

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Pengertian Dasar Plasma.

Jika energi (temperatur) suatu gas dinaikkan sehingga memungkinkan atom-atom gas terionisasi, gas akan melepaskan elektron-elektronnya yang pada keadaan normal mengelilingi inti. Percampuran antara ion-ion yang bermuatan positif dan elektron-elektron yang bermuatan negatif yang mempunyai sifat-sifat berbeda dengan gas pada umumnya, dan materi pada fase ini disebut plasma. Jadi secara sederhana plasma adalah fase keempat (selain padat, cair dan gas) suatu material yang memiliki suhu dan energi yang sangat tinggi dan antara ion-ion positif dengan elektron-elektron yang bermuatan negatif dan secara keseluruhan material tersebut netral (Nur,1998). Untuk memproduksi plasma pada skala laboratorium digunakan metode lucutan listrik, dengan memberikan energi dalam bentuk penyinaran laser, *radio frekuensi (RF)* dan tegangan DC.

Sebagai contoh lucutan listrik oleh tegangan DC pada tabung lucutan yang mempunyai dua elektroda lempeng paralel (katoda dan anoda) pada kedua sisinya dan diisi dengan gas dengan tekanan sekitar 10^{-1} Torr. Dengan memberikan tegangan tinggi (DC) antara elektroda gas akan terionisasi dan akan timbul arus listrik (Konuma,1992).

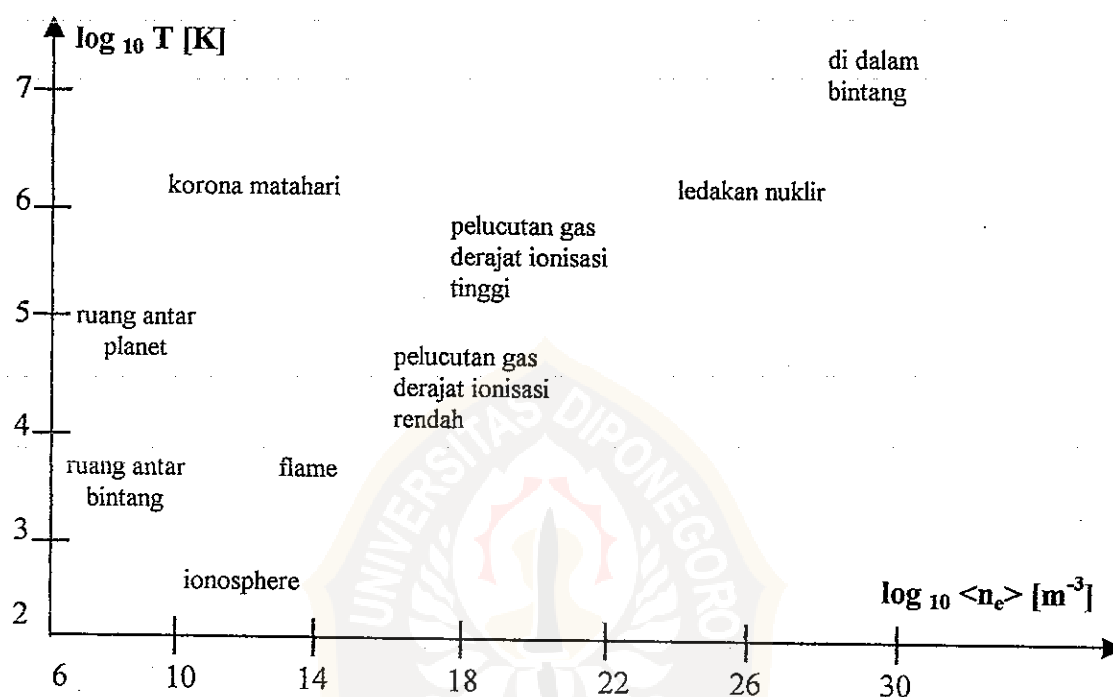
Jika gas terionisasi total maka dalam fase plasma terdapat kesetimbangan termodinamika. Ionisasi dalam gas terjadi akibat tumbukan antar molekul gas netral, antar elektron dengan atom netral, antar ion dengan molekul dalam gas netral. Elektron-elektron mempunyai suatu temperatur kesetimbangan antar sesamanya yakni temperatur elektronik (T_e), yang lainnya ion-ion dan partikel-partikel netral dengan massa yang hampir sama mempunyai suatu temperatur kesetimbangan yang lain pula ($T_e=T_i$) (Nur, 1998).

2.2. Klassifikasi Plasma (Nur, 1998)

Parameter dari suatu plasma yang sangat penting adalah kerapatan plasma (ion/elektron) dan temperatur (ion dan elektron). Berdasarkan dua parameter inilah plasma selalu diklassifikasikan. Dan parameter-parameter inilah yang sangat menentukan untuk apa plasma diproduksi dan bagaimana memproduksinya. Dari penelitian terhadap plasma yang telah diproduksi dan yang terdapat di alam terlihat betapa lebarnya interval temperatur plasma.

