



UNIVERSITAS INDONESIA

**ASPEK KINETIKA DEKOMPOSISI METANA
DALAM REAKTOR DBD PLASMA
BERKONFIGURASI ALIRAN *THREE PASS***

SKRIPSI

RIZKI FITRIA DARMAYANTI

0706163823

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA**

DEPOK

JUNI 2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**ASPEK KINETIKA DEKOMPOSISI METANA
DALAM REAKTOR DBD PLASMA
BERKONFIGURASI ALIRAN *THREE PASS***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

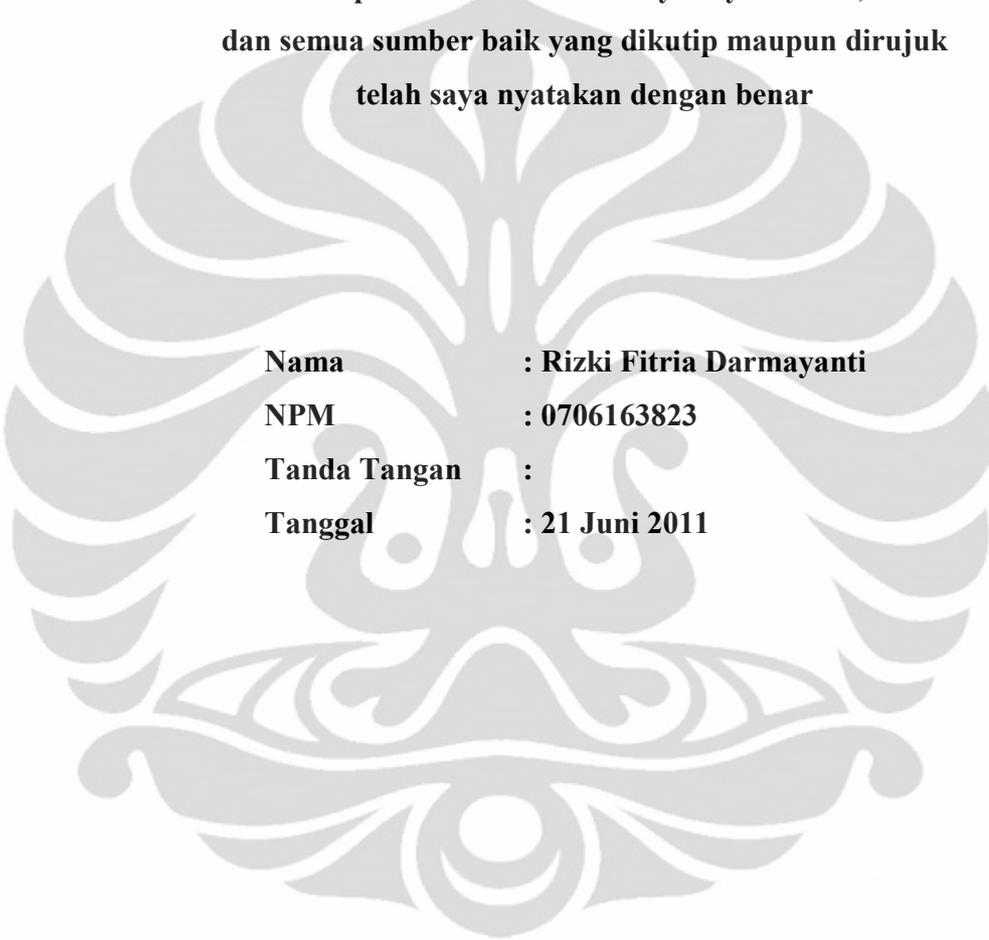
RIZKI FITRIA DARMAYANTI

0706163823

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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



Nama : Rizki Fitria Darmayanti
NPM : 0706163823
Tanda Tangan :
Tanggal : 21 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Rizki Fitria Darmayanti
NPM : 0706163823
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Aspek Kinetika Dekomposisi Metana dalam Reaktor
DBD Plasma Berkonfigurasi Aliran *Three – Pass*

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana S1 pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

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

Penguji I : Prof. Ir. Sutrasno K., M.Sc., Ph.D. (.....)

Penguji II : Dr. Ir. Nelson Saksono, M.T. (.....)

Penguji III : Ir. Amien Rahardjo, M.T. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 21 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah membimbing penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi. Berkat petunjuknya, penulis dapat menyelesaikan makalah skripsi dengan judul “Aspek Kinetika Dekomposisi Metana dalam Reaktor DBD Plasma Berkonfigurasi Aliran *Three Pass*” ini untuk memenuhi tugas skripsi, salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana Teknik Departemen Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

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

1. Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Ir. Yuliusman, M.Eng., selaku dosen pembimbing akademik dan coordinator skripsi DTK FTUI yang telah menyediakan waktu dan membantu kehidupan akademik perkuliahan selama ini;
3. Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA., selaku ketua Departemen Teknik Kimia FTUI;
4. Para dosen Departemen Teknik Kimia FTUI yang telah memberikan ilmu dan membagi wawasannya;
5. Mbak Tiwi, Mang Ijal, Kang Jajat, Mas Topik, Mas Eko, Mas Sri, dan Pak Masturo atas bantuannya yang sangat besar pada saat penulis melakukan penelitian;
6. Keluarga besar terutama ayah, ibu, Tob, Hembit, Timuk dan mbah yang selalu memberi dukungan dan semangat;
7. Alfi, Hariri, Resuli, serta seluruh teman seperjuangan Lab IP dan RPKA yang berbagi suka, duka, dan ilmu selama penelitian ini;

8. Semua teman-teman yang tidak dapat disebutkan satu demi satu, yang selalu memberikan informasi dan bantuan semangat;
9. Seluruh karyawan DTK FTUI, pahlawan tanpa tanda jasa;
10. Semua pihak yang telah membantu penyusunan makalah skripsi ini secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa dalam makalah skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sehingga dapat menyempurnakan skripsi ini dan melaksanakan perbaikan di masa yang akan datang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan memberikan manfaat bagi dunia pendidikan dan ilmu pengetahuan. Akhir kata, penulis berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Depok, 21 Juni 2011

Penulis

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

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

Nama : Rizki Fitria Darmayanti
NPM : 0706163823
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:

**Aspek Kinetika Dekomposisi Metana
dalam Reaktor DBD Plasma
Berkonfigurasi Aliran *Three Pass***

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 : 21 Juni 2011
Yang menyatakan

(Rizki Fitria Darmayanti)

ABSTRAK

Nama : Rizki Fitria Darmayanti
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Aspek Kinetika Dekomposisi Metana dalam Reaktor DBD Plasma Berkonfigurasi Aliran *Three Pass*

Penelitian ini difokuskan pada aspek - aspek kinetika dekomposisi metana dalam reaktor DBD koaksial yang terbuat dari kuarsa dan elektroda *stainless steel*. Reaksi berlangsung pada tekanan atmosfer dan laju alir umpan 250 cc/menit. Konversi metana semakin stabil pada volume reaktor yang besar dan tegangan yang rendah. Dekomposisi optimal diperoleh pada reaktor 55,4 cc dengan tegangan 9,5 kV. Berdasarkan penelitian ini diperoleh bahwa laju reaksi dipengaruhi oleh tegangan reaktor, 9,5 kV memberikan laju reaksi yang paling besar. Laju reaksi dekomposisi dan formasi metana masing-masing dipengaruhi waktu tinggal. Laju reaksi tersebut tidak dapat dimodelkan dengan pendekatan reaksi elementer.

Kata Kunci: metana, plasma, DBD, kinetika,

ABSTRACT

Name : Rizki Fitria Darmayanti
Study Program : Teknik Kimia
Title : Kinetic Aspects of Methane Decomposition through Three Pass Flow DBD Plasma Reactor

This experiment is focused in kinetic aspects of methane decomposition through coaxial DBD reactor made from quartz dielectric and stainless steel electrodes. Reaction occurs at atmospheric pressure and 250 cc/min feed flow rate. Methane conversion is more stable in the larger reactor volume and lower voltage. Optimal decomposition is obtained in 55,4 cc reactor and 9,5 kV voltage. The data showed that reaction reaction rate is affected by reactor voltage, 9,5 kV results the fastest reaction rate. Both decomposition and formation rate of methane are affected by residence time. Those reaction rates model can't be developed well with elementary reaction approach.

Keywords: methane, plasma, DBD, kinetic

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Batasan Masalah	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Plasma Dielectric Barrier Discharge	5
2.2. Konversi Metana dalam Reaktor Plasma	6
2.2.1. Pengaruh tegangan dan laju alir	8
2.2.2. Mekanisme reaksi konversi metana non-oksidatif	11
2.2.3. Pengaruh tegangan dan frekuensi terhadap densitas spesi	14
2.3. Kinetika Reaksi Elementer	16
2.3.1. Reaksi orde nol	16
2.3.2. Reaksi orde satu	17
2.3.2. Reaksi orde dua	18
BAB 3 METODE PENELITIAN	20
3.1. Tahapan Penelitian	20

3.2. Rancangan Reaktor.....	21
3.3. Rangkaian Alat dan Spesifikasi.....	24
3.4. Variabel Penelitian	27
3.4.1. Variabel kontrol	27
3.4.2. Variabel bebas.....	27
3.4.3. Variabel terikat.....	27
3.5. Prosedur Penelitian.....	27
3.5.1. Uji kebocoran	27
3.5.2. Uji coba kondisi optimal.....	28
3.5.3. Pengambilan data	28
3.6. Metode Pengolahan Data.....	29
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1. Uji Kinerja Reaktor Plasma.....	31
4.2. Pengaruh Waktu Operasi Reaktor terhadap Konversi Metana.....	33
4.3. Pengaruh Tegangan Reaktor terhadap Konversi Metana	36
4.4. Pengaruh Panjang Reaktor terhadap Konversi Metana.....	38
4.5. Laju Reaksi Dekomposisi Metana.....	39
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	43
5.1. Kesimpulan.....	43
5.2. Saran.....	43
DAFTAR PUSTAKA.....	45

DAFTAR GAMBAR

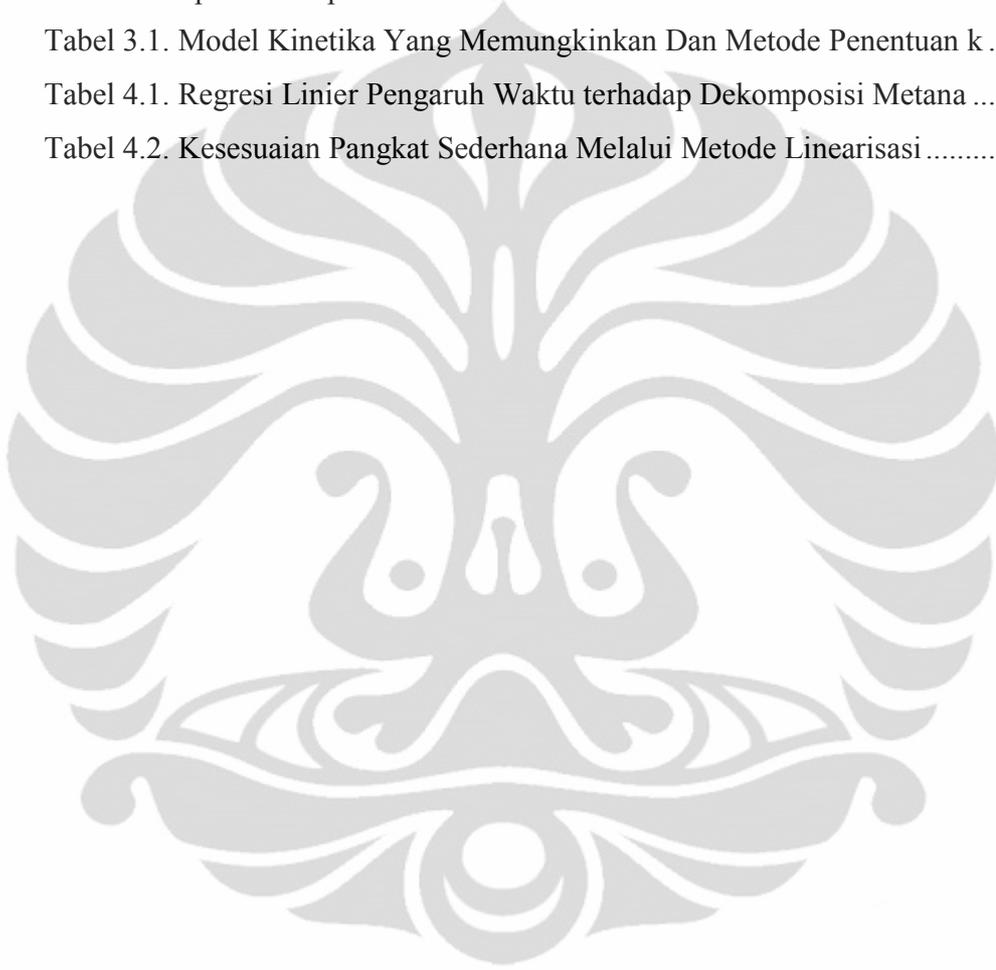
Gambar 2.1. Skema Pembangkitan Plasma DBD	6
Gambar 2.2. Pengaruh Laju Alir dan tegangan Terhadap Konversi Metana	9
Gambar 2.3. Pengaruh Tegangan terhadap Selektivitas C_2H_n	10
Gambar 2.4. Pengaruh Tegangan terhadap Selektivitas Produk pada Konversi dengan Oksigen.....	10
Gambar 2.5. Pengaruh Komposisi Oksigen terhadap Selektivitas Produk	11
Gambar 2.6. Densitas Elektron Spasial Konversi Metana (10 kV, 10 kHz)	14
Gambar 2.7. Densitas Molekul Spasial sebagai Fungsi Waktu Tinggal (10 kV, 10 kHz).....	15
Gambar 2.8. Densitas Molekul Spasial sebagai Fungsi Waktu Tinggal pada Dua Nilai Frekuensi	16
Gambar 2.9. Ilustrasi Linierisasi Reaksi Orde 0.....	17
Gambar 2.10. Ilustrasi Linierisasi Reaksi Orde 1.....	18
Gambar 2.11. Ilustrasi Linierisasi Reaksi Orde 2.....	19
Gambar 3.1. Diagram Alir Tahapan Penelitian.....	20
Gambar 3. 2. Diagram Reaktor	22
Gambar 3.3. Rangkaian Sistem Konversi Metana Nonoksidatif Dalam Reaktor DBD	26
Gambar 4.1. Hubungan Waktu dan Tegangan terhadap Konversi Metana pada Reaktor 83,1 cc.....	34
Gambar 4.2. Hubungan Waktu dan Tegangan terhadap Konversi Metana pada Reaktor 55,4 cc.....	35
Gambar 4.3. Hubungan Waktu dan Tegangan terhadap Konversi Metana pada Reaktor 27,7 cc.....	35
Gambar 4. 4. Pengaruh Tegangan Primer terhadap Daya Reaktor	37
Gambar 4.5. Hubungan Tegangan Reaktor terhadap Konversi Metana.....	37

Gambar 4.6. Hubungan Panjang Reaktor terhadap Konversi Metana pada Tegangan
5,5 kV38



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Pembagian Plasma Berdasarkan Suhu dan Kondisi Equilibrium	5
Tabel 2.2. Spesi Aktif pada Konversi Metana dalam Plasma	12
Tabel 3.1. Model Kinetika Yang Memungkinkan Dan Metode Penentuan k	30
Tabel 4.1. Regresi Linier Pengaruh Waktu terhadap Dekomposisi Metana	36
Tabel 4.2. Kesesuaian Pangkat Sederhana Melalui Metode Linearisasi	41



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Penggunaan gas alam sebagai bahan baku dalam industri kimia dan farmasi merupakan salah satu alternatif untuk menggantikan minyak bumi yang persediaannya terus menurun. Metana (CH_4), komponen utama dari gas alam terdistribusi secara meluas di Indonesia (Indarto, et. al., 2007). Berdasarkan data dari kementerian ESDM Indonesia tahun 2009, rasio cadangan per produksi gas alam Indonesia adalah 59 tahun, dibandingkan dengan minyak bumi yang hanya 24 tahun. Perkiraan ini sudah termasuk skenario diversifikasi tahun 2025 yang menunjukkan penurunan komposisi penggunaan minyak bumi menjadi 20% dan peningkatan komposisi penggunaan gas alam menjadi 30% (Indartono, 2009). Cadangan gas alam tersebut memiliki potensi yang sesuai untuk dikonversi menjadi produk-produk *precursor* dengan nilai yang lebih tinggi, seperti gas asetilena dan etilena.

Secara umum, terdapat tiga pendekatan untuk mengkonversi metana menjadi rantai hidrokarbon yang lebih panjang melalui proses dengan temperatur tinggi, yaitu oksidasi metana secara langsung (OMC/*Oxidative Methane Conversion*), proses konversi dengan reaksi Fischer-Tropsch dengan bahan baku gas sintesis, dan konversi metana nonoksidatif (Gradassi and Green, 1995). Dalam beberapa dekade terakhir, banyak peneliti menekuni proses yang melibatkan oksigen, baik secara tidak langsung melalui proses Fischer-Tropsch maupun secara langsung melalui proses OMC. Dalam proses Fischer-Tropsch, metana dikonversi menjadi hidrokarbon dengan rantai yang lebih panjang, diawali dengan proses oksidasi parsial pembentukan gas sintesis yang kemudian dihidrogenasi (Bell, 1984). Dengan adanya kehadiran oksigen, konversi metana secara langsung menjadi etilena, asetilen, C_3H_n , dan C_4H_n memungkinkan secara termodinamika dan reaksinya bersifat eksotermik. Sementara itu, konversi metana dehidrogenatif tanpa oksigen melalui polimerisasi dua tahap bersifat endotermik. OMC merupakan proses yang paling sering digunakan karena konversi metana yang lebih besar meskipun selektivitas produksi C_{2+} masih rendah. Konversi

metana tanpa oksigen hanya dipelajari oleh sedikit peneliti. Kekurangan dari OMC adalah rendahnya selektivitas C_{2+} . Hal ini disebabkan terjadinya oksidasi metana dalam jumlah yang cukup besar menjadi CO dan CO_2 .

