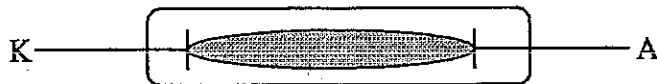


## BAB II

### DASAR TEORI

#### 2. 1. Proses Pelucutan dalam Gas (Raizer, 1991)

Untuk memudahkan pengertian pelucutan elektrik dalam gas diambil kasus pada suatu tabung lucutan gas dengan elektroda berupa dua plat yang dihubungkan pada sumber tegangan dc seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.1.



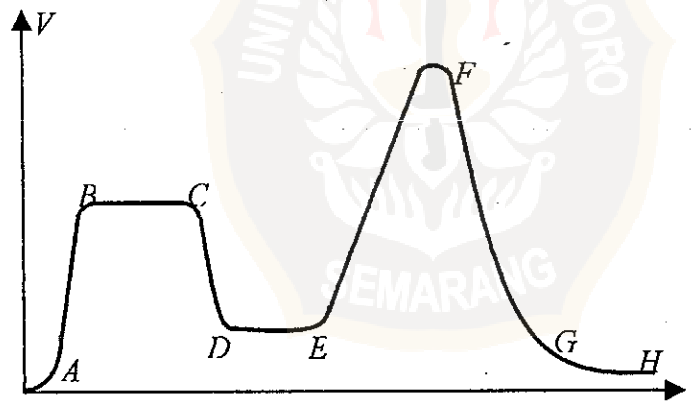
Gambar 2.1. Tabung lucutan gas

Tegangan rendah yang dikenakan pada elektroda tidak memberikan pengaruh terhadap partikel-partikel gas dalam tabung dan arus yang terjadi berkisar pada orde  $10^{-15}$  A. Ionisasi primer terjadi disebabkan oleh sinar kosmik atau radioaktif alam. Medan listrik akan mempercepat ion-ion gas dan elektron-elektron ke elektroda terkait. Sebuah lucutan dan arus listrik berlangsung terus menerus terjadi akibat pengaruh ionisasi eksternal, pada kondisi ini disebut *non-self-sustaining* (ionisasi-tak-mandiri). Bila tegangan dinaikkan arus juga naik karena muatan yang dihasilkan dari ionisasi didorong ke elektroda sebelum terjadi rekombinasi.

Jika tegangan terus dinaikkan maka pada suatu nilai tegangan ( $V$ ) tertentu arus akan naik secara tajam dan emisi cahaya akan terlihat, ini dinamakan keadaan dadal (*breakdown*). Keadaan dadal diawali oleh sejumlah kecil elektron yang diinjeksi untuk menstimulasi suatu proses sehingga lucutan dengan cepat dapat

menjadi proses mandiri (*self-sustaining*). Energi kinetik elektron akan naik terus menerus karena berada di dalam medan listrik. Elektron yang mempunyai energi yang cukup untuk mengionisasi gas, maka akan terjadi ionisasi akibat tumbukan dengan molekul/atom gas dan menghasilkan elektron yang lain. Proses yang sama akan terjadi pada elektron yang dihasilkan dan terjadilah proses ionisasi berantai (*avalanche electronic*).

Lucutan pijar (*glow discharge*) merupakan lucutan yang penting dan sering digunakan pada aplikasi-aplikasi plasma. Gas terionisasi hampir tersebar merata dalam tabung kecuali daerah sekitar elektroda. Secara kelistrikan gas terionisasi tersebut bermuatan netral, hal inilah yang dinamakan plasma. Klasifikasi pelucutan gas dalam tabung ditunjukkan oleh karakteristik tegangan-arus pada gambar 2.2.



**Gambar 2.2.** Karakteristik V-i lucutan gas dalam tabung dengan elektroda dua plat (Raizer, 1991)

Gambar 2.2 dapat dijelaskan sebagai berikut. Tegangan mula-mula dinaikkan dari rendah sampai tinggi. Jika terdapat elektron pertama (akibat ionisasi gas oleh radiasi kosmik, UV) elektron dipercepat dan energinya cukup untuk mengionisasi

gas. Elektron-elektron bergerak menuju anoda dan arus terukur sangat lemah. Daerah ini disebut daerah lucutan tak mandiri (*region of non-self-sustaining discharge*), daerah A.

Jika tegangan terus dinaikkan sehingga elektron-elektron yang terjadi akibat ionisasi (eksternal) mendapat energi yang cukup besar dan mampu mengionisasi gas yang lain selama tumbukan maka terjadilah proses ionisasi berantai. Keadaan ini dinamakan keadaan dadal (*breakdown*), arus naik walaupun tegangan tidak dinaikkan. Daerah keadaan dadal adalah daerah lucutan mandiri (*region of self-sustaining discharge*) dan biasa disebut daerah lucutan gelap Townsend (*the Townsend dark discharge*), daerah BC. Kemudian arus terus naik dengan sendirinya sedangkan tegangan sebaliknya turun, keadaan ini dinamakan lucutan pijar subnormal (*sub-normal glow discharge*), daerah CD.

