

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Parameter Pencemaran Udara

Udara merupakan komponen terpenting dalam kehidupan sehingga kualitasnya harus selalu dijaga dan ditingkatkan untuk menciptakan hidup sehat dengan udara yang bersih. Namun dengan seiring perkembangan jaman, banyak terjadi pencemaran udara yang secara perlahan mengurangi atau menurunkan kualitas udara tersebut. Selain itu, regulasi yang mengatur tentang cara pengendalian pencemaran udara kurang begitu diperhatikan dan dipraktikkan secara riil. Untuk mengimbangi perkembangan tersebut sudah selayaknya pemilihan serta penggunaan teknologi yang tepat harus segera diterapkan.

Sebelum menerapkan teknologi yang tepat dalam mengolah pencemaran udara diperlukan parameter apa saja yang menyebabkan pencemaran udara, khususnya hasil limbah dari gas buang pada *boiler*. Parameter tersebut meliputi:

(<http://depkes.go.id/downloads/Udara.pdf>)

2.1.1 Sulfur Dioksida

a. Sifat fisik

Pencemaran oleh sulfur oksida terutama disebabkan oleh dua komponen sulfur bentuk gas yang tidak berwarna, yaitu sulfur dioksida (SO_2) dan sulfur trioksida (SO_3). Sulfur dioksida mempunyai karakteristik bau yang tajam dan tidak mudah terbakar di udara, sedangkan sulfur trioksida merupakan komponen yang tidak reaktif.

b. Sumber dan distribusi

Masalah yang ditimbulkan oleh bahan pencemar yang dibuat oleh manusia adalah dalam hal distribusinya yang tidak merata sehingga terkonsentrasi pada daerah tertentu. Sedangkan pencemaran yang berasal dari sumber alam biasanya lebih tersebar merata. Tetapi pembakaran bahan bakar di industri pada dasarnya merupakan sumber pencemaran SO_x , misalnya bahan bakar batu bara.

c. Dampak dan pencegahan

Pencemaran SO_x menimbulkan dampak terhadap manusia dan hewan, kerusakan pada tanaman terjadi pada kadar sebesar 0,5 ppm. Pengaruh

utama polutan SO_x terhadap manusia adalah iritasi sistem pernafasan. Untuk menekan emisi gas SO_x digunakan unit FGD (*Flue Gas Desulfurizasi*).

2.1.2 Karbon Monoksida

a. Sifat fisik

Karbon monoksida merupakan senyawa yang tidak berbau, tidak berasa dan pada suhu normal berbentuk gas yang tidak berwarna. Senyawa CO mempunyai potensi bersifat racun yang berbahaya karena mampu membentuk ikatan yang kuat dengan pigmen darah.

b. Sumber dan distribusi

Sumber CO buatan antara lain kendaraan bermotor, terutama yang menggunakan bahan bakar bensin, sedangkan dari sumber tidak bergerak seperti pembakaran batubara, minyak dari industri pembakaran sampah domestik.

c. Dampak dan pencegahan

Dampak dari CO bervariasi tergantung dari status kesehatan seseorang, pengaruh CO kadar tinggi adalah terhadap sistem syaraf pusat. Untuk menekan emisi CO digunakan unit *scrubber* pada cerobong asap.

2.1.3 Nitrogen Dioksida

a. Sifat fisik

Oksida Nitrogen (NO_x) adalah kelompok gas nitrogen yang terdapat di atmosfer yang terdiri dari nitrogen monoksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO_2). Nitrogen monoksida merupakan gas yang tidak berwarna dan tidak berbau. Sebaliknya nitrogen dioksida berwarna cokelat kemerahan dan berbau tajam.

b. Sumber dan distribusi

Dumber pencemaran NO_x yang terbesar adalah dari aktifitas manusia perkotaan dan kegiatan industri.

c. Dampak dan pencegahan

Dampak NO_x berbahaya bagi makhluk hidup dan bersifat racun terutama terhadap paru. Untuk menekan emisi NO_x digunakan unit *Low NO_x Combustion*.

2.1.4 Hidrokarbon

a. Sifat fisik

Hidrokarbon adalah bahan pencemar udara yang dapat berbentuk gas, cairan maupun padatan. Hidrokarbon yang berupa gas akan bercampur dengan gas-gas hasil buangan lainnya, bila berupa cairan maka hidrokarbon akan membentuk semacam kabut minyak, dan bila berbentuk padatan akan membentuk asap yang pekat dan akhirnya menggumpal menjadi debu.

b. Sumber dan distribusi

Sebagai bahan pencemar udara, hidrokarbon berasal dari proses industri yang diemisikan ke udara. Hidrokarbon merupakan polutan primer karena dilepas ke udara secara langsung. Kegiatan industri yang menimbulkan cemaran dalam bentuk hidrokarbon adalah industri plastic, resin, pigmen, zat warna, pestisida, dan pemrosesan karet. Selain itu sumber hidrokarbon berasal dari sarana transportasi. Kondisi mesin yang kurang baik akan menghasilkan hidrokarbon.

c. Dampak dan pencegahan

Hidrokarbon akan beraksi dengan bahan-bahan lain dan akan membentuk ikatan baru yang banyak dijumpai di daerah industri dan padat lalu lintas. Bila ikatan baru ini masuk dalam paru-paru akan menimbulkan luka dan merangsang terbentuknya sel-sel kanker. Untuk menekan emisi hidrokarbon, pada industri dengan memasang scrubber pada cerobong asap.

2.1.5 Partikel Debu

a. Sifat fisik

Debu merupakan salah satu bahan yang sering disebut sebagai partikel yang melayang di udara (*Suspended Particulate Matter / SPM*) dengan ukuran 1 mikron sampai dengan 500 mikron. Partikel debu akan berada di udara dalam waktu yang relatif lama dalam keadaan melayang-layang di udara kemudian akan masuk ke dalam tubuh manusia melalui pernafasan. Hal ini dapat mengganggu dan membahayakan kesehatan manusia (Pudjiastuti,2002:1).

Pada dasarnya sisa pembakaran dari gas buang boiler yang bersifat debu dibedakan menjadi 5 jenis berdasarkan sifatnya, meliputi: (Pudjiastuti,2002:1)

- Sifat pengendapan, sifatnya mengendap pada ruang pembakaran karena gaya gravitasi bumi dan proses pembuangannya hanya menggunakan *conveyor*.
- Sifat permukaan basah, sifatnya selalu basah dilapisi oleh lapisan air yang sangat tipis.
- Sifat penggumpalan, karena sifat yang selalu basah maka debu satu dengan yang lainnya cenderung menempel membentuk gumpalan.
- Sifat opsis, partikel yang basah/lembab lainnya dapat memancarkan sinar yang dapat terlihat dalam kamar gelap
- *Fly Ash* (debu terbang), Partikulat debu melayang (*Fly Ash*) merupakan campuran yang sangat rumit dari berbagai senyawa organik dan anorganik yang tersebar di udara dengan diameter yang sangat kecil, mulai dari < 1 mikron sampai dengan maksimal 500 mikron. Partikulat debu tersebut akan berada di udara dalam waktu yang relatif lama dalam keadaan melayang-layang di udara dan masuk kedalam tubuh manusia melalui saluran pernafasan. *Fly ash* pada umumnya mengandung berbagai senyawa kimia yang berbeda, dengan berbagai ukuran dan bentuk yang berbeda pula, tergantung dari mana sumber emisinya.

b. Sumber dan distribusi

Partikulat debu melayang dihasilkan dari pembakaran batu bara yang tidak sempurna sehingga aerosol kompleks dari butiran-butiran tar. Dibandingkan dengan pembakaran batubara, pembakaran minyak dan gas pada umumnya menghasilkan abu terbang lebih sedikit.

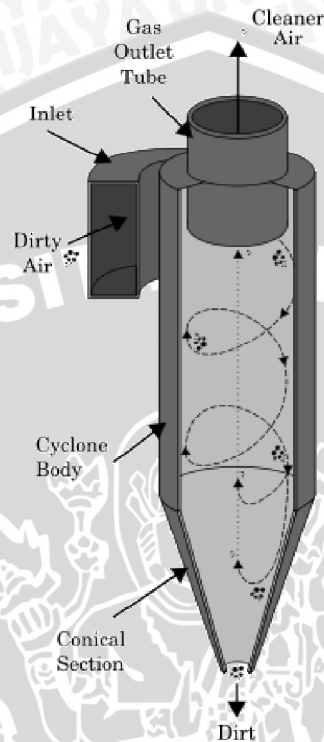
c. Dampak dan pencegahan

Pengaruh partikulat debu bentuk padat maupun cair yang berada di udara sangat bergantung kepada ukurannya. Ukuran partikulat debu yang membahayakan kesehatan umumnya berkisar antara 0,1 mikron sampai dengan 10 mikron. Adanya ceceran logam beracun yang terdapat dalam partikulat debu di udara merupakan bahaya yang terbesar bagi kesehatan. Batas baku mutu emisi partikulat debu yang ditetapkan pemerintah untuk ketel uap berbahan bakar bagasse atau ampas tebu sebesar 250 mg/Nm^3 . Untuk menekan emisi debu tersebut digunakan *electrostatic precipitator*.

2.2 Metode Pengendapan Partikel Debu

2.2.1 Separator Cyclone

Separator Cyclone seperti terlihat pada Gambar 2.1 merupakan salah satu alat penangkap debu yang ditempatkan pada setiap *boiler*. Alat ini menggunakan prinsip gerakan *cyclo* untuk memisahkan gas dengan debu yang dikandungnya.



