

**STUDI PEMBANGKITAN PLASMA NITROGEN DENGAN
METODE *CAPACITIVELY COUPLED DISCHARGE*
MENGUNAKAN SUMBER DAYA DC/AC POWER
INVERTER 100V AC PADA FREKUENSI ORDE kHz**

SKRIPSI

Oleh :
NIKE FITAYATUL KHUSNAH
0710930047-93



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2012**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



**STUDI PEMBANGKITAN PLASMA NITROGEN DENGAN
METODE *CAPACITIVELY COUPLED DISCHARGE*
MENGUNAKAN SUMBER DAYA DC/AC POWER
INVERTER 100V AC PADA FREKUENSI ORDE kHz**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang Fisika

Oleh :

NIKE FITAYATUL KHUSNAH
0710930047-93



JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2012

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

STUDI PEMBANGKITAN PLASMA NITROGEN DENGAN
METODE *CAPACITIVELY COUPLED DISCHARGE*
MENGUNAKAN SUMBER DAYA DC/AC POWER INVERTER
100V AC PADA FREKUENSI ORDE kHz

Oleh :
NIKE FITAYATUL KHUSNAH
0710930047 – 93

Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji
Pada tanggal
dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang Fisika

Pembimbing I

Pembimbing II

DR.Ing.Setyawan P.Sakti.,M.Eng.
NIP. 19650825 199002 1 001

DR.Eng.Masruroh,S.Si.,M.Si.
NIP. 19751231 200212 2 002

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya

Drs. Adi Susilo,M.Si.,PhD.
NIP. 19631227 199103 1 002

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Nike Fitayatul K
NIM : 0710930047
Penulis Tugas Akhir Berjudul :

**STUDI PEMBANGKITAN PLASMA NITROGEN DENGAN
METODE *CAPACITIVELY COUPLED DISCHARGE*
MENGUNAKAN SUMBER DAYA DC/AC POWER INVERTER
100V AC PADA FREKUENSI ORDE kHz**

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Tugas Akhir ini adalah benar-benar karya saya sendiri, dan bukan hasil plagiat dari karya orang lain. Karya-karya yang tercantum dalam Daftar Pustaka TA ini, semata-mata digunakan sebagai acuan/ referensi.
2. Apabila kemudian hari diketahui bahwa isi TA saya merupakan hasil plagiat, maka saya bersedia menanggung akibat hukum dari keadaan tersebut.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang,.....
Yang menyatakan,

NIKE FITAYATUL KHUSNAH
NIM. 0710930047

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



STUDI PEMBANGKITAN PLASMA NITROGEN DENGAN METODE *CAPACITIVELY COUPLED DISCHARGE* MENGUNAKAN SUMBER DAYA DC/AC *POWER* *INVERTER 100V AC* PADA FREKUENSI ORDE kHz

ABSTRAK

Dalam Fisika dan Teknik, kata plasma menunjukkan gas terionisasi sebagian maupun seluruhnya yang bersifat konduktif dan terdiri dari ion positif, ion negatif, elektron, radikal bebas, serta partikel netral. Perkembangan aplikasi plasma cukup pesat dikarenakan kemudahan modifikasi parameter pembangkitan plasma seperti gas kerja, konfigurasi elektroda, tekanan sistem, dan medan elektromagnetik. Konfigurasi elektroda yang umum digunakan adalah *Capacitively Coupled Discharge* (CCD), yakni sistem yang mana plasma dibangkitkan dengan cara menginjeksi gas bertekanan rendah yang mengalir di antara elektroda menggunakan medan listrik yang umumnya berfrekuensi radio yakni pada 13,56 MHz. Sistem vakum yang dimiliki oleh jurusan Fisika FMIPA UB, dimanfaatkan oleh kelompok penelitian *Green_Plasma* sebagai sistem pembangkit plasma. Sistem yang telah dibangun terdiri atas sistem vakum, *power supply* berupa DC/AC *power inverter* dalam orde kHz, transformator *matching impedance* jenis *step-up*, elektroda terbuat dari *stainless steel*, gas kerja nitrogen, dan *flowmeter* gas hidrogen dengan konversi $Q_{N_2} = 0,267 Q_{H_2}$. Pengujian dengan berbagai konfigurasi menunjukkan bahwa plasma tidak dapat terbentuk. Dari hasil analisis diketahui, tegangan keluaran DC/AC *power inverter* ditambah trafo *matching impedance* mampu melebihi tegangan minimum *breakdown* gas nitrogen dan tekanan sistem membuat plasma tidak dapat terbentuk.

Kata kunci : plasma, DC/AC *power inverter*, CCD.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



STUDY THE GENERATION OF NITROGEN PLASMA WITH A CAPACITIVELY COUPLED DISCHARGE METHOD USING THE RESOURCES DC / AC POWER INVERTER ON THE ORDER OF kHz FREQUENCY

ABSTRACT

In Physics and Engineering, the word plasma designates a fully or partially ionized gases that conductively consisting of electrons, positive ions, negative ions, free radicals, and neutral. The field of plasma application has rapidly expanded because of plasma generation parameter such as the working gas, pressure, electromagnetic field, and the discharge configuration can easily be modified. The discharge configuration that generally used in some plasma generation is Capacitively Coupled Discharge (CCD). This is a kind of system that plasma is generated by usually 13,56 MHz radio frequent electromagnetic field injection onto the low pressure gas flowing between the electrodes. With the vacuum system that Department of Physics had, Green_Plasma research group is trying to built up the plasma system. The system consist of DC/AC power inverter in kHz orde as power supply, step-up matching impedance tranformer , stainless steel electrodes, nitrogen gas as a working gas, and hydrogen flowmeter with the conversion for nitrogen is $Q_{N_2} = 0,267 Q_{H_2}$. The test results show that there is no light that indicate the plasma generation. After analyzed, the voltage of DC/AC power inverter plus matching impedance transformer had exceed the minimum breakdown voltage of nitrogen gas. But because of the pressure of system, the free electrons can not be able to interact with the other particles to sustain plasma.

Key words: plasma, DC/AC power inverter, CCD.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, yang telah melimpahkan kesehatan serta hidayah-Nya sehingga tulisan yang berjudul “STUDI PEMBANGKITAN PLASMA NITROGEN DENGAN METODE *CAPACITIVELY COUPLED DISCHARGE* MENGGUNAKAN SUMBER DAYA DC/AC *POWER INVERTER* 100V AC PADA FREKUENSI ORDE kHz “ dapat diselesaikan dengan baik.

Skripsi ini berisi sedikit pengetahuan mengenai plasma yaitu keadaan benda keempat yang umumnya dikesampingkan ketika belajar tentang Fisika. Tulisan ini juga menampilkan usaha penulis beserta kelompok riset *Green_Plasma* di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Brawijaya, untuk bekerja semaksimal mungkin dalam usaha membangun sistem plasma yang saat ini telah berkembang pesat dan banyak memberi manfaat dalam perkembangan ilmu pengetahuan serta industri.

Dengan terselesaikannya tulisan ini, penulis banyak menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu hingga hal ini dapat terwujud, antara lain :

1. Kedua orang tua penulis yang tak henti-henti memberi kepercayaan, dukungan, dan doa selama masa pengerjaan skripsi yang tidak singkat.
2. Bapak Ir.D.J.Djoko H.S.,M.Phil.,Ph.D sebagai ketua penelitian yang telah mempercayai penulis untuk melaksanakan skripsi ini bagaimanapun keadaannya.
3. Bapak Dr.Ing.Setyawan P.S., M.Eng selaku Pembimbing I yang banyak memberi ilmu-ilmu yang luar biasa.
4. Ibu Dr.Eng.Masruroh,S.Si.,M.Si selaku Pembimbing II yang telah memberi bimbingan yang sangat berharga.
5. Bapak Drs. Adi Susilo,M.Si,Ph.D selaku Ketua Jurusan Fisika.
6. Bapak Dr.rer.nat., Abdurrouf,M.Si selaku Sekretaris Jurusan Fisika.
7. Mas Puji selaku laboran Fisika Material atas segala bentuk diskusi dan bantuannya.
8. Bapak/Ibu dosen, staf karyawan, serta laboran Jurusan Fisika.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

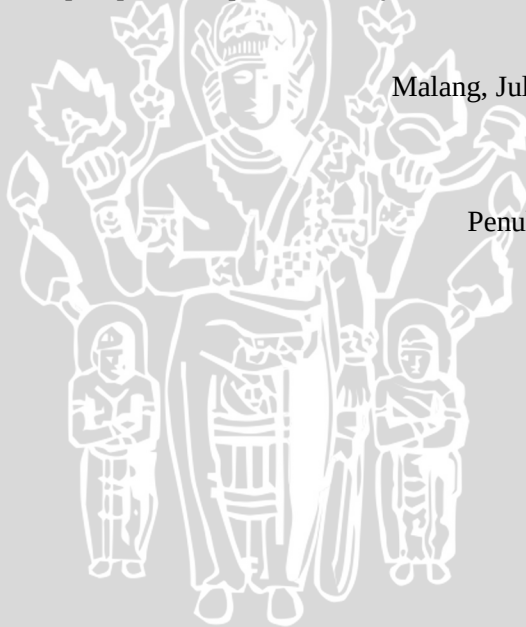


9. Doni dan mas Rona yang telah bersedia masuk ke dalam tim dan menyelesaikan tugas berat ini.
10. Mas Alin dan Cak win dengan segala bentuk diskusi dan kesediaan mendengar keluh kesah penulis.
11. Bagus Apriyanto yang selalu mendukung, menemani belajar dari nol, dan memberikan segala bentuk bantuan dalam pengerjaan skripsi ini.
12. Teman-teman angkatan 2007.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari pembaca naskah ini. Penulis berharap laporan hasil penelitian ini dapat bermanfaat bagi pembaca yang melaksanakan kegiatan serupa maupun pembaca pada umumnya.

Malang, Juli 2012

Penulis



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	iii
LEMBAR PERNYATAAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR LAMPIRAN	xxiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Plasma.....	7
2.2 Prinsip Pembangkitan Plasma	10
2.3 Pemecahan Molekul Gas dengan Medan Listrik (<i>Electrical discharge in gases</i>).....	12
2.3.1 Daerah di dalam <i>gas discharge</i>	14
2.3.2 Reaksi Pemecahan Molekul Gas di dalam <i>gas</i> <i>discharge</i>	18
2.3.3 Parameter <i>Gas Discharge</i>	20
2.4 Plasma Frekuensi Radio	23
2.5 CCD (<i>Capacitively Coupled Discharge</i>).....	24
2.6 Gas Nitrogen dan Plasma Nitrogen	27
2.7 Ruang Hampa Udara dalam Pembangkitan Plasma.....	28
2.8 Pengukuran Laju Gas dengan <i>Rotameter</i>	29
BAB III METODE PENELITIAN	35
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	35
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	35
3.3 Tahapan Penelitian	35
3.4 Perancangan dan Pembuatan Alat	35
3.4.1 Perancangan dan Pembuatan Elektroda.....	35

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



3.4.2	Perbaikan Piranti Sistem Pengukuran Tekanan Metode Ionisasi.....	38
3.5	Pengujian Kerja Alat.....	40
3.5.1	Pengujian Penggantian Filamen.....	40
3.5.2	Pengujian Rangkaian I-V konverter.....	41
3.5.3	Pengujian tekanan vakum	42
3.5.4	Integrasi Instrumen dan Pengujian Pembangkitan Plasma.....	42
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	47
4.1	Sistem Reaktor Plasma.....	47
4.1.1	Sistem Vakum.....	48
4.1.2	Elektroda Reaktor Plasma	51
4.1.3	<i>Power Supply</i> Sistem Plasma	53
4.1.4	Transformator <i>Matching Impedance</i>	54
4.1.5	Instalasi Gas Nitrogen.....	56
4.2	Pengujian Pembangkitan Plasma Nitrogen.....	58
4.2.1	Pengujian reaktor tahap I	58
4.2.2	Pengujian reaktor tahap II	59
4.3	Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Hasil Pengujian Sistem	60
4.3.1	Tekanan sistem reaktor plasma	60
4.3.2	Tegangan <i>Power Supply</i>	63
BAB V	PENUTUP.....	69
5.1	Kesimpulan	69
5.2	Saran	69
DAFTAR PUSTAKA		71

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1	Spesies Plasma7
Gambar 2.2	Diagram log n vs log T_e Plasma di alam semesta dan laboratorium.....8
Gambar 2.3	Prinsip Pembentukan Plasma.....11
Gambar 2.4	Ilustrasi proses longsoran elektron12
Gambar 2.5	Kurva Paschen.....13
Gambar 2.6	(a) Rangkaian skematik DC <i>discharge</i> ; (b) Kurva karakteristik V-I15
Gambar 2.7	Transisi <i>glow discharge</i> menuju <i>arc discharge</i> pada argon17
Gambar 2.8	Skematik konfigurasi CCD.....25
Gambar 2.9	Konfigurasi elektroda serta respon potensial sumber dan plasma terhadap waktu27
Gambar 2.10	<i>Rotameter</i>30
Gambar 2.11	Skematik <i>rotameter</i> (a) tampak samping, (b) tampak atas.....31
Gambar 3.1	Posisi Terminal dan Sungkup Reaktor Plasma36
Gambar 3.2	Skematik rangkaian reaktor di dalam sungkup37
Gambar 3.3	Bentuk elektroda (a) penampang lintang elektroda bawah, (b) elektroda bawah tampak atas, (c) elektroda atas tampak samping, (d)elektroda atas tampak atas.....38
Gambar 3.4	Sensor Bayard-Alpert.39
Gambar 3.5	Rangkaian I-V Konverter40
Gambar 3.6	Skema pengujian filamen41
Gambar 3.7	Skematik rangkaian uji I-V konverter.....42
Gambar 3.8	<i>Setting</i> Eksperimen.....43
Gambar 4.1	Skematik Katup Pembuangan.....51
Gambar 4.2	(a) DC/AC <i>power inverter</i> ; (b) Sinyal tegangan output DC/AC <i>power inverter</i>54
Gambar 4.3	Transformator <i>matching impedance</i>55
Gambar 4.4	Hasil pengukuran tegangan trafo dengan osiloskop (a) lilitan primer; (b) lilitan sekunder.....56
Gambar 4.5	Tampilan Osiloskop (a) Tegangan sistem <i>power supply</i> ; (b) Tegangan elektroda pada jarak elektroda 0,47 cm66

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Beberapa karakteristik <i>glow discharge</i> dan <i>arc discharge</i>	9
Tabel 2.2 Tegangan <i>breakdown</i> (V_{br}) minimum gas	21
Tabel 2.3 Pengaruh Tekanan Terhadap Proses Pembentukan Plasma.....	22
Tabel 2.4 Derajat Vakum dan Aplikasi	29
Tabel 3.1 Variabel-Variabel Penelitian	45
Tabel 4.1 Spesifikasi Sistem Reaktor Plasma	48
Tabel 4.2 Data hasil pengujian I-V Konverter	50
Tabel 4.3 Kapasitansi Elektroda Reaktor Plasma.....	53
Tabel 4.4 Skala <i>flowmeter</i> dan laju gas N_2 sebenarnya	58
Tabel 4.5 Jumlah Molekul Gas Nitrogen Dalam Reaktor	62
Tabel 4.6 Tekanan Parsial Gas Nitrogen Dalam Reaktor	63



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Data Hasil Pengujian Filamen.....	73
Lampiran 2 Data Hasil Pengujian Pembangkitan Plasma Tahap I.....	74
Lampiran 3 Data Hasil Pengujian Pembangkitan Plasma Tahap II.....	83
Lampiran 4 Foto instrumen dalam penelitian	85



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Adanya fenomena petir dan aurora akhirnya dapat dijelaskan dengan baik oleh para ilmuwan sebagai peristiwa *gas discharge* di atmosfer bumi. Pengetahuan mengenai listrik membuat manusia mulai berkreasi menciptakan *gas discharge* di muka bumi dan akhirnya diketahui bahwa *gas discharge* terdiri atas gas yang terion sebagian. Untuk menyatakan keadaan gas terion sebagian yang diciptakan dalam tabung *gas discharge*, pada tahun 1928 Dr. Irving Langmuir yang merupakan seorang ahli Kimia dan Fisika memperkenalkan kata plasma. Selanjutnya dalam bidang Fisika dan Teknik, plasma diketahui merupakan gas terionisasi sebagian atau seluruhnya yang bersifat konduktif dan terdiri dari ion positif, ion negatif, elektron, radikal, dan juga netral (Lieberman dan Lichtenberg, 2005). Wujud benda yang satu ini mempunyai karakteristik reaktifitas tinggi dan telah dimanfaatkan dalam berbagai bidang mulai dari bidang industri piranti elektronik seperti semikonduktor, pembuatan lampu hemat energi, sterilisasi peralatan medis, dan lain sebagainya.

Dalam beberapa tahun terakhir bidang aplikasi teknologi plasma berkembang cepat sebagai akibat proses di dalam plasma yang tidak mengikuti kaidah kesetimbangan kimia. Sifat plasma yang cukup menguntungkan tersebut dapat dengan mudah diciptakan melalui kontrol parameter pembangkitan plasma yang akhirnya membuat metode pembangkitan plasma menjadi bervariasi. Kontrol parameter pembangkitan plasma secara umum antara lain (Bogaerts dkk., 2002):

1. Gas kerja

Gas yang digunakan akan sangat menentukan spesies (elektron, atom, molekul, ion-ion, radikal, dan lain-lain) yang muncul di dalam plasma.

2. Tekanan

Tekanan dalam pembangkitan plasma mempunyai rentang 0,1 Pa hingga tekanan atmosfer. Pada tekanan yang tinggi, jalur bebas rata-rata partikel untuk bertumbukan akan menjadi pendek dan mengakibatkan plasma berada dalam

kesetimbangan termal. Sebaliknya dengan tekanan yang rendah maka jalur bebas rata-rata partikel untuk bertumbukan menjadi lebih panjang dan mengakibatkan plasma berada dalam ketidaksetimbangan termal.

3. Medan elektromagnetik yang digunakan
Dalam pembangkitan plasma dapat digunakan medan listrik ataupun medan magnet bahkan keduanya untuk mempercepat (*accelerate*), memanaskan (*heat*), memandu (*guide*), dan menekan (*compress*) partikel-partikel di dalam gas.
4. Konfigurasi reaktor / *discharge*
Plasma dapat dibangkitkan pada berbagai bentuk, ukuran, serta konfigurasi elektroda yaitu cara mengkopel elektroda dengan *power supply*.

Metode yang umum digunakan dalam pembangkitan plasma adalah metode *capacitively coupled discharge* (CCD). Dalam metode tersebut plasma dibangkitkan dengan energi listrik yang diaplikasikan pada gas di antara dua elektroda sejajar (Piel, 2010). *Power supply* yang digunakan dalam pembangkit plasma dapat berupa tegangan ac maupun frekuensi radio dengan frekuensi kerja 60 Hz hingga beberapa MHz. Namun pada umumnya frekuensi kerja *power supply* CCD adalah 13,56 MHz. Pemilihan frekuensi ini berdasarkan kesepakatan internasional dari para ahli komunikasi agar tidak terjadi gangguan pada sistem telekomunikasi maupun sistem yang lain (Bogaerts dkk., 2002). Namun saat ini frekuensi kerja *power supply* CCD juga dikembangkan pada frekuensi kerja yang lain, misalnya plasma yang ada di laboratorium profesor Aizawa yang dibangkitkan pada frekuensi 2 MHz dan lain-lain.

Salah satu piranti penting dalam usaha pembangkitan plasma pada skala laboratorium adalah sistem vakum. Di jurusan Fisika Universitas Brawijaya terdapat sistem vakum yang memiliki kehampaan hingga 10^{-7} Torr dengan menggunakan pompa *rotary* dan pompa turbo (Nuzula, 2007). Kelompok riset Green_Plasma di Jurusan Fisika FMIPA UB yang diketuai oleh Ir.D.J. Djoko H.S., M.Phil.,Ph.D mencoba untuk memanfaatkan sistem vakum yang ada tersebut sebagai reaktor pembangkit plasma.

Untuk mewujudkan kemungkinan dapat membangun sistem plasma di Jurusan Fisika, tahapan yang dilakukan oleh kelompok riset adalah membangun *power supply* yang bekerja pada frekuensi radio, membangun sistem kontrol pemanas, serta membangun sistem reaktor plasma. Tahapan yang telah selesai dikerjakan adalah pembuatan power supply dan sistem kontrol pemanas yang masing-masing dikerjakan oleh mahasiswa anggota kelompok riset yaitu Doni dan Rona, sehingga pada penelitian ini bagian yang dikerjakan adalah rancang bangun reaktor plasma kemudian pengintegrasian berbagai instrumen yang diperlukan untuk membangkitkan plasma dengan metode CCD. Reaktor yang dimaksudkan adalah sungkup dan elektroda sejajar yang akan diletakkan dalam ruang vakum. Kemudian sistem yang telah dibangun diuji untuk membangkitkan plasma dengan gas kerja yang digunakan adalah gas nitrogen. Pemilihan gas nitrogen dikarenakan gas yang tersedia di laboratorium adalah gas nitrogen, selain itu gas nitrogen memiliki reaktivitas rendah (*inert*) dan aman digunakan dalam skala laboratorium.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan apa yang telah dijelaskan pada latar belakang, maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan dalam penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana perancangan elektroda reaktor plasma dengan metode *Capacitively Coupled Discharge* yang sesuai dengan sistem vakum di Jurusan Fisika?
2. Apakah plasma nitrogen dapat dibangkitkan menggunakan DC/AC *power inverter* pada frekuensi orde kHz yang telah dibangun ?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat lebih terfokus, maka berdasarkan rumusan masalah tersebut diberikan beberapa batasan masalah sebagai berikut.

