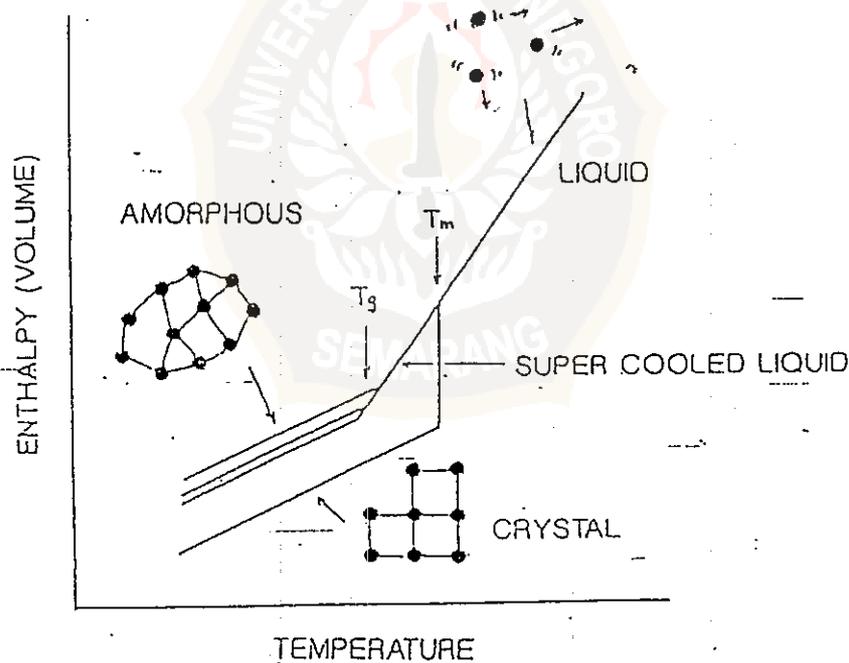


## BAB II

### DASAR TEORI

#### 2.1. Struktur Padatan Amorf

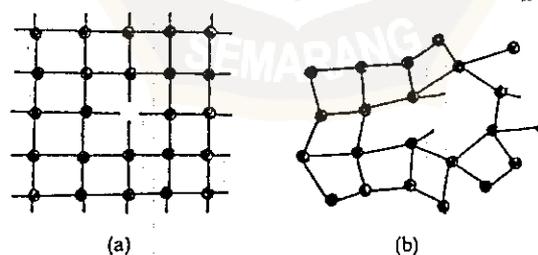
Secara umum, material amorf dibentuk dengan metode pendinginan cepat (*rapid cooling method*) dari keadaan cair. Pada fase cair atom-atom bergerak secara leluasa dan jika didinginkan secara cepat sepanjang garis kesetimbangan termodinamika, maka akan memasuki fase cair super dingin (*super cooled liquid phase*) dan mencapai titik transisi gelas. Pada keadaan tersebut terbentuk amorf seperti ditunjukkan pada gambar (2.1) (Matsuda,1988).



Gambar (2.1) Skema pembentukan amorf (Matsuda,1988).

Proses kristalisasi adalah suatu transisi orde pertama yang ditandai dengan perubahan volume secara tak kontinyu pada titik leleh, dalam hal ini penurunan volume pada proses pembekuan. Sebaliknya pada pembekuan amorf ditandai dengan perubahan volume secara kontinyu sampai mencapai suhu transisi gelas ( $T_g$ ). Bila proses itu diteruskan dengan laju pendinginan yang lebih lambat, maka akan mencapai transisi orde kedua. Akan tetapi dalam praktek kondisi semacam ini tidak pernah ditemukan (Danker, 1985).

Material amorf merupakan padatan yang atom-atomnya tersusun secara acak, dan tidak adanya kisi periodik. Posisi atom-atom tetangga terdekat di dalam padatan amorf identik dengan padatan kristal karena adanya gaya ikatan antar atom, akan tetapi untuk susunan rentang panjang (*long range order*) tidak lagi teratur karena adanya deviasi sudut ikatan. Padatan amorf mempunyai keteraturan susunan rentang pendek (*short range order*) paling tidak sampai jarak dua atom tetangga terdekat. Untuk lebih jelas ditunjukkan gambar (2.2) (Anas, 1995).



