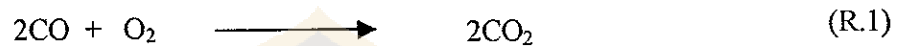


## BAB II

### DASAR TEORI

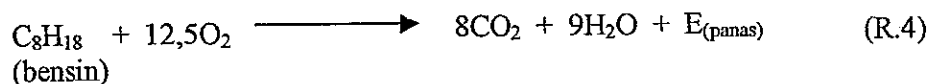
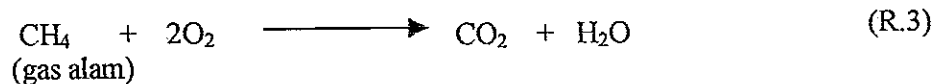
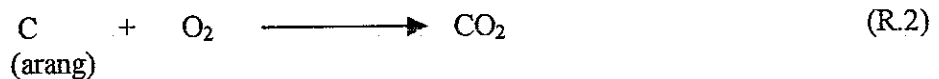
#### 2.1. CO<sub>x</sub> dalam Udara

Senyawa CO<sub>x</sub> merupakan salah satu gas emisi yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar minyak bumi dan batu bara selain SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub>. Senyawa CO<sub>x</sub> tersebut dapat berupa gas karbonmonoksida (CO) atau gas karbondioksida (CO<sub>2</sub>). Tetapi gas CO dalam udara merupakan senyawa yang kurang stabil dan biasanya akan bereaksi dengan oksigen membentuk karbondioksida (CO<sub>2</sub>) melalui reaksi:



Kedua proses pembentukan CO<sub>2</sub> tersebut dapat menyebabkan kadar karbondioksida dalam udara semakin meningkat. Salah satu dampak negatif apabila kadar karbondioksida melebihi batas ambang kandungan CO<sub>2</sub> dalam jumlah yang banyak adalah terjadinya efek pemanasan global yang lebih dikenal dengan sebutan efek rumah kaca (Prawiro, 1988).

Pengaruh terbesar yang dapat mengakibatkan kadar karbondioksida dalam udara meningkat dalam jumlah yang banyak adalah pembakaran bahan bakar minyak bumi, gas alam, dan batubara melalui reaksi (Pardiaz, 1992):



Minyak bumi dan batubara banyak banyak digunakan oleh sebagian besar mesin-mesin sistem industri dan kendaraan-kendaraan bermotor dan kendaraan bermotor untuk energi utamanya.

**Tabel 2.1.** Perkiraan emisi CO<sub>2</sub> per satuan berat bahan bakar (Sumarno, 1998)

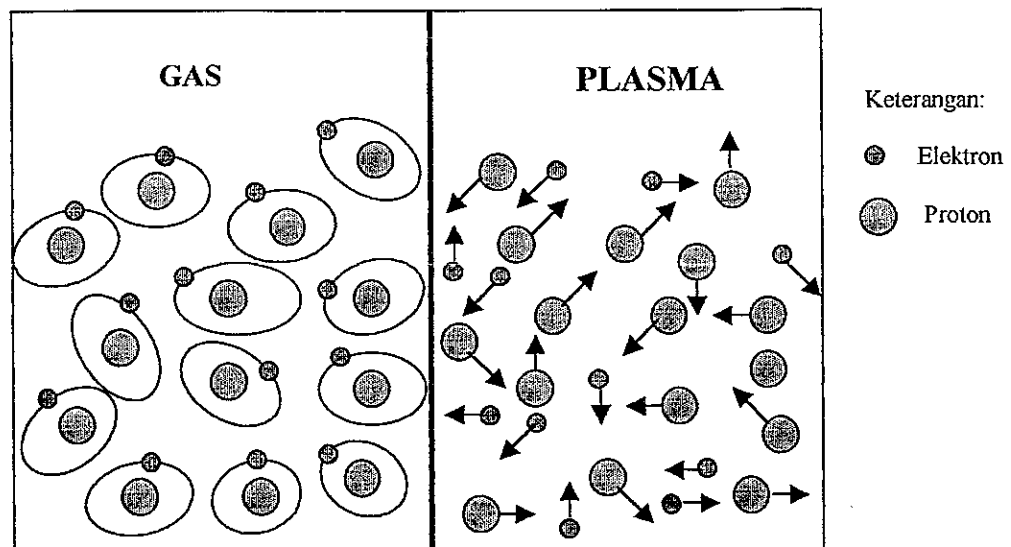
Sumber Bahan Bakar	Faktor Emisi CO <sub>2</sub> %	Emisi CO <sub>2</sub> kg/ton BB
Batubara	248	2,48
Minyak Bumi	317	3,17
Gas Alam	275	2,75
Kayu	146	1,46
Kebakaran Hutan	120	1,20

