

**KARAKTERISASI TEMPERATUR ELEKTRON (T_e) DAN
DENSITAS ELEKTRON (N_e) DARI SPEKTROSKOPI EMISI
OPTIK UNTUK PLASMA GAS CAMPURAN ARGON DAN
METANA YANG DIHASILKAN DARI *PLASMA ENHANCED*
CHEMICAL VAPOR DEPOSITION
(PE CVD)**

SKRIPSI

Oleh :
M. Shoufie Ukhtary
0910930011



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2013**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



**KARAKTERISASI TEMPERATUR ELEKTRON (T_e) DAN
DENSITAS ELEKTRON (N_e) DARI SPEKTROSKOPI EMISI
OPTIK UNTUK PLASMA GAS CAMPURAN ARGON DAN
METANA YANG DIHASILKAN DARI *PLASMA ENHANCED*
*CHEMICAL VAPOR DEPOSITION***

SKRIPSI

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

Oleh :

M. Shoufie Ukhtary

0910930011



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2013**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

KARAKTERISASI TEMPERATUR ELEKTRON (T_e) DAN DENSITAS ELEKTRON (N_e) DARI SPEKTROKOPI EMISI OPTIK UNTUK PLASMA GAS CAMPURAN ARGON DAN METANA YANG DIHASILKAN DARI PLASMA ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (PE CVD)

Oleh :
M.Shoufie Ukhtary
0910930011

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. Eng. Masruroh, M.Si.
NIP. 197512312002122002

Dr. rer. nat. Abdurrouf, M.Si
NIP. 197209031994121001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya

Adi Susilo, Ph.D
NIP. 196312271991031002

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : M.Shoufie Ukhtary
NIM : 0910930011
Jurusan : Fisika
Penulis Skripsi berjudul :

KARAKTERISASI TEMPERATUR ELEKTRON (Te) DAN DENSITAS ELEKTRON (Ne) DARI SPEKTROSKOPI EMISI OPTIK UNTUK PLASMA GAS CAMPURAN ARGON DAN METANA YANG DIHASILKAN DARI PLASMA ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (PE CVD)

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Isi dari skripsi yang saya buat adalah benar-benar karya sendiri dan tidak menjiplak karya orang lain, selain nama-nama termaktub di isi dan tertulis di daftar pustaka dalam skripsi ini.
2. Apabila di kemudian hari ternyata skripsi saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya akan bersedia menanggung segala resiko yang akan saya terima.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang,

Yang menyatakan,

M.Shoufie Ukhtary
NIM. 0910930011

KARAKTERISASI TEMPERATUR ELEKTRON (T_e) DAN DENSITAS ELEKTRON (n_e) DARI SPEKTROSKOPI EMISI OPTIK UNTUK PLASMA GAS CAMPURAN ARGON DAN METANA YANG DIHASILKAN DARI *PLASMA ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION* (PE CVD)

ABSTRAK

Plasma adalah gas yang terionisasi, sehingga elektron lepas dari atom-atom gas tersebut. Plasma dapat disebut sebagai kumpulan dari atom-atom, ion-ion dan elektron. Parameter plasma yang penting untuk mendeskripsikan plasma adalah temperatur (T_e) dan densitas elektron (n_e). Plasma dihasilkan oleh *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PE CVD). Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data spektrum *Optical Emission Spectroscopy* (OES). Kemudian spektrum tersebut dianalisis menggunakan program *PeakFit* untuk memperoleh posisi panjang gelombang dari transisi atomik dalam plasma serta intensitasnya. Jenis spesies ditentukan dengan mencocokkan panjang gelombang dengan database *National Institute of Standard and Technology* (NIST). Selanjutnya, T_e dihitung menggunakan persamaan Boltzmann dan n_e dengan persamaan Saha-Boltzmann. Pada penelitian ini, laju alir gas dan tegangan pada plasma divariasikan. Peningkatan laju alir gas argon mengakibatkan meningkatnya T_e dan n_e , tetapi peningkatan laju alir gas metana menyebabkan T_e dan n_e turun. Untuk variasi tegangan RF, T_e dan n_e meningkat seiring naiknya tegangan RF. Sebaliknya pada variasi tegangan negatif DC, semakin tinggi tegangan, semakin rendah T_e dan n_e .

Kata kunci : plasma, *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*, persamaan Boltzmann, persamaan Saha-Boltzmann temperatur elektron, densitas elektron, *Optical Emission Spectroscopy*, database NIST

CHARACTERIZATION OF ELECTRON TEMPERATURE (T_e) AND DENSITY (n_e) FROM OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY FOR ARGON – METHANE MIXED GAS PLASMA PRODUCED BY PLASMA ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (PE CVD)

ABSTRACT

Plasma is ionized gas, so that electrons are released from the gas atoms. Plasma can be referred as collection of neutral atoms, ions and electrons. The important plasma parameters to describe plasma are electron temperature (T_e) and density (n_e). Plasma has been produced by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PE CVD). The spectrum data used in this research was obtained by Optical Emission Spectroscopy (OES), then the spectrum was analysed using PeakFit programm to obtain wavelength position and intensity of atomic transition. The spesies of each transisition was determined by using National Institute of Standard and Technology (NIST) atomic database. T_e then was calculated using Boltzmann equation and n_e using Saha-Boltzmann equation. In this research, gas flow rate and voltage were varied. The increasing argon flow rate results in the increase of T_e and n_e , but T_e and n_e decrease while the methane flow rate increases. For RF voltage variation, electron temperature and density increase as the voltage rises. On the contrary, for negative DC voltage variation, the higher the voltage, the lower T_e and n_e .

Keywords : plasma, Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, Boltzmann equation, Saha-Boltzmann equation, electron temperature, electron density, Optical Emission Spectroscopy, NIST atomic Database

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT, penulis lahirkan sebagai rasa syukur atas semua ni'mat, rahmat, pertolongan dan petunjuk-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir berjudul "**KARAKTERISASI TEMPERATUR ELEKTRON (T_e) DAN DENSITAS ELEKTRON (N_e) DARI SPEKTROSKOPI EMISI OPTIK UNTUK GAS CAMPURAN ARGON DAN METANA YANG DIHASILKAN DARI PLASMA ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (PE CVD)**". Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains dalam bidang Fisika di Fakultas MIPA Universitas Brawijaya Malang.

Dalam penulisan tugas akhir ini penulis banyak mendapatkan dukungan dan saran. Oleh sebab itu pada kesempatan ini penulis ucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua dan keluarga penulis yang selalu memberikan semangat, doa dan dukungan untuk keberhasilan penulis
2. Dr. Eng. Masruroh, M.Si sebagai pembimbing I atas segala bentuk bimbingan dan kerja sama yang beliau berikan selama penyusunan tugas akhir
3. Dr. rer. nat. Abdurrouf, M.Si sebagai pembimbing II atas segala bentuk bimbingan dan kerja sama yang beliau berikan selama penyusunan tugas akhir
4. Adi Susilo, Ph.D selaku Ketua Jurusan Fisika
5. Bapak dan ibu dosen, staf pengajar, laboran, dan karyawan jurusan fisika
6. Seluruh teman-teman penulis fisika angkatan 2009 yang selalu membantu dan menyemangati penulis

Akhir kata penulis menyadari bahwa tugas akhir ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran sangat penulis harapkan. Semoga dapat bermanfaat bagi kita semua.

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
Lembar Pengesahan Skripsi	ii
Lembar Pernyataan	iii
Abstrak	iv
Abstract	v
Kata Pengantar	vi
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel	xi
Daftar Lampiran	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan penelitian	3
1.5 Manfaat penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Plasma	5
2.2 Proses Atomik	6
2.3 Metode Diagnostik	7
2.4 Spektroskopi Optik.....	7
2.4.1 Spektroskopi Emisi Optik.....	8
2.5 Pengukuran Temperatur Secara Spektroskopik.....	9
2.6 Distribusi Partikel.....	11
2.6.1 Distribusi Boltzmann	11
2.6.2 Distribusi Saha Boltzmann	11
BAB III METODE PENELITIAN	15
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	15
3.2 Tahapan Pengerjaan	15
3.3 Diagram Alir Penelitian	17
3.4 Pengolahan Data OES Menggunakan <i>Software</i> <i>PeakFit</i>	18

3.5	Penentuan Spesies Plasma	25
3.6	Penentuan Temperatur dan Densitas Elektron.....	26
3.7	Data Spektrum OES dan Variasi Plasma.....	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		31
4.1	Temperatur dan Densitas Elektron	31
4.2	Proses Pengambilan Data	32
4.3	Hasil Penentuan Temperatur dan Densitas Elektron	34
4.1	Pembahasan	44
BAB V PENUTUP		57
5.1	Kesimpulan.....	57
5.1	Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA		59
Lampiran.....		61



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Spektrometer Optik	8
Gambar 3.1 Rancangan Kegiatan.....	17
Gambar 3.2 Diagram Alir Analisis Spektrum OES.....	17
Gambar 3.3 Tampilan Utama Software PeakFit.....	18
Gambar 3.4 Tampilan Spektrum pada Software <i>PeakFit</i>	18
Gambar 3.5 Menu Pengaturan pada Jendela <i>Autofit and Substract Baseline</i>	19
Gambar 3.6 Menu Pengaturan pada Jendela <i>AutoFit Peaks I Residual</i>	20
Gambar 3.7 Jendela <i>PeatFit Numerical Fitting</i>	21
Gambar 3.8 Jendela <i>AutoFit Peaks I Residual</i>	22
Gambar 3.9 Jendela <i>Review Fitting</i>	23
Gambar 3.10 Hasil <i>Fitting</i>	24
Gambar 3.11 Masukan Spektrum dan Jangkauan Panjang Gelombang pada Database NIST	25
Gambar 3.12 Pilihan Keadaan Transisi	25
Gambar 3.13 <i>Level Information</i>	26
Gambar 3.14 Hasil Pencarian pada Database NIST	27
Gambar 3.15 <i>Boltzmann Plot</i>	28
Gambar 4.1 Grafik Pengaruh Laju Alir terhadap Temperatur Elektron (Argon Murni)	35
Gambar 4.2 Grafik Pengaruh Laju Alir terhadap Densitas Elektron (Argon Murni)	35
Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Laju Alir terhadap Temperatur Elektron (Argon-Metana Variasi Laju Alir Argon)	37
Gambar 4.4 Grafik Pengaruh Laju Alir terhadap Densitas Elektron (Argon-Metana Variasi Laju Alir Argon)	37

Gambar 4.5	Grafik Pengaruh Laju Alir terhadap Temperatur Elektron (Argon-Metana Variasi Metana Laju Alir)	39
Gambar 4.6	Grafik Pengaruh Laju Alir terhadap Densitas Elektron (Argon-Metana Variasi Metana Laju Alir)	39
Gambar 4.7	Grafik Pengaruh Tegangan DC terhadap Temperatur Elektron (Argon-Metana Variasi Tegangan DC)	41
Gambar 4.8	Grafik Pengaruh Tegangan DC terhadap Densitas Elektron (Argon-Metana Variasi Tegangan DC)	41
Gambar 4.9	Grafik Pengaruh Tegangan RF terhadap Temperatur Elektron (Argon-Metana Variasi Tegangan RF)	43
Gambar 4.10	Grafik Pengaruh Tegangan RF terhadap Densitas Elektron (Argon-Metana Variasi Tegangan RF)	43
Gambar 4.11	Salah Satu Spektrum OES Argon Murni	44
Gambar 4.12	Salah Satu Spektrum OES Argon - Metana	47
Gambar 4.13	Hubungan Daya Ohmic terhadap Frekuensi Tumbukan	52
Gambar 4.14	Spektrum OES Plasma Campuran Gas Argon –Metana Ar 70 mL/min Metana 180 mL/min	54
Gambar 4.15	Hubungan Intensitas terhadap Laju Alir Metana	55

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Proses Atomik dalam Plasma	7
Tabel 4.1 Pengaruh Laju Alir terhadap Temperatur Elektron (Argon Murni)	34
Tabel 4.2 Pengaruh Laju Alir terhadap Densitas Elektron Pengaruh (Argon Murni).....	34
Tabel 4.3 Pengaruh Laju Alir terhadap Temperatur Elektron (Argon-Metana Variasi Laju Alir Argon)	36
Tabel 4.4 Pengaruh Laju Alir terhadap Densitas Elektron (Argon-Metana Variasi Laju Alir Argon)	36
Tabel 4.5 Pengaruh Laju Alir terhadap Temperatur Elektron (Argon-Metana Variasi Laju Alir Metana)	38
Tabel 4.6 Pengaruh Laju Alir terhadap Densitas Elektron (Argon-Metana Variasi Laju Alir Metana)	38
Tabel 4.7 Pengaruh Tegangan DC terhadap Temperatur Elektron (Argon-Metana Variasi Tegangan DC)	40
Tabel 4.8 Pengaruh Tegangan DC terhadap Densitas Elektron (Argon-Metana Variasi Tegangan DC)	40
Tabel 4.9 Pengaruh Tegangan RF terhadap Temperatur Elektron (Argon-Metana Variasi Tegangan RF)	42
Tabel 4.10 Pengaruh Tegangan RF terhadap Densitas Elektron (Argon-Metana Variasi Tegangan RF)	42

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
Lampiran A. Data Spektroskopik	61
Lampiran B. <i>Ohmic Heating</i>	93
Lampiran C. <i>Stochastic Heating</i>	95
Lampiran D. Database NIST.....	97

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Plasma adalah salah satu dari wujud dari benda yang telah lama dikenal. Plasma merupakan gas yang terionisasi sehingga elektron dapat terlepas dari atom-atom gas tersebut. Dari pengertian tersebut plasma merupakan kumpulan elektron dan ion. Walaupun kurang begitu dikenal, mayoritas wujud dari benda di jagat raya ini adalah plasma. Lebih dari 99% dari jagat raya ini memiliki wujud plasma. Plasma pertama kali dikenalkan pada tahun 1927 oleh Langmuir (Harry, 2010) dan wujud ini mendapatkan namanya berdasarkan analogi pada plasma darah (Piel, 2010).

Plasma memiliki banyak aplikasi dalam teknologi. Salah satu penerapan plasma dalam industri adalah untuk melakukan pelapisan lapisan tipis pada material. Sebagai contoh adalah lapisan tipis karbon. Lapisan tipis ini dapat dibentuk dengan cara mendeposisikan karbon yang dibantu dengan plasma melalui metode PE CVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*). Kualitas dari hasil deposisi ini dan mekanisme pembentukan lapisan tipis dipengaruhi oleh kondisi pendeposisian dan juga karakteristik plasma yang digunakan (Jamroz & Zyrnicki, 2010).

Plasma gas campuran argon dan metana telah dihasilkan melalui metode PE CVD untuk mendeposisikan lapisan tipis karbon. Plasma dibangkitkan di dalam reaktor pada laju alir gas argon-metana dan tegangan DC-RF yang berbeda-beda. Laju alir gas dan tegangan yang digunakan untuk membangkitkan plasma mempengaruhi karakteristik dari plasma yang dibangkitkan, yaitu temperatur elektron dan densitas elektron dari plasma.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menentukan temperatur dan densitas elektron dari plasma yang digunakan dalam proses pendeposisian dan juga mempelajari pengaruh variasi laju alir gas dan tegangan terhadap temperatur dan densitas elektron tersebut. Pengukuran temperatur dan densitas elektron tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan teknik langsung yaitu dengan menyisipkan elektroda ke dalam plasma, elektroda ini disebut *Langmuir Probe*. Tetapi teknik ini

lebih memakan biaya dan bersifat invasif, sehingga dapat mengganggu proses atomik dalam plasma. Sehingga dalam penelitian ini digunakan teknik spektroskopi yaitu menggunakan *Optical Emission Spectroscopy* (OES). Secara singkat, temperatur dan densitas elektron dapat ditentukan secara spektroskopik dengan menganalisis spektrum emisi optik plasma yang dihasilkan oleh OES. Penentuan parameter plasma secara spektroskopik ini memberi keuntungan, yaitu metode ini bersifat non-invasif, sehingga tidak mengganggu proses atomik yang terjadi dalam plasma dan juga lebih hemat biaya dibandingkan dengan pengukuran langsung menggunakan *Langmuir Probe*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pada uraian latar belakang, maka dapat dirumuskan beberapa masalah antara lain :

1. Bagaimana cara menentukan spesies plasma yang dihasilkan dari pengukuran dengan *Optical Emission Spectroscopy* (OES)?
2. Bagaimana cara menentukan parameter plasma, yaitu temperatur dan densitas elektronnya?
3. Bagaimana pengaruh parameter deposisi yaitu laju alir gas ke dalam plasma dan tegangan bias yang digunakan terhadap parameter plasma?

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan yang dibahas tidak meluas, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Data berupa spektrum emisi plasma dari pengukuran dengan *Optical Emission Spectroscopy* (OES).
2. Tidak membahas mengenai proses eksperimen di mana data spektrum diperoleh menggunakan *Optical Emission Spectroscopy* (OES).
3. Analisis spektrum dilakukan menggunakan program analisis yang sudah tersedia yaitu *Origin* dan *PeakFit*

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk menentukan spesies plasma yang dihasilkan dari pengukuran dengan *Optical Emission Spectroscopy* (OES).
2. Untuk menentukan parameter plasma yaitu temperatur dan densitas elektron.
3. Untuk mempelajari pengaruh laju alir gas ke dalam plasma dan tegangan bias terhadap parameter plasma.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini berguna untuk dapat menentukan parameter plasma berupa temperatur dan densitas elektron dengan menggunakan teknik spektroskopik tidak melalui pengukuran langsung menggunakan *Langmuir Probe*.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Plasma

Dalam fisika, kata plasma berkaitan dengan gas yang terionisasi sempurna atau terionisasi sebagian dan terdiri atas elektron dan ion. Istilah plasma pertama kali diperkenalkan 80 tahun yang lalu oleh Irving Langmuir (1881-1957) untuk menjelaskan bagian bermuatan netral dari *gas discharge*. Berdasarkan keterangan rekan kerjanya Harold M. Mott-Smith, "Langmuir menunjukkan bahwa bagian 'seimbang' dari *discharge* bertindak seperti semacam lapisan yang membawa partikel khusus, seperti elektron berkecepatan tinggi dari filamen termionik, molekul dan ion dari gas. Hal ini mengingatkannya pada bagaimana plasma darah membawa sel darah merah dan putih". Hal ini menunjukkan bahwa hubungan pemilihan nama plasma yang diperkenalkan oleh Langmuir dengan plasma darah adalah disengaja.

Plasma adalah gas yang terdiri atas partikel-partikel bermuatan, di mana energi potensial dari partikel-partikelnya disebabkan tetangga terdekatnya dan jauh lebih kecil daripada energi kinetiknya. Keadaan plasma adalah wujud ke-empat dari benda: memanaskan zat padat menjadikannya zat cair, memanaskan zat cair menjadikannya gas, dan memanaskan gas menjadikannya plasma. Kata plasma datang dari bahasa Yunani Plasma yang berarti sesuatu yang dibentuk atau *molded*. Kata ini diperkenalkan untuk mendeskripsikan gas terionisasi oleh Tonks dan Langmuir. Lebih dari 99% dari jagat raya berada dalam keadaan plasma (Nicholson, 1983).

David A. Frank-Kamenetzki mengidentifikasi plasma sebagai wujud ke-empat dari benda. Pandangan ini, di sisi lain, menyinggung keempat elemen Yunani pra-Sokratik, yaitu Bumi (padat), Air (cair), Udara (gas), dan Api. Di sisi lain, ide wujud ke-empat dari benda dikemukakan oleh Michael Faraday (1791-1867), yang pada tahun 1809, berspekulasi mengenai wujud benda *radian* yang dia kaitkan dengan fenomena kilauan yang dihasilkan oleh arus listrik yang mengalir dalam gas.

Dari sudut pandang fenomologi, identifikasi plasma sebagai wujud baru dari benda bisa dibenarkan karena pemecahan atom netral pada suhu tinggi menjadi elektron dan ion dikaitkan dengan tingkat energi baru, yaitu energi ionisasi. Sekarang, kita tahu bahwa plasma bukan hanya wujud benda yang panas dan tidak teratur seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Melainkan, kita telah mempelajari selama 20 tahun terakhir bahwa sistem plasma bisa memiliki fase gas, cair, dan padat.

Gas netral dikarakteristikan dengan jumlah partikel per satuan volume, yang dikenal sebagai angka kerapatan (*number density*) n . Satuan dari n adalah m^{-3} . Gerak partikel (dalam keseimbangan termodinamika) ditentukan oleh temperatur T dari gas. Dalam gas ideal, perkalian antara angka kerapatan dan temperatur menghasilkan tekanan, $p = nk_B T$, di mana k_B adalah konstanta Boltzmann. Terminologi tersebut berlaku juga dalam plasma, tetapi keadaan plasma merupakan gabungan dari dua gas yang berbeda, yaitu elektron yang ringan dan ion yang berat. Maka, kita harus membedakan elektron dan ion berdasarkan rapatnya masing-masing, n_e dan n_i . Selebihnya, plasma lebih sering berada pada keadaan yang tidak seimbang dengan temperatur yang berbeda, T_e dan T_i yang merupakan temperature elektron dan temperature ion. Dua jenis temperature plasma tersebut biasanya ditemukan dalam gas discharge. Plasma dalam matahari, merupakan contoh yang baik untuk plasma isothermal dengan $T_e = T_i$ (Piel, 2010).

2.2 Proses Atomik

Plasma terdapat dalam lingkungan yang memungkinkan banyak proses ionisasi terjadi. Proses ionisasi ini dapat berupa fotoionisasi dengan menggunakan sumber radiasi UV berintensitas tinggi atau ionisasi secara tumbukan oleh elektron berenergi tinggi. Ionisasi tumbukan adalah proses dominan dalam *gas discharge* karena cukupnya jumlah elektron berenergi tinggi. Fotoionisasi ditemukan dalam plasma luar angkasa di mana rapat elektron dan ion rendah tetapi terdapat banyak foton UV. Proses ini dan proses rekombinasi dituliskan di dalam tabel di bawah

Tabel 2.1 Proses Atomik dalam Plasma (Piel, 2010)

$e + A \rightarrow A^+ + 2e$	Ionisasi Tumbukan
$h\nu + A \rightarrow A^+ + e$	Fotoionisasi
$A^+ + 2e \rightarrow A + e$	Three-body recombination
$A^+ + e \rightarrow A$	Two-body recombination

2.3 Metode Diagnostik

Diagnostik penting untuk memahami plasma dan aplikasi dari banyak proses plasma, terutama proses yang digunakan dalam pembuatan chip komputer dan komponen elektronik lainnya. Parameter utama dari plasma yang menarik adalah rapat jumlah partikel netral, bermuatan dan yang tereksitasi, temperatur dan serta tingkat energi dari elektron dan ion, distribusi energi dari elektron dan ion, ketebalan selubung (*sheath thickness*) dan distribusi medan listrik dan magnet. Pengukuran langsung yang menggunakan *probe* dapat mempengaruhi plasma dan jangkauan operasi plasma yang sangat luas juga berarti bahwa tersedianya metode yang universal. Metode tanpa kontak (*non-contact methods*), seperti pengukuran absorpsi dan emisi, tidak mempengaruhi plasma secara signifikan, tetapi biasanya metode ini kompleks dan sulit diinterpretasi.