Gambar 2.1 Separator Cyclone

Sumber: Burnett, Colin M.L.2007

(http://en.wikipedia.org/wiki/Cyclonic_separation)

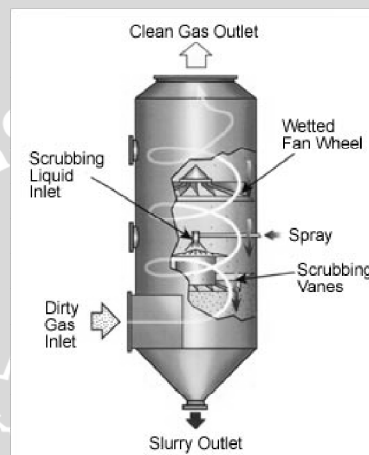
Prinsip kerja dari alat ini berawal dari gas yang masuk dengan bantuan *fan*. Gas akan mengikuti bentuk alur yang bersirip-sirip siklon. Hal ini mengakibatkan gas yang masuk akan mengalami pergerakan siklon menuju kearah bawah. Partikel-partikel debu akan terpantul dan bergerak ke atas membentuk pusaran baru yang letaknya berada di dalam pusaran yang mengarah ke bawah saat penutup *dust outlet* dalam keadaan tertutup, sehingga untuk pusaran yang mengarah ke bawah disebut *inner vortex*, sedangkan untuk pusaran yang mengarah ke atas disebut *outer vortex*.

Dengan menggunakan sistem siklon ini efisiensi yang didapat sekitar 80%, sedangkan untuk partikel terkecil yang diperoleh $> 10 \mu\text{C}$. Namun pada kenyataanya separator ini sangat bergantung dengan kondisi tekanan dan temperatur gas buang itu sendiri. Padahal tekanan dan temperatur pada kondisi riil hampir setiap saat mengalami perubahan walaupun tidak terlalu signifikan. Aplikasi sistem *cyclone* pada industri

terdapat pada industri peleburan timah, PB (*Particle Board*), pabrik pengolahan kayu maupun industri yang menggunakan bahan bakar batubara atau limbah tebu.

2.2.2 *Wet Scrubber*

Sistem *scrubber* merupakan alat kendali polusi udara yang dapat digunakan untuk membuang partikel dan atau gas dari arus gas keluaran industri. *Wet scrubber* seperti pada Gambar 2.2 adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan variasi alat yang menggunakan *liquid* atau cairan untuk membuang polutan.



Gambar 2.2 *Wet Scrubber*

Sumber: Anand K, Lakshmi.2008

(<http://www.ustudy.in/node/3145>)

Prinsip kerja dari *wet scrubber* adalah saat arus gas kotor dibawa menuju kontak dengan *liquid* pencuci dengan cara menyemprotkan, mengalirkannya atau dengan metode kontak lainnya. Desain dari alat ini tergantung pada kondisi proses industri dan sifat alami polutan udara yang bersangkutan. *Wet scrubber* membuang partikel dengan cara menangkapnya dalam tetesan atau butiran *liquid*. Adapun butiran *liquid* yang masih terdapat dalam arus gas pasca pencucian selanjutnya harus dipisahkan dari gas bersih dengan alat lain yang disebut *entrainment separator*. Kemampuan alat ini terbatas yaitu menyisahkan partikel lebih dari 1 mikron.

2.2.3 Pengendap Elektrostatis

Sistem elektrostatis pada dasarnya melewati gas buang *boiler* pada kamar yang berisi plat-plat elektroda, yang terbuat dari tembaga, kuningan ataupun arang. Elektroda yang terpasang pada konstruksi *precipitator* diberi arus listrik searah (DC) dengan muatan positif dan negatif. Antara batang-batang elektroda yang bermuatan negatif dan plat-plat pengumpul debu yang melewati batang-batang elektroda akan

terinduksi oleh muatan negatif. Butiran-butiran debu yang bermuatan negatif akan tertarik oleh plat-plat elektroda positif.

Adanya getaran (*rapping*) yang menyentuh plat-plat pengumpul mengakibatkan debu akan jatuh ke tempat penampungan (*dust hopper*), dengan demikian debu akan terpisah dari gas asap didalam *precipitator* tersebut. Dengan cara mengalirkan arus listrik statis untuk mengendapkan debu sangat efektif dan polusi udara sangat sedikit pengaruhnya. Efisiensi yang didapat dari metode ini > 99%, sedangkan ukuran partikel debu terkecil yang diperoleh, $2\mu\text{C}$. Aplikasi metode ini pada industri terdapat pada pabrik semen, *pulp and paper*, *power plant*, dan pabrik gula.

Faktor yang mempengaruhi dalam pemilihan metode pembersihan gas buang *boiler* pada dunia industri, adalah:(Pasaribu,2008 : 10)

- Efisiensi yang didapat dalam menyaring partikel debu.
- Ukuran partikel debu terkecil yang didapat.
- Bahan bakar yang digunakan pada ruang pembakaran.
- Kapasitas bahan bakar pada ruang pembakaran.
- Biaya pembangunan dan pemeliharaan.

Parameter teknologi penyaringan partikel debu secara lengkap dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Parameter Penyaringan Partikel Debu

Types of Dust Collecting Equipment	Particle Size Microns	Loading Grains/Cu. Ft.	Collection Efficiency Weight %	Pressure Loss		Utilities Per 1,000 Cfm.	Gas Velocity, Fpm.	Size Range Limits, 1,000 Cfm. (Relative)	Space Required, (Relative)
				Gas, In. W.G.	Liquid Psi.				
Dry inertial collectors									
Settling chamber	>50	>5	<50	<0.2	—	—	300-600	None	Large
Baffle chamber	>50	>5	<50	0.1-0.5	—	—	1,000-2,000	None	Medium
Skimming chamber	>20	>1	<70	<1	—	—	2,000-4,000	50	Small
Louver	>20	>1	<80	0.5-2	—	—	2,000-4,000	30	Medium
Cyclone	>10	>1	<85	0.5-3	—	—	2,000-4,000	50	Medium
Multiple cyclone	>5	>1	<95	2-6	—	—	2,000-4,000	200	Small
Impingement	>10	>1	<90	1-2	—	—	3,000-6,000	None	Small
Dynamic	>10	>1	<90	Provides head	—	1-2hp.	—	50	—
Wet scrubbers									
Gravity spray	>10	>1	<70	<1	20-100	0.5-2 gpm.	100-200	100	Medium
Centrifugal	>5	>1	<90	2-6	20-100	1-10 gpm.	2,000-4,000	100	Medium
Impingement	>5	>1	<95	2-8	20-100	1-5 gpm.	3,000-6,000	100	Medium
Packed bed	>5	>0.1	<90	1-10	5-30	5-15 gpm.	100-300	50	Medium
Dynamic	>1	>1	<95	Provides head	5-30	1-5 gpm., 3-20 hp.	3,000-4,000	50	Small
Submerged nozzle	>2	>0.1	<90	2-6	None	No pumping	3,000	50	Medium
Jet	0.5-5	>0.1	<90	Provides head	50-100	50-100gpm.	2,000-20,000	100	Small
Venturi	>0.5	>0.1	<99	10-30	5-30	3-10 gpm.	12,000-42,000	100	Small
Fabric filters	>0.2	>0.1	<99	2-6	—	—	1-20	200	Large
Electrostatic precipitators	<2	>0.1	<99	0.2-1	—	0.1-0.6 kw.	100-600	10-2,000	Large

Note: The terms expressing concentration, or loading, can be defined as light = ½-2, moderate = 2-5, and heavy = 5+ grains/cu. ft. Particle size: fine, 50% in ½-7 micron size range; medium, 50% in 7-15 micron size range; coarse 50% over 15 microns.

Sumber: Pasaribu, 2008 : 11

2.3 Teori Dasar Listrik Statis

Listrik statik merupakan proses elektrifikasi terhadap suatu benda sehingga benda tersebut mempunyai muatan potensial listrik elektrostatik. Pada dasarnya daya listrik menurut prinsipnya dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu:

- a. Sumber daya gesekan yang menimbulkannya, disebut *electrostatic*
- b. Sumber daya magnet yang menimbulkannya, disebut *electromagnetic*
- c. Sumber daya proses kimia yang menimbulkannya, disebut *electrochemical*.
- d. Sumber daya panas yang menimbulkannya, disebut *electrothermic*.

2.3.1 Muatan Listrik (Q)

Muatan merupakan suatu sifat dasar dan ciri khas dari partikel dasar. Hal ini dikarenakan suatu partikel atau zat memiliki 2 jenis muatan yaitu muatan positif dan muatan negatif (Sears, 1969 : 557). Kedua muatan ini menimbulkan suatu gaya yang menyebabkan terjadinya gaya tarik dan gaya tolak. Menurut pendapat Sears (1969 : 558) muatan listrik bukanlah suatu yang dapat diciptakan ataupun dibangkitkan, tetapi proses mendapatkan muatan dari berpindahnya suatu barang dari satu benda ke satu benda yang lainnya, sehingga benda tersebut akan kelebihan satu barang dan benda lainnya akan kekurangan. Barang menurut Sears (1969 : 558) adalah suatu elektron yang memiliki muatan negatif. Menurut model atom yang dikemukakan oleh Niels Bohr, suatu atom yang merupakan satuan terkecil penyusun benda memiliki tiga partikel subatom yang menyusun yaitu elektron yang bermuatan negatif, proton yang bermuatan positif, dan neutron yang bermuatan netral.

Dari tinjauan makro, muatan zat sebenarnya merupakan muatan bersih atau muatan lebih. Jika ada satu atau lebih elektronnya terambil, struktur bermuatan positif yang tertinggal disebut ion positif. Sedangkan ion negatif adalah sebuah atom yang memperoleh tambahan satu atau lebih elektron.. Proses berkurang dan bertambahnya elektron disebut ionisasi (Sears, 1969 : 559). Muatan biasanya dinyatakan dengan lambang q .