Gambar (2.2) a. Struktur padatan kristal  
b. Struktur padatan amorf  
(Hummel, 1993)

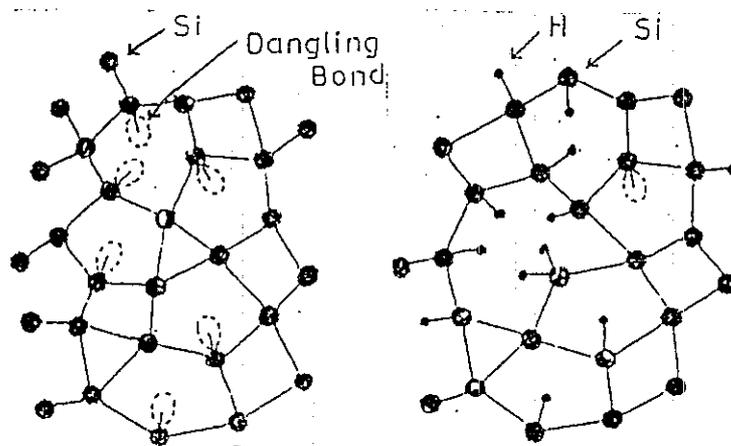
## 2.2. Silikon Amorf dan Silikon Amorf Terhidrogenasi

Silikon amorf (a-Si) dapat dibuat dengan teknik evaporasi dari fasa uap pada substrat. Silikon amorf yang terbentuk ini membentuk ikatan kovalen. Beberapa hal yang membedakan silikon kristal dan silikon amorf adalah sebagai berikut:

| No | Silikon kristal   | Silikon amorf (Anas,1995)   |
|----|---|---|
| 1. | Adanya batas butiran pada struktur kristalnya (Matsuda, 1988).                                      | Banyak mengandung kekosongan makroskopis seperti adanya pori-pori dan tidak adanya batas butiran.                 |
| 2. | Banyaknya kekosongan (cacat kristal) tergantung pada eksitasi termal (Beiser, 1992)                 | Banyaknya tangan-tangan kosong dalam ikatan tetrahedral.  |
| 3. | Struktur atom dalam keadaan stabil, mempunyai keteraturan susunan atom rentang panjang (Anas,1995). | Struktur atom dalam keadaan metastabil, terutama untuk sudut dihedral terdapat distribusi sudut ikatan yang lebar |
| 4. | Bentuk tertentu   | Dapat dibentuk sesuai kebutuhan   |

Silikon dalam tabel periodik terletak dalam grup IV A, mempunyai struktur *diamond cubic*. Struktur silikon amorf ditunjukkan pada gambar (2.3).

Dengan memasukkan sejumlah hidrogen ke dalam silikon amorf, maka akan terbentuk silikon amorf terhidrogenasi (gambar (2.3.b)). Antara Si dan H akan membentuk ikatan kovalen. Setiap atom Si berkoordinat tetrahedral yaitu 4 atom Si, 3 atom Si dengan satu atom H, dua atom Si dengan dua atom H. Kandungan hidrogen dalam a-Si:H akan mengurangi ikatan-ikatan kosong dan mengurangi pita energi terlarang, sehingga meningkatkan sifat konduksi listriknya.



Gambar (2.3) a. Struktur a-Si  
b. Struktur a-Si:H  
(Matsuda, 1988)

## 2.3. Sifat-Sifat Listrik

### 2.3.1. Konduktivitas listrik

Konduktivitas listrik merupakan besaran yang penting dalam pembahasan semikonduktor. Konduktivitas listrik semikonduktor amorf ( $\sigma_A$ ) tergantung pada rapat pembawa muatan ( $N_A$ ) dan mobilitas pembawa muatan ( $\mu_A$ ), yang dirumuskan sebagai berikut (Hummel, 1993):

$$\sigma_A = N_A e \mu_A \quad (2.1)$$

Rapat pembawa muatan dalam semikonduktor amorf sangat kecil, karena seluruh

elektron mengikat sangat kuat pada intinya masing-masing. Mobilitas pembawa muatan juga kecil, karena tidak adanya kisi periodik. Sehingga konduktivitas semikonduktor amorf pada suhu kamar secara umum sangat rendah, yaitu sekitar  $10^{-7} (\Omega\text{cm})^{-1}$  (Hummel,1993).