2.4 Spektroskopi Optik

Metode optik untuk diagnostik seperti spektroskopi emisi, spektroskop absorpsi dan *laser-induced fluorescence* (LIF) memberikan informasi yang berguna. Intensitas dari garis spektral adalah sebagai fungsi temperatur dari spesies yang diemisikan dan panjang gelombang yang berkaitan dengan atom dan molekul. Metode intensitas relatif secara teori adalah metode spektroskopi yang lebih sederhana, tetapi metode ini dapat memberikan kesalahan jika *discharge* tidak homogen atau tipis secara optis (*optically thin*). Pengukuran intensitas absolut juga bisa dilakukan, tetapi metode ini lebih kompleks (Harry, 2010).

2.4.1 Spektroskopi Emisi Optik

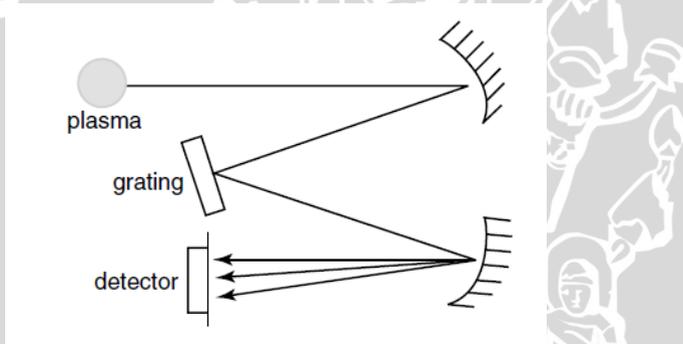
Persamaan Planck untuk intensitas emisi spektra dari suatu sumber per satuan *solid angle* adalah

$$I'(\lambda T) \sim \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \right) \quad (2.1)$$

Frekuensi dan panjang gelombang dari emisi sebanding dengan selisih energi antara keadaan energi atas dan bawah yaitu,

$$hf = E_2 - E_1 \quad (2.2)$$

Di mana E adalah energi (eV), h adalah konstanta Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J s), f adalah frekuensi (Hz) dan λ panjang gelombang (m).



Gambar 2.1 Spektrometer Optik (Harry, 2010)

Sebuah spektrometer optik diilustrasikan pada Gambar 2.1 di atas. Sinar dikumpulkan dari plasma menggunakan lensa atau serat optik dan dibagi menjadi spektrumnya oleh kisi interferensi atau oleh filter optik. Sebuah fotodioda, sebuah detektor muatan terkopel digunakan sebagai detektor yang bergantung pada jangkauan spektral dan sensitivitas yang diperlukan. Kekuatan garis relatif dari garis-garis spektral dapat diperoleh dari perbandingan dengan sumber emisi referensi untuk kondisi yang sama; perbedaan apapun antara sumber dan referensi dapat memberikan ketidakakuratan.

Emisi dari atom dari transisi elektronik menuju keadaan dasar sudah sering terdefinisi dengan baik dan bisa digunakan untuk mengidentifikasi partikel netral dan ion dari spesies dari tabel panjang gelombang emisi. Spektra dari molekul dan ion lebih kompleks daripada untuk transisi atom ke keadaan dasar. Secara prinsip, intensitas dari spektra garis dapat memberikan informasi mengenai konsentrasi spesies yang tereksitasi. Tetapi, jika ada perubahan yang terjadi yang mempengaruhi efisiensi eksitasi atau parameter plasma, metode ini tidak dapat lagi digunakan (Harry, 2010).

2.5 Pengukuran Temperatur dengan Metode Spektroskopik

Selain penentuan komposisi kimia dari plasma secara kualitatif dari identifikasi garis emisi dan absorpsi, pengukuran temperatur elektron dan ion atau atom adalah aplikasi spektroskopi tertua untuk plasma dan *gaseous electrical discharge physics*, begitu juga astronomi. Pengukuran ini terus memiliki peran penting dalam riset mengenai proses fusi. Dalam laboratorium, metode independen berdasarkan pada hamburan cahaya laser dan Langmuir probe juga dapat digunakan. Bagaimanapun juga, dalam astronomi, metode spektroskopik harus berdiri sendiri. Perbedaan penting lainnya adalah peran dominan dari transfer radiatif dalam aplikasi astronomi, dibandingkan dengan kedalaman optik yang relatif kecil dalam beberapa bagian yang berguna dari spektrum plasma laboratorium (Griem, 2005).

Berdasarkan hasil dari Griem T_e akan sama dengan T_{exc} hanya jika plasma berada pada keadaan kesetimbangan termodinamik. Teknik lainnya yang sering digunakan untuk pengukuran temperatur eksitasi adalah pengukuran intensitas garis-garis spektra yang diemisikan, yang berada dalam keadaan kesetimbangan termodinamik, diberikan oleh

$$I_{ij} = \frac{1}{4\pi} \frac{hc}{\lambda} \frac{N_o}{U(T)} g_i A_{ij} e^{-E_i/kT} \quad (2.3)$$

Di mana I_{ij} adalah intensitas radiasi N_o adalah total rapat atom dalam keadaan dasar, g_i adalah bobot statistik dari tingkat energi

atas, E_i adalah energi dari tingkat energi atas, dan $U(T)$ adalah fungsi partisi.

Ketika dituliskan dalam bentuk kekuatan osilator f_{ij} untuk menggantikan probabilitas transisi A_{ij} , persamaan tersebut dapat ditulis sebagai

$$I_{ij} = h \frac{e^2}{2\lambda^3} \frac{N_o}{U(T)} \frac{g_{if_{ij}}}{\epsilon_o m_e} e^{-E_i/kT} \quad (2.4)$$

Di mana ϵ_o adalah permitivitas ruang hampa, m_e adalah massa elektron dan e adalah muatan elektron.

Berdasarkan persamaan di atas, T_{exc} dapat ditentukan dengan hanya menggunakan satu garis spektra saja. Tetapi, hal ini membutuhkan penentuan intensitas absolut, nilai probabilitas transisi yang akurat, fungsi partisi dan pengetahuan mengenai jumlah atom N_o . Untuk menghindari kesulitan ini, T_{exc} dapat ditentukan dari rasio intensitas dari dua atau lebih garis-garis spektra yang berasal dari tahap ionisasi yang sama. Dalam kasus ini, fungsi partisi, dan rapat jumlah atom N_o akan hilang, dengan tambahan tidak diperlukannya pengukuran intensitas absolut. Untuk memperoleh nilai temperatur yang akurat, sejumlah garis spektra dapat digunakan. Dari persamaan sebelumnya, dapat dilihat bahwa

$$\ln \frac{I_{ij}\lambda^3}{g_{if_{ij}}} = Const - \frac{E_i}{kT_{exc}} \quad (2.5)$$

Selanjutnya, grafik dari $\ln \frac{I\lambda^3}{gf}$ atau $\ln \frac{I\lambda}{gA}$ terhadap energi dari level atas E_i akan menghasilkan garis lurus, jika populasi mengikuti distribusi Boltzmann. Garis lurus ini disebut grafik Boltzmann. Kemiringannya sama dengan $-\frac{1}{kT_{exc}} = -\frac{0,625}{T_{exc}}$ jika E_i dalam satuan cm^{-1} atau $-5040/T$ jika dalam eV (Hamed, 2005).

2.6 Distribusi Partikel

2.6.1 Distribusi Boltzmann

Populasi relatif dari tingkat energi yang berbeda-beda dapat ditentukan oleh faktor Boltzmann. Populasi relatif dari tingkat energi E_i dan E_k diberikan sebagai

$$\frac{n_i}{n_k} = \frac{g_i}{g_k} e^{\left(\frac{E_i - E_k}{k_B T}\right)} \quad (2.6)$$

g_i dan g_k adalah degenerasi dari tingkat i dan k , yaitu jumlah subtingkat dengan energi yang sama dan E adalah tingkat energi.

Komponen eksponensial $e^{\left(\frac{E}{k_B T}\right)}$ menentukan seberapa banyak atom telah dapat melampaui penghalang energi $E_i - E_k$ antara tingkat i dan k . Contoh distribusi Boltzmann lainnya adalah distribusi kecepatan Maxwell-Boltzmann untuk partikel bebas

$$f_M(v_x, v_y, v_z) = \frac{1}{Z} e^{\left(-\frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2k_B T}\right)} \quad (2.7)$$

z adalah faktor normalisasi. Di sini, distribusi kecepatan ditentukan oleh energi kinetik $E = \frac{1}{2} m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$ (Piel, 2010).

2.6.2 Distribusi Saha-Boltzmann

Berdasarkan mekanika statistik, dalam keadaan kesetimbangan termodinamik, rasio jumlah ion per satuan volume dalam dua level energi yang berbeda, atau rasio rapat populasi, diberikan oleh distribusi Boltzmann.

$$\frac{n_{z-1}(q)}{n_{z-1}(p)} = \frac{g_{z-1}(q)}{g_{z-1}(p)} \exp\left(-\frac{E_{z-1}(p,q)}{kT_e}\right) \quad (2.8)$$

Di mana, kita telah berasumsi bahwa level $p < q$ dalam tahap ionisasi ($z-1$). Jika ion-ion dalam tahap ionisasi ini memiliki banyak level termasuk p dan q , kita dapat membuat suatu grafik. Grafik ini disebut grafik Boltzmann, dan kita akan mendapatkan garis lurus, yang kemiringannya berkaitan dengan T_e .

Persamaan di atas berlaku untuk level energi ion-ion pada tahapan ionisasi tertentu. Hubungan termodinamika di atas dapat diperluas untuk energi yang lebih tinggi sepanjang batas ionisasi sampai ke keadaan kontinu sebagai elektron bebas. Karena level energi kontinu, kita anggap keadaan elektron bebas yang memiliki kecepatan v dalam range dv . Level atas dianggap sebagai kumpulan keadaan elektron bebas yang dipasangkan dengan ion inti (dalam keadaan dasar) dalam tahap ionisasi z . Maka, persamaan di atas dapat ditulis ulang sebagai

$$\frac{n_z(1,v)dv}{n_{z-1}(p)} = \frac{g_z(1,v)}{g_{z-1}(p)} \exp\left(\frac{\Delta E}{kT_e}\right) dv \quad (2.9)$$

Di mana $n_z(1,v)dv$ dan $g_z(1,v)$ menunjukkan, secara urut, populasi dan bobot statistik dari level atas, dan ΔE adalah beda energi antara level atas dan level bawah p .

Sekarang kita kenalkan ruang fase, yaitu ruang enam dimensi untuk pergerakan elektron bebas : tiga dimensi untuk koordinat spasial (x, y, z) dan tiga dimensi untuk ruang momentum (p_x, p_y, p_z) . Dalam bidang $x - p_x$, kita definisikan sebuah sel $\delta x, \delta p_x$ yang memiliki luas h . Argumen yang sama juga berlaku untuk bidang $y - p_y$ dan $z - p_z$. Jadi, jumlah keadaan diturunkan dari pergerakan elektron diberikan sebagai

$$\begin{aligned} g dv &= \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta p_x \cdot \Delta p_y \cdot \Delta p_z / h^3 \\ &= \Delta V 4\pi p^2 dp / h^3 \\ &= \left(\frac{1}{n_e}\right) 4\pi m^3 v^2 dv / h^3 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Persamaan ini memberikan jumlah keadaan untuk gerakan elektron. Bobot statistik dari level atas adalah

$$g_z(1,v)dv = \frac{4\pi m^3 v^2 dv}{n_e h^3} g_e g_z(1) \quad (2.11)$$

atau

$$g_z(1, E)dE = \frac{2\pi}{n_e} \left(\frac{2m}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{E} dE g_e g_z(1) \quad (2.12)$$

di mana g_e dan $g_z(1)$ adalah bobot statistik yang berasal dari struktur dalam dari elektron dan ion pada keadaan dasar. g_e berasal dari spin elektron dan $g_e = 2$. Persamaan ini juga ditemui dalam fisika zat padat sebagai rapat keadaan elektron dalam model elektron bebas. Persamaan ini dapat diubah menjadi

$$\begin{aligned} & \frac{n_z(1, v)n_e dv}{n_{z-1}(p)} \\ &= \frac{g_z(1)g_e}{g_{z-1}(p)} \frac{4\pi m^3 v^2}{h^3} \exp\left(-\frac{\chi_{z-1}(p)}{kT_e}\right) \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT_e}\right) dv \\ &= \frac{g_z(1)g_e}{g_{z-1}(p)} \left(\frac{2\pi m k T_e}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{\chi_{z-1}(p)}{kT_e}\right) f(v) dv \end{aligned} \quad (2.13)$$

Dalam banyak situasi, kita tidak tertarik dalam rasio populasi yang diberikan oleh persamaan di atas. Tetapi, kuantitas yang menarik adalah rasio rapat ion $n_z(1)$ dan rapat atom $n_{z-1}(p)$ dalam tingkat p . Kuantitas $n_z(1)$ dapat diperoleh dengan mengintegrasikan populasi sepanjang seluruh kecepatan elektron bebas, yaitu $n_z(1) = \int n_z(1, v) dv$. Dengan menggunakan kondisi normalisasi untuk distribusi Maxwell, kita peroleh distribusi Saha-Boltzmann

$$\begin{aligned} \frac{n_z(1)n_e}{n_{z-1}(p)} &= \frac{2g_z(1)}{g_{z-1}(p)} \left(\frac{2\pi m k T_e}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{\chi_{z-1}(p)}{kT_e}\right) \\ &= Z(p)^{-1} \end{aligned} \quad (2.14)$$

atau

$$n_{z-1}(p) = Z(p)n_z(1)n_e \quad (2.15)$$

Di mana $Z(p)$ disebut koefisien Saha-Boltzmann (Fujimoto, 2004).

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Waktu pengerjaan penelitian ini dimulai pada bulan Januari 2013 dan selesai pada bulan Mei. Proses pengerjaan dilakukan di Laboratorium Komputer Jurusan Fisika FMIPA Universitas Brawijaya Malang.

3.2 Tahapan Pengerjaan

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu:

1. Pengolahan Data Spektrum OES

Data yang digunakan berupa data spektrum OES pada keadaan plasma yang divariasi. Data ini berupa grafik dengan sumbu x berupa panjang gelombang foton emisi yang ditangkap oleh spektrograf OES dan sumbu y berupa intensitas foton emisi tersebut. Karena garis spektral pada spektrum mengalami pelebaran dan juga kemungkinan terjadi tumpang tindih antara garis spektral yang berdekatan, maka untuk mengetahui letak panjang gelombang foton emisi serta intensitasnya, spektrum tersebut harus dipisahkan (*resolve*). Untuk memisahkan garis-garis spektral, digunakan software statistik *PeakFit*. Untuk memisahkan garis-garis spektral tersebut, Secara garis besar, langkah-langkah yang digunakan adalah :

a. *Subtract Baseline* (Menghapus *Background*)

Tahapan ini berguna untuk menghilangkan pengaruh background dari data spektrum eksperimen.

b. *Smoothing* (Penghalusan)

Tahapan ini berfungsi untuk menghilangkan noise atau data yang menyimpang serta memperhalus spektrum OES.

c. *Fitting* (Pengepasan)

Tahapan ini adalah tahapan di mana, software akan mensimulasikan bentuk spektrum eksperimen. Hasil dari tahapan ini berupa puncak-puncak spektral yang terpisah.

d. *Review Fit* (Meninjau Hasil Pengepasan)

Setelah proses *Fitting*, untuk meninjau letak garis spektral dan intensitasnya, menu *Review Fit* dipilih.

2. Penentuan Spesies dari Plasma

Setelah mengetahui panjang gelombang foton emisi beserta intensitasnya, tahapan selanjutnya adalah penentuan spesies plasma yang memancarkan foton tersebut. Foton diemisikan karena adanya spesies plasma yang berpindah tingkat energi, yaitu dari tingkat energi lebih tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah. Untuk menentukan spesies plasma ini, panjang gelombang dari transisi yang bersangkutan dicocokkan dengan panjang gelombang transisi yang sudah terdapat di database transisi atomik National Institute of Standard and Technology (NIST) (http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html).

3. Penentuan Temperatur Elektron

Dengan asumsi bahwa plasma berada pada kesetimbangan termodinamika, maka temperatur elektron dapat ditentukan menggunakan metode *Boltzmann Plot*. Dari grafik garis linear pada *Boltzmann Plot*, akan diperoleh informasi temperatur elektron yang merupakan resiprok dari kemiringan garis (*slope*).

4. Penentuan Densitas Elektron

Dengan menggunakan persamaan Saha dan temperatur elektron yang sudah diperoleh sebelumnya, densitas elektron dapat ditentukan.

5. Penentuan Pengaruh Variasi Keadaan Plasma terhadap Temperatur dan Densitas Elektron

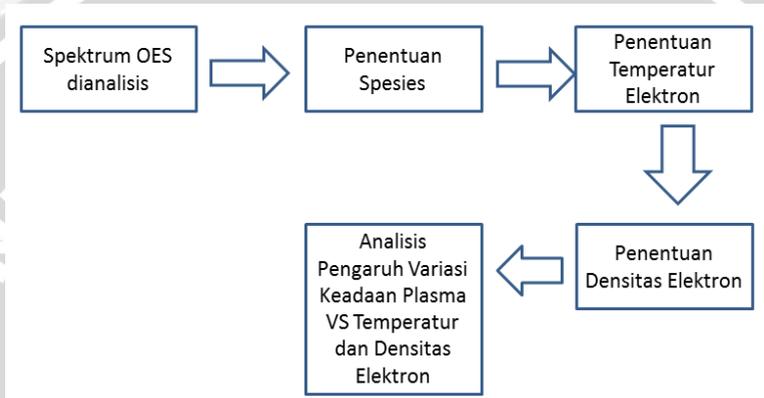
Pada penelitian ini, keadaan plasma divariasi, yaitu variasi laju alir gas (*flow rate*), DC dan RF bias. Dari variasi keadaan tersebut dapat ditentukan hubungannya terhadap temperatur dan densitas elektron.

6. Analisis Hasil dan Penulisan Laporan

Hasil berupa temperatur dan densitas elektron pada variasi parameter deposisi, yaitu perubahan laju alir (*flow rate*), dan tegangan bias kemudian dianalisis.

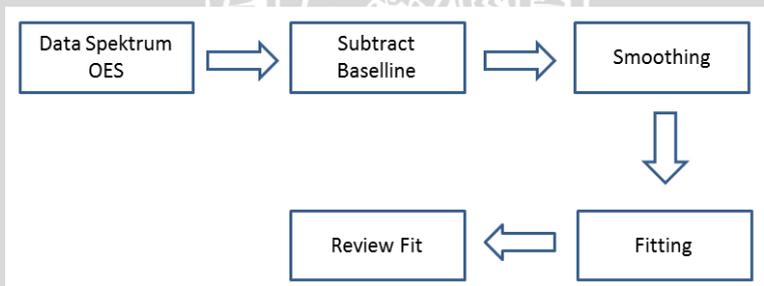
3.3 Diagram Alir Penelitian

Agar penelitian berlangsung dengan baik, maka diperlukan rancangan kegiatan penelitian yang urut. Rancangan tersebut digambarkan dalam diagram alir berikut :



Gambar 3.1 Rancangan Kegiatan

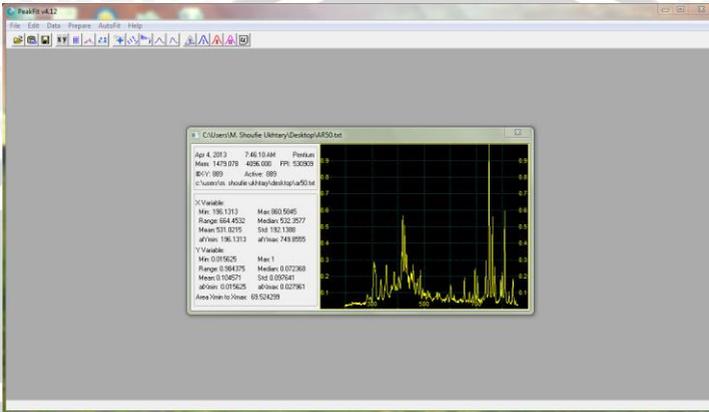
Analisis spektrum OES atau pengolahan data spektrum ditunjukkan secara urut pada diagram alir di bawah :



Gambar 3.2 Diagram Alir Analisis Spektrum OES

3.4 Pengolahan Data Spektrum OES Menggunakan Software Peak Fit

Tampilan utama software PeakFit adalah :

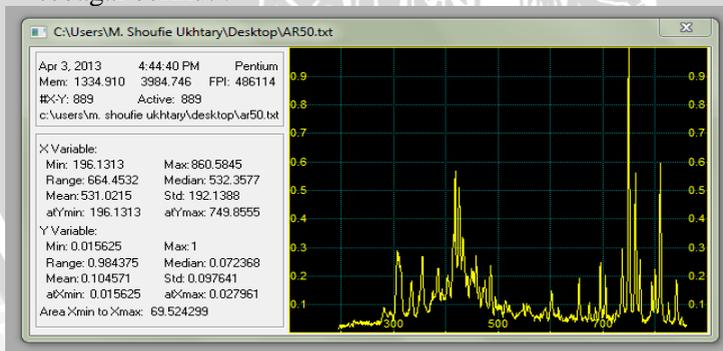


Gambar 3.3 Tampilan Utama Software *PeakFit*

Urut-urutan pengolahan data spektrum OES menggunakan software Peak Fit dijelaskan di bawah :

1. Membuka File Data Spektrum

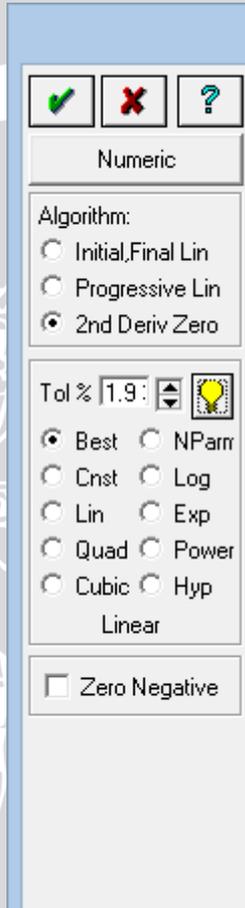
File data spektrum dapat berupa file txt atau excel. Untuk membukanya pada toolbar pilih menu File, kemudian data spektrum dipilih. Data spektrum OES akan ditampilkan sebagai berikut :



Gambar 3.4 Tampilan Spektrum pada Software *PeakFit*

2. Subtract Baseline

Langkah selanjutnya adalah menghilangkan baseline. Untuk memulainya, menu *Autofit* dipilih dan selanjutnya pilihan *Autofit and Subtract Baseline* dipilih. Pada jendela *Autofit and Subtract Baseline* terdapat menu pengaturan seperti berikut :

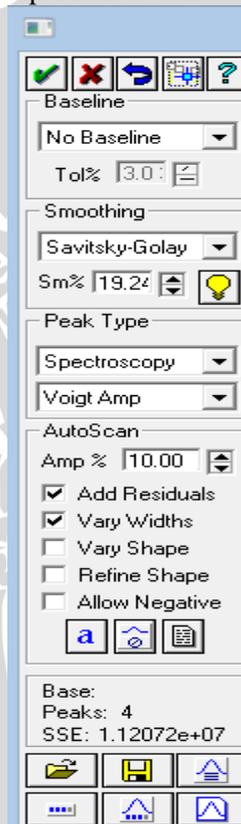


Gambar 3.5 Menu Pengaturan pada Jendela *Autofit and Subtract Baseline*

Pada menu pengaturan tersebut, pengaturan *Algorithm 2nd Deriv Zero* dipilih, Tol% dipilih *Auto* (ikon lampu), dan pilihan *baseline* dipilih *Best*. Setelah itu, ikon ok (tanda centang) dipilih, maka *baseline* telah dihilangkan dan tampilan menu kembali ke halaman utama.

