

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Isolator Padat

Isolator listrik adalah bahan yang tidak bisa atau sulit melakukan perpindahan muatan listrik. Dalam bahan isolator valensi elektronnya terikat kuat pada atom-atomnya. Bahan-bahan ini dipergunakan dalam alat-alat elektronika sebagai isolator, atau penghambat mengalirnya arus listrik. Isolator berguna pula sebagai penopang beban atau pemisah antara konduktor tanpa membuat adanya arus mengalir ke luar atau antara konduktor. Istilah ini juga dipergunakan untuk menamai alat yang digunakan untuk menyangga kabel transmisi listrik pada tiang listrik. (Arismunandar, 1993)

Beberapa bahan, seperti kaca, kertas, atau teflon merupakan bahan isolator yang sangat bagus. Beberapa bahan sintetis masih "cukup bagus" dipergunakan sebagai isolator kabel. Contohnya plastik atau karet. Bahan-bahan ini dipilih sebagai isolator kabel karena lebih mudah dibentuk/diproses sementara masih bisa menyumbat aliran listrik pada voltase menengah (ratusan, mungkin ribuan volt). (Arismunandar, 1993)

Tahanan isolasi merupakan suatu tahanan dalam megaohm yang ada pada isolasi untuk menahan / timbul disebut arus isolasi yang terdiri dari dua komponen pokok:

- a) Arus yang mengalir di dalam isolasi yang terdiri dari: arus kapasitansi, arus penyerapan dielektris dan arus induksi yang kekal.
- b) Arus yang mengalir pada saluran-saluran yang terjadi karena keretakan pada permukaan isolasi, ini disebut arus bocor. Arus ini berubah atau berkurang selama ada tegangan. Faktor pokok penyebabnya adalah kualitas isolasi. (Pabla S.A, 1986)

Berdasarkan peraturan PUIL (Persyaratan Umum Instalasi Listrik) 2000, syarat konstruksi dari isolator antara lain :

1. Isolator harus mempunyai sudut lekuk yang licin dan tidak tajam untuk menghindari kerusakan penghantar pada waktu pemasangan.
2. Isolator harus demikian rupa sehingga pada keadaan terpasang penghantar tidak bersentuhan yang satu dengan yang lain, atau dengan bagian gedung atau benda lain.

Dan syarat mekanis, termis, dan elektris dari isolator adalah isolator harus cukup tahan terhadap tembusan dan loncatan listrik dan terhadap arus rambat, lagi pula harus cukup tahan terhadap gaya mekanis perubahan suhu dan cuaca, sesuai dengan keadaan kerja setempat. (Arismunandar, 1993)

Kertas kraft mengandung zat additive seperti *morpholine*, *oxyalkilamine*, *aromatic polyimine*, dan zat – zat yang lain yang diperlukan dalam pembuatan kertas kraft. Beberapa kandungan zat dalam kertas kraft seperti *iso-Phropyl Carbamate* dengan pelarut ethanol memiliki kandungan zat additive sebesar 6,6% dan kandungan nitrogen sebesar 0,9%, *n-Butyl Carbamate* dengan pelarut ethanol memiliki zat additive sebesar 6,5% dan kandungan nitrogen sebesar 0,8%, dan *iso-Butyl Carbamate* dengan pelarut ethanol memiliki zat additive sebesar 6,8% dan kandungan nitrogen sebesar 0,8%. (Akira, 1975)

2.2 Isolator Gas

Udara dan gas termasuk ke dalam bahan isolasi yang banyak digunakan untuk mengisolasi peralatan listrik tegangan tinggi (Fortescue, 1913:760). Menggunakan udara sebagai isolator lebih efisien daripada yang biasa dilakukan, namun menggunakan kombinasi udara dan dielektrik padat lebih efisien lagi. Isolasi berfungsi memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan, sehingga antara penghantar – penghantar tersebut tidak terjadi lompatan listrik (*flashover*) atau percikan (*spark-over*). (Arismunandar, 1983)

