6 mA.

Prosedur menyalakan alat pencetak kromatogram (*chromatopac*):

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

Prosedur mematikan GC:

1. Matikan *current*.
2. Turunkan temperatur menjadi 30-30-30 (°C) kemudian buka GC agar pendinginan terjadi lebih cepat.
3. Setelah suhu kolom menjadi 80°C (pada *indicator*) kemudian GC baru dapat dimatikan.

Prosedur mematikan aliran gas sesuai dengan prosedur menutup gas.

3.4 Alat Uji yang digunakan

Berikut ini adalah beberapa alat uji yang digunakan pada penelitian ini:

3.4.1 CO Analyzer

Fungsi alat ini adalah untuk mengukur kadar karbon monoksida pada keluaran reaktor. *CO analyzer* memiliki rentang pengukuran gas CO dari 0 hingga 1000 ppm. Selain dapat mengukur CO, alat ini juga dapat mengukur komposisi oksigen (rentang 0–20%), karbon dioksida (0–15 %), serta suhu lingkungan (*ambient*). Alat ini dapat digunakan baik menggunakan sistem *batch* maupun kontinu.



Gambar 3.15 CO Analyzer

3.4.2 H₂ Analyzer

Fungsi utama *H₂ analyzer* adalah untuk mengukur kandungan gas hidrogen (H₂). Alat ini memiliki rentang pengukuran komposisi hidrogen dari 0 hingga 50% H₂.



Gambar 3.16 H₂ Analyzer

3.5 Data yang Diambil

Data yang diambil untuk setiap variasi laju alir bahan, ukuran reaktor, dan tegangan adalah gas produk hasil konversi dengan plasma non-termal per satu kali *running* (5 menit) yang akan dianalisis secara kualitatif menggunakan GC.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian plasma non-termal ini, reaktor plasma DBD hasil rancangan adalah berupa pipa koaksial *shell and tube* dengan bagian *tube* terbuat dari tabung *pyrex* (glas borosilikat) yang berfungsi sebagai penghalang dielektrik dengan dua ukuran diameter luar gelas borosilikat (*tube* reaktor), yaitu 12 mm dan 14 mm dan bagian *shell* (selongsong) berupa tabung *acrylic* berdiameter dalam 46 mm. Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, pembangkit plasma yang digunakan adalah transformator tegangan tinggi (HVT) berjenis *neon-sign transformer* (NST) dengan sumber tegangan listrik bolak-balik (AC) dari listrik PLN. Demikian pula, terdapat dua elektroda yang digunakan pada penelitian ini. Elektroda pertama yang digunakan berupa batang *stainless steel* jenis SS-316 berongga dengan sisi bawah tertutup dan diberi ulir untuk baut. Elektroda ini terletak dalam *tube* reaktor dan bagian yang berulir dihubungkan dengan kabel tegangan tinggi ke kutub pertama HVT. Elektroda kedua berbentuk jala terbuat dari *stainless steel* jenis SS-304 berukuran 60 *mesh* yang diselubungkan pada gelas dielektrik (borosilikat) dan pada bagian tengahnya dihubungkan pada kutub kedua HVT. Kedua elektroda ini terpisahkan oleh penghalang dielektrik yang membentuk ruang *discharge gap* dimana reaksi utama plasma terjadi.

Reaktan yang digunakan pada penelitian ini ada dua, yaitu elpiji dari kaleng (*cartridge*) 250 g produksi Iwatani dan dari tabung LPG 12 kg produksi Pertamina. Reaktan dialirkan ke dalam reaktor melalui bagian bawah selongsong *acrylic*, naik, dan kemudian masuk ke dalam rongga elektroda batang pada bagian atas, turun, dan naik kembali sepanjang bagian dalam gelas dielektrik dan keluar pada bagian atas reaktor. Sehingga, pada satu kali *running* terdapat tiga kali siklus dengan pola aliran U yang diharapkan meningkatkan konversi proses.

Bab ini merupakan suatu pembahasan untuk mengetahui kinerja dari reaktor plasma DBD hasil rancang bangun dalam mengkonversi elpiji. Pembahasan meliputi analisis reaktor plasma DBD hasil rancang bangun, hasil pengamatan fenomena-fenomena yang terjadi dalam pengoperasian reaktor, penentuan kondisi

operasi, dan analisis kinerja reaktor dengan melihat pengaruh variasi tegangan operasi, laju alir umpan, dan ukuran (volume) gelas dielektrik.

4.1 Rancang Bangun Reaktor Plasma Non-Termal DBD

Setelah melakukan perancangan desain reaktor dan persiapan bahan serta peralatan yang dibutuhkan, dilakukan pembuatan reaktor plasma DBD yang digunakan sebagai tempat berlangsungnya reaksi pada penelitian ini. Gambar 4.1 di bawah ini menunjukkan dua buah reaktor plasma DBD sebagai hasil rancang bangun.

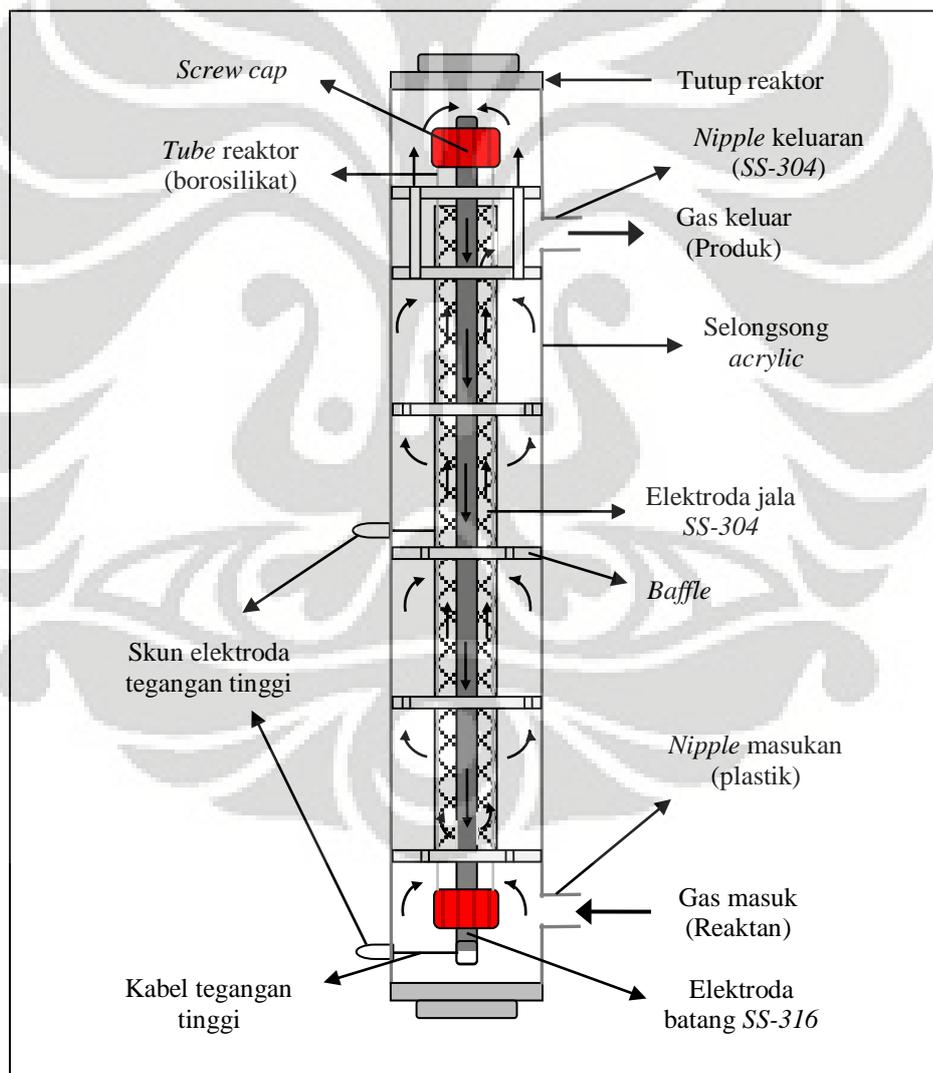


Gambar 4.1 Dua buah reaktor plasma hasil rancang bangun: (a) reaktor 1 dengan diameter gelas dielektrik 12 mm; (b) reaktor 2 dengan diameter gelas dielektrik 14 mm

4.1.1 Analisis Reaktor Plasma DBD Hasil Rancang Bangun

Umpan gas elpiji diatur laju alirnya menggunakan regulator gas, lalu dialirkan ke *bubbler* yang berisi larutan KOH sebelum masuk ke dalam reaktor. Umpan masuk ke reaktor melalui selang berwarna hijau di bagian bawah melalui

nipple plastik (Gambar 4.1b). Di dalam reaktor, elpiji akan mengalir dari bagian bawah ke atas (sepanjang selongsong *acrylic*), seperti tampak pada Gambar 4.2 di bawah. Sebagaimana telah dijelaskan, umpan dirancang agar mengalir di dalam reaktor sebanyak 3 kali dengan pola aliran U, yaitu dari bawah ke atas sepanjang selongsong *acrylic* (*shell*), lalu ke bawah melalui rongga di dalam elektroda batang SS, dan kemudian ke atas lagi sepanjang bagian dalam *tube* gelas dielektrik (ruang antara elektroda jala dan batang) yang pada akhirnya keluar pada bagian atas reaktor di antara kedua penyekat (*baffle*) teratas melalui *nipple* *stainless steel* (Gambar 4.1a). Ilustrasi skematis aliran gas reaktan dalam reaktor plasma DBD ini dapat dilihat pada Gambar 4.2 di bawah ini.



Gambar 4.2 Skematis Aliran Gas Dalam Rancangan Reaktor Plasma DBD dan Komponen-Komponen Reaktor

Proses pengaliran tiga kali ini dilakukan dengan tujuan agar diperoleh waktu tinggal (*residence time*) reaktan yang lebih lama dalam reaktor plasma DBD. Dengan waktu tinggal yang lama maka waktu kontak antara gas umpan dan plasma yang dibangkitkan akan lebih lama sehingga reaksi yang terjadi semakin banyak pula. Berdasarkan hasil penelitian Wang, Yan, Jin, & Cheng (2009), disimpulkan bahwa reaktan harus berada dalam plasma reaktor dalam waktu yang cukup lama untuk menyelesaikan reaksi yang terjadi atau dengan kata lain diperlukan waktu tinggal yang cukup lama agar reaksi berjalan dengan baik. Oleh karena itu, dengan cara ini diharapkan diperoleh waktu tinggal yang cukup lama agar reaksi dapat berlangsung dengan baik sehingga konversi yang terjadi semakin besar. Penghitungan 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 *cross-sectional area* reaktor. (Wang et.al., 2009). Dari rumus di atas, dapat pula dikatakan waktu tinggal dapat dihitung dengan rumus volume reaktor (L dikali A) dibagi dengan laju alir umpan (F).

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, pada reaktor DBD ini digunakan *baffle* sebagai penghambat aliran, sehingga gas umpan dapat bersirkulasi lebih lama dalam selongsong *acrylic*. Dengan adanya sirkulasi yang lebih lama ini diharapkan gas umpan dapat mendinginkan bagian dalam reaktor (*tube*) sehingga tidak terlalu panas dan pecah.

Selain itu, *discharge gap* antara elektroda batang dan jala harus dirancang cukup kecil, yaitu sekitar 1,75 mm untuk reaktor 1 (diameter luar dielektrik 12 mm) dan 2,75 mm untuk reaktor 2 (diameter luar dielektrik 14 mm) serta ketebalan gelas dielektrik yang cukup tipis yaitu sekitar 1 mm agar diperoleh konsumsi daya listrik yang minimal. Perhitungan *discharge gap* ini adalah dengan mengurangi diameter dalam gelas dielektrik dengan diameter luar elektroda batang SS lalu dibagi dua. Diameter dalam gelas dielektrik yang menjadi variasi penelitian ini adalah 10 mm dan 12 mm (untuk masing-masing reaktor 1 dan 2),

sedangkan diameter luar elektroda batang SS adalah sama untuk kedua reaktor, yaitu 6,5 mm. Perhitungan lengkapnya akan dibahas lebih lanjut.