Silikon amorf dapat menjadi silikon amorf terhidrogenasi dengan proses hidrogenisasi. Hidrogenisasi dilakukan dengan menggunakan reaktor plasma yang dilengkapi dengan pembangkit medan listrik yang ditimbulkan oleh daya RF pada frekuensi 13,56 Mhz. Dalam proses ini, elektron dan molekul-molekul hidrogen didalam reaktor plasma akan saling bertumbukan secara lenting dan tak lenting di bawah pengaruh medan listrik. Tumbukan tak lenting dapat menimbulkan peristiwa ionisasi dan disosiasi, sehingga atom-atom hidrogen akan menuju ke permukaan lapisan a-Si. Dengan turunnya atom-atom hidrogen ke permukaan a-Si maka terjadi reaksi radikal di permukaan a-Si tersebut. Reaksi radikal itu tergantung pada beberapa faktor yang mempengaruhi lapisan tipis a-Si:H yang terbentuk, yaitu daya RF dan suhu substrat.

A-Si:H yang terbentuk dapat mempunyai sifat yang mirip dengan silikon kristal. Dengan cara ini maka dapat dihasilkan bahan semikonduktor yang mempunyai konduktivitas antara  $10^{-11}$  sampai  $10^{-2} (\Omega\text{cm})^{-1}$  (Hummel, 1993).

### 2.3.2. Resistivitas

Menurut hukum Ohm, arus listrik I sebanding dengan tegangan yang diberikan

dan berbanding terbalik dengan R, yaitu:

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.2)$$

Persamaan tersebut disebut makro karena nilai I, V, dan R tergantung pada bentuk geometri konduktor. Sedangkan secara mikro, Ohm merumuskan (Smith, 1990):

$$J = \frac{E}{\rho} \quad (2.3)$$

dengan:

J = rapat arus ( $A/m^2$ )

$\rho$  = resistivitas ( $\Omega m$ )

E = kuat medan listrik ( $V/m$ )

Tinjau sebuah penghantar silinder yang luas penampangnya A dan panjangnya l, mengangkut sebuah arus i yang tetap. Sebuah perbedaan potensial V diterapkan pada kedua ujung-ujung penghantar tersebut. Maka medan listrik E mempunyai nilai :

$$E = \frac{V}{L} \quad (2.4)$$

dengan :

V = tegangan antara kedua ujung material (V)

L = panjang penghantar (m)

Menurut hukum Ohm arus listrik didefinisikan sebagai (Hummel, 1993) :

$$I = J A \quad (2.5)$$

$$I = \frac{V}{L\rho} A \quad (2.6)$$

Substitusi persamaan (2.2) ke persamaan (2.6) maka :

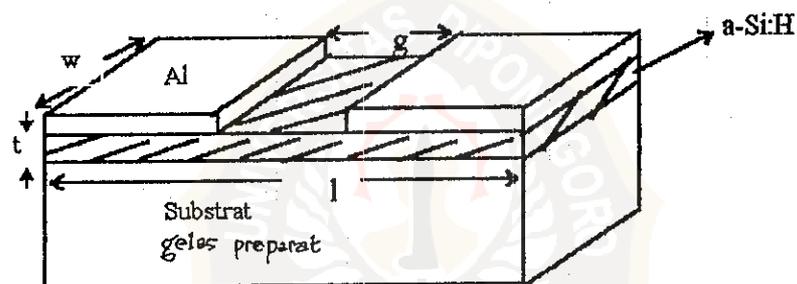
$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (2.7)$$

dengan :

A = luas penampang ( $m^2$ )

R = hambatan listrik ( $\Omega$ )

Hukum Ohm ini dapat diterapkan untuk menentukan resistivitas lapisan tipis, maka harus diperhatikan tebal lapisan, lebar, serta jarak antara kedua elektroda yang menempel pada lapisan tipis tersebut, seperti ditunjukkan gambar (2.4).



Gambar (2.4) Lapisan tipis a-Si:H dengan elektroda Al

Sehingga persamaan (2.7) menjadi:

$$\rho = R \frac{wt}{g} \quad (2.8)$$

dengan:

g = jarak antara kedua elektroda (cm)

w = lebar lapisan tipis (cm)

t = tebal lapisan tipis (cm)

Tebal lapisan tipis dapat ditentukan dengan metode gravimetrik, yang merupakan metode paling dasar dalam penentuan ketebalan lapisan tipis (Stuart, 1983). Silikon dilapiskan pada substrat yang telah ditimbang sebelumnya, kemudian substrat yang telah terlapis ditimbang kembali. Selisih beratnya merupakan berat lapisan tipis. Perkalian antara rapat massa dengan volume adalah massa lapisan tipis, yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$m = v \rho \quad (2.9)$$

$$m = l w t \rho \quad (2.10)$$

$$t = \frac{m}{l w \rho} \quad (2.11)$$

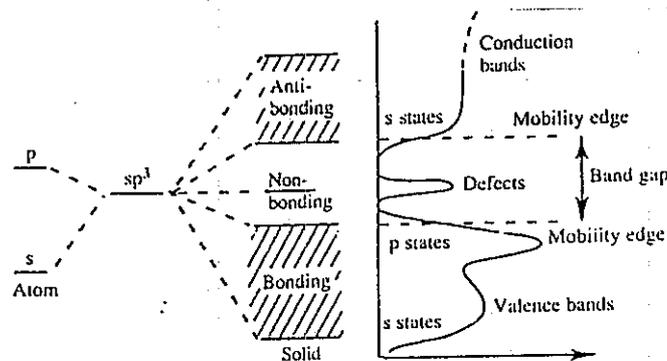
dengan :