Pada suatu nilai tegangan tertentu, tegangan akan tetap tetapi arus akan naik terus sampai pada nilai tertentu. Keadaan ini disebut lucutan pijar normal (*normal glow discharge*), daerah DE. Kemudian arus tidak naik lagi dan terjadi kestabilan. Jika tegangan terus dinaikkan, arus akan naik sebanding dengan kenaikan tegangan, keadaan ini disebut lucutan abnormal (*abnormal discharge*), daerah EF. Selanjutnya pada tegangan tertentu timbul ketidakstabilan, tegangan turun dengan cepat sedang arus naik secara tajam dan diikuti dengan nyala yang terang, keadaan ini dinamakan keadaan transisi lucutan arc, daerah FG. Selanjutnya daerah GH merupakan lucutan arc (*arc discharge*). Lucutan arc arus yang terjadi sangat tinggi sedang tegangan sangat rendah.

## 2. 2. Ionisasi

Ion adalah atom yang memiliki jumlah elektron yang tidak sama dengan jumlah protonnya, sehingga atom tersebut memiliki muatan listrik. Plasma dapat terbentuk karena adanya ionisasi partikel-partikel gas. Ionisasi didefinisikan sebagai proses terlepasnya elektron suatu atom atau molekul dari ikatannya. Energi yang dibutuhkan untuk melepaskan satu atau lebih elektron dari orbitnya pada sebuah atom atau molekul dapat didefinisikan sebagai energi ionisasi  $E_i$ . Besarnya energi ionisasi dinyatakan dalam satuan elektron-volt (eV).

Dalam keadaan stabil ionisasi dapat terjadi apabila energi elektron yang menumbuk lebih besar atau sama dengan energi ionisasi atom atau molekul tertumbuk, dapat ditulis dalam persamaan (Valyi, 1977),

$$\frac{1}{2} m_e v_e^2 \geq eV^i \quad (2.1)$$

dengan  $m_e$  adalah massa elektron

$v_e$  adalah kecepatan elektron

$e$  adalah muatan elektron

$V^i$  adalah potensial ionisasi atom atau molekul.

Pada proses tumbukan antara elektron dengan partikel-partikel gas tidak hanya proses ionisasi yang terjadi melainkan juga menyebabkan peristiwa-peristiwa yang lain. Sebagai contoh diambil proses tumbukan antara elektron dengan molekul  $N_2$  serta proses yang mengikutinya.

Tabel 2.1. Peristiwa tumbukan elektron dengan partikel gas (Valyi,1977)

$e + N_2$	$\longrightarrow$	$N + N$	dissosiasi
$e + N_2$	$\longrightarrow$	$N_2^* + e$	eksitasi molekul
$e + N$	$\longrightarrow$	$N^* + e$	eksitasi atom
$e + N_2$	$\longrightarrow$	$N_2^+ + 2e$	ionisasi molekul
$e + N$	$\longrightarrow$	$N^+ + 2e$	ionisasi atom
$e + N_2^+$	$\longrightarrow$	$N_2$	rekombinasi molekul
$e + N^+$	$\longrightarrow$	$N$	rekombinasi atom
$e + N_2$	$\longrightarrow$	$N_2 + e + h\nu$	relaksasi molekul
$e + N$	$\longrightarrow$	$N + e + h\nu$	relaksasi atom