Berdasarkan kerapatan (densitas) ionisasinya, densitas plasma berkisar antara 10^6 m^{-3} (plasma antar bintang) sampai dengan 10^{30} m^{-3} (plasma metal dan di dalam bintang). Temperatur plasma juga sangat bervariasi mulai sekitar 1000 K (plasma dingin, daerah antar bintang, plasma non-termik untuk pemrosesan material) sampai dengan 10^8 K (di dalam bintang/ matahari, plasma fusi/ reaksi termionuklir).

Gambar 2.1 menunjukkan plasma-plasma alami dan plasma-plasma produksi laboratorium, dalam pembagian diagram keseimbangan dalam koordinat $\log_{10} T$, $\log_{10} n_e$ (T adalah temperatur dan n_e densitas elektronik).



Gambar 2.1. Klassifikasi plasma (Held, 1994)

Lebih lanjut jika ditinjau dari temperaturnya dan aplikasinya di bidang teknologi dan industri plasma dapat digolongkan dalam beberapa famili, yaitu:

1. Plasma dingin, ion-ion dan atom-atom (molekul-molekul) netral tetap dalam suhu sekitar 1.000 K, namun elektronnya mempunyai suhu sekitar 50.000 K (terapannya bidang mikroelektronik, pembentukan materi baru, pembersihan polusi dan lain sebagainya).

2. Plasma termik, ion-ion dan atom-atom (molekul-molekul) bersuhu lebih tinggi dari 3000 K (penerapannya untuk pengelasan, pemotongan metal, pembersihan polusi dan lain sebagainya).
3. Plasma panas, temperaturnya diatas 10^6 K (penerapannya untuk memproduksi energi listrik dari reaksi fusi terkendali).

2.3. Kestimbangan Termodinamika Dalam Plasma (Nur, 1998)

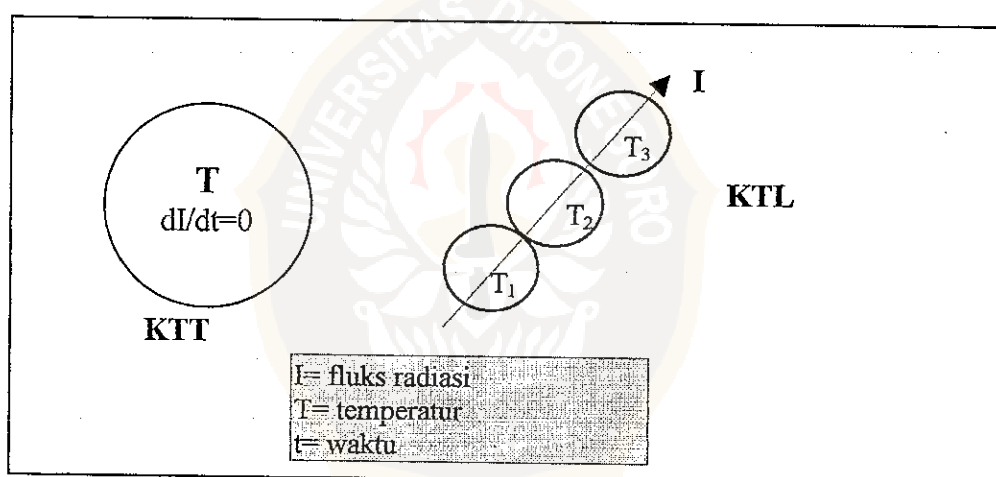
Dari uraian sebelumnya telah dikemukakan bahwa plasma merupakan fase keempat setelah fase padat, cair dan gas. Akibatnya hukum-hukum termodinamika dalam fase gas belum cukup untuk menerangkan kestimbangan termodinamika dalam plasma.

2.3.1. Kestimbangan Termodinamika Total (KTT).

Didalam suatu sistem tertutup pada temperatur T , terdapat beberapa jenis partikel yang berbeda misalnya atom-atom, ion-ion, molekul-molekul dan elektron-elektron. Suatu keadaan setimbang telah tercapai, bila dalam setiap proses baik di bawah pengaruh radiasi dan/atau tumbukan partikel selalu terjadi proses kebalikannya; plasma berada dalam keadaan “Kestimbangan Termodinamika Total (KTT)”. Plasma pada kondisi ini mengikuti seluruh hukum distribusi dan radiasi, yakni hukum-hukum Planck, Maxwell, Boltzmann, Kirchoff dan Saha.