## 2.2. Plasma

Kata plasma berasal dari bahasa Yunani yaitu *plásma*, yang berarti “*something formed or molded*”. Plasma secara umum dapat dijelaskan dengan beberapa pendekatan sebagai berikut: Plasma merupakan gas yang terdiri dari partikel bermuatan dengan energi potensial partikel lebih kecil dibandingkan energi kinetik. Percampuran antara ion-ion yang bermuatan positif dengan elektron-elektron yang bermuatan negatif memiliki sifat-sifat termodinamika yang sangat berbeda dengan gas pada umumnya. Materi pada fase ini disebut fase plasma (Nur, 1998).

Plasma merupakan materi fase keempat setelah fase padat, fase cair, dan fase gas dan menempati hampir 99 % ruang jagat raya. Plasma didefinisikan

sebagai gas terionisasi (Nicholson, 1983). Ilustrasi perbedaan antara fase gas dan fase plasma dapat dilihat pada gambar 2.1.



**Gambar 2.1.** Ilustrasi perbedaan materi antara fase gas dengan fase plasma (Nur, 1988)

Dalam fase plasma terdapat kesetimbangan termodinamik jika gas terionisasi total. Keadaan kesetimbangan termodinamik tersebut dapat terjadi pada kondisi temperatur tinggi (di atas 50000 K). Dalam laboratorium sering ditemui plasma tidak dalam kesetimbangan termodinamik (*non-equilibrium plasma*) (Nur, 1998).

### 2.3. Plasma Non-Termik

Plasma non-termik termasuk plasma dingin, dimana ion-ion dan atom-atom/molekul-molekul netral (partikel berat), tetap dalam suhu sekitar 1000 K, namun demikian elektron-elektron dalam plasma jenis ini mempunyai temperatur cukup tinggi sekitar 50000 K. Dengan pengertian lain plasma non-termik

merupakan plasma dengan energi rata-rata elektronnya lebih besar daripada energi rata-rata gas dan ion. Spesies dalam plasma non-termik merupakan senyawa-senyawa radikal bebas selain ion, elektron, dan molekul gas netral (Nur, 1998).

Plasma non-termik dapat dibangkitkan dengan radiasi berkas elektron (*electron-beam*), metoda lucutan elektrik, dan radiasi elektromagnetik khususnya laser energi tinggi. Ketiga metode ini berdasarkan prinsip yang sama yaitu, dalam pembentukan plasma sebagian besar energi digunakan untuk memproduksi elektron berenergi tinggi daripada untuk pemanasan gas (Penetrante, 1995).

Plasma non-termik yang dibangkitkan dengan teknik lucutan listrik dapat terjadi dalam lucutan pijar korona. Lucutan pijar korona dapat dibangkitkan di dalam reaktor plasma yang berkonfigurasi geometri elektroda kawat-bidang, titik-bidang dan lain-lain. Dalam konfigurasi geometri elektroda tersebut memungkinkan terjadinya medan listrik tak seragam yang kuat di daerah sekitar elektroda aktif sehingga memungkinkan terjadinya ionisasi dan pembentukan elektron berenergi tinggi di daerah tersebut (Goldman dan Goldman, 1978).