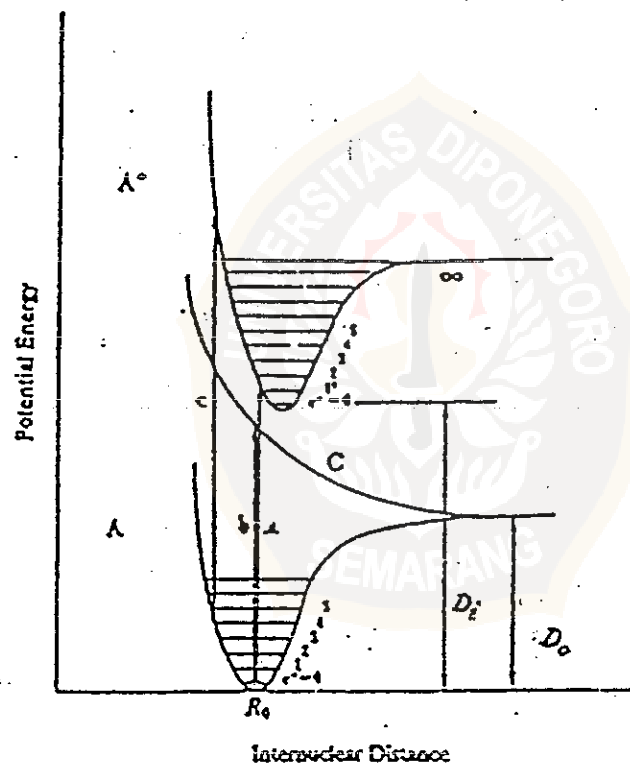
\* keadaan tereksitasi

Ionisasi merupakan proses terlepasnya elektron partikel gas dari ikatannya. Partikel gas yang kehilangan elektron tersebut akan bemuatan positif yang disebut ion positif. Kebalikan dari proses ionisasi adalah rekombinasi. Rekombinasi terjadi dengan cara mengikat elektron sehingga menjadi partikel netral kembali. Besarnya energi ionisasi atom nitrogen 14,534 eV sedangkan untuk molekul  $N_2$  sebesar 15,675 eV (Chapman, 1980).

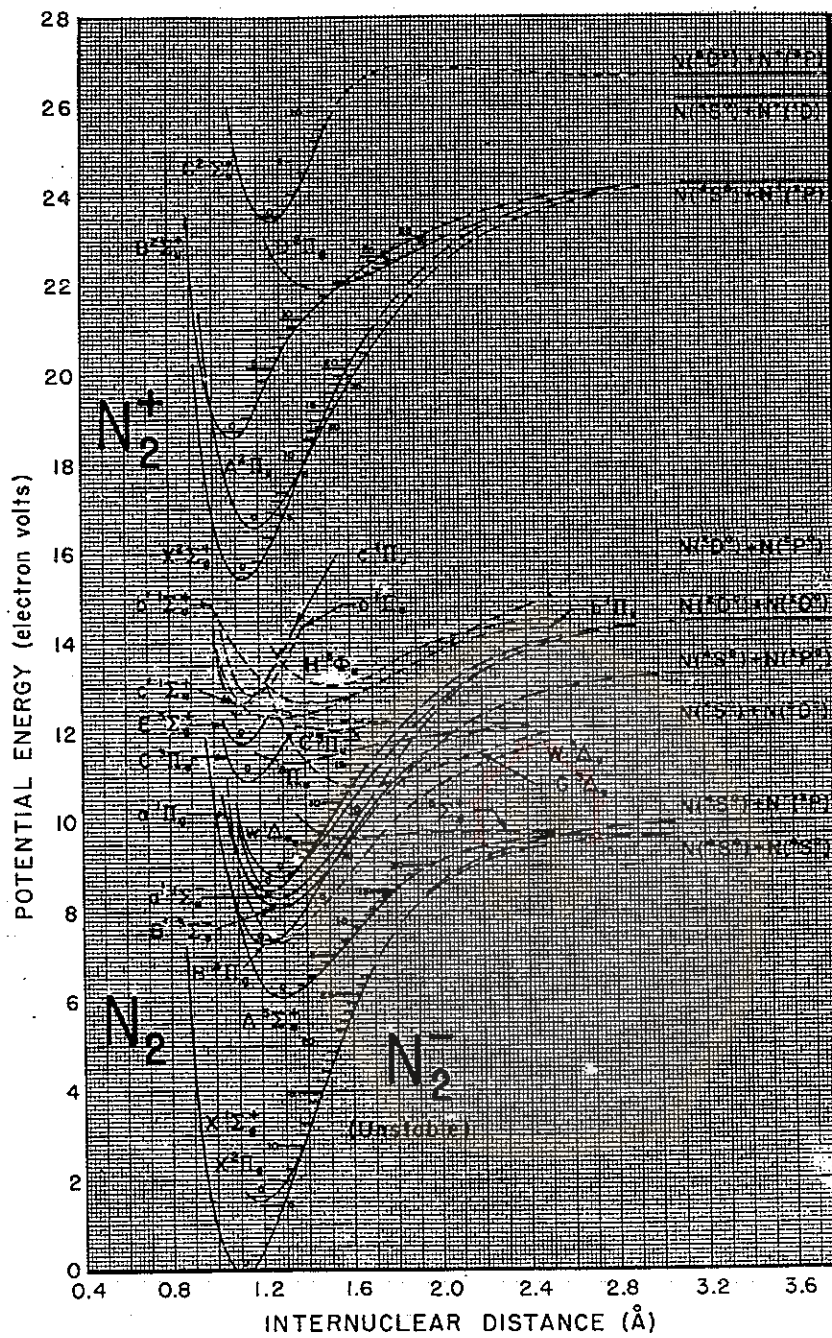
Dissosiasi adalah pemisahan molekul-molekul menjadi atom-atom penyusunnya (Marr,1967). Partikel gas yang terdissosiasi ini dapat pula terionisasi menjadi ion-ion positif dan negatif.