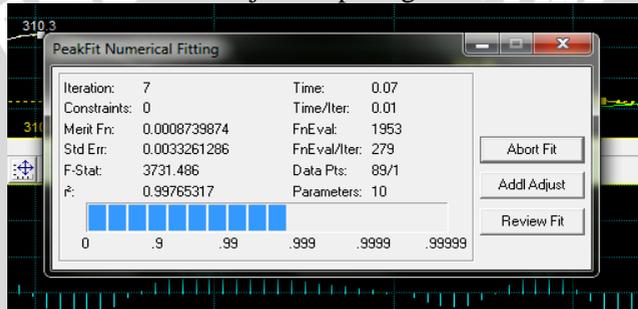
3. Smoothing & Fitting

Langkah selanjutnya adalah *smoothing & fitting*. Untuk memulainya, *Autofit* dipilih dan selanjutnya pilihan *AutoFit Peaks I Residual* dipilih. Maka akan muncul menu pengaturan *AutoFit* seperti di bawah :



Gambar 3.6 Menu Pengaturan pada Jendela *AutoFit*

Pada menu pengaturan tersebut, Level *Smoothing* dipilih *Auto (AI Expert)*, yaitu tombol lampu) dan pilihan *smoothing* pada Savitzky-Golay. Pada pilihan *Baseline*, *No Baseline* dipilih. Pada Pilihan *Peak Type*, *Spectroscopy* dan *Voigt Amp* dipilih. *Cutoff Amplitudo* dipilih 10% dan juga Add Residuals dan *Vary Widths* dicentang. Selanjutnya proses *fitting* dapat dimulai dengan cara tombol *PeatFit Numerical Fitting* ditekan. Proses *fitting* dilakukan terus menerus sampai diperoleh hasil *fitting* terbaik. Tampilan keseluruhan jendela *AutoFit Residual I* ditunjukkan pada gambar 3.8.

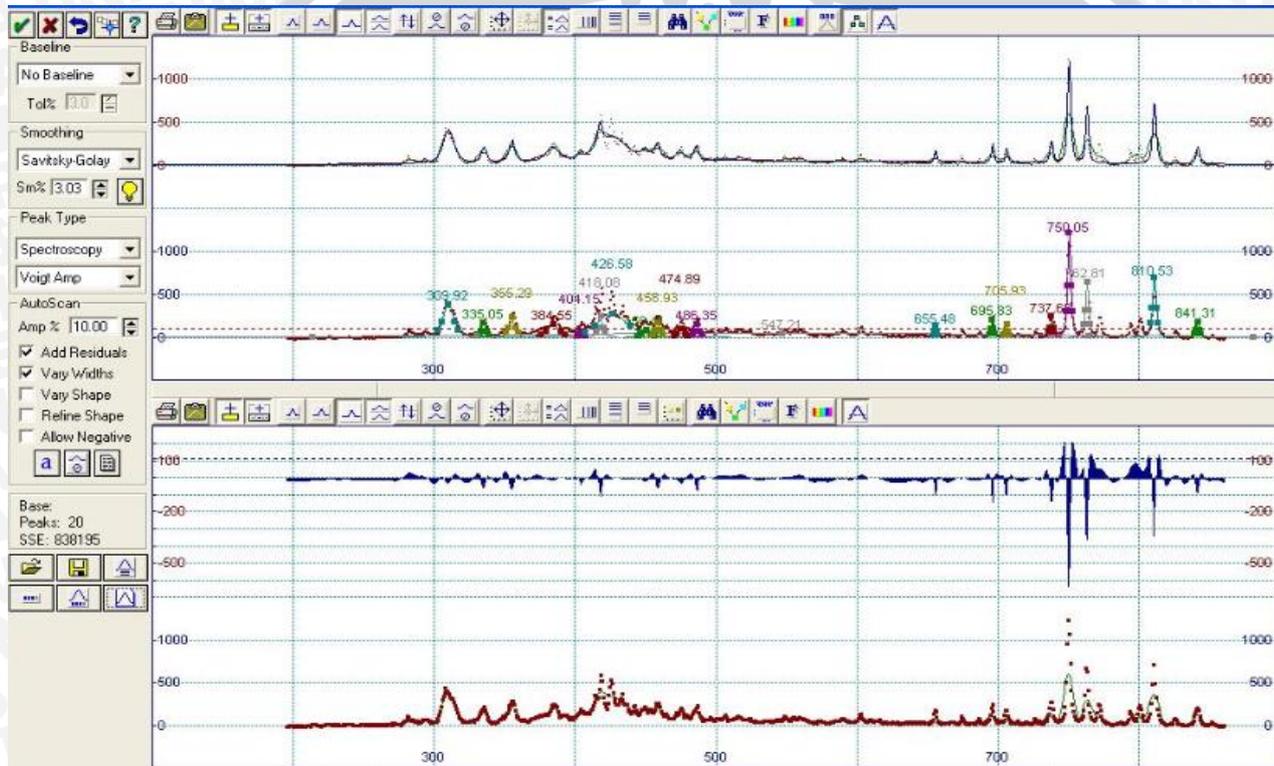


Gambar 3.7 Jendela *PeatFit Numerical Fitting*

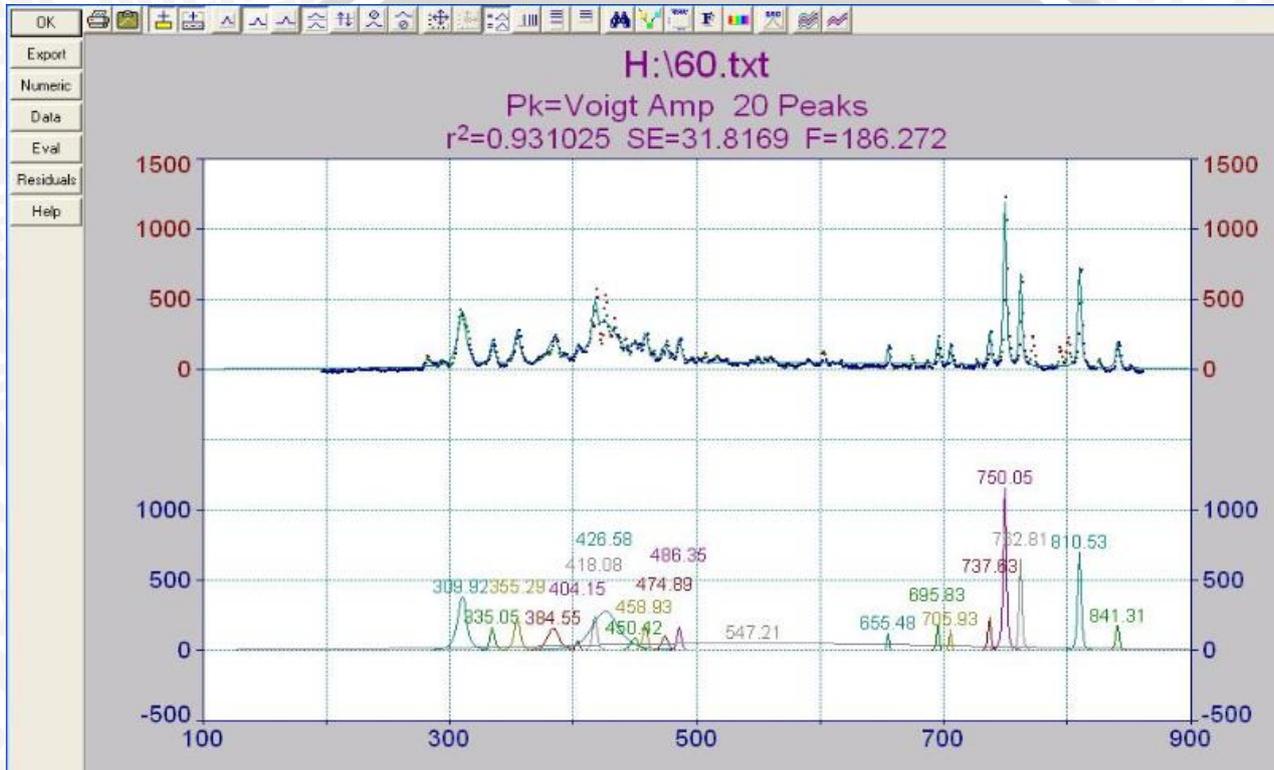
4. Review Fit

Jika hasil *fitting* sudah memuaskan, maka untuk meninjau hasil *fitting*, tombol *review fit* ditekan. Maka akan muncul jendela seperti pada Gambar 3.9.

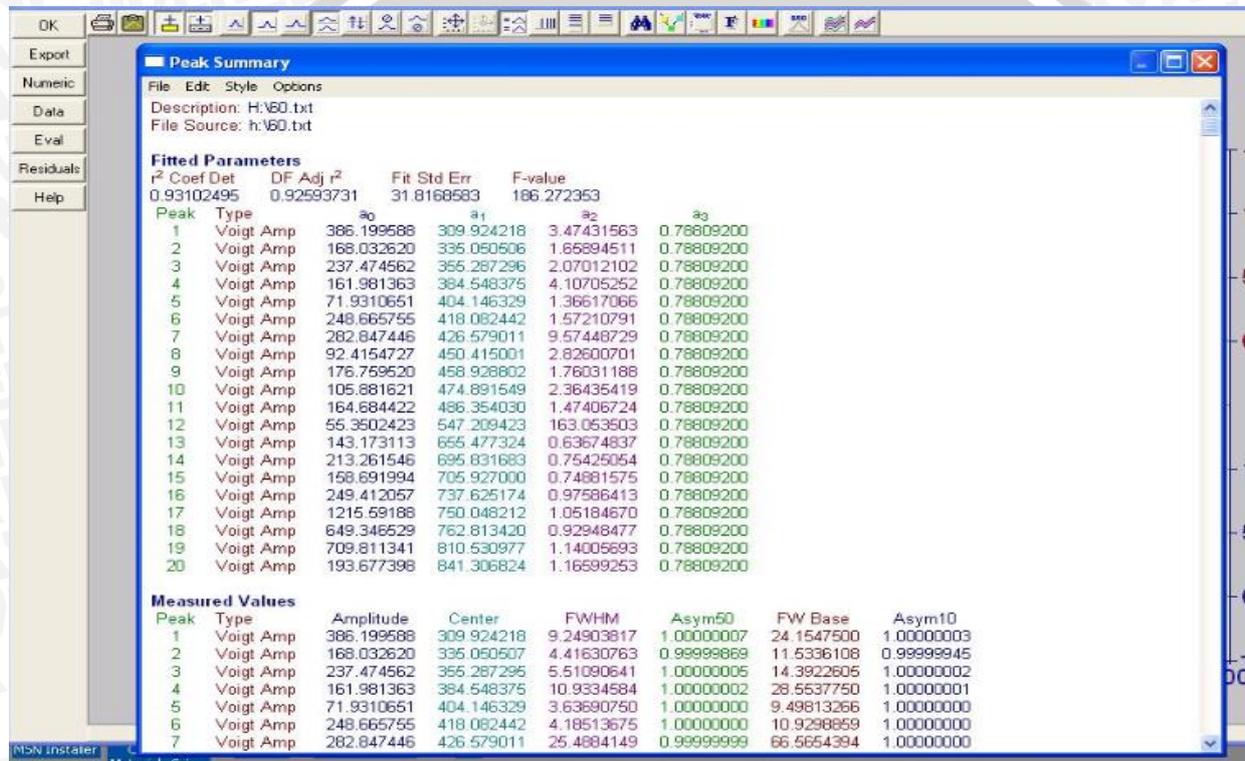
Dengan menekan tombol *Numeric*, maka akan diperoleh letak panjang gelombang foton (*center*) emisi serta intensitasnya (*amplitude*) yang ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.8 Jendela AutoFit Residual I



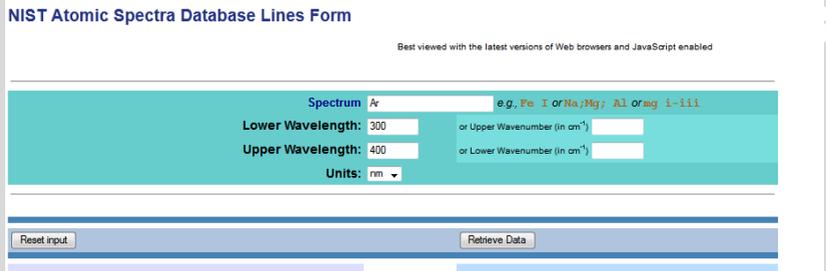
Gambar 3.9 Jendela *Review Fitting*



3.5 Penentuan Spesies Plasma

Untuk menentukan spesies plasma ini, panjang gelombang dari transisi yang bersangkutan dicocokkan dengan panjang gelombang transisi yang sudah terdapat di database transisi atomik National Institute of Standard and Technology (NIST) (http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html). Spesies adalah atom atau ion yang bertanggungjawab atas transisi atomik.

Panjang gelombang yang dicocokkan ini tidak harus sama persis dengan database, tetapi cukup mendekati. Pada database ini, terdapat beberapa masukan yang perlu diisi terlebih dahulu, yaitu jenis transisi apa yang ingin ditampilkan (*Spectrum*) dan batas atas dan bawah panjang gelombang yang ingin ditampilkan (*Lower Wavelength* dan *Upper Wavelength*).



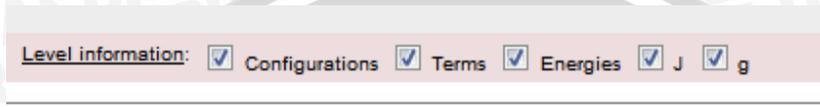
Gambar 3.11 Masukan Spektrum dan Jangkauan Panjang Gelombang pada Database NIST

Keadaan transisi dipilih pada Vakum (*Vacuum All Wavelength*).



Gambar 3.12 Pilihan Keadaan Transisi

Semua pilihan pada *level information* ditandai .



Gambar 3.13 *Level Information*

Selanjutnya tombol Retrive Data dipilih, maka akan muncul database transisi seperti pada Gambar 3.14. Panjang gelombang dicocokkan dengan kolom *Observed Wavelength* dan jenis spesies yang bersangkutan pada kolom *Ion*.

3.6 Penentuan Temperatur dan Densitas Elektron

Dengan asumsi bahwa plasma berada pada kesetimbangan termodinamika, maka temperatur elektron dapat ditentukan menggunakan metode grafik Boltzmann (Hamed, 2005).

Penentuan temperatur elektron dengan menggunakan metode ini adalah dengan cara memplot hubungan di bawah:

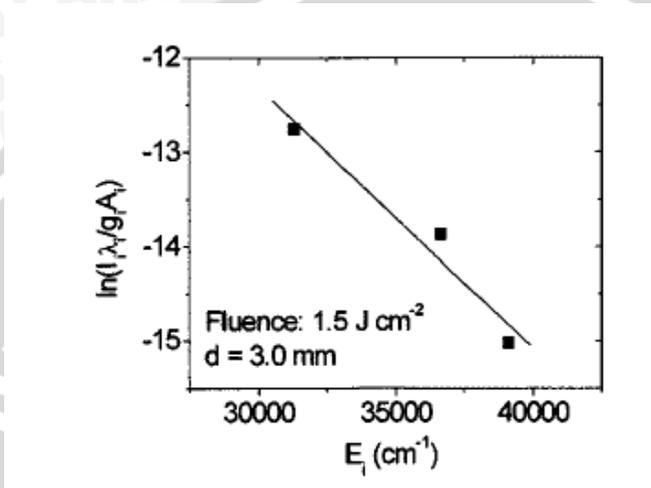
$$\ln \frac{I\lambda}{gA} = \text{Const} - \frac{E_i}{kT} \quad (3.1)$$

I merupakan intensitas emisi, λ panjang gelombang emisi, g merupakan bobot statistik, A adalah probabilitas transisi, dan E_i merupakan energi level atas dari transisi. Informasi mengenai g , A dan E_i dapat diperoleh dari database NIST. Dengan memplot hubungan di atas, di mana bagian kiri persamaan merupakan sumbu y terhadap energi level atas transisi, maka dapat diperoleh persamaan garis linear $y = mx + C$, dengan gradien m bernilai negatif. Dari persamaan garis tersebut, maka temperatur elektron plasma (dalam satuan eV) adalah $1/m$.

Ion	Observed Wavelength Vac (nm)	Ritz Wavelength Vac (nm)	Rel. Int. (?)	A_{ki} (s^{-1})	Acc.	E_i (eV)	E_k (eV)	Lower Level Conf., Term, J	Upper Level Conf., Term, J	$g_i - g_k$	Type
Ar II	300.0984	300.098395	3			20.24656402	- 24.37801534	$3s^23p^4(^1D)3d$ 2F $^5/2$	$3s^23p^4(^3P_0)4f$ $^2[3]^o$ $^7/2$	6 - 8	
Ar II	300.13198	300.132001	17	1.5e+08	D	19.76225987	- 23.8922486	$3s^23p^4(^3P)4p$ $^2D^o$ $^3/2$	$3s^23p^4(^3P)4d$ 2D $^3/2$	4 - 4	
Ar III	300.35160	300.35152	16			26.1685695	- 30.2965930	$3s^23p^3(^2P^o)4s$ $^1P^o$ 1	$3s^23p^3(^2P^o)4p$ 1D 2	3 - 5	
Ar II	300.3839	300.383984	4			21.42814480	- 25.55566815	$3s^23p^4(^1D)3d$ 2D $^3/2$	$3s^23p^4(^3P_1)5f$ $^2[2]^o$ $^5/2$	4 - 6	
Ar II	300.5362	300.536569	2			21.42814480	- 25.55357257	$3s^23p^4(^1D)3d$ 2D $^3/2$	$3s^23p^4(^3P_1)5f$ $^2[2]^o$ $^3/2$	4 - 4	
Ar III		300.610		4.3e-02	D	0.000000	- 4.12442	$3s^23p^4$ 3P 2	$3s^23p^4$ 1S 0	5 - 1	E2
Ar VIII	300.75	300.75				123.794	- 127.9165	$2p^67p$ $^2P^o$ $^1/2$	$2p^68s$ 2S $^1/2$	2 - 2	
Ar III	301.090	301.0862	10			26.063054	- 30.18095053	$3s^23p^3(^2P^o)3d$ $^3D^o$ 3	$3s^23p^3(^2P^o)4p$ 3P 2	7 - 5	
Ar II	301.53601	301.536028	7			19.76225987	- 23.87401366	$3s^23p^4(^3P)4p$ $^2D^o$ $^3/2$	$3s^23p^4(^3P)4d$ 2D $^5/2$	4 - 6	
Ar IV	301.703	301.695	5			31.75084	- 35.86043	$3s^23p^2(^3P)4s$ 2P $^1/2$	$3s^23p^2(^3P)4p$ $^4P^o$ $^3/2$	2 - 4	
Ar III	302.48607	302.48612	5	2.6e+08	D	25.6936162	- 29.79245524	$3s^23p^3(^2P^o)4s$ $^3P^o$ 2	$3s^23p^3(^2P^o)4p$ 3D 3	5 - 7	
Ar II	302.76268	302.762680	35			21.35179894	- 25.44689345	$3s^23p^4(^1D)4p$ $^2P^o$ $^3/2$	$3s^23p^4(^1D)4d$ 2S $^1/2$	4 - 2	
Ar III	302.804	302.79678	5	6.4e+07	D	25.6936162	- 29.7882499	$3s^23p^3(^2P^o)4s$ $^3P^o$ 2	$3s^23p^3(^2P^o)4p$ 3D 2	5 - 5	

Gambar 3.14 Hasil Pencarian pada Database NIST (NIST, 2012)

Contoh grafik Boltzmann yang diambil dari jurnal Vazques (2005) adalah sebagai berikut :



Gambar 3.15 Boltzmann Plot (Gordillo-Vazquez et al., 2005).

Untuk penentuan densitas elektron, digunakan persamaan *Saha-Boltzmann*. Bentuk sederhana persamaan *Saha - Boltzmann*:

$$n_e = 4.83 \times 10^{21} \frac{I^0 g^+ A^+ \lambda^0}{I^+ g^0 A^0 \lambda^+} T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E^+ - E^0 + E_1}{kT}\right) \quad (3.2)$$

Di mana $(0,+)$ menandakan atom netral dan ion dari ionisasi berikutnya. T adalah temperatur elektron dan E_1 menandakan energi ionisasi pertama. Satuan dari densitas elektron yang diperoleh adalah m^{-3} .

3.7 Data Spektrum OES dan Variasi Parameter Deposisi

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data spektrum OES. Plasma yang akan dianalisis adalah plasma yang terdiri atas gas argon murni dan gas campuran argon metana

Plasma dibangkitkan dalam reaktor dengan laju alir gas dan tegangan yang divariasi. Laju alir gas dan tegangan adalah parameter dalam proses deposisi. Laju alir gas dan tegangan yang

digunakan untuk membangkitkan plasma mempengaruhi parameter plasma yang dibangkitkan dalam reaktor yaitu temperatur dan densitas elektron.

Untuk gas argon murni, variasi parameter deposisi plasma adalah variasi laju alir gas (*flow rate*) yaitu 50, 60, 70 dan 80 mL/menit pada RF 250 V, DC 200 V tekanan 50 Pa. Untuk gas campuran argon metana variasi parameter deposisi adalah variasi laju alir gas, RF bias dan DC bias. Untuk variasi laju alir gas argon, digunakan laju alir 140, 180, 190 dan 210 mL/menit pada RF: 250 V/DC350 V; CH₄: 70 mL/min. Untuk variasi laju alir metana, digunakan laju alir 70, 130, 180, 280 dan 380 mL/menit pada laju alir argon 70mL/menit. Untuk variasi DC bias digunakan tegangan DC 250, 325, 350, 400 dan 500 V pada Ar 70mL/menit CH 70 mL/menit RF 250 V. Untuk variasi RF bias digunakan tegangan RF 200, 225, 250 V pada DC 350.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Temperatur dan Densitas Elektron

Plasma adalah gas yang terionisasi sehingga elektron dapat terlepas dari atom – atom gas tersebut. Dari pengertian tersebut plasma merupakan kumpulan elektron, ion dan atom. Keadaan dari plasma dapat diwakilkan oleh parameter plasma yang mengkarakterisasi plasma tersebut. Parameter plasma tersebut adalah temperatur dan densitas elektron. Berdasarkan Harry, plasma baik dideskripsikan oleh temperatur elektronnya T_e dan densitas elektronnya n_e (Harry, 2010). Sedangkan menurut Fujimoto, karena elektron biasanya lebih aktif daripada ion dan atom netral dalam penentuan populasi level eksitasi, temperatur dan densitas elektron merupakan parameter yang penting dalam karakterisasi plasma (Fujimoto, 2004). Bahkan plasma dikatakan hanya merupakan gas elektron yang memiliki temperatur dan densitas elektron tertentu.

Temperatur elektron berkaitan dengan energi kinetik rata-rata dari elektron dalam plasma. Semakin tinggi temperatur elektron, maka semakin energetik elektron tersebut. Semakin energetik elektron, maka elektron tersebut akan mengeksitasi atom atau ion lainnya pada plasma ke tingkat yang tinggi, sehingga intensitas radiasi akan lebih tinggi dan cenderung pada wilayah panjang gelombang yang pendek, karena radiasi ini berasal dari transisi dari tingkat yang lebih tinggi. Densitas elektron merupakan jumlah elektron yang terdapat pada tiap satuan volume, biasanya dinyatakan dalam satuan m^{-3} atau cm^{-3} . Densitas elektron berkaitan dengan derajat ionisasi dari plasma. Semakin tinggi derajat ionisasi, maka semakin besar pula densitas elektron plasma.