1. Sistem vakum yang digunakan sebagai reaktor telah tersedia di Laboratorium Biofisika Jurusan Fisika.

2. Instrumen pengukur tekanan *ionization gauge* dalam penelitian ini telah tersedia di Laboratorium Material Jurusan Fisika namun memerlukan perbaikan yang dilakukan seperti pada penelitian sebelumnya.
3. Penelitian ini hanya dibatasi pada terbentuknya plasma dengan menggunakan sistem reaktor plasma yang telah dibangun.
4. *Power supply* sistem pembangkitan plasma yaitu DC/AC *power inverter* beserta *matching impedance* merupakan karya yang dibangun sebelumnya oleh Dony Susanto pada tahun 2012 yang memiliki frekuensi orde kHz.
5. Parameter pembangkit plasma dalam penelitian ini adalah jarak antar elektroda, laju aliran gas N₂, dan laju evakuasi vakum saat gas N₂ dialirkan ke ruang vakum yang diatur melalui katup pembuangan pada pompa.
6. Proses pengujian plasma dilakukan tanpa mengoperasikan sistem kontrol pemanas.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang elektroda reaktor plasma dengan metode *capacitively coupled discharge* sesuai dengan sistem vakum yang ada di Jurusan Fisika.
2. Membangkitkan plasma nitrogen pada orde kHz menggunakan DC/AC *power inverter* yang telah dibangun oleh kelompok riset *Green Plasma*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini antara lain:

1. Diharapkan sistem plasma dapat pula dibangun oleh Jurusan Fisika FMIPA UB yang diwakili oleh kelompok riset *Green Plasma* sehingga dapat digunakan untuk mengembangkan penelitian khususnya pada kelompok riset tersebut.
2. Perancangan awal reaktor plasma ini diharapkan mampu membuka wawasan mahasiswa lain untuk dapat memperbaiki kekurangan-kekurangan yang ada pada

perancangan awal mengingat teknologi plasma memiliki banyak manfaat di berbagai bidang.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



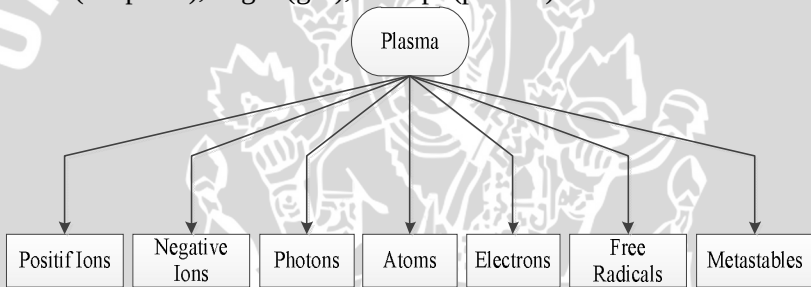
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

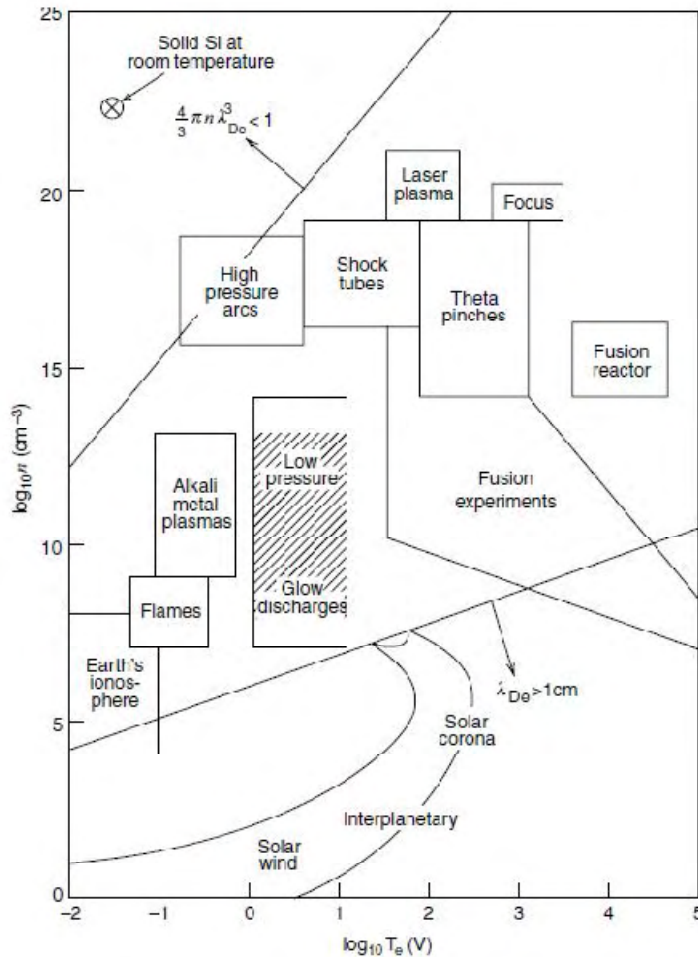
2.1 Plasma

Plasma secara umum didefinisikan sebagai gas yang terionisasi sebagian atau seluruhnya yang terdiri atas elektron dan ion-ion (Piel, 2010). Namun di dalam plasma juga terdapat partikel-partikel lain yang disebut sebagai spesies. Spesies yang ada di dalam plasma antara lain ditunjukkan oleh bagan pada gambar 2.1. Plasma pada umumnya disebut sebagai “keadaan benda keempat (*a fourth state of matter*)”, mengikuti tiga wujud benda lainnya yaitu padat, cair, dan gas. Pemberian sebutan ini didasarkan pada filosofi Yunani kuno bahwa ada empat elemen di alam semesta yaitu air (fluida), tanah (zat padat), angin (gas), dan api (plasma).



Gambar 2.1 Spesies Plasma
(Nehra dkk., 2008)

Plasma merupakan 99% penyusun alam semesta (Nehra dkk., 2008). Contoh plasma yang secara alamiah ada di alam semesta dan dapat terlihat oleh mata manusia adalah petir dan aurora. Namun plasma juga dapat dibangkitkan di laboratorium dan telah banyak dimanfaatkan untuk perkembangan ilmu pengetahuan maupun industri. Tokamak adalah salah satu contoh sistem pembangkitan plasma yang dilakukan oleh manusia. Pada skala laboratorium, plasma umumnya dibangkitkan dengan menggunakan energi listrik di dalam ruang vakum dengan berbagai ukuran yang mana dalam ruang tersebut mengalir gas kerja plasma serta terdapat meja substrat dan elemen pemanas (*heater*) (Ikegami, 2010).



Gambar 2.2 Diagram $\log n$ vs $\log T_e$ Plasma di alam semesta dan laboratorium
(Lieberman dan Lichtenberg, 2005)

Gambar 2.2 memberikan contoh sejumlah plasma yang ada di alam semesta maupun di laboratorium. Diagram tersebut mengidentifikasi plasma berdasarkan densitas plasma (n) dan temperatur elektron (T_e). Dua jenis sistem plasma yang banyak digunakan pada pemrosesan bahan adalah *low pressure glow discharge* dan *high pressure arcs discharge*. Aplikasi dari *low*

pressure glow discharge banyak digunakan pada proses *etching* dan deposisi lapisan tipis. Sistem ini mempunyai ciri $T_e \approx 1\text{-}10\text{ V}$, $n \approx 10^8\text{-}10^{13}\text{ cm}^{-3}$, tekanan $p \approx 1\text{ mTorr -}10\text{ Torr}$, dan tidak terjadi kesetimbangan termal antara ion dan elektron dalam plasma $T_i \ll T_e$ (T_i adalah temperatur ion). Sistem lain yang juga digunakan dalam pemrosesan bahan yaitu *high pressure arcs discharge* pada umumnya diaplikasikan untuk mempercepat reaksi kimia pada permukaan bahan atau meleburkan bahan. Ciri dari sistem ini adalah $T_e \approx 0,1 - 2\text{ V}$, $n \approx 10^{14} - 10^{19}\text{ cm}^{-3}$, bekerja pada tekanan atmosfer ($p \approx 760\text{ Torr}$), dan terjadi kesetimbangan termal antara ion dan elektron dalam plasma ($T_i \approx T_e$). Beberapa ciri lain dari dua jenis plasma ini di berikan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Beberapa karakteristik *glow discharge* dan *arc discharge*

	Glow discharge (luminous)	Arc discharge (thermal)
Voltage	High ($\sim 100\text{V}$)	Low ($\sim 1\text{ V}$)
Current	Low ($\sim 1\text{ mA}$)	High ($\sim 100\text{ A}$)
Electron emission process	Field emission	Thermionic emission
Ionization degree	Low ($\sim 10^{-8}\text{-}10^{-5}$)	Moderate ($\sim 10^{-2}$)
Electrons	Non-LTE	Partial-LTE
Ions-neutrals	LTE Cold ($\sim 300\text{K}$)	Partial-LTE Thermal ($\sim 30.000\text{K}$)

Berdasarkan temperatur masing-masing spesies, plasma juga dapat dibedakan menjadi plasma LTE (*local thermal equilibrium*) atau plasma non-LTE (*non-local thermal equilibrium*). Plasma LTE adalah plasma yang mana spesies pada area yang sama (secara lokal) di dalam plasma (elektron, ion, dan partikel netral) memiliki temperatur yang sama atau hampir sama. Plasma non-LTE adalah plasma yang mana terjadi perbedaan temperatur yang sangat tinggi antara elektron yang ringan dengan ion-ion dan partikel netral yang lebih berat.

Di dalam plasma, kecepatan gerak elektron selalu lebih besar dari kecepatan gerak ion-ion maupun spesies lain akibat perbedaan

massa yang dimiliki. Elektron yang mempunyai massa lebih ringan dari ion akan bergerak lebih cepat. Akibatnya fluks elektron yang bergerak menuju dinding elektroda akan selalu lebih besar dari fluks ion-ion. Dalam waktu singkat elektron-elektron yang berada di dekat dinding elektroda akan hilang berubah membentuk lapisan tipis bermuatan positif di sekitar elektroda yang kemudian disebut sebagai *sheaths* (Singh, 2004). Keberadaan *sheaths* sangat penting dalam usaha mempelajari karakteristik plasma yang telah dibangkitkan.

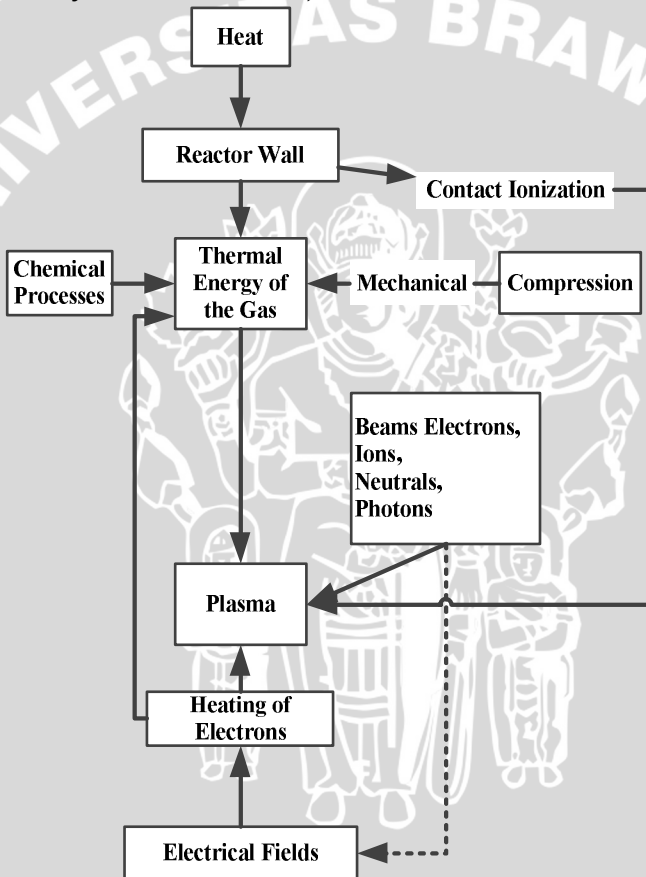
2.2 Prinsip Pembangkitan Plasma

Plasma dapat dibangkitkan pada tekanan rendah hingga tekanan atmosfer dengan memberikan sejumlah energi pada gas melalui berbagai cara untuk memisahkan elektron dari atom-atom atau molekul gas sehingga terbentuk elektron bebas, ion-ion, radikal, dan lain-lain. Proses pelepasan elektron dari atom atau molekul gas akibat pemberian energi eksternal selanjutnya disebut sebagai *gas discharge*. Secara umum sumber energi yang digunakan adalah energi panas, energi listrik, dan energi cahaya yang berasal dari laser atau yang lain. Diagram prinsip pemberian energi pada gas untuk menghasilkan plasma ditunjukkan pada gambar 2.3.

Dari gambar 2.3 dapat dilihat bahwa pembangkitan plasma pada prinsipnya adalah meningkatkan energi termal dari gas sehingga energi elektron meningkat dan akhirnya dapat terlepas dari atom. Metode yang paling umum digunakan untuk menghasilkan plasma adalah dengan memberikan medan listrik pada gas dalam reaktor. Dalam metode ini elektroda dihubungkan dengan beda potensial yang cukup tinggi. Akibat beda potensial yang tinggi dihubungkan pada sepasang elektroda yang di antara keduanya mengalir gas, atom atau molekul gas akan pecah menjadi elektron dan ion positif.

Tiga macam teknik *discharge* dengan medan listrik eksternal yang umum adalah DC, RF, dan microwave *discharge* (Herrebut, 2003). *Dirrect current* (DC) *discharge* adalah suatu cara membangkitkan plasma pada suatu ruang bertekanan rendah di antara dua plat sejajar di mana satu plat dihubungkan dengan *ground* dan satu plat lain pada sumber tegangan DC. Plasma yang terbentuk dengan menggunakan sistem *discharge* ini selanjutnya disebut sebagai *DC discharge*. Cara ke dua yaitu *Radio frequent* (RF)

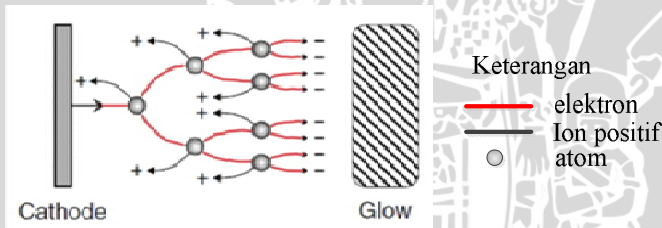
discharge merupakan cara membangkitkan plasma yang sama dengan DC *discharge*, hanya saja sumber daya yang digunakan adalah AC dan bekerja pada frekuensi radio. Plasma yang terbentuk selanjutnya diberi nama plasma frekuensi radio atau *RF plasma*. Sistem *discharge* yang ke tiga adalah menggunakan gelombang mikro (*microwave*) dengan frekuensi 2,54 GHz. Contoh dari *discharge* dengan menggunakan gelombang mikro adalah ECR (*Electron Cyclotron Resonance*).



Gambar 2.3 Prinsip Pembentukan Plasma
(Conrads dan Schmidt, 2000)

2.3 Pemecahan Molekul Gas dengan Medan Listrik (*Electrical discharge in gases*)

Pemecahan molekul-molekul gas yang dilakukan oleh medan listrik di dalam tabung yang berisi gas dan elektroda sejajar dapat terjadi ketika arus listrik dapat mengalir di dalam medium gas tersebut. Agar terdapat arus yang mengalir di dalam sistem, syarat utama yang harus dipenuhi adalah menciptakan dan memperbanyak jumlah pembawa muatan yaitu elektron. Elektron di dalam sistem dapat diciptakan melalui pemberian energi eksternal dengan berbagai cara antara lain melalui penyinaran katoda dengan sinar UV, pemberian medan listrik yang tinggi pada katoda (prinsip *electron field emission*), dan lain-lain. Elektron yang tercipta ini disebut sebagai elektron utama. Setelah elektron utama tercipta, selanjutnya adalah memperbanyak jumlah elektron di dalam sistem tanpa bantuan energi eksternal lagi. Proses pelipatan jumlah elektron ini bisa terjadi jika ionisasi gas melalui tumbukan elektron dengan atom atau molekul gas di dalam sistem yang telah dihubungkan dengan sumber tegangan listrik dapat berlangsung dan mengakibatkan peristiwa longsor elektron (*electron avalanche*) dari katoda menuju anoda.



Gambar 2.4 Ilustrasi proses longsor elektron
(Piel, 2010)

Pelipatan jumlah elektron di dalam sistem, sangat tergantung kepada tegangan *power supply* sistem. Ketika tegangan tersebut mencapai nilai kritis tertentu yaitu tegangan *breakdown* gas (V_{br}), hal yang terjadi adalah perubahan keadaan gas netral menjadi gas terion yang disebut sebagai plasma. Perubahan fase dari gas yang netral menjadi plasma merupakan suatu peristiwa yang disebut sebagai *plasma breakdown* atau *discharge ignition*. Agar peristiwa tersebut berlangsung sehingga plasma dapat terbentuk pada sistem

pembangkit plasma, maka sistem harus memenuhi *breakdown criterion*:

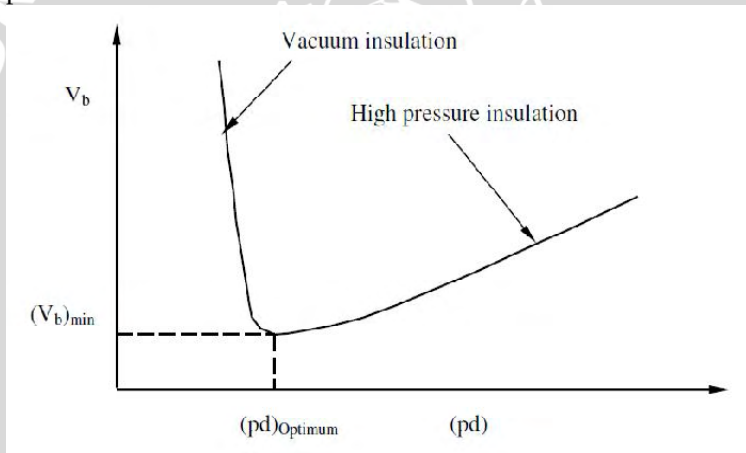
$$e^{\alpha d} = \ln \frac{1}{\gamma} + 1 \quad (2.1)$$

α adalah koefisien ionisasi yaitu laju ionisasi, d adalah jarak elektroda, dan γ adalah koefisien emisi elektron sekunder. Tegangan *breakdown* gas (V_{br}) secara umum merupakan fungsi perkalian tekanan (p) dengan jarak elektroda (d) yang ditentukan berdasarkan Hukum Paschen yang di berikan oleh:

$$V_{br} = f(pd) \quad (2.2)$$

$$V_{br} = \frac{Bpd}{\ln A pd - \ln [\ln(\frac{1}{\gamma} + 1)]}$$

A dan B adalah koefisien spesifik gas yang ditentukan dari eksperimen.



Gambar 2.5 Kurva Paschen
(Nehra dkk., 2008)

Gambar 2.5 menunjukkan sebuah kurva yang dibuat oleh Paschen berdasarkan persamaan 2.2. Paschen mempelajari *gas discharge* untuk memperoleh kurva tersebut dengan menggunakan sistem pembangkit plasma bersumber tegangan DC dan bekerja pada tekanan atmosfer. Dari kurva Paschen dapat disimpulkan bahwa terdapat harga tegangan *breakdown* minimum pada hasil $p \times d$ tertentu dan potensi terjadinya *breakdown* sangat luas untuk hasil $p \times d$ yang rendah maupun tinggi. Pada harga $p \times d$ rendah, dibutuhkan

tegangan *breakdown* yang cukup tinggi karena laju ionisasi yang kecil akibat terlalu sedikitnya tumbukan elektron dengan atom. Pada harga $p \times d$ yang tinggi tegangan *breakdown* yang dibutuhkan juga bernilai besar akibat terlalu banyaknya tumbukan elektron dengan atom yang terjadi di dalam sistem.

2.3.1 Daerah di dalam *gas discharge*

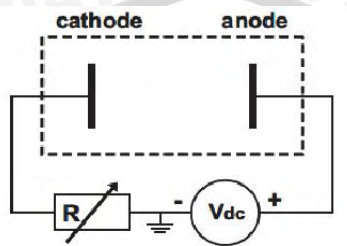
Sistem *gas discharge* pertama yang digunakan untuk mempelajari karakteristik plasma, menggunakan sumber tegangan DC dalam proses pembangkitan plasma. Plasma pada sistem ini dibangkitkan di antara dua elektroda sejajar yang terpisah pada jarak tertentu pada kondisi tekanan rendah (umumnya $< 10^3 \text{ Pa}$). Sejumlah daerah berbeda muncul hingga terbentuk *discharge* pada kondisi setimbang (*steady-state discharge*). Daerah yang terbentuk dalam sistem diberikan dalam kurva karakteristik V-I. Kurva karakteristik V-I ini dapat diperoleh dengan mengubah harga R pada rangkaian di luar tabung seperti ditunjukkan pada gambar 2.6 (a). Skala arus yang tertera pada gambar 2.6 (b) bergantung pada konfigurasi sistem *discharge* yang digunakan. Perpotongan garis antara kurva karakteristik V-I dengan garis beban (*load line*) $V = V_{dc} - IR$, merupakan nilai tegangan dan arus di mana *discharge* akan dioperasikan untuk pemrosesan lebih lanjut sesuai dengan tujuan operasi pembangkitan plasma.