2.3.2 Hukum Coulomb

Gaya F pada hukum Coulomb menyatakan besar gaya listrik yang diberikan masing-masing benda bermuatan kepada yang lainnya. Jika kedua muatannya sejenis, maka gaya pada masing-masing muatan saling menjauhi (tolak-menolak). Sebaliknya

jika kedua muatannya tidak sejenis, maka gaya pada masing-masing muatan mempunyai arah menuju benda yang lain (tarik-menarik). (Sears,1969 : 564)

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2-1)$$

Dengan :

F : gaya *Coulomb* (N)

ϵ_0 : konstanta permitifitas ($8.85 \times 10^{-12} F/m$)

r : jarak antara muatan q_1 dan q_2 (m)

q_1, q_2 : muatan Listrik (Q)

2.3.3 Medan Listrik

Medan listrik timbul karena adanya gaya listrik pada setiap partikel yang bermuatan. Gaya listrik ini memiliki besar dan arah (Sears,1969 : 571). Partikel positif didorong kearah medan, sedangkan muatan negatif kearah sebaliknya. Medan listrik akan dihasilkan oleh satu atau lebih muatan listrik, serta dapat disamakan atau dibedakan arah magnetisasinya dari satu tempat ke tempat lainnya. Medan listrik atau kadang disebut intensitas listrik atau kuat medan listrik dinotasikan dengan huruf E , dengan:

$$E = k \frac{q}{r^2} \quad (2-2)$$

Dengan :

E : intensitas medan listrik (V/m)

Q : muatan listrik (C)

k : konstanta ($\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$)

r : jarak antar muatan (m)

Selain dipengaruhi oleh besarnya muatan q dan jarak antar muatan, intensitas medan listrik juga dipengaruhi oleh distribusi medan listrik. Distribusi medan listrik adalah penyebaran medan listrik pada ruang yang terdapat di antara elektroda positif (anoda) dan negatif (katoda). Distribusi medan listrik ini memiliki tingkat intensitas yang berbeda pada tiap titik dalam jarak sela sehingga menentukan juga besarnya nilai tegangan tembus yang terjadi. Besarnya intensitas medan listrik pada sebuah titik adalah

$$E = \frac{\Delta U}{\Delta x} \quad (2-3)$$

Dengan :

E : intensitas medan listrik/kuat medan listrik pada sebuah titik
(V/m)

ΔU : beda potensial antara dua titik yang berdekatan (V)

Δx : jarak antara dua titik yang berdekatan (m)

Ukuran seragam atau tidaknya distribusi medan listrik diantara susunan elektroda dapat diketahui dari nilai efisiensi medan listrik yaitu: (Dachlan, H.S., Dhofir, M., Fernanda, V, 2008 : 3)

$$\eta = \frac{E_{rata-rata}}{E_{maksimum}} \quad (2-4)$$

Sehingga,

$$E_{rata-rata} = \eta \cdot E_{maksimum} \quad (2-5)$$

Dengan :

$$E_{maksimum} = \frac{U_d}{s \cdot \eta} \quad (2-6)$$

$$U_d = E_{maksimum} \cdot s \cdot \eta \quad (2-7)$$

Dengan :

η : efisiensi medan listrik pada susunan elektroda

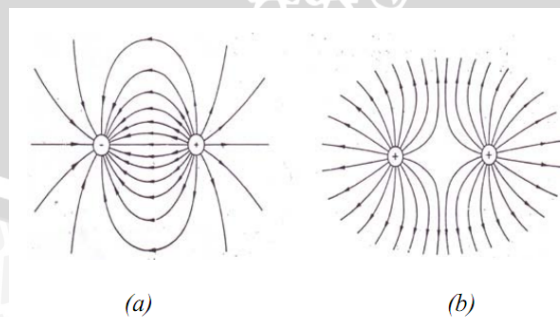
$E_{rata-rata}$: kuat medan listrik rata-rata (V/m)

$E_{maksimum}$: kuat medan listrik tertinggi (V/m)

U_d : tegangan tembus pada susunan elektroda (kV)

s : jarak sela antar elektroda (m)

Gambar di bawah ini menunjukkan dua medan listrik sederhana yang telah dipetakan dengan bantuan garis gaya.



Gambar 2.3 Pemetaan Medan Listrik Dengan Bantuan Garis Gaya

a. Muatan sejenis

b. Muatan tidak sejenis

Sumber: Pasaribu, 2008 : 13

2.4 Tegangan Tembus

Tegangan tembus merupakan fenomena yang terjadi karena adanya kegagalan isolasi. Tegangan tembus yang akan dibahas disini adalah tegangan tembus dalam udara. Tembus di dalam gas atau udara adalah transisi pelepasan bertahan dan pelepasan tidak tertahan. Peningkatan arus yang tinggi dalam suatu proses tembus disebabkan oleh proses ionisasi. Teori yang menjelaskan mekanisme tembus dengan kondisi yang berbeda dijelaskan oleh teori *Streamer* dan teori *Townsend*.

Teori *Streamer* dikemukakan oleh Raether, Meek, dan Loeb sekitar tahun 1940. Teori ini menjelaskan bahwa tegangan tembus terjadi karena adanya medan yang tidak homogen serta tekanan udara yang relatif tinggi. Teori ini memperkirakan bahwa perkembangan suatu pelepasan muatan hingga tembus terjadi secara langsung dari *avalanche* (banjiran elektron) tunggal yang akan mengembangkan muatan ruang menjadi suatu streamer plasma. *Avalanche* tunggal tersebut akan mengalami distorsi medan utama karena adanya muatan ruang, sehingga pada bagian ujung *avalanche* terjadi peningkatan medan yang tinggi. Di daerah medan tinggi ini terjadilah proses ionisasi dan proses rekombinasi. Proses rekombinasi ini akan membebaskan energi foton yang akan mengionisasi atom netral yang berada didepan dan belakang *avalanche* tunggal, sehingga mengakibatkan terbentuknya *avalanche-avalanche* baru. Proses ini berlangsung terus menerus sehingga *avalanche-avalanche* yang terbentuk menyatu membentuk kanal antara elektroda positif dan negatif dan tembus streamer terjadi.

2.5 Proses Ionisasi

Udara ideal adalah gas yang hanya terdiri dari molekul netral, yang tidak mengalirkan arus listrik pada kondisi normalnya. Pada kenyataannya udara sekitar tidak hanya terdiri dari molekul netral saja, sebagian kecil ada yang berupa ion dan elektron bebas, yang akan mengakibatkan udara dapat mengalirkan arus listrik walupun kecil dan terbatas. Pada kondisi normal udara bersifat isolator, namun bila ada proses ionisasi dapat berubah sifat menjadi konduktor. Kegagalan udara atau gas sebagai isolator bergantung pada jumlah elektron bebas di dalamnya. Konsentrasi elektron bebas ini pada keadaan normal sangat kecil dan ditentukan oleh pengaruh radiasi dari luar, seperti radiasi ultra violet dari sinar matahari, radiasi radioaktif dari bumi, radiasi sinar kosmis dari angkasa luar dan sebagainya, yang kesemuanya dapat menyebabkan udara terionisasi (Sinuraya,2002 : 3)

Ionisasi yang akan dibahas adalah yang diakibatkan adanya medan listrik pada udara tersebut yang menimbulkan tumbukan elektron. Jika di antara dua buah elektroda diterapkan suatu tegangan maka akan timbul suatu medan listrik E yang mempunyai besar dan arah tertentu. Di dalam medan listrik, bila sebuah elektron dengan muatan e ditempatkan dalam medan listrik E , maka elektron-elektron tersebut akan mendapat tambahan energi yang cukup besar untuk merangsang timbulnya pelepasan muatan dari molekul-molekul netral di sekitarnya, yang besarnya adalah

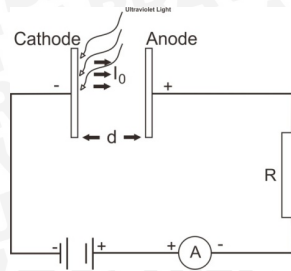
$$W = e \cdot E \cdot x = \frac{1}{2} m_e v_e^2 \quad (2-8)$$

Dengan :

- W : energi
- e : muatan elektron
- E : medan listrik (V/m)
- m_e : massa elektron
- v_e : kecepatan elektron

Jika gradien tegangan yang ada cukup tinggi maka jumlah elektron yang diionisasikan akan lebih banyak dibandingkan jumlah ion yang ditangkap menjadi molekul oksigen. Elektron-elektron akan bergerak menuju anoda secara kontinu, sambil berbenturan sehingga akan membebaskan lebih banyak elektron. Ionisasi akibat benturan ini merupakan proses yang penting pada kegagalan udara atau gas sebagai isolator. Dalam proses ionisasi dikenal satuan ionisasi atau kemungkinan ionisasi yang didefinisikan sebagai jumlah pasangan ion yang dapat dibebaskan oleh sebuah elektron yang bergerak sepanjang lintasan 1 cm dalam gas bertekanan 1 mm Hg. Diketahui bahwa untuk energi sebesar 150 eV, akan dibebaskan 10 pasang ion jika elektron bergerak sepanjang 1 cm pada tekanan 1 mm Hg (Sinuraya, 2002 : 3).