- $l$  = panjang lapisan tipis (cm)
- $w$  = lebar lapisan tipis (cm)
- $m$  = massa silikon yang terdeposisi (gr)
- $\rho$  = massa jenis silikon ( $2,33 \text{ gr/cm}^3$ )
- $t$  = tebal lapisan tipis (cm)

#### 2.4. Model Pita Energi pada Semikonduktor Amorf

Salah satu sifat dasar semikonduktor atau isolator adalah adanya celah pita terlarang yang memisahkan pita valensi dan pita konduksi yang kosong. Gambaran orbital molekul pita valensi dan pita konduksi a-Si ditunjukkan gambar (2.5). State s dan p bergabung membentuk orbital hibrida sp dari ikatan silikon tetrahedral. Orbital-orbital itu memisah oleh interaksi ikatan untuk membentuk pita valensi dan pita konduksi. Di sebelah skema model orbital molekul adalah distribusi rapat keadaan

silikon amorf yang menggambarkan pita ekor, keadaan cacat dalam celah pita, pita valensi, pita konduksi, dan tepi mobilitas.



Gambar (2.5) Skema orbital molekul a-Si dan distribusi rapat keadaan silikon amorf (Street,1991)

Daerah antara  $E_c$  dan  $E_v$  adalah celah mobilitas. Celah mobilitas dalam semikonduktor amorf analog dengan celah terlarang dalam semikonduktor kristal (Danker,1985). Celah mobilitas dapat didefinisikan sebagai daerah yang keberadaan elektronnya adalah nol. State yang berada di bawah  $E_c$  adalah tepi pita konduksi dan di atas  $E_v$  adalah tepi pita valensi.

## 2.5. Sumber Evaporasi (Evaporator)

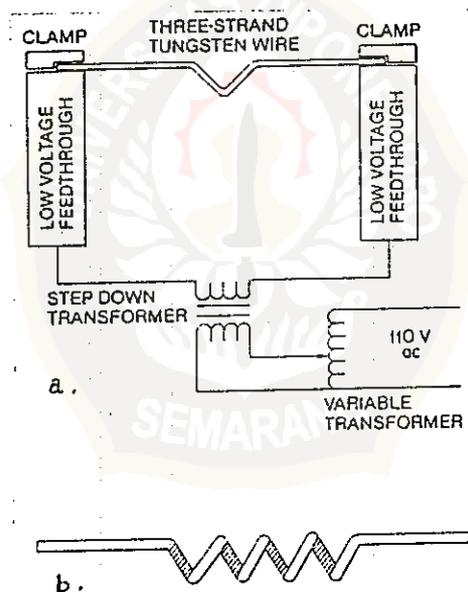
Sumber-sumber evaporasi yang digunakan dalam pembuatan lapisan tipis dengan menggunakan metode evaporasi, antara lain sebagai berikut :

### 2.5.1. Sumber evaporasi (evaporator) filamen.

Sumber evaporasi filamen bentuknya bermacam-macam. Yang pertama, kawat tungsten yang terdiri dari tiga jalinan dengan tiap helai kawat mempunyai diameter

0,05 cm - 0,1 cm, dan panjangnya 10 cm. Kawat tersebut berbentuk V dengan lebar tengahnya 1 cm. Material yang akan dievaporasi diletakkan pada titik V, kemudian dipanaskan oleh arus yang dialirkan pada kawat tersebut. Bentuk yang pertama ini dapat dilihat pada gambar (2.6.a).