Sejumlah daerah yang muncul pada kurva karakteristik V-I tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

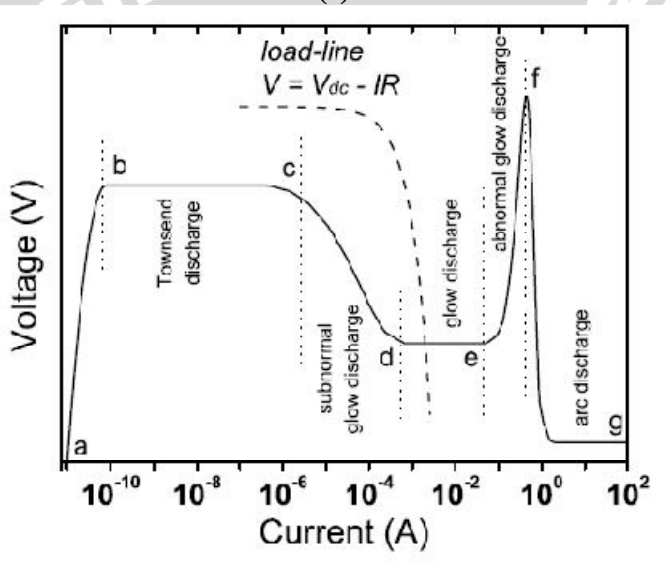
1) *Non-self sustaining discharge* (a-b)

Ketika sejumlah kecil tegangan diaplikasikan pada elektroda, arus yang sangat kecil nilainya dapat teramati mengalir melalui elektroda. Arus ini memiliki nilai kurang dari 10^{-10} A dan timbul akibat adanya pergerakan elektron utama yang terpancar dari katoda akibat radiasi dari sumber eksternal seperti sinar UV dari lampu. Elektron utama ini dipercepat menuju anoda oleh medan listrik akibat tegangan yang diaplikasikan pada elektroda. Karena arus pada daerah ini muncul sebagai akibat radiasi dari sumber di luar sistem *discharge*, maka arus ini akan hilang begitu sumber eksternal dihilangkan. Akibat tidak mampunya elektron mempertahankan jumlahnya tanpa bantuan energi eksternal,

maka daerah ini disebut sebagai *non-self sustaining discharge*.



(a)



(b)

Gambar 2.6 (a) Rangkaian skematik DC *discharge* ; (b) Kurva karakteristik V-I (Piel, 2010)

2) Townsend *discharge* (b-c)

Daerah ini disebut pula sebagai *dark discharge* karena tidak terdapatnya cahaya di dalam tabung *discharge* akibat tegangan yang diaplikasikan pada elektroda masih di bawah tegangan *breakdown* gas. Jika tegangan yang diaplikasikan pada elektroda lebih tinggi dari daerah a-b, maka medan

listrik di antara elektroda menjadi lebih besar. Akibatnya elektron utama memperoleh energi yang lebih besar hingga mampu bergerak dengan cepat dan mengionisasi atom-atom maupun molekul gas melalui peristiwa tumbukan. Dari peristiwa ionisasi tersebut akan dihasilkan elektron baru serta ion positif. Akibat perbedaan massa, elektron yang ringan akan mengikuti medan listrik untuk bergerak menuju anoda sedangkan ion positif cenderung untuk bergerak menuju katoda. Elektron baru pada katoda dapat pula terbentuk akibat tumbukan ion positif dengan katoda, yang mana peristiwa ini disebut sebagai emisi elektron sekunder. Karena terjadi ionisasi serta emisi elektron sekunder, jumlah elektron di dalam sistem akan meningkat bahkan mampu mempertahankan jumlahnya sendiri tanpa bantuan energi luar seperti pada daerah a-b. Elektron-elektron ini bergerak menuju anoda seolah-olah terjadi longsoran elektron (*electron avalanche*), sehingga arus yang mengalir di antara elektroda meningkat dari orde femtoampere (10^{-15} A) hingga mikroampere (10^{-6} A). Pada garis b-c terdapat batas antara garis yang lurus menuju garis yang menurun. Batas perpindahan garis ini merupakan tegangan *breakdown* dari gas kerja pada sistem *discharge*.

3) *Subnormal glow discharge* (c-d)

Bila tegangan yang diaplikasikan pada elektroda terus dinaikkan hingga melebihi tegangan *breakdown* gas, cahaya akan mulai tampak pada tabung *discharge* namun masih terkumpul di bagian tengah dan warna yang terbetuk terlihat kabur. Medan listrik yang didistribusikan pada daerah ini lebih besar akibat bertambahnya elektron, dan menyebabkan pelipatan jumlah elektron semakin besar. Akibatnya tegangan yang dibutuhkan untuk mempertahankan jumlah elektron di dalam *discharge* dapat direduksi. Kondisi ini ditunjukkan pada penurunan tegangan dalam kurva karakteristik V-I *discharge*.

4) *Glow discharge* (d-e)

Pada daerah ini tegangan yang dibutuhkan untuk mengoperasikan sistem berada pada harga minimum. Arus di antara elektroda pun semakin meningkat dalam orde

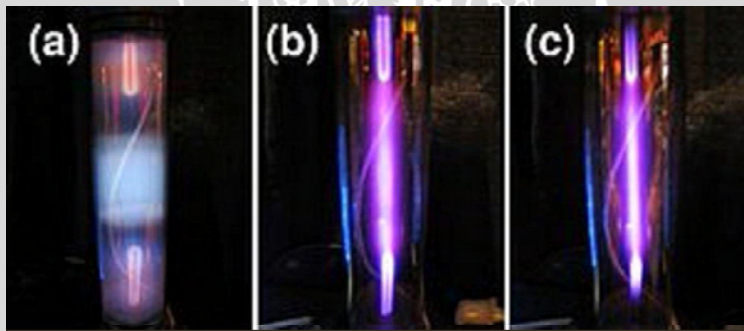
miliampere. Namun penambahan arus ini oleh sistem digunakan untuk meratakan proses *discharge* ke seluruh permukaan elektroda. *Glow discharge* akan berakhir ketika *discharge* telah merata menutupi permukaan elektroda.

5) *Abnormal glow discharge* (e-f)

Jika arus di antara elektroda semakin tinggi, *glow discharge* akan berubah menjadi *abnormal glow discharge* dan tegangan elektroda akan naik drastis. Keadaan *abnormal glow discharge* ditandai dengan semakin tebalnya elektroda ditutupi oleh cahaya.

6) *Arc discharge* (f-g)

Arus yang mengalir di antara elektroda semakin besar dalam orde ampere, dan tegangan elektroda menjadi semakin turun seiring kenaikan arus. Dalam kondisi ini jumlah elektron bertahan dengan adanya reaksi termionik elektron pada katoda.



Gambar 2.7 Transisi *glow discharge* menuju *arc discharge* pada argon (Anonim²)

Transisi perubahan daerah dari *glow discharge* menuju *arc discharge* dapat ditunjukkan pada gambar 2.7. Gas yang digunakan pada discharge tersebut adalah argon. Tampak pada gambar bahwa pada daerah *glow discharge* (a) seluruh area tabung dipenuhi dengan cahaya, sedangkan menuju *arc discharge* (c) cahaya terpusat di tengah tabung dan warna yang dihasilkan lebih tajam. Adanya kurva karakteristik V-I serta transisi *discharge*, menunjukkan kenyataan

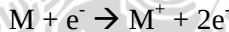
bahwa terdapat harga potensial minimum yang dibutuhkan oleh sistem agar plasma dapat terbentuk.

2.3.2 Reaksi Pemecahan Molekul Gas di dalam *gas discharge*

Setelah elektron utama lepas dari elektroda, elektron ini akan dipercepat oleh medan listrik yang diaplikasikan menuju anoda. Elektron ini memperoleh energi kinetik (E_e) sebesar $\frac{1}{2} mv^2$ yang nilainya setara dengan beda potensial elektroda. Dalam perjalanannya menuju anoda, elektron akan mengalami tumbukan dengan gas yang ada di antara elektroda. Tumbukan yang terjadi dapat menyebabkan berbagai reaksi di dalam atom atau molekul yang di antaranya adalah :

1. Ionisasi oleh tumbukan sederhana (*ionisation by simple collision*)

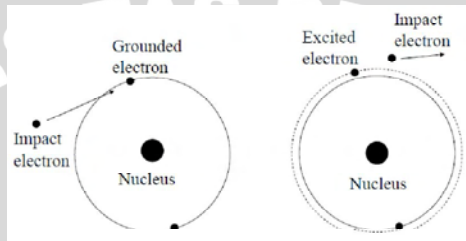
Peristiwa ini terjadi jika energi kinetik elektron lebih besar dari energi ionisasi molekul ($\frac{1}{2} mv^2 > E_i$). Umumnya dihasilkan satu ion positif dan dua elektron yang bergerak lambat.



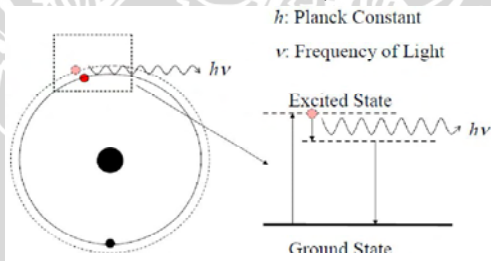
Perbandingan elektron hasil peristiwa ini dengan elektron utama bergantung pada energi elektron yang dimiliki oleh elektron utama. Perbandingan ini akan bernilai maksimum jika energi elektron utama berkisar antara 200-500 eV. Untuk energi yang lebih rendah, energi yang ditransmisikan elektron utama kepada molekul mungkin tidak mencukupi untuk elektron terluar molekul dapat lepas, menyebabkan probabilitas proses berlangsung sangat kecil. Untuk energi yang lebih tinggi, elektron akan mempunyai energi yang cukup untuk masuk lebih dalam dari permukaan molekul, sehingga probabilitas peristiwa ini berlangsung juga kecil.

2. Eksitasi dan Deeksitasi

Dalam peristiwa elektron utama menumbuk molekul, peristiwa ionisasi tidak selamanya berlangsung. Hal ini mengakibatkan molekul yang menerima energi dari elektron utama akan berada dalam keadaan tereksitasi M^* dengan energi E_e , mengakibatkan elektron di dalam molekul naik menuju level energi yang lebih tinggi.

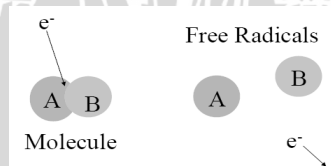


Ketika elektron yang tereksitasi di dalam molekul kembali menuju level energi yang lebih rendah melalui peristiwa deeksitasi, akan dihasilkan foton dengan energi sebesar $h\nu$.



3. Disosiasi

Elektron utama yang menumbuk molekul gas juga dapat mengakibatkan ikatan kimia dalam molekul rusak, sehingga dihasilkan radikal bebas.



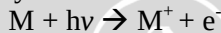
4. Ionisasi oleh tumbukan ganda (ionisation by double electron impact)

Ketika molekul dalam keadaan tereksitasi dengan energi E_e , ada kalanya sebelum mengalami peristiwa deeksitasi molekul ini telah ditumbuk oleh elektron lain. Dalam peristiwa ini maka ionisasi akan dapat berlangsung, bahkan dengan energi elektron yang rendah sekalipun. Namun energi yang dimiliki oleh elektron untuk menyebabkan peristiwa ini berlangsung harus memenuhi syarat $\frac{1}{2}mv^2 > E_i - E_e$.



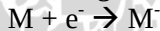
5. Fotoionisasi (*photo-ionisation*)

Jika energi foton yang terpancar akibat peristiwa deeksitasi memiliki energi yang lebih besar dari energi ionisasi ($h\nu > E_i$), maka foton tersebut dapat mengionisasi molekul yang bertumbukan dengannya.



6. Penangkapan elektron

Jika molekul atau atom memiliki level energi kosong pada kulit terluarnya, maka elektron yang menumbuk molekul ini akan dapat menempati level energi tersebut yang akan mengakibatkan molekul atau atom menjadi ion negatif. Peristiwa ini akan menyebabkan jumlah elektron bebas di dalam reaktor menjadi berkurang.



7. Pelepasan elektron (*electron detachment*)

Peristiwa ini terjadi jika ion negatif melepaskan satu elektronnya.



2.3.3 Parameter Gas Discharge

Agar proses *gas discharge* berlangsung hingga terbentuk plasma yang stabil, ada berbagai macam faktor yang mempengaruhi antara lain:

1) Gas kerja

Berdasarkan kurva Paschen, terdapat tegangan minimum agar suatu proses *discharge* dapat menghasilkan plasma. Tegangan ini antara satu gas dengan yang lain memiliki nilai yang berbeda-beda mengingat energi untuk mengikat elektron terluar pada masing-masing atom adalah berbeda. Beberapa tegangan minimum dari sejumlah gas serta hasil

kali $p \times d$ minimumnya diberikan pada tabel 2.2 (Lucas, 2001).

Tabel 2.2 Tegangan *breakdown* (V_{br}) minimum gas

Gas	V_{br} min (V)	Hasil kali $p \times d$ saat V_{br} min (Torr.cm)
Udara	327	0,567
Argon	137	0,9
Hidrogen	273	1,15
Helium	156	4,0
CO ₂	420	0,51
Nitrogen	251	0,67
N ₂ O	418	0,5
Oksigen	450	0,7
SO ₂	457	0,33
H ₂ S	414	0,6

2) *Power supply*

Pemilihan frekuensi kerja serta jenis tegangan ac atau DC sebagai *power supply* sangat mempengaruhi kerja dari sistem dalam membangkitkan plasma. Elektron yang menjadi pemeran utama agar plasma dapat terbentuk, mempunyai waktu hidup yang cukup singkat sebelum hilang akibat tumbukan yang menyebabkan ionisasi maupun akibat tumbukan dengan dinding dan membentuk *sheaths*. Pemilihan frekuensi kerja *power supply* akan berpengaruh pada waktu pembentukan *sheaths*.

3) Tekanan sistem

Pengaruh tekanan terhadap proses pembangkitan plasma pada tegangan dan jarak elektroda yang sama dapat dijelaskan dengan tabel sebagai berikut. Kenyataan bahwa tekanan rendah berarti tegangan *breakdown* rendah dapat dijelaskan berdasarkan persamaan *mean free path* (Lawlor dan Simpson).

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi N_V d^2} \quad (2.3)$$

dimana

$$N_V = \frac{N}{V} = \frac{p}{kT} \quad (2.4)$$

dengan λ : *mean free path* (m)
 N_V : jumlah molekul per satuan volume (m⁻³)
 d : diameter molekul (m)

Dari persamaan 2.3 dapat dilihat bahwa jalur bebas rata-rata berbanding terbalik dengan jumlah molekul persatuan volume, dan artinya berbanding terbalik pula dengan tekanan reaktor. Selanjutnya pengaruh tekanan terhadap pembentukan plasma dapat dijelaskan melalui tabel 2.3 sebagai berikut.

Tabel 2.3 Pengaruh Tekanan Terhadap Proses Pembentukan Plasma

Tekanan reaktor	Jumlah molekul	<i>Mean free path</i> (λ)	Keterangan
Tinggi	Banyak	Pendek	Probabilitas terbentuk plasma seharusnya tinggi. Namun karena λ pendek, maka energi elektron kurang dari E_i . Kurangnya energi elektron tersebut mengakibatkan plasma tidak terbentuk, karena reaksi elektron-molekul berkurang akibat jumlah elektron sekunder yang berkurang.
Terlalu rendah	Sedikit	Panjang	Probabilitas terbentuk plasma harusnya juga besar. Namun karena elektron memiliki energi kinetik yang besar, elektron bergerak dengan kecepatan tinggi dan akan dapat menumbuk anoda lalu hilang. Akibatnya plasma tidak terbentuk, karena jumlah elektron baru berkurang.

2.4 Plasma Frekuensi Radio

Plasma frekuensi radio (*RF plasma*) merupakan sistem pembangkit plasma dengan menggunakan *power supply* berfrekuensi radio. Plasma radio frekuensi umumnya digunakan pada proses *etching* dan deposisi lapisan tipis. Plasma ini umumnya digunakan apabila sampel yang akan ditreatment merupakan bahan isolator (misalnya : polimer) atau bahan semikonduktor (Bogaerts dkk., 2002). Penggunaan plasma ini pada bahan isolator maupun semikonduktor dikarenakan arus DC pada DC *glow discharge* tidak mampu bertahan dalam kondisi tersebut. Dengan sampel yang digunakan adalah isolator atau semikonduktor, yang terjadi adalah *glow discharge* akan hilang karena sampel akan dimuati terlebih dahulu oleh elektron, sehingga jumlah elektron bebas dalam plasma berkurang. Akibatnya reaksi terbentuk dan musnahnya elektron menjadi berkurang.

Untuk mengatasi kekurangan pada DC *glow discharge*, digunakan sumber tegangan ac. Syarat yang berlaku adalah frekuensi yang digunakan harus cukup tinggi agar muatan yang terbentuk pada setengah siklus pertama tidak hilang ketika arus dalam plasma mulai menuju nol. Oleh karena itu frekuensi yang dipilih adalah frekuensi radio dan umumnya yang digunakan dalam usaha membangkitkan plasma adalah 13,56 MHz. Frekuensi ini dipilih berdasarkan kesepakatan ahli komunikasi internasional untuk menghindari interferensi dengan frekuensi komunikasi.

Secara umum plasma frekuensi radio dapat dibedakan berdasarkan frekuensi kerja ($\omega_{rf} = 2\pi f_{rf}$) dan cara menghubungkan/mengkopel sumber frekuensi radio pada sistem *discharge* (Singh, 2004). Pembagian plasma berdasarkan frekuensi kerja (ω_{rf}) dilakukan dengan membandingkan frekuensi sumber terhadap nilai frekuensi elektron plasma (ω_{pe}) dan frekuensi ion plasma ω_{pi} . Berdasarkan frekuensi kerja, plasma dibagi kedalam dua daerah yaitu frekuensi rendah (*low frequency regime*) dan frekuensi tinggi (*high frequency regime*). Daerah pertama dicirikan oleh keadaan $\omega_{pe} \gg \omega_{pi} \gg \omega_{rf}$. Dalam daerah pertama gerak elektron dan ion dimodulasi oleh frekuensi medan yang diaplikasikan. Sedangkan daerah kedua yaitu daerah frekuensi tinggi dicirikan oleh keadaan $\omega_{pi} \gg \omega_{rf} \gg \omega_{pe}$. Dalam daerah kedua hanya elektron

yang mampu mengikuti frekuensi medan yang diaplikasikan, sedangkan ion tidak mampu untuk mengikuti perubahan yang terlalu cepat akibat massa ion yang lebih berat dari elektron sehingga menjadi lambat bergerak. Nilai ω_{rf} , ω_{pe} dan ω_{pi} diberikan oleh persamaan berikut.

$$\omega_{rf} = 2\pi f_{rf} \quad (2.5)$$

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (2.6)$$

$$\omega_{pi} = \sqrt{\frac{n_i e^2}{M_i \epsilon_0}} \quad (2.7)$$

Dengan n_e dan n_i adalah kerapatan elektron dan kerapatan ion, m_e dan M_i adalah massa elektron dan massa ion, e adalah muatan elektron ($1,6 \times 10^{-19}$ C) dan ϵ_0 adalah permitivitas ruang hampa ($8,85 \times 10^{-12}$ As/Vm).

Berdasarkan cara menghubungkan/mengkopel *power supply* frekuensi radio pada sistem *discharge*, plasma frekuensi radio dapat dibagi menjadi dua yaitu *Capacitively Discharge*, yang mana plasma dibangkitkan di antara dua plat sejajar, dan *Inductively Discharge* yang mana plasma dibangkitkan diantara plat sejajar yang dililit kawat. Namun untuk membangun sistem tersebut tidaklah mudah. Ada dua hal yang perlu diperhatikan yaitu (Singh, 2004):

1. Kenyataan bahwa gelombang elektromagnetik pada konduktor akan terbatas pada permukaan konduktor dan daya tembusnya dalam *discharge* akan dibatasi oleh *skin depth* (ketebalan *sheaths*) yang sangat tergantung pada kerapatan elektron bebas.
2. Impedansi plasma adalah kompleks.

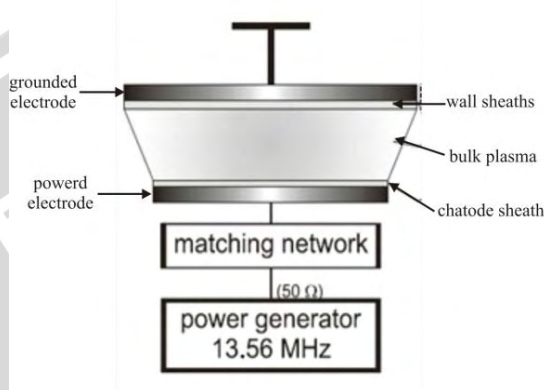
$$Z_p = R_p + jX_p \quad (2.8)$$

Dengan R_p adalah resistansi plasma dan X_p adalah reaktansi plasma.

2.5 CCD (*Capacitively Coupled Discharge*)

Salah satu metode pembangkitan plasma yang cukup sering digunakan antara lain adalah metode *capacitively coupled discharge*. Beberapa literatur juga menyebutkan dengan nama *RF diodes*. Di

sebut *capasitive* karena elektroda yang digunakan berbentuk plat sejajar layaknya kapasitor plat sejajar. *Power supply* yang digunakan umumnya pada rentang frekuensi radio. Konfigurasi reaktor pada CCD yang umum digunakan ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Skematik konfigurasi CCD (Singh, 2004)

Dari gambar dapat dilihat bahwa CCD terdiri dari dua elektroda yang disusun sejajar dan dipisahkan pada jarak tertentu. Di antara elektroda tersebut kemudian gas kerja plasma akan dialirkan. Bentuk dan ukuran dari kedua elektroda yang digunakan dapat memiliki bentuk yang sama (simetris) ataupun tidak sama (asimetris). Bentuk umum dari elektroda ini adalah lingkaran dengan bahan yang digunakan adalah aluminium atau *stainless steel*. Ukuran dari elektroda akan menentukan resultan *sheaths* yang akan muncul pada saat kondisi *discharge* mencapai stabil. Pentingnya *sheaths* dalam CCD adalah sebagai media penghantar arus maupun tegangan frekuensi radio yang diaplikasikan. Tekanan gas yang umum untuk membangkitkan plasma pada CCD adalah pada rentang $1-10^3$ Pa. *RF power supply* umumnya dihubungkan dengan penyesuaian impedansi yang disebut sebagai '*matching network*' atau '*matching impedance*'. *Matching network* dibutuhkan untuk menyesuaikan impedansi *power supply* dengan impedansi sistem *discharge*. Hal ini karena setiap generator frekuensi radio mempunyai impedansi riil yang tetap (umumnya adalah 50 Ohm), sedangkan reaktor dan *discharge* memiliki impedansi yang kompleks. Impedansi yang sesuai antara *power supply* dengan beban (reaktor dan *discharge*), akan membuat

transfer energi menjadi maksimum dan energi yang dikembalikan pada sumber akan diminimalisir (Conrads dan Schmidt, 2000).