Efek kuantum dalam penelitian ini dapat diabaikan dan distribusi partikel dapat didekati dengan distribusi Boltzmann. Hal ini disebabkan karena jarak bebas rata-rata antar elektron yang lebih besar dari pada panjang gelombang de Broglie nya (Fujimoto, 2004) atau dapat dituliskan bahwa $n_e \ll \left(\frac{2\pi mkT_e}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$ (batas agar efek kuantum mulai berlaku). Temperatur elektron tertinggi yang diperoleh dalam penelitian ini adalah 2,42 eV dengan densitas elektron pada orde $10^{24} m^{-3}$. Densitas tersebut jauh di bawah batas densitas yang berada

pada orde 10^{28} m^{-3} . Jika densitas elektron melebihi batas ini, maka distribusi Boltzmann tidak dapat lagi menjelaskan distribusi elektron maupun atom dan ion, sehingga harus digunakan distribusi Fermi-Dirac.

Temperatur elektron pada penelitian ini diperoleh dengan memplot berdasarkan persamaan Boltzmann yang mengharuskan plasma pada kondisi kesetimbangan termodinamika sehingga populasi partikel pada tingkat-tingkat energi sesuai dengan distribusi Boltzmann. Penyimpangan dari kondisi ini dapat menyebabkan grafik pada Boltzmann plot tidak linear atau dengan kata lain, tidak memberikan regresi linear yang baik. Seluruh hasil Boltzmann plot pada penelitian ini berupa garis lurus dengan gradien negatif dengan nilai R^2 yang mendekati satu (yang dapat dilihat pada Lampiran A), sehingga dapat disimpulkan populasi partikel dalam plasma sesuai dengan distribusi Boltzmann. Densitas elektron dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann yang telah dilampirkan pada bagian metodologi. Inti dari teknik pengukuran densitas elektron dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann adalah dengan menghitung rasio intensitas dua garis spektral untuk jenis atom yang sama pada dua keadaan ionisasi yang berbeda. Dalam hal ini adalah perbandingan garis spektral Ar I dan Ar II (Ar I adalah atom netral dan Ar II adalah ion argon bermuatan +1). Karena akan terdapat lebih dari satu rasio antar dua garis spektral, maka hasil densitas elektron adalah rata-rata dari densitas elektron yang diperoleh dari pengukuran seluruh rasio.

4.2 Proses Pengambilan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder. Data tersebut merupakan hasil eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya. Data yang digunakan berupa spektrum emisi optik dari plasma.

Plasma digunakan untuk mendeposisikan lapisan tipis karbon. Pendeposisian dilakukan melalui metode *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PE CVD). Secara singkat, metode PE CVD adalah metode yang digunakan untuk mendeposisi lapisan tipis di mana zat yang akan dideposisikan awalnya dalam wujud gas yang selanjutnya diionisasikan sehingga menjadi plasma, melalui proses atomik dan

kimiawi dalam plasma, zat tersebut akan terdeposisi pada substrat di mana lapisan tipis terbentuk. Plasma dibangkitkan di dalam suatu reaktor. Agar reaktor dapat membangkitkan plasma, gas dialirkan ke dalam reaktor pada laju alir tertentu dan juga tegangan diberikan pada reaktor. Laju alir gas dan tegangan adalah parameter dalam proses deposisi, sehingga dapat diubah-ubah sesuai dengan variasi yang diinginkan. Gas yang masuk dalam reaktor akan terionisasi akibat diterapkannya tegangan listrik sehingga plasma terbentuk.

Karakteristik plasma yang terbentuk mempengaruhi hasil deposisi. Karakteristik plasma berupa parameter plasma yaitu temperatur dan densitas elektron. Parameter plasma dipengaruhi oleh parameter deposisi yang digunakan yaitu laju alir gas memasuki reaktor dan besar tegangan yang diterapkan. Temperatur dan densitas elektron dapat ditentukan melalui analisis pada spektrum emisi optik dari plasma.

Untuk memperoleh spektrum emisi dari plasma, digunakan *Optical Emission Spectroscopy* (OES). Sinar yang diemisikan oleh plasma berkaitan dengan transisi atomik maupun molekul dari plasma dan sinar tersebut akan diubah dalam bentuk spektrum oleh OES. Spektrum tersebut kemudian diolah menggunakan program *PeakFit* (dengan metode yang tertulis pada metode penelitian) untuk memperoleh posisi panjang gelombang dan intensitas tiap transisi. Panjang gelombang dan intensitas transisi digunakan untuk jenis spesies dengan database NIST, menentukan temperatur elektron dengan metode Boltzmann plot dan densitas elektron dengan persamaan Saha-Boltzmann seperti pada subbab 3.6. Pertama-tama, spesies ditentukan terlebih dahulu, selanjutnya temperatur elektron ditentukan Hasil temperatur elektron kemudian digunakan untuk menentukan densitas elektron. Karena terdapat 21 variasi parameter deposisi (laju alir gas dan tegangan) maka akan terdapat 21 spektrum OES dan masing-masing spektrum akan memberikan satu temperatur dan densitas elektron. Berdasarkan hasil temperatur dan densitas elektron, maka dapat diketahui pengaruh variasi parameter deposisi (variasi laju alir dan tegangan) terhadap parameter plasma (temperatur dan densitas elektron).

4.3 Hasil Penentuan Temperatur dan Densitas Elektron

Plasma pertama yang dibahas adalah plasma argon murni pada kondisi RF 250 V, DC 200 V tekanan 50 Pa dan variasi laju alir 50, 60, 70 dan 80 mL/menit digunakan untuk pengukuran temperatur dan densitas elektron serta pengaruhnya terhadap variasi laju alir. Tabel 4.1 dan 4.2 di bawah adalah hasil pengukuran temperatur elektron dan densitasnya :

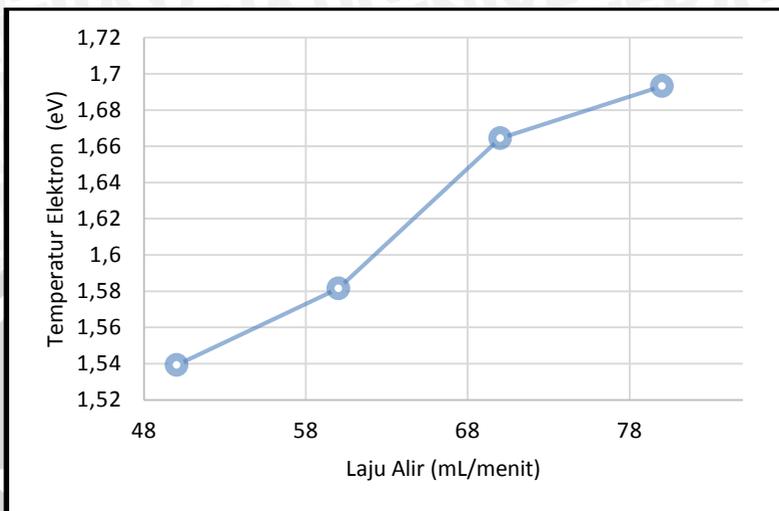
Tabel 4.1 Pengaruh Laju Alir terhadap Temperatur Elektron (Argon Murni)

Laju Alir (mL/menit)	Temperatur Elektron (eV)
50	1,539172
60	1,581528
70	1,664447
80	1,693193

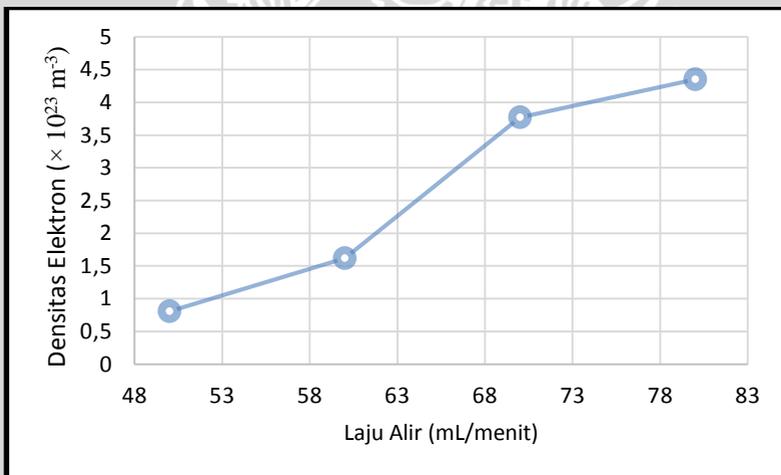
Tabel 4.2 Pengaruh Laju Alir terhadap Densitas Elektron Pengaruh (Argon Murni)

Laju Alir (mL/menit)	Densitas Elektron (m^{-3})
50	$8,07 \times 10^{22}$
60	$1,62 \times 10^{23}$
70	$3,77 \times 10^{23}$
80	$4,35 \times 10^{23}$

Dari kedua tabel di atas, maka dapat digambarkan grafik hubungan antara laju alir gas terhadap temperatur dan densitas elektron, seperti di halaman selanjutnya (Gambar 4.1 dan 4.2).



Gambar 4.1 Grafik Pengaruh Laju Alir terhadap Temperatur Elektron (Argon Murni)



Gambar 4.2 Grafik Pengaruh Laju Alir terhadap Densitas Elektron (Argon Murni)

Peningkatan laju alir gas argon (*flow rate*) pada plasma argon murni ini meningkatkan besar temperatur elektron. Temperatur elektron tertinggi diperoleh pada laju alir 80 mL/menit dengan temperatur 1,693 eV atau 19642 K. Peningkatan laju alir gas juga berpengaruh positif terhadap densitas elektron, yang berarti semakin tinggi laju alir, maka semakin padat pula populasi elektron dalam plasma. Densitas elektron tertinggi diperoleh pada laju alir 80 mL/menit yaitu $4,35 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$. Densitas elektron yang diperoleh mayoritas berada pada orde 10^{23} m^{-3} .

Plasma kedua yang dibahas adalah plasma campuran gas argon dan metana pada kondisi RF: 250 V/DC350 V; CH₄: 70 mL/min dan variasi laju alir gas argon 140, 180, 190, dan 210 mL/menit. Tabel 4.3 dan 4.4 di bawah adalah hasil pengukuran temperatur elektron dan densitasnya :

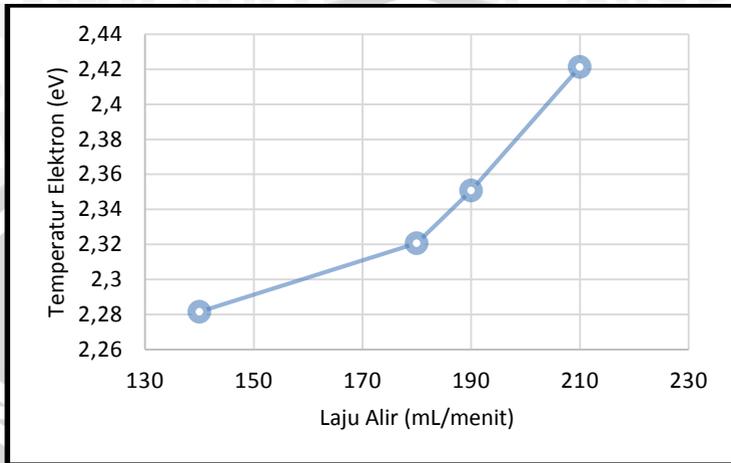
Tabel 4.3 Pengaruh Laju Alir terhadap Temperatur Elektron (Argon-Metana Variasi Laju Alir Argon)

Laju Alir (mL/menit)	Temperatur Elektron (eV)
140	2,281542
180	2,320724
190	2,350729
210	2,421308

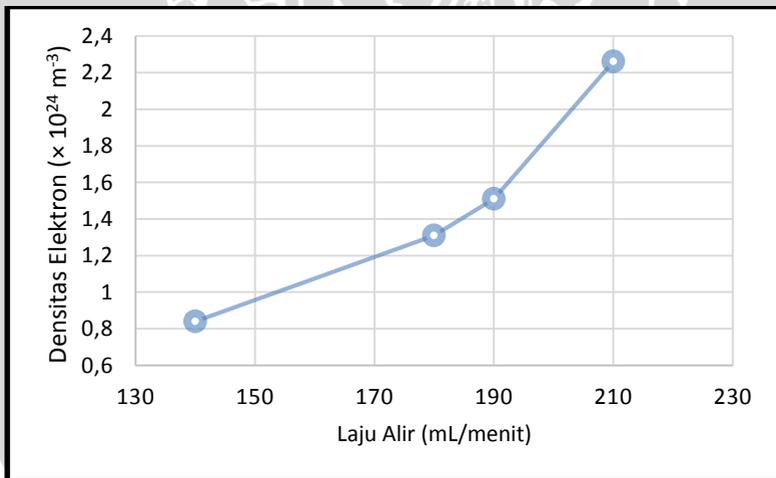
Tabel 4.4 Pengaruh Laju Alir terhadap Densitas Elektron (Argon-Metana Variasi Laju Alir Argon)

Laju Alir (mL/menit)	Densitas Elektron (m^{-3})
140	$8,40 \times 10^{23}$
180	$1,31 \times 10^{24}$
190	$1,51 \times 10^{24}$
210	$2,26 \times 10^{24}$

Dari kedua tabel di atas, maka dapat digambarkan grafik hubungan antara laju alir gas terhadap temperatur dan densitas elektron, seperti di halaman selanjutnya (Gambar 4.3 dan 4.4).



Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Laju Alir terhadap Temperatur Elektron (Argon-Metana Variasi Laju Alir Argon)



Gambar 4.4 Grafik Pengaruh Laju Alir terhadap Densitas Elektron (Argon-Metana Variasi Laju Alir Argon)

Peningkatan laju alir gas argon dalam plasma campuran gas argon – metana juga menunjukkan kenaikan temperatur elektron. Pada laju alir gas argon 180-210 mL/menit, temperatur elektron berkisar dari 2,2 eV – 2,4 eV, dengan temperatur tertinggi pada laju alir 210 mL/menit yaitu 2,421 eV. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat hubungan positif antara laju alir gas argon terhadap temperatur elektron. Peningkatan laju alir juga menyebabkan densitas elektron dalam plasma meningkat. Densitas elektron yang diperoleh mayoritas pada orde 10^{24} m^{-3} dengan hasil tertinggi pada laju alir 210 mL/menit yaitu $2,26 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$.

Plasma ketiga yang akan dibahas adalah plasma campuran gas argon – metana pada variasi laju alir gas metana 70, 130, 180, 280 dan 380 mL/menit. Tabel 4.5 dan 4.6 di bawah adalah hasil pengukuran temperatur elektron dan densitasnya :

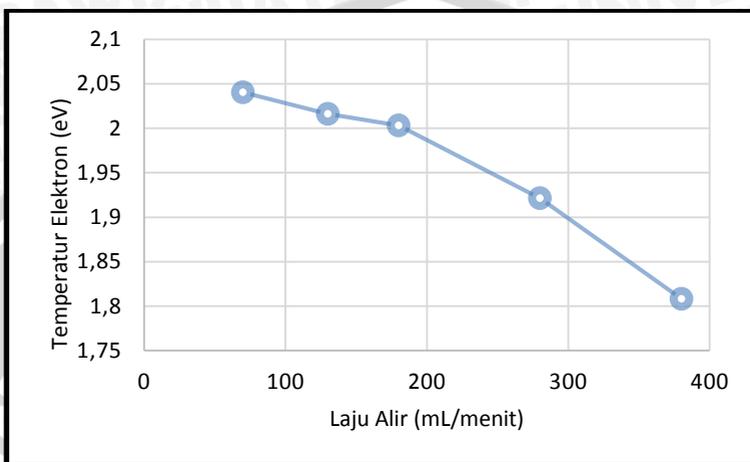
Tabel 4.5 Pengaruh Laju Alir terhadap Temperatur Elektron (Argon-Metana Variasi Laju Alir Metana)

Laju Alir (mL/menit)	Temperatur Elektron (eV)
70	2,0404
130	2,016129
180	2,003205
280	1,92123
380	1,807991

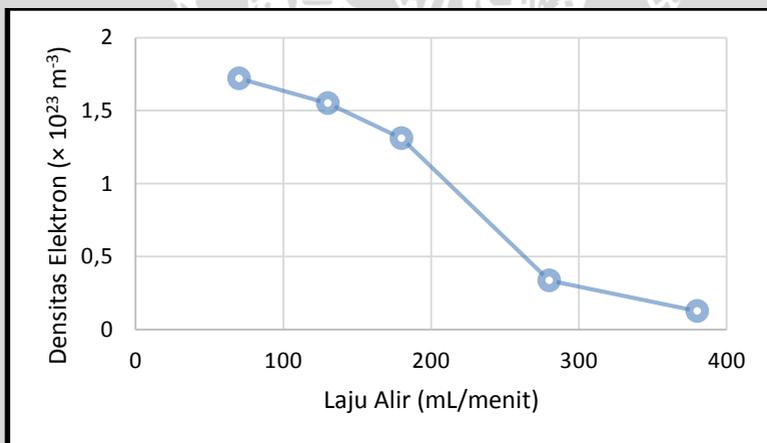
Tabel 4.6 Pengaruh Laju Alir terhadap Densitas Elektron (Argon-Metana Variasi Laju Alir Metana)

Laju Alir (mL/menit)	Densitas Elektron (m^{-3})
70	$1,72 \times 10^{23}$
130	$1,55 \times 10^{23}$
180	$1,31 \times 10^{23}$
280	$3,36 \times 10^{22}$
380	$1,26 \times 10^{22}$

Dari kedua tabel di atas, maka dapat digambarkan grafik hubungan antara laju alir gas terhadap temperatur dan densitas elektron, seperti di halaman selanjutnya (Gambar 4.5 dan 4.6).



Gambar 4.5 Grafik Pengaruh Laju Alir terhadap Temperatur Elektron (Argon-Metana Variasi Laju Alir Metana)



Gambar 4.6 Grafik Pengaruh Laju Alir terhadap Densitas Elektron (Argon-Metana Variasi Metana Laju Alir)

Pada plasma campuran gas argon dan metana dengan variasi laju alir gas metana, ternyata memberikan hasil pengukuran temperatur dan densitas elektron yang berlawanan dengan hasil pengukuran pada plasma campuran gas argon–metana dengan variasi laju alir gas argon. Pada variasi laju alir gas metana, peningkatan laju alir gas metana ternyata menurunkan temperatur elektron. Temperatur elektron tertinggi diperoleh pada laju alir terendah yaitu 70 mL/menit. Jangkauan temperatur elektron pada variasi ini adalah 2 – 1,8 eV. Hal ini juga terjadi pada hasil pengukuran densitas elektron. Dari hasil pengukuran densitas elektron diperoleh densitas elektron pada orde 10^{23} dan 10^{24} m^{-3} . Peningkatan laju alir cenderung menurunkan densitas elektron. Densitas elektron tertinggi diperoleh pada laju alir 70 mL/menit yaitu $1,72 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$.

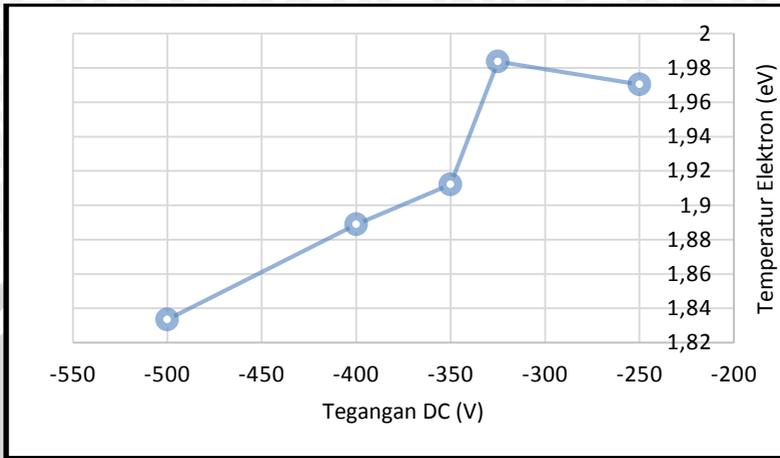
Plasma keempat yang akan dibahas adalah plasma campuran gas argon-metana pada variasi tegangan negatif DC. Plasma ini berada pada kondisi Ar 70 mL/menit CH 70 mL/menit RF 250 V dengan variasi tegangan DC 250, 325, 400 dan 500 V. Hasil pengukuran temperatur elektron dan densitasnya diberikan pada Tabel 4.7 dan 4.8 di bawah :

Tabel 4.7 Pengaruh Tegangan DC terhadap Temperatur Elektron (Argon-Metana Variasi Tegangan DC)

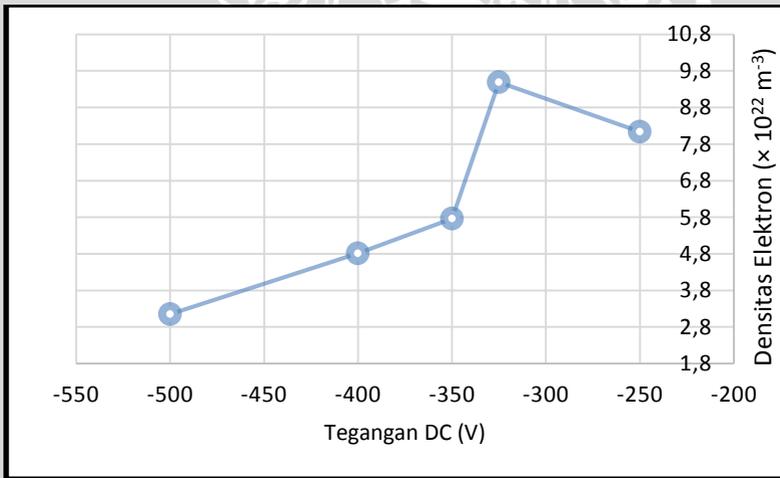
Tegangan (V)	Temperatur Elektron (eV)
-250	1,970443
-325	1,983733
-350	1,912046
-400	1,888931
-500	1,833517

Tabel 4.8 Pengaruh Tegangan DC terhadap Densitas Elektron (Argon-Metana Variasi Tegangan DC)

Tegangan (V)	Densitas Elektron (m^{-3})
-250	$8,14 \times 10^{22}$
-325	$9,49 \times 10^{22}$
-350	$5,76 \times 10^{22}$
-400	$4,81 \times 10^{22}$
-500	$3,15 \times 10^{22}$



Gambar 4.7 Grafik Pengaruh Tegangan DC terhadap Temperatur Elektron (Argon-Metana Variasi Tegangan DC)



Gambar 4.8 Grafik Pengaruh Tegangan DC terhadap Densitas Elektron (Argon-Metana Variasi Tegangan DC)

Peningkatan pada tegangan bias DC yang diberikan (semakin negatif tegangan DC) pada plasma ternyata menurunkan temperatur dan densitas elektron. Temperatur elektron yang diperoleh berkisar

pada 1,97–1,8 eV pada variasi tegangan DC 250–500 V. Temperatur tertinggi adalah 1,983733 eV pada tegangan 325 V. Densitas elektron juga menunjukkan hasil yang sama dengan densitas elektron terendah pada tegangan tertinggi pada variasi ini yaitu $3,15 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ pada tegangan 500 V.