4.1.2 Pengujian Awal Reaktor Plasma DBD

Setelah reaktor plasma DBD selesai dibuat, dilakukan persiapan uji plasma fisik. Pengujian ini bertujuan untuk melihat fenomena munculnya plasma dan menentukan reantang kondisi tegangan yang aman untuk pengoperasian reaktor. Mula-mula reaktor diuji kebocorannya menggunakan metode gelembung sabun, sebagaimana telah dibahas pada bab sebelumnya. Kemudian, reaktor dinyalakan dengan menghubungkan kedua skun elektroda ke sumber tegangan tinggi (HVT) berupa NST dan menghubungkan sumber tegangan tinggi ke sumber utama masukan listrik, yaitu listrik PLN. Setelah reaktor dinyalakan, dilakukan pengamatan terhadap fenomena munculnya plasma pada reaktor. Tegangan masukan diatur menggunakan regulator tegangan dengan memutar bagian atasnya sehingga dapat diperhatikan pengaruh tegangan terhadap fenomena plasma pada reaktor agar dapat melakukan uji plasma fisik.

Uji plasma fisik reaktor plasma DBD dilakukan setelah pengujian keamanan awal. Pengujian keamanan awal terhadap reaktor merupakan hal yang penting yang pertama kali dilakukan dalam uji kinerja reaktor plasma untuk mengevaluasi rancangan, keselamatan, produk keluaran yang berbahaya, dan kinerja awal dari reaktor. Hal ini terutama dilakukan karena reaktor plasma menggunakan kondisi yang cukup ekstrim, yaitu pada kondisi tegangan listrik menengah (sekitar 10 kV) yang cukup berbahaya bagi manusia. Selain itu, efek reaksi plasma yang merupakan jenis reaksi berantai dan kompleks dengan umpan gas yang dimasukkan menyebabkan sangat mungkin terbentuk sejumlah gas berbahaya pada produk gas keluarannya.

Berdasarkan hasil pengujian dari penelitian terdahulu, terdapat produk samping dari produk keluaran reaktor DBD akibat reaksi kimia yang terjadi pada reaktor plasma non-termal terhadap masukan umpan campuran CH_4 dan CO_2 , seperti C_2 -Hidrokarbon (C_2H_2 , C_2H_4), metana, CO, dan CO_2 dengan konsentrasi yang relatif cukup tinggi, yaitu mencapai 8% dan 2,5% (Rico, Hueso, & Gonzalez-Elipe, 2010). Sehingga, sangat memungkinkan pada penelitian ini juga

dihasilkan sejumlah gas berbahaya. Tabel 4.1 di bawah menyajikan hasil dari uji keselamatan awal yang telah dilakukan.

Pengujian awal ini dilakukan dengan mengamati kadar gas CO yang terbentuk pada keluaran produk sebagai hasil konversi elpiji. Untuk pengujian awal ini digunakan tabung elpiji 250 g Iwatani dengan kadar butana 95%. Kadar CO dianalisis menggunakan CO *detector* (berbentuk *handheld*, seukuran *remote control*) dengan rentang pengujian 0-999 ppm. Selain itu, pada pengujian ini juga dilakukan pengamatan munculnya bau gas yang tercium dari produk keluaran proses. Dari hasil pengujian, tercium yang cukup menyengat seperti aldehyd, namun tidak sampai dalam taraf membahayakan. Tabel 4.1 di bawah ini menampilkan hasil uji keselamatan awal reaktor DBD.

Tabel 4.1 Pengujian Keselamatan Reaktor Plasma DBD (untuk reaktor 1, diameter gelas dielektrik 12 mm) dengan Umpan Elpiji dan Sumber Listrik PLN

Percobaan	Tegangan (V)	Arus (mA)	Laju Alir (cc/menit)	Hasil Pengamatan
1	250	250	750	CO belum terdeteksi, tercium bau menyengat seperti aldehyd
			1000	CO = 132 ppm, bau menyengat seperti aldehyd makin kuat
2	250	240	1000	CO = 73 ppm, bau menyengat seperti aldehyd kuat
			1500	CO = 350 ppm, bau menyengat seperti aldehyd kuat

Hasil uji keselamatan awal ini menunjukkan bahwa reaktor telah memenuhi aspek keselamatan standar dan dapat dioperasikan dengan normal. Namun, untuk meningkatkan aspek keamanan, keseluruhan sistem reaktor diletakkan dalam ruang asam dengan saluran pembuangan gas sendiri untuk menghindari tersebarnya elpiji selama eksperimen dilakukan. Terbentuknya CO pada produk diduga disebabkan oleh adanya oksigenat yang berasal dari larutan KOH sebagai

larutan pengabsorpsi *mercaptan*. Saat aliran gas masuk, sejumlah kecil kandungan air dari larutan KOH dalam *bubbler* terbawa masuk ke dalam reaktor, yang dalam hal ini kemungkinannya ialah $H_2O_{(l)}$ yang dalam kondisi terplasmakan akan terpecah menjadi ion-ion OH^- sehingga ion-ion ini bereaksi dengan elpiji menjadi gas CO pada produk keluarannya.

4.1.3 Uji Fisik Plasma (Visual)

Setelah dilakukan uji keselamatan awal ini, dilakukan uji fisik plasma. Tujuannya adalah untuk mengamati fenomena plasma fisik pada reaktor DBD yang terlihat secara kasat mata dan merupakan studi pendahuluan untuk mengetahui apakah reaktor ini dapat digunakan untuk mengkonversi elpiji menjadi hidrokarbon rantai panjang atau pendek. Pada operasi ini digunakan tegangan listrik dalam rentang 0–15 kV (tegangan masukan reaktor atau tegangan pada sekunder NST) dan laju alir umpan dengan rentang 500-2500 cc/menit. Selain itu, pada pengujian ini kandungan yang dievaluasi pada gas produk hanyalah kandungan gas CO, H_2 , O_2 , dan CO_2 . Hal ini disebabkan keterbatasan alat yang digunakan pada pengujian ini, yaitu *CO analyzer* yang hanya dapat menyelidiki keberadaan gas CO, CO_2 , dan O_2 dan dapat mengukur kadar gas CO dengan rentang 0–999 ppm. Sementara untuk pengukuran kandungan H_2 dilakukan menggunakan *H₂ analyzer* dengan rentang pengukuran 0-50% H_2 .

Saat reaktor dinyalakan, tegangan listrik yang digunakan dinaikkan secara perlahan. Hal ini dilakukan untuk menyelidiki berapa tegangan minimal yang dibutuhkan untuk memunculkan plasma DBD. Pada saat tegangan masukan reaktor sekitar 4.770 V (70 V pada primer NST), terdengar bunyi dengungan pelan, menandakan terjadinya pelepasan lucutan listrik pada reaktor plasma DBD yang terjadi antara kedua elektroda. Ketika tegangan terus dinaikkan, bunyi dengungan ini terdengar semakin keras.

Pada tegangan masukan reaktor sekitar 8.860 V (130 V pada primer NST) mulai terjadi suatu lucutan listrik yang tidak lazim, terutama pada bagian dekat keluaran produk (dekat *nipple* keluaran) dan masukan umpan (dekat ujung elektroda batang SS bagian bawah), dengan intensitas yang jarang. Lucutan pada kedua elektroda reaktor plasma DBD ini seharusnya mengalir melewati dielektrik

gelas, namun pada lucutan ini tidak. Hal yang seharusnya terjadi adalah pelepasan listrik antar elektoda yang melewati dielektrik kaca, namun yang terjadi adalah lucutan listrik 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). Sementara itu, lucutan tak lazim pada bagian bawah terjadi antara ujung terbawah elektroda jala dan ujung bawah elektroda batang. Semakin tinggi tegangan, maka intensitas kedua lucutan ini semakin sering. Pada tegangan 11.600 V (170 V pada primer NST) lucutan tidak lazim ini menjadi sangat sering.

Saat fenomena lucutan ini dibandingkan pada kedua reaktor, terlihat pada reaktor satu (diameter penghalang dielektrik 12 mm) lucutan listrik tersebut tidak terlalu sering terjadi, sedangkan pada reaktor dua (diameter penghalang dielektrik 14 mm) terjadi lebih sering. Pada tegangan sekitar 15.000 V (220 V pada primer NST) lucutan yang tidak lazim ini terjadi dengan intensitas sangat tinggi, terutama pada reaktor dua. Pada saat pengujian menggunakan reaktor 2, karena telatnya pengantisipasi lucutan listrik ini dengan mematikan aliran listrik ke reaktor 2, maka terjadi bunga api disertai lucutan api yang cukup besar pada permukaan dielektrik kaca bagian bawah dan tercium bau terbakar. Setelah sumber listrik dimatikan, ternyata kaca dielektrik telah pecah yang ditandai dengan munculnya warna putih susu pada permukaan kaca dielektrik.



Gambar 4.3 Pembentukan Pijar Api Plasma pada Bagian Bawah Reaktor DBD

Berdasarkan hasil pengujian di atas, maka peneliti menentukan batas aman tegangan listrik yang digunakan berada dalam rentang 4.770 V–11.600 V (70 V–170 V pada keluaran regulator tegangan) untuk reaktor plasma DBD dengan sumber listrik PLN. Hal ini dilakukan dengan pertimbangan agar reaktor tidak rusak (pecah) pada tegangan tertinggi (11.600 V) dan tegangan terendah yang digunakan (4.770 V) masih mampu menghasilkan plasma untuk reaksi konversi yang diinginkan.

Terjadinya peristiwa lucutan listrik yang besar ini diduga dipicu oleh jarak antara ujung elektroda jala dengan ujung elektroda batang yang terlalu dekat, pada bagian ujung bawah *tube* reaktor yang tidak tertutupi oleh dielektrik kaca. Hipotesis ini didukung oleh jaranginya lucutan tidak lazim ini pada reaktor satu (diameter penghalang dielektrik 12 mm), yang jarak antara kedua ujung elektrodanya lebih jauh. Karena sifat dielektrik yang memperlemah medan listrik, maka lucutan listrik akan cenderung mencari medium lain yang lebih mudah untuk mengalirkan listrik (hambatan lebih kecil), yaitu gas yang terionisasi dan tereksitasi. Gas yang terionisasi mempunyai muatan listrik, baik positif maupun negatif, yang akan mempermudah terbentuknya lucutan listrik. Hal ini dibuktikan dengan pengamatan bahwa lucutan tidak lazim paling besar terjadi pada bagian keluaran produk plasma DBD, yang kaya akan gas terionisasi dan tereksitasi.

Pada pembuatan reaktor dua (diameter 14 mm) kembali, sebagai pengganti reaktor yang telah pecah, dilakukan modifikasi dengan memperbesar jarak antara ujung elektroda jala dan elektroda batang pada bagian bawah dari ukuran sebelumnya. Hal ini dilakukan berdasarkan hipotesis bahwa jarak antara kedua ujung elektroda akan mempengaruhi timbulnya lucutan tidak lazim. Setelah dilakukan modifikasi ini, ternyata hasil pengamatan uji plasma fisik menunjukkan bahwa lucutan listrik ini memang lebih jarang terjadi yang membenarkan hipotesis yang dinyatakan sebelumnya.

Fenomena lain yang teramati selama uji plasma fisik ini adalah munculnya warna pendar hijau pucat sepanjang bagian *tube* kedua reaktor saat reaktor dinyalakan dengan tegangan sekitar 13.600 V. Fenomena ini baru dapat teramati ketika lampu dalam laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses (TIP), tempat penelitian dilakukan, dimatikan karena intensitas cahaya yang cukup rendah.

Warna hijau pucat ini diduga muncul akibat terjadinya eksitasi elektron dari molekul-molekul elpiji akibat lucutan listrik yang teraktifkan oleh plasma DBD. Molekul yang tereksitasi akan segera menghasilkan emisi foton (sinar tampak) dan kembali pada keadaan elektronik dasarnya.

Ketika laju aliran umpan pada kedua reaktor diubah-ubah, tidak terlihat adanya perbedaan yang signifikan pada uji fisik plasma DBD yang dihasilkan. Jadi, disimpulkan bahwa laju alir tidak mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap plasma yang dihasilkan oleh reaktor DBD ini.