Konversi metana oksidatif juga telah dilakukan beberapa peneliti dengan campuran CO_2 dalam reaktor plasma (Chae, et. al., 2000; Istadi and Amin, 2007; Kim, et. al., 2009). Produk utama yang diperoleh adalah C_{2+} dan gas sintesis. CO_2 digunakan dengan tujuan utama mengurangi gas rumah kaca. Kestabilan CO_2 membuat konversi secara termal sangat tidak menguntungkan. Konversi secara termal masih kecil dan baru terjadi di atas $800^\circ C$.

Konversi metana secara nonoksidatif melalui proses termal menghasilkan sejumlah karbon padat dan hidrogen yang cukup besar dibandingkan jumlah produksi C_{2+} . Pembentukan hidrokarbon rantai panjang melalui penggabungan gugus metil kecil kemungkinannya dan hanya terjadi pada temperatur reaksi yang tinggi. (Indarto, et. al., 2006)

Konversi metana nonoksidatif dengan plasma memberikan selektivitas produk C_{2+} yang tinggi (Indarto, et. al., 2006 and Yang, 2003). Proses difokuskan pada konversi metana tanpa oksigen untuk menjaga selektivitas C_{2+} yang tinggi. Kehadiran plasma berperan dalam meningkatkan aktivitas electron sehingga dapat meningkatkan konversi metana dan *yield* C_{2+} . Optimisasi proses konversi metana nonoksidatif dengan plasma memerlukan penjelasan lebih rinci mengenai reaksi fasa gas yang terjadi dalam zona plasma beserta kinetiknya.

Reaktor yang akan digunakan adalah reaktor plasma nontermal *dielectric barrier discharge* (DBD) yang plasmanya bersifat nonequilibrium. Dalam industri sangat penting untuk mengkonstruksi peralatan yang sederhana, tidak memerlukan dinding yang tahan tekanan tinggi, mudah diperbesar skalanya, dan dapat dijalankan secara kontinyu. Kelebihan ini dimiliki oleh plasma nontermal tekanan atmosfer (d'Agostino, et. al., 2008). Plasma DBD memiliki kelebihan ini dan konstruksi paling sederhana sehingga memudahkan untuk perawatan. Oleh karena itu, studi konversi metana dalam reaktor DBD perlu ditingkatkan mengingat potensi DBD dalam industri namun konversinya masih rendah dibanding plasma quasi-equilibrium.

Kelebihan plasma non-termal non-equilibrium adalah dapat mencapai suhu yang tidak terlalu tinggi diiringi dengan munculnya banyak jenis spesies aktif di dalamnya dalam jumlah yang besar. Zat yang dihasilkan dan mekanisme reaksi yang terjadi pada plasma non-termal non-equilibrium juga berbeda dari plasma equilibrium. Kelebihan lain dari jenis plasma ini adalah generatornya berukuran lebih kecil dan lebih ringan. (Zhukov, et. al., 1990 and Ardelyan, et. al., 2008)

Pada penelitian ini, akan disusun model kinetika proses konversi metana menjadi hidrokarbon rantai panjang dalam reaktor plasma. Dengan penentuan mekanisme reaksi dan konstanta laju reaksi, karakteristik kinetika reaksi dapat diamati dengan lebih mudah melalui grafik yang dibentuk. Reaktor akan dioperasikan pada tekanan atmosfer dan suhu ruangan. Model kinetika yang dihasilkan diharapkan dapat menjadi dasar dalam penentuan kondisi optimal dalam pengoperasian reaktor serta dasar dalam menentukan metode pengendalian reaktor.

1.2. Perumusan Masalah

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

1. Bagaimana kinerja proses dekomposisi metana dalam reaktor plasma DBD?
2. Apakah pendekatan reaksi elementer sesuai untuk model kinetika reaksi global dekomposisi metana tersebut?

1.3. Tujuan Penelitian

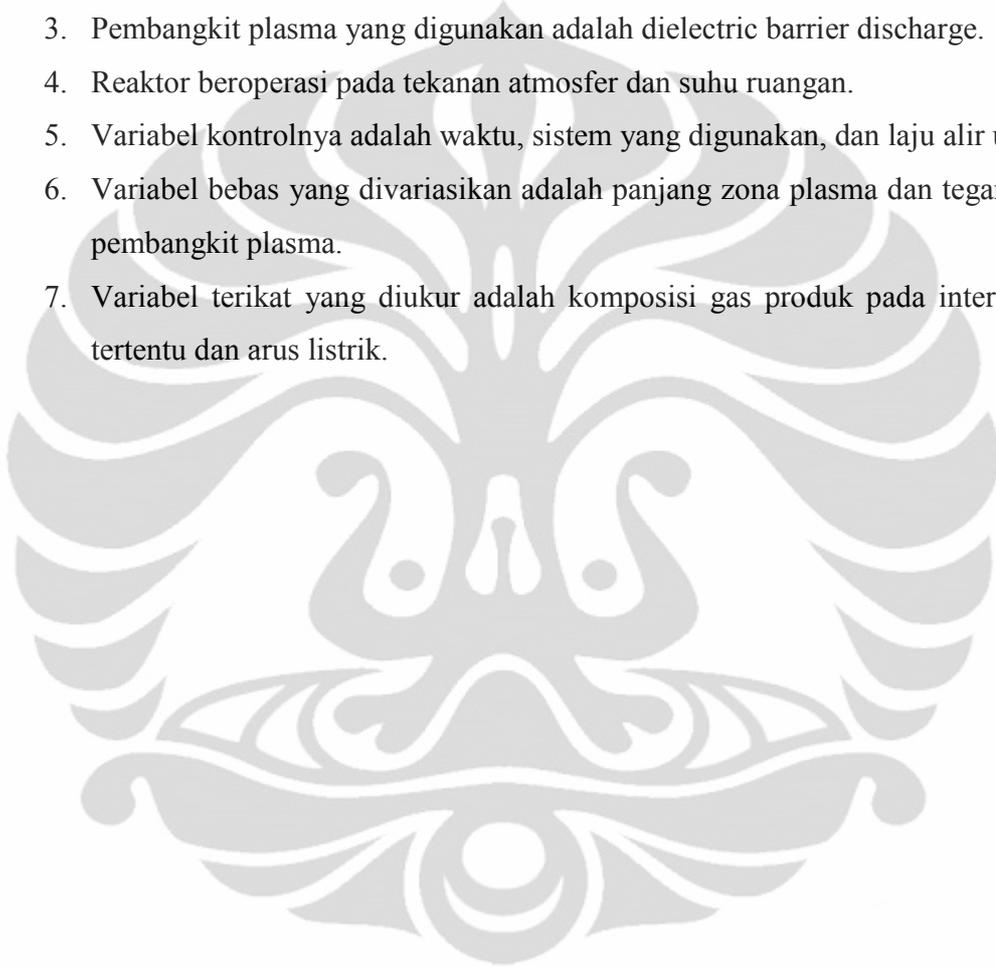
Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui kinerja reaktor plasma untuk dekomposisi metana.
2. Mengetahui kesesuaian pendekatan reaksi elementer untuk model kinetika dekomposisi dalam reaktor DBD.

1.4. Batasan Masalah

Pada penelitian ini yang permasalahan dibatasi sebagai berikut :

1. Gas yang digunakan adalah metana.
2. Reaktor yang digunakan adalah reaktor three pass.
3. Pembangkit plasma yang digunakan adalah dielectric barrier discharge.
4. Reaktor beroperasi pada tekanan atmosfer dan suhu ruangan.
5. Variabel kontrolnya adalah waktu, sistem yang digunakan, dan laju alir umpan.
6. Variabel bebas yang divariasikan adalah panjang zona plasma dan tegangan pada pembangkit plasma.
7. Variabel terikat yang diukur adalah komposisi gas produk pada interval waktu tertentu dan arus listrik.



BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Plasma Dielectric Barrier Discharge

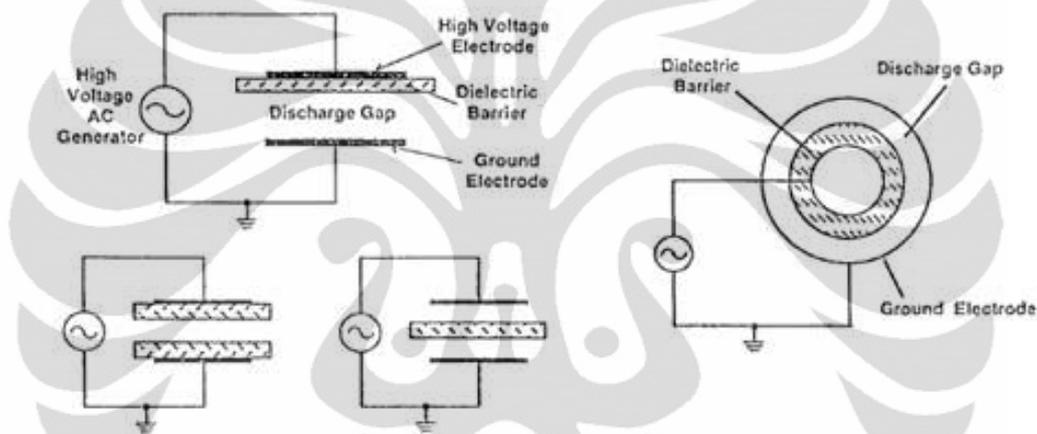
Plasma nontermal memiliki sifat densitas energi lebih rendah, terdapat perbedaan suhu besar antara elektron dan partikel yang lebih berat. Elektron dengan energi yang cukup bertumbukan dengan gas latar (*background*) menghasilkan disosiasi, eksitasi dan ionisasi tingkat rendah tanpa peningkatan entalpi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

Tabel 2.1. Pembagian Plasma Berdasarkan Suhu dan Kondisi Equilibrium

Plasma	Keadaan	Contoh
Plasma temperatur tinggi (equilibrium plasma)	$T_e = T_i = T_h, T_p = 10^6 - 10^8 \text{ K}$ $n_e \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}$	Laser fusion plasma
Plasma temperatur rendah (quasi-equilibrium plasma)	$T_e \approx T_i \approx T_h, T_p = 2 \times 10^3 - 3 \times 10^4 \text{ K}$ $n_e \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}$	Arc plasma, RF discharge
Plasma nontermal (non-equilibrium plasma)	$T_e \geq T_h, T_p \approx 3 \times 10^2 - 4 \times 10^2 \text{ K}$ $n_e \approx 10^{10} \text{ m}^{-3}$	Corona, microwave, glow, DBD

Dielectric barrier discharge, yang beroperasi pada tekanan 0,1 – 10 bar merupakan jenis lucutan plasma AC. DBD dihasilkan di antara dua elektroda yang terdapat penghalang (dinding) dielektrik di antaranya. Plasma DBD dapat dipertahankan pada tegangan 1-100 kV dengan frekuensi 50 Hz – 1 MHz. Arus listrik

dihalangi oleh dielektrik biasanya berupa kaca borosilikat atau kuarsa. Pembawa muatan berhenti di permukaan dielektrik sehingga menghasilkan medan listrik eksternal. Kerapatan arus pada filament berkisar antara $100 - 1000 \text{ A.cm}^{-2}$, kerapatan elektronnya $10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, dan energi elektron $1-10 \text{ eV}$. Aplikasi kimia DBD antara lain untuk memompa laser CO_2 , produksi methanol dari campuran metana/oksigen, produksi ozon, remediasi gas buang, dan gasifikasi. DBD menjadi pilihan untuk mengoperasikan plasma nontermal pada tekanan atmosfer dan mudah di-scale-up. (Conrads and Schmidt, 1999)



Gambar 2.1. Skema Pembangkitan Plasma DBD

(Conrads and Schmidt, 1999)

2.2. Konversi Metana dalam Reaktor Plasma

Penelitian yang mengobservasi konversi metana murni dalam reaktor plasma telah dilakukan beberapa kali, antara lain sebagai berikut:

1. Deteksi radikal pada plasma gas metana (Kang and Dose, 2003)

Deteksi radikal dengan menggunakan spektrometri massa kuadropol dan analisis Bayesian dapat menghasilkan model yang sesuai untuk molekul dan radikal H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , H , CH_3 , dan C_2H_5 .

2. Studi mekanisme reaksi dan kondisi transisi konversi metana menjadi C_2 dalam plasma (Wang, et. al., 2007)

Studi ini menghasilkan sifat termodinamika mekanisme reaksi metana menjadi C_2 . Selain itu, juga diperoleh nilai energi aktivasi masing-masing reaksi tunggal serta pengaruh panjang ikatan spesi dan geometri terhadap energi potensial sistem.

3. Konversi metana dengan plasma quasi-equilibrium

- a) Pemodelan kinetika konversi metana dalam reaktor gliding arc plasma (Indarto, et. al., 2005)

Konversi maksimum sebesar 50% diperoleh pada laju alir 1 l/menit, 20 kHz. Diamati bahwa semakin tinggi frekuensi dan semakin rendah laju alir metana maka semakin besar konversinya. Produk utama berupa karbon, hidrogen, dan asetilena. Suhu produk meningkat menjadi 30 – 50°C, suhu reaksi eksotermik berkontribusi sebesar 70 – 80% terhadap peningkatan suhu dan sisanya karena daya listrik yang masuk.

- b) Penggabungan metana dalam reaktor plasma frekuensi radio (Liu and Lei, 2001)

Penelitian ini menggunakan generator plasma frekuensi 13.56 MHz. Produk utama dari proses ini adalah asetilena, etilena, dan etana. Saat oksigen dimasukkan pada rasio molar yang sesuai, selektivitas C_2 meningkat.

- c) Penggabungan metana dengan plasma elektroda rotary multidentate helix (Wang, et. al., 2005)

Kondisi terbaik dengan konversi metana 70.46%, yield C_2 69.85%, selektivitas C_2 99.14% tanpa dihasilkan coke diperoleh pada tegangan 2300 V.

4. Konversi metana dengan plasma non-equilibrium

- a) Konversi metana dengan plasma gelombang mikro (Kovacs, et. al., 2010)

Produk utama dari konversi metana berupa etana, etilena, dan asetilena. Model kinetika dan kesetimbangan termodinamika proses tersebut

disimulasikan. Kinetika reaksi berhasil dimodelkan secara akurat, tetapi model termodinamika hanya sesuai untuk suhu di atas 2000 K.

- b) Konversi metana dengan glow discharge (Hu and Chen, 2007; Tanabe, et. al., 1999)

Konversi metana dipengaruhi oleh arus listrik dan konsentrasi metana. Pembentukan C_2 mengikuti mekanisme reaksi rantai radikal. Yield terbesar yang diperoleh sebesar 15.2% C_2 .

- c) Konversi metana dalam reaktor DBD AC (Savadkouei, et. al., 2007)

Dari penelitian ini diperoleh produk utama C_2 dan methanol. Konversi meningkat dengan meningkatnya waktu tinggal dan tegangan tidak mempengaruhi selektivitas. Campuran helium tidak memiliki pengaruh terhadap konversi dan selektivitas. Sementara itu, campuran oksigen dapat meningkatkan konversi metana.

- d) Model fluida dua dimensi plasma metana dalam reaktor DBD (Debie, et. al., 2006)

Penelitian ini menghasilkan model fluida dua dimensi untuk optimasi konversi metana menjadi hidrokarbon rantai panjang. Selain itu, juga diamati pengaruh beberapa parameter plasma terhadap profil densitas dikaitkan dengan yield, dan selektivitas.

- e) Model kinetika konversi metana dalam reaktor DBD (Indarto, et. al., 2007)

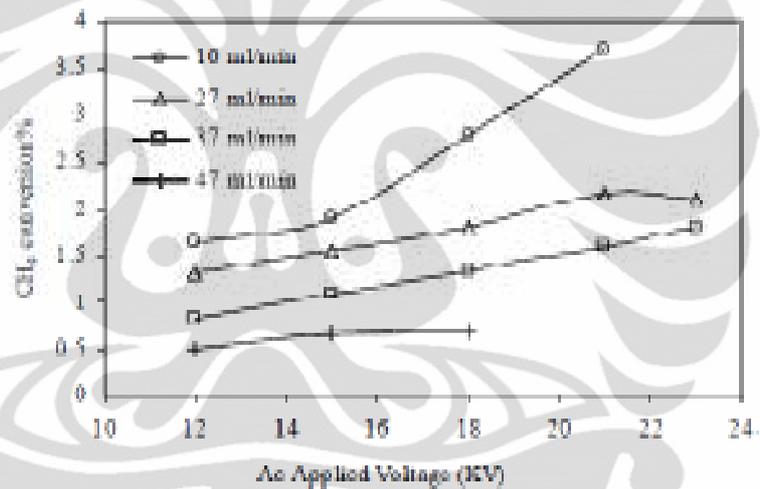
Dengan daya 60 W, laju 30 ml/menit dihasilkan konversi metana 13.8%. Dari penelitian ini disimpulkan bahwa etilena memegang peranan penting pada mekanisme reaksi global.