Eksitasi adalah peristiwa dimana elektron yang berada di tingkat energi yang lebih rendah berpindah ke tingkat energi yang lebih tinggi dengan menyerap energi tumbukannya dengan elektron. Peristiwa kebalikan dari eksitasi disebut relaksasi atau

deeksitasi dan peristiwa ini disertai pemancaran foton. Untuk menggambarkan besar energi potensial dari sebagian proses tersebut di atas ditunjukkan dengan diagram energi potensial pada gambar 2.3. Gambar 2.4 menunjukkan diagram energi potensial molekul  $N_2$  dan ion  $N_2^+$ .



**Gambar 2.3.** Eksitasi, ionisasi dan disosiasi dari molekul ( $D_i$  = energi ionisasi,  
 $D_0$  = energi disosiasi termal) (Konuma, 1992)



Gambar 2.4. Kurva energi potensial dari  $N_2$  dan  $N_2^+$  (Lofthus and Krupenie, 1977)

## 2.3. Korona

### 2.3.1. Lucutan pijar korona

Korona merupakan salah satu teknik yang cukup penting diperhitungkan kemanfaatannya (Sigmond, 1978). Pelucutan korona ditandai dengan fenomena-fenomena kelistrikan secara bersama yang terjadi dalam medium gas di bawah pengaruh medan-medan listrik yang tidak homogen akibat dari konfigurasi geometri elektroda (titik-bidang, kawat-bidang, pisau-silinder, dan lain-lain). Dan kuat medan listrik tersebut cukup tinggi sehingga mampu mengionisasi partikel-partikel gas.

Pada tahun 1978 Goldman mengusulkan definisi lucutan korona sebagai berikut :

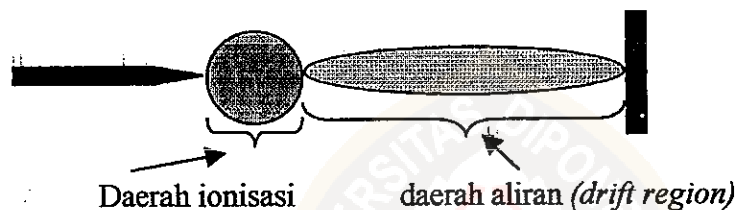
Suatu lucutan korona dalam gas adalah lucutan elektrik mandiri (*self-sustained*), dimana medan listrik (Laplacian) ditentukan oleh konfigurasi dari geometri elektroda, sehingga salah satu dari elektroda terdapat suatu daerah yang mempunyai intensitas medan listrik sangat kuat (elektroda aktif) dan mampu menimbulkan proses ionisasi primer (Goldman and Goldman, 1978).

Lucutan korona bisa terjadi dalam medan listrik tak seragam yang intensitas medannya cukup besar tetapi belum mengakibatkan terjadinya keadaan lucutan arc (*arc discharge*) pada gas. Pijaran korona bisa terjadi pada ujung elektroda aktif. Lucutan pijar korona dapat terjadi diawali oleh lucutan Townsend kemudian diikuti oleh lucutan pijar (*glow discharge*) atau korona (*corona discharge*) dan berakhir dengan lucutan arc (Raizer, 1991).



Dalam konfigurasi elektroda titik-bidang (*point-to-plane*) lucutan pijar korona disebut sebagai korona positif atau negatif tergantung dari polaritas sumber tegangan yang dikenakan pada elektroda titik (*point*) (Sigmond, 1982).

Dalam lucutan pijar korona, distribusi medan laplacian membatasi terjadinya ionisasi pada suatu daerah tertentu saja dan dinamakan daerah ionisasi (*ionization region*). Daerah ionisasi ini berada di sekitar elektroda aktif. Daerah yang lain selain daerah ionisasi adalah daerah aliran ion-ion dan elektron atau daerah aliran muatan (*drift region*). Hal itu ditunjukkan dalam gambar 2.5.



**Gambar 2.5.** Ilustrasi daerah ionisasi dan daerah aliran ion-ion dan elektron pada konfigurasi elektroda geometri titik-bidang (*point-to-plane*) (Sigmond, 1982)

### 2. 3. 2. Korona positif

Korona positif adalah lucutan korona yang terjadi jika elektroda titik (*point*) merupakan elektroda positif. Elektron dari elektroda bidang (*plane*) akan mengalir menuju elektroda titik (*point*). Tumbukan antara elektron dengan partikel-partikel gas menghasilkan ion-ion positif dan negatif. Proses ini dinamakan proses ionisasi atom-atom gas. Ion-ion yang terbentuk paling banyak terdapat di daerah sekitar elektroda titik (*point*) yang merupakan daerah ionisasi.

Di dalam daerah ionisasi ini, terdapat kerapatan ion ( $n_i$ ) yang hampir sama dengan kerapatan elektron ( $n_e$ ) sehingga dapat dikatakan  $n_i \approx n_e \approx n$ , dengan  $n$  menyatakan kerapatan secara umum yang disebut kerapatan plasma. Keadaan ini disebut kuasinetral (Francis, 1979).