Tabel 4.2 di bawah ini menyajikan hasil pengamatan fenomena fisik yang terjadi selama pengoperasian reaktor plasma BDB dalam hubungannya dengan tegangan masukan yang digunakan.

Tabel 4.2 Fenomena yang Teramati Pada Pengoperasian Reaktor Plasma pada Beberapa Tegangan Untuk Kedua Reaktor Hasil Rancang Bangun

Tegangan Sekunder NST	Tegangan Primer NST	Fenomena yang Teramati
± 4.770 V	70 V	Terdengar bunyi dengungan pelan, samar-samar tercium bau merkaptan elpiji
± 8.860 V	130 V	Bunyi dengung makin terdengar, bau merkaptan elpiji makin kuat
± 11.600 V	170 V	Terjadi lucutan listrik yang tidak lazim dengan instensitas yang jarang
± 13.600 V	200 V	Lucutan listrik tidak lazim semakin sering terjadi, terlihat warna pendar kehijauan pucat pada <i>tube</i> reaktor
15.000 V	220 V	Lucutan listrik yang tidak lazim sangat sering terjadi, menciptakan lucutan berwarna jingga; berakibat pecahnya gelas dielektrik reaktor 2 (diameter penghalang dielektrik 14 mm)

Selain itu, berdasarkan uji plasma fisik ini juga diputuskan untuk melakukan pengantian gas umpan, yaitu dari *cartridge* 250 g produksi Iwatani (95% butana) menjadi tabung elpiji 12 kg produksi Pertamina. Hal ini dilakukan atas pertimbangan tekanan dalam *cartridge* yang tidak mencukupi untuk menghasilkan laju alir umpan yang tinggi; pada laju alir lebih dari 1000 cc/menit saja sudah sangat sulit untuk menjaga laju alir yang konstan. Selain itu, diputuskan bahwa analisis produk untuk uji kinerja reaktor DBD dilakukan dengan mengambil dua laju alir dan tegangan yang terbaik dan kemudian dianalisis menggunakan GC. Hal ini dilakukan karena keterbatasan *CO Analyzer* yang hanya mampu mengukur kadar CO hingga 1000 ppm saja dan hanya dapat mendeteksi 3 gas saja (CO, CO₂, dan O₂). Selain itu, *H₂ analyzer* yang digunakan (yang memiliki rentang 0-50% H₂) memiliki ketelitian yang besar, yaitu dalam persen; sementara diduga gas H₂ yang dihasilkan dari konversi elpiji dihasilkan hanya dalam ppm, sehingga tidak dapat dideteksi oleh alat ini. Kesemua alasan ini menjadi pertimbangan penggantian gas umpan dan penggunaan GC.

4.2 Uji Kinerja Reaktor Plasma DBD untuk Konversi Elpiji

Uji ini merupakan analisis kualitatif kinerja reaktor plasma DBD untuk konversi elpiji. Pada uji ini, sampel gas produk keluaran reaktor DBD dianalisis menggunakan perangkat analisis GC-TCD. Kondisi operasi berupa laju alir dan tegangan untuk pengambilan data menggunakan analisis GC dipilih berdasarkan uji fisik plasma DBD yang telah dilakukan.

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, dengan menggunakan sumber listrik PLN, tegangan operasi yang dipilih ada dua, yaitu 8.860 V (tegangan primer NST 130 V) dan 11.590 V (tegangan primer NST 170 V), yang merupakan dua tegangan ekstrem yang akan dievaluasi pengaruhnya terhadap konversi elpiji. Variasi laju alir yang dipilih adalah 500 cc/menit dan 1500 cc/menit. Pemilihan dua laju alir ini dilakukan berdasarkan uji plasma fisik awal yang menunjukkan konversi terbesar adalah pada laju alir 500 cc/menit, sedangkan laju alir 1500 cc/menit digunakan sebagai pembandingnya karena menghasilkan konversi yang cukup besar dan rentang nilainya tidak terlalu dekat dengan konversi CO₂ pada laju alir 500 cc/menit (agar dapat dilihat pengaruhnya, karena dikhawatirkan

pemilihan laju alir 1000 cc/menit tidak memberikan perbedaan yang signifikan dengan laju alir 500 cc/menit).

Pada pengujian ini, data yang diambil sebagai perbandingan untuk mengevaluasi pengaruh variasi laju alir, tegangan, dan volume gelas dielektrik adalah komposisi aliran umpam sebelum dikenai plasma dan komposisi produk dari reaktan yang dikenai plasma pada reaktor DBD yang dianalisis menggunakan GC.

Selain itu, pada uji ini akan dianalisis juga perhitungan konsumsi energi listrik reaktor plasma. Perhitungan konsumsi energi listrik ini dilakukan dengan mengalikan nilai tegangan dan kuat arus yang dicatat ketika operasi (sehingga diperoleh nilai daya listrik yang dibutuhkan reaktor), yang ditunjukkan oleh panel *voltmeter* dan *amperemeter*, kemudian dikali dengan lama pengoperasian dalam satu kali pengambilan data, yaitu 5 menit, sehingga diperoleh konsumsi energi dari reaktor. Tabel 4.3 di bawah ini menunjukkan hasil perhitungan konsumsi energi reaktor.

Tabel 4.3. Data Konsumsi Energi Listrik Reaktor pada Pemakaian Sumber Listrik PLN

Reaktor	Diameter gelas dielektrik (mm)	Tegangan (V)	Kuat Arus (A)	Daya Listrik (W)	Energi Listrik (Wh) ^a
1	12	130	0,098	12,74	1,06
		170	0,12	20,4	1,7
2	14	130	0,098	12,74	1,06
		170	0,12	20,4	1,7

Ket: ^aenergi listrik yang digunakan untuk pengoperasian reaktor selama 5 menit

Dari hasil perhitungan konsumsi energi di atas dapat disimpulkan bahwa faktor utama yang berpengaruh terhadap konsumsi energi reaktor adalah tegangan masukan. Daya yang diperlukan reaktor tidak terlalu besar, yakni maksimum hanya 20,4 Watt saja. Selain itu, variasi volume reaktor, yang merupakan

pengaruh dari diameter gelas dielektrik tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap konsumsi daya reaktor.

Sebelum menggunakan tabung elpiji 12 kg Pertamina, sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, pada penelitian ini digunakan elpiji yang berasal dari kaleng (*cartridge*) 250 g produksi Iwatani dengan 95% butana. Namun, ternyata tekanan gas yang dihasilkan tidak cukup kuat untuk memberikan laju alir yang diinginkan sehingga diputuskan untuk melakukan penggantian umpan, yaitu menggunakan LPG 12 kg Pertamina.

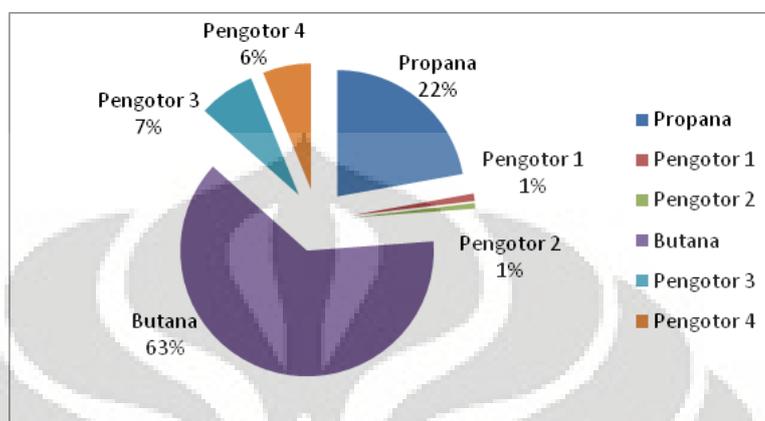
Dalam melakukan uji kinerja reaktor DBD ini, perlu diketahui komponen apa saja yang terdapat dalam elpiji yang berasal dari tabung gas LPG 12 kg Pertamina yang digunakan. Hal inilah yang menjadi dasar penghitungan konversi karena elpiji yang digunakan merupakan campuran hidrokarbon C3 dan C4 (propana dan butana). Dengan mengambil sampel dan kemudian dianalisis dengan GC, diperoleh komposisi komponen penyusun elpiji seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 4.4 di bawah ini.

Tabel 4.4 Komposisi Komponen Gas Reaktan (Elpiji) sebelum dikonversi dengan Reaktor DBD Hasil Analisis GC

No.	Waktu retensi (menit)	Area	MK	Konsentrasi (% volume)
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
	TOTAL	251255		100

Dari hasil pengujian GC di atas dapat dilihat bahwa terdapat dua komponen yang memiliki konsentrasi terbesar, yaitu zat pada waktu retensi 0,248 menit dan 2,15 menit yang masing-masing memiliki konsentrasi 22,1485% dan 62,8464%. Seperti telah dibahas sebelumnya, spesifikasi komponen utama penyusun elpiji dari Pertamina yaitu 70% butana dan 30% propana dengan tambahan mercaptan sebagai pemberi bau untuk mendeteksi kebocoran gas (“Mengenal Elpiji” Pertamina, 2010). Sehingga, disimpulkan zat dengan waktu retensi 0,248 menit adalah propana (dengan konsentrasi 22,1485%) dan zat

dengan waktu retensi 2,15 menit (dengan konsentrasi 62,8464%) adalah butana Untuk lebih jelasnya, komposisi komponen penyusun elpiji umpan dapat dilihat pada Gambar 4.4 di bawah ini.



Gambar 4.4 Pie Chart Komposisi Umpan Elpiji Sebelum dikonversi dengan Plasma DBD

Dari Gambar 4.4 di atas dapat dilihat bahwa dua komponen utama penyusun elpiji adalah propana (22%) dan butana (63%). Oleh karena itu, pada penelitian ini diputuskan bahwa uji kinerja reaktor DBD ini dibatasi hanyalah berdasarkan perubahan konsentrasi propana dan butana dari gas produk yang dihasilkan reaktor DBD terhadap konsentrasi umpan sebelum dikenai plasma, yang terbaca oleh peralatan analisis GC-TCD.

Tabel 4.5 Konsentrasi Produk Propana dan Butana dari Reaktor DBD menggunakan Analisis GC

Jenis Reaktor	Laju Alir (cc/menit)	Tegangan (V)	Konsentrasi Propana (C ₃ H ₈)	Konsentrasi Butana (C ₄ H ₁₀)
-	-	-	22,15	62,85
1	500	170	1,20	74,85
		130	65,35	26,26
	1500	170	61,91	28,77
		130	66,94	21,49
2	500	170	43,27	45,30
		130	54,62	35,52
	1500	170	57,43	34,49
		130	40,35	47,64

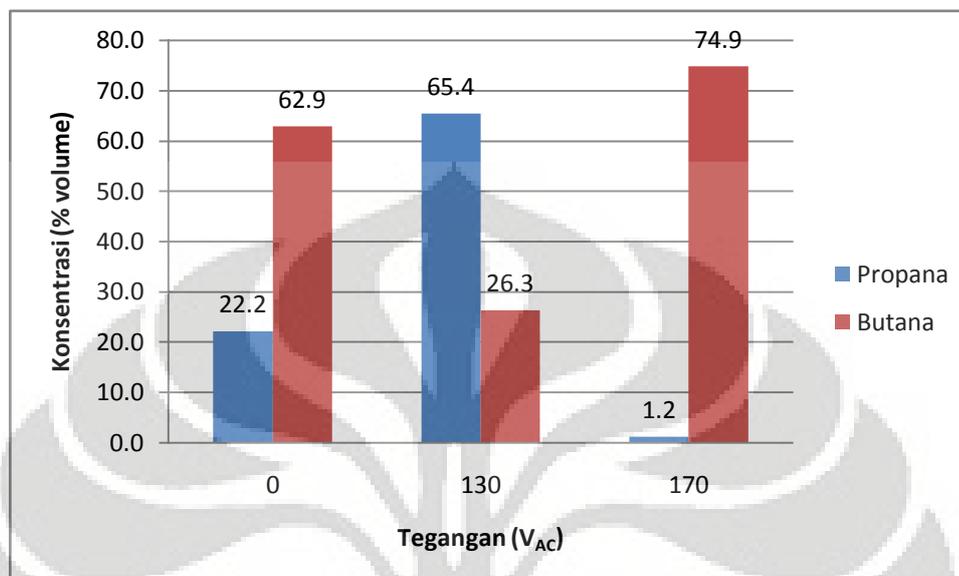
Data konsentrasi propana dan butana yang diperoleh menggunakan GC dengan variasi ukuran reaktor, laju alir, dan tegangan untuk uji kinerja reaktor plasma DBD ini ditampilkan pada Tabel 4.5 pada halaman sebelumnya. Data selengkapnya dapat dilihat pada bagian lampiran (Lampiran 1).