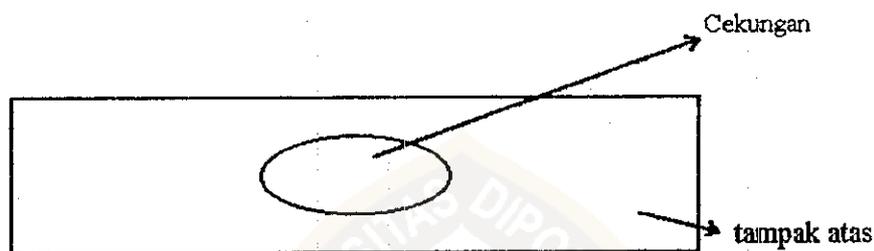
Pada bentuk yang kedua, terdiri dari 3 helai kawat, dan 15 loop, tetapi pada gambar (2.6.b) hanya digambarkan 4 loop. Bentuk ini lebih baik, karena bentuk koil lebih kuat daripada bentuk V. Panjang kawat adalah 10 cm dan diameter lingkaran koil 1 cm. Sumber ini dioperasikan pada beberapa titik dengan metode *trial and error*, untuk mendapatkan bagian dengan posisi yang dapat menghasilkan lapisan yang seragam.



Gambar (2.6) a. Sumber filamen  
b. Sumber loop ganda.  
(Stuart, 1983)

### 2.5.2. Sumber evaporasi ( evaporator) lembaran

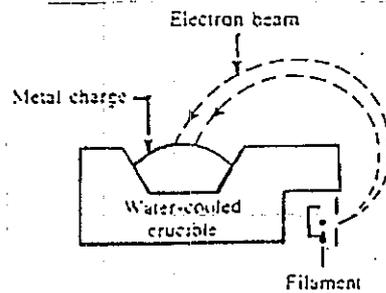
Salah satu bentuk sumber evaporasi lembaran terlihat pada gambar (2.7). Cekungan mempunyai kedalaman 0,3 cm , diameternya 1-2 cm, dan panjangnya 10 cm. Sumber ini terbuat dari molybdenum, tantalum atau tungsten. Bentuk ini mempunyai keuntungan, yaitu dapat memegang lebih banyak bahan daripada sumber evaporasi kawat, sehingga dapat dihasilkan lapisan tipis yang lebih tebal. Sumber ini membutuhkan daya yang lebih besar daripada sumber kawat.



Gambar (2.7) Sumber evaporasi lembaran (Stuart,1983)

### 2.5.3. Sumber evaporasi pancaran elektron.

Pada sistem evaporasi pancaran elektron, filamen bersuhu tinggi ditempatkan bersama pengarah elektron. Pada sistem ini dibutuhkan tenaga yang tinggi (5000 V - 10.000 V), untuk mempercepat elektron dari filamen ke material. Tenaga dari elektron ini melelehkan material tadi sehingga terevaporasi pada substrat. Sistem ini dapat dilihat pada gambar (2.8).

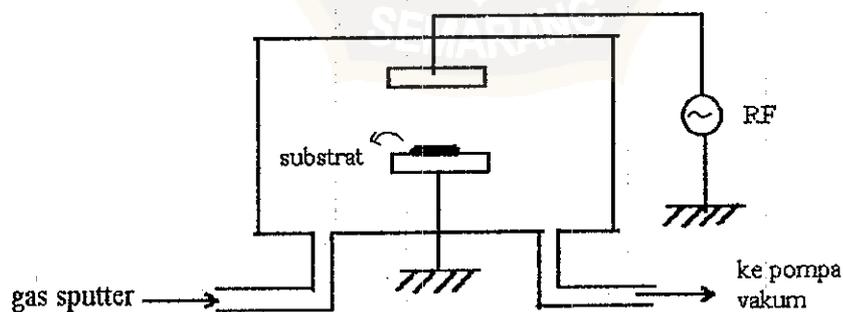


Gambar (2.8) Sumber evaporasi pancaran elektron (Anas, 1995)