Variasi plasma terakhir adalah plasma dengan variasi tegangan RF (*Radio Frequency*) pada kondisi tegangan DC 350 V. Variasi tegangan RF yang digunakan adalah RF 200, 225, 250 V. Hasil yang diperoleh untuk temperatur dan densitas elektron terdapat pada Tabel 4.9 dan 4.10 berikut :

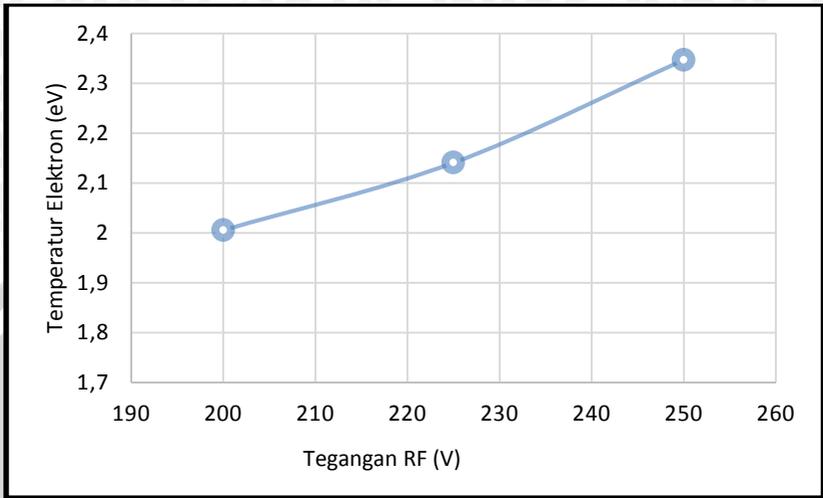
Tabel 4.9 Pengaruh Tegangan RF terhadap Temperatur Elektron (Argon-Metana Variasi Tegangan RF)

Tegangan (V)	Temperatur Elektron (eV)
200	2,005616
225	2,140869
250	2,346867

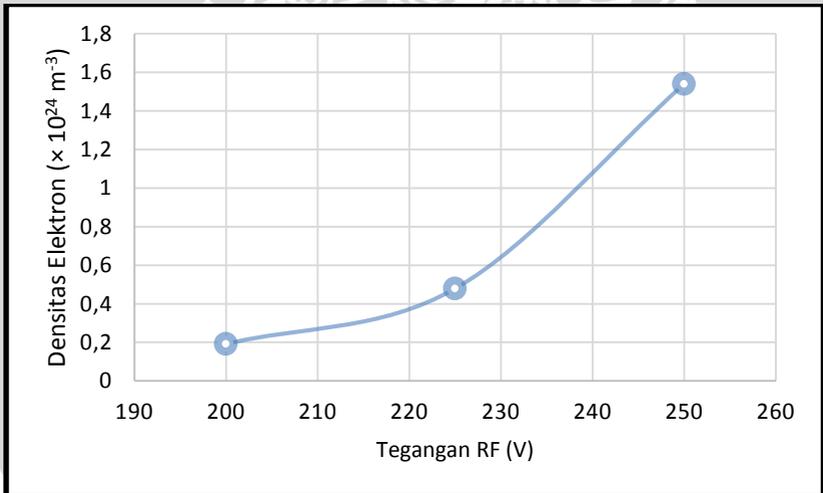
Tabel 4.10 Pengaruh Tegangan RF terhadap Densitas Elektron (Argon-Metana Variasi Tegangan RF)

Tegangan (V)	Densitas Elektron (m^{-3})
200	$1,92 \times 10^{23}$
225	$4,79 \times 10^{23}$
250	$1,54 \times 10^{24}$

Dari kedua tabel di atas, maka dapat digambarkan grafik hubungan antara laju alir gas terhadap temperatur dan densitas elektron, seperti di halaman selanjutnya (Gambar 4.9 dan 4.10).



Gambar 4.9 Grafik Pengaruh Tegangan RF terhadap Temperatur Elektron (Argon-Metana Variasi Tegangan RF)



Gambar 4.10 Grafik Pengaruh Tegangan RF terhadap Densitas Elektron (Argon-Metana Variasi Tegangan RF)

Berkebalikan dengan variasi tegangan DC, peningkatan tegangan RF ternyata juga meningkatkan temperatur dan densitas elektron. Temperatur elektron yang diperoleh berkisar pada jangkauan 2,0-2,3 eV. Temperatur tertinggi terjadi pada tegangan RF 250 V yaitu 2,346867 eV. Densitas elektron tertinggi juga terjadi pada tegangan 250 V yaitu $1,54 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$.

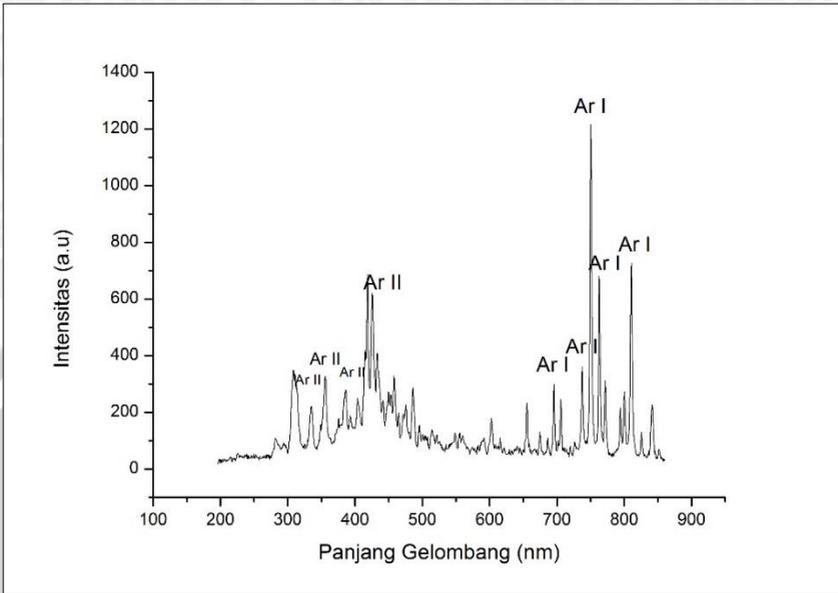
4.4 Pembahasan

Dari hasil yang diperoleh, nampak bahwa variasi kondisi plasma, yaitu variasi laju alir, besar tegangan RF dan DC ternyata berpengaruh pada besar temperatur dan densitas elektron. Kondisi plasma mempengaruhi proses atomik pada plasma, yaitu proses tumbukan yang terjadi dalam plasma dan juga mekanisme pemanasan elektron.

Sebelum menjelaskan pengaruh variasi kondisi plasma terhadap parameternya, spesies plasma yang muncul dan spektrum OES yang digunakan akan dijelaskan terlebih dahulu. Pada plasma argon murni, spesies utama yang muncul adalah Ar I dan Ar II. Spektrum OES yang digunakan menunjukkan banyak garis-garis spektral. Pada spektrum OES argon murni, karena plasma ini monoatomik, sehingga spektrum yang muncul adalah garis-garis spektral, bukan berupa pita (*band*) yang muncul karena transisi elektronik molekuler diatomik. Tetapi, dikarenakan adanya mekanisme pelebaran garis spektra, garis-garis spektral yang teramati tidaklah berupa garis lurus, tetapi berupa puncak-puncak. Mekanisme pelebaran garis spektral yang penting adalah Pelebaran Doppler, Pelebaran Stark dan Pelebaran Instrumental. Pelebaran Doppler dikarenakan pergerakan termal dari atom emisi. Frekuensi radiasi yang diemisikan atom mengalami pergeseran karena efek Doppler. Pelebaran Instrumental disebabkan oleh resolusi dari spektrometer. Semakin tinggi resolusi, maka akan menyebabkan pelebaran makin besar. Sedangkan pelebaran Stark disebabkan oleh karena gangguan yang dirasakan oleh atom emisi oleh partikel bermuatan. Pelebaran Doppler dan Instrumental memberi bentuk profil Gaussian sedangkan Pelebaran Stark memberi bentuk profil Lorentz. Sehingga bentuk garis (*lineshape*) dari spektral merupakan gabungan semua efek tersebut yaitu gabungan profil Gaussian dan Lorentz. Profil ini disebut profil

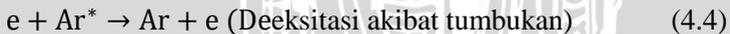
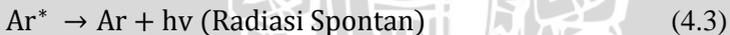
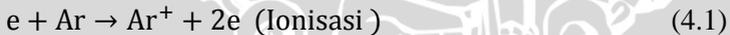
Voigt. Oleh karena itu, dalam memperoleh posisi – posisi puncak dari spektrum, spektrum OES di-*fit* menggunakan puncak Voigt pada program *PeakFit*. Dalam *fitting* puncak-puncak dari spektrum, untuk menemukan puncak-puncak dari spektrum, metode residual digunakan. Metode residual ini pertama-tama akan mencari puncak-puncak yang menghasilkan maksimum lokal, atau dengan kata lain puncak-puncak yang sudah dengan jelas terlihat. Tetapi terdapat juga puncak-puncak yang tidak jelas terlihat sehingga tidak menghasilkan maksimum lokal. Metode residual akan menempatkan puncak-puncak sedemikian hingga total luas puncak-puncak tersebut sama dengan luas spektrum yang akan di-*fit*. Residual sendiri adalah selisih nilai sumbu y antara data spektrum dengan data hasil *fitting*. Puncak yang tersembunyi akan muncul jika terdapat residual positif. Hasil dari metode ini adalah spektrum buatan yang merupakan gabungan dari puncak-puncak baik yang jelas terlihat maupun yang tersembunyi, sehingga spektrum buatan tersebut menyerupai spektrum data sebenarnya.

Setelah posisi puncak diketahui, maka jenis spesies yang menyebabkan munculnya puncak tersebut dapat diketahui dengan bantuan database NIST. Pada plasma argon murni, garis spektral yang banyak muncul adalah garis spektral Ar I dan Ar II. Garis spektral Ar I cenderung muncul pada wilayah spektrum berenergi rendah, yaitu pada wilayah foton radiasi dengan panjang gelombang tinggi (>700 nm), sedangkan garis spektral Ar II cenderung berada pada wilayah spektrum berenergi tinggi (< 500 nm). Garis spektral dengan intensitas paling tinggi berada pada garis 750,59 nm yang berasal dari transisi Ar I. Beberapa spesies yang telah diidentifikasi digambarkan pada Gambar 4.11.



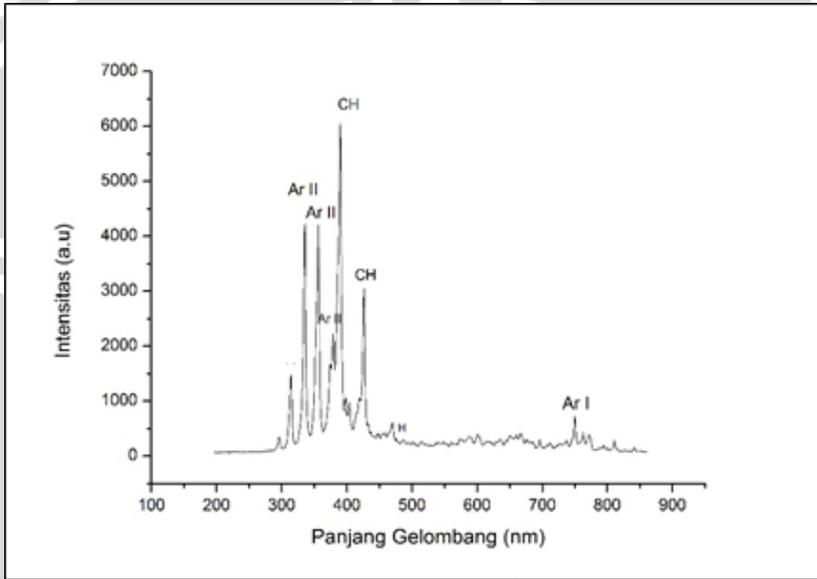
Gambar 4.11 Salah Satu Spektrum OES Argon Murni

Kemungkinan proses atomik yang terjadi dalam plasma argon murni ini sebagai berikut :



Spektrum OES untuk plasma campuran gas argon dan metana berbeda dengan spektrum untuk gas argon murni. Pada spektrum OES plasma campuran gas argon dan metana, puncak- puncak pada wilayah panjang gelombang pendek (<500 nm) memiliki intensitas yang sangat tinggi dibandingkan pada wilayah panjang gelombang tinggi. Transisi-transisi utama yang muncul (dan mudah teramati) berasal dari

spesies Ar I, Ar II dan radikal CH. Selain transisi atomik, transisi elektronik dari molekul diatomik juga teramati pada spektrum ini yaitu berasal dari radikal CH. Pada spektrum OES plasma campuran argon-metana, intensitas maksimum berasal dari transisi Ar II di wilayah panjang gelombang pendek, berbeda dengan spektrum plasma argon murni. Spesies yang teridentifikasi untuk plasma gas campuran argon dan metana ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Salah Satu Spektrum OES Argon - Metana

Penambahan metana pada plasma argon ternyata dapat meningkatkan intensitas radiasi pada wilayah panjang gelombang pendek. Intensitas radiasi berenergi tinggi jauh lebih tinggi daripada intensitas radiasi yang berenergi rendah. Kecenderungan ini terlihat untuk seluruh spektrum plasma campuran gas argon-metana pada variasi apapun. Intensitas radiasi berbanding lurus terhadap jumlah atom atau ion yang berada pada level eksitasi yang bersangkutan. Penambahan metana ternyata meningkatkan jumlah ion Ar II yang tereksitasi ke level energi yang tinggi (karena radiasi yang diemisikan memiliki panjang gelombang yang pendek). Jumlah ion Ar II yang tereksitasi juga berkaitan dengan jumlah ion Ar II yang ada dalam

plasma. Sehingga penambahan metana meningkatkan jumlah atom netral Ar I yang terionisasi menjadi ion Ar II dibandingkan dengan plasma argon murni. Pada plasma argon murni intensitas tertinggi pada transisi Ar I. Karena pada plasma campuran argon – metana, ion Ar II banyak berada pada level energi eksitasi yang tinggi, maka diharapkan bahwa temperatur elektron pada plasma ini lebih tinggi daripada temperatur elektron pada plasma argon murni. Dengan tingginya temperatur elektron, maka ionisasi atom Ar I lebih banyak terjadi dan elektron dapat mengeksitasi ion Ar II ke level energi yang tinggi. Karena jumlah ion Ar II jauh lebih banyak daripada atom Ar I, artinya banyak atom Ar I yang terionisasi yang berarti densitas elektron lebih banyak pada plasma campuran gas argon–metana.

Temperatur elektron ditentukan dengan membuat grafik dari persamaan Boltzmann. Untuk memperoleh hasil yang akurat, maka harus dipilih garis – garis spektral yang memiliki level energi eksitasi yang jangkauannya luas. Garis spektral yang dipilih juga harus memiliki intensitas yang cukup tinggi dan data spektroskopiknya tersedia lengkap di NIST. Garis– garis spektral yang digunakan adalah garis–garis spektral dari transisi spesies Ar II. Sebenarnya dapat digunakan garis–garis spektral dari spesies Ar I, tetapi tidak digunakan. Ada dua alasan mengapa garis spektral yang digunakan berasal dari transisi spesies Ar II: (1) karena garis - garis spektral Ar I yang teramati tidak memiliki jangkauan level energi eksitasi yang luas, (2) karena pada plasma campuran gas argon–metana, kebanyakan garis spektral Ar I memiliki intensitas yang rendah. Metode Boltzmann Plot dan persamaan Saha–Boltzmann dapat digunakan untuk pengukuran temperatur dan densitas elektron jika populasi partikel dalam plasma mengikuti distribusi Boltzmann. Penyimpangan dari kondisi ini dapat menyebabkan titik – titik pada grafik Boltzmann menyimpang dari garis lurus. Hal ini tidak terjadi dalam penentuan temperatur ini. Selain itu, kriteria kondisi ini yang lain adalah densitas elektron harus lebih besar daripada nilai tertentu yaitu: $n_e(\text{cm}^{-3}) \geq 1.4 \times 10^{14} \times (T_e(\text{eV}))^{\frac{1}{2}} \times (\Delta E(\text{eV}))^3$ (Gordillo-Vazquez et al., 2005), dengan ΔE adalah selisih antara level energi transisi¹. Pada temperatur elektron 2,5 eV (temperatur tertinggi yang

diperoleh pada plasma ini), densitas elektron harus lebih besar dari $\sim 10^{16}$ (cm^{-3}) atau $\sim 10^{22}$ (m^{-3}). Dengan menggunakan metode independen untuk pengukuran densitas elektron, yaitu melalui pelebaran Stark, maka dapat ditentukan apakah plasma yang dibangkitkan berada pada kesetimbangan atau tidak. Pelebaran Stark berkaitan dengan densitas elektron melalui hubungan $\text{FWHM Stark (nm)} = \frac{2w}{10^{16}} n_e (\text{cm}^{-3})$ (Bernhardt, 2009). Untuk pelebaran Stark atom argon (Ar I) yang sering digunakan dan banyak terdapat dalam jurnal – jurnal ilmiah adalah pada panjang gelombang 696,73 nm dengan $w = 0,0405$ nm (Bernhardt, 2009). Pengukuran densitas elektron dalam penelitian ini tidak menggunakan metode pelebaran Stark, dikarenakan untuk plasma campuran gas argon–metana, intensitas panjang gelombang 696,73 nm dan spesies Ar I yang muncul memiliki intensitas yang sangat rendah. Sehingga metoda ini hanya dapat digunakan untuk plasma argon murni. Bentuk garis spektral akan di-fit dengan profil Voigt dengan menggunakan program *Origin*, dan parameter FWHM Lorentz adalah FWHM dari pelebaran Stark. Hasil pengukuran densitas elektron pada plasma argon murni seluruhnya pada orde 10^{17} (cm^{-3}). Densitas elektron ini lebih besar daripada densitas minimal batas kesetimbangan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa plasma yang dibangkitkan memiliki populasi partikel yang mengikuti distribusi Boltzmann.

Berdasarkan hasil perhitungan temperatur dan densitas elektron, parameter deposisi yaitu laju alir gas ke dalam plasma dan juga tegangan yang digunakan ternyata mempengaruhi parameter plasma yaitu temperatur dan densitas elektron. Pengaruh variasi parameter deposisi terhadap parameter plasma dibahas pada paragraf-paragraf selanjutnya

Agar plasma dapat dipertahankan dalam reaktor, plasma harus disuplai dengan tegangan. Sumber tegangan bolak-balik pada frekuensi radio (RF bias) mampu mengionisasi dan mempertahankan plasma (Harry, 2010). Mekanisme penyaluran energi dari medan listrik ke elektron disebut dengan *Ohmic heating*. Medan menyalurkan energi tersebut melalui tumbukan elektron terhadap atom netral. Semisal dalam plasma diberikan medan listrik bolak balik $E =$

$Re(E_0 e^{i\omega t})$, maka daya rata – rata yang diberikan medan ke elektron per satuan elektron adalah

$$\bar{p}_{ohm} = \frac{1}{2} E_0^2 \frac{e^2 v_m}{m_e (v_m^2 + \omega^2)} \quad (4.6)$$

Dari persamaan daya, ternyata diperoleh hubungan positif antara energi yang diperoleh elektron dengan medan listrik . Dengan kata lain, semakin tinggi besar tegangan yang diberikan pada plasma, maka semakin besar pula energi yang diperoleh elektron. Hal inilah yang menjelaskan mengapa semakin tinggi tegangan RF yang diberikan kepada plasma, semakin tinggi juga temperatur elektron. Dari persamaan daya tersebut juga nampak bahwa jika tidak ada tumbukkan dengan atom netral atau dengan kata lain $v_m = 0$, maka tidak ada daya yang diberikan ke elektron oleh medan. Sehingga, medan menyalurkan energinya melalui tumbukkan antara elektron dan atom netral. Temperatur elektron yang semakin tinggi juga menyebabkan kemungkinan elektron mengionisasi atom netral semakin besar, sehingga jumlah elektron yang dibebaskan juga semakin tinggi. Oleh karena itu, semakin tinggi tegangan RF, maka densitas elektron juga semakin besar.

Tegangan AC RF yang diberikan kepada plasma berfungsi untuk mempertahankan plasma, sedangkan tegangan DC negatif berfungsi agar ion dapat menembaki (*ion bombardment*) pelat di mana proses deposisi berlangsung. Bila suatu plasma disuplai dengan tegangan AC RF, maka pada plasma tersebut, arah medan listrik berubah-ubah dengan cepat. Energi yang dari medan tersebut akan diberikan kepada elektron dan ion. Semisal, sebesar energi yang sama diberikan pada elektron dan ion, maka yang akan mudah bergerak mengikuti tegangan ini adalah elektron, dikarenakan massanya yang sangat kecil dibandingkan ion. Sedangkan ion akan bergerak sangat lamban dibanding elektron. Ukuran ion yang besar juga menyebabkan ion memiliki penampang lintang (*cross section*) yang lebih besar, sehingga tumbukan lebih rentan terjadi dan hal ini memperlamban ion lagi. Pada reaktor plasma yang digunakan, dua elektroda tegangan AC RF dipasangkan bersebelahan, sedangkan pelat bertempelkan substrat diletakkan di bagian bawah elektroda. Pada pelat tersebut, diberikan tegangan DC bias negatif, sehingga ion positif dari plasma akan dipercepat menuju pelat tersebut. Sehingga substrat akan ditembaki oleh ion tersebut (*ion bombardment*). Selain ion-ion positif, radikal

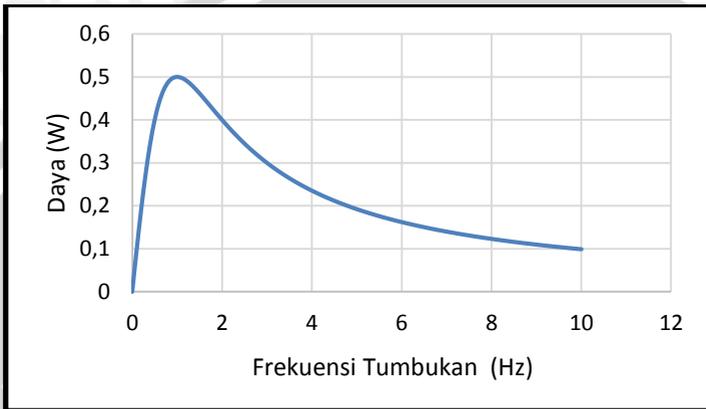
dan atom netral juga bias mencapai pelat, sehingga pada pelat akan terjadi reaksi permukaan (*surface reaction*) yang menyebabkan proses deposisi terjadi pada substrat. Mekanisme reaksi tersebut tidak dijelaskan dalam skripsi ini.

Penambahan tegangan DC pada plasma biasanya juga berfungsi untuk mengontrol energi elektron dan densitasnya. Pada penelitian ini diperoleh bahwa semakin negatif tegangan DC, maka temperatur elektron semakin turun. Menurut (Lieberman et al., 2003), penambahan tegangan DC pada plasma RF akan berpengaruh pada ketebalan plasma atau dengan kata lain volume dari plasma. Menurut (Green et al., 2001), penurunan volume dari plasma berakibat pada naiknya temperatur elektron. Sehingga penurunan temperatur elektron pada penelitian ini disebabkan karena volume plasma yang semakin besar seiring bertambah negatifnya tegangan DC. Turunnya temperatur elektron ternyata menyebabkan densitas elektron juga turun, hal ini disebabkan karena energi elektron untuk mengionisasi juga semakin berkurang.