Selain itu, analisis uji kinerja reaktor DBD ini hanya dibatasi pada pengamatan fenomena perubahan konsentrasi yang terjadi antara propana dan butana, penentuan kondisi operasi optimal dari variasi parameter yang dilakukan, penentuan pada kondisi variasi apa produk terbesar dihasilkan, dan penentuan pengaruh variasi parameter yang dilakukan (tegangan, laju alir, dan ukuran reaktor). Jadi, pada pembahasan analisis uji kinerja ini tidak dibahas mengenai mekanisme reaksi karena selain data yang diambil tidak mencukupi untuk melakukannya, hal ini juga membutuhkan pembahasan kinetika reaksi yang lebih mendalam.

Gambar 4.5 sampai 4.8 berikut ini (halaman 63-67) merupakan grafik hasil pengolahan data yang diambil menggunakan analisis kualitatif GC. Nilai tegangan yang ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 4.5 sampai 4.10 tersebut menunjukkan nilai tegangan pada primer NST (atau keluaran regulator tegangan) yang terukur oleh *voltmeter*. Jadi, tegangan sebenarnya yang digunakan reaktor adalah tegangan yang keluar dari sekunder NST, sehingga pada tegangan 130 V akan menjadi 8.860 V dan pada 170 V akan menjadi 11.590 V pada sekunder NST. Selama pembahasan selanjutnya, tegangan yang dimaksud adalah tegangan pada primer NST.

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, terdapat dua jenis reaktor yang digunakan pada penelitian ini; yang mempunyai ukuran diameter gelas dielektrik (borosilikat) yang berbeda sebagai variasi ukuran reaktor. Reaktor pertama (reaktor 1) memiliki diameter luar gelas dielektrik 12 mm dan reaktor kedua (reaktor 2) memiliki diameter luar gelas dielektrik 14 mm, dengan ukuran selongsong *acrylic* yang sama. Jadi, reaktor 2 memiliki volume dan *discharge gap* yang lebih besar daripada reaktor 1. Selama pembahasan selanjutnya, reaktor 1 merujuk pada reaktor dengan diameter dielektrik 12 mm dan reaktor 2 merujuk pada reaktor dengan diameter 14 mm.

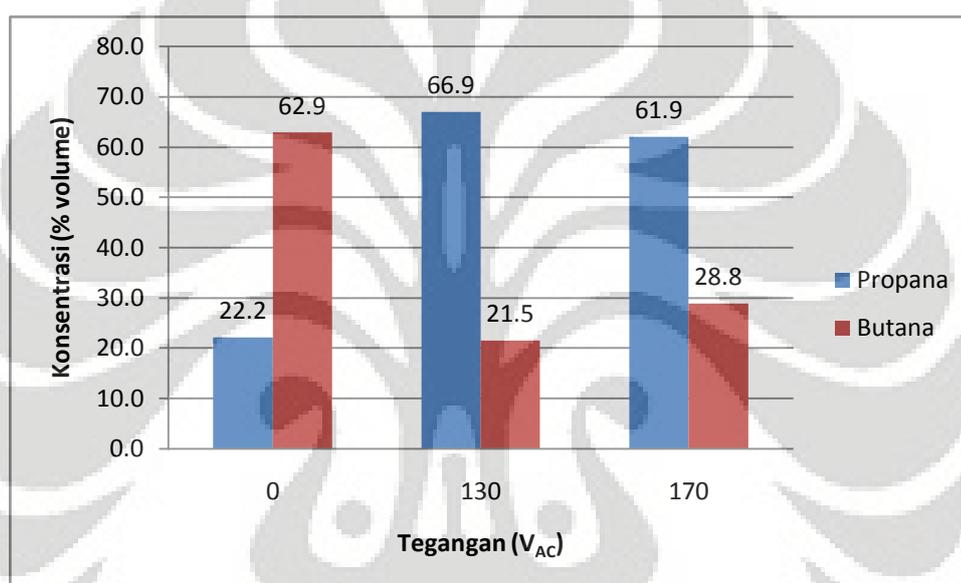
Gambar 4.5 di bawah menunjukkan hasil pengujian konsentrasi propana dan butana menggunakan analisis GC untuk reaktor 1 dengan variasi laju alir umpan elpiji dan tegangan pada primer NST.



Gambar 4.5 Diagram Batang Pengaruh Tegangan Primer NST terhadap Konsentrasi Propana dan Butana pada Laju Alir Umpan Elpiji 500 cc/menit untuk Reaktor 1 (diameter dielektrik 12 mm)

Dapat dilihat dari Gambar 4.5 di atas, tegangan 0 (nol) Volt menunjukkan konsentrasi propana dan butana pada umpan elpiji sebelum dikenai plasma (reaktor belum dinyalakan) atau sebelum reaksi berlangsung dalam reaktor DBD. Setelah reaktor dinyalakan dan reaksi berlangsung selama 5 menit, pada kondisi tegangan 130 V terjadi peningkatan konsentrasi propana, yaitu dari 22,2% menjadi 65,4% yang diikuti dengan penurunan konsentrasi butana, yaitu dari 62,9% menjadi 26,3%. Dapat dilihat dari grafik pada Gambar 4.5 di atas, selisih kenaikan kenaikan konsentrasi propana dan penurunan konsentrasi butana ini cukup berimbang. Berdasarkan hal ini dapat diajukan hipotesis bahwa reaksi plasma yang terjadi dalam reaktor menyebabkan terjadinya pemecahan butana menjadi propana dari elpiji, atau terjadi fenomena *cracking*, yang merupakan istilah lazim dalam industri pengilangan minyak maupun petrokimia (hipotesis pertama). Pada tegangan yang lebih tinggi, yaitu 170 V, terjadi penurunan konsentrasi propana yang sangat signifikan (dari 22,2% menjadi 1,2%) diikuti peningkatan konsentrasi butana (dari 62,9% menjadi 74,9%). Hal ini bertentangan dengan hipotesis sebelumnya yang menyatakan bahwa terjadi peningkatan

konsentrasi propana dan penurunan butana akibat reaksi plasma dalam reaktor. Berdasarkan fakta ini, reaktor 1 diduga menghasilkan *discharge* listrik yang sangat besar pada laju alir umpan elpiji 500 cc/menit dan tegangan 170 V ini, sehingga terjadi dekomposisi (pemutusan) propana dan bukannya pemutusan butana, sebagaimana dinyatakan pada hipotesis awal, akibat medan listrik yang sangat besar yang dibangkitkan plasma. Untuk menguji kebenaran hipotesis kedua ini, pembahasan dilanjutkan terhadap hasil variasi lainnya dengan melihat apakah fenomena yang serupa terjadi pada reaktor 1.



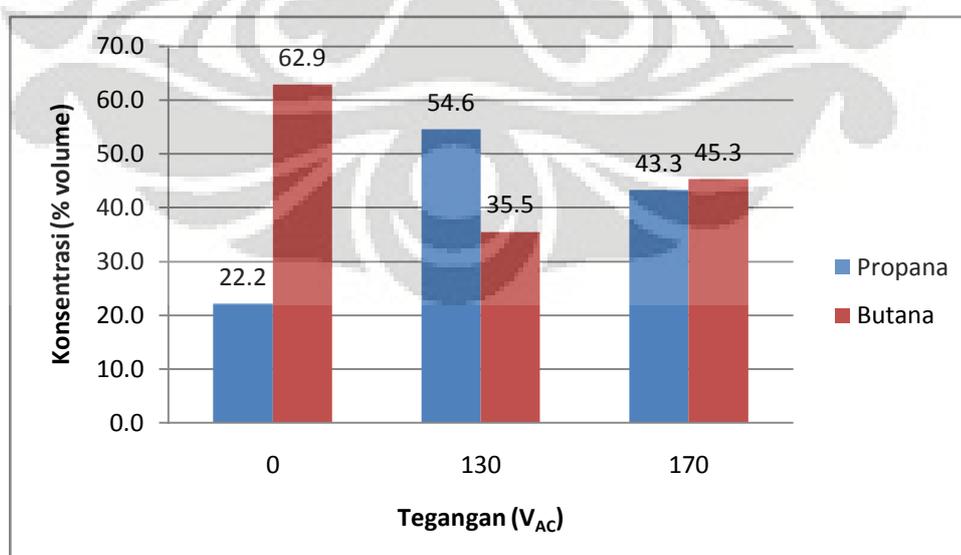
Gambar 4.6 Diagram Batang Pengaruh Tegangan Primer NST terhadap Konsentrasi Propana dan Butana pada Laju Alir Umpan Elpiji 1500 cc/menit untuk Reaktor 1 (diameter dielektrik 12 mm)

Dapat dilihat dari Gambar 4.6 di atas, pada reaktor yang sama (reaktor 1) dan laju alir lebih besar (1500 cc/menit) terjadi kecenderungan peningkatan konsentrasi propana dan penurunan konsentrasi butana akibat reaksi plasma dalam reaktor, yang membenarkan hipotesis pertama. Pada kondisi laju alir yang lebih besar ini dihasilkan propana yang kecil, dengan melihat delta kenaikan konsentrasi propana maksimum, yang menunjukkan produksi propana, yaitu 66,9% dikurangi 22,2% menjadi 44,7% (Gambar 4.6), pada tegangan 130 V, yang mempunyai nilai lebih kecil dibandingkan produksi propana pada kondisi sebelumnya, yang menghasilkan propana sebesar 65,4% dikurangi dengan 22,2%, yaitu 43,2% (Gambar 4.5) pada nilai tegangan dan ukuran reaktor yang sama.

Sehingga, dapat disimpulkan bahwa laju alir yang lebih besar pada ukuran reaktor sama memberikan kinerja yang kurang baik pada reaktor DBD, berdasarkan adanya fenomena produksi propana yang lebih kecil pada laju alir besar daripada laju alir kecil dengan ukuran reaktor yang sama.

Menurut penelitian Istadi dan Amin (2007), semakin besar tegangan *discharge* dengan *discharge gap* kecil akan menghasilkan medan listrik yang besar yang kemudian memecah hidrokarbon rantai pendek (hidrokarbon ringan) seperti C2 (etana) dan C3 (propana). Jadi, hal ini dapat menjelaskan terjadinya penyimpangan sebagaimana yang terjadi pada Gambar 4.5 (hal. 63), yaitu terjadinya pemecahan propana menjadi butana pada tegangan 170 V untuk reaktor 1 dengan laju alir umpan 500 cc/menit. Selain itu, penyimpangan ini diduga juga disebabkan oleh kondisi ukuran reaktor dan laju alir yang kecil, yang mengakibatkan waktu tinggal umpan yang lebih lama dalam reaktor; paling lama dibanding variasi lainnya. Semakin lama waktu tinggal ini, maka semakin lama pula terjadinya reaksi, yang juga diperparah dengan kondisi tegangan paling besar (170 V), sehingga reaksi yang terjadi adalah pemecahan propana, dan konversi bergeser ke arah butana (butana diproduksi).