Mekanisme terbentuknya plasma pada CCD adalah elektron bebas dalam reaktor, akan dipercepat oleh medan yang diaplikasikan. Elektron-elektron ini akan selalu bertumbukan dengan partikel-partikel gas dan akan menghasilkan elektron bebas yang baru. Karena perbedaan massa elektron dan ion, untuk frekuensi kerja sumber yang tinggi (misal 13,56 MHz) hanya elektron yang dapat mengikuti perubahan medan. Sedangkan ion-ion akan cenderung lambat untuk mengikuti perubahan medan dengan frekuensi sebesar itu. Akibatnya temperatur elektron akan lebih tinggi dari temperatur ion, dan ini membuat CCD termasuk ke dalam golongan *non-thermal plasma*. Oleh karena itu metode ini banyak dimanfaatkan untuk sampel berbahan isolator maupun semikonduktor (Singh, 2004).

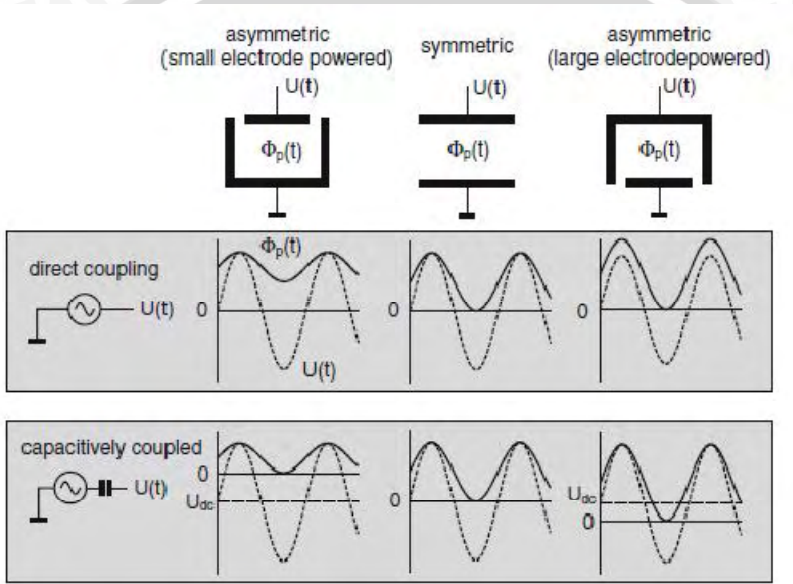
Dalam CCD elektron akan mentransfer energi yang dimilikinya kepada partikel atau atom melalui tumbukan inelastis dalam bentuk eksitasi, disosiasi, maupun ionisasi. Transfer energi ini bergantung pada arus dan tegangan RF di dalam *bulk plasma* maupun *sheaths*. Sebagai akibatnya, ada dua macam daerah operasi pada *capacitively coupled discharge* yaitu daerah α (α -*regime* atau *wave rider*) yang mana dipengaruhi oleh proses ionisasi karena proses longsor elektron (*electron avalanche*) dan daerah γ (γ -*regime* atau *secondary emission*) yang mana elektron diproduksi pada permukaan elektroda melalui emisi sekunder akibat bombardir ion. Kedua daerah operasi tersebut ditentukan berdasarkan pada tegangan yang diaplikasikan untuk proses *discharge*, yang mana pada daerah α tegangan maupun arus lebih rendah dari daerah γ (Piel, 2010).

Konfigurasi reaktor serta perubahan potensial sumber dan potensial plasma yang umum digunakan ditunjukkan pada gambar 2.9 (Piel, 2010). Dari gambar garis putus-putus merupakan tegangan yang diaplikasikan dan garis utuh merupakan potensial plasma. *Direct coupling* merupakan konfigurasi CCD yang mana *rf power supply* dihubungkan langsung pada reaktor. Sedangkan *capacitive coupled* adalah konfigurasi di mana kapasitor dipasang di antara *power supply* dan reaktor.

Aspek penting lain pada CCD akibat perbedaan massa ion dan elektron adalah fenomena *self-bias* (Bogaerts dkk., 2002).

Fenomena *self-bias* (juga disebut sebagai *DC-bias*) dapat muncul akibat dua kondisi yaitu:

1. Ukuran elektroda yang berbeda.
2. Adanya kapasitor yang dipasang antara sumber dan reaktor.



Gambar 2.9 Konfigurasi elektroda serta respon potensial sumber dan plasma terhadap waktu (Piel, 2010)

2.6 Gas Nitrogen dan Plasma Nitrogen

Nitrogen adalah unsur kimia yang dalam tabel periodik memiliki lambang N dan nomor atom 7. Nitrogen di alam bebas ditemukan sebagai gas tanpa warna, tanpa bau, tanpa rasa, merupakan gas diatomik, dan sulit berinteraksi dengan unsur atau senyawa lain. Di atmosfer bumi dapat pula ditemukan nitrogen dengan prosentase sebesar 79%. Aplikasi nitrogen didasarkan pada pemanfaatan dua prinsip dasar, baik sendiri maupun secara bersama-sama yaitu memanfaatkan rendahnya reaktivitas dan dinginnya nitrogen dalam bentuk cairan kriogenik. Dalam bentuk cairan (dengan temperatur -196°C), nitrogen dipergunakan untuk

membekukan makanan, mendaur ulang material komposit, mengawetkan material biologi, sebagai pendingin dalam pengobatan rematik, atau sebagai *refrigerant* untuk *cryosurgery*. Nitrogen disebut juga "*protective gas*", karena dapat menggantikan Oksigen dalam udara yang dapat merusak atau bahkan berbahaya untuk banyak proses. Dalam bentuk gas, nitrogen digunakan sebagai gas *inert* oleh industri kimia, petrokimia dan agro industri (Anonim¹).

Plasma nitrogen telah banyak digunakan dalam berbagai macam pemrosesan bahan antara lain *hardning*, *plasma spraying* untuk proses pemotongan logam, dan lain sebagainya. Spektrum plasma nitrogen cenderung biru keunguan dan menyala terang. Namun jika arus dalam *discharge* cukup rendah maka wana plasma yang terbentuk cenderung abu-abu. Penggunaan nitrogen sebagai bahan pembentuk plasma pada umumnya karena dibutuhkan energi yang tidak terlalu besar, karena gas nitrogen memiliki potensial ionisasi pertama yang rendah yang ditunjukkan dengan harga energi ionisasi pertama gas nitrogen. Gas nitrogen (N_2) memiliki energi ionisasi pertama sebesar 1503 kJ/mol (Lohninger).

2.7 Ruang Hampa Udara dalam Pembangkitan Plasma

Ruang hampa udara atau vakum adalah suatu kondisi lingkungan yang mana gas dalam ruangan memiliki tekanan di bawah tekanan atmosfer. Penggunaan ruang vakum secara umum bertujuan untuk mengontrol reaksi kimia maupun fisika, mengurangi tumbukan partikel-partikel dengan gas udara pada proses deposisi lapisan tipis, dan mendapatkan permukaan bahan yang bersih.

Kondisi vakum atau derajat kevakuman sangat tergantung pada tekanan gas dalam ruangan, semakin rendah tekanan gas maka semakin besar derajat vakumnya. Derajat kevakuman dapat dibagi menjadi lima rentang yang disajikan pada tabel 2.4 (Lawlor dan Simpson).

Dalam mekanisme pembentukan plasma, ketika partikel bermuatan berinteraksi satu sama lain maka partikel tersebut akan kehilangan muatannya dan menjadi netral. Bila dalam reaktor terdapat banyak atom maupun molekul gas, maka plasma akan hilang. Agar plasma dapat bertahan lama maka interaksi antar partikel harus dikurangi. Cara yang mungkin digunakan adalah dengan meningkatkan jalur bebas rata-rata (*mean free path*) partikel

dan jumlah molekul gas harus dikurangi. Hal tersebut dapat dilakukan dengan mengurangi tekanan gas, yakni menciptakan vakum (Bhatt, 2009).

Tabel 2.4 Derajat Vakum dan Aplikasi

Derajat vakum	Tekanan		Aplikasi
	Pa	mbar	
Kehampaan sangat kasar (<i>very rough vacuum</i>)	10^5 – $7 \cdot 10^4$	900–700	Media pengangkatan (<i>lifting</i>), pembersih (<i>cleaners</i>), dan <i>filtering moulding</i> .
Kehampaan kasar (<i>rough vacuum</i>)	$7 \cdot 10^4$ – 10^2	1–700	Media pendeteksi kebocoran (<i>leak detection</i>), pengeringan beku (<i>freeze drying</i>), <i>heat treatment</i> .
Hampa (<i>vacuum</i>)	10^2 – 10^{-2}	10^{-4} –1	Isolasi panas (<i>thermal insulator</i>) dan industri semikonduktor.
Kehampaan tinggi (<i>high vacuum</i>)	10^{-2} – 10^{-6}	10^{-4} – 10^{-8}	Akselerator, spektrometer massa, mikroskop elektron, dan pemisah isotop.
Kehampaan ultra tinggi (<i>ultra high vacuum</i>)	$< 10^{-6}$	$< 10^{-8}$	Studi permukaan bahan yang bersih, simulasi luar angkasa, studi korosi.

Saat ini piranti-piranti yang umum digunakan untuk menciptakan vakum yang digunakan untuk skala penelitian antara lain adalah pompa *rotary*, pompa difusi, *Pirani gauge*, dan *ionization gauge*. Piranti-piranti tersebut adalah piranti standar untuk menciptakan kondisi kehampaan tinggi yang umumnya digunakan dalam penelitian.

2.8 Pengukuran Laju Gas dengan *Rotameter*

Secara umum untuk mengontrol laju gas yang masuk ke dalam suatu reaktor digunakan *flowmeter* atau juga disebut sebagai

flow controller. Kerja *flowmeter* pada dasarnya adalah mengukur debit gas yang masuk ke dalam reaktor. Ada berbagai macam *flowmeter*, salah satunya adalah *rotameter* yaitu suatu alat ukur laju aliran fluida berdasarkan perubahan luasan dalam tabung (*variable area meter*) dan diletakkan vertikal pada sebuah sistem. Ada tiga bagian yang penting dalam *rotameter* yaitu tabung, *float*, dan skala. Tabung dalam *rotameter* memiliki bentuk meruncing pada bagian ujungnya (*tapered tube*). Pada umumnya ujung atas tabung memiliki luasan yang lebih besar dari luasan ujung bawah. *Float* atau benda yang mengapung dalam tabung sebagai penunjuk skala pembacaan berbentuk bola, silinder, atau kerucut.

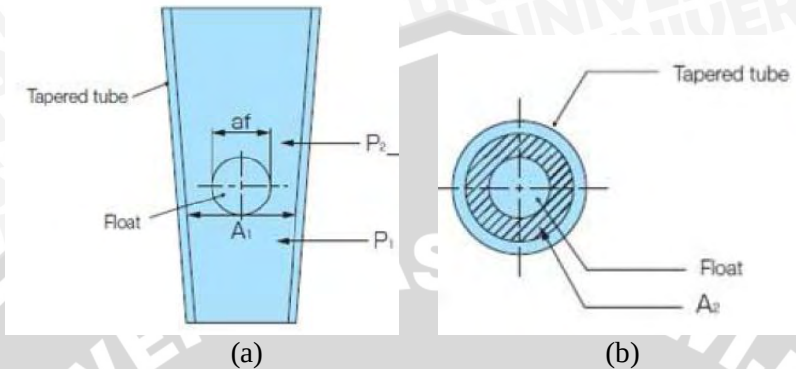


Gambar 2.10 *Rotameter*

Rotameter pada umumnya hanya diciptakan untuk mengukur laju dari satu jenis gas. Namun pada dasarnya *rotameter* dapat digunakan untuk mengukur laju gas lain dengan melakukan kalibrasi atau konversi hasil pembacaan *rotameter* yang dapat dilakukan dengan berbagai hitungan konsep dasar. Salah satu konsep yang dapat digunakan dalam konversi hasil pembacaan *rotameter* adalah konsep fluida bergerak dan juga fluida diam.

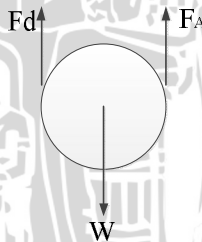
Secara umum skematik bagian-bagian dari *rotameter* ditunjukkan pada gambar 2.11 dengan keterangan pada gambar sebagai berikut:

- a_f : luas efektif bola (cm^2)
- P1 : tekanan di bawah bola (Pa)
- P2 : tekanan di atas bola (Pa)
- A1 : luas efektif tabung dibawah bola (cm^2)
- A2 : luas efektif tabung di atas bola (cm^2)



Gambar 2.11 Skematik *rotameter* (a) tampak samping, (b) tampak atas (KOFLOC)

Dari gambar skematik *rotameter*, ketika gas dialirkan menuju *rotameter* dan katup *rotameter* dibuka maka gas akan mendorong bola sehingga bola akan mengapung di dalam tabung akibat perbedaan tekanan di atas dan di bawah permukaan bola. Gaya-gaya yang dialami oleh bola ketika mengapung adalah gaya dorong gas (F_d), gaya Archimedes (Nuzula), dan gaya gravitasi (W).



Secara matematis gaya-gaya yang dialami oleh bola dapat di turunkan dari besaran-besaran fisis sebagai berikut:

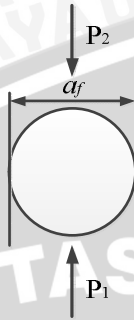
- 1) Gaya dorong yang dialami bola adalah akibat perbedaan tekanan di atas dan di bawah bola.

Tekanan di atas bola adalah

$$p_2 = \frac{F_2}{a_f} \text{ atau } F_2 = p_2 a_f$$

Tekanan di bawah bola adalah

$$p_1 = \frac{F_1}{a_f} \text{ atau } F_1 = p_1 a_f$$



Agar bola dapat terangkat maka F_d minimal harus sama dengan $F_1 - F_2$, sehingga gaya dorong yang dialami bola adalah

$$F_d = a_f(p_1 - p_2) \quad (2.9)$$

- 2) Gaya Archimedes yang dialami oleh bola adalah akibat berat gas yang dipindahkan oleh bola yaitu

$$F_A = \rho_g V_f g \quad (2.10)$$

- 3) Gaya berat yang dialami bola akibat percepatan gravitasi adalah

$$W = \rho_f V_f g \quad (2.11)$$

dengan

- a_f : luasan efektif bola
- p_1 : tekanan di bawah bola
- p_2 : tekanan di atas bola
- ρ_f : massa jenis bola
- ρ_g : massa jenis gas
- V_f : volume bola
- g : percepatan gravitasi bumi

Dalam keadaan setimbang jumlah gaya yang dialami bola adalah :

$$\begin{aligned} \sum F &= 0 \\ F_d + F_A - W &= 0 \\ F_d &= W - F_A \end{aligned} \quad (2.12)$$

Dengan mensubstitusikan (2.9), (2.10), dan (2.11) ke dalam (2.12) akan diperoleh

$$\alpha_f(p_1 - p_2) = (\rho_f - \rho_g)V_f g$$

$$p_1 - p_2 = \frac{(\rho_f - \rho_g)V_f g}{\alpha_f} \quad (2.13)$$

Gas yang mengalir melalui tabung dengan luasan yang berbeda akan memenuhi hukum-hukum dalam fluida dinamis yaitu prinsip kontinuitas dan persamaan Bernoulli. Debit atau laju aliran gas berdasarkan hukum fluida dinamis adalah

$$Q = \frac{V}{t} = A \cdot v$$

V adalah volume fluida, t adalah waktu aliran fluida, A adalah luasan efektif tabung, v adalah kecepatan fluida. Sedangkan prinsip kontinuitas mensyaratkan

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_2 \\ A_1 v_1 &= A_2 v_2 \end{aligned}$$

sehingga

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} \quad \text{dan} \quad v_2 = \frac{Q}{A_2}$$

Berdasarkan persamaan Bernoulli

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho_g (v_2^2 - v_1^2) + \rho_g g (h_2 - h_1)$$

Bila dianggap pergeseran bola sangat kecil selama bola melayang maka suku $\rho_g (h_2 - h_1)$ dapat diabaikan, sehingga persamaan Bernoulli akan menjadi

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho_g (v_2^2 - v_1^2)$$

Dengan mensubstitusikan $v_1 = \frac{Q}{A_1}$ dan $v_2 = \frac{Q}{A_2}$ maka persamaan Bernoulli akan menjadi

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho_g \left[\left(\frac{Q}{A_2} \right)^2 - \left(\frac{Q}{A_1} \right)^2 \right] \quad (2.14)$$

Dengan menyelesaikan persamaan (2.13) dan (2.14) maka akan dihasilkan persamaan laju aliran gas yaitu

$$Q = \frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{2g \left(\frac{\rho_f - \rho_g}{\rho_g} \right) \frac{V_f}{\alpha_f}} \quad (2.15)$$

Karena massa jenis gas (ρ_g) jauh lebih kecil dari massa jenis bola (ρ_f) maka persamaan diatas dapat ditulis

$$Q = \frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{2g \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right) \frac{V_f}{a_f}} \quad (2.16)$$

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan Mei 2011 hingga Januari 2012 dan bertempat di Laboratorium Biofisika Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Brawijaya.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Peralatan yang digunakan untuk membangkitkan plasma pada penelitian ini antara lain adalah sistem vakum yang terdiri dari pompa *rotary* dan ruang vakum, *flowmeter* gas, reaktor plasma terdiri dari sungkup dan dua elektroda sejajar, DC/AC *power inverter*, transformator *matching impedance*, dan sensor Bayard-Alpert *ionization gauge* beserta *power supply* sensor. Bahan yang digunakan untuk plasma adalah satu tabung gas nitrogen volume 7 m³ dengan kemurnian tingkat tinggi yakni 99,999%.

3.3 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu

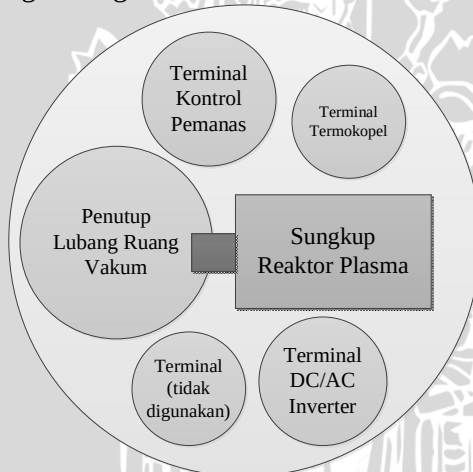
1. Perancangan elektroda meliputi pengukuran pada ruang vakum.
2. Pembuatan elektroda sebagai reaktor plasma.
3. Perbaikan sensor Bayard-Alpert *ionization gauge* dan pengujian.
4. Integrasi instrumen pembangkit plasma.
5. Pembangkitan plasma tahap I (tanpa *matching impedance*)
6. Pembangkitan plasma tahap II (setelah dibangun *matching impedance*).

3.4 Perancangan dan Pembuatan Alat

3.4.1 Perancangan dan Pembuatan Elektroda

Perancangan elektroda pembangkit plasma dimaksudkan sebagai acuan pembuatan elektroda. Perancangan dimulai dengan

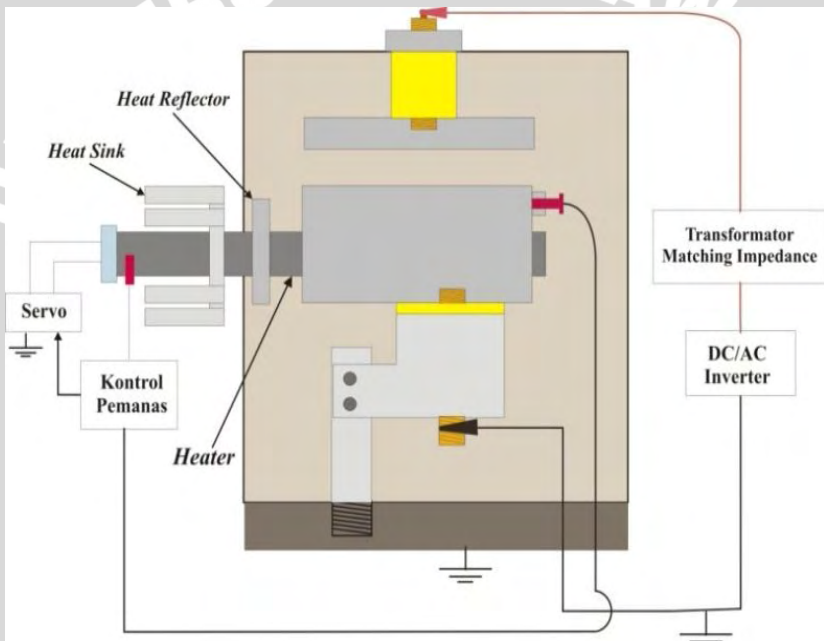
melakukan observasi ruang vakum untuk menentukan letak elektroda dan beberapa konektor termasuk di dalamnya adalah persiapan sistem vakum. Persiapan yang dimaksud di sini adalah melakukan pembersihan seluruh instalasi sistem vakum dengan menggunakan alkohol 96% (atau konsentrasi 90% yang merupakan standar fluida yang digunakan untuk membersihkan sistem vakum) dan melakukan pemeriksaan kondisi sistem vakum. Sistem vakum ini terdiri dari pompa *rotary*, ruang vakum, beberapa katup (*valve*), pengukur tekanan, dan beberapa kabel konektor. Setelah dilakukan observasi didapatkan posisi terminal kelistrikan dalam ruang vakum yang ditampilkan seperti gambar 3.1. Dalam penelitian ini terminal untuk kontrol pemanas dan DC/AC *power inverter* telah terpasang sebelumnya. Sehingga dibuat satu lagi terminal untuk termokopel yang dibuat dari bahan *teflon* dengan 4 buah konduktor yang terbuat dari logam as kuningan dengan diameter 4 mm.