Pada plasma gas argon murni, semakin tinggi laju alir gas argon, ternyata diperoleh temperatur elektron yang lebih tinggi juga. Hal ini menyebabkan kemungkinan elektron untuk mengionisasi atom netral Ar juga semakin besar, sehingga diperoleh densitas elektron yang lebih besar juga seiring peningkatan laju alir gas. Peningkatan temperatur elektron juga terjadi seiring naiknya laju alir gas argon pada plasma campuran gas argon–metana. Dalam plasma gas campuran argon–metana, yang berfungsi sebagai agen ionisasi dan disosiasi, dan juga untuk eksitasi spesies adalah elektron dari atom argon. Hal ini dikarenakan energi yang diperlukan untuk ionisasi atom argon lebih kecil dibandingkan energi untuk memperoleh elektron bebas dari molekul metana yang harus melalui proses disosiasi molekul metana, kemudian ionisasi dari atom C atau H. Sehingga agar diperoleh kondisi plasma yang optimum, jumlah atom argon dalam plasma haruslah lebih banyak daripada molekul metana.

Karena pada penambahan laju alir gas argon, temperatur elektron juga meningkat, maka haruslah ada mekanisme penambahan energi kepada elektron. Sebelumnya telah dibahas mekanisme penambahan energi ke dalam plasma melalui mekanisme *Ohmic*

heating. Pada amplitudo medan listrik yang tetap, maka daya yang diberikan medan ke elektron hanya berupa fungsi frekuensi tumbukkan elektron dengan atom netral. Hubungan ini dapat dibentuk dalam grafik pada Gambar 4.13 : (semua konstanta diberi nilai 1)



Gambar 4.13 Hubungan Daya *Ohmic* terhadap Frekuensi Tumbukan

Dari grafik di atas, semakin besar frekuensi tumbukan elektron dengan atom netral, pada awalnya akan meningkatkan daya yang diberikan medan kepada elektron. Tetapi jika frekuensi tumbukkan melebihi frekuensi osilasi medan (dalam hal ini bernilai 1), maka daya yang diberikan akan turun seiring bertambah besarnya frekuensi tumbukan. Berdasarkan literatur (Franz, 2009), untuk tekanan 13.3 Pa frekuensi tumbukkan elastik antara elektron dan atom netral berada pada orde 10^6 Hz dan pada tekanan 133 Pa berada pada orde 10^9 Hz. Sehingga pada tekanan 50 Pa, frekuensi tumbukan sudah jelas melampaui frekuensi osilasi medan listrik yaitu frekuensi radio 13.56 MHz (10^6). Sehingga jika gas argon terus ditambahkan yang menyebabkan densitas atom netral bertambah dan frekuensi tumbukan juga bertambah, maka daya yang diberikan kepada elektron akan juga berkurang. Selain itu akibat semakin banyaknya atom dalam plasma, maka tumbukan inelastik akan lebih sering terjadi, yang menyebabkan energi elektron juga semakin berkurang akibat proses ionisasi dan disosiasi molekul serta eksitasi. Hal ini dapat ditunjukkan dari intensitas spektrum Ar II yang bertambah seiring naiknya laju alir, yang berarti semakin banyak proses ionisasi dan eksitasi. Berdasarkan

hasil perhitungan temperatur elektron, bertambahnya gas argon menyebabkan temperatur elektron juga naik. Oleh karena itu, terdapat mekanisme pemberian energi kepada elektron yang lain.

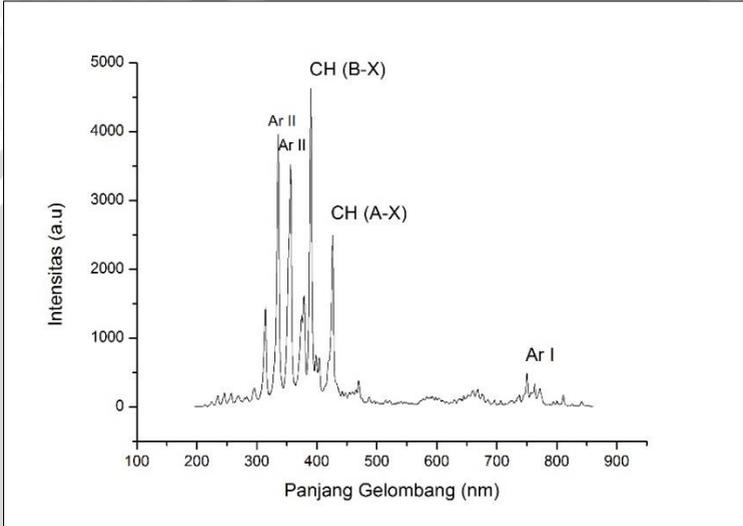
Mekanisme penyaluran energi pada elektron dalam plasma lainnya adalah *stochastic heating*. Pada plasma RF, Di sekitar elektroda – elektroda dan juga pelat DC bias, terdapat suatu lapisan di mana potensial listriknya sangat besar sehingga elektron tidak dapat memasuki lapisan tersebut, lapisan tersebut hanya dapat dilewati oleh ion positif dan atom netral. Lapisan itu disebut *sheath*. Pada plasma RF, lapisan *sheath* berosilasi, maksudnya lebar lapisan *sheath* berubah–ubah dengan frekuensi tertentu. Karena elektron tidak dapat melewati lapisan ini, sehingga elektron yang bergerak mendekati permukaan lapisan *sheath* akan dipantulkan. Karena permukaan lapisan *sheath* ini berosilasi, sehingga ada transfer momentum dari permukaan lapisan *sheath* kepada elektron. Sehingga energi elektron bertambah ketika terpantul. Semakin banyak elektron yang terpantul, maka energi diberikan oleh proses ini juga semakin besar. Daya rata-rata per satuan luas yang diberikan kepada elektron akibat *stochastic heating* adalah

$$\bar{S}_{stoch} = \frac{1}{2} m u_s^2 n \bar{v}_e \quad (4.7)$$

Semakin besar densitas elektron dalam plasma, maka semakin besar juga jumlah partikel yang berada di dekat permukaan lapisan *sheath* yang dipantulkan oleh permukaan lapisan *sheath*. Sehingga, elektron–elektron dalam plasma mendapatkan energi melalui dua mekanisme yaitu *ohmic* dan *stochastic heating*. Pada plasma gas argon murni dan campuran gas argon – metana, densitas elektron meningkat seiring laju alir gas argon juga naik. Semakin banyak atom netral yang memasuki plasma, maka kemungkinan proses ionisasi juga lebih besar, sehingga densitas elektron juga semakin besar. Oleh karena itu, daya yang diterima elektron akibat *stochastic heating* juga bertambah. Hal inilah yang menjelaskan mengapa semakin tinggi laju alir gas, temperatur elektron juga bertambah.

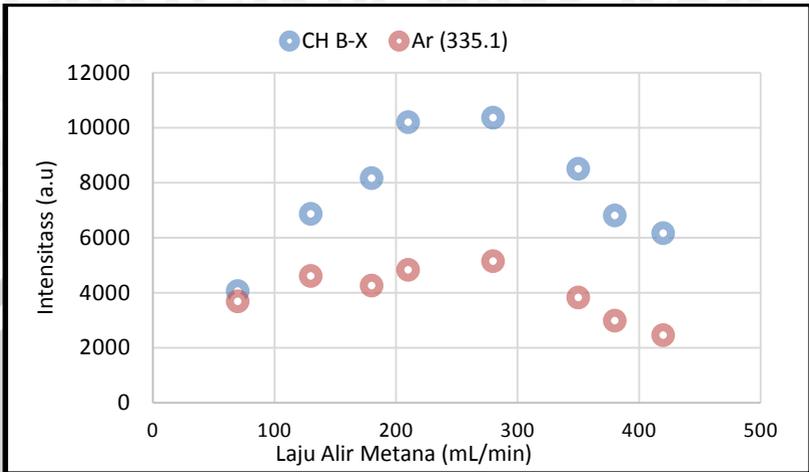
Pada plasma campuran gas argon – metana, berdasarkan hasil perhitungan, semakin tinggi laju alir gas metana, ternyata temperatur dan densitas elektron turun. Spektrum OES untuk plasma campuran

gas argon–metana pada laju alir Ar 70 mL/menit dan CH 180 mL/menit diberikan pada Gambar 4.14. Jika laju alir gas metana lebih besar daripada laju alir gas argon, nampak bahwa intensitas spesies CH jauh lebih tinggi dibanding spesies ion argon.



Gambar 4.14 Spektrum OES Plasma Campuran Gas Argon – Metana Ar 70 mL/min Metana 180 mL/min

Gambar 4.15 menunjukkan perbandingan intensitas radiasi dari spesies ion argon (335,1 nm) terhadap CH (B-X).



Gambar 4.15 Hubungan Intensitas terhadap Laju Alir Metana

Intensitas spesies CH selalu lebih besar daripada ion argon. Hal ini dapat menunjukkan bahwa seiring laju alir gas metana bertambah, jumlah spesies CH dalam plasma selalu lebih besar daripada spesies ion argon. Dari spektrum juga nampak jika laju alir argon dan metana sama (70 mL/min), maka intensitas kedua spesies juga sama. Hal ini disebabkan, karena semakin tinggi laju alir gas metana ke dalam plasma, maka semakin banyak molekul metana yang ada dalam plasma, sehingga kemungkinan proses disosiasi metana menjadi radikal CH juga semakin besar. Proses disosiasi tersebut dapat ditunjukkan dalam reaksi di bawah ini (Jun-Feng et al., 2009)



Dari proses disosiasi di atas, nampak bahwa tumbukkan dengan molekul metana akan menghasilkan radikal CH, tetapi proses

tersebut tidaklah memberi elektron bebas tambahan. Berdasarkan perbandingan intensitas radikal CH dan ion argon, elektron bebas dalam plasma lebih banyak digunakan untuk proses disosiasi molekul metana dibanding untuk mengionisasi atom netral argon menjadi ion argon. Karena kemungkinan untuk mendisosiasi metana semakin besar seiring jumlah gas metana yang memasuki plasma juga bertambah, maka densitas elektron pada plasma juga semakin turun. Penurunan densitas elektron berakibat pada menurunnya suplai energi kepada elektron melalui *stochastic heating* dan karena elektron akan lebih sering mengalami tumbukkan, maka temperatur elektron juga ikut turun.

Pada plasma campuran gas argon – metana, hasil disosiasi yang muncul dalam spektrum OES hanyalah radikal CH. Dalam reaksi disosiasi metana, radikal CH₃ dan CH₂ tidak muncul dalam spektrum. Menurut (Jun-Feng et al., 2009) radikal CH₃ dan CH₂ tidak muncul dalam spektrum plasma campuran gas metana dan gas mulia. Hal ini disebabkan karena CH₃ tidak mengemisikan radiasi cahaya dalam plasma walaupun waktu hidupnya yang panjang (sekitar milisekon). Sedangkan CH₂ memiliki waktu hidup yang sangat pendek sehingga sulit dideteksi. Radikal CH₂ akan langsung berubah menjadi radikal CH seperti reaksi di bawah :



Garis atomik H sebenarnya muncul di spektrum, tetapi intensitasnya sangat rendah. Garis atomik H yang muncul adalah H-beta (H_β) pada panjang gelombang 481 nm (Jun-Feng et al., 2009) Sedangkan radikal H₂ yang seharusnya muncul pada 627-637 nm (Jun-Feng et al., 2009) tidak muncul atau sulit dideteksi oleh spektrometer karena intensitasnya yang sangat rendah. Hal ini juga mengindikasikan bahwa pembentukan radikal CH tidak melalui reaksi 4.11 dan 4.12.

BAB V PENUTUP

4.1 Kesimpulan

Plasma merupakan gas yang terionisasi, sehingga elektron dapat terlepas dari atom-atom gas tersebut. Plasma terdiri atas elektron, ion dan atom gas tidak bermuatan. Plasma dapat dikarakterisasi berdasarkan parameternya yaitu temperatur dan densitas elektron. Proses karakterisasi plasma dilakukan dengan menggunakan spektroskopi optis yaitu *Optical Emission Spectroscopy* (OES).

Pada plasma argon murni, spesies utama yang muncul adalah atom argon netral (Ar I) dan ion argon (Ar II). Sedangkan pada plasma campuran gas argon-metana, spesies utama yang muncul adalah argon netral (Ar I), ion argon (Ar II), dan radikal CH. Temperatur elektron dari plasma yang dibangkitkan berkisar antara 1,5 – 2,4 eV dan densitasnya pada orde $10^{22} - 10^{24} \text{ m}^{-3}$. Parameter deposisi berpengaruh terhadap parameter plasma. Seiring meningkatnya laju alir gas argon, temperatur dan densitas elektron juga meningkat dalam kedua plasma dan menurun saat laju alir gas metana diperbesar. Naiknya tegangan RF menyebabkan temperatur dan densitas elektron juga meningkat. Hal sebaliknya terjadi pada peningkatan besar tegangan DC bias negatif yang menyebabkan temperatur dan densitas elektron turun.

4.2 Saran

Karena plasma yang diteliti juga mengandung spesies diatomik, maka untuk melengkapi karakterisasi plasma, sebaiknya untuk penelitian selanjutnya, temperatur rotasi dan vibrasi juga ditentukan.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



DAFTAR PUSTAKA

- Bernhardt, J. 2009. Stark Broadening Approach for Measuring The Plasma Density Inside A Filament Induced by A Femtosecond Laser Pulse in A Gas or Gas Mixture. in: *Departement de Physique, Genie Physique et D'optique, Faculte des Sciences et de Genie*, Vol. Doctoral, Universite Laval. Quebec.
- Bogaerts, A., E. Neyts, R. Gijbels, J. van der Mullen. 2002. Gas discharge plasmas and their applications. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **57**(4), 609-658.
- Franz, G. 2009. *Low Pressure Plasmas and Microstructuring Technology*. Springer-Verlag: Heidelberg.
- Fujimoto, T. 2004. *Plasma Spectroscopy*. Clarendon Press: Oxford.
- Gordillo-Vazquez, F.J., A. Perea, A. McKiernan, C.N. Afonso. 2005. Electronic temperature and density of the plasma produced by nanosecond ultraviolet laser ablation of LiF. *Applied Physics Letters*, **86**(18), 181501-181501-3.
- Green, K.M., M.C. Borras, P.P. Woskov, G.J. Flores, III, K. Hadidi, P. Thomas. 2001. Electronic excitation temperature profiles in an air microwave plasma torch. *Plasma Science, IEEE Transactions on*, **29**(2), 399-406.
- Griem, H.R. 2005. *Principles of Plasma Spectroscopy*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Hamed, S. 2005. Spectroscopic Determination of Excitation Temperature and Electron Density in Premixed Laminar Flame. *Egypt. J. Solids*, **28**, 349-357.
- Harry, J. 2010. *Introduction to Plasma Technology*. WILEY-VCH Verlag: Weinheim.
- Jamroz, P., W. Zyrnicki. 2010. Optical emission spectroscopy study for nitrogen–acetylene–argon and nitrogen–acetylene–helium 100 kHz and dc discharges. *Vacuum*, **84**(7), 940-946.
- Jun-Feng, Z., B. Xin-Chao, C. Qiang, L. Fu-Ping, L. Zhong-Wei. 2009. Diagnosis of Methane Plasma Generated in an Atmospheric Pressure DBD Micro-Jet by Optical Emission Spectroscopy. *Chinese Physics Letters*, **26**(3), 035203.
- Kawamura, E. 2005. Stochastic Heating in RF Capacitive Discharges, PTSG Seminar.

Lieberman, M.A., E. Kawamura, A.J. Lichtenberg. 2003. *Capacitive Discharge Driven by Combined DC/RF Sources*. University of California: Berkeley.

Lieberman, M.A., A.J. Lichtenberg. 2005. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. John Wiley & Sons: Hoboken.

Nicholson, D.R. 1983. *Introduction to Plasma Theory*. John Wiley & Sons: New York.

http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html).NIST. 2012. NIST Atomic Spectra Database. Diakses pada Februari-April 2013

Piel, A. 2010. *Plasma Physics: An Introduction to Laboratory, Space and Fusion Plasmas*. Springer: Heidelberg.

Schulze, F.J. 2009. *Electron Heating in Capacitively Coupled Radio Frequency Discharges*.



LAMPIRAN A

Data Spektroskopik

Pada bagian ini, dilampirkan data-data perhitungan temperatur dan densitas elektron beserta grafik Boltzmann.

I.Data Spektroskopik dari Transisi Atomik Beserta Temperatur dan Densitas Elektron Plasma.

i. Plasma Argon Murni

A. Variasi Laju Aliran Gas (Laju Alir)

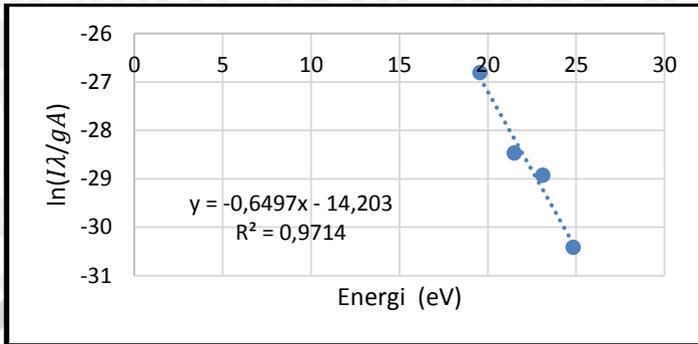
1. 50 mL/menit

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.1) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.1 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	165,96	6	-30,41
354,9528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	267,85	4	-28,93
404,4036	Ar II	21,49	$4,06 \times 10^7$	173,54	4	-28,47
426,7727	Ar II	19,55	$1,64 \times 10^7$	525,49	6	-26,81
750,5935	Ar I	14,76	$4,45 \times 10^7$	1208,74	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut (Gambar A.1) :



Gambar A.1 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Laju Alir Argon (50 mL/menit)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,6497x - 14,203$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 1,539172 eV.

Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut :

Tabel A.2 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$8,55 \times 10^{22}$
Ar II	354,9528	$5,92 \times 10^{22}$
Ar II	404,4036	$1,07 \times 10^{22}$
Ar II	426,7727	$7,15 \times 10^{22}$
	Rata-rata	$8,07 \times 10^{22}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $8,07 \times 10^{22} m^{-3}$.

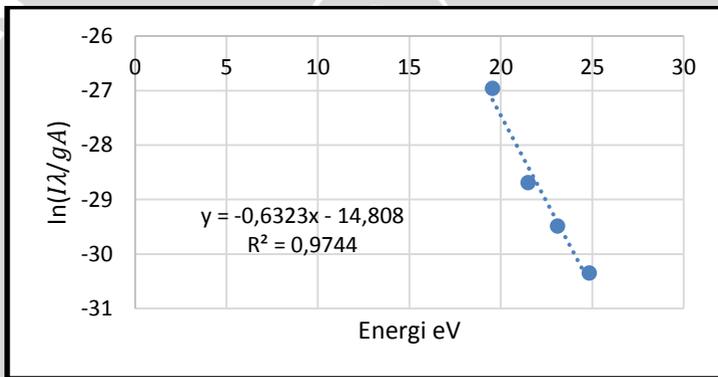
2. 60 mL/menit

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.3) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.3 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	177,18	6	-30,35
354,9528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	153,29	4	-29,49
404,4036	Ar II	21,49	$4,06 \times 10^7$	138,99	4	-28,69
426,7727	Ar II	19,55	$1,64 \times 10^7$	451,19	6	-26,96
750,5935	Ar I	14,76	$4,45 \times 10^7$	1226,96	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut :



Gambar A.2 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Laju Alir Argon (60 mL/menit)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,6323x - 14,808$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 1,581528 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut :

Tabel A.4 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$1,36 \times 10^{23}$
Ar II	354,9528	$1,70 \times 10^{23}$
Ar II	404,4036	$2,13 \times 10^{23}$
Ar II	426,7727	$1,29 \times 10^{23}$
	Rata-rata	$1,62 \times 10^{23}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $1,62 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$.

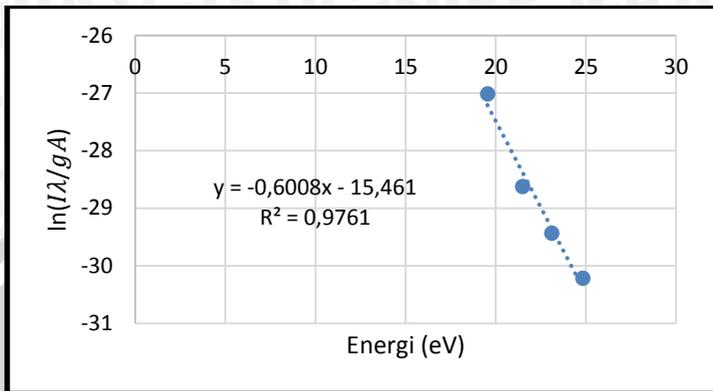
3. 70 mL/menit

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.5) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.5 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50\text{E}+08$	201,69	6	-30,22
354,9528	Ar II	23,10	$8,70\text{E}+07$	161,36	4	-29,43
404,4036	Ar II	21,49	$4,06\text{E}+07$	148,16	4	-28,63
426,7727	Ar II	19,55	$1,64\text{E}+07$	426,91	6	-27,01
750,5935	Ar I	14,76	$4,45\text{E}+07$	1286,79	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut (Gambar A.3) :



Gambar A.3 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Laju Alir Argon (70 mL/menit)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,6008x - 14,311$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 1,664447 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut :

Tabel A.6 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,015	-
Ar II	334,8273	$3,17 \times 10^{23}$
Ar II	355,4757	$4,07 \times 10^{23}$
Ar II	404,8551	$4,78 \times 10^{23}$
Ar II	426,038	$3,06 \times 10^{23}$
	Rata-rata	$3,77 \times 10^{23}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $3,77 \times 10^{23} m^{-3}$.