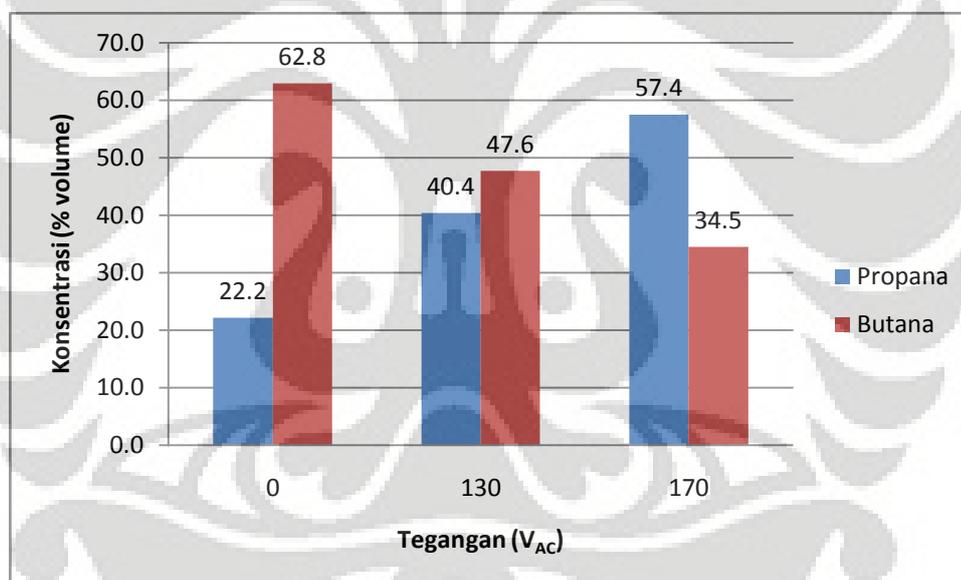
Pembahasan berikutnya akan melihat pengaruh variasi tegangan dan laju alir umpan elpiji terhadap konsentrasi propana dan butana pada reaktor dengan ukuran lebih besar, yaitu reaktor 2 dengan diameter gelas dielektrik 14 mm.



Gambar 4.7 Diagram Batang Pengaruh Tegangan Primer NST terhadap Konsentrasi Propana dan Butana pada Laju Alir Umpan Elpiji 500 cc/menit untuk Reaktor 2 (diameter dielektrik 14 mm)

Pada ukuran reaktor yang lebih besar (diameter gelas dielektrik 14 mm), sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4.7 di halaman sebelumnya, terjadi fenomena produksi propana dan dekomposisi butana, baik pada tegangan 130 V maupun 170 V. Hal ini mendukung hipotesis pertama yang menyatakan kecenderungan peningkatan konsentrasi propana dan penurunan konsentrasi butana akibat reaksi plasma dalam reaktor.

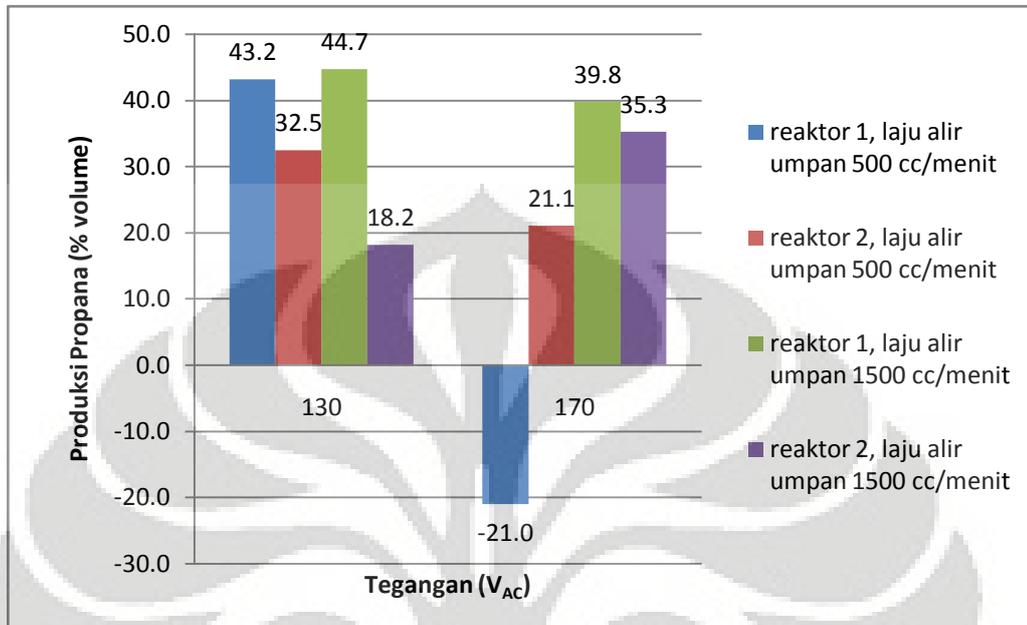
Hal yang senada juga ditunjukkan oleh Gambar 4.8 di bawah ini yang menunjukkan fenomena produksi propana dan dekomposisi butana, baik pada tegangan 130 V maupun 170 V. Berbeda halnya dengan kondisi reaktor 1 sebelumnya, reaktor 2 memberikan pola kecenderungan (*trend*) yang lebih baik dimana setiap variasi laju alir dan tegangan menunjukkan konversi butana menjadi propana.



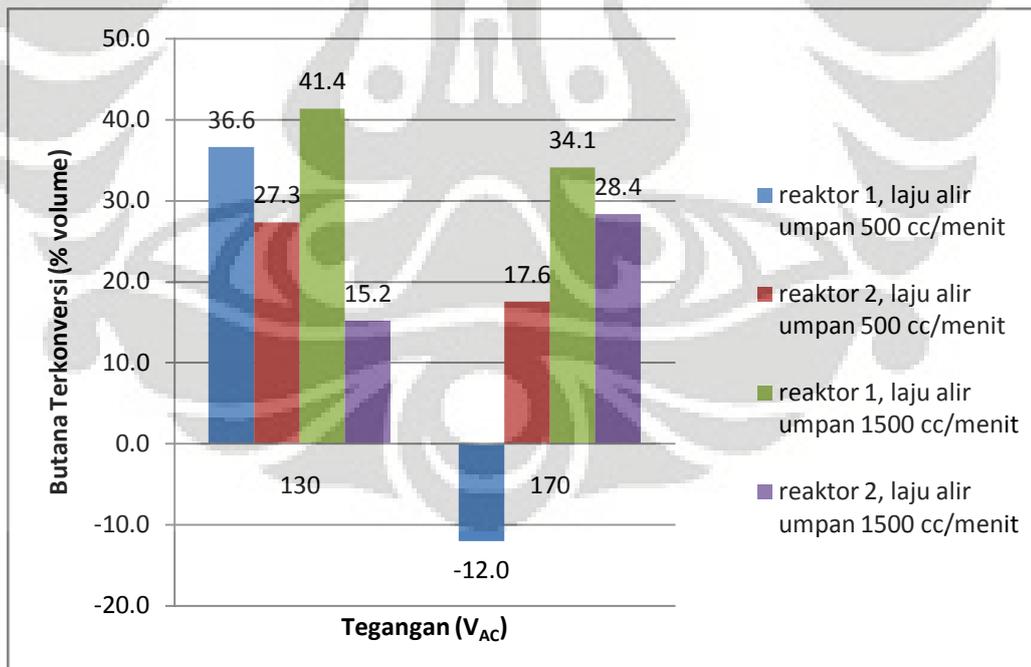
Gambar 4.8 Diagram Batang Pengaruh Tegangan Primer NST terhadap Konsentrasi Propana dan Butana pada Laju Alir Umpan Elpiji 1500 cc/menit untuk Reaktor 2 (diameter dielektrik 14 mm)

Fenomena produksi propana yang diduga merupakan hasil konversi butana ditunjukkan dengan lebih jelas oleh diagram batang pada Gambar 4.9 dan 4.10 pada halaman berikutnya, yang menunjukkan nilai produksi propana dan dekomposisi butana pada berbagai variasi yang dihitung dengan cara mengurangi nilai konsentrasi propana dan butana pada tiap variasi tegangan (130 V dan 170 V) dengan konsentrasi pada tegangan 0 (nol) V, yang menunjukkan

konsentrasi awal propana dan butana dalam elpiji sebelum direaksikan dalam reaktor DBD.



Gambar 4.9 Diagram Batang Hubungan Tegangan Primer NST terhadap Konsentrasi Propana yang diproduksi pada Laju Alir Umpan Elpiji dan Ukuran Reaktor Berbeda-beda

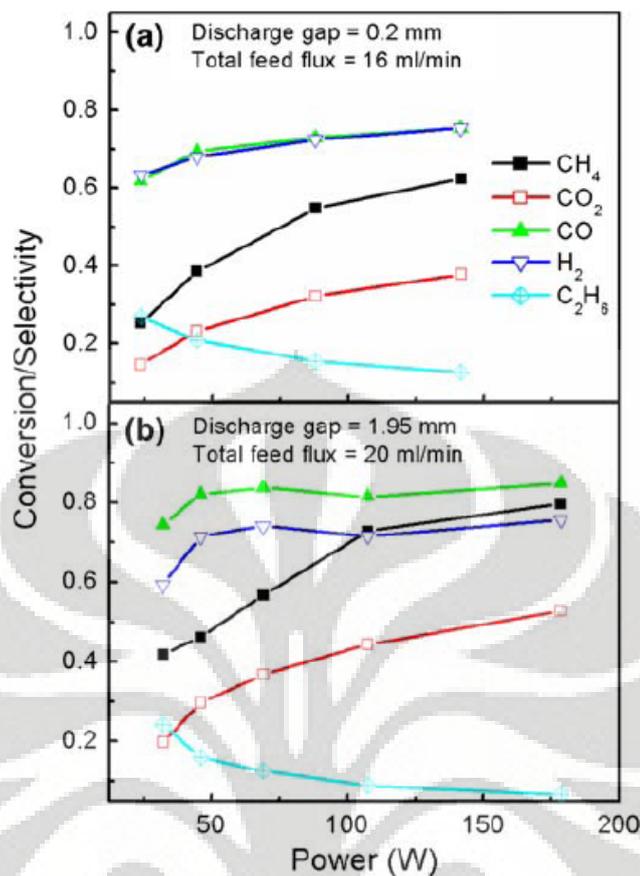


Gambar 4.10 Diagram Batang Hubungan Tegangan Primer NST terhadap Konsentrasi Butana yang Terdekomposisi pada Laju Alir Umpan Elpiji dan Ukuran Reaktor Berbeda-beda

Dari Gambar 4.9 dan 4.10 di atas dapat disimpulkan bahwa kecenderungan utama reaksi konversi elpiji adalah pengkonversian butana menjadi propana dengan produksi propana terbaik sebesar 44,7% dicapai pada kondisi laju alir 1500 cc/menit dan tegangan 130 V dengan menggunakan reaktor 1 (volume reaktor kecil). Nilai konsentrasi propana yang bernilai negatif (-21%) yang dihasilkan pada kondisi laju alir 500 cc/menit dan tegangan 170 V untuk reaktor 1 (Gambar 4.9) menunjukkan bahwa pada kondisi ini terjadi pemecahan propana menjadi butana dan bukan produksi propana dari butana sebagaimana yang ditunjukkan hasil variasi-variasi lainnya. Sejalan dengan hal tersebut, pada kondisi yang sama, butana juga memberikan nilai konsentrasi yang negatif yang menunjukkan produksi butana, bukannya dekomposisi butana. Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, hal ini diduga terjadi karena pada kondisi ini laju alir dan ukuran reaktor yang digunakan merupakan nilai variasi yang paling kecil yang berakibat pada waktu tinggal paling lama dibandingkan variasi lainnya, sehingga reaksi yang terjadi semakin lama menyebabkan terjadinya reaksi balik berupa pemecahan propana dan produksi butana. Waktu tinggal paling lama ini turut diperparah dengan besarnya medan listrik yang dihasilkan oleh tegangan 170 V, yang merupakan nilai variasi tegangan paling besar. Semakin besar tegangan yang diberikan maka semakin besar pula medan listrik yang dibangkitkan dalam reaktor plasma DBD ini. Medan listrik yang besar ini turut berkontribusi terhadap reaksi pemecahan propana ini.