2.2.1. Pengaruh tegangan dan laju alir

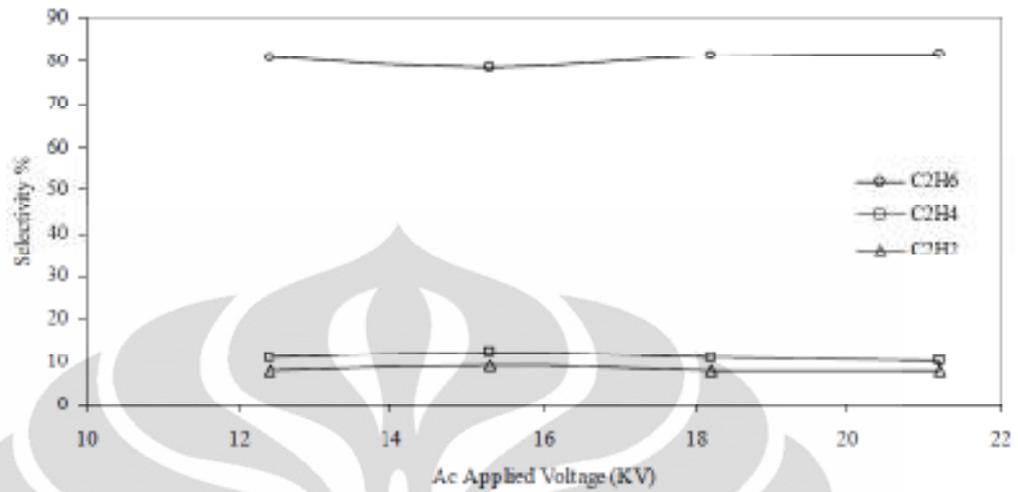
Konversi metana dalam reaktor plasma baik dengan atau tanpa kehadiran oksigen telah diobservasi. Pembangkit plasma yang digunakan adalah jenis nontermal gelombang mikro dan *dielectric barrier discharge*. Pembahasan berikut ini akan difokuskan pada konversi metana dalam reaktor *dielectric barrier discharge*.

Hasil penelitian Savadkouei et. al. (2007) mengenai konversi metana dalam reaktor DBD dapat diamati pada keempat grafik berikut ini. Berdasarkan hasil tersebut diketahui bahwa:

- Konversi metana terus meningkat dengan meningkatnya tegangan plasma
- Selektivitas etana paling besar dibandingkan produk C_{2+} lainnya.
- Pada konversi dengan oksigen, selektivitas metanol paling besar dibandingkan dengan produk lainnya.
- Pada konversi dengan oksigen, tegangan optimal sebesar 15 kV dan rasio O_2/CH_4 optimal sebesar 0,05.

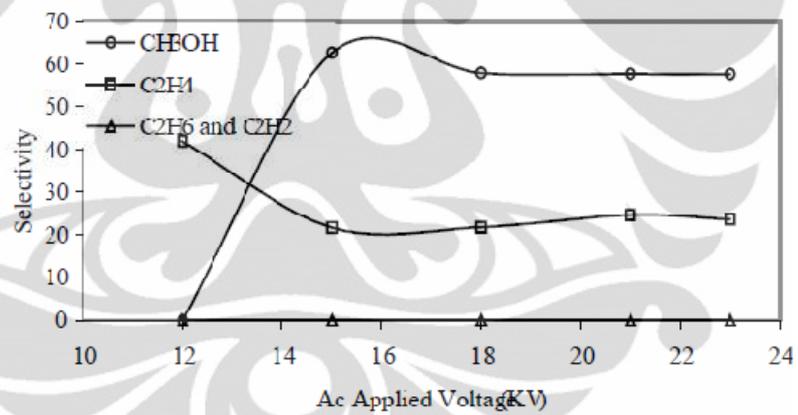


Gambar 2.2. Pengaruh Laju Alir dan tegangan Terhadap Konversi Metana
(Savadkouei et. al., 2007)



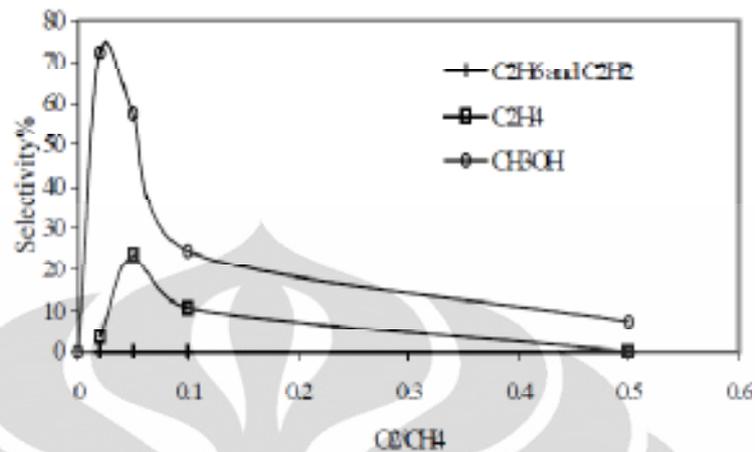
Gambar 2.3. Pengaruh Tegangan terhadap Selektivitas C₂H_n

(Savadkouei et. al., 2007)



Gambar 2.4. Pengaruh Tegangan terhadap Selektivitas Produk pada Konversi dengan Oksigen

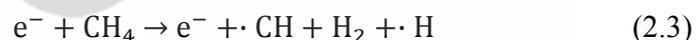
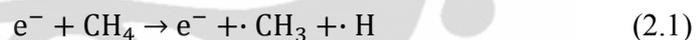
(Savadkouei et. al., 2007)



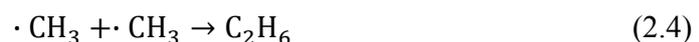
Gambar 2.5. Pengaruh Komposisi Oksigen terhadap Selektivitas Produk
(Savadkouei et. al., 2007)

2.2.2. Mekanisme reaksi konversi metana non-oksidatif

Kinetika reaksi konversi metana pernah dipelajari oleh Indarto, et. al. (2007) pada reaktor 1-pass dan pemodelan fluidanya pernah dipelajari oleh De Bie, et. al. (2006). Mekanisme reaksi konversi metana diawali oleh efek disosiasi yang ditimbulkan oleh elektron metana yang menyebabkan terjadinya pembentukan radikal. Radikal tersebut akan bereaksi membentuk hidrokarbon yang lebih panjang (De Bie, et. al., 2006).



Radikal yang memiliki peranan paling penting adalah radikal metil. Radikal metil inilah yang akan bergabung dengan radikal atau molekul lain sehingga menghasilkan hidrokarbon yang lebih panjang.



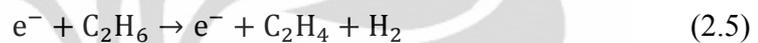
Dalam konteks konversi metana menjadi karbon rantai 2 dan 3 saja, terdapat 33 spesies aktif yang

Tabel 2.2. Spesi Aktif pada Konversi Metana dalam Plasma

Molekul	Ion	Radikal
CH ₄	CH ₅ ⁺ , CH ₄ ⁺ , CH ₃ ⁺ , CH ₂ ⁺ , CH ⁺ , C ⁺	CH ₃ , CH ₂ , CH, C
C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ , C ₃ H ₈ ,	C ₂ H ₆ ⁺ , C ₂ H ₅ ⁺ , C ₂ H ₄ ⁺ , C ₂ H ₃ ⁺ , C ₂ H ₂ ⁺ , C ₂ H ⁺ , C ₂ ⁺ ,	C ₂ H ₅ , C ₂ H ₃ , C ₂ H, C ₂ , C ₃ H ₇
H ₂	H ₃ ⁺ , H ₂ ⁺ , H ⁺	H

Sumber: De Bie, et. al., 2006

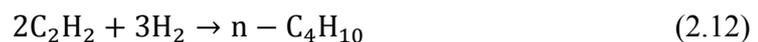
Efek disosiasi oleh elektron etana memicu pembentukan etilena dan asetilena.



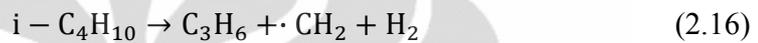
Sementara itu, propana dihasilkan dari rekombinasi radikal etil dan metil (De Bie, et. al., 2006).



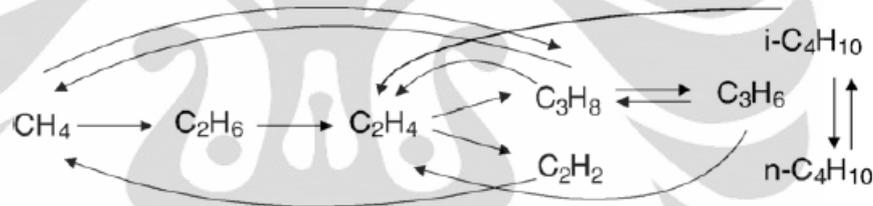
Asetilen sebagai salah satu produk yang paling diharapkan, tetapi tidak stabil, berpotensi terurai kembali atau mengalami rekombinasi jika waktu tinggal atau energi terlalu besar.



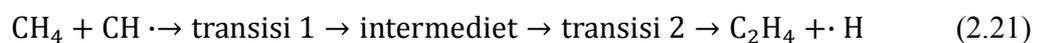
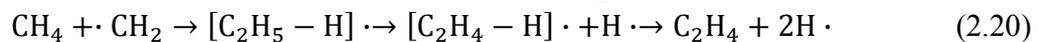
Spesi C_3H_6 dapat terbentuk dan terurai melalui reaksi berikut ini (Indarto, et. al., 2007).



Secara ringkas, rute reaksi konversi CH_4 dijelaskan pada mekanisme berikut (Indarto, et. al., 2007):



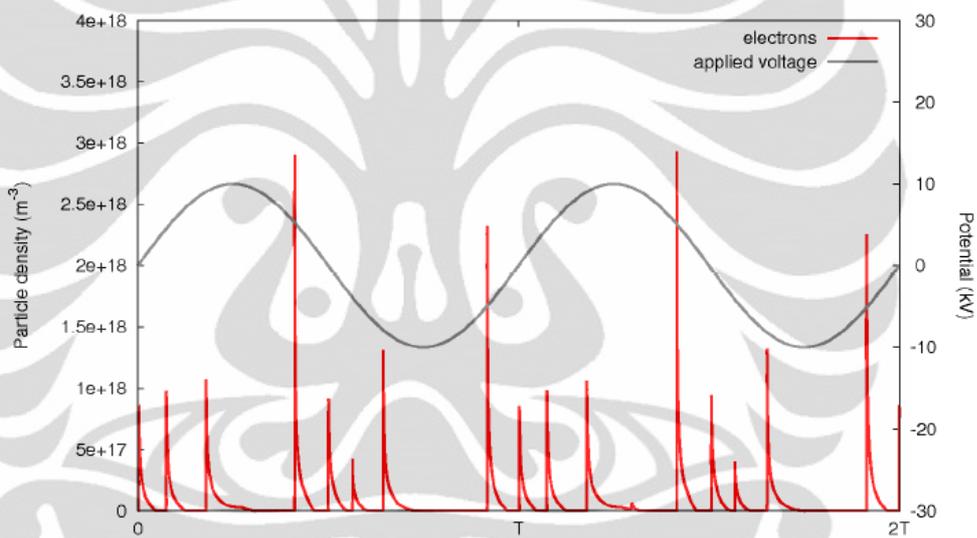
Penelitian konversi metana yang dilakukan Savadkouei, et. al. (2007), Indarto, et. al. (2007), dan De Bie, et. al. (2006) membuktikan bahwa C_2 merupakan produk paling dominan dalam proses dengan reaktor DBD. Wang, et. al. (2007) melakukan studi penggabungan metana dalam plasma dan mengusulkan mekanisme berikut:



Analisis kondisi transisi mengindikasikan bahwa terdapat satu kondisi transisi pada reaksi 1 dan 2, dan dua kondisi transisi pada reaksi 4. Selain itu, juga diindikasikan bahwa reaksi 3 merupakan reaksi konsekutif yang terdiri dari dua reaksi elementer dengan masing-masing satu kondisi transisi. Reaksi 2 dan 4 bersifat

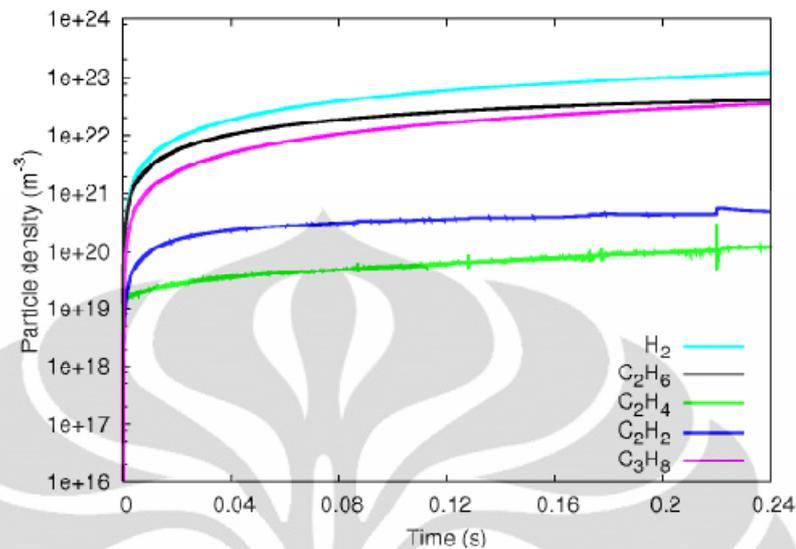
eksotermik, reaksi 1 dan 3 bersifat endotermik. Energi aktivasi reaksi 2 paling rendah di antara yang lain. Energi aktivasi reaksi elementer kedua dari reaksi 3 adalah yang paling tinggi. Kondisi transisi utama pada reaksi 4 memiliki energi aktivasi yang juga tinggi. Oleh karena itu, reaksi 2 paling mudah terjadi sedangkan reaksi 3 dan 4 sulit terjadi. Pelepasan dan pembentukan ikatan kimia terjadi secara bertahap dan kontinyu melalui reaksi 1. Transfer hidrogen terjadi setelah pembentukan ikatan C – C pada reaksi 2. (Wang, et. al., 2007)

2.2.3. Pengaruh tegangan dan frekuensi terhadap densitas spesi



Gambar 2.6. Densitas Elektron Spasial Konversi Metana (10 kV, 10 kHz)

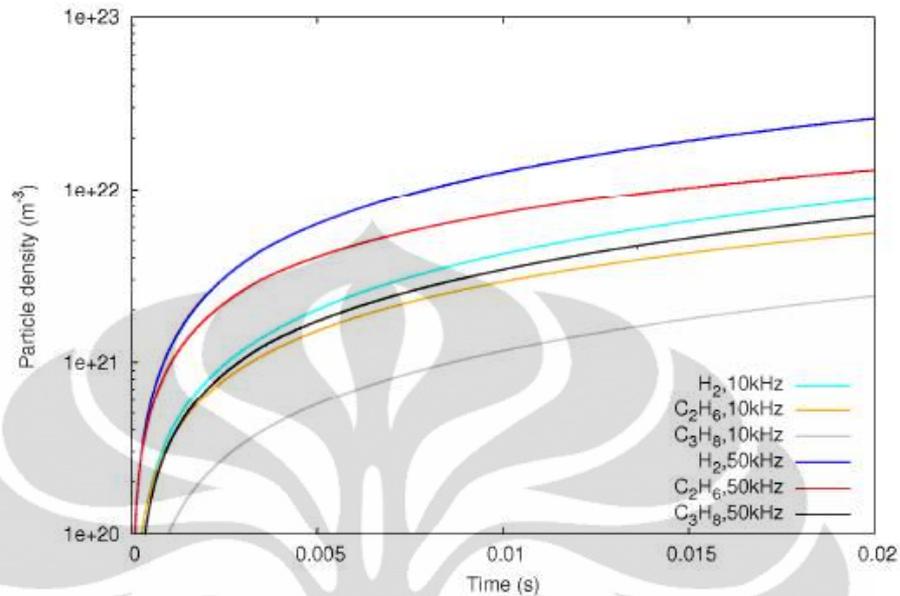
Gambar tersebut menunjukkan densitas elektron spasial rata-rata dengan tegangan yang diberikan selama waktu dua kali periode. Gambar tersebut menunjukkan terjadinya pemecahan gas setiap setengah periode. Perbedaan profil densitas pada kutub positif dan negatif disebabkan perbedaan dimensi permukaan elektroda luar dan dalam.



Gambar 2.7. Densitas Molekul Spasial sebagai Fungsi Waktu Tinggal (10 kV, 10 kHz)

Profil periodik ini juga tampak pada radikal. Namun, pada radikal terdapat kenaikan dan penurunan yang cukup ekstrim. Setelah beberapa waktu, densitas spesi ini akan mencapai kejenuhan yang hanya terjadi secara periodik. Sementara profil densitas molekul menunjukkan peningkatan yang tidak bergantung pada tegangan yang digunakan (Gambar 2.7.). Beberapa molekul tampak pada densitas yang tinggi dan menjadi produk akhir dalam waktu kurang dari 1 detik.

Ketika frekuensi (Gambar 2.8.) ditingkatkan, densitas elektron spasial tidak berubah banyak. Namun, terjadi lebih banyak ignisi pada waktu yang sama sehingga densitas spasial radikal metal tidak memiliki cukup waktu untuk turun banyak. Hal ini menyebabkan disosiasi metana yang lebih tinggi pada interval waktu yang sama sehingga densitas radikal CH₃, CH₂, CH, dan H yang lebih tinggi mempengaruhi densitas molekul seperti pada gambar. Ketika tegangan ditingkatkan, densitas radikal juga mengalami peningkatan sehingga mempengaruhi densitas molekul pula.