Gambar 3.1 Posisi Terminal dan Sungkup Reaktor Plasma

Sungkup reaktor plasma adalah suatu ruang dengan bentuk balok yang memiliki ukuran panjang, lebar, dan tinggi berturut-turut 8,5 cm , 5 cm dan 12 cm. Sungkup ini terbuat dari bahan *stainless steel* dengan ketebalan 2,7 mm. Sungkup dibuat karena dinding ruang vakum terbuat dari kaca, sehingga tidak ada penghubung elektroda dengan *ground*. Sedangkan di dalam sungkup ini terdapat reaktor plasma yaitu ruang di antara dua elektroda sejajar.

Konfigurasi reaktor yang ada di dalam sungkup serta koneksi kelistrikannya lebih lanjut diberikan pada gambar 3.2. Warna kuning menunjukkan keramik yang berfungsi sebagai isolator. Untuk isolator bagian bawah berfungsi memisahkan elektroda bawah dengan *ground* dan digunakan dari bahan keramik piring. Untuk isolator bagian atas digunakan keramik busi, di mana elektroda busi digunakan sebagai konektor elektroda dengan *power supply* sedangkan keramiknya sebagai isolator elektroda dengan *ground*. Gambar berwarna merah menunjukkan termokopel.

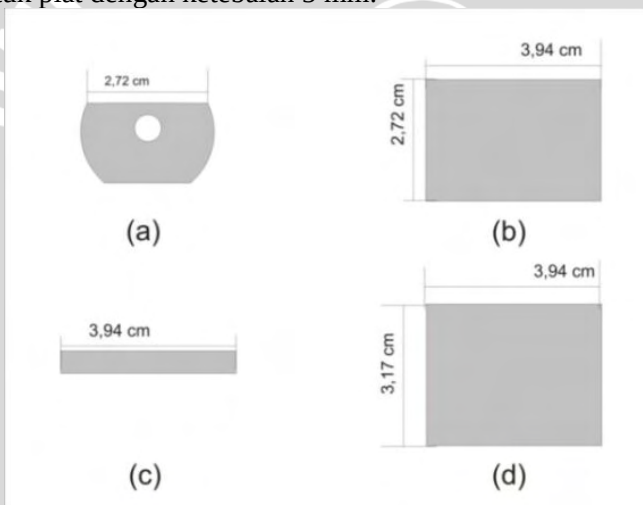


Gambar 3.2 Skematik rangkaian reaktor di dalam sungkup

Heat reflector terbuat dari *stainless steel* yang sama dengan bahan sungkup. Bentuk dari *heat reflector* adalah lingkaran dengan diameter 39,41 mm. Fungsi dari *heat reflector* adalah mengembalikan panas dari *heater* untuk menjaga pangkal *heater* lebih dingin dari batang *heater*. *Heat sink* yang terpasang pada *heater* terbuat dari bahan aluminium dimaksudkan untuk menjaga pangkal *heater* lebih dingin dari batang *heater*, sehingga tidak terjadi kerusakan pada *heater*. *Heater* merupakan elemen pemanas yang

memiliki spesifikasi 300 W/120 V dengan bentuk batang yang memiliki ukuran panjang 70,00 mm dan diameter 6,30 mm. Jarak antar elektroda dirancang agar dapat diubah dengan cara menambahkan *ring* dengan ketebalan 3 mm pada baut pengunci busi yang terletak di bagian atas sungkup.

Elektroda terbuat dari *steinless steel* berbentuk batang as (pejal) dengan diameter 3,2 cm yang kemudian dipotong dengan bentuk dan ukuran yang ditunjukkan pada gambar 3.3. Untuk elektroda bagian bawah berfungsi sebagai meja substrat dan sekaligus tempat *heater*. Oleh karena itu elektroda bagian bawah dilubangi dengan diameter 6,32 mm dan terletak kurang lebih 6 mm dari permukaan elektroda. Untuk elektroda bagian atas dipotong berbentuk plat dengan ketebalan 5 mm.

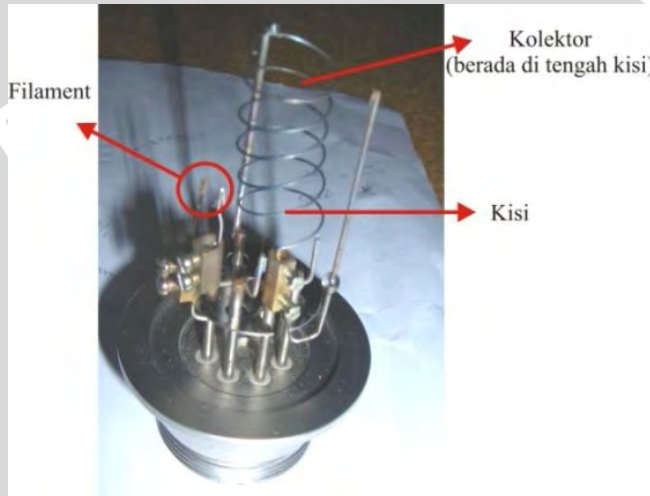


Gambar 3.3 Bentuk elektroda (a) penampang lintang elektroda bawah, (b) elektroda bawah tampak atas, (c) elektroda atas tampak samping, (d) elektroda atas tampak atas

3.4.2 Perbaikan Piranti Sistem Pengukuran Tekanan Metode Ionisasi

Setelah dilakukan persiapan sistem vakum, diketahui bahwa sistem pengukur tekanan vakum yakni *Pirani gauge* mengalami kerusakan dan tidak dapat digunakan kembali. Kerusakan yang dialami adalah ketika monitor *Pirani gauge* dinyalakan dan

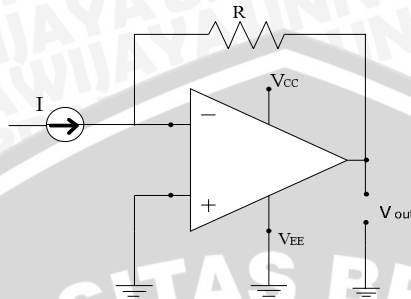
bersamaan dengan itu pompa rotary juga dinyalakan, monitor telah menunjukkan hasil pembacaan vakum sebesar 10^{-3} Torr. Oleh karena itu dilakukan metode lain untuk mengukur tekanan sistem, yakni menggunakan sensor *Bayard-Alpert ionization gauge*. Sistem pengukuran ini sebelumnya merupakan hasil tugas akhir mahasiswa pada tahun 2007, Faiz Nuzula. Namun sensor ini memerlukan beberapa perbaikan.



Gambar 3.4 Sensor Bayard-Alpert.

Kondisi kawat kisi pada sensor perlu dilakukan penggantian karena patah. Kawat kisi diganti menggunakan kawat *molibdenum* (mo) dengan diameter kawat 0,8 mm, digulung *helix* dengan diameter penampang gulungan 22 mm dan panjang gulungan 45 mm. Untuk filamen diganti berdasarkan penelitian sebelumnya yaitu menggunakan *tungsten* yang diambil dari lampu bohlam Philips 75 watt (Nuzula, 2007).

Berdasarkan pada penelitian sebelumnya, hasil pembacaan tekanan dengan metode ionisasi adalah berupa tegangan. Namun instrumen yang ada di laboratorium tidak dilengkapi dengan I-V konverter. Oleh karena itu dilakukan pembuatan rangkaian pengubah arus menjadi tegangan (I-V konverter) dengan menggunakan IC LF 351. Rangkaian I-V konverter ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Rangkaian I-V Konverter
(Nuzula, 2007)

Sumber daya (V_{CC}) yang digunakan berupa $V_{DC} + 15$ volt dan V_{EE} dihubungkan pada $V_{DC} - 15$ volt. Rangkaian I-V konverter ini merupakan rangkaian *inverting op-amp* dengan faktor penguatan rangkaian ini tergantung pada nilai R . Dalam rancangan ini digunakan R sebesar 1 kOhm. Tegangan keluaran *op-amp* yang dihasilkan akan dapat ditentukan sebagai

$$V = I \cdot R \quad (3.1)$$

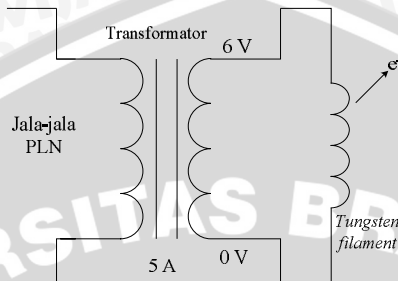
3.5 Pengujian Kerja Alat

Pengujian kerja alat dilakukan untuk mengetahui kemampuan alat yang telah dibuat dapat berfungsi sesuai dengan rancangan serta diharapkan akan diperoleh gambaran mengenai fungsi masing-masing alat yang telah dibuat, serta kelemahan-kelemahan yang akan berguna dalam proses perbaikan selanjutnya.

3.5.1 Pengujian Penggantian Filamen

Filamen yang digunakan sebagai sumber emisi elektron berasal dari lampu pijar dengan daya 75 watt yang umumnya dipasang pada tegangan jala-jala PLN. Oleh karena itu dibutuhkan pengujian seberapa panjang filamen yang digunakan untuk dipasang pada sumber daya AC 6 V/5 A sehingga filamen dapat menyala. Untuk menentukan panjang *tungsten* yang dibutuhkan (L) agar dapat menyala dengan sumber tersebut, Nuzula telah melakukan perhitungan dengan mendefinisikan panjang sebagai hambatan (R). Hasil yang diperoleh adalah $L \leq 0,4 L_0$. Berdasarkan penelitian

tersebut filamen dapat menyala dengan $\pm \frac{1}{4}$ panjang *tungsten* mula-mula. Rangkaian pengujian filamen ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Skema pengujian filamen
(Nuzula, 2007)

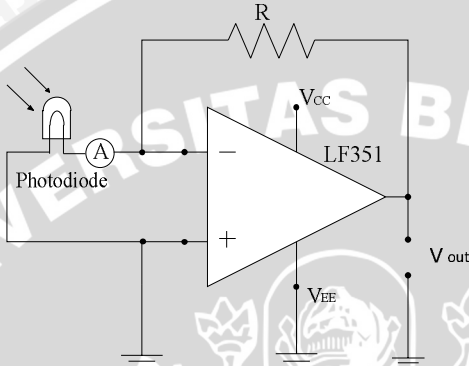
Proses pengujian kerja filamen dimulai dengan melakukan evakuasi udara dari ruang vakum menggunakan pompa *rotary*, selanjutnya dilakukan pengamatan terhadap nyala filamen, menyala atau tidak menyala. Pada penelitian sebelumnya pengamatan nyala *tungsten* dilakukan ketika monitor *Pirani gauge* telah menunjukkan tekanan vakum 10^{-3} Torr. Syarat ini karena *tungsten* akan mudah terbakar pada tekanan lebih besar dari 10^{-3} Torr akibat oksidasi dengan udara yang masih tertinggal di dalam ruang vakum.

Dalam penelitian ini tidak dapat diketahui waktu yang pasti untuk melakukan proses vakum hingga tekanan yang sesuai untuk melakukan pengamatan nyala filamen, sehingga dilakukan proses *trial* berbagai konfigurasi waktu evakuasi. Waktu evakuasi dilakukan beberapa kali mulai dari 30 menit hingga 3 jam dengan interval 30 menit. Keputusan ini didasarkan pada hasil laporan Nuzula yang menyebutkan bahwa untuk dapat mencapai tekanan 10^{-3} Torr diperlukan waktu 30 menit, namun berdasarkan hasil laporan pemakaian terakhir pada tahun 2010 (Mulyani, 2010) waktu yang dibutuhkan adalah 3 jam. Selain itu sangat sulit untuk mendapatkan panjang *tungsten* sebesar $\frac{1}{4}$ panjang mula-mula, sehingga panjang *tungsten* bervariasi dari $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, dan $\frac{1}{2}$ panjang mula-mula.

3.5.2 Pengujian Rangkaian I-V konverter

Pengujian rangkaian I-V konverter berfungsi untuk mengetahui kemampuan kerja rangkaian. Skematik rangkaian uji I-V

konverter diberikan pada gambar 3.7. Dalam pengujian ini *photodiode* digunakan sebagai sumber arus rangkaian yang disinari lampu. Intensitas cahaya lampu yang diperkuat akan membuat besar arus yang diukur dengan amperemeter berubah. Tegangan keluaran (V_{out}) yang dihasilkan oleh *op-amp* diukur menggunakan voltmeter.



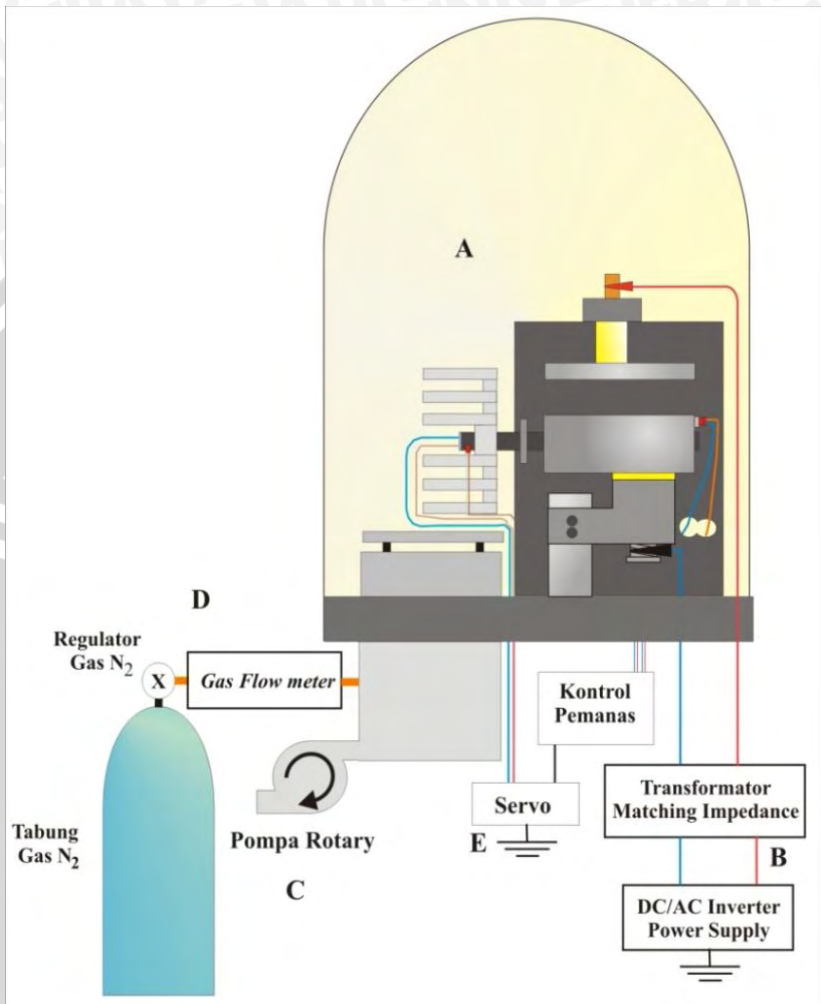
Gambar 3.7 Skematik rangkaian uji I-V konverter

3.5.3 Pengujian tekanan vakum

Tekanan vakum sangat penting untuk diketahui dalam suatu sistem plasma. Namun karena keterbatasan hasil pengujian penggantian filamen, sehingga pengujian tekanan vakum pada penelitian ini tidak dapat dilaksanakan.

3.5.4 Integrasi Instrumen dan Pengujian Pembangkitan Plasma

Instrumen yang telah dibangun oleh mahasiswa lain yaitu sumber daya frekuensi radio dan sistem kontrol pemanas, selanjutnya dirangkai dalam reaktor yang dibangun dalam penelitian ini seperti ditunjukkan pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 *Setting* Eksperimen

Keterangan gambar 3.8

- A. Ruang Vakum dan Reaktor Plasma
- B. Sumber Tenaga Pembangkit Plasma
- C. Pompa Rotary
- D. Sistem Instalasi Gas
- E. Sistem Kontrol Pemanas

Seperti telah disebutkan pada subbab tahapan penelitian, dalam usaha membangkitkan plasma dengan sistem yang telah dibangun ini dilakukan pengujian dalam dua tahap. Tahap I adalah membangkitkan plasma setelah *power supply* berhasil dibangun, sehingga pada tahap I pengujian pembangkitan plasma dilakukan tanpa transformator *matching impedance*. Berdasarkan hasil pengujian tahap I selanjutnya dilakukan perbaikan pada sistem *power supply* yakni penambahan transformator *matching impedance*, sehingga pada tahap II pembangkitan plasma dilakukan dengan menggunakan transformator *matching impedance*. Baik tahap I maupun tahap II proses pembangkitan dilaksanakan tanpa mengoperasikan sistem kontrol temperatur.

Langkah-langkah yang dilakukan untuk membangkitkan plasma pada pengujian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Seluruh instrumen yang berkaitan dalam penelitian ini dirangkai seperti pada gambar *setting* eksperimen.
- 2) Memeriksa koneksi kelistrikan antar komponen dalam reaktor menggunakan multimeter untuk menghindari adanya hubungan singkat.
- 3) Memastikan seluruh katup pada sistem vakum telah tertutup dengan benar untuk menghindari adanya kebocoran sistem.
- 4) Melakukan evakuasi udara dari dalam ruang vakum dengan menyalakan pompa *rotary* kemudian membuka katup pembuangan yang terletak pada pompa.
- 5) Setelah proses evakuasi berlangsung ± 3 jam dan dalam kondisi pompa masih menyala, katup pembuangan pada pompa ditutup terlebih dahulu kemudian dibuka kembali sesuai variabel pengujian dan gas nitrogen dialirkan ke dalam vakum sesuai dengan variabel pada masing-masing tahap pengujian pula.
- 6) Setelah gas nitrogen dialirkan selama lebih kurang 5 menit, kemudian gas diinjeksi dengan medan listrik dengan cara menyalakan DC/AC *power inverter* yang juga disesuaikan dengan variabel pada masing-masing tahap pengujian.
- 7) Kemudian reaktor diamati, terdapat nyala cahaya atau tidak.
- 8) Setelah selesai melakukan pengamatan, sumber daya dan pompa selanjutnya dimatikan. Kemudian udara dari luar vakum dimasukkan ke dalam ruang vakum dengan cara membuka katup yang ada pada sistem vakum.

Sejumlah variabel bebas dan kontrol penelitian pada masing-masing tahap pengujian sistem plasma diberikan pada tabel 3.1 sebagai berikut.

Tabel 3.1 Variabel-Variabel Penelitian

Tahap	Variabel bebas	Variabel kontrol
I.a	• Frekuensi (f) : 30,40,50,60,70,& 80 kHz (dengan perubahan frekuensi, tegangan <i>power supply</i> juga mengalami perubahan berkisar antara 60-145 V) • Jarak elektroda (d) : 0,26 ; 0,47 ; 0,64 & 0,86 cm • Skala <i>flowmeter</i> (S) : 100,200,300,400, & 500 ml/min	• Waktu evakuasi vakum : 3 jam • Jeda pengubahan <i>flowmeter</i> : 3 menit • Lebar bukaan katup pembuangan pompa : $\frac{1}{2}$ bagian.
I.b	• Frekuensi (f) : 30,40,50,60,70,& 80 kHz (dengan perubahan frekuensi, tegangan <i>power supply</i> juga mengalami perubahan berkisar antara 60-145 V) • Jarak elektroda (d) : 0,26 ; 0,47 ; 0,64 & 0,86 cm • Lebar katup pembuangan : $\frac{1}{2}$,1,1 $\frac{1}{2}$,2,2 $\frac{1}{2}$,3, 3 $\frac{1}{2}$, & 4 putaran	• Waktu evakuasi vakum : 3 jam • Jeda pengubahan lebar bukaan katup pembuangan pompa : 3 menit • Skala <i>flowmeter</i> (S) : 500 ml/min
II.	• Jarak elektroda (d) : 0,26 ; 0,47 ; 0,64 & 0,86 cm	• Waktu evakuasi :3 jam • Skala <i>flowmeter</i> :500 ml/min • Frekuensi <i>power</i> : 50 kHz • Tegangan <i>power</i> :508 V

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Keuntungan yang ditawarkan dari teknologi plasma yaitu kurang perlunya pemenuhan syarat kesetimbangan reaksi secara kimia selama pemrosesan suatu bahan, membuat teknologi ini berkembang cepat bahkan telah merambah bidang industri. Pada umumnya sistem plasma akan dibangkitkan dengan menggunakan *power supply* yang memiliki frekuensi kerja 13,56 MHz. Namun saat ini sistem plasma juga telah dikembangkan pada frekuensi lain, seperti sistem plasma yang telah dibangun oleh profesor Tatzuhiko Aizawa dengan frekuensi kerja 2 MHz. Dari sini dapat dilihat bahwa sistem plasma yang banyak berkembang, bekerja pada rentang frekuensi radio. Plasma yang seperti ini selanjutnya disebut sebagai *RF plasma* dan banyak digunakan khususnya dalam pemrosesan bahan yang bersifat dielektrik maupun semikonduktor.

Tidak terikatnya frekuensi kerja sistem plasma yang harus bernilai 13,56 MHz serta luasnya aplikasi plasma yang bekerja pada frekuensi radio, kelompok riset *Green_Plasma* mencoba untuk membangun sendiri sistem plasma dengan frekuensi kerja yang masih dalam orde MHz. Namun karena keterbatasan komponen yang ada di Indonesia, *power supply* yang dibangun hanya mampu menghasilkan frekuensi dalam orde kHz pada rentang 25-100 kHz dengan keluaran gelombang kotak dan tegangan keluaran puncak-ke-puncak (Vpp) 146 volt ac. Setelah *power supply* dapat dibangun kemudian dilakukan pengujian sistem plasma. Hasil serta pembahasan pengujian sistem plasma selanjutnya dijabarkan sebagai berikut.