#### 2.4. 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 pada partikel-partikel gas. Ionisasi didefinisikan sebagai proses terlepasnya elektron pada suatu atom atau molekul dari ikatannya. Energi yang dibutuhkan untuk melepas satu atau lebih elektron dari orbitnya pada sebuah atom atau molekul dapat didefinisikan sebagai energi ionisasi  $E_i$  yang dinyatakan dalam elektron volt (eV) (Krane, 1992).

Ionisasi gas dalam lucutan listrik sebagian besar terjadi karena tumbukan tidak elastik antara elektron dengan molekul gas netral (Chapman, 1980). Dalam keadaan stabil ionisasi tersebut dapat terjadi apabila energi elektron yang menumbuk lebih besar atau sama dengan energi ionisasi atom atau molekul tertumbuk (Valyi, 1977) sehingga memenuhi persamaan berikut ini:

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

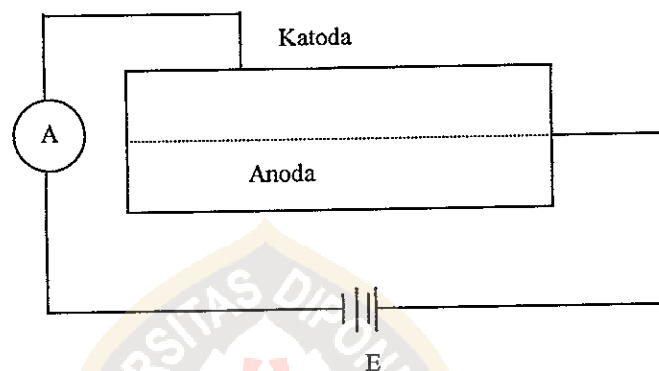
dengan  $m_e$  adalah massa elektron penumbuk,  $v_e$  adalah kecepatan elektron penumbuk,  $e$  adalah muatan elektron, dan  $V^1$  adalah energi ionisasi atom atau molekul tertumbuk.

Pada proses tumbukan antara elektron dengan partikel-partikel gas tidak hanya proses ionisasi yang terjadi tetapi juga dapat menyebabkan terjadinya peristiwa-peristiwa lain, diantaranya disosiasi, eksitasi molekul, eksitasi atom, rekombinasi molekul, rekombinasi atom, relaksasi molekul, dan relaksasi atom (Chapman, 1980).

## 2.5. Pelucutan Gas dalam Medan Listrik Tidak Homogen

Pelucutan didefinisikan sebagai aliran arus listrik yang melalui gas dan proses-proses ionisasi gas yang disebabkan oleh adanya medan listrik. Pelucutan gas dalam medan listrik DC dapat dikelompokkan menjadi dua tipe, yaitu lucutan tak mandiri (*non self-sustaining discharge*) dan lucutan mandiri (*self-sustaining discharge*). Lucutan mandiri terdiri dari lucutan Townsend (*Townsend discharge*), lucutan pijar (*glow discharge*), dan lucutan arc (*arc discharge*) (Raizer, 1991).

Pelucutan gas diawali proses ionisasi gas dalam medan listrik yang kuat. Ionisasi gas menghasilkan ion-ion yang bermuatan positif dan elektron-elektron yang bermuatan negatif. Masing-masing muatan listrik tersebut bergerak menuju elektroda yang sesuai sehingga akan terjadi aliran muatan listrik. Proses pelucutan gas dalam medan listrik secara sederhana dapat diterangkan melalui sebuah tabung lucutan gas yang berisi gas dan di tengahnya terdapat kawat. Skema tabung lucutan gas dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Tabung lucutan gas (Brown, 1960)

Dalam tabung lucutan gas, dinding tabung berperan sebagai katoda sedangkan kawat yang di tengah sebagai anoda. Apabila dikenakan suatu tegangan sebesar  $V$  antara katoda dan anoda maka akan timbul medan listrik dalam tabung tersebut, tetapi bila tegangan yang dikenakan pada kedua elektroda masih rendah, hal itu tidak akan memberikan pengaruh yang berarti terhadap partikel-partikel gas dalam tabung. Ionisasi primer yang menghasilkan  $N$  pasangan ion dalam tabung terjadi hanya disebabkan oleh radiasi sinar kosmik atau radioaktif alam. Dan arus yang terukur masih sangat lemah yaitu berkisar pada orde  $10^{-15}$  A. Dengan adanya  $V$  terpasang, ion-ion yang terjadi dikumpulkan dimana ion positif akan bergerak menuju katoda dan ion negatif akan bergerak