4.2.1 Pengaruh Tegangan terhadap Konsentrasi Produk

Sebagaimana telah dibahas sebelumnya, Wang dkk (2009) telah melakukan penelitian dengan tujuan menginvestigasi pengaruh daya masukan, waktu tinggal, dan *discharge gap* terhadap kinerja reaksi reaktor DBD yang digunakan untuk mengkonversi metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) menjadi *syngas* (CO dan H_2) dengan mekanisme *dry reforming*. Penelitian dilakukan menggunakan reaktor DBD pada suhu kamar dan tekanan sekitar (*ambient*). Pada penelitian tersebut, umpan masukan reaktor adalah CH_4 dan CO_2 dengan perbandingan mol 1:1.



Gambar 4.11 Pengaruh Daya Masukan Terhadap Konversi CH₄ dan CO₂ dan Selektivitas CO dan H₂ berdasarkan Penelitian Wang dkk (Wang, et.al., 2009)

Daya masukan merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi reaksi kimia plasma. Berdasarkan hasil penelitian Wang, Yan, Jin, & Cheng (2009), konversi dari CH₄ dan CO₂ dan selektivitas terhadap CO dan H₂ meningkat seiring peningkatan daya masukan, sementara selektivitas terhadap C₂H₆ menurun dengan cukup tajam. C₂H₆ dalam hal ini merupakan produk samping (*by-product*) proses (Gambar 4.11). Jadi, hal ini menunjukkan semakin banyak *syngas* (produk utama) dan lebih sedikit produk samping terbentuk pada daya masukan yang lebih besar.

Hal ini dapat dijelaskan dengan fakta bahwa derajat ionisasi meningkat seiring peningkatan daya masukan. Derajat ionisasi plasma dingin jauh lebih rendah daripada plasma termal yang mempunyai derajat ionisasi hampir 100%. Disamping radikal bebas, meta-stabil, ion-ion dan elektron, masih banyak terdapat molekul yang tidak terionkan pada plasma dingin. Semakin tinggi daya masukan, semakin tinggi pula derajat ionisasi yang dihasilkan. Dan kemudian, semakin

banyak radikal dan meta-stabil namun lebih sedikit molekul yang dapat terbentuk. Sebagai hasilnya, konversi CH_4 dan CO_2 menjadi lebih tinggi. Data energi ionisasi untuk beberapa molekul gas ditunjukkan oleh Tabel 4.6 di bawah ini.

Tabel 4.6 Energi Ionisasi dari Molekul-Molekul Berbeda

Molekul gas	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	CO_2	CO	H_2	O_2	H_2O
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

Dapat dilihat bahwa CO dan H_2 mempunyai energi ionisasi paling tinggi dibanding molekul lain pada tabel di atas. Atau dengan kata lain, kedua zat ini adalah molekul yang paling stabil dalam campurannya sehingga selektivitasnya meningkat. Pada daya masukan yang rendah, selektivitas C_2H_6 cukup tinggi. Dengan meningkatnya daya masukan, C_2H_6 terionisasi lebih lanjut dan bereaksi dengan CO_2 membentuk molekul yang lebih stabil, yaitu CO dan H_2 , yang meningkatkan selektivitas CO dan H_2 . Dari penelitian di atas, maka disimpulkan bahwa daya masukan merupakan faktor yang sangat berpengaruh dalam konversi reaktan menggunakan reaktor DBD.

Oleh karena daya masukan ini erat kaitannya dengan tegangan dimana menunjukkan hubungan kesebandingan, maka dapat disimpulkan bahwa analisis berdasarkan daya masukan ini layak digunakan dalam mengevaluasi pengaruh tegangan masukan pada penelitian reaktor plasma DBD untuk konversi elpiji ini.

Berdasarkan Tabel 4.6 di atas, dapat dilihat bahwa propana mempunyai derajat ionisasi yang lebih tinggi dibandingkan butana. Propana memiliki derajat ionisasi sebesar 10,95 eV, sedangkan butana sebesar 10,53 eV; jadi propana lebih stabil dibandingkan butana. Jika dihubungkan dengan penjelasan Wang dkk, maka dapat disimpulkan bahwa pada penelitian plasma DBD untuk konversi elpiji ini, propana yang lebih stabil daripada butana akan diproduksi dan sebaliknya butana akan dikonversi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan 4.10 (hal.67).

Berdasarkan hasil penelitian Istadi dan Amin (2007), disimpulkan bahwa konversi metana meningkat seiring peningkatan tegangan *discharge*. Hal ini terjadi akibat lebih banyak spesi plasma yang dibangkitkan pada tegangan *discharge* yang lebih tinggi. Semakin besar tegangan keluaran yang dibangkitkan maka semakin besar pula 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.

Jika dihubungkan dengan penelitian plasma non-termal DBD untuk konversi elpiji ini, maka tidak dapat dilihat secara signifikan pengaruh tegangan dimana semakin besar tegangan maka semakin besar pula konversi butana. Grafik yang memenuhi kondisi ini adalah yang ditunjukkan oleh Gambar 4.8 di atas (butana vs tegangan pada laju alir 1500 cc/menit untuk reaktor 2). Pada grafik ini dapat dilihat bahwa peningkatan tegangan berakibat peningkatan konversi butana yang ditunjukkan dengan pengurangan konsentrasi butana dan peningkatan produksi propana. Sementara itu, pada grafik-grafik lainnya tidak dapat disimpulkan hubungan yang jelas antara pengaruh tegangan terhadap tingkat konversi. Hal ini diduga terjadi disebabkan adanya pengaruh variasi lain dari penelitian ini, yaitu ukuran reaktor dan laju alir.

4.2.2 Pengaruh Laju Alir terhadap Konsentrasi Produk

Laju alir umpan merupakan salah satu parameter yang menentukan dalam kinerja reaktor DBD karena berpengaruh langsung pada waktu tinggal umpan dalam ruang *discharge* (*discharge gap*) reaktor plasma. Semakin kecil laju alir umpan yang masuk ke reaktor plasma, maka waktu tinggal umpan dalam reaktor akan semakin besar. Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, untuk melihat pengaruh laju alir ini, ditentukan dua jenis laju alir umpan elpiji yaitu 500 cc/menit dan 1500 cc/menit.

Untuk menghitung waktu tinggal umpan dalam reaktor, digunakan persamaan 4.1 sebelumnya, yaitu: Waktu Tinggal (s) = $\frac{L}{F/A}$ dengan L adalah panjang elektroda (dalam hal ini panjang gelas dielektrik yang ebrbentuk tabung), F laju alir umpan, dan A adalah luas *cross-sectional area*. Maka, dengan

menggunakan rumus ini, diperoleh waktu tinggal umpan dalam reaktor pada laju alir umpan dan ukuran reaktor berbeda yang ditampilkan pada Tabel 4.7 di bawah berikut.

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 dalam ruang <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

Dapat dilihat dari perhitungan pada Tabel 4.7 di atas bahwa reaktor 2 dengan laju alir umpan 8,33 cc/detik atau 500 cc/menit memberikan waktu tinggal paling besar. Dengan waktu tinggal yang lebih lama maka diharapkan konversi semakin meningkat pula, sesuai dengan kesimpulan penelitian Wang et.al. (2009) yaitu 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.

Jika dihubungkan dengan hasil penelitian, dapat dilihat dari Gambar 4.9 (hal.67) bahwa reaktor 2 dengan laju alir umpan 8,33 cc/detik atau 500 cc/menit yang mempunyai waktu tinggal paling besar (4,95 detik) ternyata tidak memberikan konversi paling baik. Produksi propana yang dihasilkan pada kondisi ini dengan tegangan 130 V adalah 32,5% dan seiring peningkatan tegangan menjadi 170 V, produksi propana menurun menjadi 21,1%.

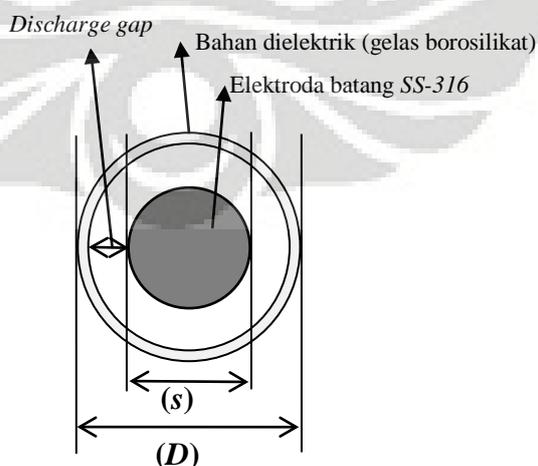
Produksi propana terbaik yaitu sebanyak 44,7% justru dihasilkan pada tegangan 130 V dan laju alir 1500 cc/menit menggunakan reaktor 1 yang berdasarkan Tabel 4.7 mempunyai waktu tinggal paling kecil, yaitu 1,15 detik. Jadi, dapat disimpulkan bahwa proses konversi elpiji menggunakan plasma DBD ini memberikan hasil optimum pada laju alir kecil.

4.2.3 Pengaruh Diameter Reaktor terhadap Konsentrasi Produk

Diameter reaktor ini erat pengaruhnya dengan *discharge gap* dan volume reaktor. *Discharge gap* merupakan jarak antara elektroda jala dan elektroda batang pada bagian dalam *tube* reaktor, berupa suatu ruang (*gap*) tempat berlangsungnya reaksi utama terhadap reaktan yang diaktifkan oleh plasma. Semakin besar diameter reaktor maka semakin besar pula *discharge gap*, demikian pula volume reaktor pun bertambah besar. Sebagaimana telah dibahas sebelumnya, volume reaktor ini erat kaitannya dengan waktu tinggal reaktan dalam reaktor.

Terdapat 3 macam faktor yang dipengaruhi oleh *discharge gap*, yaitu:

1. *Energi medan listrik*. Semakin kecil *discharge gap* maka energi yang ditimbulkan dari tumbukan-tumbukan antar molekul, elektron, dan spesi-spesi aktif dalam reaktor akan semakin besar pula, sehingga konversi akan semakin tinggi.
2. *Waktu tinggal*. Semakin besar *discharge gap*, maka semakin besar pula waktu tinggal reaktan dan konversi akan semakin besar pula.
3. *Ketahanan gelas dielektrik*. Dua faktor di atas merupakan faktor-faktor yang saling meniadakan, sehingga *discharge gap* harus diatur sedemikian rupa agar tidak terlalu besar atau terlalu kecil sehingga gelas dielektrik tidak retak (pecah).



Gambar 4.12 Skema Melintang *Tube* Reaktor Plasma DBD

Gambar 4.12 pada halaman sebelumnya menunjukkan ilustrasi potongan melintang bagian *tube* reaktor plasma DBD (gelas borosilikat) untuk perhitungan *discharge gap* (D_g). Sebagaimana telah dibahas sebelumnya, *discharge gap* adalah salah satu parameter variasi yang dilakukan untuk uji kinerja reaktor plasma DBD. Perhitungan *discharge gap* (D_g) dengan diameter luar elektroda batang (s) sama untuk kedua reaktor, yaitu 6,5 mm adalah sebagai berikut:

- Untuk reaktor 1.

$D = 12$ mm (diameter luar gelas borosilikat)

$t = 1$ mm (tebal gelas borosilikat)

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

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

- Untuk reaktor 2.