## 2.6. Teknik Deposisi Lapisan Tipis

### 2.6.1. Sputtering

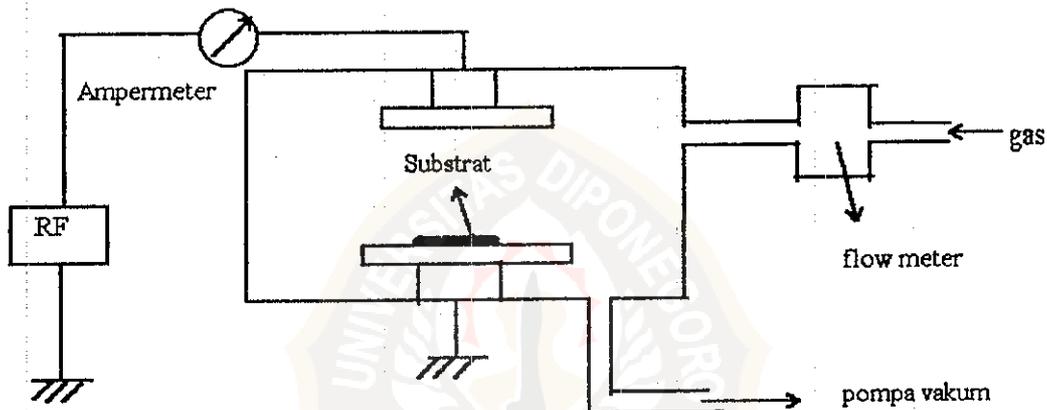
Pada metode sputtering, plasma lucutan pijar diproduksi antara elektroda target Si dan elektroda substrat dengan menggunakan medan listrik tinggi. Ion-ion gas dipercepat oleh medan listrik menuju target (Si). Atom-atom Si setelah disputter mencapai permukaan substrat dan membentuk lapisan tipis amorf di atasnya. Sistem sputtering (gambar (2.9)) terdiri dari reaktor plasma dengan pompa vakum yang dapat menentukan tekanan rendah, suplai gas sputter dan catu daya.



Gambar (2.9) Sistem sputtering (Danker, 1985)

### 2.6.2. Sistem deposisi "RF glow discharge"

Gambar (2.10) menunjukkan skema sistem "RF glow discharge". Suatu ruang yang dihampakan hingga mencapai suatu tekanan rendah tertentu. Gas dialirkan ke dalam ruang tersebut melalui suatu katup pengontrol aliran dengan kecepatan alir tertentu. Sepasang elektroda simetris berjarak orde cm dalam ruang tersebut dieksitasikan oleh RF sampai terjadi lucutan. Material dideposisikan pada substrat yang dipanaskan sebagai hasil dari dekomposisi gas.



Gambar (2.10) Skema Sistem "RF glow discharge" (Anas, 1995)

## 2.7. Tinjauan Umum Plasma

### 2.7.1. Definisi Plasma

Plasma merupakan fase materi keempat setelah padat, cair dan gas. Plasma didefinisikan sebagai gas terionisasi dalam keadaan kuasinetral dari partikel bermuatan dan partikel netral yang menunjukkan fenomena kolektif.

"A plasma is a quasineutral gas of charged and neutral particles which exhibits collective behavior." (Francis, 1977)

Tidak semua gas terionisasi dapat dikatakan plasma, sebab plasma mempunyai syarat-syarat tertentu, seperti misalnya panjang Debye harus jauh lebih kecil dibanding panjang sistem reaktor. Sebagai contoh, plasma yang dihasilkan dari sistem lucutan pijar mempunyai kerapatan ( $n$ ) antara  $10^8 \text{ cm}^{-3}$  dan  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , panjang Debye ( $\lambda_D$ ) lebih dari  $10^{-3} \text{ cm}$  dan energi elektronik ( $kT_e$ ) kira-kira 1 eV. Hubungan antara panjang Debye, kerapatan dan suhu plasma dapat dirumuskan sebagai berikut: (Francis, 1977)

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e e^2}} \quad (2.12)$$

dengan :

- $\lambda_D$  = panjang Debye (cm)
- $k$  = konstanta Boltzman ( $8,1 \times 10^{-6} \text{ eV/K}$ )
- $T_e$  = temperatur elektronik (K)
- $n_e$  = kerapatan elektronik (partikel/ $\text{cm}^{-3}$ )
- $e$  = muatan elektronik ( $4,8 \times 10^{-10} \text{ stc}$ )

Keadaan kuasinetral adalah keadaan gas terionisasi dimana rapat ion hampir sama dengan rapat elektron, sehingga dapat dikatakan  $n_i \approx n_e \approx n$ , dimana  $n$  menyatakan kepadatan secara umum yang disebut rapat plasma. Keadaan seperti ini dapat dikatakan netral tetapi tidak terlalu netral (Francis, 1977). Sedangkan yang dimaksud dengan *collective behavior* adalah suatu kondisi yang sangat kompleks dimana proses-proses atomis seperti ionisasi, eksitasi dan rekombinasi terjadi dalam waktu yang

hampir bersamaan. Selain itu proses terbentuknya plasma juga menunjukkan adanya partikel-partikel gas yang bermuatan sehingga gerakannya cukup kompleks akibat adanya interaksi antara partikel yang saling berdekatan maupun dengan partikel yang berjauhan.