Gambar 2.8. Densitas Molekul Spasial sebagai Fungsi Waktu Tinggal pada Dua Nilai Frekuensi

2.3. Kinetika Reaksi Elementer

Reaksi elementer adalah reaksi yang hanya terdiri dari satu tahap. Reaksi elementer dapat melibatkan satu atau lebih reaktan. Laju reaksi elementer secara umum dapat dinyatakan dengan model pangkat sederhana. Pada reaksi unimolekular, reaktan A terdisosiasi atau terisomerisasi menghasilkan produk.



Persamaan laju reaksi merupakan persamaan diferensial yang dapat diintegrasikan untuk memperoleh persamaan aljabar yang menghubungkan konsentrasi reaktan atau produk terhadap waktu. Pengaruh konsentrasi masing-masing zat dinyatakan dengan orde (pangkat).

2.3.1. Reaksi orde nol

Reaksi orde nol memiliki laju yang tidak bergantung kepada konsentrasi reaktan. Peningkatan atau penurunan konsentrasi tidak akan mempercepat ataupun memperlambat reaksi. Bila reaksi orde nol terjadi pada sistem yang tertutup, tidak

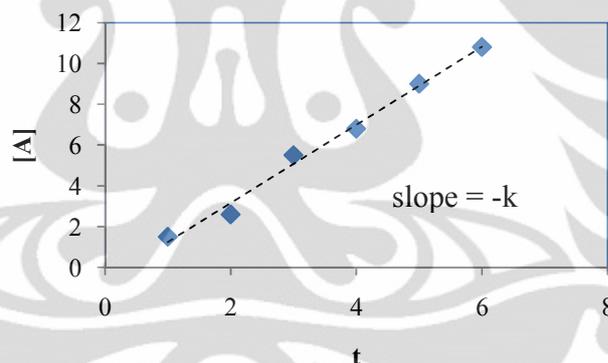
terdapat zat antara, dan tidak terjadi reaksi lain, maka laju reaksi dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$-\frac{d[A]}{dt} = k \quad (2.23)$$

Bila persamaan tersebut diintegrasikan maka diperoleh persamaan aljabar sebagai berikut.

$$[A]_t = -kt + [A]_0 \quad (2.24)$$

Dari persamaan tersebut, maka nilai konstanta laju reaksi dapat diperoleh dari kemiringan grafik linier dengan waktu sebagai sumbu x dan konsentrasi reaktan sebagai sumbu y.



Gambar 2.9. Ilustrasi Linierisasi Reaksi Orde 0

2.3.2. Reaksi orde satu

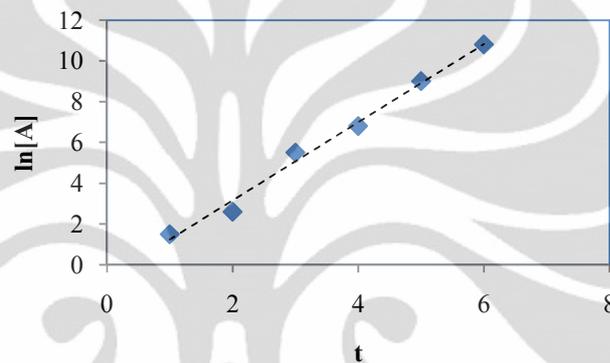
Reaksi orde satu hanya dipengaruhi oleh satu reaktan (reaksi unimolekuler). Reaktan lain bisa saja terlibat, tetapi ordenya nol. Laju reaksi untuk reaksi orde satu adalah sebagai berikut.

$$-\frac{d[A]}{dt} = k[A] \quad (2.25)$$

Apabila diintegrasikan maka akan diperoleh:

$$\ln[A]_t = -kt + \ln[A]_0 \quad (2.26)$$

Dari persamaan tersebut, maka nilai konstanta laju reaksi dapat diperoleh dari kemiringan grafik linier dengan waktu sebagai sumbu x dan nilai logaritma konsentrasi reaktan sebagai sumbu y.



Gambar 2.10. Ilustrasi Linierisasi Reaksi Orde 1

2.3.2. Reaksi orde dua

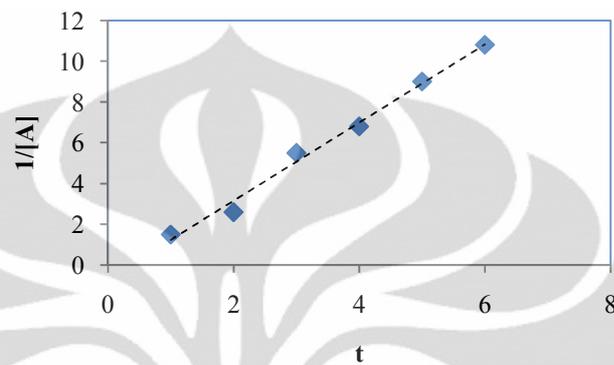
Reaksi orde dua terdiri dari satu reaktan dengan orde dua atau dengan dua reaktan yang masing-masing berorde satu. Laju reaksi untuk reaksi orde dua adalah sebagai berikut.

$$-\frac{d[A]}{dt} = k[A]^2 \quad (2.27)$$

Apabila diintegrasikan maka akan diperoleh:

$$\frac{1}{[A]_t} = -kt + \frac{1}{[A]_0} \quad (2.28)$$

Dari persamaan tersebut, maka nilai konstanta laju reaksi dapat diperoleh dari kemiringan grafik linier dengan waktu sebagai sumbu x dan $\frac{1}{[A]_t}$ sebagai sumbu y.



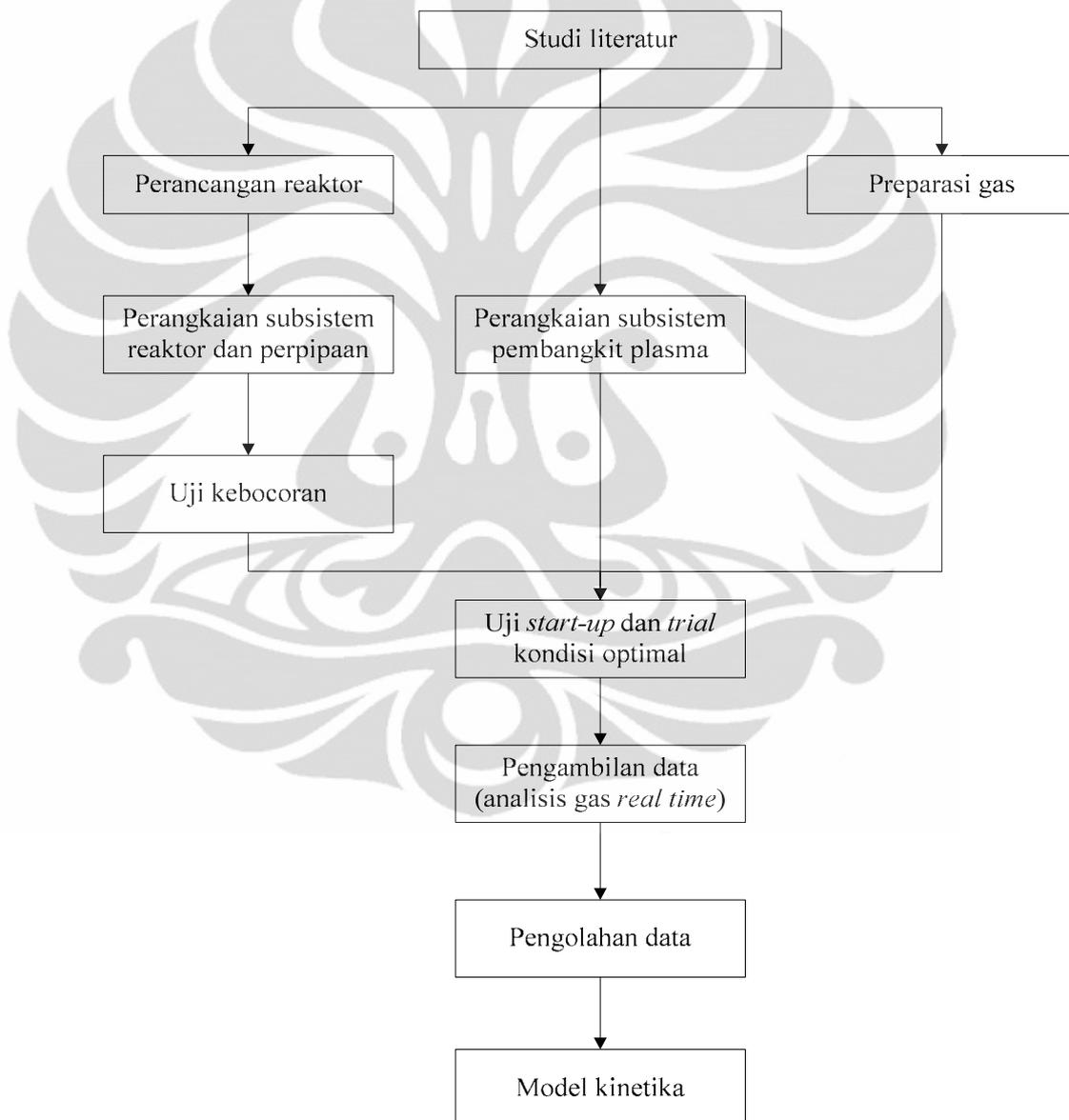
Gambar 2.11. Ilustrasi Linierisasi Reaksi Orde 2

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1. Tahapan Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:



Gambar 3.1. Diagram Alir Tahapan Penelitian

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

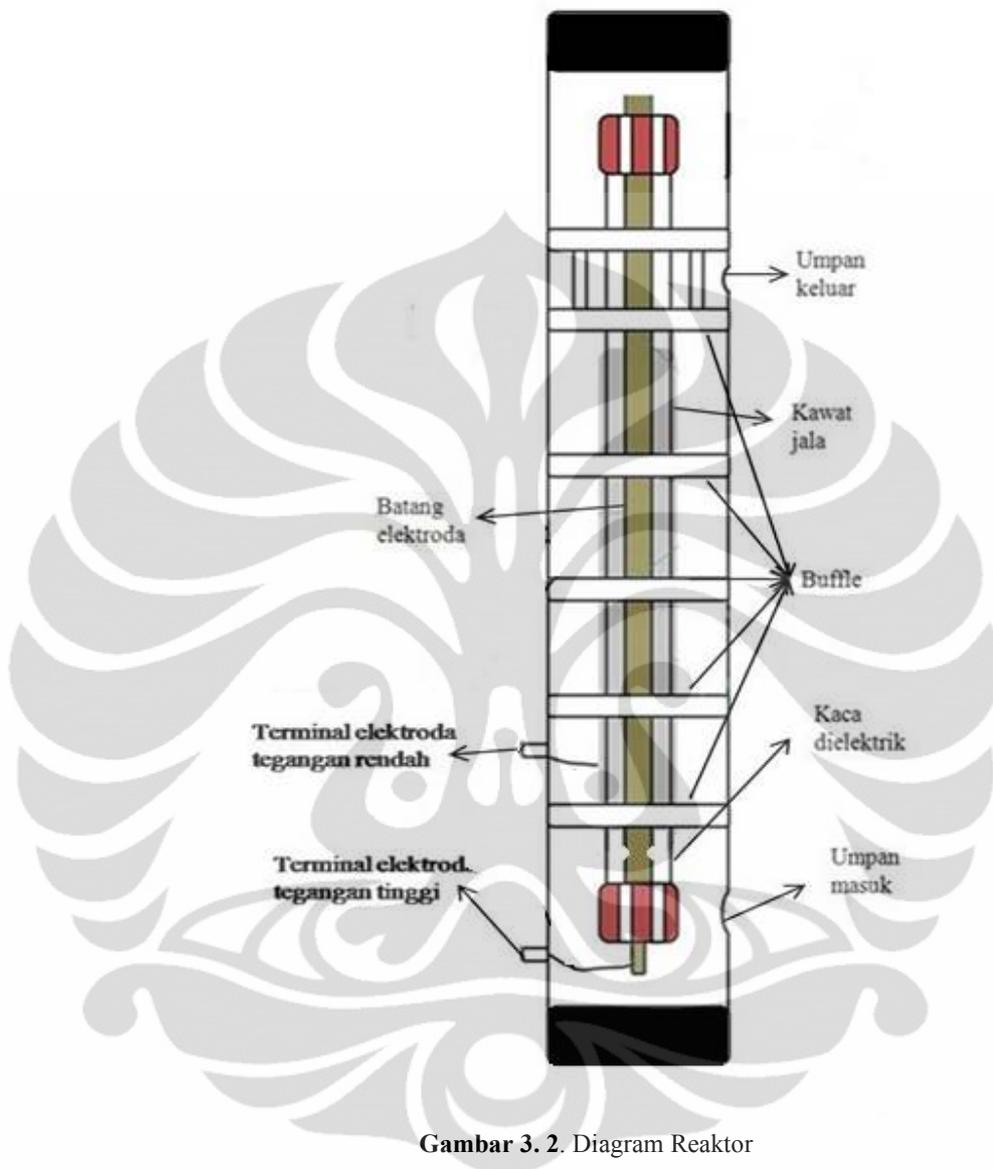
Tahap kedua adalah perancangan sistem gasifikasi yang terdiri dari perancangan reaktor dan sistem pembangkit medan plasma yang kemudian dirangkai menjadi satu sistem. Sementara itu dilakukan pula preparasi sampel gas metana. Setelah itu sistem gasifikator yang telah dirangkai diuji untuk mengetahui apakah rangkaian tersebut sudah bebas bocor dan memenuhi kondisi plasma yang diinginkan.

Tahap ketiga adalah uji variasi dan observasi kondisi optimal. Tahap ini dilakukan sebagai uji coba konversi metana. Dalam tahap ini akan ditentukan tegangan minimal dan maksimal untuk menentukan variasi. Kemudian ditentukan pula interval waktu pengambilan data sekecil mungkin menyesuaikan dengan kapasitas peralatan analisis.

Berikutnya adalah tahap pengambilan data. Pengaruh tegangan dan frekuensi terhadap kinetika reaksi diobservasi pada tahap ini. Tahap akhir adalah pengolahan data serta pembentukan model kinetika yang sesuai dengan hasil penelitian.

3.2. Rancangan Reaktor

Reaktor plasma yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.2. Reaktor ini merupakan pengembangan dari reaktor DBD *one-pass* seperti yang telah banyak diteliti untuk konversi metana. Zona berwarna abu-abu merupakan volume efektif dari reaktor, yaitu ruangan kosong di antara batang elektroda dan elektroda jala. Ruangan ini menjadi volume efektif reaktor karena pada zona inilah plasma akan muncul. Zona efektif tersebut adalah jalur terakhir yang dilalui oleh gas sebelum keluar sebagai produk.



Gambar 3. 2. Diagram Reaktor

1. Selongsong

- Fungsi : pendingin dan pelindung reaktor, tempat masuk umpan dan keluar produk
- Bahan : kaca borosilikat
- Tebal : 3 mm
- Diameter luar : 5 cm

- Tinggi : 18.5 cm, 27 cm, 35.5 cm
- Diameter umpan masuk : 5 mm
- Diameter umpan keluar : 5 mm

2. Kaca dielektrik

- Fungsi : meratakan distribusi plasma
- Bahan : kuarsa
- Tebal : 1 mm
- Diameter luar : 12 mm
- Tinggi : 14.5 cm, 21 cm, 31.5 cm

3. Batang elektroda

- Fungsi : elektroda tegangan tinggi
- Bahan : baja antikorosi (SS316)
- Tebal : 3 mm
- Diameter luar : 6.35 mm
- Tinggi : 15.5 cm, 22 cm, 32.5 cm

4. Kawat jala

- Fungsi : elektroda tegangan rendah (grounded)
- Bahan : baja antikorosi (SS304)
- Ukuran jala : 60 mesh
- Tinggi : 8.5 cm, 17 cm, 25.5 cm

5. Sekat (*Baffle*)

- Fungsi : optimisasi kontak gas sebagai pendingin reaktor
- Bahan : akrilik
- Diameter : 5 cm
- Diameter lubang : 2 mm
- Jumlah lubang : 8 lubang per sekat

- Posisi lubang : zig zag

3.3. Rangkaian Alat dan Spesifikasi

Peralatan dalam penelitian ini dirangkai seperti pada Gambar 3.3. Spesifikasi masing-masing alat adalah sebagai berikut:

1) Regulator tegangan

- Fungsi : mengatur besar tegangan primer
- Merk : Takayoshi
- Tipe : TDGC2 – 500 VA
- Kapasitas : 0.5 kVA
- Fase : 1 fase
- Frekuensi : 50 – 60 Hz
- Input : 220 V
- Output : 0 – 250 V

2) Amperemeter

- Fungsi : indikator arus listrik primer
- Merk : Heles
- Tipe : Class 2,5
- Skala maksimum : 500 mA