2.3.2. Keseimbangan Termodinamika Lokal (KTL).

Keseimbangan termodinamika lokal adalah keseimbangan plasma pada keadaan tertentu dan dapat berubah ke keadaan keseimbangan lain. Di dalam plasma terdapat perbedaan temperatur dari satu posisi dengan posisi lainnya. Oleh karena itu keseimbangan termodinamika total (KTT), digantikan oleh suatu temperatur sub sistem T_1 , T_2 , T_3 dan seterusnya, sedemikian rupa sehingga perbedaan energi antara dua sub sistem berdekatan sangat rendah. Dalam setiap sub sistem berlaku hukum-hukum Boltzmann, Saha dan Maxwell. Pada keadaan ini masih terdapat proses mikro-reversibilitas dari proses tumbukan.



Gambar 2.2. Ilustrasi temperatur dalam keadaan KTL dan KTT suatu plasma (Nur, 1998)

Karena terjadi radiasi dan tumbukan, maka suhu plasma cenderung berubah. Pada suatu keadaan tertentu terjadi keseimbangan T_1 , pada keadaan lain, suhu plasma berubah T_2 , dan seterusnya (ilustrasi ditunjukkan oleh gambar 2.2).

2.4. Hukum-hukum Distribusi dan Radiasi Dalam Plasma

Plasma merupakan gas panas yang memancarkan radiasi elektromagnetik.

Hukum-hukum radiasi tentang plasma adalah:

2.4.1. Hukum Radiasi Planck

Energi dari radiasi yang mempunyai frekuensi ν mempunyai energi terkuantisasi sebesar $h\nu$. Diandaikan radiasi plasma merupakan radiasi dari rongga hitam yang berbentuk foton maka foton tersebut memenuhi statistika Bose-Einstein, karena spin foton adalah 1. Jumlah foton rata-rata $f(\nu)$ untuk setiap tingkat energi $E=h\nu$ akan mengikuti distribusi Bose-Einstein, seperti persamaan berikut:

$$f(\nu) = \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (2.1)$$

dengan $f(\nu)$ adalah jumlah foton rata-rata, ν adalah frekuensi foton, T adalah suhu foton, h merupakan tetapan Planck dan k adalah tetapan Boltzmann.

Foton mempunyai dua arah polarisasi yang bersesuaian dengan orientasi spin relatif terhadap arah gerakannya. Kerapatan foton dalam rongga lintasan adalah :

$$u(\nu) = \frac{8\pi}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (2.2)$$

Persamaan (2.2) dinamakan persamaan radiasi Planck, yang menyatakan bahwa distribusi energi spektral sebagai fungsi frekuensi juga tergantung pada konstanta universal dan suhu absolut (Beiser, 1992)

Disamping itu, radiasi yang dihasilkan oleh suatu rongga hitam akan mengalami kesetimbangan termodinamika. Kesetimbangan termodinamika tergantung pada temperatur. Intensitas dari radiasi rongga hitam dalam keadaan kesetimbangan termodinamika diberikan oleh persamaan Planck : (Richter,1968)

$$I_{\lambda} = B_{\lambda}(T) = \frac{2 h \nu^2}{\lambda^3} \frac{1}{\exp(h \nu/kT) - 1} \quad (2.3)$$

dengan $I_{\lambda} = B_{\lambda}$ adalah intensitas radiasi plasma, h adalah konstanta Planck, k adalah konstanta Boltzmann, λ adalah panjang gelombang radiasi, T adalah temperatur plasma dan ν adalah frekuensi.

2.4.2. Hukum Radiasi Kirchoff

Emisi radiasi dalam satuan volume dari suatu plasma dicirikan oleh koefisien emisinya (ϵ_{ν} pada frekuensi tertentu, ϵ_{λ} pada panjang gelombang tertentu). Emisi radiasi yang merupakan koefisien emisi ini didefinisikan seperti intensitas spesifik dari radiasi energi yang dipancarkan oleh satu satuan volume dari plasma persatu satuan waktu, persatu satuan sudut ruang dan persatu satuan frekuensi atau panjang gelombang (Richter, 1968).

$$\epsilon_{\nu} = \lim_{\Delta V, \Delta T, \Delta \Omega, \Delta \nu \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta V \Delta T \Delta \Omega \Delta \nu} \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_{\lambda} = \lim_{\Delta V, \Delta T, \Delta \Omega, \Delta \lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta V \Delta T \Delta \Omega \Delta \lambda} \quad (2.5)$$

dengan ε_0 adalah koefisien emisi pada frekuensi tertentu, ε_{λ} adalah koefisien emisi pada panjang gelombang tertentu, $\Delta \Omega$ adalah sudut pancaran radiasi, ΔE adalah energi radiasi, ΔV adalah volume, ΔT adalah waktu pancaran radiasi, $\Delta \nu$ adalah frekuensi radiasi dan $\Delta \lambda$ adalah panjang gelombang.