### 2.7.2. Plasma molekular

Molekul-molekul gas mempunyai struktur internal, sehingga energi total molekul adalah (Konuma, 1991):

$$E = E_{\text{rot}} + E_{\text{vib}} + E_{\text{elect}} \quad (2.13)$$

dengan :

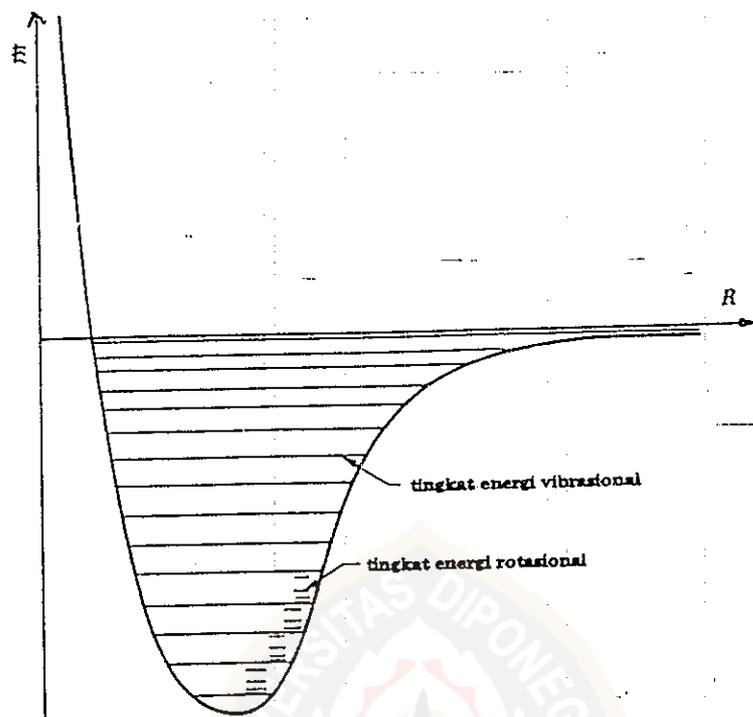
$E_{\text{rot}}$  = keadaan energi rotational

$E_{\text{vib}}$  = keadaan energi vibrasional

$E_{\text{elect}}$  = keadaan energi elektronik

Keadaan energi molekular ditimbulkan oleh rotasi molekul secara keseluruhan dan oleh vibrasi atom pembangun relatif terhadap yang lain dan juga oleh perubahan konfigurasi elektronik. Keadaan rotasional terpisah oleh selang energi yang sangat kecil (biasanya sekitar  $10^{-3}$  eV). Keadaan vibrasional terpisah oleh selang energi yang lebih besar (biasanya sekitar 0,1 eV). Keadaan elektronik molekular memiliki energi lebih tinggi, dengan pisahan antara tingkat energi elektron valensi beberapa eV. Gambar (2.11) adalah diagram energi potensial molekul dwiatom sebagai fungsi dari jarak interatomik, menunjukkan adanya tingkat energi vibrasional dan rotasional. Diagram

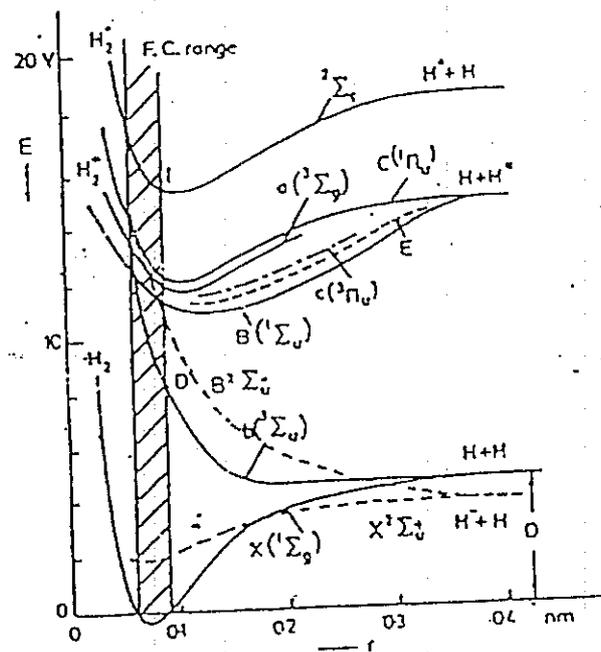
energi potensial molekul  $H_2$  ditunjukkan gambar (2.12), sedangkan energi disosiasi termal dan potensial ionisasi beberapa molekul ditunjukkan tabel (2.1) dan tabel (2.2).