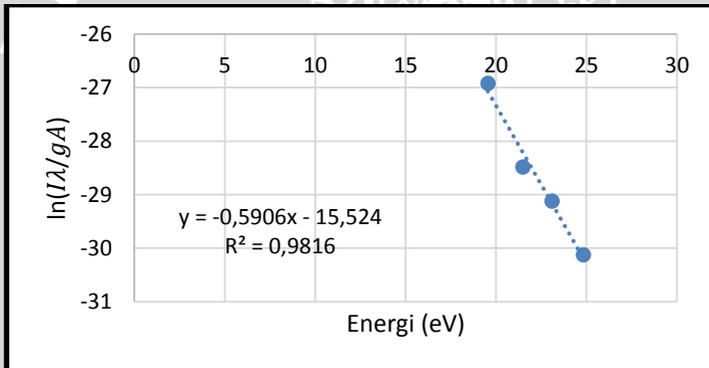
4. 80 mL/menit

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.7) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.7 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln(\frac{I\lambda}{gA})$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	222,07	6	-30,12
354,9528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	221,57	4	-29,12
404,4036	Ar II	21,49	$4,06 \times 10^7$	171,27	4	-28,48
426,7727	Ar II	19,55	$1,64 \times 10^7$	469,89	6	-26,92
750,5935	Ar I	14,76	$4,45 \times 10^7$	1331,09	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut :



Gambar A.4 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Laju Alir Argon (80 mL/menit)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,5906x - 15,524$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 1,693193 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut (Tabel A.8):

Tabel A.8 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$4,03 \times 10^{23}$
Ar II	354,9528	$4,08 \times 10^{23}$
Ar II	404,4036	$5,59 \times 10^{23}$
Ar II	426,7727	$3,69 \times 10^{23}$
	Rata-rata	$4,35 \times 10^{23}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $4,35 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$.

i.i. Plasma Campuran Gas Argon – Metana

A. Variasi Tegangan DC Bias

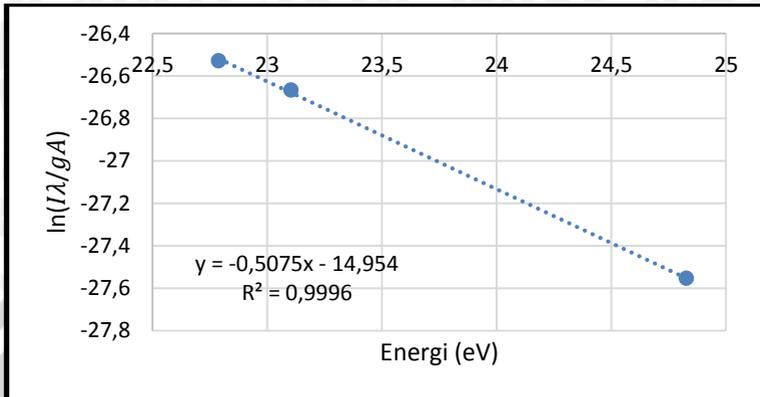
1. -250 V

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.9) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.9 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	2899,99	6	-27,55
354,9528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	2572,95	4	-26,67
376,4574	Ar II	22,79	$1,78 \times 10^7$	854,92	6	-26,53
750,5935	Ar I	13,48	$4,45 \times 10^7$	294,78	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut (Gambar A.5):



Gambar A.5 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Tegangan DC (-250V)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,5075x - 14,954$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 1,970443 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut :

Tabel A.10 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$8,15 \times 10^{22}$
Ar II	354,9528	$8,04 \times 10^{22}$
Ar II	376,4574	$8,22 \times 10^{22}$
	Rata-rata	$8,14 \times 10^{22}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $8,14 \times 10^{22} m^{-3}$.

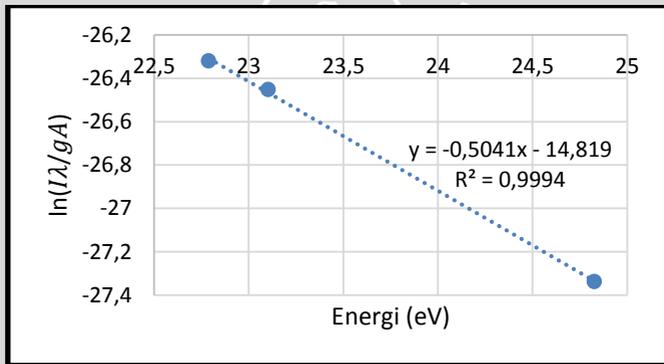
2. -325 V

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.11) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.11 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln(\frac{I\lambda}{gA})$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	3604,17	6	-27,34
354,9528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	3189,73	4	-26,45
376,4574	Ar II	22,79	$1,78 \times 10^7$	1053,22	6	-26,32
750,5935	Ar I	13,48	$4,45 \times 10^7$	385,81	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut :



Gambar A.6 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Tegangan DC (-325V)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,5041x - 14,819$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 1,983733 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut (Tabel A.12):

Tabel A.12 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$9,51 \times 10^{22}$
Ar II	354,9528	$9,35 \times 10^{22}$
Ar II	376,4574	$9,61 \times 10^{22}$
	Rata-rata	$9,49 \times 10^{22}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $9,49 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$.

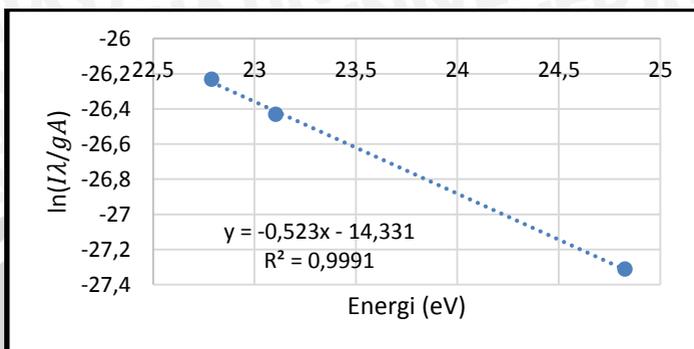
3. 350 V

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.13) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.13 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	3697,4	6	-27,31
354,9528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	3253,41	4	-26,43
376,4574	Ar II	22,79	$1,78 \times 10^7$	1148,74	6	-26,23
750,5935	Ar I	13,48	$4,45 \times 10^7$	421,70	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut (Gambar A.7):



Gambar A.7 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Tegangan DC (-350V)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,523x - 14,331$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 1,91204 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut :

Tabel A.14 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$5,75 \times 10^{22}$
Ar II	354,9528	$5,87 \times 10^{22}$
Ar II	376,4574	$5,67 \times 10^{22}$
	Rata-rata	$5,76 \times 10^{22}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $5,76 \times 10^{22} m^{-3}$.

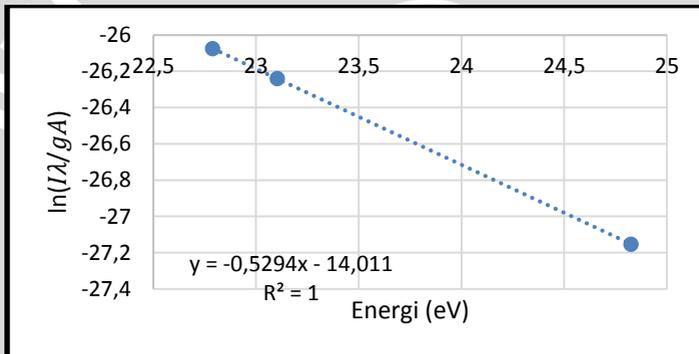
4. 400 V

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.15) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.15 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln(\frac{I\lambda}{gA})$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	4328,24	6	-27,15
354,9528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	3940,59	4	-26,24
376,4574	Ar II	22,79	$1,78 \times 10^7$	1343,80	6	-26,08
750,5935	Ar I	13,48	$4,45 \times 10^7$	500,18	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut :



Gambar A.8 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Tegangan DC (-400V)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,5294x - 14,011$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah $1,888931\text{eV}$. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut (Tabel A.16):

Tabel A.16 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$4,81 \times 10^{22}$
Ar II	354,9528	$4,80 \times 10^{22}$
Ar II	376,4574	$4,81 \times 10^{22}$
	Rata-rata	$4,81 \times 10^{22}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $4,81 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$.

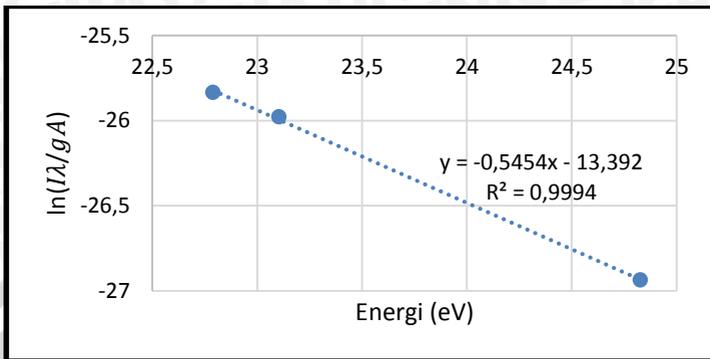
5. 500 V

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.17) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.17 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	5384,59	6	-26,94
354,9528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	5122,86	4	-25,98
376,4574	Ar II	22,79	$1,78 \times 10^7$	1710,38	6	-25,83
750,5935	Ar I	13,48	$4,45 \times 10^7$	659,60	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut (Gambar A.9) :



Gambar A.9 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Tegangan DC (-500V)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,5454x - 13,392$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 1,833516685 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut :

Tabel A.18 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	3.16×10^{22}
Ar II	354,9528	3.10×10^{22}
Ar II	376,4574	3.19×10^{22}
	Rata-rata	3.15×10^{22}

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $3,15 \times 10^{22} m^{-3}$.

B. Variasi Tegangan RF Bias

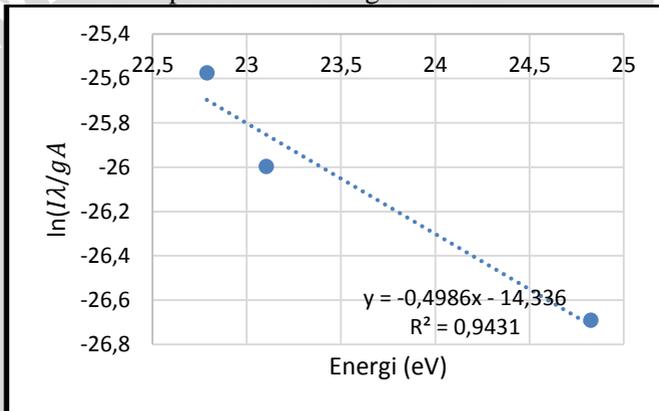
1. 200 V

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.19) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.19 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	6876,42	6	-26,69
354,9528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	5018,53	4	-26,00
376,4574	Ar II	22,79	$1,78 \times 10^7$	2216,79	6	-25,58
750,5935	Ar I	13,48	$4,45 \times 10^7$	1223,90	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut :



Gambar A.10 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Tegangan RF (200V)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,4986x - 14,336$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 2,005616 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut (Tabel A.20) :

Tabel A.20 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$1,87 \times 10^{23}$
Ar II	354,9528	$2,20 \times 10^{23}$
Ar II	376,4574	$1,69 \times 10^{23}$
	Rata-rata	$1,92 \times 10^{23}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $1,92 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$.

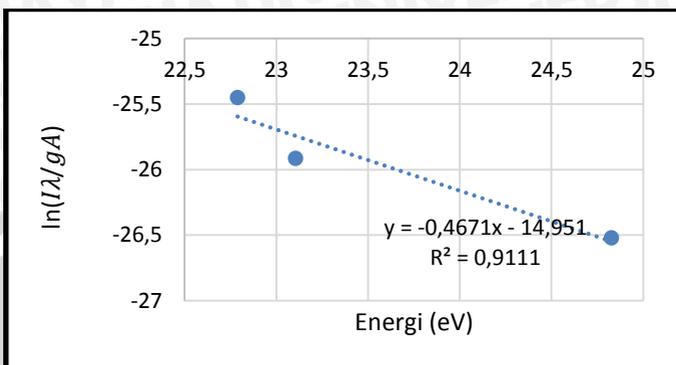
2. 225 V

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.21) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.21 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	8152,9	6	-26,52
354,9528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	5459,26	4	-25,92
376,4574	Ar II	22,79	$1,78 \times 10^7$	2512,61	6	-25,45
750,5935	Ar I	13,48	$4,45 \times 10^7$	1389,08	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut (Gambar A.10) :



Gambar A.11 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Tegangan DC (225V)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,4671x - 14,951$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 2,140869 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut :

Tabel A.22 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$4,63 \times 10^{23}$
Ar II	354,9528	$5,64 \times 10^{23}$
Ar II	376,4574	$4,11 \times 10^{23}$
	Rata-rata	$4,79 \times 10^{23}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $4,79 \times 10^{23} m^{-3}$.

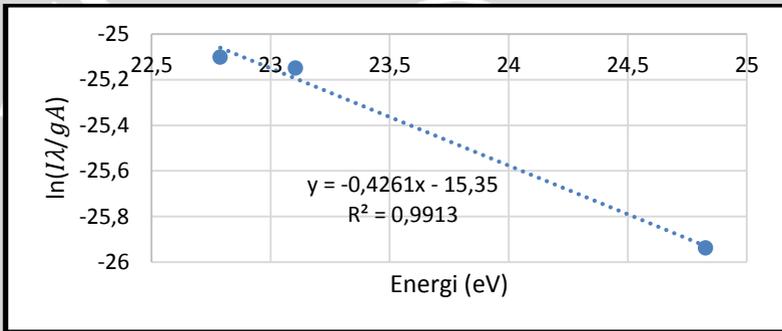
3. 250 V

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.23) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.23 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln(\frac{I\lambda}{gA})$
335,1887	Ar II	24,83	1.50×10^8	14622,9	6	-25,94
354,9528	Ar II	23,10	8.70×10^7	11744,6	4	-25,15
376,4574	Ar II	22,79	1.78×10^7	3564,77	6	-25,10
750,5935	Ar I	13,48	4.45×10^7	1918,37	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut :



Gambar A.12 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Tegangan DC (250V)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,4261x - 15,35$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 2,346867 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut (Tabel A.24) :

Tabel A.24 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$1,24 \times 10^{24}$
Ar II	354,9528	$1,18 \times 10^{24}$
Ar II	376,4574	$1,28 \times 10^{24}$
	Rata-rata	$1,23 \times 10^{24}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $1,23 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$.

C. Variasi Laju Aliran Gas Argon (Laju Alir Argon)

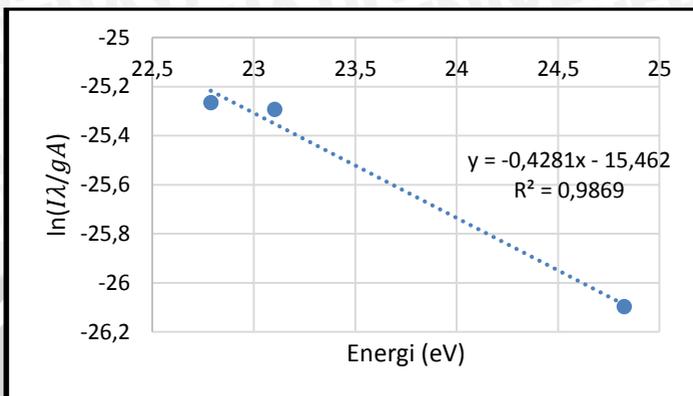
1. 140 mL/menit

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.25) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.25 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	12437,1	6	-26,10
354,9528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	10151,9	4	-25,29
376,4574	Ar II	22,79	$1,78 \times 10^7$	3020,47	6	-25,26
750,5935	Ar I	13,48	$4,45 \times 10^7$	292,40	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut (Gambar A.13):



Gambar A.13 Grafik Hubungan $\ln(\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Laju Alir Argon (140 mL/menit)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,4281x - 15,462$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 2,335903 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut :

Tabel A.26 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$2,09 \times 10^{23}$
Ar II	354,9528	$1,96 \times 10^{23}$
Ar II	376,4574	$2,18 \times 10^{23}$
	Rata-rata	$2,08 \times 10^{23}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $2,08 \times 10^{23} m^{-3}$.

2. 180 mL/menit

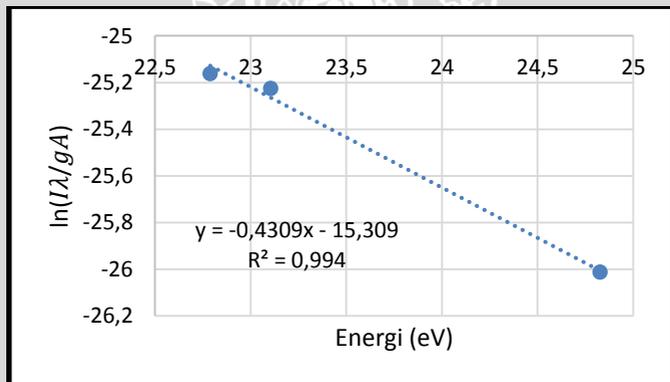
Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang

bersangkutan. Di bawah (Tabel A.27) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.27 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln(\frac{I\lambda}{gA})$
335,1887	Ar II	24,83	1.50×10^7	13544,7	6	-26,01
354,9528	Ar II	23,10	8.70×10^7	10872,66	4	-25,3
376,4574	Ar II	22,79	1.78×10^7	3351,71	6	-25,16
750,5935	Ar I	13,48	4.45×10^7	1742,72	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut :



Gambar A.14 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Laju Alir Argon (180 mL/menit)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,4309x - 15,309$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 2,320724 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut (Tabel A.28):

Tabel A.28 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$1,05 \times 10^{24}$
Ar II	354,9528	$1,01 \times 10^{24}$
Ar II	376,4574	$1,08 \times 10^{24}$
	Rata-rata	$1,05 \times 10^{24}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $1,05 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$.

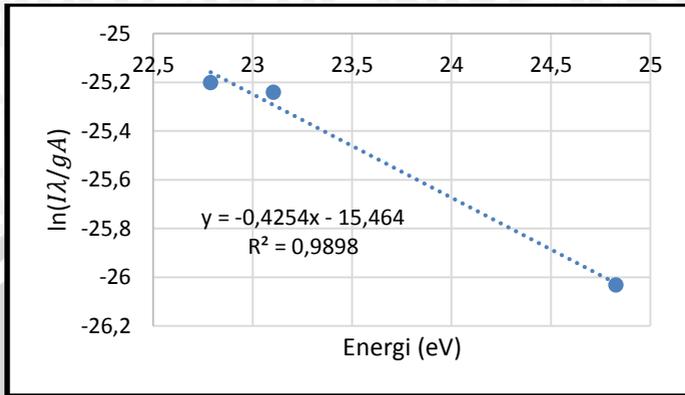
3. 190 mL/menit

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.29) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.29 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	13273,24	6	-26,03
354,9528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	10695,53	4	-25,24
376,4574	Ar II	22,79	$1,78 \times 10^7$	3222,011	6	-25,20
750,5935	Ar I	13,48	$4,45 \times 10^7$	1665,48	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut (Gambar A.15) :



Gambar A.15 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Laju Alir Argon (190 mL/menit)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,4254x - 15,464$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 2,350729 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut :

Tabel A.30 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$1,21 \times 10^{24}$
Ar II	354,9528	$1,14 \times 10^{24}$
Ar II	376,4574	$1,26 \times 10^{24}$
	Rata-rata	$1,21 \times 10^{24}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $1,21 \times 10^{24} m^{-3}$.

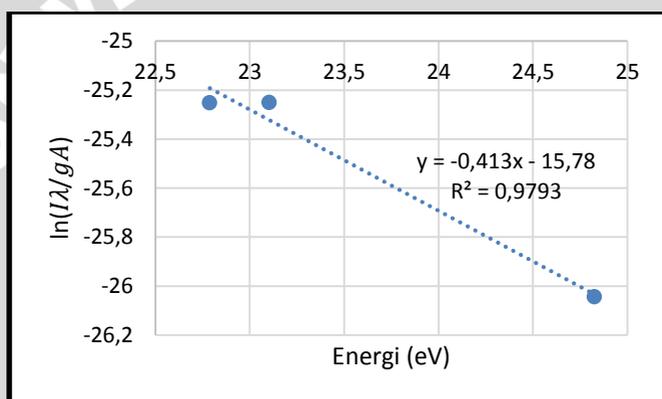
4. 210 mL/menit

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Gambar A.31) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.31 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln(\frac{I\lambda}{gA})$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	13124,22	6	-26,04
354,9528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	10591,57	4	-25,25
376,4574	Ar II	22,79	$1,78 \times 10^7$	3064,48	6	-25,25
750,5935	Ar I	13,48	$4,45 \times 10^7$	1692,32	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut :



Gambar A.16 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Laju Alir Argon (210 mL/menit)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,413x - 15,78$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 2,421308 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut (Gambar A.32) :

Tabel A.32 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$1,83 \times 10^{24}$
Ar II	354,9528	$1,68 \times 10^{24}$
Ar II	376,4574	$1,92 \times 10^{24}$
	Rata-rata	$1,81 \times 10^{24}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $1,81 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$

D. Variasi Laju Alir Metana (Methane Flow Rate)

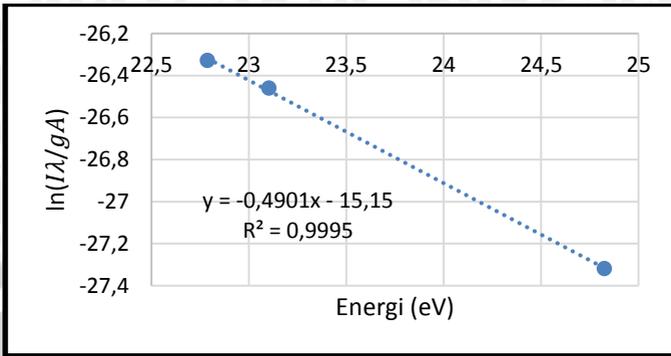
1. 70 mL/menit

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.33) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.33 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	3670,72	6	-27,32
354,9528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	3164,68	4	-26,46
376,4574	Ar II	22,79	$1,78 \times 10^7$	1043,62	6	-26,33
750,5935	Ar I	13,48	$4,45 \times 10^7$	466,70	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut (Gambar A.17) :



Gambar A.17 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Laju Alir Metana (70 mL/menit)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,4901x - 15,15$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 2,0404 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut :

Tabel A.34 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$1,72 \times 10^{23}$
Ar II	354,9528	$1,70 \times 10^{23}$
Ar II	376,4574	$1,74 \times 10^{23}$
	Rata-rata	$1,72 \times 10^{23}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $1,72 \times 10^{23} m^{-3}$.

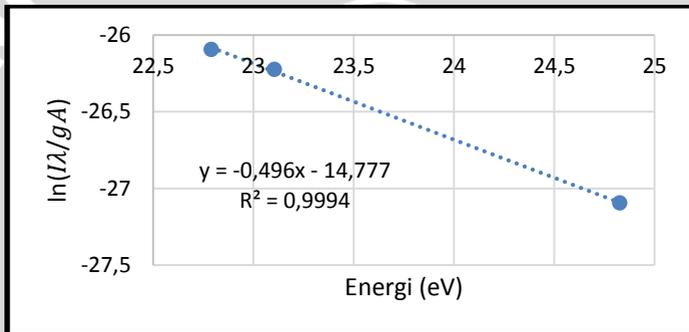
2. 130 mL/menit

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.35) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.35 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	4597,19	6	-27,09
354,9528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	4008,97	4	-26,22
376,4574	Ar II	22,79	$1,78 \times 10^7$	1322,04	6	-26,09
750,5935	Ar I	13,48	$4,45 \times 10^7$	504,32	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut :



Gambar A.18 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Laju Alir Argon (130 mL/menit)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,496x - 14,777$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 2,016129 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut (Tabel A.36):

Tabel A.36 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$1,24 \times 10^{23}$
Ar II	354,9528	$1,22 \times 10^{23}$
Ar II	376,4574	$1,26 \times 10^{23}$
	Rata-rata	$1,24 \times 10^{23}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $1,24 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$.