Dari definisi yang disebutkan diatas, koefisien emisi dapat tergantung pada arah radiasi. Dengan demikian hukum Kirchoff dapat menjelaskan hamburan radiasi dalam medan radiasi non-isotropik atau radiasi dengan arah tertentu karena pengaruh medan eksternal (Richter, 1968).

2.4.3. Distribusi Radiasi Maxwell (Richter, 1968).

Dalam kondisi isotropik dan homogen, dalam suatu plasma memungkinkan untuk mendapatkan kesetimbangan termik pada temperatur $T = T_{\text{kinetik}}$ melalui suatu hukum distribusi kecepatan.

Jika N partikel persatuan volume (cm^{-3}) dengan massa masing-masing partikel adalah m , maka jumlah (fraksi) partikel (dN) yang mempunyai kecepatan antara v dan $v + dv$ diberikan oleh :

$$dN = N f(v) dv \quad (2.6)$$

$$\frac{\Delta N}{N} = 4\pi v^2 \left[\frac{m}{2\pi kT} \right]^{3/2} \exp \left[-\frac{mv^2}{2kT} \right] dv \quad (2.7)$$

dengan $f(v)$ adalah fungsi distribusi Maxwell, m adalah massa partikel, k adalah konstanta Boltzmann dan T adalah suhu plasma.

Dalam banyak kasus plasma, elektron mempunyai distribusi Maxwell dengan energi kinetik yang berbeda dengan partikel berat (ion dan atom netral) sedemikian rupa sehingga sering dinamakan temperatur elektronik (T_e) untuk elektron dan temperatur gas panas (T_g) untuk partikel berat.

2.4.4. Distribusi Radiasi Boltzmann (Richter, 1968).

Jika sejumlah N atom sejenis berada dalam satu satuan volume (cm^{-3}) dari suatu volume plasma, terdapat sebagian dari atom-atom ini berada pada aras tereksitasi.

Pada kesetimbangan termodinamika total (KTT) atau kesetimbangan lokal (KTL), fraksi N_i dari atom-atom ini dengan i aras kuantum dengan energi E_i maka fraksi atom tereksitasi ini mengikuti distribusi Boltzmann.

$$\frac{N_i}{N} = \frac{g_i}{U(T)} \exp \left(-\frac{E_i}{kT} \right) \quad (2.8)$$

dengan g_i adalah bobot statistika atom-atom dari plasma pada aras i , E_i adalah Energi pada aras i , $U(T)$ adalah fungsi partisi atom-atom plasma, k adalah konstanta Boltzmann dan T adalah suhu plasma.

2.4.5. Distribusi Radiasi Saha (Nur, 1997)

Hukum distribusi ini dapat digunakan untuk menentukan derajat ionisasi didalam suatu plasma (medium) pada kesetimbangan termodinamika. Suatu atom A terionisasi akan memberikan suatu ion A^+ dan sebuah elektron $A \rightarrow A^+ + e$, dan jika N_0 dan N_i berturut-turut adalah jumlah partikel persatuan volume dari atom A pada aras dasar dan ion A^+ positif, dan N_e adalah densitas elektron, maka hukum Saha dapat menjelaskan perbandingan antara $N_i N_e / N_0$ sebagai fungsi temperatur plasma ($T = T_e$).

$$\frac{N_i N_e}{N_0} = \frac{2U_i}{U_0} \frac{(2\pi m_e k_B T_e)^{3/2}}{h^3} \exp \left[-\frac{(E_{ip} - \Delta E_{ip})}{k_B T_e} \right] \quad (2.9)$$

dengan U_i adalah fungsi partisi ion, U_0 adalah fungsi partisi atom netral, m_e adalah massa elektron, E_{ip} adalah energi ionisasi, ΔE_{ip} adalah perubahan energi ionisasi, h adalah konstanta Planck, k_B adalah konstanta Boltzmann dan T_e adalah temperatur elektronik.

Untuk memberikan gambaran proses kesetimbangan dalam plasma, skema reaksi ditunjukkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Perbandingan proses kesetimbangan dalam plasma (Nur, 1998)

Kesetimbangan Maxwell	$X + Y \xrightleftharpoons{M} X + Y$ $E_x + E_y = (E_x + \Delta E) + (E_y - \Delta E)$ Pertukaran energi kinetik dan konservasi
Kesetimbangan Boltzmann	$X + A_m + E_{mn} \xrightleftharpoons{B} X + A_n$ Deeksitasi $\longleftrightarrow$ eksitasi
Kesetimbangan Saha	$X + A_p + E_p \xrightleftharpoons{S} X + A_j^+ + e$ Rekombinasi $\longleftrightarrow$ ionisasi
Kesetimbangan Planck	$A_n \xrightleftharpoons{P} A_m + h\nu$ Absorpsi $\longleftrightarrow$ emisi spontan $A_n + h\nu \xrightleftharpoons{P} A_m + 2h\nu$ Emisi terstimulasi

2.5. Spektrum Emisi dari Plasma Atomik

Spektrum atomik terdiri dari spektrum garis dan kontinu. Spektrum garis merupakan hasil transisi antara aras-aras tenaga dalam atom (atau ion). Sedangkan kontinu dihasilkan oleh perpindahan elektron dari aras bebas tak terkuantifikasi (diatas aras ionisasi) ke salah satu aras pada atom yang terkuantifikasi.