Karena gerakan elektron adalah fungsi dari tegangan dan arahnya berlawanan dengan arah arus listrik, maka jika beda potensial diberikan di antara dua elektroda (katoda dan anoda), arus yang menuju katoda akan bertambah perlahan-lahan sesuai dengan penambahan elektron yang terjadi. Arah gerakan elektron ini sesuai dengan arah kuat medan yang ada. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.4

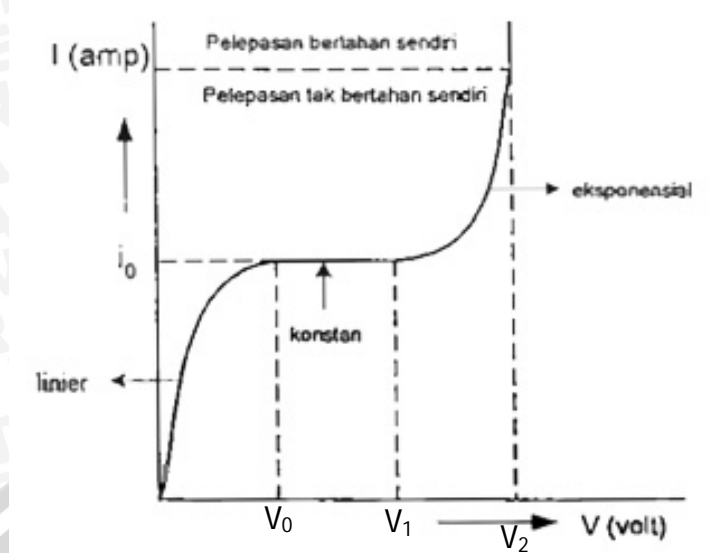


Gambar 2.4 Rangkaian Percobaan Tembus Townsend

Sumber: Naidu, 1995: 18

Perubahan arus di antara dua elektroda plat sejajar sebagai fungsi dari kuat medan yang diterapkan, pertama kali diselidiki oleh *Townsend*. Menurut *Townsend* arus mula-mula naik sebanding dengan tegangan yang diterapkan, sehingga bagian awal grafik ini linier sebab pertambahan elektron yang dibebaskan sebanding dengan naiknya tegangan yang diterapkan. Selanjutnya, pertambahan tegangan dari V_1 ke V_2 tidak akan menyebabkan pertambahan arus. Arusnya konstan pada harga i_0 , yaitu arus foto listrik yang dihasilkan di katoda oleh penyinaran sinar ultraviolet. Arusnya konstan, karena semua elektron yang dibebaskan karena penyinaran tersebut sudah habis. (Naidu, 1995 : 18)

Jika tegangan dinaikkan terus sehingga melebihi V_2 , maka arusnya akan naik secara eksponensial. Kenaikan arus sesudah tegangan melebihi V_2 menurut *Townsend* disebabkan oleh ionisasi gas karena benturan elektron. Pada waktu kuat medan listrik naik, elektron yang meninggalkan katoda semakin lama semakin dipercepat, sehingga memiliki energi yang cukup untuk memungkinkan terjadinya proses ionisasi karena menumbuk dengan atom atau molekul gas. Tumbukan ini akan menimbulkan elektron baru, yang juga memperoleh tambahan energi dari medan listrik sehingga mampu pula melakukan proses ionisasi. Dengan demikian, jumlah yang dibebaskan makin lama makin banyak dan arusnya pun makin besar. Jika tegangannya telah mencapai suatu harga kritis V_s , maka arus bertambah dengan sangat cepat dan akhirnya akan terjadi pelepasan bertahan sendiri seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Grafik Pertumbuhan Arus Townsend

Sumber: Sinuraya, 2002 : 5

2.6 Korona

Korona merupakan gejala pelepasan muatan elektron dari molekul udara di sekitar penghantar bertegangan tinggi sehingga akan tampak pijaran bercahaya di sekitar penghantar dan mengeluarkan suara desis. Gejala ini penting dalam teknik tegangan tinggi terutama dimana medan tak seragam tidak dapat dihindari. Korona yang terjadi di daerah medan listrik yang tak seragam ini dianggap merugikan karena menimbulkan rugi-rugi daya pada saluran transmisi tegangan tinggi dan karena merusak bahan isolasi (Naidu, 1995 : 29). Namun korona ini merupakan dasar pembuatan alat, seperti *electrostatic precipitator* (EP).

Gradien potensial yang dibutuhkan untuk membangkitkan korona pada permukaan konduktor biasa disebut dengan kuat medan korona atau kuat medan kritis. Untuk udara pada kawat paralel kuat medan kritis (E_c) dapat didefinisikan sebagai berikut (Naidu, 1995 : 29)

$$E_c = 3,1 \times 10^6 m d \left[1 + \frac{0.301}{\sqrt{dR}} \right] \quad (2-9)$$

Dengan :

E_c : kuat medan korona (V/m)

m : faktor iregularitas

d : densitas udara relatif $\left(\frac{0.392P}{T} \right)$

R : jari-jari kawat (m)

Untuk $d = 1$, tekanan atmosfernya 760 mmHg dan tempertaur $(25+273)^{\circ}\text{K}$

P : tekanan atmosfer (mmHg)

T : temperatur ($^{\circ}\text{K}$)

2.6.1 Proses Terjadinya Korona

Proses terjadinya korona dimulai dengan terbebaskannya ion dengan perantaraan pengion dari luar, yang dapat berupa fotoionisasi, ionisasi termal, maupun ionisasi karena benturan elektron. Bila elektron berada dalam medan listrik, maka elektron tersebut akan dipercepat menuju anoda. Dalam perjalanannya menuju anoda, elektron tersebut akan membentur molekul gas atau udara yang ada di sekitar anoda. Jika medan listrik cukup besar untuk menghasilkan energi kinetik elektron yang mampu melepaskan elektron dari kulit terluar atom molekul maka dalam benturan tersebut akan dihasilkan elektron bebas yang baru. Elektron baru juga akan mengalami percepatan oleh medan listrik menuju anoda. Bila elektron baru memiliki energi kinetik yang cukup besar, maka jika terjadi benturan akan terjadi ionisasi juga. Bila hal ini terjadi terus menerus, memungkinkan adanya banjir elektron menuju anoda. Proses ini disebut mekanisme primer. Mekanisme sekunder terjadi bila ada ion yang membentur permukaan penghantar sehingga akan dihasilkan elektron baru. Pada proses benturan oleh elektron di atas juga akan dihasilkan ion positif yang berasal dari molekul gas yang ditinggalkan oleh elektron. Ion positif yang memiliki massa lebih besar dari elektron akan bergerak dipercepat menuju katoda dengan pergerakan lebih lambat dari pergerakan elektron. Oleh karena itu, ion positif ini pada umumnya tidak dapat mengionisasikan molekul gas. Di antara dua penghantar tersebut kini telah terbentuk banjir elektron yang menuju anoda dan banjir ion positif menuju katoda. (Sinuraya,2002 : 6)

Proses pelepasan elektron dibagi menjadi dua seperti pada Gambar 2.5 yaitu:

- a. Pelepasan tak bertahan yaitu pelepasan yang akan berhenti bila energi yang diterapkan dari luar adalah tetap.
- b. Pelepasan bertahan sendiri yaitu pelepasan yang ada terus menerus walaupun besarnya energi yang diterapkan dari luar adalah tetap.

Selain proses ionisasi, proses rekombinasi cukup penting pada korona.

Rekombinasi adalah bergabungnya kembali muatan positif dan negatif. Energi potensial dan energi kinetik pada proses rekombinasi elektron, atau ion akan terpancar dalam bentuk foton. Jika di dekat elektron ada suatu badan netral, maka energi yang dibebaskan akan diserap oleh badan netral tersebut dan kemudian dapat digunakan

untuk membebaskan elektron. Rekombinasi mempunyai laju kecepatan yang sebanding dengan konsentrasi partikel yang ada. Makin banyak partikel yang terdapat per satuan volume, makin cepat terjadi rekombinasi.

Korona unipolar yang digunakan pada *electrostatic precipitator* (EP) adalah korona yang stabil, pelepasan gas bertahan sendiri diantara sebuah elektroda emisi seperti sebuah kawat dan sebuah elektroda penerima atau elektroda pasif seperti sebuah silinder atau lempengan plat. Jarak normal elektroda adalah beberapa sentimeter dan besar tekanan udaranya adalah satu atmosfer. Proses ionisasi dibatasi dengan atau oleh daerah di sekitar pijaran di dalam medan listrik yang besar, berbatasan dengan elektroda emisi.

2.6.2 Jenis Korona

Sesuai dengan polaritas medan listrik, maka korona dibagi menjadi dua jenis, yaitu: (Sinuraya, 2002 : 8)

a. Korona negatif

Korona yang terjadi pada elektroda negatif atau pada saat siklus negatif pada sumber arus bolak balik. Pada korona negatif terjadi ionisasi primer maupun ionisasi sekunder. Elektron yang dihasilkan pada proses ionisasi, akan mengalir menjauhi elektroda negatif dan menuju elektroda positif. Ion positif akan tetap berada di medan negatif. Ion positif akan memperlemah medan negatif. Medan negatif akan menjadi kuat kembali setelah ion positif menuju elektroda negatif. Ketika medan negatif telah kuat kembali setelah ion positif menuju elektroda negatif. Ketika medan negatif telah kuat kembali, maka akan terjadi ionisasi kembali. Ionisasi atau pelepasan akan berupa pulsa karena ionisasi atau pelepasan ini hanya akan terjadi pada kuat medan tertentu dan akan berupa pelepasan sebagian atau parsial yang berulang. Korona negatif dapat terlihat sebagai busur api pada permukaan konduktor yang merupakan arus elektron di udara yang menggambarkan kegagalan isolasi udara pada permukaan konduktor.

b. Korona positif

Korona yang terjadi pada elektroda positif atau pada siklus positif sumber arus bolak balik. Mekanisme korona positif mempunyai sifat yang sama dengan korona negatif. Percikan api yang terlihat pada permukaan merupakan aliran ion positif menuju elektroda negatif. Pada korona positif, elektron primer dihasilkan pada atau diantara batas luar pijaran yang terlihat

sampai ke kawat positif dan, dalam pergerakan elektron primer menuju medan yang kuat pada daerah pijaran, akan menghasilkan banyak elektron ion positif sebagai hasil dari tumbukan ionisasi. Elektron akan terkumpul pada kawat, sementara ion positif akan tergerak menuju elektroda pasif. Kemungkinan besar, sumber elektron primer yang diperlukan untuk mempertahankan korona positif adalah pelepasan elektron dari molekul gas oleh radiasi sinar ultraviolet di daerah pijaran yang terlihat. Ionisasi harus terjadi pada daerah yang sangat dekat dengan pijaran korona karena kebanyakan gas tidak tertwmbus cahaya radiasi panjang gelombang pendek pada daerah ultraviolet. Pijaran yang terlihat membungkus kawat korona adalah bukti difusi alamiah proses ionisasi. Sehingga jelaslah bahwa kawat korona hanya berfungsi sebagai elektroda pengumpul elektron dan tidak melakukan proses ionisasi. Asalkan kawat tersebut halus dan bulat maka kawat tersebut tidak akan mempengaruhi konsentrasi pelepasan pada pita atau sikat. Terdapat dua syarat yang harus dipenuhi agar diperoleh baik korona negatif maupun positif, yaitu pertama, harus terdapat pengurangan proses ionisasi disekitar elektroda korona, ion yang mengalir dari daerah pelepasan ionisasi aktif harus dapat membangkitkan jarak efektif muatan di dalam daerah pelepasan ionisasi pasif.