4.1 Sistem Reaktor Plasma

Berdasarkan desain pada bab metodologi, reaktor plasma dibangun menggunakan sejumlah instrumen yang telah tersedia di jurusan Fisika FMIPA UB. Sistem reaktor plasma ini terdiri dari sistem vakum, elektroda plasma, *power supply*, *matchhing impedance*, dan instalasi gas. Spesifikasi masing-masing instrumen yang digunakan dalam membangun sistem reaktor plasma pada penelitian diberikan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Spesifikasi Sistem Reaktor Plasma

No.	Instrumen	Spesifikasi
1.	Sistem vakum	- Volume vakum (<i>belljar</i>) : 8,6 liter - Pompa kerja : pompa <i>rotary</i> - Pengukur tekanan : tidak ada
2.	Elektroda	- Bahan : <i>stainless steel</i> as silinder - Penampang luas elektroda : • Atas : 3,94 x 3,17 cm • Bawah : 3,94 x 2,72 cm
3.	<i>Power supply</i>	- DC/AC <i>power inverter</i> - Tegangan: 146 V (Vpp) ac - Sinyal tegangan : kotak - Frekuensi : 25 – 100 kHz
4.	<i>Matching impedance</i>	- Transformator <i>step-up</i> - Inti : ferrit E - Didesain untuk frekuensi 50 kHz - Lilitan primer : 20 - Lilitan sekunder : 60
5.	Instalasi gas	- Tabung gas nitrogen volume 7,3 m³ - Kemurnian : UHP 99,999 % - Regulator nitrogen - <i>Flowmeter</i> : <i>flowmeter</i> gas hidrogen maksimum 500 ml/mnt

4.1.1 Sistem Vakum

Jurusan Fisika Universitas Brawijaya memiliki sistem vakum yang mampu menghasilkan tekanan vakum hingga 10^{-7} Torr dengan tambahan pompa Turbo (Nuzula, 2007). Sistem vakum yang telah dimiliki, memungkinkan sistem plasma dapat dibangun di Jurusan Fisika. Oleh karena itu, sebelum digunakan sebagai reaktor plasma kondisi sistem vakum yang dimiliki diobservasi terlebih dahulu.

Hasil observasi awal pada sistem vakum adalah terdapat kerusakan pada beberapa piranti yaitu pengukur tekanan *Pirani gauge* dan pompa Turbo. Bentuk kerusakannya adalah *Pirani gauge* tidak mampu membaca tekanan vakum dengan benar. Saat pompa *rotary* baru saja dinyalakan, monitor *Pirani gauge* telah

menunjukkan hasil pembacaan tekanan sebesar 10^{-3} Torr. Menurut Nuzula (2007), dalam keadaan normal *Pirani gauge* akan menunjukkan hasil pembacaan sebesar 10^{-3} Torr jika pompa *rotary* telah bekerja selama ± 30 menit. Namun menurut pengguna terakhir sistem vakum ini yaitu Mulyani (2010), sistem vakum mencapai tekanan 10^{-3} Torr dalam waktu ± 3 jam. Kerusakan yang dialami pompa Turbo adalah pompa tidak dapat lagi bekerja. Dari kerusakan beberapa piranti maka sistem vakum saat ini mampu bekerja hanya dengan pompa *rotary* dengan tekanan maksimum vakum yang mampu dicapai sebesar 10^{-3} Torr dan tanpa pengukur tekanan yang memadai.

Kerusakan yang terjadi pada *Pirani gauge* membuat pengukuran tekanan sistem vakum sulit untuk diketahui. Namun terdapat cara lain agar tekanan vakum dapat terukur yakni dengan menggunakan metode *ionization gauge* yang sebelumnya telah dilakukan oleh Nuzula pada tahun 2007. Metode ini merupakan metode pengukuran tekanan secara tidak langsung yaitu melalui pengukuran jumlah partikel di dalam ruang vakum. Sensor yang digunakan adalah *Bayard Alpert nude gauge* yang memiliki tiga bagian yaitu filamen sebagai penghasil elektron, kawat kisi, dan kawat kolektor ion. Prinsip kerja metode ionisasi ini adalah mengukur ion-ion yang diakibatkan oleh tumbukan elektron yang berasal dari katoda (filamen) yang dipercepat menuju anoda (kawat kisi) dengan molekul gas. Di dalam perjalanannya elektron akan menumbuk molekul gas dan menyebabkan ionisasi. Ion-ion ini kemudian akan bergerak menuju kawat kolektor yang berpotensi nol dan terukur sebagai arus pada rangkaian di luar sensor.

Dikarenakan kondisi sistem pengukur tekanan, metode ionisasi juga tidak dapat dengan mudah diterapkan pada penelitian ini. Sistem pengukuran *ionization gauge* yang telah dibangun sebelumnya oleh Nuzula memerlukan beberapa perbaikan yaitu penggantian filamen dan kawat kisi, serta pembuatan I-V konverter.

Penggantian filamen didasarkan pada penelitian sebelumnya yakni filamen diambil dari *tungsten* lampu bohlam Philips 75 watt dengan panjang filamen yang dibutuhkan adalah $\pm \frac{1}{4}$ panjang mula-mula. Filamen tersebut dinyalakan dalam kondisi ruang vakum yang udara didalamnya telah dievakuasi sesuai waktu yang disebutkan

pada metodologi. Hasil pengujian filamen diberikan pada Lampiran 1 halaman 75.

Setelah dilakukan berbagai konfigurasi panjang *tungsten* dan waktu vakum, kawat filamen tetap tidak dapat menyala dalam waktu lama dan akhirnya terbakar. Penyebab utama *tungsten* terbakar dapat dikarenakan oksidasi dengan udara yang masih tertinggal di dalam vakum. Kondisi ini menunjukkan bahwa tekanan ruang vakum masih lebih besar dari 10^{-3} Torr. Prinsip pengukuran dengan metode ionisasi sangat bergantung pada jumlah elektron yang lepas dari filamen kemudian bertumbukan dengan molekul-molekul gas dalam ruang vakum. Namun karena filamen tidak dapat menyala lama dalam vakum, pengukuran tekanan vakum pun tidak dapat dilakukan. Akibatnya tekanan dalam penelitian ini tidak dapat diketahui secara pasti.

Piranti lain yang harus dibuat dalam sistem pengukur tekanan ini adalah I-V konverter. Berbeda dengan pembuatan I-V konverter yang dibuat oleh Nuzula dengan menggunakan IC LF411, pada penelitian ini I-V konverter dibuat dengan menggunakan IC LF351. Data hasil pengujian I-V konverter yang telah dibuat ditunjukkan pada tabel 4.2.

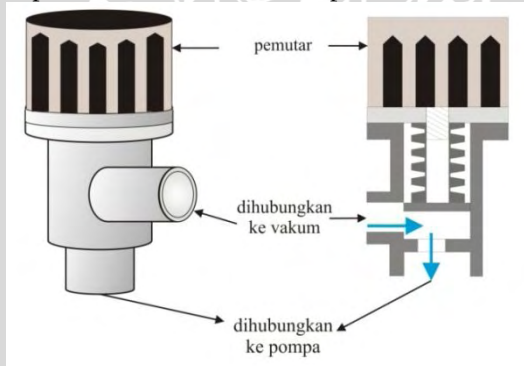
Tabel 4.2 Data hasil pengujian I-V Konverter

No	I _{in} (mA)	V _{out} (volt)	V _{teori} (volt)
1	0,181	0,184	0,181
2	0,170	0,173	0,170
3	0,160	0,163	0,160
4	0,151	0,154	0,151
5	0,140	0,143	0,140
6	0,131	0,133	0,131
7	0,120	0,121	0,120
8	0,110	0,110	0,110
9	0,100	0,100	0,100
10	0,090	0,090	0,090

Dari hasil tersebut hasil pembacaan dengan voltmeter berbeda dengan hasil perhitungan tegangan secara teori. Kesalahan ini dapat dikarenakan terdapat harga toleransi pada masing-masing

komponen yang digunakan sehingga hasil pembacaan tidak sesuai dengan teori.

Bagian lain dari sistem vakum yang juga menjadi perhatian khususnya pada pengujian tahap 1.a adalah terbukanya katup pembuangan pada pompa yang cukup lebar. Pembukaan katup setengah bagian (± 2 putaran pemutar katup), dilakukan dengan tujuan agar gas nitrogen yang dimasukkan ke dalam ruang vakum dapat mengalir dan molekul di dalamnya dapat terus berganti dengan molekul yang baru. Namun karena pembukaan katup yang cukup lebar, terdapat kemungkinan bahwa tidak terjadi interaksi antara elektron utama dan molekul gas akibat tertarik keluar sistem. Katup pembuangan yang terpasang pada pompa adalah *plate valve* yang sketsanya diberikan pada gambar 4.1. Anak panah warna biru merupakan arah aliran udara. Sekat dalam katup ini berbentuk piringan. Jika pemutar diputar sebanyak empat kali dalam usaha membuka katup, maka sekat dalam katup akan terbuka seluruhnya.



Gambar 4.1 Skematik Katup Pembuangan (Lawlor dan Simpson)

4.1.2 Elektroda Reaktor Plasma

Elektroda reaktor plasma merupakan dua buah logam yang disusun sejajar satu sama lain dan diletakkan di dalam sungkup. Kedua elektroda terbuat dari *stainless steel* silinder pejal (as) yang di potong sesuai dengan bentuk seperti pada gambar 3.3. Ukuran dari masing-masing elektroda seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.1 memiliki luas penampang sebagai berikut :

- Atas $\rightarrow 3,94 \times 3,17 \text{ cm} = 12,5 \text{ cm}^2 = 12,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
- Bawah $\rightarrow 3,94 \times 2,72 \text{ cm} = 10,7 \text{ cm}^2 = 10,7 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

Ukuran yang berbeda antara kedua elektroda dikarenakan kesulitan pada proses pemotongan bahan akibat kerasnya bahan tersebut. Jarak pisah kedua elektroda dapat dirancang untuk dapat diubah-ubah. Pengubahan jarak elektroda dapat dilakukan dengan menambahkan *ring* pada busi yang terletak pada permukaan atas sungkup. Beberapa jarak elektroda yang dapat dihasilkan dengan cara ini adalah 2,6 mm, 4,7 mm, 6,4 mm, dan 8,6 mm.

Secara kelistrikan, elektroda yang diletakkan sejajar satu sama lain dan terpisah pada jarak tertentu akan tampak seperti sebuah kapasitor. Hal ini akan turut mempengaruhi impedansi dari sistem plasma. Impedansi reaktor saat plasma belum terbentuk adalah murni berupa kapasitor plat sejajar (Gesche, 2005), di mana impedansi kapasitor (reaktansi kapasitif, X_C) yang dihubungkan pada sumber tegangan ac dapat ditentukan melalui persamaan (4.1).

$$X_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \quad (4.1)$$

X_C adalah reaktansi kapasitif, f adalah frekuensi sumber tegangan, dan C adalah kapasitansi kapasitor.

Karena jarak elektroda yang dapat diubah-ubah, maka kapasitansi elektroda juga akan berubah. Kapasitansi elektroda pada berbagai jarak tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan kapasitansi kapasitor plat sejajar.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (4.2)$$

dengan

- C = kapasitansi kapasitor (Farad)
- A = Luas efektif permukaan plat (Anonim^2)
- d = jarak pisah dua plat sejajar (m)
- ϵ_0 = permitivitas ruang hampa ($8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$)
- ϵ_r = permitivitas relatif (untuk gas nitrogen yaitu 1,00055)

Maka kapasitansi elektroda pada masing-masing jarak dapat dihitung menggunakan persamaan 4.2 dengan luasan efektif elektroda adalah

$$A = \frac{A_{atas} + A_{bawah}}{2}$$

$$A = \frac{(12,5 + 10,7) \times 10^{-4}}{2} \text{ m}^2 = 11,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Tabel 4.3 Kapasitansi Elektroda Reaktor Plasma

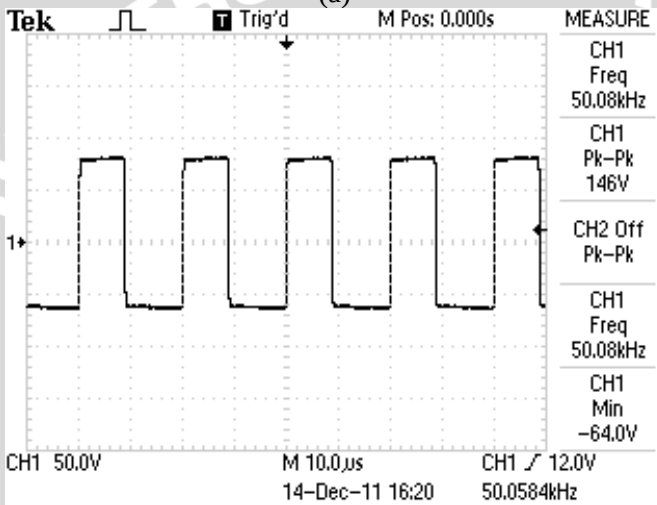
No.	Jarak elektroda (m)	Kapasitansi elektroda (F)
1.	$2,6 \times 10^{-3}$	$3,95 \times 10^{-12}$
2.	$4,7 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-12}$
3.	$6,4 \times 10^{-3}$	$1,60 \times 10^{-12}$
4.	$8,6 \times 10^{-3}$	$1,19 \times 10^{-12}$

4.1.3 Power Supply Sistem Plasma

Power supply sistem plasma yang digunakan pada penelitian ini adalah DC/AC *power inverter* yang telah dibangun oleh kelompok riset *Advanced System Material Technology* (ASMAT) di Jurusan Fisika Universitas Brawijaya. DC/AC *power inverter* ini memiliki rentang frekuensi 25–100 kHz dengan tegangan keluaran 146 V_{pp} dan sinyal *output* tegangan berupa gelombang kotak. Impedansi dari *power supply* ini adalah 333,33 Ohm. Gambar dari DC/AC *power inverter* serta sinyal *output* tegangan diberikan pada gambar 4.2. Tegangan dan frekuensi yang dihasilkan, memungkinkan DC/AC *power inverter* dapat digunakan sebagai pembangkit plasma. Seperti yang telah dijelaskan pada bagian pembukaan bab ini, bahwa *power supply* ini awalnya dibangun dengan tujuan dapat menghasilkan frekuensi dalam orde MHz. Namun keterbatasan ketersediaan komponen elektronik, membuat *power supply* yang dibangun hanya mampu menghasilkan frekuensi kerja dalam orde kHz.



(a)



(b)

Gambar 4.2 (a) DC/AC *power inverter* ; (b) Sinyal tegangan *output* DC/AC *power inverter* (Susanto, 2012)

4.1.4 Transformer Matching Impedance

Dalam sistem plasma yang dibangkitkan dengan menggunakan *power supply* berfrekuensi radio, dibutuhkan sebuah penyesuai impedansi antara *power supply* dengan beban atau sering disebut sebagai *matching impedance*. Penyesuai impedansi dibutuhkan karena setiap generator frekuensi radio mempunyai impedansi riil yang tetap (umumnya adalah 50 Ohm), sedangkan reaktor dan *discharge* memiliki impedansi yang kompleks (Gesche,

2005). Impedansi yang sesuai antara *power supply* dengan beban (reaktor dan *discharge*), akan membuat transfer energi menjadi maksimum dan energi yang dikembalikan pada sumber akan diminimalisir.

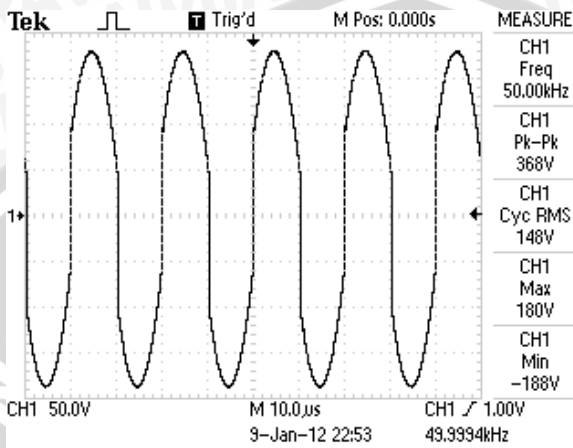
Komponen listrik yang digunakan sebagai *matching impedance* pada penelitian ini berupa transformator inti ferrit E dengan kawat yang digunakan adalah kawat tembaga *email*. Transformator yang dibangun merupakan transformator *step-up* dengan perbandingan lilitan $N_p : N_s = 20 : 60$. Tegangan keluaran DC/AC *power inverter* ($146 V_{pp}$) setelah dilewatkan pada *matching impedance* akan dinaikkan sebesar 3,43 kali menjadi $508 V_{pp}$ dengan frekuensi relatif konstan yaitu 50 kHz (Susanto, 2012). Pemilihan trafo sebagai *matching impedance* dikarenakan trafo bekerja sebagai penyesuai impedansi sekaligus digunakan untuk menaikkan tegangan *output* DC/AC *power inverter* agar tegangan yang diaplikasikan pada sistem *discharge* dapat lebih besar.



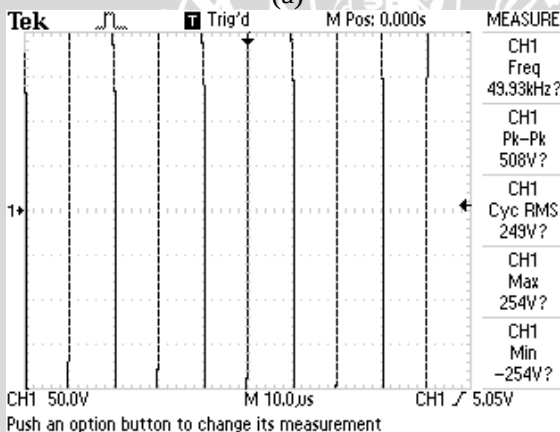
Gambar 4.3 Transformator *matching impedance*
(Susanto, 2012)

Sinyal tegangan *output* lilitan primer dari *trafo matching impedance* yang diukur dengan menggunakan osiloskop ditunjukkan pada gambar 4.4 (a). Dari gambar dapat diketahui bahwa sinyal tegangan *output* dari lilitan primer cenderung berbentuk gelombang sinus dengan frekuensi yang relatif konstan pada 50 kHz. Gambar 4.4 (b) memberikan hasil pengukuran tegangan output trafo di ukur pada lilitan sekunder. Tampilan gelombang yang terpotong menunjukkan bahwa fungsi *step-up* dari trafo telah dapat dicapai. Menurut Susanto, bila kedua gambar dibandingkan dapat diamati

bahwa sinyal gelombang yang dihasilkan memiliki bentuk serta fase yang sama yakni cenderung gelombang sinus.



(a)



(b)

Gambar 4.4 Hasil pengukuran tegangan trafo dengan osiloskop (a) lilitan primer; (b) lilitan sekunder (Susanto, 2012)

4.1.5 Instalasi Gas Nitrogen

Instalasi gas yang diperlukan dalam penelitian ini terdiri dari satu tabung gas nitrogen volume 7 m³ dengan kemurnian UHP 99.999 %, satu regulator gas nitrogen, serta *flowmeter* gas hidrogen.

Flowmeter yang ada pada sistem vakum ini merupakan produk dari *Brooks Instrument K.K* dari Jepang dengan model 2-1355AV. Memiliki spesifikasi yaitu *flowmeter* untuk gas hidrogen, *float* berbentuk bola dan skala 50-500 ml/min. Penggunaan *flowmeter* gas hidrogen sebagai *flowcontroller* debit gas nitrogen yang akan dimasukkan ke dalam reaktor, membuat hasil pembacaan *flowmeter* perlu dikonversi agar diperoleh hasil pembacaan debit gas yang sebenarnya.

Menggunakan persamaan (2.16), debit gas nitrogen yang terbaca dengan menggunakan *flowmeter* gas hidrogen akan dapat ditentukan dengan asumsi kondisi tekanan, temperatur serta viskositas kedua gas adalah sama. Cara yang dapat dilakukan adalah dengan membandingkan persamaan laju untuk gas hidrogen dengan laju gas nitrogen sebagai berikut

$$Q_{H_2} = \frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{2g \frac{V_f}{a_f} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{H_2}} \right)}$$

$$Q_{N_2} = \frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{2g \frac{V_f}{a_f} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{N_2}} \right)}$$

Untuk skala pengukuran yang sama maka suku $\frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}}$, ρ_f dan $2g \frac{V_f}{a_f}$ akan bernilai sama, dan dapat dieliminasi sehingga persamaan di atas akan menjadi

$$Q_{N_2} = Q_{H_2} \sqrt{\frac{\rho_{H_2}}{\rho_{N_2}}} \quad (4.3)$$

Massa jenis gas sangat dipengaruhi oleh tekanan dan suhu yang dapat ditunjukkan oleh persamaan

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p \cdot Mr}{R \cdot T}$$

Bila persamaan ini kita substitusikan pada persamaan (4.3), dengan asumsi kondisi tekanan dan suhu yang sama maka akan diperoleh

$$Q_{N_2} = Q_{H_2} \sqrt{\frac{pMr_{H_2}}{RT} \times \frac{RT}{pMr_{N_2}}} = Q_{H_2} \sqrt{\frac{Mr_{H_2}}{Mr_{N_2}}}$$

Maka laju nitrogen yang sebenarnya adalah

$$Q_{N_2} = Q_{H_2} \sqrt{\frac{2,01}{28,01}}$$

$$Q_{N_2} = 0,267 Q_{H_2}$$

Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa untuk skala yang terbaca pada *flowmeter* gas hidrogen yang digunakan untuk menentukan laju aliran gas nitrogen akan bernilai lebih kecil dengan faktor 0,267. Untuk beberapa skala pembacaan pada *flowmeter* gas hidrogen yang digunakan untuk gas nitrogen dan laju nitrogen yang sebenarnya diberikan pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Skala *flowmeter* dan laju gas N₂ sebenarnya

No.	Skala <i>flowmeter</i> (ml/min)	Laju nitrogen sebenarnya (ml/min)
1	50,0	13,4
2	100,0	26,7
3	150,0	40,1
4	200,0	53,4
5	250,0	66,8
6	300,0	80,1
7	350,0	93,5
8	400,0	106,8
9	450,0	120,2
10	500,0	133,5

4.2 Pengujian Pembangkitan Plasma Nitrogen

Pengujian kerja sistem pembangkit plasma yang telah dibangun dilakukan dalam dua tahapan. Pengujian tahap I adalah pembangkitan plasma nitrogen tanpa *matching impedance*, sedangkan tahap II adalah proses pembangkitan plasma nitrogen dengan menggunakan *matching impedance*. Hasil dari masing-masing tahapan diuraikan lebih lanjut sebagai berikut.