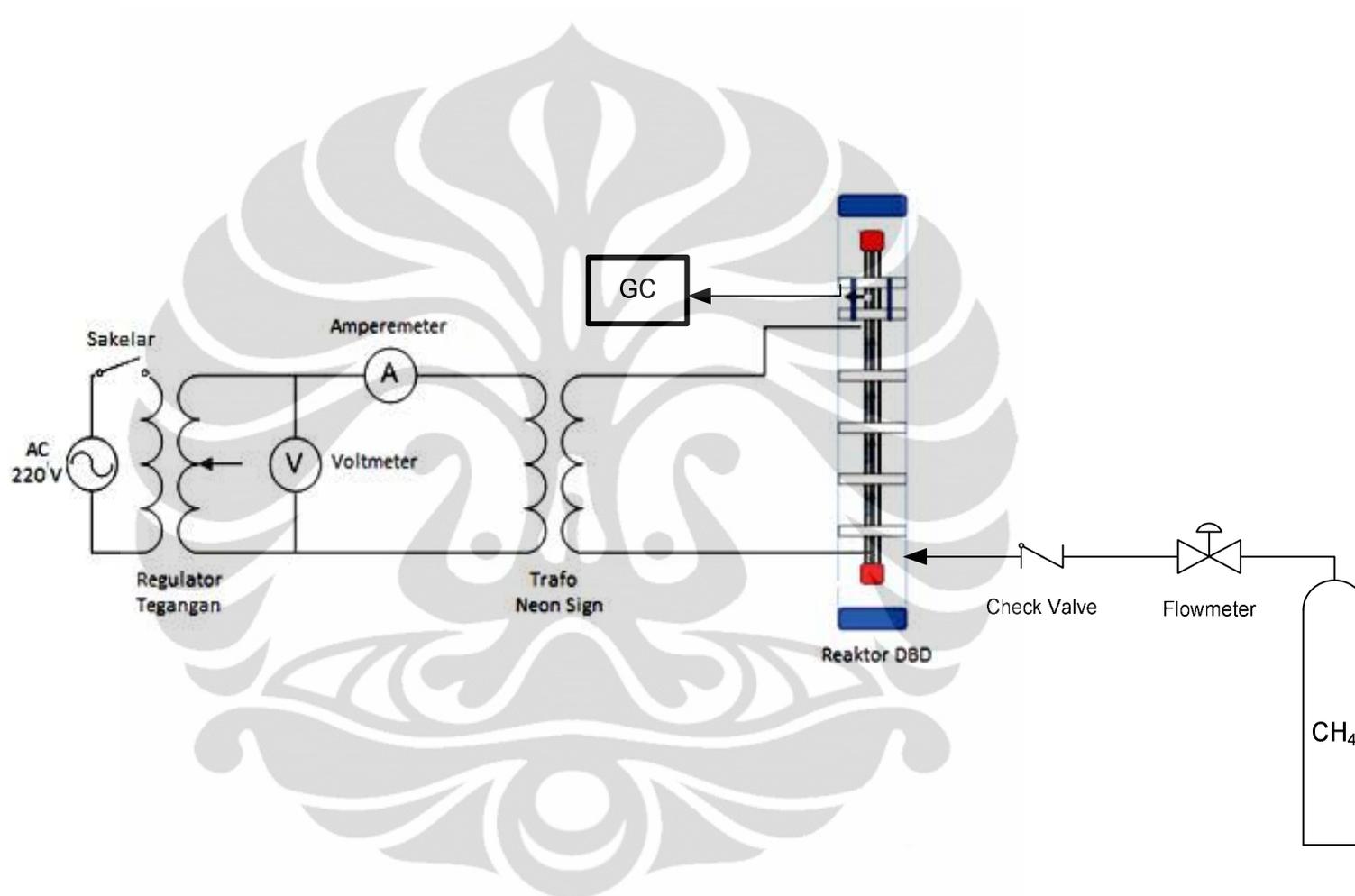
3) Voltmeter

- Fungsi : indikator tegangan primer
- Merk : Heles
- Tipe : Class 2,5
- Skala maksimum : 300 V

4) Transformator Neon Tubes

- Fungsi : transformator step – up (menaikkan tegangan)

- Merk : Standard Electric Works
 - Tipe : T – 1522
 - Frekuensi : 50 Hz
 - Tegangan primer : 220 V
 - Tegangan sekunder : 15000 V
 - Kapasitas : 450 VA
 - Arus : 2.25 A
 - MA : 30
- 5) Flowmeter
- Fungsi : indikator dan pengatur laju alir gas
 - Merk : Weike
 - Skala maksimum : 1.5 NL/menit udara 20°C
- 6) Kromatografi Gas
- Merk : Shimadzu
 - Tipe : GC – 8A
 - Arus : 60 mA
 - Gas pembawa : argon
 - Recorder : Chromatopac C – R6A



Gambar 3.3. Rangkaian Sistem Konversi Metana Nonoksidatif Dalam Reaktor DBD

3.4. Variabel Penelitian

3.4.1. Variabel kontrol

Variabel yang dikontrol tetap sama sepanjang penelitian ini adalah:

- Tekanan operasi reaktor sebesar 1 atm
- Laju alir gas umpan sebesar 250 cc/menit
- Gas yang digunakan, yaitu metana UHP
- Interval waktu reaksi 1 menit untuk 10 kali pengambilan data
- Bentuk rancangan reaktor
- Sistem peralatan yang digunakan

3.4.2. Variabel bebas

Variabel bebas yang diatur selama penelitian adalah:

- Tegangan primer sebesar 80 V, 100 V, 120V, dan 140 V.
- Panjang zona efektif reaktor 8.5 cm, 17 cm, dan 25.5 cm.

3.4.3. Variabel terikat

Variabel terikat yang diukur sebagai data langsung adalah:

- Komposisi produk
- Arus listrik

3.5. Prosedur Penelitian

3.5.1. Uji kebocoran

Sebelum dilakukan uji *start-up* alat, terlebih dahulu dilakukan uji kebocoran reaktordan perpipaan. Uji kebocoran dilakukan dengan cara sederhana yaitu metode air sabun.

1. Membuka penuh valve umpan dan membuka sedikit valve produk.
2. Mengalirkan udara dari kompresor ke dalam reaktor.
3. Meneteskan air sabun ke area yang berpotensi bocor.
4. Jika terdapat kebocoran maka dilakukan upaya penambahan atau penggantian silicon seal yang lebih rapat dan penguncian yang lebih erat. Pada permukaan

tutup reaktor juga ditambahkan lembaran silikon tipis untuk mengurangi kebocoran.

3.5.2. Uji coba kondisi optimal

Tahap ini berperan dalam menentukan kondisi maksimal yang akan digunakan dalam pengambilan data untuk pemodelan kinetika.

1. Memastikan seluruh komponen sistem telah terhubung dengan benar dan rapat sesuai dengan rangkaian pada gambar 3.2.
2. Membuka valve reaktor 1 dan menutup valve reaktor 2 dan 3.
3. Menyalakan ruang asam untuk pembuangan gas produk.
4. Mengatur laju alir umpan sebesar 250 cc/menit.
5. Menyalakan saklar dan mengatur slide regulator sehingga input tegangan sebesar-besarnya tepat sebelum muncul loncatan listrik.
6. Mengatur stop watch untuk waktu 5 menit.
7. Membaca arus pada amperemeter dan tegangan pada voltmeter.
8. Menganalisis gas produk dengan kromatografi gas setelah reaksi dilakukan selama 5 menit.
9. Mematikan saklar.
10. Menghentikan aliran umpan.
11. Mengulangi prosedur 1 – 11 untuk ketiga reaktor.
12. Tegangan maksimal untuk pengambilan data adalah tegangan terendah di antara ketiga reaktor sebelum muncul loncatan listrik. Tegangan tersebut sebesar 140 V yang merupakan tegangan maksimal dari reaktor 26.5 cm.

3.5.3. Pengambilan data

Kondisi operasi yang digunakan pada tahap ini mengacu pada kondisi optimal berdasarkan tahapan sebelumnya. Maka prosedur penelitian untuk tahap ini adalah:

1. Memastikan seluruh komponen sistem telah terhubung dengan benar dan rapat sesuai dengan rangkaian pada gambar 3.2.
2. Membuka valve reaktor 1 dan menutup valve reaktor 2 dan 3.
3. Menyalakan ruang asam untuk pembuangan gas produk.

4. Mengatur laju alir umpan sebesar 250 cc/menit.
5. Menyalakan saklar dan mengatur slide regulator sehingga input tegangan sebesar 80 V.
6. Membaca arus pada amperemeter dan tegangan pada voltmeter.
7. Menganalisis gas produk setiap 30 detik.
8. Mematikan saklar.
9. Menghentikan aliran umpan.
10. Mengulangi prosedur 1 – 11 untuk ketiga reaktor dengan variasi 100 V, 120 V, dan 140 V.

3.6. Metode Pengolahan Data

Data yang diperoleh dari penelitian ini adalah komposisi gas produk yang diambil setiap interval waktu 1 menit. Masing-masing reaktor menghasilkan 4 set data. 1 set data terdiri dari 10 titik. Dengan demikian seluruh data berjumlah 12 set yang berarti akan diperoleh 12 model kinetika berdasarkan variasi penelitian. Langkah-langkah pengolahan data dari data laboratorium hingga diperoleh model kinetika adalah sebagai berikut:

1) Plot data ke dalam grafik

Data diplot ke dalam grafik dengan menggunakan Microsoft Excel. Sumbu x merupakan waktu dalam satuan menit dan sumbu y adalah metana dalam satuan mmol.

2) Penentuan Konstanta dan Orde Laju Reaksi

Dalam penentuan konstanta dan orde laju reaksi dianggap reaksi hanya dipengaruhi oleh metana. Hal ini didasari oleh alasan:

- Komposisi metana jauh lebih besar daripada produk hasil konversinya.
- Tekanan metana yang besar menggeser reaksi ke arah produk.
- Waktu tinggal maksimal masih kecil, hanya 15 detik sehingga reaksi masih dikendalikan oleh reaktan.

Terdapat 6 model yang memungkinkan berdasarkan mekanisme yang telah dijelaskan pada subbab 2.2.2. Model dan metode penentuan konstanta laju reaksi dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Model Kinetika Yang Memungkinkan Dan Metode Penentuan k

Mekanisme Reaksi	Persamaan Laju Reaksi	Metode Penentuan Konstanta Laju Reaksi
Orde 1	$\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = -k[\text{CH}_4]$	Regresi linier $\ln[\text{CH}_4]_t = \ln[\text{CH}_4]_0 - kt$
Orde 2	$\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = -k[\text{CH}_4]^2$	Regresi linier $\frac{1}{[\text{CH}_4]_t} = \frac{1}{[\text{CH}_4]_0} + 2kt$
Orde 3	$\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = -k[\text{CH}_4]^3$	Regresi linier $\frac{1}{[\text{CH}_4]_t^2} = \frac{1}{[\text{CH}_4]_0^2} + 6kt$
Orde 4	$\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = -k[\text{CH}_4]^4$	Regresi linier $\frac{1}{[\text{CH}_4]_t^3} = \frac{1}{[\text{CH}_4]_0^3} + 12kt$

3) Konfirmasi Model Kinetika

Persamaan diferensial dengan masing-masing konstanta laju reaksi yang diperoleh dari linierisasi akan ditentukan kesesuaiannya dengan data. Metode yang digunakan adalah dengan melihat nilai R^2 . Semakin besar nilai R^2 , maka semakin sesuai model yang diusulkan. Model dapat dikatakan benar-benar mewakili apabila nilai R^2 lebih besar dari 0,95.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil penelitian. Pembahasan akan diawali dengan hasil uji kinerja reaktor plasma. Selanjutnya akan dianalisis mengenai pengaruh beberapa parameter sistem terhadap konversi metana serta kinetika reaksinya.

4.1. Uji Kinerja Reaktor Plasma

Uji kinerja atau uji *start-up* dilakukan untuk mengetahui fenomena yang terjadi pada reaktor plasma pada aliran energi listrik yang ditentukan. Uji kinerja dilakukan pada laju alir gas metana 250 ml/menit. Dari hasil uji kinerja ini akan ditentukan tegangan minimum dan maksimum reaktor akan dioperasikan untuk mengamati pengaruh parameter lain yang akan dibahas pada subbab berikutnya. Sebagai catatan, perlu diingat bahwa meningkatnya tegangan reaktor akan mengakibatkan memperbesar arus listrik yang mengalir. Hal tersebut berarti pula pada peningkatan daya listrik yang digunakan (Tipler, 1998).

Pada uji kinerja reaktor plasma yang sama, yang telah dilakukan sebelumnya untuk konversi karbon dioksida, plasma pertama kali muncul pada tegangan reaktor 6,1 kV (tegangan primer 90 V). Tegangan primer yang diujicobakan adalah 30, 60, 90, 120, dan 150 V. Munculnya warna plasma tidak dapat diamati secara fisik karena arus listrik yang digunakan berfrekuensi rendah. Plasma yang mulai muncul diamati dari adanya konversi karbon dioksida menjadi karbon monoksida. Uji coba plasma hanya dilakukan hingga tegangan primer maksimal 150 V (sekunder 10,1 kV) karena pada reaktor dengan volume 83,1 cc tegangan tersebut telah mampu menimbulkan loncatan listrik melalui lubang di ujung keluaran reaktor. Padahal pada kedua reaktor yang lebih pendek tegangan tersebut tidak menimbulkan loncatan listrik. Loncatan listrik pada reaktor 83,1 cc 10,1 kV belum intensif, muncul sekitar tiap 30 detik dan tidak mengakibatkan peningkatan suhu pada reaktor sehingga kondisi ini masih aman sebagai batas maksimum pengoperasian reaktor.

Berdasarkan uji coba dengan karbon dioksida, maka diputuskan uji coba dengan metana dimulai pada tegangan reaktor 6,1 kV. Ternyata pada tegangan tersebut sudah terjadi konversi metana menjadi C_2 . Pengujian kemudian dilakukan pada tegangan lebih rendah, yaitu 5,5 kV (primer 80 V) dan 4,8 kV (primer 70 V) untuk mengetahui tegangan minimum munculnya plasma. Hasil analisis gas kromatografi menunjukkan bahwa konversi metana mulai terjadi pada tegangan 5,5 kV dan belum terjadi pada 4,8 kV. Dari hasil tersebut diputuskan untuk menggunakan tegangan 5,5 kV sebagai tegangan minimum.

Tegangan maksimum ditentukan dengan cara yang sama, yaitu tegangan pertama kali munculnya loncatan listrik. Uji plasma pada reaktor 83,1 cc menunjukkan adanya loncatan listrik pada 9,5 kV (140 V primer). Loncatan listrik tersebut terjadi pada lokasi yang sama loncatan listrik yang terjadi saat dialirkan gas karbon dioksida. Berdasarkan pengamatan ini maka diputuskan tegangan maksimum yang akan digunakan untuk variasi adalah sebesar 9,5 kV meskipun pada kedua reaktor yang lebih pendek belum terjadi loncatan listrik pada tegangan tersebut.

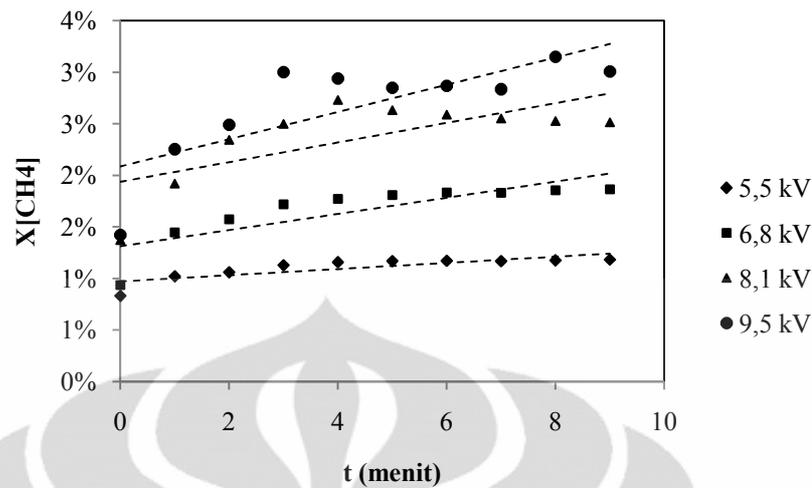
Perbedaan batas kondisi operasi antara reaktor yang satu dengan lainnya menjadi fenomena yang menarik pada penelitian ini. Telah dibahas di atas bahwa reaktor dengan volume zona efektif plasma sebesar 83,1 cc memunculkan loncatan listrik pada tegangan yang lebih rendah. Hal ini membuktikan bahwa plasma meningkatkan konduktivitas gas (Eliezer and Eliezer, 2001). Akibatnya gas yang terionisasi tersebut dapat menghantarkan arus listrik dengan cukup cepat dari *powered electrode* menuju *grounded electrode* di bagian ujung reaktor yang berlubang. Pada tegangan tinggi otomatis energi yang diterima oleh gas lebih tinggi sehingga aktivitas plasma dan jumlah ion pada plasma akan meningkat. Pada tegangan primer 150 V untuk plasma karbondioksida dan 140 V untuk plasma metana, konduktivitas plasma telah melewati konduktivitas kuarsa. Fenomena ini menyebabkan elektron lebih memilih mengalir melalui gas daripada melalui dielektrik. Pada kondisi gas yang tidak terplasmakan konduktivitas metana dan karbon dioksida lebih kecil dibandingkan konduktivitas kuarsa (Holman, 1986; Green and Perry, 1999).

Munculnya loncatan listrik hanya pada reaktor 83,1 cc menunjukkan bahwa panjang reaktor memiliki pengaruh terhadap plasma yang terbentuk. Berdasarkan pengamatan fisik kualitatif tersebut, tampak bahwa semakin panjang reaktor, maka semakin besar jumlah gas yang terionisasi. Dengan luas penampang reaktor serta laju alir yang sama, artinya ketiga reaktor akan memberikan energi listrik kepada kerapatan gas yang sama. Dengan demikian bila panjang reaktor berbeda, maka hanya waktu tinggal dalam reaktor saja yang berbeda. Loncatan listrik yang terjadi menunjukkan waktu tinggal dalam reaktor yang semakin lama menghasilkan produksi plasma yang lebih besar (Kang and Dose, 2003). Semakin lama waktu tinggal, semakin lama pula gas menerima energi listrik.