2.6.3 Faktor Yang Mempengaruhi Terjadinya Korona

Ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi timbulnya korona. Faktor-faktor tersebut meliputi: (Sinuraya,2002 : 9)

2.6.3.1 Tegangan

Gradien tegangan pada penghantar yang bertegangan tinggi menyebabkan terjadinya percepatan pada ion di sekitar penghantar. Besarnya tegangan korona ini didapatkan dari integrasi persamaan: (Hayt,2000 : 100)

$$V_c = \int E dl \quad (2-10)$$

$$V_c = \int_{r_1}^{r_2} E_c dr \quad (2-11)$$

$$V_c = E_c r \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2-12)$$

Dengan :

V_c : tegangan kritis korona (V)

E_c : kuat medan korona (V/m)

r : jari-jari korona (m)

r_1 : jari-jari kawat (m)

r_2 : jarak antara kawat dengan plat (m)

Jika diantara elektroda diterapkan suatu tegangan, V , maka akan timbul suatu medan listrik yang mempunyai besaran dan arah. Di dalam medan listrik, elektron akan mengalami percepatan. Percepatan akibat medan listrik dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$a = \frac{eE}{m_e} m/s^2 \quad (2-13)$$

Dengan :

a : percepatan elektron (m/det^2)

e : muatan elektron (coulomb)

E : kuat medan listrik (V/m)

m_e : massa elektron (gr)

Medan listrik bergantung pada bentuk dan konfigurasi elektroda. Jika tegangan yang diterapkan menghasilkan kecepatan elektron yang sangat lambat, maka tidak akan terjadi proses ionisasi, karena energi yang dihasilkan tidak cukup untuk membebaskan elektron berikutnya. Bila kecepatan elektron yang dihasilkan terlalu tinggi, maka ionisasi juga akan sulit terjadi. Dalam keadaan seperti ini, ada kemungkinan elektron bebas tersebut dalam pergerakannya akan mendekati sesuatu atom, tanpa membebaskan elektronnya.

Menurut *Townsend*, perubahan arus antara dua elektroda plat yang sejajar adalah fungsi dari kuat medan yang diterapkan. Dari Gambar 2.4 dapat dilihat bahwa awalnya kenaikan arus sebanding dengan tegangan yang diterapkan. Hal ini disebabkan waktu diawal sudah tersedia elektron bebas yang memungkinkan terjadinya penambahan arus secara linier sesuai dengan bertambahnya tegangan. Hal ini berlaku sampai dengan tegangan V_1 . Selanjutnya, penambahan tegangan dari V_1 ke V_2 tidak akan menyebabkan penambahan arus. Arusnya konstan pada nilai i_0 karena semua elektron bebas yang mula-mula ada telah bergerak sesuai dengan pergerakan arus listrik. Keadaan ini disebut kejenuhan.

Jika tegangan terus dinaikkan melebihi V_2 maka arus akan meningkat secara eksponensial. Peningkatan arus secara eksponensial ini disebabkan oleh ionisasi udara akibat benturan elektron. Ketika kuat medan naik, maka kecepatan elektron yang meninggalkan katoda makin dipercepat, sehingga kecepatan yang dihasilkan akan memungkinkan terjadinya ionisasi. Benturan elektron akan menghasilkan elektron

bebas yang baru. Elektron bebas baru akan mengalami percepatan dan ionisasi juga. Bila proses ini berlangsung terus menerus, maka elektron bebas semakin banyak sehingga akan terjadi banjir elektron yang membuat arus naik secara eksponensial. Jika tegangan telah mencapai suatu nilai kritis V_s , maka arus akan bertambah sangat cepat, walaupun tegangan yang diterapkan adalah konstan (pelepasan bertahan sendiri).

2.6.3.2 Elektroda

Elektroda memegang peranan sangat penting pada pelepasan di udara. Hal ini disebabkan katoda berfungsi sebagai pengion dalam menyediakan elektron untuk:

- a. Mengawali pelepasan,
- b. Mempertahankan pelepasan,
- c. Menyelesaikan pelepasan.

Pelepasan elektron pada elektroda dapat disebabkan oleh beberapa hal, yaitu:

- a. Emisi fotoelektrik,
- b. Emisi elektron akibat dampak ion positif,
- c. Emisi termionik,
- d. Emisi medan.

Elektroda juga berpengaruh pada pendistribusian medan listrik. Hal ini disebabkan oleh besar medan listrik yang dihasilkan disekitar elektroda bergantung pada bentuk permukaan elektroda. Parameter-parameter bentuk elektroda yang mempengaruhi besar medan listrik adalah:

a) **Diameter / Luas permukaan elektroda**

Kuat medan listrik berbanding terbalik dengan jarak. Semakin jauh satu titik dengan muatan listrik, semakin kecil kuat medan listrik tersebut. Pada suatu elektroda, diasumsikan titik pusat dari kawat merupakan letak dari muatan listrik, maka besar medan listrik pada permukaan penghantar ditentukan oleh jari-jari elektroda tersebut. Besar medan listrik dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon r} \quad (2-14)$$

Dengan :

- E : kuat medan listrik (V/m)
 Q : muatan listrik (coulomb)
 ϵ : permitivitas bahan elektroda
 r : jari-jari elektroda (m)

Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa ketika jari-jari atau diameter suatu penghantar semakin besar, maka medan listrik yang dihasilkan semakin kecil. Pada penghantar dengan jari-jari atau diameter yang lebih kecil akan dihasilkan percepatan elektron yang lebih besar dari elektroda yang berdiameter lebih besar. Akibat kecepatan elektron yang ada di sekitar elektroda berdiameter lebih kecil akan lebih besar dari elektroda berdiameter besar, maka kemungkinan kegagalan pada elektroda berdiameter kecil akan lebih besar dari elektroda berdiameter lebih besar.

b) Konfigurasi elektroda

Konfigurasi elektroda menyebabkan resultan medan listrik yang terjadi pada suatu penghantar. Bila resultan semakin besar, maka kemungkinan terjadi korona semakin besar dan sebaliknya.

c) Jenis elektroda

Jenis logam dari suatu elektroda akan menentukan jumlah elektron yang ada pada udara, sehingga akan mempengaruhi terjadinya ionisasi dan korona.

d) Keadaan permukaan elektroda

Keadaan permukaan elektroda menentukan pendistribusian tegangan pada permukaan elektroda sehingga gradien tegangan di tiap-tiap titik disekeliling elektroda akan berbeda-beda tergantung dari permukaan elektroda.

2.6.3.3 Keadaan cuaca

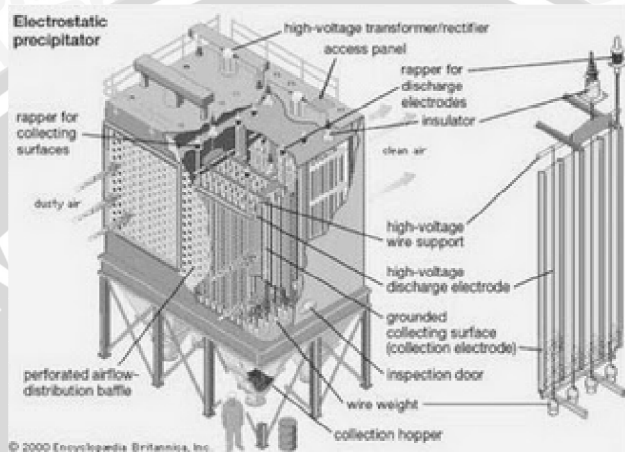
Beberapa dari cuaca yang dapat mempengaruhi proses terjadinya korona antar lain kerapatan udara, kelembaban udara, angin, dan suhu. Pada kerapatan udara tinggi, maka korona yang terjadi semakin kecil. Jika kerapatan udara semakin padat, maka partikel bebas yang terdapat di udara akan semakin banyak sehingga kuat medan listrik akan semakin kecil. Partikel bebas mempunyai polaritas yang berlawanan dengan medan listrik sehingga partikel-partikel akan memperlemah kuat medan listrik.

2.6.3.4 Partikel dekat konduktor

Adanya partikel asing disekitar konduktor akan mempermudah terjadinya pelepasan. Pelepasan terjadi sebelum partikel menyentuh permukaan konduktor, akibat adanya gangguan medan listrik. Gangguan medan listrik terjadi karena adanya pergerakan partikel disekitar konduktor tersebut. Partikel-partikel asing akan terinduksi sehingga menimbulkan distribusi muatan pada kedua ujung partikel. Distribusi muatan akan memperkuat medan listrik dan menyebabkan terjadinya pelepasan.