menuju anoda. Tetapi tidak semua ion yang terjadi dapat dikumpulkan, karena dalam perjalanannya ion-ion tersebut dapat mengalami rekombinasi. Dengan menaikkan lagi tegangan, kecepatan ion-ion akan bertambah, dan kemungkinan untuk terjadinya rekombinasi berkurang. Elektron hasil ionisasi primer ini disebut elektron primer. Elektron primer akan dipercepat oleh medan listrik menuju anoda. Dalam perjalanannya elektron-elektron tersebut akan bertumbukan dengan atom-atom atau molekul-molekul gas yang berada dalam tabung. Apabila tegangan antara kedua elektroda dinaikkan terus maka pada suatu nilai tegangan tertentu elektron-elektron tersebut dalam perjalanannya menuju elektroda pusat (*anoda*) akan mempunyai kecepatan yang semakin tinggi sehingga mampu mengionisasi atom atau molekul-molekul gas yang ditumbuknya. Hal ini mengakibatkan terjadinya ionisasi sekunder sehingga menghasilkan elektron sekunder yang menambah besar muatan sehingga arus yang terukurpun semakin naik. Elektron sekunder juga dapat mengakibatkan ionisasi pada atom-atom gas atau molekul-molekul gas yang lainnya sehingga akan terjadi ionisasi berantai yang disebut *avalanche*. Pada kondisi ini sebuah lucutan akan berlangsung secara terus-menerus sebagai akibat ionisasi eksternal, dan keadaan ini disebut dengan lucutan tak mandiri (*non self-sustaining*).

Jika tegangan dinaikkan lagi maka pada suatu nilai tegangan tertentu akan terjadi keadaan dadal (*break down*) elektrik yang ditandai dengan naiknya arus secara tajam walaupun tegangan tidak dinaikkan lagi. Daerah keadaan dadal ini disebut dengan daerah lucutan mandiri (*region of self sustaining*). Dan biasanya disebut dengan daerah Gelap Townsend.

Dengan semakin meningkatnya ionisasi yang menghasilkan elektron sekunder (*avalanche electronic*), arus akan naik sedangkan tegangan akan turun dengan sendirinya, dan daerah ini disebut dengan lucutan pijar sub normal (*sub normal glow discharge*). Kemudian pada suatu nilai tegangan tertentu, tegangan akan tetap tetapi arus akan naik sampai pada nilai tertentu. Keadaan ini disebut dengan lucutan pijar normal. Pada daerah ini ionisasi terjadi secara berantai dan tidak lagi memerlukan tambahan tegangan dari luar untuk terjadinya ionisasi.

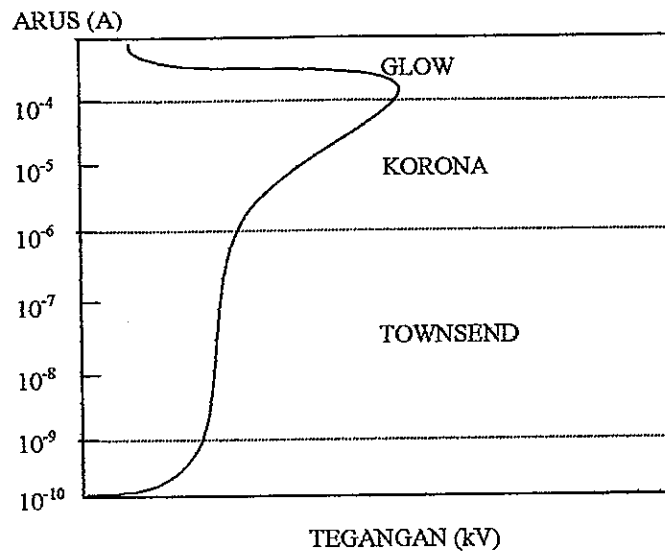
Apabila tegangan dinaikkan lagi sampai pada suatu nilai tertentu, arus naik lagi dan terjadi kestabilan antara arus dan tegangan yaitu arus naik sebanding kenaikan tegangan. Keadaan lucutan ini disebut dengan lucutan abnormal. Lucutan abnormal ditandai dengan seluruh permukaan katoda berpijar. Selanjutnya apabila tegangan dinaikkan terus maka katoda akan semakin panas akibat tumbukkan ion yang semakin tinggi dan akan timbul ketidakstabilan yaitu arus naik secara tajam sedangkan tegangan turun dengan cepat. Keadaan ini dinamakan dengan transisi lucutan *arc*. Sedangkan lucutan *arc* sendiri ditandai dengan arus yang terjadi sangat tinggi dan tegangan sangat rendah. Pada keadaan ini tidak perlu lagi penambahan tegangan untuk mendukung lucutan (Brown, 1960).