4.2.1 Pengujian reaktor tahap I

Proses pengujian pembangkitan plasma nitrogen tahap I dilakukan ketika *power supply* sistem plasma ini yakni DC/AC

power inverter telah selesai dibangun. Percobaan tahap I ini secara tidak langsung juga merupakan langkah untuk mengetahui kemampuan kerja *power supply*. Pada tahap I, *power supply* dikopel/dihubungkan langsung pada elektroda, sehingga tegangan yang diaplikasikan pada elektroda merupakan tegangan keluaran DC/AC *power inverter* yakni $V_{pp} = 146 \text{ V}$.

Sesuai dengan variabel bebas yang diberikan pada tabel 3.1 untuk pengujian tahap I, baik pada konfigurasi a maupun b, frekuensi sumber diubah dari 30kHz hingga 80kHz dengan interval 10 kHz. Pemilihan frekuensi ini berdasarkan hasil pengujian sumber daya yang menunjukkan bentuk gelombang yang masih terbaca dengan baik adalah pada frekuensi $\leq 80\text{kHz}$ (Susanto, 2012).

Pada pengujian I.a, laju aliran gas dibuat bervariasi, sedangkan besarnya bukaan katup pembuangan dibuat tetap. Jeda waktu untuk mengubah laju aliran gas antara satu konfigurasi dengan konfigurasi lain adalah 3 menit. Diasumsikan dalam 3 menit jumlah atom atau molekul gas sudah mencukupi untuk membangkitkan plasma. Pada pengujian I.b, laju aliran gas dibuat tetap yakni 500ml/mnt, sedangkan besarnya bukaan katup pembuangan dibuat bervariasi. Jeda waktu untuk mengubah besarnya bukaan katup antara satu konfigurasi dengan konfigurasi lain adalah 5 menit dengan harapan jumlah molekul gas dalam ruang lebih banyak sehingga plasma dapat terbentuk. Hasil pengujian rektor tahap I secara lebih lengkap ditunjukkan pada Lampiran 2 halaman 76-84.

4.2.2 Pengujian reaktor tahap II

Berdasarkan hasil tahap I diketahui bahwa tegangan keluaran sumber daya masih kurang untuk mampu membangkitkan plasma. Oleh karena itu DC/AC *power inverter* selanjutnya dilengkapi dengan penaik tegangan yang dalam hal ini berupa transformator inti *ferrite*. Transformator ini juga berfungsi sebagai penyesuai impedansi antar sumber dengan reaktor plasma.

Berbeda dengan tahap I, pada tahap II parameter yang diubah hanya jarak elektroda dikarenakan transformator yang telah dibuat hanya dirancang untuk bekerja pada satu frekuensi kerja yaitu 50 kHz. Sehingga konfigurasi parameter pada tahap II adalah :

- ✓ Frekuensi : 50 kHz
- ✓ Tegangan : 508 volt (V_{pp})

- ✓ Katup pembuangan : terbuka sedikit ($\pm \frac{1}{4}$ putaran)
- ✓ Laju aliran gas : 500 ml/mnt.
- Jarak elektroda : 0,26 cm; 0,47 cm; 0,64 cm; dan 0,86 cm.

Setelah dicoba untuk berbagai variasi jarak elektroda, didapatkan hasil bahwa plasma juga masih belum dapat terbentuk. Hasil pengamatan tahap II disajikan lebih lengkap pada Lampiran 3 halaman 85.

4.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Hasil Pengujian Sistem

Dari hasil pengujian yang menunjukkan tidak terdapat plasma pada reaktor, dapat dianalisis beberapa faktor yang kemungkinan mempengaruhi ketidakberhasilan pembangkitan plasma pada penelitian ini. Faktor-faktor tersebut antara lain dapat ditinjau dari beberapa parameter utama plasma yaitu tekanan sistem dan tegangan *power supply* yang terpasang.

4.3.1 Tekanan sistem reaktor plasma

Plasma adalah *glow discharge* yang bekerja pada tekanan rendah. Pengaruh tekanan vakum terhadap proses pembentukan plasma dapat dijelaskan melalui konsep jalur bebas rata-rata molekul gas. Pada umumnya plasma non-termal dibangkitkan dalam kondisi tekanan rendah yakni 2-7 Torr, hal ini dikarenakan agar dibutuhkan tegangan listrik yang tidak terlalu tinggi untuk proses pembangkitan plasma. Pada tekanan rendah, jalur bebas rata-rata (*mean free path*) dari elektron utama dapat lebih panjang sehingga energi yang dimiliki elektron akibat beda potensial yang terpasang pada elektroda tidak mudah hilang sebagai akibat terlalu seringnya bertumbukan dengan partikel lain. Jika energi yang dimiliki elektron cukup tinggi, maka yang terjadi elektron akan mampu untuk mengionisasi molekul yang ditumbuknya untuk selanjutnya membentuk reaksi berantai agar terjadi peristiwa *electron avalanche*.

Berdasarkan kenyataan bahwa filamen *tungsten* yang tidak dapat menyala lama pada pengujian sensor tekanan metode ionisasi bahkan setelah proses vakum selama 3 jam, menunjukkan bahwa tingkat vakum pada sistem masih lebih besar dari 10^{-3} Torr. Menurut hukum Paschen, terdapat harga perkalian $p \times d$ minimum agar suatu *discharge* dapat berlangsung. Untuk gas nitrogen, harga $p \times d$

minimum adalah sebesar 0,67 Torr.cm. Artinya jika diterapkan pada penelitian ini dengan jarak yang sudah ditentukan yaitu 0,26 ; 0,47 ; 0,64 & 0,86 cm, maka masing-masing tekanan yang harusnya dipenuhi sistem berdasarkan hasil kali $p \times d$ minimum adalah:

- $d = 0,26 \text{ cm} \rightarrow p = 2,6 \text{ Torr}$
- $d = 0,47 \text{ cm} \rightarrow p = 1,4 \text{ Torr}$
- $d = 0,64 \text{ cm} \rightarrow p = 1,1 \text{ Torr}$
- $d = 0,86 \text{ cm} \rightarrow p = 0,7 \text{ Torr}$

Dihadapkan kenyataan bahwa sistem vakum pada penelitian ini tidak dilengkapi dengan pengukur tekanan yang memadai, maka hasil perhitungan tersebut tidak dapat membuktikan apapun. Namun dengan menganggap gas nitrogen sebagai gas ideal, dapat dilakukan perhitungan tekanan parsial gas yang berekspansi mengisi ruang vakum (*belljar*) berdasarkan jumlah molekul gas nitrogen yang masuk ke dalam ruang berdasarkan debit gas. Tekanan parsial gas nitrogen dapat diturunkan dengan pendekatan

$$\rho = \frac{m_g}{V_g}, n = \frac{m_g}{Mr}, \text{ dan } n = \frac{N}{N_A}$$

Bila ketiga persamaan diselesaikan maka akan diperoleh persamaan:

$$N = \frac{\rho V_g N_A}{Mr} \quad (4.4)$$

m_g : massa gas (g)

n : mol gas (mol)

V_g : Volume gas (liter)

N : jumlah molekul gas

N_A : bilangan Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$)

ρ : massa jenis gas nitrogen (1,165 g/l pada 20°C dan 1 atm)

Mr : massa molekul gas nitrogen (28,01g/mol)

Dalam kondisi ruang reaktor tertutup dan dianggap tidak terdapat kebocoran jumlah partikel dalam reaktor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan tersebut. Sesuai dengan selang waktu gas yang dimasukkan ke dalam reaktor yaitu 3 menit (pengujian tahap I) dan 5 menit (pengujian tahap II), jumlah molekul gas nitrogen dalam reaktor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 4.4 dan hasilnya diberikan pada tabel 4.5. Tabel berwarna abu-abu memberikan hasil perhitungan untuk waktu pengaliran gas selama 5 menit.

Tabel 4.5 Jumlah Molekul Gas Nitrogen Dalam Reaktor

No.	Skala <i>flowmeter</i> (ml/min)	Q_{N_2} (ml/min)	t (menit)	V_g (l)	N (molekul)
1	100	26,7	3	0,080	$2,01 \times 10^{21}$
2	200	53,4	3	0,160	$4,01 \times 10^{21}$
4	400	106,8	3	0,320	$8,02 \times 10^{21}$
3	300	80,1	3	0,240	$6,02 \times 10^{21}$
5	500	133,5	3	0,401	$1,00 \times 10^{22}$
6	100	26,7	5	0,134	$3,34 \times 10^{21}$
7	200	53,4	5	0,267	$6,69 \times 10^{21}$
8	300	80,1	5	0,401	$1,00 \times 10^{22}$
9	400	106,8	5	0,534	$1,34 \times 10^{22}$
10	500	133,5	5	0,668	$1,67 \times 10^{22}$

Dengan mengetahui jumlah molekul gas nitrogen yang masuk ke dalam reaktor maka dapat dilakukan perhitungan tekanan parsial gas tersebut dengan menggunakan persamaan gas ideal

$$pV = NkT \quad (4.5)$$

- p : tekanan gas (N/m^2)
 V : volume reaktor ($Anonim^3$)
 N : jumlah molekul
 K : konstanta Boltzman ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)
 T : suhu mutlak gas (K)

Volume reaktor (*belljar*) adalah 8,6 l atau $8,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. Suhu ruang vakum yang digunakan dalam perhitungan ini adalah 20°C, hal ini karena massa jenis gas nitrogen yang diketahui terukur pada suhu 20°C. Sehingga suhu mutlak ruangan adalah 293 K. Karena satuan tekanan yang umum digunakan dalam sistem plasma dinyatakan dalam Torr, maka satuan dari tekanan yang sudah dihitung juga dikonversi ke dalam Torr dimana

$$1 \text{ Torr} = 133,3 \text{ N/m}^2$$

Selanjutnya perhitungan tekanan menggunakan persamaan 4.5 untuk masing-masing jumlah molekul gas nitrogen diberikan dalam tabel 4.6. Tabel berwarna abu-abu memberikan hasil perhitungan untuk waktu pengaliran gas selama 5 menit.

Tabel 4.6 Tekanan Parsial Gas Nitrogen Dalam Reaktor

No.	N (molekul)	N/V_{reaktor} (m^{-3})	p (N/m^2)	p (Torr)
1	$2,01 \times 10^{21}$	$2,33 \times 10^{23}$	$9,43 \times 10^2$	7,07
2	$4,01 \times 10^{21}$	$4,66 \times 10^{23}$	$1,89 \times 10^3$	14,2
3	$6,02 \times 10^{21}$	$7,00 \times 10^{23}$	$2,83 \times 10^3$	21,2
4	$8,02 \times 10^{21}$	$9,33 \times 10^{23}$	$3,77 \times 10^3$	28,3
5	$1,00 \times 10^{22}$	$1,17 \times 10^{24}$	$4,71 \times 10^3$	35,4
6	$3,34 \times 10^{21}$	$3,89 \times 10^{23}$	$1,57 \times 10^3$	11,8
7	$6,69 \times 10^{21}$	$7,77 \times 10^{23}$	$3,14 \times 10^3$	23,6
8	$1,00 \times 10^{22}$	$1,17 \times 10^{24}$	$4,71 \times 10^3$	35,4
9	$1,34 \times 10^{22}$	$1,55 \times 10^{24}$	$6,29 \times 10^3$	47,2
10	$1,67 \times 10^{22}$	$1,94 \times 10^{24}$	$7,86 \times 10^3$	59,0

Dari perhitungan tekanan parsial gas serta tekanan minimum terjadinya *gas breakdown*, dapat dikatakan bahwa pada masing-masing pengujian sistem reaktor tekanan yang dimiliki sistem masih lebih tinggi dari syarat minimum. Sebagai akibatnya jalur bebas rata-rata molekul menjadi lebih pendek dari yang seharusnya dan elektron utama yang telah lepas menjadi lebih sering bertumbukan dengan molekul gas. Interaksi ini membuat elektron menjadi cepat kehilangan energi dan kurang mampu untuk mengionisasi molekul gas, sehingga plasma tidak dapat terbentuk.

4.3.2 Tegangan *Power Supply*

Keberhasilan plasma terbentuk dalam suatu sistem *discharge* sangat ditentukan oleh kemampuan *power supply* dalam mentransmisikan daya (Gesche, 2005). Untuk mengetahui pengaruh beda potensial yang dipasang pada elektroda, dapat ditinjau dari tiga bahasan yaitu:

1. Energi ionisasi pertama gas kerja.

Plasma non-termal dapat terbentuk ketika terjadi peristiwa longsoran elektron (*electron avalanche*), sebagai akibat ionisasi gas oleh elektron bebas. Oleh karena itu elektron utama yang lepas dari elektroda, selanjutnya harus memiliki energi yang lebih besar dari energi ionisasi pertama gas kerja plasma. Energi ionisasi pertama

merupakan energi yang dibutuhkan untuk mengeluarkan satu elektron terluar dari atom atau molekul dan harganya paling rendah dibandingkan tingkat selanjutnya. Gas kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah gas nitrogen (N_2) yang memiliki energi ionisasi pertama sebesar 1503 kJ/mol. Energi ionisasi ini per satuan molekul dalam eV adalah

$$E_i N_{2(g)} = \frac{1503 \times 1000 \frac{J}{mol}}{6,02 \times 10^{23} \frac{molekul}{mol}}$$

$$E_i N_{2(g)} = 249,7 \times 10^{-20} J/molekul$$

Dengan membagi hasil tersebut dengan nilai muatan elektron $1,6 \times 10^{-19} C$ maka akan diperoleh energi ionisasi persatuan molekul dalam satuan eV.

$$E_i N_{2(g)} = \frac{249,7 \times 10^{-20} J}{1,6 \times 10^{-19} C} = 15,63 eV$$

Elektron harus memiliki energi yang lebih besar dari 15,63 eV agar mapu mengionisasi molekul gas nitrogen. Energi yang diperoleh elektron akibat beda potensial yang diberikan pada elektroda, dapat ditentukan berdasarkan kuat medan listrik di antara elektroda dan besarnya jalur bebas rata-rata (*mean free path*) elektron. Sebagai contoh bahasan, diambil dari pengujian tahap II dengan variabel pengujian sebagai berikut:

- Jarak elektroda : 0,47 cm
- Laju flowmeter : 500 ml/min (laju nitrogen sebenarnya : 133,5 ml/min dan tekanan yang dihasilkan 7857,94 N/m²)
- Tegangan power supply : 508 V (*peak-to-peak*)
- Frekuensi : 50 kHz

Dari data-data tersebut dapat dihitung kuat medan listrik di antara elektroda yaitu:

$$E = \frac{V}{d} = \frac{508 V}{0,47 \cdot 10^{-2} m} = 1,08 \cdot 10^5 V/m$$

Energi yang diperoleh elektron selanjutnya dapat dihitung dari persamaan energi potensial yaitu

$$E_p = q \cdot V'$$

Dengan q adalah muatan elektron, sedangkan V' adalah potensial yang dialami elektron selama jalur bebas bergerak yang di alami yaitu jalur bebas rata-rata (λ).

$$V' = E \cdot \lambda$$

Jalur bebas rata-rata elektron dapat dihitung menggunakan persamaan 2.3. Namun karena ukuran elektron sulit untuk diketahui, maka dapat digunakan pendekatan lain yaitu menghitung jalur bebas rata-rata molekul gas nitrogen terlebih dahulu. Dengan memasukkan diameter molekul gas nitrogen $3,64\text{\AA}$ dan temperatur sebesar 20°C pada persamaan 2.3 maka akan diperoleh hasil sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi N_V d^2}$$

$$\lambda = \frac{1,38 \times 10^{-23} \times 293}{\sqrt{2} \times 3,14 \times (3,64 \times 10^{-10})^2 \cdot p} m$$

$$\lambda = \frac{0,689}{p} cm$$

dengan p adalah tekanan dalam satuan Pa. Dari data yang disebutkan, maka jalur bebas rata-rata molekul gas nitrogen pada pengujian tersebut adalah:

$$\lambda_{N_2} = \frac{0,689}{7,86 \times 10^3} cm = 8,77 \cdot 10^{-5} cm = 877 nm$$

Dari situs wikipedia, elektron memiliki jalur bebas rata-rata sebesar 5,64 lebih panjang dari jalur bebas rata-rata molekul gas (Anonim⁴). Maka jalur bebas rata-rata elektron adalah

$$\lambda_e = 5,64 \times \lambda_{N_2} = 5,64 \times 877 nm = 4,95 \mu m$$

Maka energi elektron adalah:

$$E_e = q \cdot V' = e \cdot E \cdot \lambda_e$$

$$E_e = 1,6 \cdot 10^{-19} C \cdot 1,08 \cdot 10^5 \frac{V}{m} \cdot 4,95 \cdot 10^{-6} m$$

$$E_e = 8,55 \cdot 10^{-20} J = 5,35 \times 10^{-1} eV$$

$$E_e = 0,535 eV$$

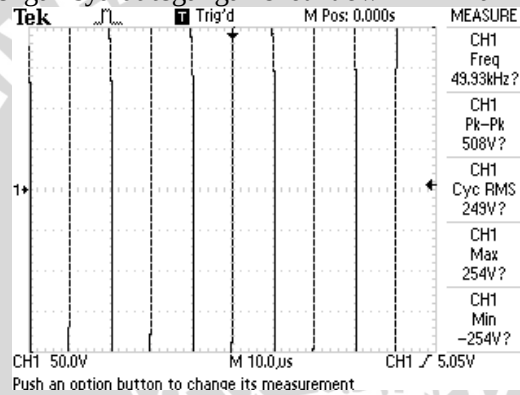
Dari perhitungan tersebut energi elektron jauh lebih kecil dibandingkan dengan energi ionisasi pertama gas nitrogen. Maka dapat dikatakan bahwa tidak terjadi peristiwa ionisasi di dalam reaktor karena elektron tidak mampu mengionisasi molekul gas nitrogen.

2. Tegangan *breakdown* minimum gas berdasarkan Hukum Paschen.

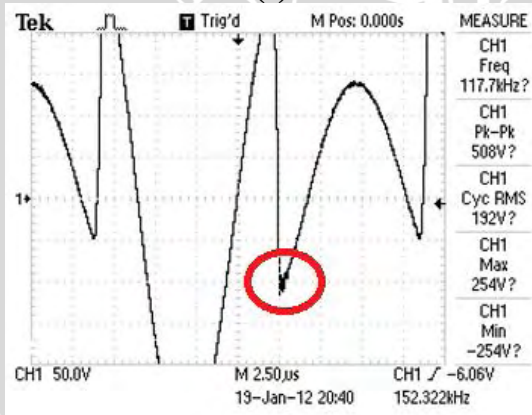
Dari syarat tegangan *breakdown* minimum yang terjadi berdasarkan hukum Paschen, dapat pula dilakukan penelusuran sebab tidak munculnya plasma pada penelitian ini. Seperti telah disebutkan bahwa Paschen melakukan penelitian menggunakan sumber

tegangan DC pada proses *discharge* dan diperoleh hasil bahwa pada gas nitrogen tegangan minimum pada harga $p \times d$ minimum adalah sebesar 251 volt.

Menurut sebuah tulisan yang berjudul “*Dielectric Testing : AC vs DC*” disebutkan bahwa tegangan DC akan memberikan efek tekanan medan listrik yang sama dengan tegangan AC jika harga tegangan DC sama besarnya dengan harga maksimum (V_p) tegangan AC (Anonim³, 1999) . Dengan mengambil contoh yang sama seperti pada bahasan sebelumnya yaitu pada pengujian tahap II dengan jarak elektroda 0,47 cm, dapat dilakukan perbandingan antara pengujian penelitian dengan syarat tegangan *breakdown* minimum Paschen.



(a)



(b)

Gambar 4.5 Tampilan Osiloskop (a) Tegangan sistem *power supply*;
(b) Tegangan elektroda pada jarak elektroda 0,47 cm

Pada pengujian tersebut diketahui bahwa tegangan *peak-to-peak* yang terukur pada elektroda adalah 508 volt. Hal ini dapat ditunjukkan dengan hasil pengukuran tegangan elektroda menggunakan osiloskop yang dilakukan melalui konektor pada bagian luar reaktor vakum pada gambar 4.5. Dari tampilan osiloskop tersebut dapat diketahui bahwa tegangan maksimum sebesar 254 volt sedangkan tegangan minimum sebesar -254 volt. Dari pola gelombang yang dihasilkan pada beberapa puncak yang gelombang yang tampak menunjukkan perubahan yang halus. Namun pada satu puncak yaitu pada gambar yang di lingkari merah, timbul puncak yang nampak agak rusak dalam arti tidak halus seperti pada puncak lain. Adanya puncak seperti ini menunjukkan bahwa di dalam sistem kemungkinan telah terjadi *gas breakdown* pada puncak gelombang tersebut. Pola gelombang yang berubah dari tegangan *power supply*, menunjukkan adanya suatu perubahan yang terjadi di dalam reaktor yang mungkin disebabkan pergerakan elektron di dalam reaktor.

3. Analisa arus yang mengalir pada reaktor.

Respon suatu bahan terhadap medan listrik yang dikerjakan pada bahan tersebut dapat diketahui melalui kurva karakteristik tegangan dan arus (V-I). Dalam pengujian ini memang tidak dilakukan pengukuran arus yang mengalir melalui elektroda, namun dengan pengetahuan dasar Fisika mengenai listrik dapat dilakukan pendekatan untuk mengetahui informasi sistem *gas discharge* yang telah dibangun.