2.7 *Electrostatic Precipitator*

Pada Gambar 2.6 tampak sebuah *electrostatic precipitator* (EP) yang digunakan untuk mengendapkan partikel debu hasil gas buang. Prinsip dasar dari alat ini adalah menggunakan medan listrik untuk memisahkan partikel dari udara. Pada prakteknya EP dapat ditemukan dalam berbagai tipe dan konfigurasi. Proses pemisahan partikel dari gas dengan menggunakan medan listrik dapat disimpulkan sebagai berikut: (Ken Parker, 2003 : 21)



Gambar 2.6. *Electrostatic Precipitator*

Sumber: Cota, Harold.M. *Advanced Air Pollution Control Controlling Particulate Emissions with Electrostatic Precipitators*
(<http://ceenve3.civeng.calpoly.edu/cota/ENVE411-ESP.html>)

1. Memproduksi korona untuk membentuk ion-ion.
 2. Mengionisasi partikel dengan ion-ion yang terbentuk oleh proses korona.
 3. Perpindahan partikel yang telah terionisasi menuju medan listrik yang terbentuk.
 4. Partikel menempel pada elektorda pengumpul.
 5. Pembuangan partikel yang telah mengndap kedalam tempat penampungan.
- } (charging)
- } (collecting)
- } (removal)

Pemuatan partikel dapat terjadi secara alamiah selama pembentukan partikel itu sendiri, seperti yang disebabkan gesekan atau radiasi kosmos yang terus menerus menembus lapisan atmosfer bumi. Namun pemuatan secara alamiah ini terlalu kecil untuk dimanfaatkan dalam EP. Dari beberapa metode pemuatan partikel, korona oleh tegangan tinggi arus searah paling efektif dan banyak digunakan untuk EP. Korona biasanya dibangkitkan diantara sebuah kawat, atau elektroda aktif bertegangan tinggi dan tabung yang halus atau lempengan elektroda yang ditanahkan. Pada kondisi ini, korona yang terlihat berupa pijaran disekitar permukaan kawat tersebut. Ion positif dan ion negatif dalam jumlah besar terbentuk dalam daerah pijaran ini. Oleh kawat berpolaritas negatif, ion positif akan ditarik oleh kawat dan ion negatif akan ditarik oleh lempengan atau tabung yang ditanahkan. Walau ion positif dan negatif terbentuk dalam jumlah yang sama di daerah pijaran korona di sekitar kawat, namun 99% udara diantara kawat dan elektroda yang ditanahkan hanya mengandung ion negatif. (Sinuraya, 2002 : 14).

2.7.1 *Discharge Electrodes (DE)*

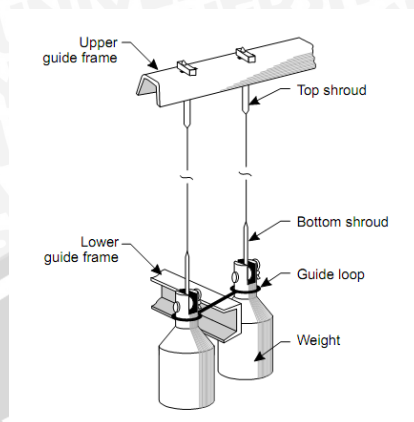
Discharge Electrodes adalah kawat konduktor berdiameter yang sangat kecil dan tergantung secara vertikal didalam EP. *Discharge Electrodes (DE)* berfungsi memancarkan arus *charging* dan menghasilkan medan listrik yang kuat sehingga dapat mengionisasi partikulat yang ada didalam aliran gas. Medan listrik yang dihasilkan tersebut memaksa partikel debu yang telah terionisasi didalam aliran gas untuk bergerak atau bermigrasi kearah plat pengumpul, sehingga partikel debu dapat mengendap di plat pengumpul.

Adapun beberapa tipe dari *discharge electrodes (DE)* yaitu:

- a. *Straight round wires*
- b. *Twisted wire pairs*
- c. *Barbed discharge wires*
- d. *Rigid masts*
- e. *Rigid frames*
- f. *Rigid spiked pipes*
- g. *Spiral wires*

Karena tergantung secara vertikal, pada bagian atas kawat diberi *frame* yang mengikat dan pada bagian bawah kawat diberi beban agar kawat tetap lurus. Pada umumnya kawat yang digunakan untuk DE terbuat dari baja, *stainless steel*, tembaga, titanium atau aluminium, sedangkan untuk pemberatnya terbuat dari besi yang

berukuran 11,4 kg atau lebih. Pada bagian ujung atas dan bawah kawat seperti pada Gambar 2.7 biasanya dilindungi oleh lapisan baja untuk meminimalisir busur api dan korosi pada kawat.

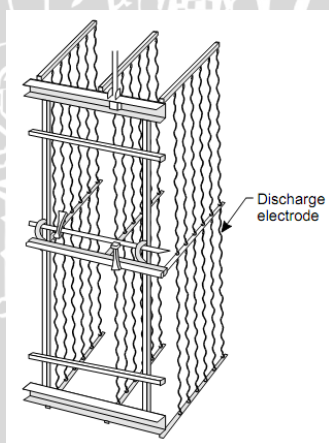


Gambar 2.7 Kawat Korona

Sumber: SI:412B *Electrostatic Precipitator Plan Review-Lesson 2 Electrostatic Precipitator Component* :hal.3

(http://yosemite.epa.gov/oaqps/EOGtrain.nsf/DisplayView/SI_412B_0-5?OpenDocument)

Selain tipe DE seperti diatas, ada tipe DE yang sering digunakan di beberapa negara Eropa dan Amerika yaitu tipe *rigid frame*. Tipe seperti pada Gambar 2.8 ini kawat-kawat diletakan sejajar dan dirangkai dalam sebuah *frame*. Hal ini bertujuan untuk mencegah kemungkinan kawat dapat berayun.



Gambar 2.8. Kawat Korona tipe rigid

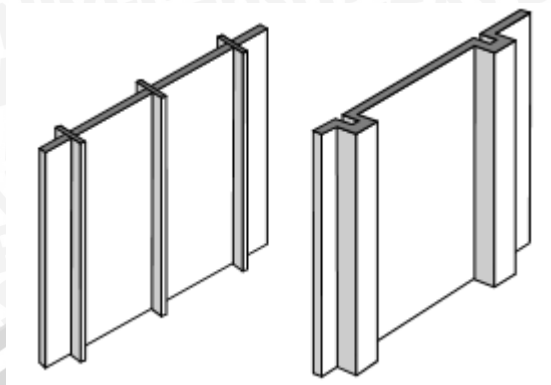
Sumber: SI:412B *Electrostatic Precipitator Plan Review-Lesson 2 Electrostatic Precipitator Component* : hal.4

(http://yosemite.epa.gov/oaqps/EOGtrain.nsf/DisplayView/SI_412B_0-5?OpenDocument)

2.7.2 Plat Pengumpul Debu (*Collection Electrodes*)

Collecting Electrodes (CE) didesain untuk menerima dan mempertahankan partikel yang mengendap sampai partikel tersebut masuk ke dalam pengumpul debu di bagian dasar *electrostatic precipitator* (EP). Plat pengumpul ini merupakan salah satu

bagian dari komponen penting EP. Pada prakteknya, CE memiliki banyak variasi bentuk seperti pada Gambar 2.9 di bawah ini.



Gambar 2.9. Plat pengumpul

Sumber: *SI:412B Electrostatic Precipitator Plan Review-Lesson 2 Electrostatic Precipitator Component*
: hal.6

(http://yosemite.epa.gov/oaqps/EOGtrain.nsf/DisplayView/SI_412B_0-5?OpenDocument)

2.7.3 Sumber Tegangan Tinggi DC

Sumber tegangan tinggi DC digunakan untuk membangkitkan medan listrik pada level tegangan tinggi yang memungkinkan. Tegangan ini harus dikontrol untuk mencegah terjadinya busur api dan percikan diantara elektroda plat pengumpul dan *discharge electrodes*. Dalam mengatur dan membangkitkan tegangan dibutuhkan tiga komponen yaitu

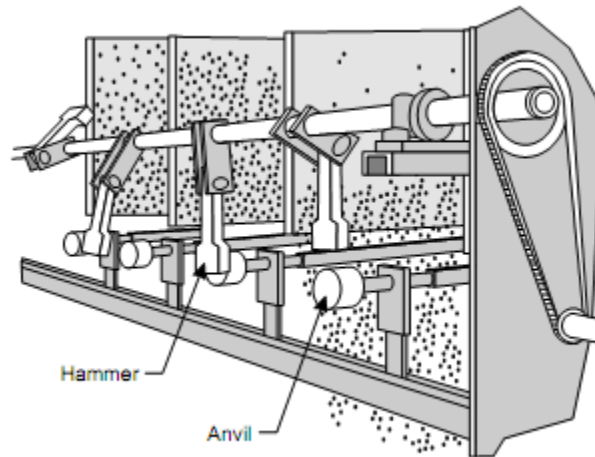
- a. Transformator *step up*
- b. *High Voltage Rectifier*
- c. AVR (*Automatic Voltage Regulator*)

2.7.4 *Rappers* (Penggetar)

Rappers pada *electrostatic precipitator* adalah suatu sistem yang dikontrol berdasarkan waktu. Alat ini digunakan untuk melepaskan atau membersihkan partikel debu dari plat pengumpul dan *discharge electrodes* dengan menggetarkan kedua elektroda tersebut. Untuk menggetarkan plat pengumpul digunakan beberapa macam metode antara lain penggetar yang digerakan secara elektrik dan mekanikal. Untuk penggetar yang digerakan secara elektrik digunakan sistem impuls magnetik, sedangkan bila digerakkan secara mekanikal digunakan palu.

Suatu sistem penggetar yang menggunakan palu terangkai didalam suatu rangkaian sumbu berputar seperti pada gambar dibawah ini. Saat sumbu berputar, palu bergerak mengikuti perputaran sumbu. Kemudian palu akan terjatuh disebabkan gaya

gravitasi dan menghantam bagian *anvil* yang terhubung dengan plat pengumpul sehingga debu yang menempel pada plat akan jatuh seperti pada Gambar 2.10.