## **2.6. Lucutan Pijar Korona sebagai Pembangkit Plasma**

Lucutan korona merupakan suatu keadaan dalam lucutan mandiri (Goldman dan Goldman, 1978). Lucutan korona diawali dengan lucutan townsend dan diikuti oleh lucutan glow. Karakteristik lucutan gas yang terjadi di dalam

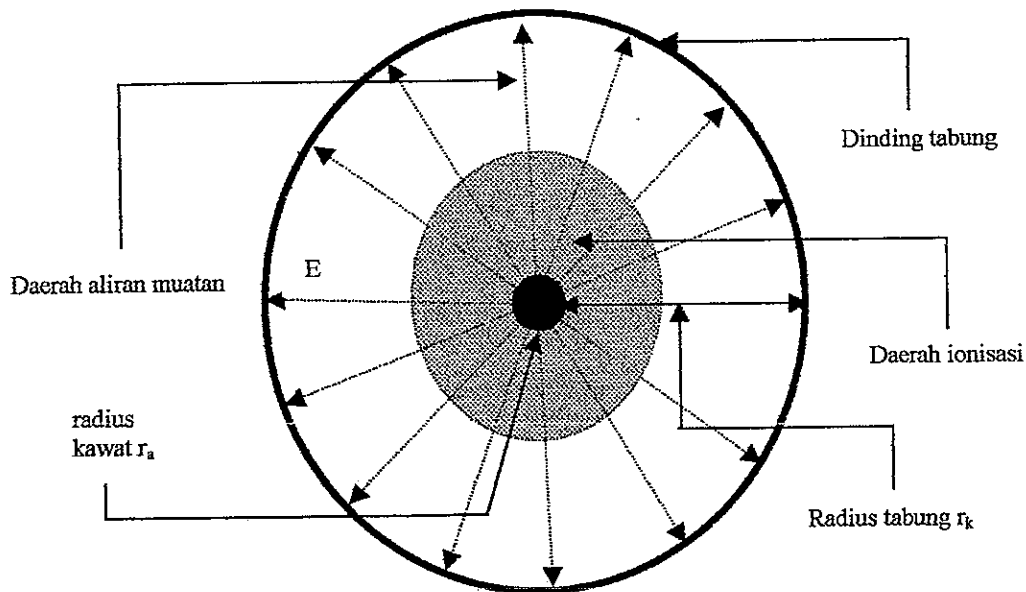


tabung lucutan gas dengan konfigurasi geometri elektroda kawat-bidang dapat dilihat pada gambar 2.3 (Brown, 1960).