2.5.1. Emisi Garis (Herzberg, 1994)

Transisi pada atom dari satu aras ke aras lain diasumsikan sebagai emisi gelombang elektro magnetik yang mengikuti persamaan:

$$\nu' = \frac{1}{h}(E_n - E_m). \quad (2.10)$$

dengan ν' adalah frekuensi Bohr, h adalah konstanta Planck, E_n adalah energi eksitasi pada aras n dan E_m adalah energi eksitasi pada aras m .

Dalam atom, terjadinya eksitasi dan sebaliknya (deeksitasi) mempunyai probabilitas tertentu. Jika terjadinya deeksitasi maka atom akan memancarkan radiasi, dan sebaliknya untuk mengalami eksitasi atom menyerap energi.

Intensitas emisi atau serapan sangat dipengaruhi besarnya probabilitas transisi dan perubahan momen dipole listrik. Menurut Dirac, emisi radiasi dari atom pada transisi dari aras n ke aras m tergantung pada $\psi_n \psi_m^*$, dimana besarnya momen listrik (P_x^{nm}):

$$P_x^{nm} = \sum_k e \int \psi_n \psi_m^* x_k d\tau \quad (2.11)$$

dengan e adalah muatan muatan elementer, ψ_n dan ψ_m^* adalah fungsi gelombang pada aras n dan fungsi gelombang konjugate pada aras m , x_k adalah sumbu arah momen listrik dan τ adalah elemen volume.

Penjumlahan semua komponen momen listrik, menghasilkan :

$$P^{nm} = e R^{nm} \exp[-2\pi i[(E_n - E_m)/h]t] \quad (2.12)$$

dengan e adalah muatan elementer, P^{nm} adalah momen listrik, R^{nm} adalah vektor transisi, E_n dan E_m adalah energi eksitasi pada aras n dan m , h adalah konstanta Planck dan t adalah waktu eksitasi.

Mengingat bahwa intensitas radiasi atom merupakan jumlah transisi perdetik yang menghasilkan $h\nu'$, maka berdasarkan formula untuk intensitas radiasi gelombang elektromagnetik melalui vibrasi dipole listrik besarnya probabilitas transisi (A^{nm}) adalah :

$$A^{nm} = \frac{64 e^2 \pi^4}{3h} \nu^3 R^{nm} R^{mn} \quad (2.13)$$

dengan A^{nm} adalah probabilitas transisi dari aras n ke m sering disebut probabilitas transisi Einstein, e adalah muatan elementer, $\nu = \frac{\nu'}{c}$ adalah jumlah gelombang, R^{nm} vektor transisi dari aras n ke m dan R^{mn} adalah vektor transisi dari aras m ke n .

Intensitas emisi (I) spektrum garis untuk transisi dari n ke m besarnya adalah :

$$I = W^{nm} h\nu'_{nm} \quad (2.14)$$

dengan W^{nm} adalah jumlah transisi perdetik dari suatu sumber radiasi dan $h\nu'$ adalah energi radiasi, dengan besarnya W^{nm} adalah :

$$W^{nm} = A^{nm} N_n \quad (2.15)$$

dengan N_n adalah jumlah atom pada aras n .

Dari persamaan (2.15) terlihat bahwa untuk menghitung intensitas radiasi spektrum garis, dua parameter penting yang perlu diketahui adalah probabilitas transisi antara dua aras ($n - m$) dan jumlah atom yang memiliki elektron pada aras n .

Pada kesetimbangan termal (pada suatu temperatur eksitasi) dari suatu tingkat tenaga eksitasi n dengan energi eksitasi adalah E_n maka jumlah atom pada aras n sebanding dengan faktor Boltzmann ($e^{-E_n/kT}$). Perbandingan antara jumlah atom yang mempunyai aras n dan m adalah

$$\frac{N_n}{N_m} = \frac{g_n e^{-E_n/kT}}{g_m e^{-E_m/kT}} \quad (2.16)$$

Jika N_m adalah jumlah atom pada aras dasar m ($E_m=0$), maka jumlah atom pada aras n (N_n) adalah :

$$N_n = N_m \frac{g_n}{g_m} e^{-E_n/kT} \quad (2.17)$$

dengan g_n dan g_m adalah bobot statistika pada aras n dan m , N_m adalah jumlah atom pada aras m , k adalah konstanta Boltzmann, E_n adalah energi eksitasi pada aras n dan T adalah temperatur.