Perbedaan terjadi pula pada kondisi operasi plasma yang diterapkan untuk karbon dioksida dan metana. Rentang tegangan untuk karbon dioksida antara 6140 – 10130 V (90 – 150 V primer) sedangkan untuk metana antara 5460 – 9550 V (80 – 140 V primer). Tegangan minimum untuk metana lebih kecil daripada karbon dioksida karena energi masing-masing ikatan pada metana (4.3 eV) lebih kecil daripada energi masing-masing ikatan pada karbon dioksida (7.2 eV) (Yamamoto and Okubo, 2007) sehingga pergerakan elektron akan lebih mudah dan lebih mudah pula menghasilkan spesi aktif. Sementara itu tegangan maksimum untuk metana juga lebih kecil daripada tegangan maksimum untuk karbon dioksida. Hal ini selain disebabkan oleh metana yang lebih mudah terdisosiasi menjadi spesi aktif, juga disebabkan oleh karakteristik alami metana yang memiliki konduktivitas lebih tinggi daripada karbon dioksida. Jumlah ionisasi yang lebih besar mengakibatkan konduktivitas listrik plasma meningkat (Eliezer and Eliezer, 2001).

4.2. Pengaruh Waktu Operasi Reaktor terhadap Konversi Metana

Mulai subbab ini, pembahasan akan difokuskan pada metana. Gambar 4.1 sampai 4.3 menunjukkan hubungan antara waktu terhadap konversi metana pada masing-masing reaktor.

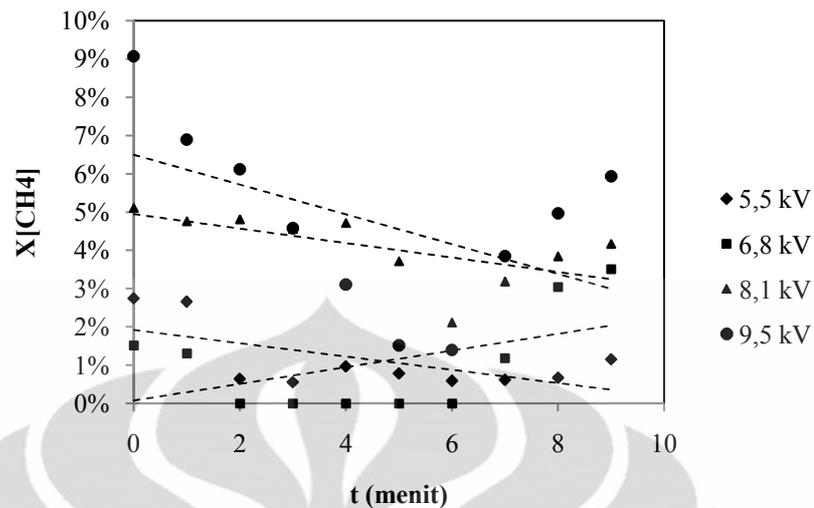


Gambar 4.1. Hubungan Waktu dan Tegangan terhadap Konversi Metana pada Reaktor 83,1 cc

Gambar di atas menunjukkan bahwa reaktor 83,1 cc menghasilkan konversi yang cukup stabil dari menit ke – 0 sampai dengan menit ke – 9. Konversi mengalami peningkatan dari menit 0 hingga menit 3 atau 4 kemudian cenderung stabil pada menit–menit berikutnya. Pada tegangan 8,1 kV dan 9,5 kV terjadi sedikit fluktuasi di menit–menit akhir, tetapi tetap stabil. Profil reaksi seperti ini menyerupai profil reaksi reversibel (Steinfeld, et. al., 2007). Karena konversi metana yang terdeteksi hanya C_2 , maka reaksi yang memungkinkan adalah:

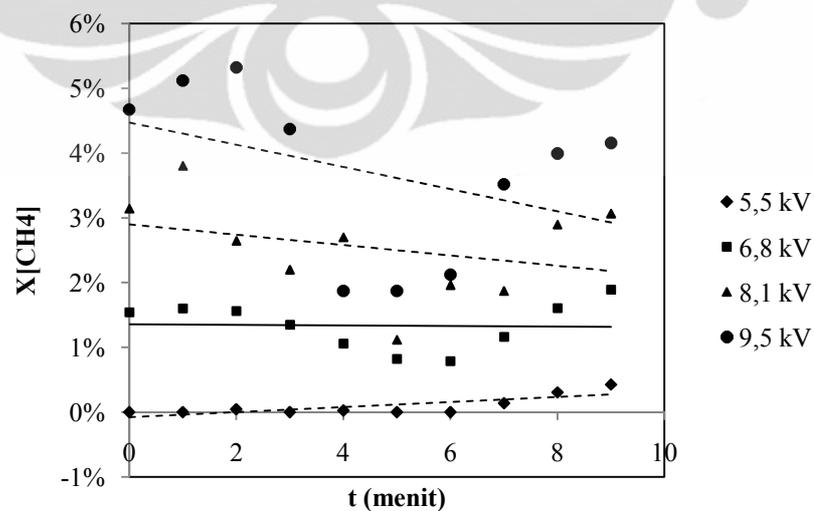


Persamaan ini digunakan karena alat kromatografi gas yang digunakan tidak dapat membedakan etana, etilena, dan asetilena.



Gambar 4.2. Hubungan Waktu dan Tegangan terhadap Konversi Metana pada Reaktor 55,4 cc

Perbedaan tampak jelas pada reaktor 55,4 cc. Pada reaktor ini profil konversi metana tinggi pada awal reaksi kemudian menurun cukup drastis hingga menit ke – 6. Kemudian meningkat lagi pada menit berikutnya. Hal ini disebabkan reaktor memerlukan waktu untuk menstabilkan arus. Sementara itu, pada tegangan 5,5 – 6,8 kV konversi relatif stabil di awal dan meningkat di akhir. Pada tegangan ini arus pada reaktor relatif lebih kecil sehingga membutuhkan waktu untuk mencapai arus puncak yang mencukupi untuk memberikan peningkatan pada konversi metana.



Gambar 4.3. Hubungan Waktu dan Tegangan terhadap Konversi Metana pada Reaktor 27,7 cc

Tabel 4.1. Regresi Linier Pengaruh Waktu terhadap Dekomposisi Metana

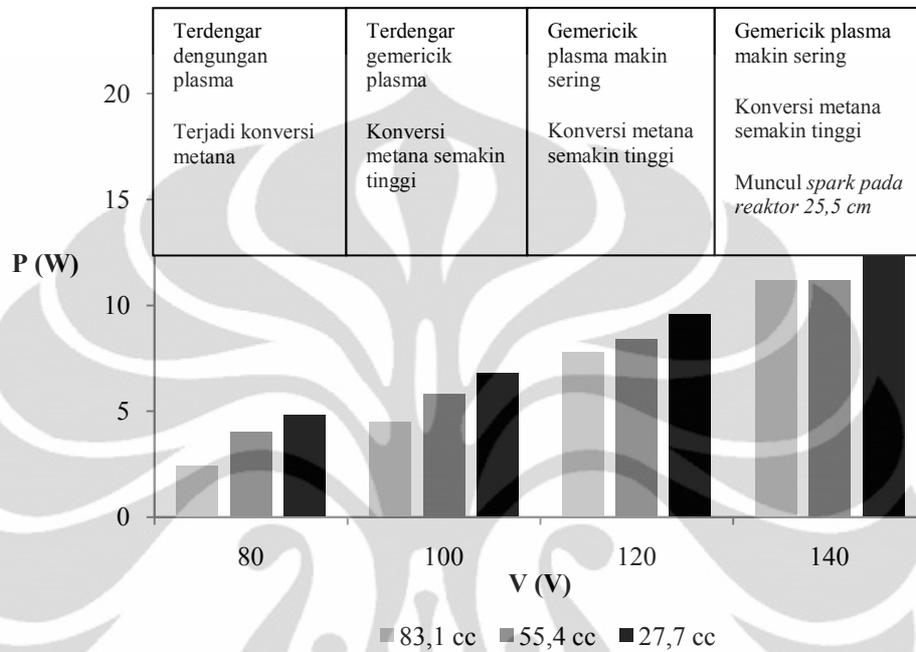
Reaktor (cc)	Tegangan (kV)	Kemiringan	R ²
83,1	5,5	0,0003	0,664
	6,8	0,0008	0,666
	8,1	0,001	0,486
	9,5	0,001	0,602
55,4	5,5	0,002	0,247
	6,8	-0,001	0,382
	8,1	-0,001	0,394
	9,5	-0,003	0,241
27,7	5,5	0,0004	0,599
	6,8	-0,00004	0,001
	8,1	-0,0008	0,099
	9,5	-0,001	0,156

Fenomena yang sama juga terjadi pada reaktor 27,7 cc. Dari menit ke menit tampak fluktuasi yang cukup besar pada tegangan 8,1 – 9,5 kV. Tegangan yang besar akan menimbulkan arus yang lebih besar pula, sehingga plasma nonequilibrium akan menghasilkan radikal yang lebih beragam dan mengakibatkan fluktuasi pada konversi metana. Hal ini pula yang menyebabkan terjadinya fluktuasi pada tegangan-tinggi pada reaktor 55,4 cc dan 83,1 cc. Stabilitas dekomposisi metana dilihat dari nilai kemiringan dan R². Semakin besar kemiringan dan semakin kecil nilai R² pada regresi linier, maka semakin tidak stabil proses dekomposisi metana.

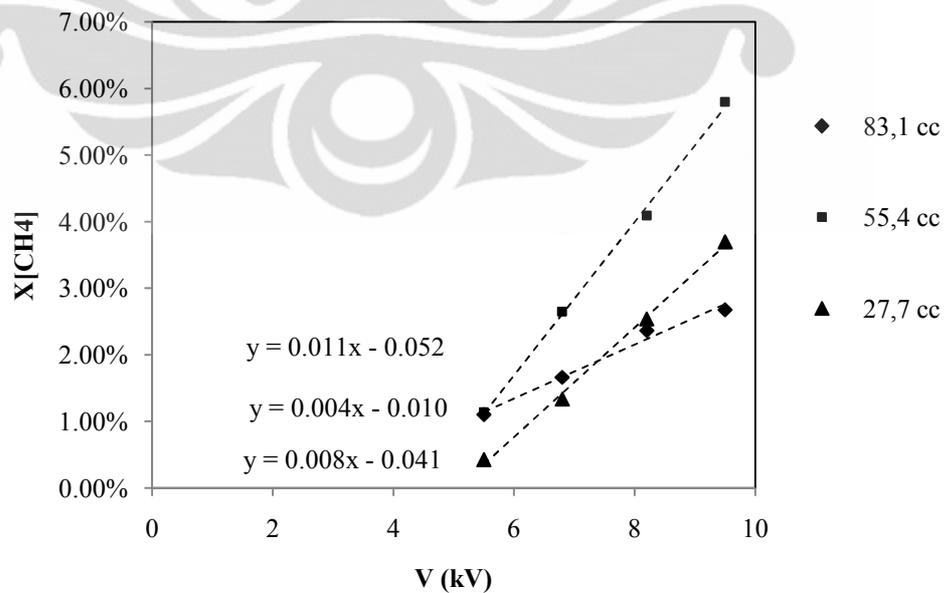
4.3. Pengaruh Tegangan Reaktor terhadap Konversi Metana

Berdasarkan Gambar 4.4 tampak bahwa semakin besar tegangan yang diaplikasikan maka semakin besar pula daya yang digunakan reaktor. Sesuai dengan hukum Kirchoff bahwa tegangan berbanding lurus dengan arus listrik. Dengan reaktor yang sama, maka hambatan listrik yang dilalui akan sama dan peningkatan tegangan akan berdampak pada peningkatan arus listrik yang mengakibatkan daya meningkat pula. Tampak pula bahwa semakin panjang

reaktor maka semakin kecil daya yang digunakan. Hal ini disebabkan semakin panjang reaktor maka semakin besar hambatan listrik sehingga arus yang dialirkan akan semakin kecil dan berakibat pada semakin kecilnya daya reaktor. (Tipler, 1998)



Gambar 4. 4. Pengaruh Tegangan Primer terhadap Daya Reaktor

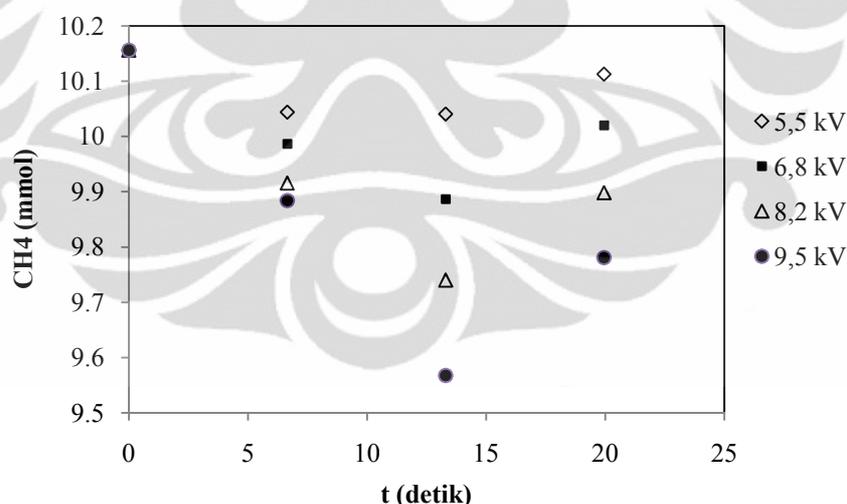


Gambar 4.5. Hubungan Tegangan Reaktor terhadap Konversi Metana

Berdasarkan grafik tersebut tampak bahwa secara umum semakin tinggi tegangan yang diaplikasikan maka semakin besar jumlah metana yang terkonversi (Savadkouei, et. al., 2007). Sesuai dengan pembahasan sebelumnya semakin besar tegangan maka semakin besar energi yang diberikan kepada gas. Konversi metana berbanding liner terhadap tegangan reaktor.

Peningkatan tegangan reaktor memberikan efek paling besar terhadap konversi metana pada reaktor 55,4 cc. Hal ini tampak pada kemiringan garis yang paling besar. Sementara itu, efek peningkatan tegangan paling kecil terjadi pada reaktor 83,1 cc. Hal ini selain disebabkan oleh rendahnya daya pada reaktor 83,1 cc untuk tegangan reaktor yang sama, juga disebabkan oleh pengaruh waktu tinggal metana dalam reaktor. Pengaruh waktu tinggal ini akan dibahas pada subbab berikutnya.

4.4. Pengaruh Panjang Reaktor terhadap Konversi Metana



Gambar 4.6. Hubungan Panjang Reaktor terhadap Konversi Metana pada Tegangan 5,5 kV

Pada tegangan rendah munculnya plasma, yaitu 5,5 dan 6,8 kV, tampak bahwa secara umum semakin panjang reaktor maka konversi metana akan lebih tinggi. Pada tegangan rendah di mana energi yang ditransfer kepada gas juga relatif rendah, waktu tinggal gas dalam reaktor memiliki peranan yang besar.

Waktu tinggal optimal diperoleh pada 13,3 detik. Waktu tinggal 6,5 detik belum mencukupi untuk mencapai konversi optimal. Sementara itu, waktu tinggal 19,95 detik terlalu panjang. Volume reaktor 83,1 cc menghasilkan konversi paling rendah karena semakin panjang reaktor, maka efek aliran gas sebagai pendingin akan menurun. Hal ini akan menghambat konversi metana secara nonoksidatif yang bersifat eksotermik. Terlalu lama berada dalam reaktor dengan suhu yang lebih tinggi akan menggeser reaksi ke arah endotermik dan hasilnya produk yang diinginkan akan kembali menjadi metana. Faktor ini memiliki pengaruh yang cukup kuat mengingat reaktor terpendek menghasilkan konversi yang lebih tinggi daripada reaktor terpanjang.

Pada tegangan 8,1 kV dan 9,5 kV menunjukkan bentuk profil yang serupa. Pada tegangan ini tampak bahwa volume reaktor optimal adalah 55,4 cc. Namun, kali ini, konversi terkecil dihasilkan oleh reaktor 27,7 cc. Tegangan tinggi mengakibatkan daya yang lebih tinggi. Meskipun reaktor terpanjang memiliki daya paling rendah, pada tegangan tinggi, seperti terlihat pada gambar 4.4, selisih daya antar reaktor tidak sebesar tegangan rendah. Hal ini menyebabkan panjangnya reaktor mengakibatkan reaksi dekomposisi metana yang bersifat endotermik dan memiliki energi aktivasi lebih tinggi akan berlangsung. Dua di antara 4 mekanisme reaksi penggabungan metana yang menghasilkan etana dan etilena seperti yang diusulkan oleh Wang, et. al. (2007), serta reaksi pembentukan asetilena seperti yang diusulkan oleh Indarto, et. al. (2005) bersifat endotermik. Inilah yang menyebabkan konversi reaktor 83,1 cc lebih besar daripada reaktor 27,7 cc. Namun, konversi optimal tetap diperoleh reaktor 55,4 cc. Fenomena dikarenakan waktu tinggal yang lebih lama pada reaktor 83,1 cc, meskipun memberikan kontak pada plasma yang semakin lama akan menghasilkan lebih banyak molekul yang stabil daripada yang aktif. (De Bie, et. al., 2006).