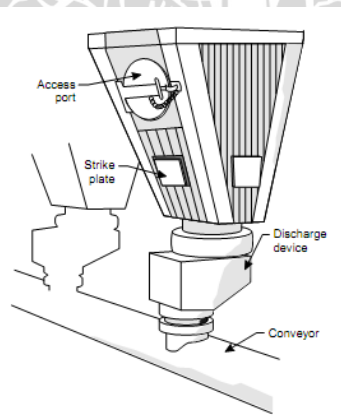
Gambar 2.10 Sistem penggetar (*Rapper*)

Sumber: SI:412B *Electrostatic Precipitator Plan Review-Lesson 2 Electrostatic Precipitator Component* : hal.9

(http://yosemite.epa.gov/oaqps/EOGtrain.nsf/DisplayView/SI_412B_0-5?OpenDocument)

2.7.5 *Hoppers*

Saat plat pengumpul digetarkan, debu akan jatuh kedalam *hopper* (tempat pengumpul) seperti Gambar 2.11 dan disimpan sementara sebelum dibuang dan digunakan kembali. Debu harus segera dibersihkan sebelum menumpuk sehingga sulit untuk dibersihkan. Biasanya tempat pengumpul ini didesain dengan kemiringan antara $50-70^{\circ}$ agar debu dapat mengalir secara bebas dari atas sampai bawah.



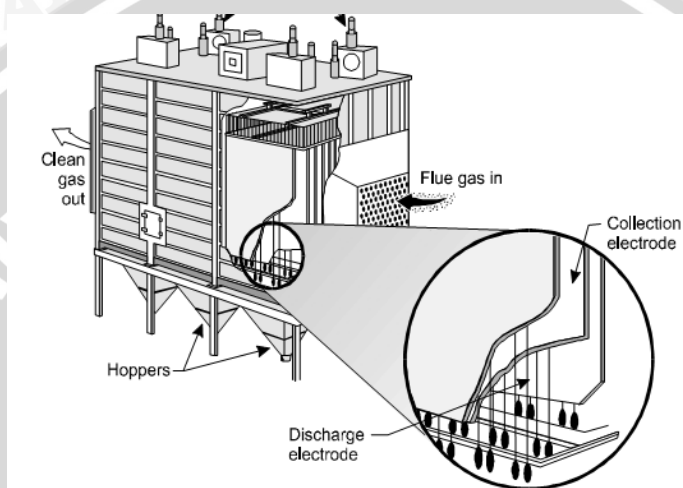
Gambar 2.11 Tempat pengumpul (*Hopper*)

Sumber: SI:412B *Electrostatic Precipitator Plan Review-Lesson 2 Electrostatic Precipitator Component* : hal.12

(http://yosemite.epa.gov/oaqps/EOGtrain.nsf/DisplayView/SI_412B_0-5?OpenDocument)

2.7.6 Prinsip Kerja *Electrostatic Precipitator*

Pada prinsipnya *electrostatic precipitator* (EP) menggunakan teori listrik statis dalam prakteknya. EP seperti pada Gambar 2.12 di bawah ini menggunakan kabel tipis, disebut *discharge electrodes*. Letak *discharge electrodes* adalah diantara plat-plat pengumpul (*collecting electrodes*) yang di *ground*. *Discharge electrodes* diberi tegangan tinggi arus searah negatif sehingga dapat menimbulkan medan listrik yang dapat mengionisasi partikel-partikel debu yang terbawa oleh aliran gas.

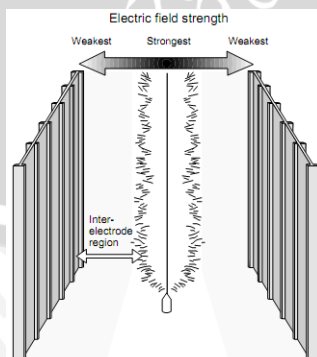


Gambar 2.12 Dry Electrostatic Precipitator

Sumber: SI:412B *Electrostatic Precipitator Plan Review-Lesson 1 Electrostatic Precipitator Operation* : hal.2

(http://yosemite.epa.gov/oaqps/EOGtrain.nsf/DisplayView/SI_412B_0-5?OpenDocument)

Pada Gambar 2.13 di bawah ini, dapat diamati distribusi medan listrik yang terjadi disekitar *discharge electrodes*. Semakin menjauh dari *discharge electrodes*, semakin lemah medan listrik yang ditimbulkan. Proses ionisasi partikel mulai terjadi di sekitar *discharge electrodes*.



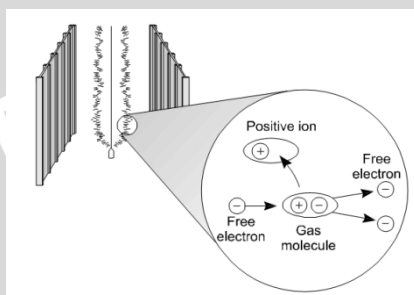
Gambar 2.13 Medan Listrik pada *electrostatic precipitator*

Sumber: SI:412B *Electrostatic Precipitator Plan Review-Lesson 1 Electrostatic Precipitator Operation* : hal.2

(http://yosemite.epa.gov/oaqps/EOGtrain.nsf/DisplayView/SI_412B_0-5?OpenDocument)

a) **Charging**

Pada proses ini partikel-partikel yang melewati *discharge electrodes* akan terionisasi karena adanya medan listrik disekitar elektroda. Selain itu disekitar elektroda juga terjadi lucutan korona (*Corona discharge*) atau biasa disebut pembentukan elektron bebas. Lucutan korona ini terjadi di sebagian area dari elektroda dan waktu terbentuknya sangat cepat sekali (dalam orde milisekon). Ciri-ciri lucutan korona terjadi adalah muncul cahaya kebiruan disekitar elektroda. Lucutan korona ini menimbulkan elektron bebas yang bergerak menjauhi elektroda seperti terlihat pada Gambar 2.14.

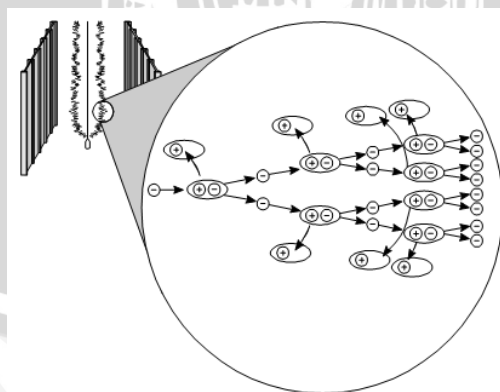


Gambar 2.14 Proses Lucutan Korona

Sumber: SI:412B Electrostatic Precipitator Plan Review-Lesson 1 Electrostatic Precipitator Operation : hal.3

(http://yosemite.epa.gov/oaqps/EOGtrain.nsf/DisplayView/SI_412B_0-5?OpenDocument)

Karena pergerakan yang cepat dari elektron bebas tersebut mengakibatkan tabrakan dengan molekul gas lain dan menciptakan elektron bebas yang baru dan partikel positif. Proses ini akan berlanjut terus menerus, sehingga menimbulkan banyak elektron bebas dan ion positif. Proses terciptanya elektron bebas ini disebut banjiravalanche (*Avalanche multiplication*) seperti terlihat pada Gambar 2.15.

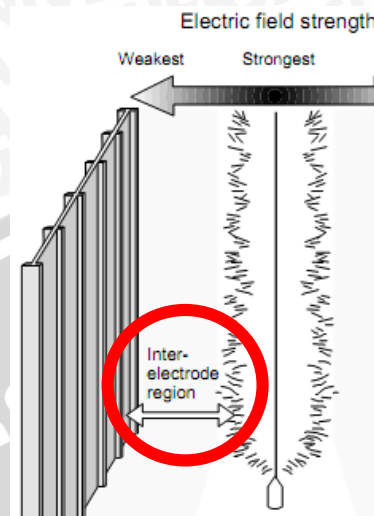


Gambar 2.15 Proses Banjiran Avalanche

Sumber: SI:412B Electrostatic Precipitator Plan Review-Lesson 1 Electrostatic Precipitator Operation : hal.3

(http://yosemite.epa.gov/oaqps/EOGtrain.nsf/DisplayView/SI_412B_0-5?OpenDocument)

Selanjutnya elektron tetap bergerak menjauhi elektroda negatif dan berada diluar area medan listrik yang sangat kuat terlihat pada Gambar 2.16, tepatnya elektron berada didaerah *inter-electrode area*.



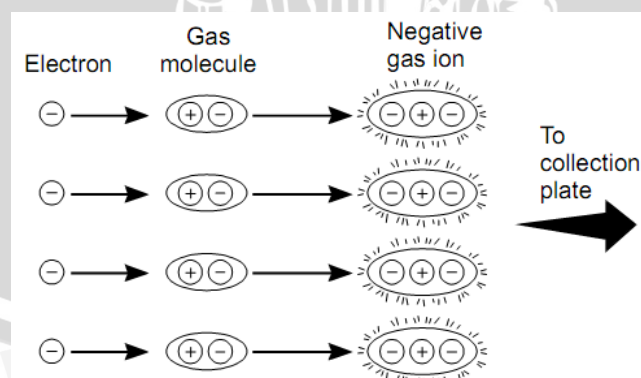
Gambar 2.16 Inter-electrode area

Sumber: SI:412B Electrostatic Precipitator Plan Review-Lesson 1 Electrostatic Precipitator

Operation : hal.2

(http://yosemite.epa.gov/oaqps/EOGtrain.nsf/DisplayView/SI_412B_0-5?OpenDocument)

Pada area seperti pada Gambar 2.17 di bawah ini terdapat molekul gas yang bertabrakan dengan elektron bebas yang dihasilkan akibat banjir avalanche tadi. Karena bertabrakan dengan elektron bebas, molekul gas tersebut menangkap elektron itu sehingga menimbulkan molekul gas ion negatif. Karena molekul bersifat lebih negatif, maka molekul gas ini akan bergerak menjauh elektroda negatif menuju elektroda positif (*collecting electrodes*).