Ion-ion atau muatan-muatan positif karena pengaruh kuat medan listrik yang tinggi akan menuju ke elektroda bidang (katoda). Muatan-muatan positif tersebut mengalir dengan cepat keluar dari daerah ionisasi menuju katoda melalui daerah yang disebut sebagai daerah aliran muatan (*drift region*). Sedang muatan-muatan negatif akan tertarik ke elektroda titik (anoda) dan untuk elektron akan mengalir dalam rangkaian sistem lucutan.

Menurut Sigmond (1982), ion-ion yang mengalir melalui daerah aliran muatan (*drift region*) akan menghasilkan arus yang dinamakan arus saturasi unipolar korona. Pada konfigurasi elektroda geometri hiperboloid-bidang (pendekatan untuk konfigurasi titik-bidang), arus saturasi unipolar korona diberikan oleh persamaan berikut,

$$\frac{I_s}{V^2} = 2\mu\varepsilon_0/d \quad (2.2)$$

dengan  $I_s$  = arus saturasi unipolar korona

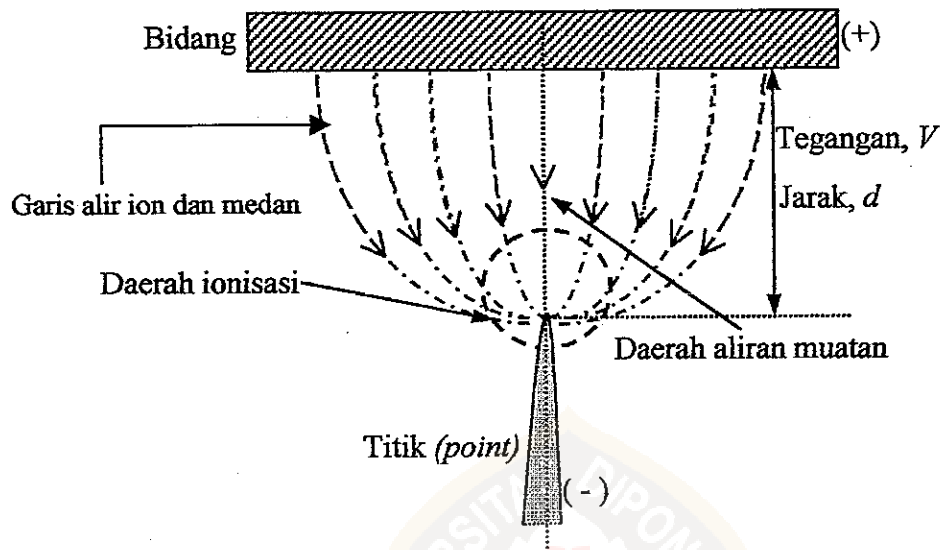
$V$  = tegangan korona

$\mu$  = mobilitas ion unipolar

$\varepsilon_0$  = permitivitas ruang hampa

$d$  = jarak antar elektroda.

Gambar 2.6. menunjukkan daerah dalam lucutan pijar korona antara dua elektroda dengan konfigurasi geometri hyperboloid-bidang yang merupakan pendekatan terhadap geometri titik-bidang.



Gambar 2.6. Ilustrasi daerah antara dua elektroda pada lucutan korona titik-bidang dengan polaritas negatif pada elektroda titik (Sigmond, 1982)

### 2.3.3. Korona negatif

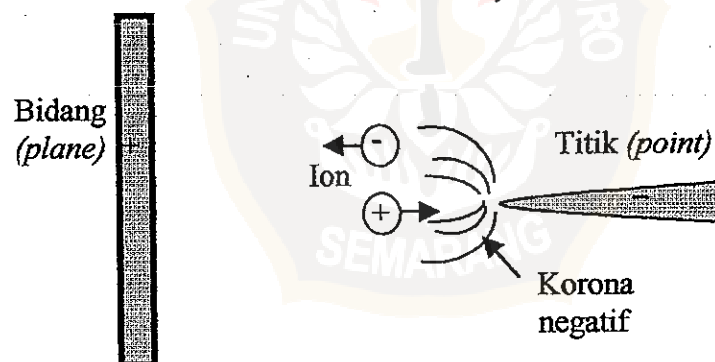
Korona negatif memiliki karakteristik yang berbeda dengan korona positif. Lucutan pijar korona dinamakan korona negatif, bila elektroda titik (*point*) adalah elektroda negatif. Dalam medium udara baik korona positif maupun korona negatif mampu menghasilkan ion negatif. Pada korona negatif, elektron dari elektroda titik (*point*) akan menumbuk partikel-partikel gas dalam udara dan terjadi pelipatan elektron (*avalanche electronic*) melalui proses ionisasi berantai.