4.5. Laju Reaksi Dekomposisi Metana

Berdasarkan beberapa literatur (Indarto, et al, 2007; De Bie, et al, 2006), reaksi dekomposisi metana dalam reaktor plasma berlangsung secara reversibel. Namun, secara khusus untuk penyederhanaan, dalam studi ini model reaksi yang diasumsikan adalah reaksi ireversibel. Oleh karena itu kinetika reaksinya juga

diasumsikan ireversibel untuk dapat memenuhi pengaluran data yang diperoleh dari penelitian pada kurva antara waktu (t) terhadap besaran-besaran konsentrasi, bergantung pada ordenya. Hasil yang terbaca pada analisis kromatografi gas TCD menunjukkan hanya ada metana dan C_2 dalam aliran produk. Dengan demikian perkiraan reaksi global yang terjadi pada reaktor adalah sebagai berikut:



Gambar 4.6 menunjukkan bahwa semakin tinggi tegangan yang diaplikasikan maka semakin tinggi laju reaksi. Hal ini dapat diamati berdasarkan pergerakan jumlah metana yang terbaca dalam produk, semakin tinggi tegangan, kurvanya semakin curam. Sesuai dengan hukum Arrhenius yang menyatakan bahwa semakin tinggi suhu sistem maka semakin cepat pula reaksi aktivasi reaksi akan berlangsung.

Seperti yang telah dijelaskan pada subbab 4.3, meningkatnya tegangan akan meningkatkan arus yang mengalir di antara elektroda. Pada reaktor DBD plasma bersifat nontermal dan nonequilibrium. Suhu elektron jauh lebih tinggi dibandingkan suhu gas. Dengan demikian meningkatnya tegangan berarti akan meningkatkan suhu elektron lebih signifikan dibandingkan peningkatan suhu gas (Yamamoto and Okubo, 2001). Dalam reaktor plasma, densitas dan mobilitas elektron merupakan faktor yang menentukan konversi reaktan. Semakin tinggi suhu elektron mobilitasnya akan semakin cepat dan frekuensi terjadinya tabrakan elektron baik dengan spesi aktif maupun netral akan semakin sering. Fenomena tersebut mempercepat reaksi.

Laju reaksi dekomposisi metana lebih besar dari laju reaksi formasi metana pada detik 6,65 – 13,3. Hal ini dapat terlihat pada Gambar 4.6 yang menunjukkan penurunan jumlah metana dalam produk pada regional waktu tersebut. Hal sebaliknya terjadi pada detik 13,3 – 19,95.

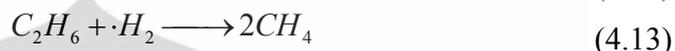
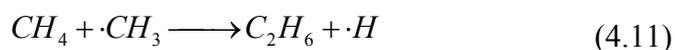
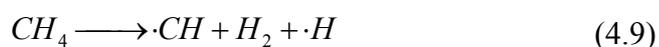
Dengan metode linearisasi pangkat sederhana, akan ditentukan kecenderungan orde reaksi yang berlangsung.

Tabel 4.2. Kesesuaian Pangkat Sederhana Melalui Metode Linearisasi

Tegangan (kV)	5,5	6,8	8,1	9,5
R² orde 0	0.7125	0.05769	0.00835	0.1030
R² orde 1	0.7124	0.05707	0.00821	0.1006
R² orde 2	0.7123	0.05645	0.00808	0.0982
R² orde 3	0.7121	0.05584	0.00794	0.0959
R² orde 4	0.7120	0.05523	0.00781	0.0936

Dari seluruh kondisi operasi yang dilakukan, semua memberikan hasil yang sejenis. Analisis nilai R^2 menunjukkan bahwa studi kinetika awal dengan pendekatan reaksi elementer ini belum dapat mewakili. Plot kurva linier masing-masing orde nol sampai empat tidak mengarahkan pada model kinetika yang diharapkan.

Diperkirakan terjadi reaksi kompleks yang terdiri dari berbagai reaksi elementer yang melibatkan banyak radikal dengan mekanisme yang kompleks pula. Dalam reaktor plasma, hal ini dapat terjadi karena energi plasma sangat tinggi sehingga ketidaksetimbangan spesi aktif dalam plasma menjadi faktor yang membuat jumlah molekul stabil menjadi menurun. Densitas elektron yang dihasilkan oleh medan listrik memberikan pengaruh yang lebih besar daripada konsentrasi reaktan. Seluruh spesi radikal yang merupakan zat antara dalam reaksi dekomposisi metana terbentuk akibat tumbukan dari elektron. Oleh karena itu, densitas elektron yang dihasilkan oleh medan listrik memberikan pengaruh yang besar. Berikut ini merupakan reaksi yang mungkin terjadi akibat aktivitas spesi radikal dalam zona plasma.



Mengingat nilai R^2 yang masih sangat kecil diperlukan adanya studi lebih lanjut mengenai model kinetika. Selain itu, diperlukan pula penambahan data eksperimen yang dapat mendukung penyusunan model. Oleh karena itu, metode pengambilan data eksperimental seharusnya ditingkatkan. Untuk menangani analisis spesi radikal yang komplikatif penelitian terdahulu menggunakan alat analisis yang lebih memadai seperti spektrometri massa, spektrometri Raman, spektrometri fluoresensi laser, spektrometri absorpsi laser, dan resonansi gelombang mikro.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

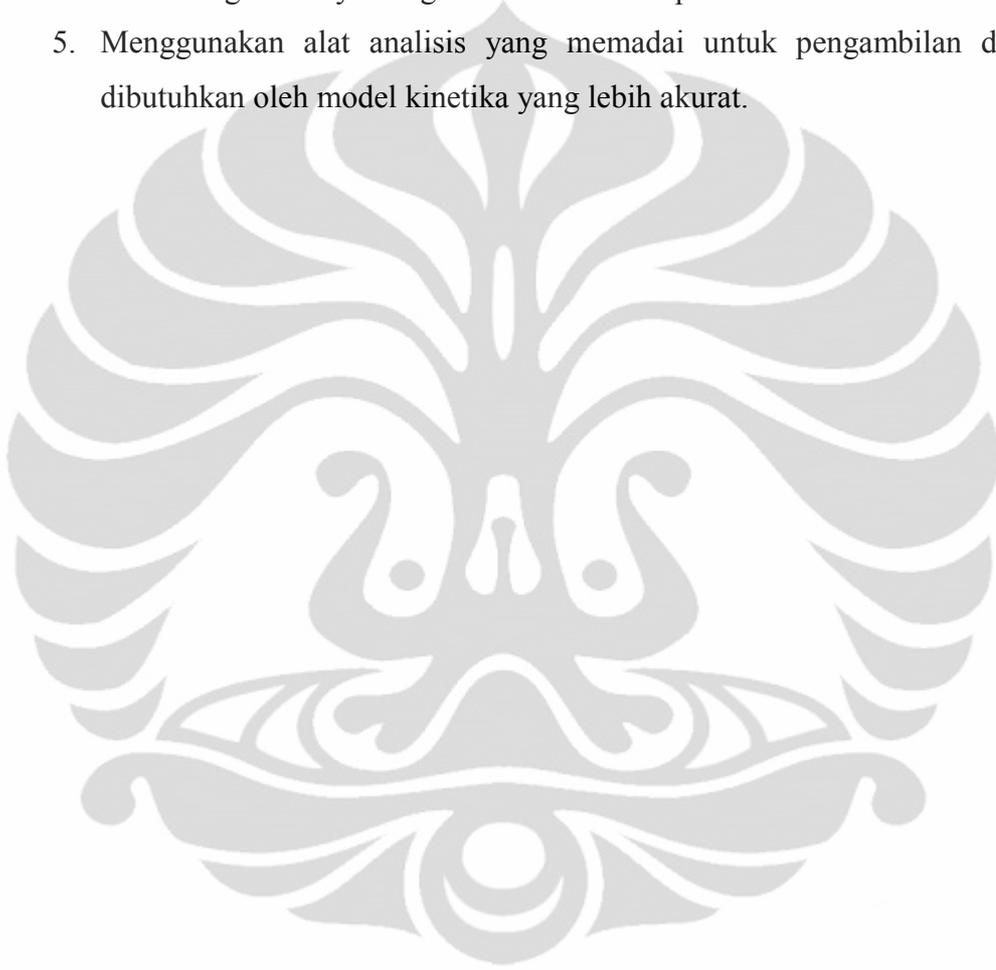
1. Stabilitas proses dekomposisi metana semakin meningkat dengan meningkatnya panjang reaktor dan menurun dengan meningkatnya tegangan.
2. Peningkatan tegangan reaktor menghasilkan peningkatan dekomposisi metana.
3. Dekomposisi optimal diperoleh pada reaktor 55,4 cc tegangan 9,5 kV frekuensi 50 Hz arus AC.
4. Model kinetika reaksi elementer tidak sesuai untuk kinetika dekomposisi metana dalam reaktor yang digunakan.
5. Di antara waktu tinggal 6,65 – 13,3 detik, laju reaksi dekomposisi metana lebih besar daripada laju reaksi formasi metana. Di antara waktu tinggal 13,3 – 19,95 detik, laju reaksi dekomposisi metana lebih kecil daripada laju reaksi formasi metana.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian ini, diperlukan penyempurnaan lebih lanjut untuk memperoleh kinerja yang lebih optimal dan model kinetika yang lebih baik. Saran dari peneliti adalah sebagai berikut:

1. Melakukan variasi laju alir untuk mengetahui lebih jauh efek waktu tinggal gas dalam reaktor. Dengan variasi ini, model kinetika akan tampak lebih jelas.
2. Menggunakan transformator frekuensi tinggi untuk meningkatkan konversi sehingga kecenderungan konversinya akan lebih tampak.

3. Memperbaiki posisi elektroda sehingga terjadinya loncatan listrik terjadi pada tegangan yang lebih tinggi dan dapat diaplikasikan rentang tegangan yang lebih besar.
4. Apabila data memungkinkan, disarankan untuk menggunakan metode studi kinetika yang lebih akurat dengan melibatkan masing-masing reaksi elementer serta mengaitkannya dengan model kinetika plasma DBD.
5. Menggunakan alat analisis yang memadai untuk pengambilan data yang dibutuhkan oleh model kinetika yang lebih akurat.



DAFTAR PUSTAKA

- Balia, M.L. (2010). *Kebutuhan Energi Listrik Nasional: Harapan dan Tantangan*. Paper presented at National Seminar of Clean Energy, Bandung, Indonesia.
- Bell, A.T. (1984). *Mechanisms of Fischer–Tropsch Synthesis*. NTiS report number: DE84014608.
- De Bie, C., Martens, T. D., Petrović, Mihailova, D., van Dijk, J. Bogaerts, A. (2006). *The Plasma Chemistry in an Atmospheric Pressure CH₄ Dielectric Barrier Discharge Described Using A Two Dimensional Fluid Model*, Handout. Eindhoven: Eindhoven University of Technology.
- Eliezer, S. and Eliezer, Y. (2001). *The Fourth State of Matter*, 2nd Edition. Bristol: IOP Publishing.
- Gradassi, M. J. and Green, N. W. (1995) Economics Of Natural Gas Conversion Processes. *Fuel Processing Technology*, 42, 65–83.
- Kang, H. D. and Dose, V. (2003). Radical Detection in a Methane Plasma. *Journal of Vacuum Science Technology*, 21, 1978 – 1980.
- Harahap, F. R. (2010). *Rancang Bangun Reaktor Dielectric Barrier Discharge untuk Konversi Karbon Dioksida*, Skripsi. Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, 20 – 44.
- Holman, J. P. (1986). *Heat Transfer*, 6th Edition. Singapore: McGraw – Hill Book Company.
- Hu, M. and Chen, J. (2007). Methane Conversion to C₂ Hydrocarbons Using Glow Discharge Plasma. *Plasma Science and Technology*, 9, 269 – 272.
- Indarto, A., Choi, J. W., Lee, H., Song, H. K. (2005). Kinetic Modeling of Plasma Methane Conversion Using Gliding Arc. *Journal of Natural Gas Chemistry*, 14, 13 – 21.

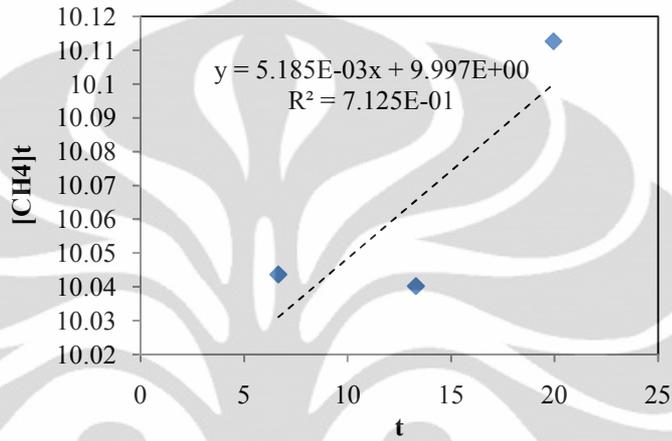
- Indarto, A., Choi, J. W., Lee, H., Song, H. K. (2006). Methane Conversion Using Dielectric Barrier Discharge: Comparison With Thermal Process and Catalyst Effects. *Journal National of Gas Chemistry*, 15, 87–92.
- Indarto, A., Coowanitwong, N., Choia, J. W., Lee, H., Song, H. K. (2007). Kinetic Modeling of Plasma Methane Conversion in a Dielectric Barrier Discharge, *Fuel Processing Technology*, 214 – 219.
- Indartono, Y. S. (2009). Energi dan Perubahan Iklim. Institut Teknologi Bandung, 1 – 8.
- Liu, W. Y., Lei, Z. L., Chen, D. L. (2001). Non-equilibrium Plasma Dehydrogenation Coupling of Methane. *Plasma Science & Technology*, 3, 755 – 760.
- Maiorov, V. A. and Golubovskii, Y. B. (2007). Modelling of Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharges with Emphasis On Stability Issues. *Plasma Sources Science And Technology*, 16, S67 –S75.
- Perry, R. H. and Green, D. W. (1999). *Perry's Chemical Engineering Handbook*, 7th Edition. New York: MmcGraw – Hill Book Company.
- Savadkouei, H., Seyed Matin, N., Jalili, A. H., Ahmadi, R., Khodagholi, M., Bozorgzadeh, H.R. (2007). Methane Conversion to Higher Hydrocarbons in AC Dielectric Barrier Discharge. *28th ICPIG*, 212 – 215.
- Wang, B., Guo, S., Cui, J., Ma, T. (2007). Study on Methane Coupling with Rotary Multidentate Helix Electrode under Plasmas at Atmospheric Pressure. *China*, 313 – 316.
- Wang, B., Yang, E., Xu, G., Hao, J. (2007). Theoretical Study of Reaction Paths and Transition States on Conversion Methane into C2 Hydrocarbons Through Plasma. *China Journal of Chemical Engineering*, 15, 44 – 50.
- Yamamoto, T. and Okubo, M. (2007). *Nonthermal Plasma Technology*. Totowa: The Humana Press, Inc.

Yang, Y. (2003). Direct Non-Oxidative Methane Conversion By Non-Thermal Plasma: Experimental Study. *Plasma Chemistry and Plasma Process*, 23.

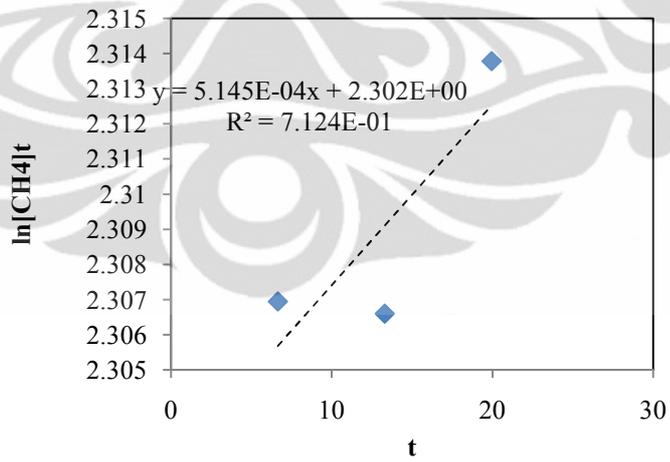


LAMPIRAN A

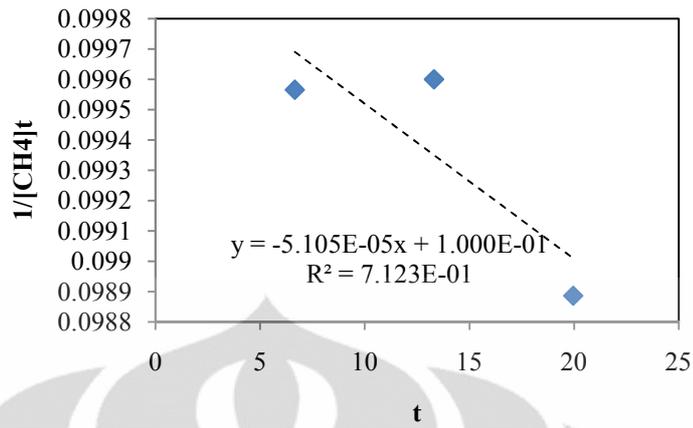
LINEARISASI KINETIKA ORDE 0 – 4



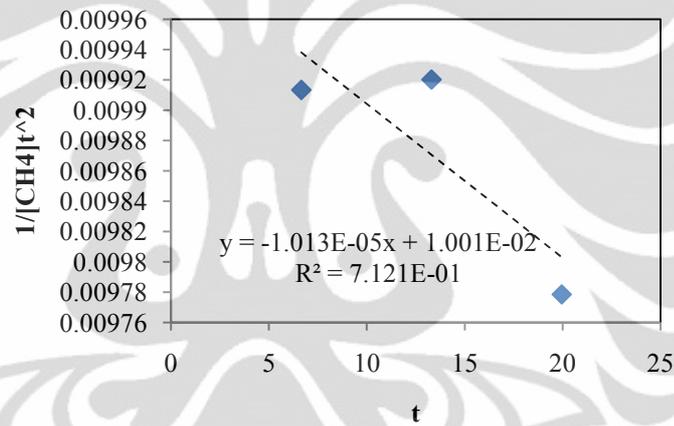
Gambar A.1. Linearisasi Orde 0 pada Tegangan 5,5 kV