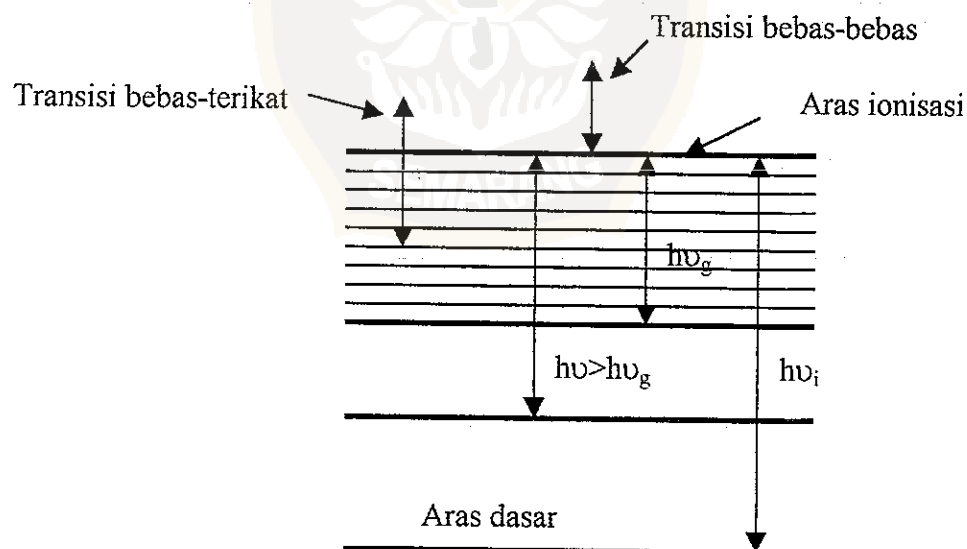
2.5.2. Emisi Kontinu

Spektrum kontinu dari spektrum atom dapat terbentuk dari transisi elektron melalui aras bebas (diatas energi ionisasi) yang tak terkuantisasi ke aras yang terkuantisasi. Transisi ini sering disebut transisi bebas-terikat. Selain itu dapat juga terbentuk dari perpindahan elektron dari aras bebas ke aras bebas. Beberapa reaksi proses terjadinya kontinu ditunjukkan pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Proses-proses yang terjadi pada emisi kontinu (Batal, 1981).

<u>Transisi bebas-terikat :</u>	
- Rekombinasi radiatif	$\text{Ar}^+ + e \rightarrow \text{Ar} + h\nu$
- Pancaran foto (cahaya)	$\text{Ar} + e \rightarrow \text{Ar}^- + h\nu$
<u>Transisi bebas-bebas :</u>	
- Retardasi pada medan ionik	$\text{Ar}^+ + e \rightarrow \text{Ar}^+ + e + h\nu$
- <i>Bremsstrahlung</i>	$\text{Ar} + e \rightarrow \text{Ar} + e + h\nu$

Transisi bebas-terikat terjadi pada aras eksitasi hingga aras ionisasi, sedangkan bebas-bebas terjadi pada aras ionisasi (ilustrasi transisi elektron pada emisi kontinu ditunjukkan oleh gambar 2.3)



Gambar 2.3. Ilustrasi transisi elektron pada emisi kontinu (Nur, 1997)

Emisi radiasi kontinu karena transisi “bebas-terikat” pada atom dengan densitas atom netral sebesar n_0 mempunyai koefisien emisi (ϵ_{ea}) sebesar :

$$\epsilon_{ea}(\lambda, T) = 2hc^2 \frac{n_e n_0}{\lambda^5} k_{ea}(\lambda, T) \exp\left(-\frac{hc}{\lambda k T_e}\right) \quad (2.18)$$

dengan k_{ae} adalah koefisien serap dan n_e adalah densitas elektronik (Batal, 1981).

Dalam daerah spektrum tampak, kontinu yang disumbangkan oleh proses transisi “bebas-bebas” sangat kecil. Pada umumnya emisi radiasi oleh transisi “bebas-bebas” berada pada daerah infra merah.

2.6. Temperatur Plasma Atomik

Kesetimbangan termodinamika yang berlaku untuk plasma termal adalah kesetimbangan termodinamika lokal, sedangkan pada plasma dengan panas (tokamak) adalah kesetimbangan termodinamika total.

Plasma atomik pada keadaan kesetimbangan termodinamika lokal, temperaturnya dinyatakan dengan temperatur eksitasi, temperatur elektronik dan temperatur ionik. Pada penelitian ini hanya dibahas tentang temperatur eksitasi dan elektronik.