Dalam udara terdapat molekul oksigen ( $O_2$ ) yang merupakan molekul elektronegatif sebanyak 20%. Molekul elektronegatif adalah molekul-molekul yang sangat mudah menjadi ion negatif jika bertumbukan dengan elektron melalui reaksi (Nur *et al*, 1997),



Proses ini sering disebut proses tangkapan terhadap elektron (*attachment*).

Daerah aliran muatan (*drift region*) pada korona negatif, muatan yang mengalir melewatinya adalah muatan-muatan negatif. Demikian juga pada korona positif, muatan yang mengalir dalam daerah aliran muatan adalah muatan-muatan positif. Oleh sebab itu jenis muatan yang mengalir dalam daerah aliran muatan (*drift region*) tergantung dari polaritas korona atau type korona (Sigmond, 1978). Gambar 2.7 menunjukkan arah ion negatif dan positif dalam korona negatif.



**Gambar 2.7.** Ilustrasi arah ion negatif dan positif dalam korona negatif (Kraus, 1991)

#### 2. 4. Plasma Lucutan Pijar Korona sebagai Sumber Ion

Partikel-partikel gas yang berada di antara dua elektroda dengan konfigurasi geometri titik-bidang (*point-to-plane*) dan diberi beda tegangan yang tinggi akan terionisasi. Partikel-partikel gas tersebut akan menjadi ion-ion yang bermuatan positif. Ionisasi tersebut terjadi karena elektron-elektron yang terlepas dari katoda dipercepat menuju anoda dan mengalami tumbukan dengan partikel-partikel gas sehingga dihasilkan ion-ion positif (Sigmond, 1978).

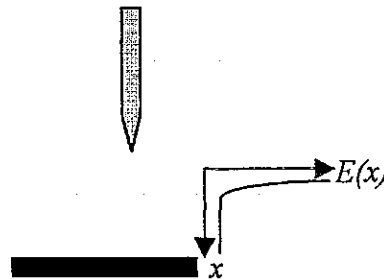
Jika di dalam gas terdapat atom-atom atau molekul-molekul elektronegatif (misalnya  $O_2$ ), molekul tersebut akan menangkap elektron menjadi ion negatif (Scott and Haddad, 1987). Disamping peristiwa ionisasi, dalam celah antar elektroda juga terjadi peristiwa eksitasi, deeksitasi, rekombinasi yang disertai dengan pancaran radiasi oleh plasma, maka plasma yang dihasilkan disebut sebagai plasma lucutan pijar (*the glow discharges plasma*) (Raizer, 1991).

Karena konfigurasi geometri elektroda adalah titik-bidang (*point-to-plane*) maka pelucutan gas yang terjadi disebut pelucutan pijar korona (*the corona glow discharge*), sehingga plasma yang dihasilkan dinamakan plasma lucutan pijar korona (*the corona glow discharges plasma*). Plasma lucutan pijar korona ini dapat dianggap sebagai salah satu sumber ion (Spyrout *et al*, 1994).

#### 2. 5. Medan Listrik pada Elektroda Geometri titik-bidang

Pada konfigurasi geometri titik-bidang (*point-to-plane*) medan elektrostatik tak homogen menimbulkan daerah medan kuat yang terdapat di sekitar ujung

elektroda titik (*point*). Hubungan medan listrik sebagai fungsi jarak ( $x$ ) antar elektroda (titik-bidang) ditunjukkan oleh gambar 2.8 berikut,



**Gambar 2.8.** Distribusi medan dalam celah antar elektroda titik-bidang

(Spyrou *et al*, 1994)

Pada gambar 2.8 ditunjukkan bahwa kuat medan listrik semakin tinggi pada jarak yang paling dekat dengan elektroda titik (jarum). Besar intensitas medan listrik sebagai fungsi jarak ( $x$ ) sepanjang daerah antar elektroda (gambar 2.9) ditunjukkan oleh persamaan berikut (Bamji *et al*, 1993),

$$E(x) = \frac{2V}{\left[ r + 2x - \frac{x^2}{d} \right] \ln \left[ 1 + \frac{4d}{r} \right]} \quad (2.3)$$

dengan  $V$  = tegangan yang dikenakan pada elektroda titik (jarum)

$r$  = jari-jari ujung jarum (elektroda titik)

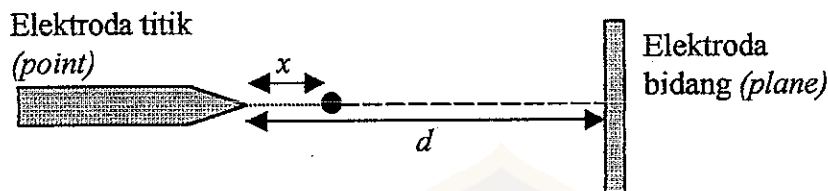
$d$  = jarak antar elektroda

$x$  = jarak ujung jarum ke suatu titik tertentu dalam daerah antar elektroda pada sumbu jarum.