Tinjauan mengenai arus yang mengalir di antara elektroda dapat didekati menggunakan Hukum Ohm yaitu:

$$V = I \cdot R$$

dengan V adalah beda potensial elektroda, I adalah arus yang mengalir di antara elektroda, dan R adalah hambatan listrik yang dalam hal ini merupakan reaktansi kapasitif. Reaktansi kapasitif elektroda sejajar dapat dihitung dengan

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

maka reaktansi elektroda pada pengujian tahap II yakni pada frekuensi 50 kHz untuk jarak elektroda 0,47 yang memiliki kapasitansi 2,19 pF adalah:

$$X_c = \frac{1}{2.3,14.5.10^4.2,19.10^{-12}} = 1,45.10^6 \Omega$$

Selanjutnya arus efektif yang mengalir dapat dihitung dengan membagi V_{rms} yang terpasang pada elektroda dengan reaktansi kapasitif elektroda. Dalam pengujian ini tegangan rms (V_{rms}) adalah 192 volt, sehingga arus efektif yang mengalir pada elektroda dapat dihitung menggunakan hukum Ohm adalah:

$$I_{ef} = \frac{V_{rms}}{X_c} = \frac{192 V}{1,45.10^6 \Omega} = 1,32.10^{-4} A$$

Dengan arus yang sangat kecil yang mengalir dalam elektroda, maka dapat dikatakan jumlah elektron bebas dalam reaktor sangat sedikit jumlahnya. Bila dibandingkan dengan kurva karakteristik $V-I$ pada gambar 2.6, sistem harusnya berada pada daerah *subnormal glow discharge*. Namun karena tekanan yang cukup tinggi dan energi elektron yang lebih kecil dari energi ionisasi pertama gas nitrogen, mengakibatkan reaksi terbentuknya plasma tidak dapat berlangsung.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari serangkaian pengujian yang telah dilakukan pada sistem plasma yang telah dibangun, diketahui sistem tidak menampilkan cahaya yang mengindikasikan terwujudnya plasma. Berdasarkan analisis faktor-faktor yang memungkinkan tidak terbentuknya plasma adalah

1. Tekanan sistem reaktor membuat *mean free path* elektron menjadi lebih kecil, sehingga energi elektron utama lebih kecil dari energi ionisasi gas nitrogen dan menyebabkan tidak terjadi ionisasi di dalam sistem.
2. Pada pengujian tahap II, sistem *power supply* yang dibangun yang terdiri atas DC/AC *power inverter* dan transformator *matching impedance* sudah dapat menyebabkan terjadinya *gas breakdown*. Pernyataan ini dapat dibuktikan dengan tegangan maksimum *power supply* (V_p) sebesar 254 V yang melebihi tegangan *breakdown minimum* gas nitrogen yang bernilai 251 V.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa pengetahuan mengenai teknologi plasma masih belum dikuasai dengan baik. Beberapa saran yang dapat diberikan untuk perbaikan sistem selanjutnya adalah

1. Perlu dicoba adanya suatu sumber emisi elektron utama selain dari elektroda untuk membantu berlangsungnya *gas discharge* hingga terbentuk plasma. Misalnya dengan menambahkan filamen *tungsten* ke dalam reaktor.
2. Diperlukan pengujian adanya kebocoran pada sistem vakum untuk memastikan sistem vakum dapat digunakan sebagai reaktor plasma.
3. Perlu dilakukan perbaikan alat ukur tekanan sistem atau di coba dengan metode pengukuran tekanan yang lain agar tekanan sistem dapat diketahui.

4. Perlu dicoba untuk membuat transformator *matching impedance* dengan kemampuan *step-up* yang lebih tinggi atau mengganti *matching impedance* dengan komponen yang lain.
5. Perlu dicoba digunakan gas lain sebagai gas kerja untuk melihat pengaruh gas pada sistem pembangkit plasma misalnya menggunakan gas Argon yang membutuhkan tegangan *breakdown* lebih rendah dari gas nitrogen yaitu 137 V.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR PUSTAKA

- Anonim¹. Akses tanggal 12 Agustus 2011, dari <http://www.lenntech.com/periodic/elements/n.htm#ixzz3pmqW7jHg>
<<http://www.lenntech.com/periodic/elements/n.htm>>.
- Anonim². (10 Mei 2012). *Electric Discharge in Gases*. Akses tanggal 12 Mei, 2012, dari http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_discharge_in_gases.
- Anonim³. 1999. *Dielectric Testing :AC vs DC part 2*.
- Anonim⁴. *Paschen's Law*. Akses tanggal 18 Desember, 2011, dari <http://en.wikipedia.org/wiki/Paschen's>.
- Bhatt, S. B. 2009. *Vacuum Techniques in Plasma Generation. DST-SERC School On Plasma Diagnostics*. Gujarat.
- Bogaerts, A., E. Neyts, R. Gijbels dan J. v. d. Mullen. 2002. *Review:Gas Discharge Plasmas and Their Applications. Spectrochimica Acta. Part B(57): 609-658*.
- Conrads, H. dan M. Schmidt. 2000. *Plasma Generation and Plasma Source. Plasma Source Sci. Technol. 9: 441-446*.
- Gesche, R. 2005. *RF Matching of a Reactive Ion Etching (RIE) Plasma Reactor. Frequenz. 59: 73-76*.
- Herrebut, D. 2003. *Modelling of Methane, Acetylene, and Silane Plasmas: Study of the Plasma Chemistry*, Universiteit Antwerpen. Thesis.
- Ikegami, H. 2010. *Industrial Plasma Technology*. New York, John Wiley and Sons.
- KOFLOC. *Principle of Variable Flow Meter (Rotameter)*. Akses tanggal 3 April, 2012, dari http://www.kofloc.co.jp/kofloc_e/product/principal_flow_meter.html.
- Lawlor, K. dan A. Simpson. *Intensive Two Day Short Course in Vacuum Technology*. Australia, Vacuum Society of Australia.
- Lieberman, M. A. dan A. J. Lichtenberg. 2005. *Principles of Plasma Discharge and Material Processing*. Second, John Wiley and Sons. New Jersey.
- Lohninger, H. (26 Mei 2011). *Ionization Energies of Diatomic Molecule*. Akses tanggal 21 April, 2012, dari http://www.vias.org/genchem/chembonding_14777_04.html.

- Lucas, J. R. 2001. *Breakdown of Gaseous Insulation. High Voltage Engineering*. University of Moratuwa.
- Mulyani, S. 2010. *Perancangan Reaktor Redoks Untuk Mereduksi CuO Dengan Pereduksi Gas H₂*. Jurusan Fisika. Malang, Universitas Brawijaya. Skripsi.
- Nehra, V., A. Kumar dan H. K. Dwivedi. 2008. *Atmospheric Non-Thermal Plasma Source. International Journal of Engineering*. Volume 2(Issue 1): 53-56.
- Nuzula, F. 2007. *Perancangan dan Pembuatan Alat Ukur Tekanan Ruang Vakum Dengan Menggunakan Metode Ionisasi*. Jurusan Fisika. Malang, Universitas Brawijaya. Skripsi.
- Piel, A. 2010. *Plasma Physics : An Introduction to Laboratory, Space, and Fusion Plasmas*. Springer. Berlin.
- Singh, S. V. 2004. *Investigation of ICP RF Discharges by Means of a Langmuir Probe. Physics and Astronomie*. Bochum, Ruhr University Bochum. Dissertation.
- Susanto, D. T. 2012. *Implementasi DC/AC Power Inverter 100 Vac Dengan Frekuensi 50 Khz dan Studi Pengaruh Impedance Matching Pada Tegangan Dan Frekuensi Yang Dihasilkan*. Jurusan Fisika. Malang, Universitas Brawijaya. Skripsi.

Lampiran 1 Data Hasil Pengujian Filamen

Waktu evakuasi (jam)	Panjang Filamen (dari panjang mula-mula)	Hasil
0,5	$\frac{1}{4}$	Menyala lalu putus
	$\frac{1}{3}$	Tidak menyala
	$\frac{1}{2}$	Tidak menyala
1	$\frac{1}{4}$	Menyala lalu putus
	$\frac{1}{3}$	Menyala sesaat kemudian putus
	$\frac{1}{2}$	Tidak menyala
1,5	$\frac{1}{4}$	Menyala lalu putus
	$\frac{1}{3}$	Menyala sesaat kemudian putus
	$\frac{1}{2}$	Tidak menyala
2	$\frac{1}{4}$	Menyala lalu putus
	$\frac{1}{3}$	Menyala sesaat kemudian putus
	$\frac{1}{2}$	Tidak menyala
2,5	$\frac{1}{4}$	Menyala lalu putus
	$\frac{1}{3}$	Menyala sesaat kemudian putus
	$\frac{1}{2}$	Tidak menyala
3	$\frac{1}{4}$	Menyala lalu putus
	$\frac{1}{3}$	Menyala sesaat kemudian putus
	$\frac{1}{2}$	Tidak menyala

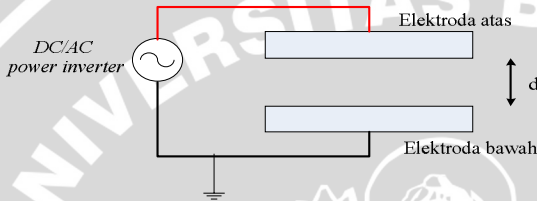
Catatan : Pada saat panjang filamen $\frac{1}{3}$ Lo, nyala filamen hanya mampu bertahan kurang dari 2 menit.

Lampiran 2 Data Hasil Pengujian Pembangkitan Plasma Tahap I

A. Data hasil pengujian dengan bukaan katup vakum konstan

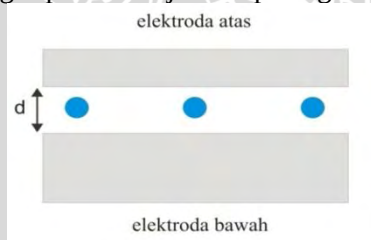
Pengujian dilakukan sebanyak empat kali dengan jarak elektroda yang berbeda.

Skematik pengujian



I. Pengujian pada jarak elektroda 0,86 cm.

Jarak elektroda diukur pada tiga titik menggunakan jangka sorong seperti ditunjukkan pada gambar.



Konfigurasi sistem:

1. Variabel kontrol :

- Waktu evakuasi : 3 jam
- Bukaan katup pembuangan : $\frac{1}{2}$ bagian
- Jarak antar elektroda (d) : 0,86 cm

No.	d (cm)	$\sum d$	$\bar{d}$ (cm)
1	0,85	2,59	0,86
2	0,87		
3	0,87		

2. Variabel bebas :

- Frekuensi sumber : 30 – 80 kHz (interval 10 kHz)
- Laju aliran gas : 100 – 500 ml/min (interval 100 ml/min)

c. Jeda pengubahan *flowmeter* (Δt) : 3 menit

f (kHz)	S (ml/min)	kondisi plasma	f (kHz)	S (ml/min)	kondisi plasma
30	100	x	60	100	x
	200	x		200	x
	300	x		300	x
	400	x		400	x
	500	x		500	x
40	100	x	70	100	x
	200	x		200	x
	300	x		300	x
	400	x		400	x
	500	x		500	x
50	100	x	80	100	x
	200	x		200	x
	300	x		300	x
	400	x		400	x
	500	x		500	x

II. Pengujian pada jarak 0,64 cm

Konfigurasi sistem:

1. Variabel kontrol :

- Waktu evakuasi : 3 jam
- Bukaan katup pembuangan : $\frac{1}{2}$ bagian
- Jarak antar elektroda (d) : 0,64 cm

No.	d (cm)	$\sum d$	d (cm)
1	0,64	1,92	0,64
2	0,64		
3	0,64		

2. Variabel bebas :

- Frekuensi sumber : 30 – 80 kHz (interval 10 kHz)
- Laju aliran gas : 100 – 500 ml/mnt (interval 100 ml/min)
- Jeda pengubahan *flowmeter* (Δt) : 3 menit

f (kHz)	S (ml/min)	kondisi plasma	f (kHz)	S (ml/min)	kondisi plasma
30	100	x	60	100	x
	200	x		200	x
	300	x		300	x
	400	x		400	x
	500	x		500	x
40	100	x	70	100	x
	200	x		200	x
	300	x		300	x
	400	x		400	x
	500	x		500	x
50	100	x	80	100	x
	200	x		200	x
	300	x		300	x
	400	x		400	x
	500	x		500	x

III. Pengujian pada jarak 0,47 cm

Konfigurasi sistem:

1. Variabel kontrol :

- Waktu evakuasi : 3 jam
- Bukaan katup pembuangan : $\frac{1}{2}$ bagian
- Jarak antar elektroda (d) : 0,47 cm

No.	d (cm)	$\sum d$	d (cm)
1	0,48	1,41	0,47
2	0,47		
3	0,46		

2. Variabel bebas :

- Frekuensi sumber : 30 – 80 kHz (interval 10 kHz)
- Laju aliran gas : 100 – 500 ml/min (interval 100 ml/min)
- Jeda perubahan *flowmeter* (Δt) : 3 menit

f (kHz)	S (ml/min)	kondisi plasma	f (kHz)	S (ml/min)	kondisi plasma
30	100	x	60	100	x
	200	x		200	x
	300	x		300	x
	400	x		400	x
	500	x		500	x
40	100	x	70	100	x
	200	x		200	x
	300	x		300	x
	400	x		400	x
	500	x		500	x
50	100	x	80	100	x
	200	x		200	x
	300	x		300	x
	400	x		400	x
	500	x		500	x

IV. Pengujian pada jarak 0,26 cm

Konfigurasi sistem:

1. Variabel kontrol :

- Waktu evakuasi : 3 jam
- Bukaan katup pembuangan : $\frac{1}{2}$ bagian
- Jarak antar elektroda (d) : 0,26 cm

No.	d (cm)	$\sum d$	$\bar{d}$ (cm)
1	0,25	0,77	0,26
2	0,26		
3	0,26		

2. Variabel bebas :

- Frekuensi sumber : 30 – 80 kHz (interval 10 kHz)
- Laju aliran gas : 100 – 500 ml/min (interval 100 ml/min)
- Jeda pengubahan *flowmeter* (Δt) : 3 menit

f (kHz)	S (ml/min)	kondisi plasma	f (kHz)	S (ml/min)	kondisi plasma
30	100	x	60	100	x
	200	x		200	x
	300	x		300	x
	400	x		400	x
	500	x		500	x
40	100	x	70	100	x
	200	x		200	x
	300	x		300	x
	400	x		400	x
	500	x		500	x
50	100	x	80	100	x
	200	x		200	x
	300	x		300	x
	400	x		400	x
	500	x		500	x

B. Data hasil pengujian dengan laju aliran gas konstan

Pengujian dilakukan sebanyak empat kali dengan jarak elektroda yang berbeda.

I. Pengujian pada jarak 0,86 cm

Konfigurasi sistem:

1. Variabel kontrol :

- Waktu evakuasi : 3 jam
- Laju aliran gas : 500 ml/min
- Jarak antar elektroda (d) : 0,86 cm

No.	d (cm)	$\sum d$	d (cm)
1	0,87	2,59	0,86
2	0,86		
3	0,86		

2. Variabel bebas :

- Frekuensi sumber : 30 – 80 kHz (interval 10 kHz)
- Bukaan katup pembuangan: $\frac{1}{2}$ - 3 $\frac{1}{2}$ putaran (interval $\frac{1}{2}$ putaran) Jeda pengubahan *flowmeter* (Δt) : 5 menit

f (kHz)	bukaan V2 (putaran)	kondisi plasma	f (kHz)	bukaan V2 (putaran)	kondisi plasma
30	3,5	x	60	3,5	x
	3	x		3	x
	2,5	x		2,5	x
	2	x		2	x
	1,5	x		1,5	x
	1	x		1	x
	0,5	x		0,5	x
40	3,5	x	70	3,5	x
	3	x		3	x
	2,5	x		2,5	x
	2	x		2	x
	1,5	x		1,5	x
	1	x		1	x
	0,5	x		0,5	x
50	3,5	x	80	3,5	x
	3	x		3	x
	2,5	x		2,5	x
	2	x		2	x
	1,5	x		1,5	x
	1	x		1	x
	0,5	x		0,5	x

II. Pengujian pada jarak 0,64 cm

Konfigurasi sistem:

1. Variabel kontrol :

- Waktu evakuasi : 3 jam
- Laju aliran gas : 500 ml/min
- Jarak antar elektroda (d) : 0,64 cm

No.	d (cm)	$\sum d$	d (cm)
1	0,64	1,92	0,64
2	0,64		
3	0,64		

2. Variabel bebas :

- Frekuensi sumber : 30 – 80 kHz (interval 10 kHz)

- b. Buka an katup pembuangan: $\frac{1}{2}$ - $3 \frac{1}{2}$ putaran (interval $\frac{1}{2}$ putaran)
- c. Jeda pengubahan *flowmeter* (Δt) : 5 menit

f (kHz)	bukaan V2 (putaran)	kondisi plasma	f (kHz)	bukaan V2 (putaran)	kondisi plasma
30	3,5	x	60	3,5	x
	3	x		3	x
	2,5	x		2,5	x
	2	x		2	x
	1,5	x		1,5	x
	1	x		1	x
	0,5	x		0,5	x
40	3,5	x	70	3,5	x
	3	x		3	x
	2,5	x		2,5	x
	2	x		2	x
	1,5	x		1,5	x
	1	x		1	x
	0,5	x		0,5	x
50	3,5	x	80	3,5	x
	3	x		3	x
	2,5	x		2,5	x
	2	x		2	x
	1,5	x		1,5	x
	1	x		1	x
	0,5	x		0,5	x

III. Pengujian pada jarak 0,47 cm

Konfigurasi sistem:

1. Variabel kontrol :
 - a. Waktu evakuasi : 3 jam
 - b. Laju aliran gas : 500 ml/min
 - c. Jarak antar elektroda (d) : 0,47 cm

No.	d (cm)	Σ d	d (cm)
1	0,46	1,4	0,47
2	0,47		
3	0,47		

2. Variabel bebas:

- Frekuensi sumber : 30 – 80 kHz (interval 10 kHz)
- Bukaan katup pembuangan: $\frac{1}{2}$ - 3 $\frac{1}{2}$ putaran (interval $\frac{1}{2}$ putaran)
- Jeda pengubahan *flowmeter* (Δt) : 5 menit

f (kHz)	bukaan V2 (putaran)	kondisi plasma	f (kHz)	bukaan V2 (putaran)	kondisi plasma
30	3,5	x	60	3,5	x
	3	x		3	x
	2,5	x		2,5	x
	2	x		2	x
	1,5	x		1,5	x
	1	x		1	x
	0,5	x		0,5	x
40	3,5	x	70	3,5	x
	3	x		3	x
	2,5	x		2,5	x
	2	x		2	x
	1,5	x		1,5	x
	1	x		1	x
	0,5	x		0,5	x
50	3,5	x	80	3,5	x
	3	x		3	x
	2,5	x		2,5	x
	2	x		2	x
	1,5	x		1,5	x
	1	x		1	x
	0,5	x		0,5	x

IV. Pengujian pada jarak 0,25 cm

Konfigurasi sistem:

1. Variabel kontrol :

- Waktu evakuasi : 3 jam
- Laju aliran gas : 500 ml/min
- Jarak antar elektroda (d) : 0,25 cm

No.	d (cm)	$\sum d$	$\bar{d}$ (cm)
1	0,25	0,76	0,25
2	0,25		
3	0,26		

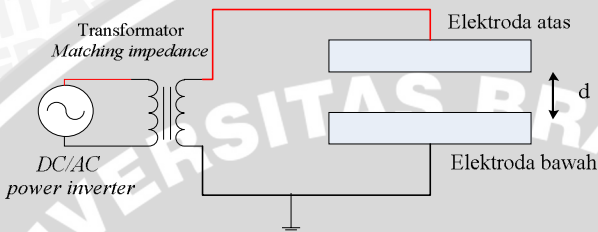
2. Variabel bebas :

- Frekuensi sumber : 30 – 80 kHz (interval 10 kHz)
- Bukaan katup pembuangan: $\frac{1}{2}$ - 3 $\frac{1}{2}$ putaran (interval $\frac{1}{2}$ putaran)
- Jeda pengubahan *flowmeter* (Δt) : 5 menit

f (kHz)	bukaan V2 (putaran)	kondisi plasma	f (kHz)	bukaan V2 (putaran)	kondisi plasma
30	3,5	x	60	3,5	x
	3	x		3	x
	2,5	x		2,5	x
	2	x		2	x
	1,5	x		1,5	x
	1	x		1	x
	0,5	x		0,5	x
40	3,5	x	70	3,5	x
	3	x		3	x
	2,5	x		2,5	x
	2	x		2	x
	1,5	x		1,5	x
	1	x		1	x
	0,5	x		0,5	x
50	3,5	x	80	3,5	x
	3	x		3	x
	2,5	x		2,5	x
	2	x		2	x
	1,5	x		1,5	x
	1	x		1	x
	0,5	x		0,5	x

Lampiran 3 Data Hasil Pengujian Pembangkitan Plasma Tahap II

Skematik pengujian tahap II



Data hasil pengujian dengan konfigurasi :

1. Variabel kontrol :
 - a. Waktu evakuasi : 3 jam
 - b. Laju aliran gas : 500 ml/min
 - c. Frekuensi sumber : 50 kHz
 - d. Tegangan Vpp sumber : 508 V
 - e. Bukaan katup pembuangan : $\frac{1}{2}$ putaran
 - f. Waktu pengamatan (Δt) : 5 menit
2. Variabel bebas : jarak elektroda : 0,26 cm, 0,47 cm, 0,64 cm, dan 0,86 cm.

d (cm)	Δt (menit ke-)	kondisi plasma
0,86	1	x
	2	x
	3	x
	4	x
	5	x
0,64	1	x
	2	x
	3	x
	4	x
	5	x

0,47	1	x
	2	x
	3	x
	4	x
	5	x
0,25	1	x
	2	x
	3	x
	4	x
	5	x



Lampiran 4 Foto instrumen dalam penelitian



Sistem Vakum



Elektroda dan sungkup



DC/AC power inverter



Transformator *matching impedance*



Kontrol sistem pemanas



Filamen dan sensor *Bayard-Alpert nude gauge*



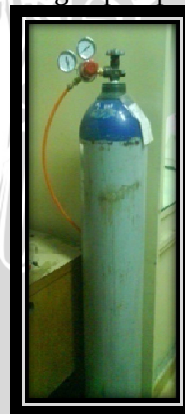
Power supply pengukur tekanan metode ionisasi



Pompa Rotary dan katup pembuangan pompa



Flowmeter



Tabung gas nitrogen