Gambar 2.17 Ionisasi molekul gas di Inter-electrode area

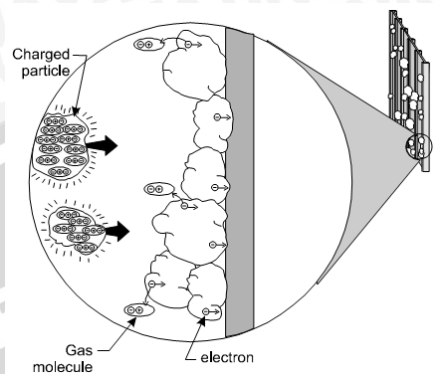
Sumber: SI:412B Electrostatic Precipitator Plan Review-Lesson 1 Electrostatic Precipitator

Operation : hal.4

(http://yosemite.epa.gov/oaqps/EOGtrain.nsf/DisplayView/SI_412B_0-5?OpenDocument)

b) **Collecting**

Saat partikel yang terionisasi mencapai elektroda positif (collecting electrodes), proses ionisasi tetap terjadi sehingga elektron dapat menarik elektron bebas lainnya membentuk banjir elektron, namun hanya sebagian partikel yang dapat terionisasi. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Kumpulan partikel menempel pada *collecting electrodes*

Sumber: SI:412B *Electrostatic Precipitator Plan Review-Lesson 1 Electrostatic Precipitator Operation* : hal.8

(http://yosemite.epa.gov/oaqps/EOGtrain.nsf/DisplayView/SI_412B_0-5?OpenDocument)

c) **Removal**

Pada proses ini partikel debu yang telah terakumulasi di elektroda positif (collecting electrodes) akan dibersihkan dengan beberapa proses. Proses tersebut antara lain, dengan menyemprotkan air, sehingga *collecting electrodes* bersih dari partikel debu. Partikel debu yang jatuh akan mengalir bersama air yang disemprotkan ke dalam *hopper* atau bak penambungan partikel debu.

2.8 Parameter-Parameter yang Dibutuhkan

2.8.1 Kuat Medan yang Dibutuhkan Untuk Mengionisasi Partikel

Kuat medan listrik pada *electrostatic precipitator* (EP) dibutuhkan untuk proses pengikatan partikel dengan mengubah muatan partikel melalui proses ionisasi. Untuk mendapatkan besarnya nilai kuat medan yang dibutuhkan untuk membangkitkan korona tersebut dilakukan perhitungan berdasarkan persamaan (2-9): (Naidu,1995 : 29)

$$E_c = 3,1 \times 10^6 m d \left[1 + \frac{0.301}{\sqrt{dR}} \right]$$

Dengan :

E_c : kuat medan korona (V/m)

m : faktor iregularitas

d : densitas udara relatif $\left(\frac{0.392P}{T} \right)$

R : jari-jari kawat (m)

2.8.2 Tegangan yang Dibutuhkan Untuk Mengionisasi Partikel

Tegangan korona merupakan tegangan yang dibutuhkan untuk membangkitkan kuat medan korona. Tegangan korona ini dapat dihitung dengan mengintegrasikan persamaan (2-10), sehingga didapatkan persamaan (2-12) : (Hayt,2000 : 100)

$$V_c = E_c r \ln \frac{r_2}{r_1}$$

Dengan :

V_c : tegangan kritis korona (V)

E_c : kuat medan korona (V/m)

r : jari-jari korona (m)

r_1 : jari-jari kawat (m)

r_2 : jarak antara kawat dengan plat (m)

2.8.3 Tegangan Operasi

Tegangan operasi merupakan tegangan yang digunakan untuk mengoperasikan *Electrostatic Precipitator* (EP). Tegangan aplikasi ini dapat diperoleh sesuai dengan persamaan: (Saidiman,2006 : 65)

$$V_a = V_c + E_c \frac{r^2 + r_1^2}{2r_1} \quad (2-15)$$

Dengan,

V_c : tegangan kritis korona (V)

E_c : kuat medan korona (V/m)

r : jari-jari korona (m)

r_1 : jari-jari kawat (m)

r_2 : jarak antara kawat dengan plat (m)

2.8.4 Pemuatan Partikel (*Particle Charging*)

Aplikasi EP di industri umumnya menggunakan ionisasi negatif (korona negatif). Hal ini dilakukan karena tegangan tembus yang terjadi lebih tinggi dibandingkan dengan ionisasi positif sehingga proses pemuatan partikel dapat berlangsung lama. Tujuan dari pemuatan partikel adalah untuk mengionisasi partikel karena adanya ion-ion bebas yang dapat menarik partikel menuju elektroda pengumpul. *Particle charging* atau pemuatan partikel oleh ion-ion terjadi didaerah plasma aktif dan permukaan elektroda pengumpul. Pada area ini terdapat ruang yang didalamnya tersebar ion netral, ion negatif, dan elektron bebas. Semua ion tersebut bergerak menuju

elektroda karena adanya medan listrik. Saat partikel yang ada didalam aliran gas melalui daerah ini terjadi dua macam mekanisme pemuatan, yaitu: (Ken Parker, 2003 : 27)

- Pemuatan yang disebabkan ion, atau biasa disebut pemuatan tumbukan. Pemuatan ini dipengaruhi oleh medan listrik yang dapat mengendalikan pergerakan ionisasi. Pemuatan ini cenderung berpengaruh pada partikel yang berdiameter lebih dari 1 mikrometer.
- Diffusion charging*, pemuatan yang disebabkan pergerakan ion yang acak dan dipengaruhi oleh temperatur dan *Brownian motion*. Pemuatan ini berpengaruh pada partikel dengan ukuran kurang dari 0,2 mikrometer.

Dalam beberapa tahun terakhir terdapat penemuan yang mensimulasikan model pemuatan partikel secara numerik. Beberapa analisis dikemukakan oleh *Cochet* yang mengembangkan persamaan untuk menentukan pemuatan partikel. Persamaan pemuatan yang disebutkan oleh *Cochet* dapat dilihat pada persamaan (2-16), yaitu: (Ken Parker, 2003 : 27)

$$Q_p = \left\{ \left(1 + \frac{2\lambda}{d_p}\right)^2 + \left(\frac{2}{1 + \frac{2\lambda}{d_p}}\right) \cdot \chi \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}\right) \right\} \pi \epsilon_0 d_p^2 E_c \quad (2-16)$$

Dengan :

Q_p : pemuatan partikel (C)

λ : *mean free electron path* = $6,61 \times 10^{-8} \left(\frac{T}{293}\right) \cdot \left(\frac{101,3 \times 10^3}{P}\right)$ (m)

ϵ_r : permitivitas elektrik

ϵ_0 : permitivitas elektrik ruang bebas = $8,85 \times 10^{-12}$ F/m

d_p : diameter partikel (m)

E_c : kuat medan listrik (V/m)

T : Temperatur (K)

P : Tekanan (Pa)

2.8.5 Kecepatan Gerak Partikel (*Migration Velocity*)

Kecepatan gerak dari suatu partikel di dalam medan pada *electrostatic precipitator* (EP) dipengaruhi oleh beberapa gaya, yaitu : (Ken Parker, 2003 : 29)

- Gaya elektrostatis (F_e)

Gaya elektrostatis adalah gaya yang disebabkan adanya pergerakan suatu muatan terhadap medan listrik. Gaya elektrostatis dapat dituliskan seperti persamaan (2-18) yaitu :

$$F_e = Q_p \cdot E \quad (2-17)$$

Dengan:

F_e : gaya elektrostatis (N)

Q_p : pemuatan partikel(C)

E : medan listrik (V/m)

b. Gaya *drag* (F_d)

Selain dipengaruhi gaya elektrostatis, pergerakan partikel di dalam medan listrik juga dipengaruhi oleh *viscous drag* dari gas. Gaya ini menurut hukum Stokes disebutkan seperti pada persamaan (2-19):

$$F_D = \frac{3\pi\mu d_p v_{th}}{C_o} \quad (2-18)$$

Dengan :

F_d : gaya *viscous drag* (N)

μ : viskositas gas (pa.s)

d_p : diameter partikel (m)

v_{th} : kecepatan migrasi partikel (m/s)

C_o : faktor *Cunningham*

$$C_o = 1 + 2,54 \left(\frac{\lambda}{d_p} \right) + 0,8 \left(\frac{\lambda}{d_p} \right) \exp\left(\frac{-0,55 d_p}{\lambda} \right) \quad (2-19)$$

Sehingga gaya yang bekerja pada suatu partikel didalam medan listrik yaitu :

(Ken Parker, 2003 : 30)

$$\begin{aligned} F_D &= F_E \\ \frac{3\pi\mu d_p v_{th}}{C_o} &= Q_p \cdot E \\ v_{th} &= \frac{Q_p \cdot E \cdot C_o}{3\pi\mu d_p} \end{aligned} \quad (2-20)$$

2.8.6 Efisiensi EP

Efisiensi merupakan nilai yang menunjukkan kemampuan EP dalam mengendapkan debu. Efisiensi ini dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti tertulis pada persamaan (2-22), yaitu: (Theodore, 2008 : 208)

$$eff = 1 - e^{-\left(\frac{v_{th} A}{q} \right)} \quad (2-21)$$

Dengan :

- eff : efisiensi (%)
 v_{th} : kecepatan migrasi partikel (m/s)
A : luas total plat pengumpul (m^2)
q : debit gas (m^3/s)

Pada proses pengujian model miniatur EP, jika berat debu sebelum dan sesudah EP diketahui maka efisiensi juga dapat diketahui. Hal ini didapatkan menurut persamaan (2-23),

$$\eta_{EP} = \frac{B_{plat}}{B_{awal} - B_{jatuh}} \times 100\% \quad (2-22)$$

Dengan :

- η_{EP} : efisiensi EP (%)
 B_{plat} : berat debu yang tertangkap oleh plat pengumpul (gram)
 B_{awal} : berat debu awal (gram)
 B_{jatuh} : berat debu yang terjatuh ke dalam bak penampungan (gram)