**Gambar 2.3.** Karakteristik lucutan gas (Brown, 1960)

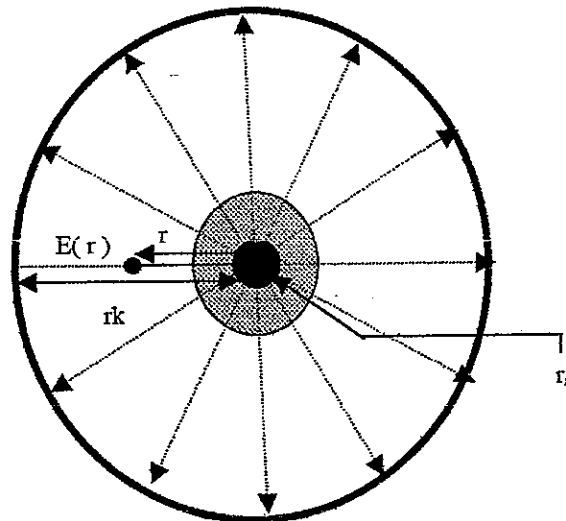
Karakteristik umum lucutan korona adalah adanya medan listrik tak seragam (*laplacian*), dimana medan listrik laplacian ditentukan oleh konfigurasi geometri elektroda. Pada lucutan pijar korona, distribusi medan listrik membatasi terjadinya ionisasi pada daerah tertentu dalam tabung lucutan gas. Daerah ini disebut daerah ionisasi (*ionization region*). Letaknya di sekitar elektroda aktif. Dalam konfigurasi geometri elektroda kawat-bidang, daerah ionisasi terletak di sekitar kawat. Sedangkan daerah lain di luar daerah ionisasi disebut daerah aliran muatan (*drift region*). Daerah ionisasi mempunyai intensitas medan listrik sangat kuat dan mampu menimbulkan ionisasi primer (Goldman dan Goldman, 1978). Ilustrasi daerah ionisasi dan daerah aliran muatan pada konfigurasi elektroda geometri kawat-bidang dapat dilihat pada gambar 2.4.



**Gambar 2.4.** Ilustrasi daerah ionisasi dan daerah aliran muatan pada konfigurasi geometri elektroda kawat-bidang (Kraus, 1991)

Elektron-elektron hasil ionisasi primer bergerak dan dipercepat oleh medan listrik menuju anoda. Dalam perjalanannya elektron-elektron tersebut mengalami tumbukan dengan partikel-partikel gas yang berada di daerah antar elektroda. Peristiwa tumbukan elektron-elektron dengan partikel-partikel gas tersebut mengakibatkan partikel-partikel gas dapat terionisasi. Proses ionisasi senantiasa disertai dengan lucutan yang berpijar sehingga plasma yang dihasilkan disebut sebagai plasma lucutan pijar (*glow discharge plasma*) (Raizer, 1991). Karena konfigurasi geometri elektroda adalah kawat-bidang maka lucutan gas yang terjadi disebut lucutan pijar korona (*corona glow discharge*) sehingga plasma yang dihasilkan dinamakan plasma lucutan pijar korona (*corona glow discharge plasma*) (Spyrou, 1994).

Ilustrasi distribusi medan listrik pada konfigurasi geometri elektroda kawat-bidang dapat dilihat pada gambar 2.5.

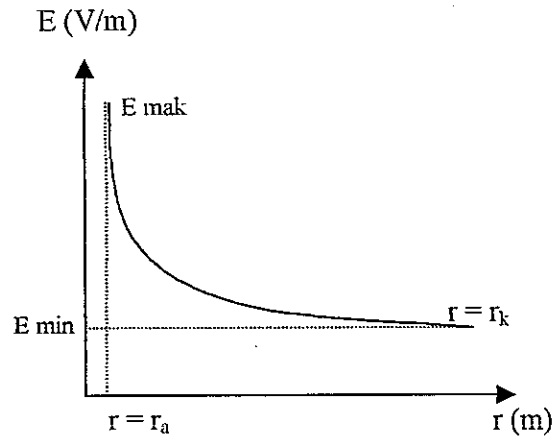


**Gambar 2.5.** Distribusi medan listrik dalam konfigurasi geometri elektroda kawat-bidang (Kraus, 1991)

Besarnya medan listrik di suatu titik di dalam daerah antar elektroda pada jarak  $r$  dari poros kawat dirumuskan oleh persamaan sebagai berikut (Brown, 1960) :

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(r_k/r_a)} \quad (2.2)$$

Dengan  $r_k$  adalah jarak antara dinding dalam tabung dengan permukaan kawat,  $r_a$  adalah radius kawat,  $r$  adalah jarak dari poros kawat ke suatu titik tertentu dalam daerah antar elektroda, dan  $V$  adalah tegangan yang dikenakan pada elektroda kawat.