$D = 14$ mm (diameter luar gelas borosilikat)

$t = 1$ mm (tebal gelas borosilikat)

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

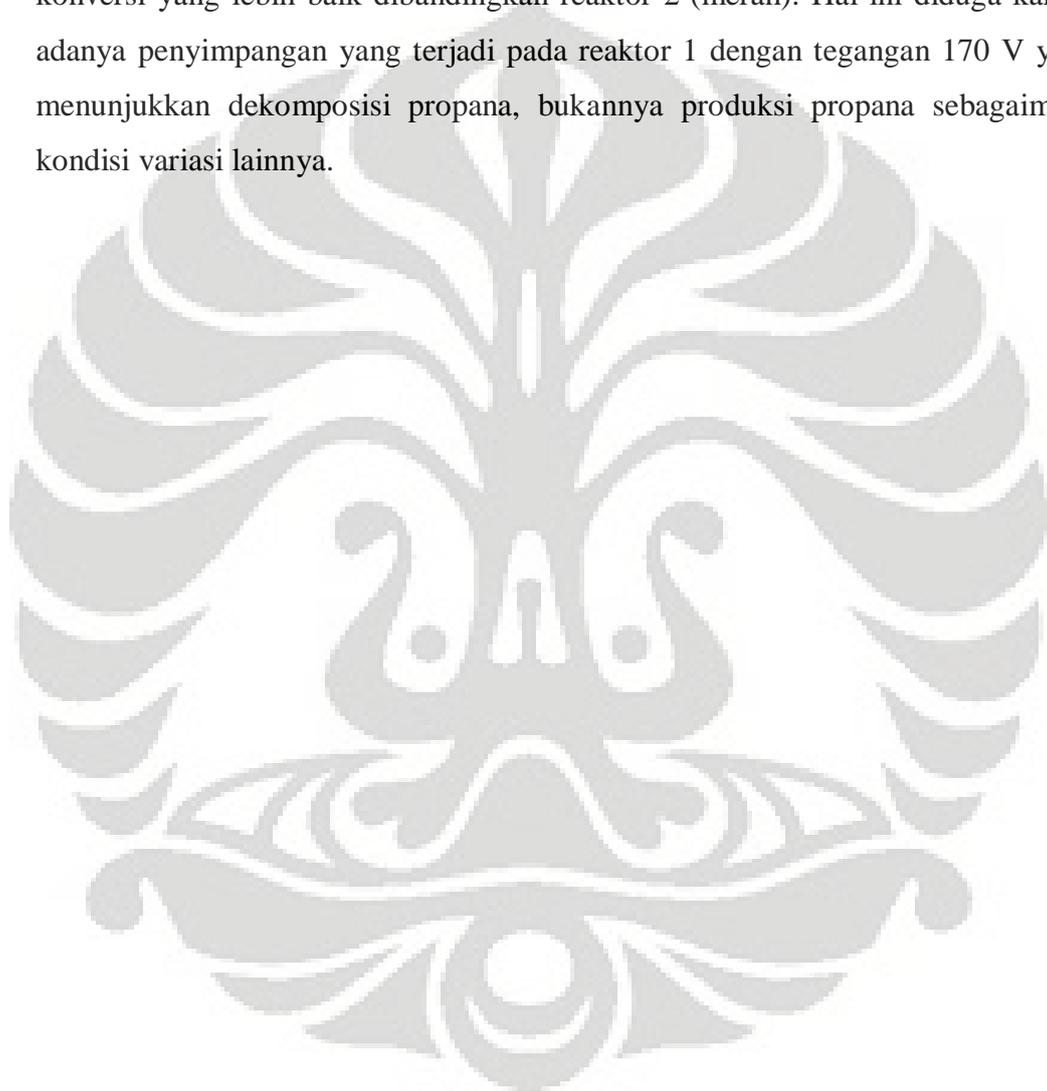
$D_g = (d - s)/2 = (12$ mm $- 6,5$ mm)/2 = **2,75 mm** (*discharge gap* untuk reaktor 1)

Pengaruh *discharge gap* ini erat kaitannya dengan volume reaktor karena menunjukkan hubungan kesebandingan. Sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 4.7 (hal.72), *discharge gap* mempunyai pengaruh dalam menentukan waktu tinggal umpan dalam reaktor. Semakin besar *discharge gap*, maka semakin besar pula volume reaktor dan semakin besar waktu tinggal umpan yang berdampak pada semakin besarnya konversi. Namun, sebagaimana dibahas pada analisis pengaruh laju alir sebelumnya, yaitu waktu tinggal yang diperlukan untuk konversi optimum dicapai pada waktu tinggal yang kecil (1,15 detik), maka dengan demikian reaktor 1 diduga menghasilkan konversi lebih baik.

Dapat dilihat dari Gambar 4.9 dan 4.10 (hal.67) bahwa pada laju alir 1500 cc/menit, reaktor 1 (warna hijau) menghasilkan konversi yang lebih baik dibandingkan reaktor 2 (warna ungu), baik pada tahanan 130 V maupun 170 V. Hal ini sesuai dengan analisis yang diajukan di atas sehingga disimpulkan reaktor

1 yang memiliki *discharge gap* lebih kecil (1,75 mm) menghasilkan konversi yang lebih baik (yang ditunjukkan dengan besarnya produksi propana) dibandingkan reaktor 2 (*discharge gap* 2,75 mm) dalam proses konversi elpiji menggunakan plasma DBD.

Sementara itu, pada laju alir 500 cc/menit tidak dapat dilihat adanya hubungan ini, meskipun pada tegangan 130 V reaktor 1 (biru) menunjukkan konversi yang lebih baik dibandingkan reaktor 2 (merah). Hal ini diduga karena adanya penyimpangan yang terjadi pada reaktor 1 dengan tegangan 170 V yang menunjukkan dekomposisi propana, bukannya produksi propana sebagaimana kondisi variasi lainnya.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

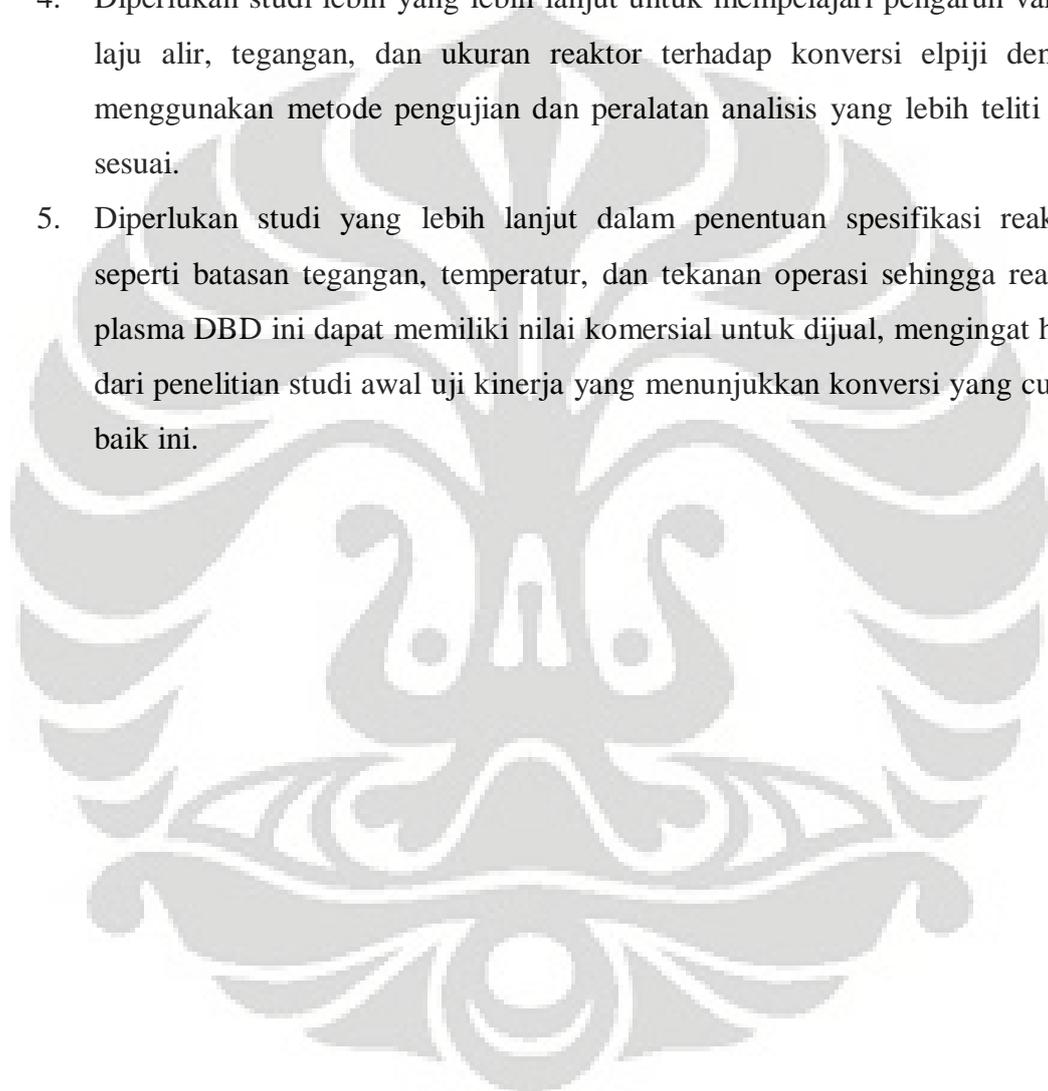
1. Plasma Non-termal (Plasma Dingin) jenis DBD dapat digunakan untuk mengkonversi elpiji menjadi hidrokarbon lainnya.
2. Dua reaktor plasma DBD jenis pipa koaksial *shell and tube* hasil rancangan memiliki konfigurasi aliran sebanyak 3 kali dengan skema aliran U, yang bertujuan mendinginkan *tube* reaktor agar tahan lama, dengan volume reaktor 29 cm³ dan 41 cm³.
3. Tegangan operasional pembangkitan plasma yang aman untuk pengujian konversi LPG menggunakan reaktor plasma DBD berada pada rentang 70 – 170 V_{AC} pada primer NST.
4. Konversi dari umpan elpiji hanya terjadi antara butana dan propana (sebagai komponen utama elpiji); butana dikonversi menjadi propana.
5. Produksi propana terbaik (optimum) dari hasil konversi butana pada umpan elpiji dicapai pada kondisi laju alir umpan elpiji 1500 cc/menit dengan tegangan primer NST 130 V menggunakan reaktor 1 (diameter luar dielektrik 12 mm), yaitu sebesar 44,7%.
6. Tingkat konversi propana dari butana dalam elpiji dipengaruhi oleh:
 - Laju alir elpiji umpan
 - Tegangan masukan reaktor (sekunder NST)
 - Ukuran (volume) reaktor

5.2. Saran

1. Perlu dilakukan perbaikan pada reaktor plasma hasil rancang bangun yang meliputi: pencegahan kebocoran gas, pencegahan lucutan listrik yang tidak lazim, penanganan keamanan operasi, dan mekanisme preparasi sampel.
2. Diperlukan studi lebih yang lebih lanjut dan mendalam mengenai mekanisme reaksi konversi butana menjadi propana pada elpiji untuk mengetahui

produktivitas proses konversi elpiji dan konversi apa saja yang terjadi selain antara butana dan propana.

3. Diperlukan analisis GC yang lebih lanjut untuk menginvestigasi komponen apa saja yang terdapat pada tabung elpiji sehingga dapat dilihat konversi keseluruhan komponen, tidak hanya propana dan butana, untuk penghitungan produktivitas reaktor DBD dalam mengkonversi.
4. Diperlukan studi lebih yang lebih lanjut untuk mempelajari pengaruh variasi laju alir, tegangan, dan ukuran reaktor terhadap konversi elpiji dengan menggunakan metode pengujian dan peralatan analisis yang lebih teliti dan sesuai.
5. Diperlukan studi yang lebih lanjut dalam penentuan spesifikasi reaktor, seperti batasan tegangan, temperatur, dan tekanan operasi sehingga reaktor plasma DBD ini dapat memiliki nilai komersial untuk dijual, mengingat hasil dari penelitian studi awal uji kinerja yang menunjukkan konversi yang cukup baik ini.



DAFTAR PUSTAKA

- 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.
- H. Huang, L. Tang. (2007). Treatment Of Organic Waste Using Thermal Plasma Pyrolysis Technology. *Energy Conversion and Management*, 48, 1331–1337.
- Istadi. (2006). Aplikasi Teknologi Hibrid Katalisis-Plasma Dalam Pengembangan Reaktor Kimia Masa Depan. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 1(2), 2006, 15-20.
- 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.
- 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.
- Purushothama, C et al. (2006). Comparative Studies on Soot Oxidation by Nitrogen Dioxide and Ozone. *Regional Research Center for Environmental Technology of Thermal Plasma (ETTP)*, Inha University, F2006SC28.
- 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.
- The Clean Air Technology Center (CATC) U.S. Environmental Protection Agency (E143-03). (2005). *Using Non-Thermal Plasma to Control Air Pollutants*. North Carolina: Ravi Srivastava dan William Maxwell.
- 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.
- Zhang, J.Q., Yang, Y.J., Zhang, J.S., Liu, Q., & Tan, K.R. (2002). Non-Oxidative Coupling of Methane to C2 Hydrocarbons under Above-Atmospheric Pressure Using Pulsed Microwave Plasma. *Energy & Fuels* 2002, 16, 687-693.
- Zhou, L.M., Xue, B., Kogelschatz, U., & Eliasson, B. (1998). Partial Oxidation of Methane to Methanol with Oxygen or Air in a Nonequilibrium Discharge Plasma. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 18, No. 3, 1998.
- 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.
- Borosilicate Glass. Wikipedia. 30 Juni, 2010.
http://en.wikipedia.org/wiki/Borosilicate_glass
- Elpiji. Wikipedia. 30 Juni, 2010.
<http://id.wikipedia.org/wiki/elpiji.html>

Lestarini, Ade Hapsari. *Defisit BBM Indonesia 360 Ribu Barel/Hari*. 30 Juni, 2010.