Pada titik ujung jarum  $x = 0$  maka persamaan (2.3) dapat dituliskan (Bamji *et al*, 1993)

$$E_{(x=0)} = \frac{2V}{r \ln\left(1 + \frac{4d}{r}\right)} \quad (2.4)$$

Persamaan (2.4) dapat digunakan sebagai referensi dalam menentukan besar intensitas medan listrik di ujung jarum.



**Gambar 2.9.** Ilustrasi jarak pada titik tertentu terhadap elektroda aktif dan jarak antara dua elektroda (titik-bidang) (Bamji *et al*, 1993)

## 2.6. Konduktor dan Isolator (Reitz *et al*, 1991)

Penghantar atau konduktor adalah zat yang mengandung pembawa muatan bebas dalam jumlah besar. Pembawa muatan ini bebas bergerak di seluruh bahan penghantar. Pembawa muatan dapat memberikan tanggapan terhadap medan listrik dan terus bergerak selama mendapat pengaruh medan listrik.

Isolator (dielektrik) adalah zat yang semua zarah bermuatan di dalamnya terikat kuat pada molekul penyusunnya. Kedudukan zarah bermuatan ini dapat bergeser akibat adanya suatu medan listrik, akan tetapi masih di sekitar molekulnya. Dielektrik ideal adalah bahan yang dalam pengaruh medan listrik luar daya hantarnya

no. Dielektrik yang sebenarnya memiliki daya hantar sangat kecil, tetapi pada dielektrik yang khas daya hantarnya  $10^{20}$  kali lebih kecil daripada daya hantar penghantar yang baik.

## 2.7. Analisis Lintasan Partikel dalam Pengendap Tembakan Ion

Analisis ini bertujuan untuk memahami lintasan partikel dalam pengendap tembakan ion dengan elektroda silinder berputar. Prinsip lintasan partikel dalam pengendap tembakan ion sangat mendekati dengan sistem pemisah elektrostatik menurut Samuila (1997), pada kasus pemisah elektrostatik dengan polaritas positif pada elektroda titik.

### 2.7.1. Persamaan-persamaan gerak

Persamaan-persamaan diperoleh dari memodifikasi persamaan pada Samuila (1997) untuk kasus polaritas negatif. Gerak sebuah partikel yang mengalami kontak dengan elektroda silinder yang berputar dari sebuah sistem pemisah elektrostatik dituliskan sebagai berikut,

$$\begin{aligned} x &= x_0 + R_c \sin[2\pi\nu(t - t_0)] \\ y &= y_0 + R_c \cos[2\pi\nu(t - t_0)] \end{aligned} \quad (2.5)$$

dengan  $t_0$  adalah waktu awal partikel ditempatkan pada permukaan silinder dengan koordinat  $x = x_0$  dan  $y = y_0$

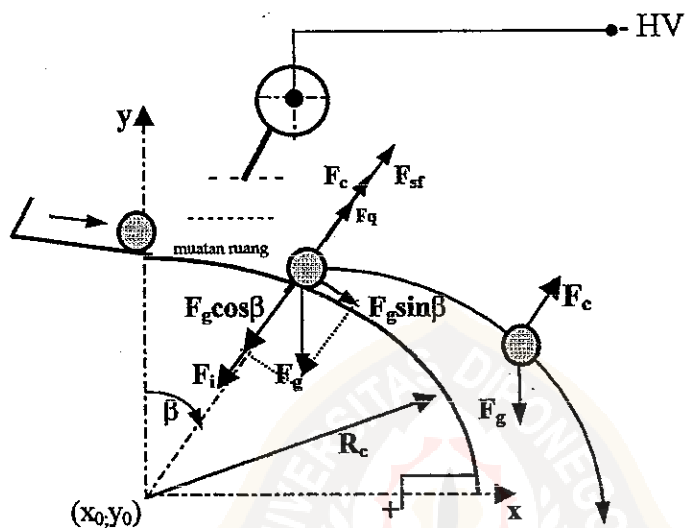
$R_c$  adalah jari-jari silinder

$x_0, y_0$  adalah koordinat-koordinat dari pusat silinder



$\nu$  adalah jumlah putaran silinder per detik.

Saat melewati daerah medan listrik tinggi (gambar 2.10), partikel mendapatkan gaya-gaya sebagai berikut, yaitu gaya oleh medan listrik luar ( $F_q$ ), gaya kelembaman ( $F_i$ ), gaya sentrifugal ( $F_{sf}$ ), gaya gravitasi ( $F_g$ ), dan gaya coulomb ( $F_c$ ).



**Gambar 2.10.** Gaya-gaya yang bekerja pada sebuah partikel konduktor kontak terhadap elektroda silinder berputar dengan polaritas negatif untuk elektroda titik

(Samuila, 1997)

Gaya dari medan listrik ke arah normal keluar (untuk partikel konduktor “termuati” dengan kontak langsung pada permukaan silinder), gaya ke arah normal ke dalam pada permukaan yang sama (untuk partikel isolator termuati dalam medan ionisasi).