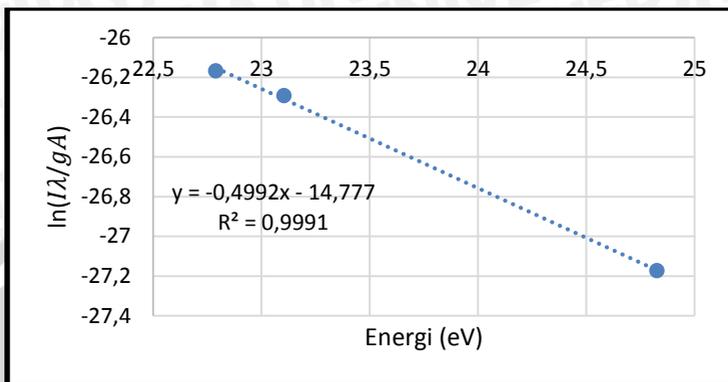
3. 180 mL/menit

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.37) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.37 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	4246,41	6	-27,17
354,528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	3739,40	4	-26,29
376,4574	Ar II	22,79	$1,78 \times 10^7$	1225,90	6	-26,17
750,5935	Ar I	13,48	$4,45 \times 10^7$	433,83	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut (Gambar A.19) :



Gambar A.19 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Laju Alir Argon (180 mL/menit)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,4992x - 14,777$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 2,003205 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut :

Tabel A.38 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$1,05 \times 10^{23}$
Ar II	354,9528	$1,03 \times 10^{23}$
Ar II	376,4574	$1,07 \times 10^{23}$
	Rata-rata	$1,05 \times 10^{23}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $1,05 \times 10^{23} m^{-3}$.

4. 280 mL/menit

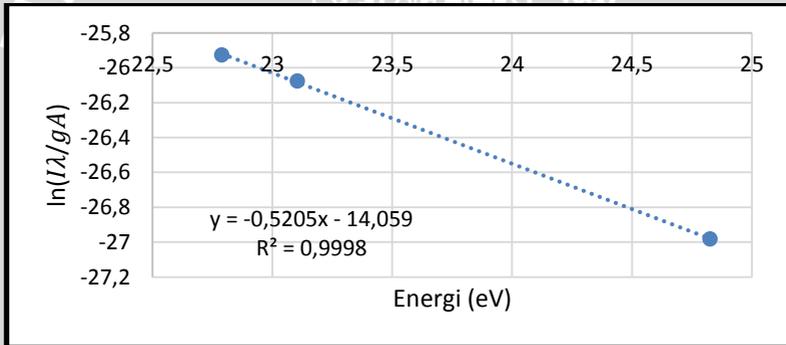
Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang

bersangkutan. Di bawah (Tabel A.39) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.39 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln(\frac{I\lambda}{gA})$
335,1887	Ar II	24,83	1.50×10^8	5143,18	6	-26,98
354,9528	Ar II	23,10	8.70×10^7	4646,1	4	-26,07
376,4574	Ar II	22,79	1.78×10^7	1560,95	6	-25,93
750,5935	Ar I	13,48	4.45×10^7	318,41	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut :



Gambar A.20 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Laju Alir Argon (280 mL/menit)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,5205x - 14,059$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 1,92123 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut (Tabel A.40) :

Tabel A.40 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$3,36 \times 10^{22}$
Ar II	354,9528	$3,33 \times 10^{22}$
Ar II	376,4574	$3,38 \times 10^{22}$
	Rata-rata	$3,36 \times 10^{22}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $3,36 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$.

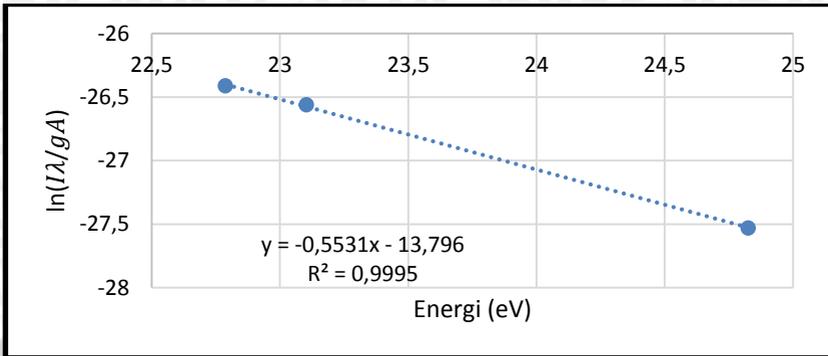
5. 380 mL/menit

Untuk membuat grafik dari persamaan Boltzmann, diperlukan data-data spektroskopik untuk tiap transisi yang bersangkutan. Di bawah (Tabel A.41) diberikan tabel berisi data spektroskopik.

Tabel A.41 Data Spektroskopik untuk Spesies Argon

Panjang Gelombang (nm)	Spesies	Level Energi Atas (eV)	Probabilitas Transisi (s^{-1})	Intensitas (a.u)	g	$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$
335,1887	Ar II	24,83	$1,50 \times 10^8$	2968,45	6	-27,53
354,9528	Ar II	23,10	$8,70 \times 10^7$	2857,11	4	-26,56
376,4574	Ar II	22,79	$1,78 \times 10^7$	958,86	6	-26,41
750,5935	Ar I	13,48	$4,45 \times 10^7$	146,36	1	-

Dari data spektroskopik di atas, dapat digambarkan grafik Boltzmann untuk spesies Ar II sebagai berikut (Gambar A.21):



Gambar A.21 Grafik Hubungan $\ln(I\lambda/gA)$ Terhadap Energi Eksitasi untuk Variasi Laju Alir Argon (140 mL/menit)

Berdasarkan grafik di atas, diperoleh persamaan linear $y = -0,5531x - 13,796$, sehingga temperatur elektron dari plasma ini adalah 1,807991 eV. Dengan menggunakan persamaan Saha-Boltzmann, diperoleh nilai densitas elektron plasma (untuk perhitungan tiap garis spektral) sebagai berikut :

Tabel A.42 Densitas Elektron

Spesies	Panjang Gelombang (nm)	Densitas (m^{-3})
Ar I	750,5935	-
Ar II	335,1887	$1,01 \times 10^{22}$
Ar II	354,9528	$9,94 \times 10^{21}$
Ar II	376,4574	$1,02 \times 10^{22}$
	Rata-rata	$1,01 \times 10^{22}$

Sehingga nilai terbaik untuk densitas elektron plasma ini (rata-rata) adalah $1,01 \times 10^{22} m^{-3}$.

Lampiran B Ohmic Heating

Ohmic heating adalah mekanisme penyaluran energi pada plasma. Agar plasma dapat mempertahankan keadaannya, plasma haruslah disuplai dengan energi. Ohmic heating merupakan mekanisme penyaluran energi kepada elektron dalam plasma dari medan listrik AC luar yang diterapkan pada plasma. Semisal medan listrik yang diberikan dapat dituliskan sebagai berikut $E = Re(E_0 e^{i\omega t})$

Daya rata-rata yang diterima elektron per satuan volum adalah

$$\bar{p}_{ohm} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{\text{volume}} VI dt = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} j(t)E(t)dt \quad (B.1)$$

$$j(t) = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + en_e u \quad (B.2)$$

Untuk memperoleh ekspresi untuk kecepatan elektron u , persamaan gerak elektron harus diselesaikan dahulu.

$$m \frac{du}{dt} = -eE(t) - mv_m u \quad (B.3)$$

Dengan $mv_m u$ adalah gaya akibat tumbukkan dengan partikel netral. Dengan menganggap solusi dari persamaan diferensial di atas sebagai $u = Ae^{i\omega t}$, dan mensubstitusikan solusi tersebut ke dalam persamaan (B.3), maka diperoleh ekspresi kecepatan elektron u ,

$$u(t) = Re \left(-\frac{e}{m} \frac{1}{i\omega + v_m} E_0 e^{i\omega t} \right) \quad (B.4)$$

Kemudian, ekspresi kecepatan ini disubstitusi ke dalam persamaan rapat arus total, sehingga diperoleh daya rata – rata sebesar

$$\bar{p}_{ohm} = \frac{1}{2} E_0^2 Re \left(\frac{n_e e^2}{m(v_m + i\omega)} \right) = \frac{1}{2} E_0^2 \frac{n_e e^2 v_m}{m(v_m^2 + \omega^2)} \quad (B.5)$$

Atau jika dituliskan sebagai daya rata-rata yang diberikan medan per satuan elektron

$$\bar{p}_{ohm} = \frac{1}{2} E_0^2 \frac{e^2 v_m}{m(v_m^2 + \omega^2)} \quad (B.6)$$

(Schulze, 2009).

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



Lampiran C Stochastic Heating

Pada plasma RF, di sekitar elektroda-elektroda terdapat satu lapisan yang hanya dapat dimasuki oleh ion positif dan atom netral. Elektron tidak dapat memasuki daerah ini dikarenakan potensial listrik yang sangat besar, sehingga elektron tidak dapat memasukinya. Lapisan ini di sebut *sheath*. Pada plasma RF, lapisan *sheath* berosilasi, artinya ketebalan lapisan ini berubah-ubah dan sisi lapisan ini bergerak secara harmonis. Elektron menganggap lapisan ini seperti dinding keras, sehingga ketika elektron mencapai lapisan ini, elektron akan dipantulkan seperti bola dipantulkan oleh dinding keras. Karena dinding ini juga bergerak, maka elektron akan mengalami perubahan momentum dan juga energi. Penambahan energi kepada elektron karena mekanisme ini disebut *stochastic heating*.

Semisal elektron mendekati lapisan *sheath* dengan kecepatan $-u$ dan sheath memiliki kecepatan v_{sh} . Maka, menurut kerangka acuan laboratorium, kecepatan akhir dari elektron setelah menumbuk adalah,

$$u_f = u + 2v_{sh} \quad (C.1)$$

Perubahan energi yang dirasakan oleh elektron adalah,

$$\Delta E = \frac{m_e}{2} (u_f^2 - u^2) \quad (C.2)$$

Fluks elektron yang menumbuk lapisan *sheath* adalah,

$$(u + v_{sh}) f_{sh}(-u, t) du \quad (C.3)$$

$f_s(-u, t)$ adalah fungsi distribusi elektron.

Jadi, daya per satuan luas yang diberikan pada elektron adalah,

$$S_{stoch} = \int_0^\infty \frac{m_e}{2} (u_f^2 - u^2) (u + v_{sh}) f_s(-u, t) du \quad (C.4)$$

Karena lapisan *sheath* berosilasi, maka $v_{sh} = u_s \cos \omega t$.

Sehingga, daya rata-rata per satuan luas yang diberikan pada elektron adalah,

$$\begin{aligned} S_{stoch} &= \int_0^\infty \frac{m_e}{2} (u_f^2 - u^2) (u + v_{sh}) f_{sh}(-u, t) du \\ &= 2m_e u_s^2 \int_0^\infty u f_s(-u) du = \frac{m_e}{2} u_s^2 n \bar{v}_e \end{aligned} \quad (C.5)$$

Karena terdapat dua elektrode, maka

$$S_{stoch} = m_e u_s^2 n \bar{v}_e \quad (C.6)$$

(Kawamura, 2005).

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



LAMPIRAN D Database NIST

Pada bagian lampiran ini, disertakan lembar database NIST untuk panjang gelombang yang bersangkutan . Database ini diambil dari http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html

Ion	Observed Wavelength Vac (nm)	Ritz Wavelength Vac (nm)	Rel. Int. (I)	A_{ul} (s ⁻¹)	Acc.	E _l (eV)	E _u (eV)	Lower Level Conf., Term, J	Upper Level Conf., Term, J	g - g _k	Type			
Ar II	334.2468	334.246308	3			21.36688974	- 25.07625579	3s ² 3p ¹ (¹ D)3d	¹ D	¹ D	3s ² 3p ¹ (¹ P)6p	¹ P ^o	³ / ₂	6 - 4
Ar II	334.2707	334.270126	6			19.54901058	- 23.25811233	3s ² 3p ¹ (¹ P)4p	¹ D ^o	¹ D ^o	3s ² 3p ¹ (¹ P)4d	¹ F	¹ D ^o	6 - 6
Ar III	334.34983	334.34990	5			27.2651742	- 30.9733910	3s ² 3p ¹ (¹ D)3d	¹ P ^o	¹ S	3p ¹	¹ S	0	3 - 1
Ar III	334.57183	334.571834	575	1.8e+08	D	24.37717804	- 28.08293502	3s ² 3p ¹ (¹ D)4s	³ D ^o	³ D ^o	3s ² 3p ¹ (¹ D)4p	¹ F	³ D ^o	5 - 7
Ar VIII	334.65	334.69				131.8567	- 135.5413	2p ⁵ 9p	⁴ P ^o	¹ S	2p ⁵ 11s	¹ S	¹ / ₂	2 - 2
Ar II	334.8656	334.865873	1			21.14307416	- 24.84557719	3s ² 3p ¹ (¹ D)4p	⁴ P ^o	⁴ P ^o	3s ² 3p ¹ (¹ P)5d	¹ F	¹ D	8 - 10
Ar II	335.18870	335.188704	129	1.5e+08	D	21.12703222	- 24.82596924	3s ² 3p ¹ (¹ D)4p	⁴ P ^o	⁴ P ^o	3s ² 3p ¹ (¹ D)4d	¹ F	¹ D	6 - 6
Ar III	335.307		4	2.2e+07	D	24.38531556	- 28.08293502	3s ² 3p ¹ (¹ D)4s	³ D ^o	³ D ^o	3s ² 3p ¹ (¹ D)4p	¹ F	³ D ^o	7 - 7
Ar VIII	335.58	335.56				131.84635	- 135.5413	2p ⁵ 9p	⁴ P ^o	¹ S	2p ⁵ 11s	¹ S	¹ / ₂	4 - 2
C III		335.8752		2.04e+05	B	40.577331	- 44.268708	1s ² 2p(¹ P ^o)3p	³ S	¹ S	1s ² 2s6p	³ P ^o	¹ / ₂	3 - 5
C III		335.8872		2.04e+05	B	40.577331	- 44.268576	1s ² 2p(¹ P ^o)3p	³ S	¹ S	1s ² 2s6p	³ P ^o	¹ / ₂	3 - 3

Ion	Observed Wavelength Vac (nm)	Ritz Wavelength Vac (nm)	Rel. Int. (%)	A_{if} (s ⁻¹)	Acc.	E_i (eV)	E_f (eV)	Lower Level Conf., Term, J	Upper Level Conf., Term, J	$g_i - g_f$	Type
Ar II	353.2187	353.219132	2			16.45737682	- 19.96749786	3s ² 3p ⁴ (³ P)3d	1/2 3s ² 3p ⁴ (³ P)4p	4s ^o 3/2	2-4
Ar II	353.3243	353.324924	1			19.61030669	- 23.11937674	3s ² 3p ⁴ (³ P)4p	4p ^o 3/2 3s ² 3p ⁴ (³ P)4d	4p 3/2	4-4
Ar II	353.63298	353.632972	170	5.7e+07	B	19.30534372	- 22.811135704	3s ² 3p ⁴ (³ P)4p	4p ^o 1/2 3s ² 3p ⁴ (³ P)4d	4D 3/2	2-4
Ar III	354.0230	354.02093	3			30.16095053	- 33.6831218	3s ² 3p ⁴ (³ P ^o)4p	3P 2 3s ² 3p ⁴ (³ D ^o)4d	3p ^o 1	5-3
Ar II	354.41591	354.415932	26			21.49804856	- 24.99631655	3s ² 3p ⁴ (³ D)4p	4D ^o 5/2 3s ² 3p ⁴ (³ P)5d	4F 7/2	6-8
Ar II	354.432	354.432999	1?			21.42648821	- 24.92458774	3s ² 3p ⁴ (³ D)4p	4P ^o 1/2 3s ² 3p ⁴ (³ P)5d	4P 1/2	2-2
Ar II	354.66083	354.660823	891	3.4e+08	D	19.76225987	- 23.25811233	3s ² 3p ⁴ (³ P)4p	4D ^o 3/2 3s ² 3p ⁴ (³ P)4d	4F 5/2	4-6
Ar II	354.68562	354.685628	794	3.9e+08	D	21.12703222	- 24.62264019	3s ² 3p ⁴ (³ D)4p	4P ^o 5/2 3s ² 3p ⁴ (³ D)4d	4G 7/2	6-8
Ar II	354.95279	354.952777	195	8.7e+07	B	19.61030669	- 23.10328376	3s ² 3p ⁴ (³ P)4p	4p ^o 3/2 3s ² 3p ⁴ (³ P)4d	4F 3/2	4-4
Ar II	355.10439	355.104307	10	2.6e+06	C	19.68004775	- 23.17153429	3s ² 3p ⁴ (³ P)4p	4D ^o 5/2 3s ² 3p ⁴ (³ P)4d	4P 5/2	6-6
Ar I	355.5321	355.5320	7	2.7e+05	D	11.5483537	- 15.0356393	3s ² 3p ⁴ (³ P ^o , ³ s ₂)4s	4P ^o [_g]° 2 3s ² 3p ⁴ (³ P ^o , ³ s ₂)6p	4P ^o [_g] 2	5-5
Ar II	355.79198	355.791981	49	5.0e+06	B	17.94175001	- 21.42848821	3s ² 3p ⁴ (³ P)3d	4P 1/2 3s ² 3p ⁴ (³ D)4p	4P ^o 1/2	2-2
Ar II	356.05246	356.052445	1445	2.88e+08	B	19.68004775	- 23.16223675	3s ² 3p ⁴ (³ P)4p	4D ^o 5/2 3s ² 3p ⁴ (³ P)4d	4F 7/2	6-8

Ion	Observed Wavelength Vac (nm)	Ritz Wavelength Vac (nm)	Rel. Int. (%)	A_{if} (s ⁻¹)	Acc.	E_i (eV)	E_x (eV)	Lower Level Conf., Term, J	Upper Level Conf., Term, J	$g_i - g_k$	Type
Ar II	376.4180	376.417957	2			21.49804856	- 24.79163911	$3s^2 3p^1(^1D)4p$ $^2D^{\circ}$ $^5/2$	$3s^2 3p^1(^2P)5d$ 4D $^5/2$	6 - 6	
Ar II	376.45735	376.457440	17	1.78e+07	B	19.49453270	- 22.78797779	$3s^2 3p^1(^2P)4p$ $^4D^{\circ}$ $^7/2$	$3s^2 3p^1(^2P)4d$ 4D $^5/2$	8 - 6	
Ar II	376.63395	376.633954	186	9.8e+07	D	19.22290098	- 22.51480257	$3s^2 3p^1(^2P)4p$ $^4P^{\circ}$ $^5/2$	$3s^2 3p^1(^2P)5s$ 4P $^5/2$	6 - 6	
Ar II	376.71883	376.718846	91	7.4e+06	B	18.06063878	- 21.35179854	$3s^2 3p^1(^2P)3d$ 2P $^3/2$	$3s^2 3p^1(^2D)4p$ $^2P^{\circ}$ $^3/2$	4 - 4	

Ion	Observed Wavelength Vac (nm)	Ritz Wavelength Vac (nm)	Rel. Int. (%)	A_{if} (s ⁻¹)	Acc.	E_i (eV)	E_x (eV)	Lower Level Conf., Term, J	Upper Level Conf., Term, J	$g_i - g_k$	Type
Ar II	404.3332	404.332299	3	4.e+05	C	18.06063878	- 21.12703222	$3s^2 3p^1(^1P)3d$ 2P $^3/2$	$3s^2 3p^1(^1D)4p$ $^2F^{\circ}$ $^5/2$	4 - 6	
Ar II	404.40356	404.403560	288	4.06e+07	B	18.42654798	- 21.49240108	$3s^2 3p^1(^1D)4s$ 2D $^3/2$	$3s^2 3p^1(^1D)4p$ $^2D^{\circ}$ $^3/2$	4 - 4	
Ar I	404.5561	404.5561	50	3.33e+05	C	11.6235920	- 14.68828941	$3s^2 3p^1(^3P_{32})4s$ $^2[1/2]^{\circ}$ 1	$3s^2 3p^1(^3P_{32})5p$ $^1[1/2]$ 2	3 - 5	
Ar II	404.68198	404.681904	8	1.6e+06	C	18.28805417	- 21.35179854	$3s^2 3p^1(^1P)3d$ 4P $^3/2$	$3s^2 3p^1(^1D)4p$ $^2P^{\circ}$ $^3/2$	4 - 4	
Ar I		404.7108		4.1e+04	C	11.6235920	- 14.68711735	$3s^2 3p^1(^3P_{32})4s$ $^2[1/2]^{\circ}$ 1	$3s^2 3p^1(^2P_{32})5p$ $^1[1/2]$ 1	3 - 3	
Ar II	404.86237	404.862419	10			19.76225987	- 22.82463823	$3s^2 3p^1(^3P)4p$ $^2D^{\circ}$ $^3/2$	$3s^2 3p^1(^1D)3d$ 2S $^1/2$	4 - 2	

Ion	Observed Wavelength Vac (nm)	Ritz Wavelength Vac (nm)	Rel. Int. (%)	A_{ul} (s^{-1})	Acc.	E_l (eV)	E_k (eV)	Lower Level Conf., Term, J	Upper Level Conf., Term, J	$g_l - g_k$ Type
Ar I	426.7487	426.7488	100	3.12e+05	C	11.6235920	- 14.52891260	$3s^2 3p^2 (^4P_{3/2}) 4s \ ^2[1/2]^{\circ}$ 1	$3s^2 3p^2 (^6P_{3/2}) 5p \ ^2[1/2]$ 2	3 - 5
Ar II	426.77273	426.772743	288	1.64e+07	B	16.64385338	- 19.54901058	$3s^2 3p^2 (^4P) 4s \ ^4P$ $^{\circ}$ $^{\circ}$	$3s^2 3p^2 (^6P) 4p \ ^4D^{\circ}$ $^{\circ}$	6 - 6
C II	426.820	426.8202	800	2.23e+08	C+	18.045808	- 20.950643	$2s^2 3d \ ^2D$	$2s^2 4f \ ^2F^{\circ}$ $^{\circ}$	4 - 6
C II	426.846	426.8462	1000*	2.38e+08	C+	18.045986	- 20.950643	$2s^2 3d \ ^2D$	$2s^2 4f \ ^2F^{\circ}$ $^{\circ}$	6 - 8
C II	426.846	426.8462	1000*	1.59e+07	C+	18.045986	- 20.950643	$2s^2 3d \ ^2D$	$2s^2 4f \ ^2F^{\circ}$ $^{\circ}$	6 - 6
Ar II	426.8691	426.869916	3			19.61030669	- 22.51480257	$3s^2 3p^2 (^4P) 4p \ ^4D^{\circ}$ $^{\circ}$	$3s^2 3p^2 (^2P) 5s \ ^4P$ $^{\circ}$	4 - 6
Ar II	426.8931	426.893735	3h			20.74334480	- 23.64787861	$3s^2 3p^2 (^1S) 4s \ ^2S$ $^{\circ}$	$3s^2 3p^2 (^2P) 5p \ ^4D^{\circ}$ $^{\circ}$	2 - 2

Ion	Observed Wavelength Vac (nm)	Ritz Wavelength Vac (nm)	Rel. Int. (%)	A_{ul} (s^{-1})	Acc.	E_l (eV)	E_k (eV)	Lower Level Conf., Term, J	Upper Level Conf., Term, J	$g_l - g_k$ Type
Ar I	750.5935	750.5934	20000	4.45e+07	C	11.8280704	- 13.47988600	$3s^2 3p^2 (^2P_{1/2}) 4s \ ^2[1/2]^{\circ}$ 1	$3s^2 3p^2 (^2P_{1/2}) 4p \ ^2[1/2]$ 0	3 - 1
Ar II	750.7220	750.72218	1			19.97253701	- 21.62406929	$3s^2 3p^2 (^3P) 4p \ ^2S^{\circ}$ $^{\circ}$	$3s^2 3p^2 (^1D) 3d \ ^2P$ $^{\circ}$	2 - 4
C II		751.096		1.53e+06	B	20.919794	- 22.570505	$2p^3 \ ^2P^{\circ}$	$2s 2p^3 (^3P) 3p \ ^2P$ $^{\circ}$	2 - 4