<http://economy.okezone.com/read/2009/09/01/320/253243/320/defisit-bbm-indonesia-360-ribu-barel-hari>

Mengenal Elpiji. Pertamina. 30 Juni, 2010.

<http://www.pertamina.com/konversi/elpiji.php>

Nonthermal plasma. Wikipedia. 2 Juni, 2009.

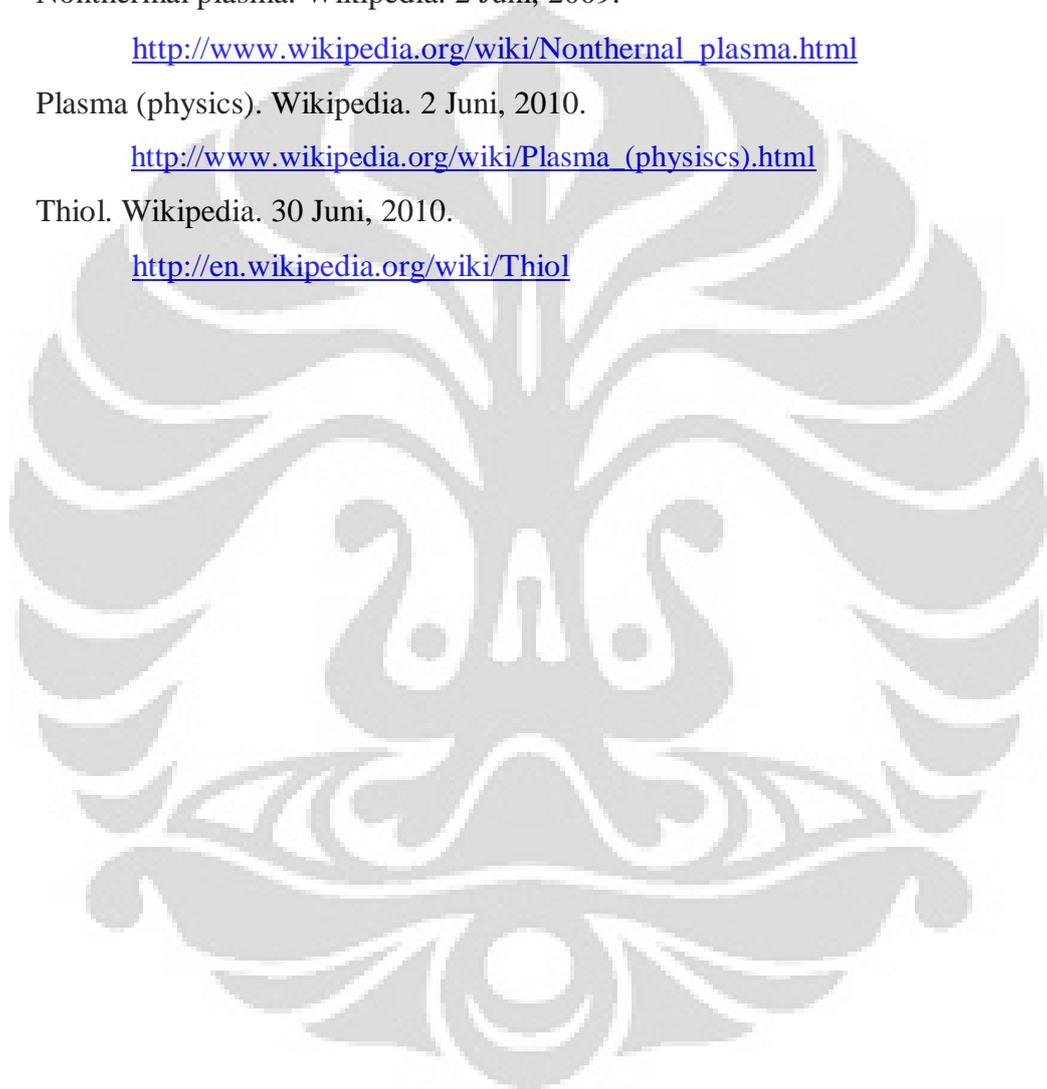
http://www.wikipedia.org/wiki/Nonthermal_plasma.html

Plasma (physics). Wikipedia. 2 Juni, 2010.

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

Thiol. Wikipedia. 30 Juni, 2010.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Thiol>



Lampiran 1. Data Hasil Analisis GC

Seluruh hasil pengambilan data GC pada penelitian reaktor plasma non-termal DBD ini menggunakan gas umpan elpiji dari sumber tabung elpiji 12 kg produksi Pertamina dengan sumber tegangan bolak-balik (AC) dari listrik PLN.

Berikut hasil pengambilan data:

1. Hasil pencatatan data kromatogram GC pada laju alir umpan 500 cc/menit, tanpa menyalakan reaktor, untuk menguji komposisi umpan elpiji.

No	Time	Area	MK	IDN0	Concentration
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
	TOTAL	251255			100

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	IDN0	Concentration
1	0.042	52			0.1856
2	0.243	340			1.2022
3	0.348	55	V		0.1929
4	0.675	75			0.2637
5	0.837	376	V		1.3288
6	1.673	1538			5.4361
7	2.397	21172	SV		74.8536
8	3.708	29	T		0.102
9	6.608	2353			8.3197
10	8.378	1954	SV		6.9091
11	9.508	13	T		0.0467
12	10.807	47			0.1655
13	11.607	103			0.3635
14	13.575	58			0.2061
15	13.975	37			0.1317
16	16.542	40			0.1421
17	16.975	43			0.1508
	TOTAL	28284			100

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	IDN0	Concentration
1	0.04	1284			0.5257
2	0.255	159625	V		65.3456
3	0.815	805			0.3297
4	1.532	3826			1.5662
5	2.3	64136	V		26.2553
6	6.5	7362			3.0136
7	8.267	6624	V		2.7116
8	11.465	17			0.0071
9	12.1	12			0.0049
10	12.467	24	V		0.0097
11	14.662	106			0.0434
12	15.4	254	V		0.1038
13	18.863	48			0.0195
14	19.367	17			0.0071
15	19.733	36	V		0.0147
16	20.233	44			0.0179
17	20.598	43	V		0.0178
18	21.198	15			0.0063
	TOTAL	244278			100

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	IDN0	Concentration
1	0.05	126			0.3842
2	0.26	20374			61.9052
3	0.817	117			0.356
4	1.757	816			2.4804
5	2.392	9469	V		28.7718
6	6.492	992			3.015
7	8.292	1016	V		3.0874
	TOTAL	32911			100

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	IDN0	Concentration
1	0.04	65			0.5425
2	0.26	8082	S		66.9378
3	0.815	25	T		0.2079
4	1.667	1307			10.8251
5	2.408	2594	V		21.4867
	TOTAL	12073			100

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	IDN0	Concentration
1	0.042	335			0.5258
2	0.265	27600	SV		43.2742
3	0.825	376	T		0.5894
4	1.77	628			0.9851
5	2.35	28891	V		45.2978
6	6.45	3134			4.9139
7	8.215	2815	V		4.4138
	TOTAL	63779			100

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	IDN0	Concentration
1	0.042	1222			0.7599
2	0.263	87835	SV		54.6234
3	0.823	696	T		0.4331
4	1.648	1329			0.8267
5	2.295	57109	V		35.5152
6	6.425	6618			4.1158
7	8.158	5991	V		3.7258
	TOTAL	160801			100

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	IDN0	Concentration
1	0.042	298			0.6889
2	0.263	24809	SV		57.4343
3	0.823	183	T		0.423
4	2.37	14899			34.4907
5	6.497	1661			3.8441
6	8.158	1347	V		3.119
	TOTAL	43196			100

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	IDN0	Concentration
1	0.033	83			0.3459
2	0.263	9694	V		40.3484
3	0.82	132			0.5481
4	1.785	391			1.6286
5	2.378	11446	V		47.6391
6	6.498	1174			4.8873
7	8.2	1106	V		4.6026
	TOTAL	24026			100

Lampiran 2. Material Safety Data Sheet (MSDS) Elpiji

(Terjemahan dari HALDIA Petrochemical Ltd)

1. Identitas Bahan Kimia

Nama Bahan	<i>Liquified petroleum gas</i> (elpiji)	Nama Lazim Penjualan	Elpiji
Sinonim	Elpiji, Propana, Butana, Purofax, <i>Bottled Gas</i>	Klasifikasi Kimia	Campuran aromatik
Rumus Kimia	$C_3H_8-C_4H_{10}$ (Campuran)	Nomor CAS	68476-85-7
Nomor UN	1075	Kelas Bahaya UN	2

2. Sifat Fisik dan Kimia Bahan

Titik Didih /range	>-40°C	Wujud Fisik	Gas pada 15°C dan 1 atm
Densitas Uap (udara=1)	1,5	Solubilitas dalam air (pada 30°C)	Terapung
Spesific Gravity (pada 50°C) (air=1)	0.51-0.58	Bau	Bau senyawa tambahan (merkaptan)

3. Bahaya Ledakan dan Kebakaran Bahan

Sensivitas meledak terhadap tubrukan	Dapat meledak	Mudah meledak	Tidak	Suhu Nyala Otomatis	466,1°C
Mudah terbakar	Tidak	Pengoksidasi	Tidak	Bahan korosif	Tidak
Mudah menyala	Ya	Tingkat flamabilitas	2	Bahaya polimerisasi	Tidak

4. Bahaya Bahan terhadap Kesehatan

Jalur masuk ke tubuh	Terhirup, lewat kulit, tertelan			
Efek paparan	Konsentrasi di udara lebih besar dari 10% menyebabkan pusing selama beberapa menit, konsentrasi 1% menyebabkan gejala yang sama selama 10 menit. Konsentrasi tinggi menyebabkan sesak napas.			
Batas paparan yang diperbolehkan	TLV-TWA (ACGIH)	1000 ppm	STEL(ACGIH)	Tidak diketahui
Kode Bahaya NFPA	<i>Health 1</i>	<i>Flammability 4</i>	<i>Reactivity 0</i>	<i>Special 0</i>

5. Tindakan Pencegahan

Peralatan perlindungan diri	Hindari kontak dengan cairan atau gas. Sediakan sarung tangan, kacamata pelindung, pakaian pelindung dan sepatu pelindung.
Peringatan penanganan dan penyimpanan	Simpan dalam silinder tertutup dalam tempat dingin, berventilasi baik, jauh dari panas dan nyala api.

6. Tindakan Darurat dan Pertolongan Pertama

Kebakaran (Tingkat kebakaran: C)	
Alat pemadam	Air, DCP, CO ₂
Prosedur khusus	Jaga tempat penyimpanan tetap dingin dengan menembakkan air jika terkena panas atau api
Terpapar	
Pertolongan pertama	Mata: Bilas dengan air selama minimal 10 menit Kulit: Singkirkan pakaian yang terkontaminasi dan bilas bagian kulit yang terkena dengan air Terhirup: Bawa korban ke area terbuka. Jika tak bernapas, berikan bantuan pernapasan Tertelan: Jika sadar, korban diberikan minum air atau susu. Segera cari pertolongan medis sesudahnya.
Tumpahan	
Tindakan yang diambil	Tutup tumpahan jika tidak berbahaya. Peringatkan orang sekitar untuk menjauh
Metode pembuangan bahan sisa	Bakar gas dengan dikontrol agar tidak menyambar kemana-mana