Gambar (2.11) Energi potensial molekul dwiatom sebagai fungsi dari jarak interatomik, menunjukkan adanya tingkat energi vibrasional dan rotasional. (Beiser,1992)

Tabel (2.1) Energi disosiasi termal dan energi disosiasi oleh tumbukan elektron untuk beberapa molekul diatomik (Konuma,1991)

| Molecule | Thermal dissociation energy [eV] | Dissociation energy by electron impact [eV] |
|----------|----------------------------------|---|
| $H_2$    | 4.476                            | 8.8   |
| $N_2$    | 9.760                            | 24.3  |
| $O_2$    | 5.080                            | 7   |
| $Cl_2$   | 2.475                            | 3.7   |
| NO       | 6.48                             | >10   |



Gambar (2.12) Diagram energi potensial molekul  $H_2$ .  $D'$  : energi disosiasi oleh tumbukan elektron,  $D$ : energi disosiasi termal,  $I$ : energi ionisasi (Konuma, 1991)

Tabel (2.2) Potensial ionisasi untuk beberapa molekul (Konuma, 1991)

| Molecule | First ionization potential (eV) |
|----------|---------------------------------|
| $H_2$    | 15.427                          |
| $N_2$    | 15.576                          |
| $O_2$    | 12.063                          |
| $F_2$    | 15.7                            |
| $Cl_2$   | 11.48                           |
| $CO$     | 14.013                          |
| $NO$     | 9.250                           |
| $H_2O$   | 12.614                          |
| $CO_2$   | 13.769                          |
| $NO_2$   | 9.78                            |
| $N_2O$   | 12.94                           |
| $NH_3$   | 10.19                           |
| $CH_4$   | 12.704                          |
| $C_2H_2$ | 11.396                          |
| $C_2H_4$ | 10.45                           |
| $C_2H_6$ | 11.521                          |

### 2.7.3. Pembentukan plasma dengan medan radio frekuensi

Plasma adalah gas yang terionisasi. Untuk mengionisasi gas dapat dilakukan dengan memasukkan energi ke dalam sistem reaktor plasma. Salah satu sumber energi yang sering dipakai adalah osilator radio frekuensi (RF), yaitu rangkaian osilator yang berfungsi untuk memasok daya serta memberikan getaran listrik pada frekuensi radio (0,3 Mhz - 300 Mhz).

Terjadinya proses ionisasi gas dengan menggunakan osilator radio frekuensi dapat berlangsung dengan dua cara:

- a. Proses ionisasi karena penyerapan energi elektromagnetik yang menyebabkan transisi tingkat energi atom.
- b. Proses ionisasi yang terjadi karena adanya tumbukan antar partikel.

Pada proses yang pertama terjadi penyerapan energi gelombang elektromagnetik (foton) yang terpancar dari osilator radio frekuensi (RF). Hal ini mengakibatkan partikel gas tereksitasi dan terjadi transisi tingkat-tingkat energi atom.

Jika frekuensi foton yang datang melebihi frekuensi ambang partikel untuk ionisasi, maka elektron dapat terlepas dari atom dan terbentuklah ion dari gas tersebut. Proses ini disajikan dalam persamaan (Beiser,1991):

$$h\nu = K_{\max} + h\nu_0 \quad (2.13)$$

dengan :

- $h$  = konstanta Planck ( $6,625 \times 10^{-34}$  Js)
- $\nu_0$  = frekuensi ambang ionisasi
- $\nu$  = frekuensi foton yang datang

$K_{\max}$  = energi kinetik fotoelektron maksimum

Proses kedua dari ionisasi adalah peristiwa-peristiwa tumbukan antar partikel di dalam tabung reaktor. Pada saat antara anoda dan katoda di dalam tabung reaktor bertekanan rendah diberi beda potensial yang besar dari sumber tegangan osilator radio frekuensi (RF), maka elektron-elektron di katoda akan terlepas dan dipercepat menuju anoda. Dalam perjalanannya, partikel-partikel ini mengalami tumbukan dengan partikel gas yang banyak tersebar di antara anoda dan katoda. Peristiwa ini mengakibatkan transfer seluruh atau sebagian dari energi partikel penumbuk ke partikel gas, sehingga partikel-partikel tereksitasi. Jika energi transfer ini melebihi energi ambang ionisasi, maka partikel gas dapat mengalami ionisasi. Proses ini senantiasa disertai dengan lucutan (*discharge*) dan pijar (*glow*), sehingga plasma yang dihasilkan disebut sebagai plasma lucutan pijar (*glow discharge plasma*).