Partikel akan terlepas (konduktor) jika resultan gaya-gaya listrik dan mekanik ke arah radial adalah nol. Setelah terpisah gaya sentrifugal menjadi nol, dengan mengabaikan gaya aerodinamik gerak partikel dapat dituliskan melalui persamaan berikut,

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{cx} \quad (2.6)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_{cy} - mg \quad (2.7)$$

dengan kondisi-kondisi awal,

$$\frac{dx}{dt}(0) = v_0 \cos \beta \quad (2.8)$$

$$\frac{dy}{dt}(0) = v_0 \sin \beta \quad (2.9)$$

$$x(0) = R_c \sin \beta + x_0 \quad (2.10)$$

$$y(0) = R_c \cos \beta + y_0 \quad (2.11)$$

dengan  $m$  adalah massa partikel

$\beta$  adalah sudut pelepasan

$v_0 = 2\pi\omega R_c$  adalah kecepatan dari partikel ketika terlepas dari permukaan silinder.

### 2.7.2. Analisis lintasan partikel konduktor

Pada saat menyentuh anoda, elektron-elektron bebas dalam konduktor akan tertarik ke anoda dan menjadikan konduktor bermuatan positif. Saat melalui medan listrik tinggi gaya-gaya pada sebuah partikel konduktor dapat dituliskan melalui persamaan :

$$F_i + F_g \cos \beta - F_q - F_{sf} - F_c = 0 \quad (2.12)$$

Sehingga diperoleh sudut pelepasan  $\beta$  adalah

$$\beta = \arccos \left[ \frac{(F_c + F_q + F_{sf} - F_i)}{F_g} \right] \quad (2.13)$$

Lintasan gerak partikel konduktor ditunjukkan pada gambar 2.10.

### 2. 7. 3. Analisis lintasan partikel isolator

Pada sistem pengendap tembakan ion dengan anoda berputar berbentuk silinder, partikel isolator yang kontak pada anoda akan termuati oleh ion-ion negatif saat melewati daerah muatan ruang. Partikel tersebut akan tertempel atau terendap pada silinder. Maka gaya-gaya radial partikel mengikuti persamaan.

$$F_c + F_q + F_g \cos \beta - F_i - F_{sf} = 0 \quad (2.14)$$

dengan sudut penempelan (pengendapan) pada silinder berputar,  $\beta$  adalah

$$\beta = \arccos \left[ \frac{(F_{sf} + F_i - F_c - F_q)}{F_g} \right] \quad (2.15)$$

dengan  $F_{sf}$  = gaya sentrifugal

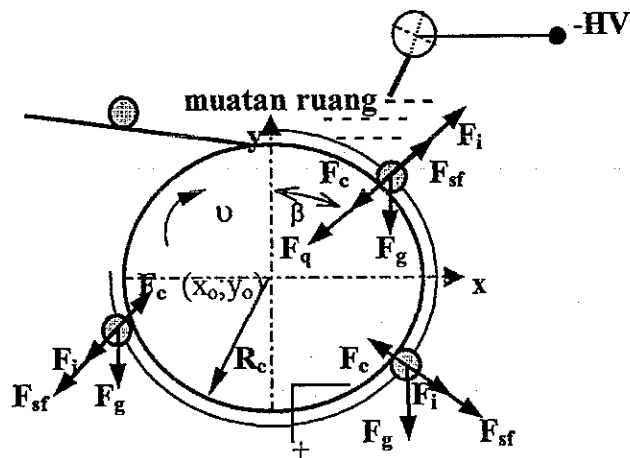
$F_i$  = gaya kelembaman

$F_g$  = gaya gravitasi.

$F_q$  = gaya elektrostatis oleh medan listrik luar

$F_c$  = gaya coulomb.

Lintasan partikel isolator ditunjukkan dalam gambar 2.11.



**Gambar 2.11.** Gaya-gaya listrik dan mekanik pada sebuah partikel isolator yang melekat pada elektroda silinder berputar dan termuati oleh berkas ion dalam daerah medan ionisasi (Samuila, 1997)

Dari analisis lintasan partikel dalam sistem pengendap tembakan ion dapat disimpulkan bahwa partikel isolator akan menempel (mengendap) pada silinder yang berputar, karena termuati oleh ion-ion dalam daerah muatan ruang. Apabila elektroda titik (aktif) merupakan elektroda negatif, maka material akan termuati oleh ion-ion negatif. Jika medium antar elektroda adalah udara maka ion negatif yang dihasilkan berupa ion  $O_2^-$ . Ion tersebut berasal dari proses tangkapan elektron oleh molekul elektronegatif, seperti molekul  $O_2$  (Scott and Haddad, 1987).