**Gambar 2.6.** Grafik karakteristik medan listrik sebagai fungsi jarak pada elektroda kawat-bidang (Brown, 1960).

Dari gambar 2.6 dapat dilihat bahwa medan listrik semakin menurun dengan bertambahnya  $r$ . Medan listrik maksimum diperoleh pada  $r = r_a$  dan medan listrik minimum pada  $r = r_k$ .

Berdasarkan polaritas sumber tegangan yang dikenakan pada elektroda kawat, korona dapat digolongkan menjadi korona positif dan korona negatif (Brown, 1960).

Suatu korona disebut korona positif apabila elektroda kawatnya merupakan elektroda positif (dihubungkan dengan polaritas positif sumber tegangan). Daerah antara kedua elektroda didominasi oleh ion bermuatan positif. Pada korona positif, katoda terisolasi dari daerah ionisasi oleh adanya daerah aliran dan terjadinya proses rekombinasi pada katoda (Sigmond, 1978).

Suatu korona disebut korona negatif apabila elektroda kawatnya merupakan elektroda negatif (dihubungkan dengan polaritas negatif sumber tegangan). Daerah antara kedua elektroda didominasi oleh muatan negatif. Pada

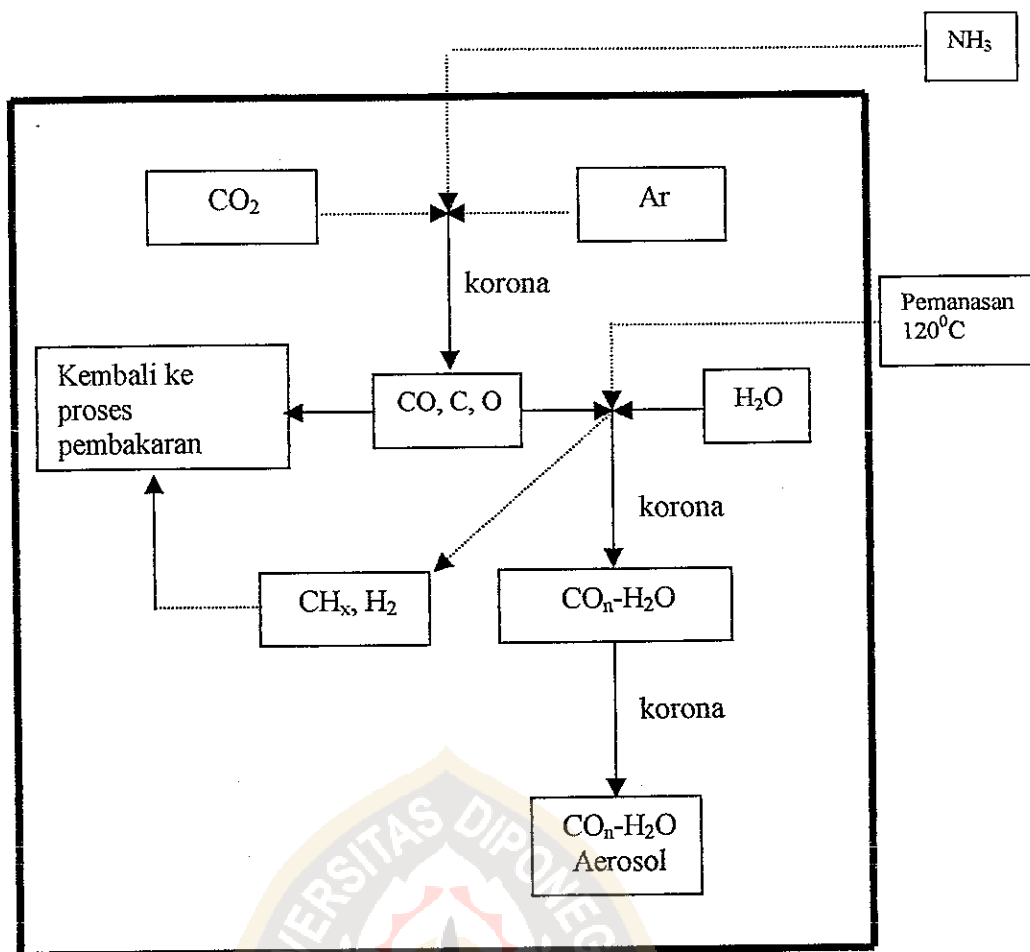
korona negatif, katoda tidak terisolasi dari daerah ionisasi oleh adanya daerah aliran (Kraus, 1991).