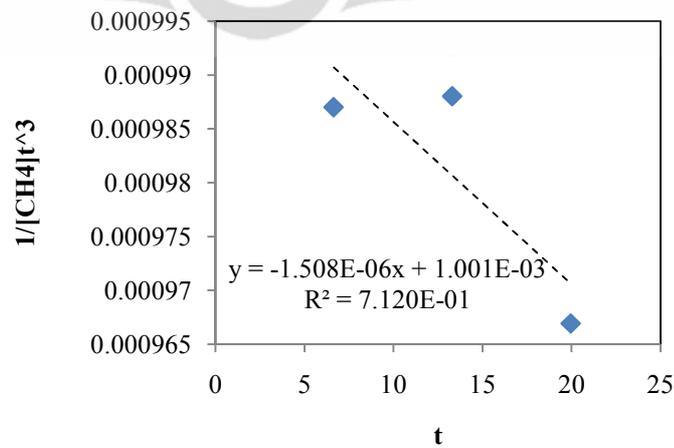
Gambar A.2. Linearisasi Orde 1 pada Tegangan 5,5 kV



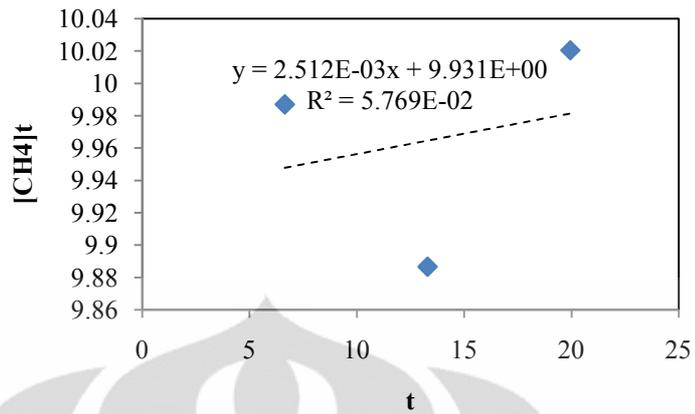
Gambar A.3. Linearisasi Orde 2 pada Tegangan 5,5 kV



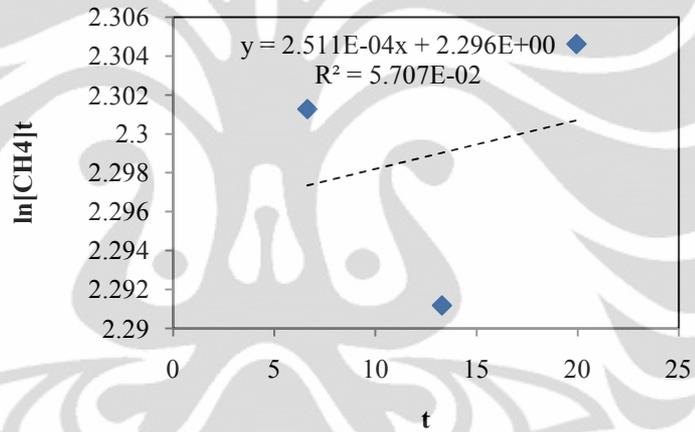
Gambar A.4. Linearisasi Orde 3 pada Tegangan 5,5 kV



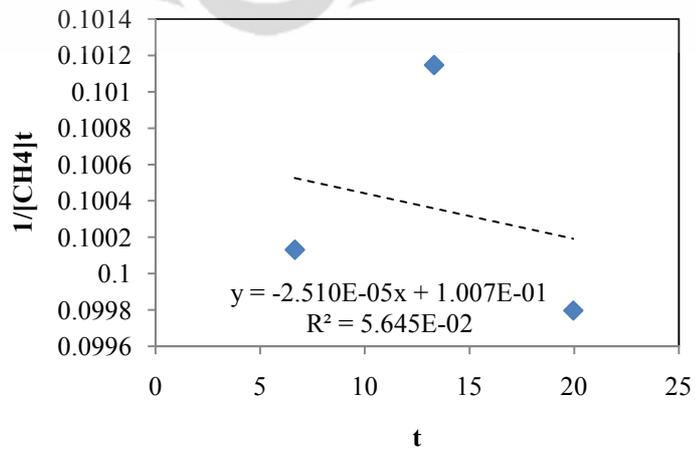
Gambar A.5. Linearisasi Orde 4 pada Tegangan 5,5 kV



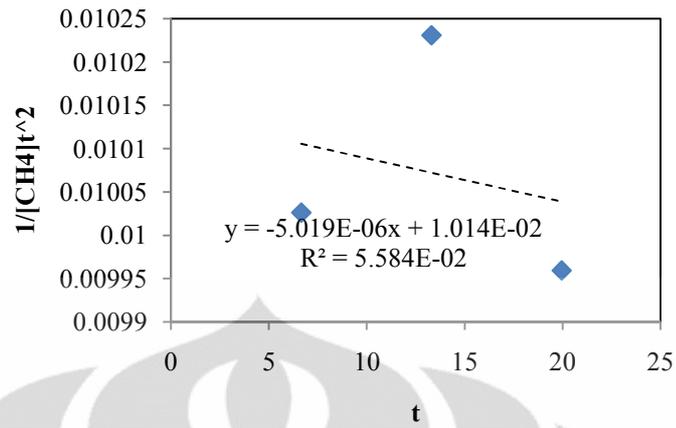
Gambar A.6. Linearisasi Orde 0 pada Tegangan 6,8 kV



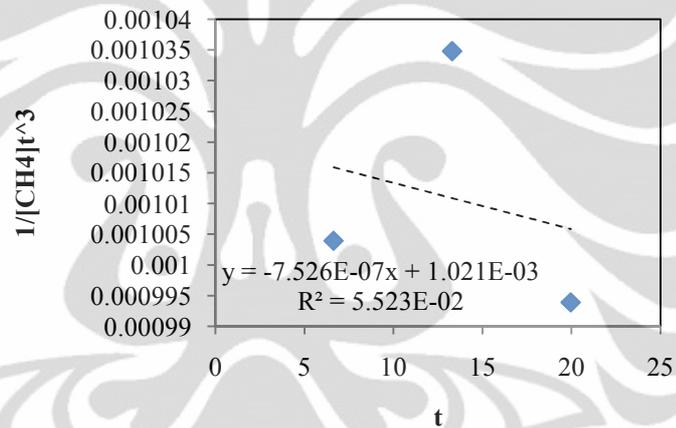
Gambar A.7. Linearisasi Orde 1 pada Tegangan 6,8 kV



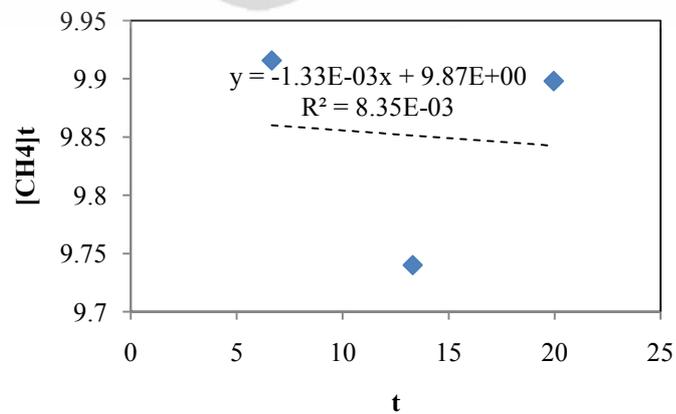
Gambar A.8. Linearisasi Orde 2 pada Tegangan 6,8 kV



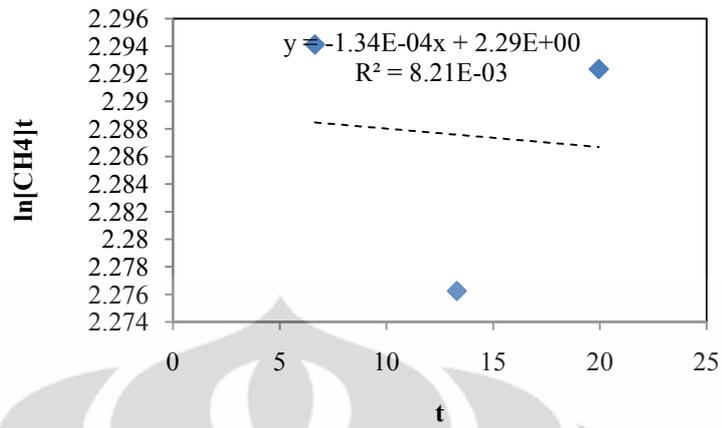
Gambar A.9. Linearisasi Orde 3 pada Tegangan 6,8 kV



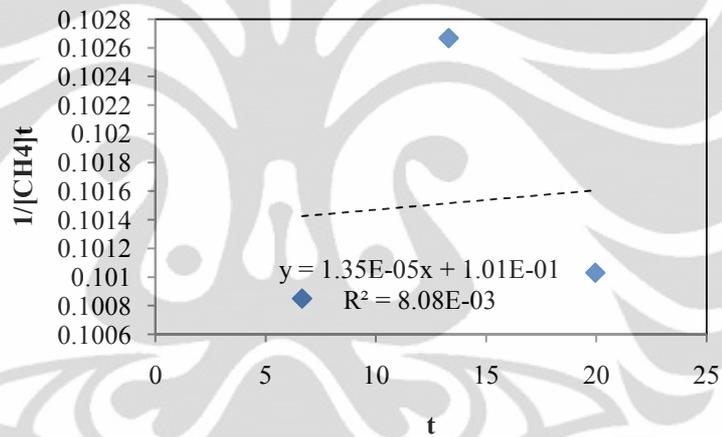
Gambar A.10. Linearisasi Orde 4 pada Tegangan 6,8 kV



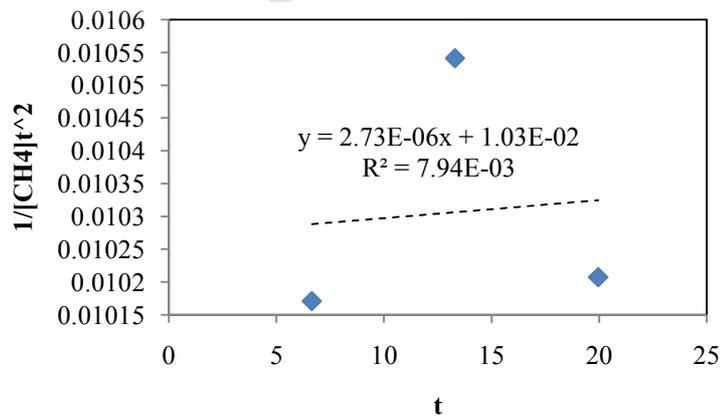
Gambar A.11. Linearisasi Orde 0 pada Tegangan 8,1 kV



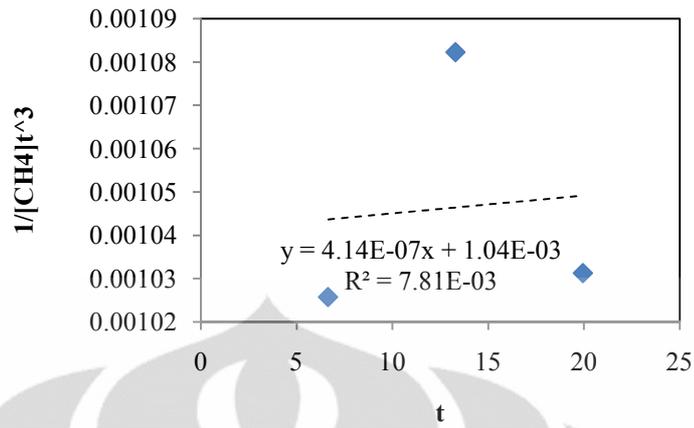
Gambar A.12. Linearisasi Orde 1 pada Tegangan 8,1 kV



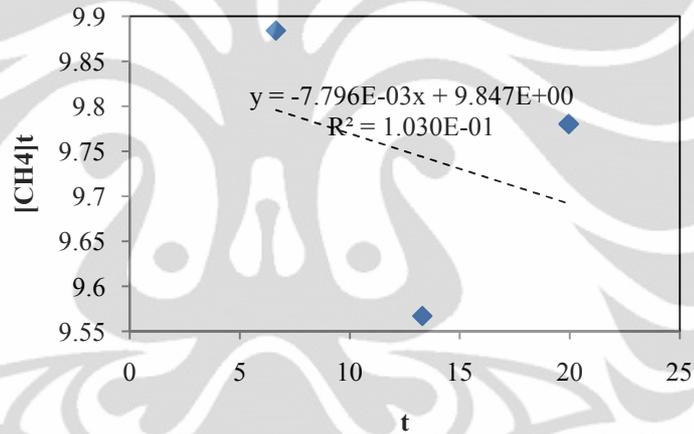
Gambar A.13. Linearisasi Orde 2 pada Tegangan 8,1 kV



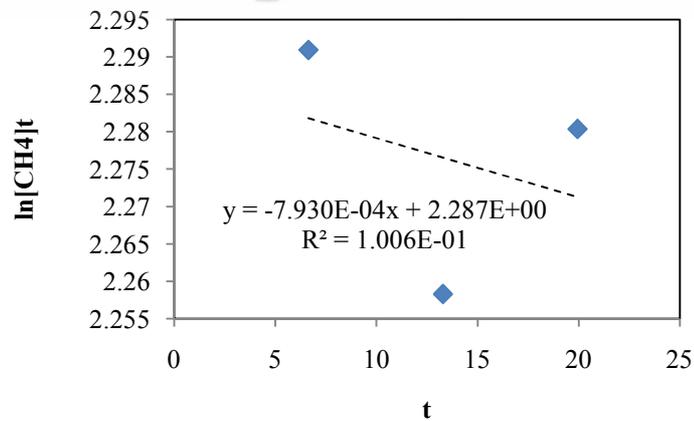
Gambar A.14. Linearisasi Orde 3 pada Tegangan 8,1 kV



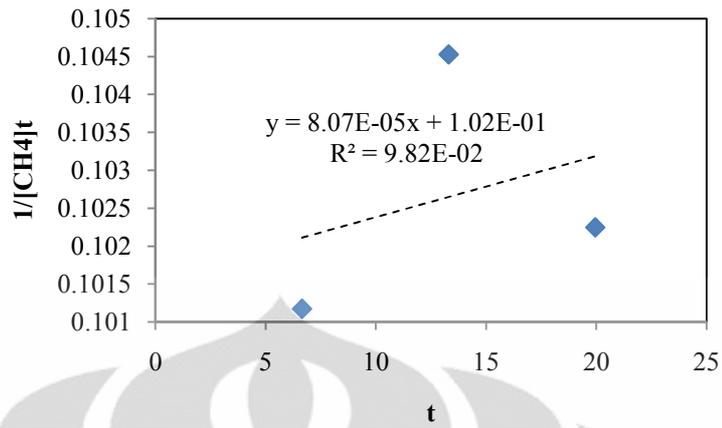
Gambar A.15. Linearisasi Orde 4 pada Tegangan 8,1 kV



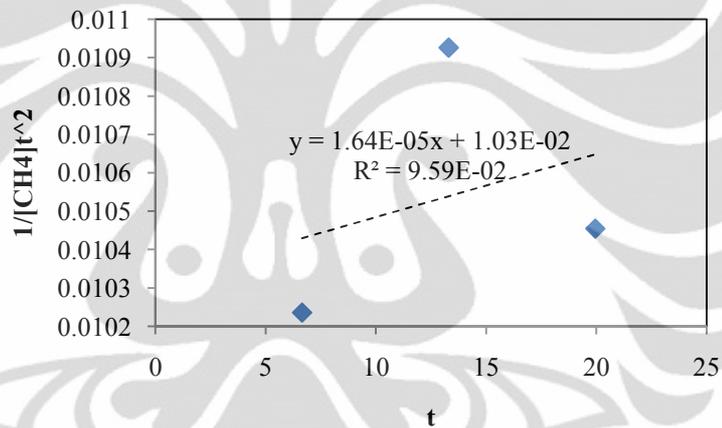
Gambar A.16. Linearisasi Orde 0 pada Tegangan 9,5 kV



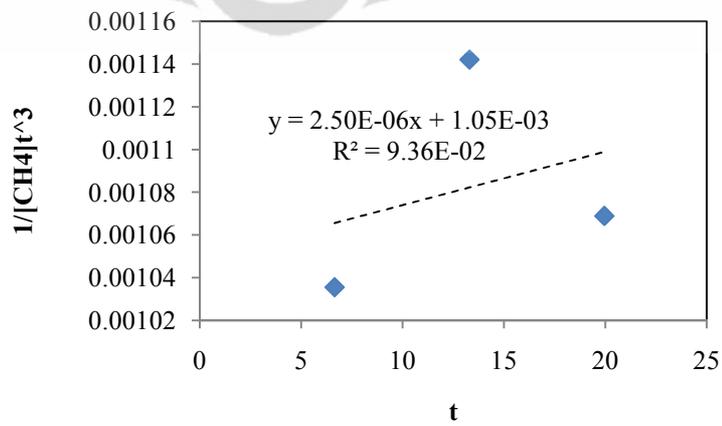
Gambar A.17. Linearisasi Orde 1 pada Tegangan 9,5 kV



Gambar A.18. Linearisasi Orde 2 pada Tegangan 9,5 kV



Gambar A.19. Linearisasi Orde 3 pada Tegangan 9,5 kV



Gambar A.20. Linearisasi Orde 4 pada Tegangan 9,5 kV