Dari spektrum emisi garis, temperatur eksitasi dapat ditentukan dengan hipotesa bahwa didalam plasma terjadi kesetimbangan termodinamika lokal. Dengan hipotesa yang sama dan melalui analisa spektrum emisi garis dan emisi kontinu, temperatur elektronik dapat ditentukan.

2.6.1. Temperatur Eksitasi (Nur, 1997).

Temperatur eksitasi adalah temperatur yang berhubungan dengan tingkat-tingkat energi eksitasi suatu atom. Pada atom Argon temperatur eksitasi ini menunjukkan temperatur pada tingkat energi eksitasi tertentu di dalam atom Argon.

Temperatur eksitasi dari Argon dapat ditentukan dengan menggunakan kesetimbangan Boltzmann dengan mengasumsikan bahwa dalam plasma terjadi kesetimbangan termodinamika lokal (KTL). Intensitas radiasi yang dipancarkan oleh tingkat eksitasi atom I_i sebagai fungsi temperatur eksitasi dan probabilitas transisi spontan Einstein A_{ki} :

$$I_i = \left[\frac{h\nu}{4\pi} \right] A_{ki} g_k \left[\frac{n_a}{U_a} \right] \exp \left[\frac{-E_k}{k_B T_{\text{exc}}} \right] \quad (2.19)$$

dengan n_a adalah densitas atom netral, E_k adalah energi eksitasi, g_k adalah bobot statistika aras k , T_{exc} adalah temperatur eksitasi, U_a adalah fungsi partisi dan A_{ki} adalah probabilitas transisi Einstein.

Dengan menggunakan perbandingan antara intensitas-intensitas dua spektrum dalam tingkat ionisasi yang sama, temperatur eksitasi dapat ditentukan.

Perbandingan tersebut dapat dituliskan sebagai;

$$\frac{I_{i1}}{I_{i2}} = \left[\frac{g_{k1} A_{k1} \nu_1}{g_{k2} A_{k2} \nu_2} \right] \exp \left[-\frac{E_{k1} - E_{k2}}{k_B T_{\text{exc}}} \right] \quad (2.20)$$

Indeks 1 dan 2 dalam persamaan ini berhubungan dengan besaran-besaran intensitas spektrum I_1 dan I_2 . Ketepatan pengukuran ini akan lebih baik jika jarak antara tingkat energi eksitasi 1 dan 2 cukup jauh.

Metode ini dapat disempurnakan lagi jika dari sejumlah transisi diperoleh diagram atomik Boltzmann. Dari persamaan (2.19) diperoleh :

$$\frac{I\lambda}{A_{kl}g_k} = \frac{hc}{4\pi} \left(\frac{n_a}{U_a} \right) \exp\left(\frac{-E_k}{k_B T_{exc}} \right) \quad (2.21)$$

$$\ln\left(\frac{I\lambda}{A_{kl}g_k} \right) = -\frac{1}{k_B T_{exc}} E_k + \ln\left(\frac{hc}{4\pi} \frac{n_a}{U_a} \right) \quad (2.22)$$

$$\ln \frac{I\lambda}{A_{kl}g_k} = f(E_k) \quad (2.23)$$

Dengan membuat grafik berdasarkan grafik Boltzmann pada persamaan (2.23), temperatur eksitasi dapat ditentukan melalui koefisien arah dari grafik linier.

2.6.2. Temperatur Elektronik (Nur, 1997).

Dalam banyak kasus temperatur elektronik plasma Argon dapat ditentukan dengan mengukur intensitas relatif antara spektrum garis dengan kontinu.

Intensitas total dari radiasi persatuan frekuensi adalah :

$$I_i(\nu) = \left[\frac{h\nu}{4\pi} \right] A_{kl} \frac{g_k}{2U_i} \frac{h^3}{(2\pi m k_B)^{3/2}} n_e n_i T_e^{-3/2} \exp\left[\frac{E_i - \Delta E_i}{k_B T_e} - \frac{E_k}{k_B T_{exc}} \right] \quad (2.24)$$

dengan U_i adalah fungsi partisi dari ion Ar, E_i potensial ionisasi dan ΔE_i adalah pengurangan potensial. n_e dan n_i masing-masing densitas elektron dan ion. T_e adalah temperatur elektronik.

Selain itu densitas radiasi kontinu $\epsilon_c(\nu)$ diberikan oleh :

$$\epsilon_c(\nu) = \left[\frac{16\pi e^6}{3c^3 (6\pi m^3 k_B)^{1/2}} \right] \frac{n_e n_i}{T_e^{1/2}} \left[\xi \left(1 - \exp \frac{-h\nu}{k_B T_e} \right) + G \exp \frac{-h\nu}{k_B T_e} \right] \quad (2.25)$$

dalam persamaan ini G adalah faktor batas-batas Gaunt, ξ adalah faktor kontinu (terikat bebas).