## 2.7. Reduksi Gas CO<sub>x</sub>

Pereduksian CO<sub>x</sub> dengan teknik plasma lucutan pijar korona untuk gas karbonmonoksida (CO) lebih mudah dibandingkan CO<sub>2</sub>, dalam sub bahasan ini akan diuraikan pereduksian CO<sub>2</sub>.

Pereduksian CO<sub>2</sub> diawali oleh proses pemisahan ikatan-ikatan molekul gas (molekul-molekul gas mengalami dissosiasi). Proses pemisahan ikatan-ikatan tersebut dapat mengakibatkan terjadinya ionisasi atau radikalisasi pada molekul-molekul gas, sehingga terbentuk ion-ion, elektron, dan radikal-bebas yang energetik (Kraus, 1991). Pada radikalisasi mekanisme reaksi radikal-bebas merupakan suatu deret reaksi-reaksi bertahap yang meliputi: tahap permulaan (*inisation*), tahap perambatan (*propagation*), dan tahap pengakhiran (*termination*) (Fessenden dan Fessenden, 1994). Radikal-bebas yang terbentuk dari proses radikalisasi akan mendissosiasi molekul-molekul gas yang berada dalam reaktor sehingga terjadi suatu reaksi berantai (Chang, 1993).

Skema proses reduksi CO<sub>2</sub> dalam lucutan pijar korona pada percampuran gas Argon-CO<sub>2</sub> yang telah dilakukan oleh Chang (1993) dapat dilihat pada gambar 2.7 yang terdapat dalam kotak.



Gambar 2.7. Skema pereduksian CO<sub>2</sub> (Chang, 1993)

Dalam reaktor plasma reaksi-reaksi argon sangat penting yaitu untuk menambah jumlah elektron, Argon mula-mula akan terionisasi dalam korona dan elektron yang dihasilkan akan mampu mendissosiasikan CO<sub>2</sub>.

Proses dissosiasi CO<sub>2</sub> yang disebabkan tertumbuknya CO<sub>2</sub> oleh elektron bertenaga tinggi dapat terjadi melalui reaksi



Pada reaksi ini, tumbukan antara elektron dengan molekul  $\text{CO}_2$  akan menghasilkan radikal  $\text{CO}$ ,  $\text{O}$ , dan  $\text{C}$  yang sebagian akan bereaksi lebih lanjut dengan molekul  $\text{H}_2\text{O}$  membentuk aerosol  $\text{CO}_n\text{-H}_2\text{O}$  dan sebagian yang lain akan kembali ke proses pembakaran bersama-sama dengan senyawa-senyawa yang dihasilkan dari reaksinya dengan radikal atau ion dari disosiasi  $\text{H}_2\text{O}$  (Chang, 1993).

Sedangkan dalam penelitian ini, pereduksian  $\text{CO}_2$  melalui plasma lucutan pijar korona dilakukan dalam campuran gas  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{NH}_3$ , dan uap air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) di dalam reaktor, selain itu temperatur di dalam reaktor dijaga pada suhu minimal  $120^\circ\text{C}$ . Dengan menambahkan gas  $\text{NH}_3$  ke dalam campuran gas  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar}$ , dan uap air akan menghasilkan senyawa lain selain aerosol  $\text{CO}_n\text{-H}_2\text{O}$ , sebagai akibat reaksi radikal-radikal yang dihasilkan dari disosiasi  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , dan  $\text{H}_2\text{O}$ , sehingga persentase reduksi  $\text{CO}_2$  semakin besar.