Persamaan (2.25) tidak terintegrasi pada suatu interval frekuensi dan satuannya adalah energi persatuan volume persatuan waktu dan persatuan frekuensi. Dengan mengambil perbandingan antara intensitas dari spektrum teramati (terintegrasi pada interval frekuensi) dengan intensitas kontinu teramati (tak terintegrasi), diperoleh :

$$\frac{I_i}{\epsilon_c}(\nu) = \frac{\left(\frac{h^4 3^{3/2} c^3}{256\pi^3 e^6 k_B} \right) \frac{A_{21} g_2}{U_i} \frac{\nu}{T_e} \exp \left(\frac{E_i - \Delta E_i}{k_B T_e} \right) \exp \left(\frac{-E_2}{k_B T_{exc}} \right)}{\left[\xi \left(1 - \exp \frac{-h\nu}{k_B T_e} \right) + G \exp \frac{-h\nu}{k_B T_e} \right]} \quad (2.26)$$

Persamaan (2.26) dapat dituliskan sebagai fungsi panjang gelombang.

$$\frac{I_i}{\epsilon_c}(\lambda) = \frac{2,0052 \times 10^{-5} \frac{A_{ki} g_k}{U_i} \frac{\lambda}{T_e} \exp \left(\frac{E_i - \Delta E_i}{k_B T_e} \right) \exp \left(\frac{-E_2}{k_B T_{exc}} \right)}{\left[\xi \left(1 - \exp \frac{-hc}{\lambda k_B T_e} \right) + G \exp \frac{-hc}{\lambda k_B T_e} \right]} \quad (2.27)$$

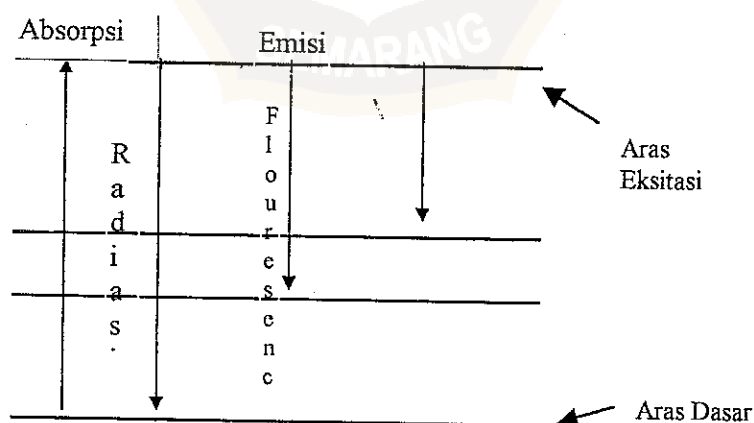
Dengan mengukur I_i dan ϵ_c dapat ditentukan T_e melalui persamaan (2.27), jika seluruh parameter yang diperlukan diketahui.

2.7. Metode Spektroskopi.

Spektroskopi adalah suatu cara (metode) untuk menyelidiki, mengamati dan menganalisa sesuatu dengan memanfaatkan spektrum dari benda yang diselidiki apabila diberikan suatu energi foton dengan intensitas dan frekuensi tertentu.

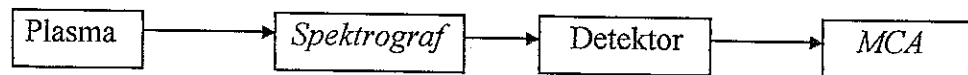
Pada spektroskopi emisi spektrum benda yang dipancarkan berasal dari lucutan dalam sumber cahaya pada state eksitasi, sedangkan dalam spektroskopi absorpsi, spektrum yang digunakan merupakan spektrum serapan dari sumber radiasi lain (Svanberg, 1992).

Proses emisi dan absorpsi radiasi benda ditunjukkan oleh gambar 2.4. Kedua proses itu terjadi diantara aras dasar dan aras eksitasi atom-atom penyusun benda tersebut.



Gambar 2.4 Terminologi proses radiasi (Svanberg, 1992).

Teknik spektroskopi yang sering digunakan dalam menganalisa plasma saat ini adalah teknik spektroskopi emisi. Radiasi yang dipancarkan oleh plasma dilewatkan pada suatu spektrograf diteruskan ke detektor fotodioda, dan data cacahnya ditunjukkan oleh *Multi Channal Analyzer (MCA)* (ilustrasinya ditunjukkan oleh gambar 2.5).



Gambar.2.5. Prinsip spektroskopi emisi yang digunakan dalam menganalisa plasma (Svanberg, 1992).