Untuk tegangan yang semakin tinggi diperlukan bahan isolasi yang mempunyai kekuatan isolasi yang lebih tinggi. Dan apabila tegangan yang diterapkan mencapai tingkat ketinggian tertentu, maka bahan isolasi tersebut akan mengalami pelepasan muatan yang merupakan suatu bentuk kegagalan listrik. Kegagalan ini menyebabkan hilangnya tegangan dan mengalirnya arus dalam bahan isolasi. Proses kegagalan pada bahan isolasi gas sangat bergantung dari pembawa muatan dalam gas. Pembawa muatan dalam hal ini adalah electron – electron dan ion – ion. Pembawa muatan ini bergerak karena medan listrik dan dalam pergerakannya mencapai energi tertentu untuk membentuk pembawa muatan baru melalui proses ionisasi. Karakteristik pembawa muatan pada gas sangat dipengaruhi oleh proses benturan dengan molekul. (Arismunandar, 1983)

Dalam proses pelepasan listrik ada beberapa mekanisme pembangkitan atau kehilangan ion baik dalam bentuk tunggal maupun dalam kombinasi. Proses dasar pelepasan dalam gas meliputi antara lain:

- a. Pembangkitan ion dengan cara benturan elektron (*collision*), fotoionisasi, ionisasi oleh benturan ion-positif, ionisasi thermal, pelepasan elektron (*detachment*), ionisasi kumulatif, dan efek gamma sekunder.
- b. Kehilangan ion dengan cara penggabungan (*attachment*) elektron, rekombinasi, dan difusi. (Arismunandar, 1983)

2.3 Proses Dasar Ionisasi

Udara ideal adalah gas yang hanya terdiri dari molekul – molekul netral, sehingga tidak dapat mengalirkan arus listrik. Tetapi dalam kenyataannya, udara yang sesungguhnya tidak hanya terdiri dari molekul – molekul netral saja tetapi ada sebagian kecil daripadanya berupa ion-ion dan elektron-elektron bebas yang akan mengakibatkan udara dan gas mengalirkan arus walaupun terbatas. (Arismunandar, 1983)

Kegagalan listrik yang terjadi di udara atau gas pertama – tama tergantung dari jumlah elektron bebas yang ada di udara atau gas tersebut. Konsentrasi elektron bebas ini dalam keadaan normal sangat kecil dan ditentukan oleh pengaruh radioaktif dari luar. Pengaruh ini dapat berupa radiasi ultra violet dari sinar matahari, radiasi radioaktif dari bumi, radiasi sinar kosmis dari angkasa luar dan sebagainya yang semuanya dapat menyebabkan udara terionisasi. (Arismunandar, 1983)

Jika diantara elektroda diterapkan suatu tegangan V , maka akan timbul suatu medan listrik E yang mempunyai besar dan arah tertentu. Di dalam medan listrik, elektron – elektron bebas akan mendapat energi yang cukup kuat sehingga dapat merangsang timbulnya proses ionisasi. (Arismunandar, 1983)

Besarnya energi tersebut adalah:

$$U = e \cdot V = \frac{1}{2} \cdot m_c \cdot v_c^2 \quad (1)$$

Di mana:

e = muatan elektron

V = beda potensial antara kedua elektroda

m_c = massa elektron

v_c = kecepatan elektron

2.4 Ionisasi Benturan Elektron

Jika gradien tegangan yang ada cukup tinggi maka jumlah elektron yang diionisasikan akan lebih banyak dibandingkan jumlah ion yang ditangkap menjadi molekul oksigen. Tiap-tiap elektron ini kemudian akan berjalan menuju anoda secara kontinu, sambil membuat benturan – benturan yang kemudian akan membebaskan lebih banyak elektron. Ionisasi karena benturan ini mungkin merupakan proses yang paling penting dalam kegagalan udara atau gas. (Arismunandar, 1983)

Sebuah elektron tunggal yang dibebaskan oleh pengaruh luar akan menimbulkan banjir elektron (*avalanche*) yaitu kelompok elektron yang bertambah secara cepat dan bergerak maju meninggalkan ion positif pada lintasannya. Efektivitas ionisasi karena benturan (tumbukkan) elektron ditentukan oleh energi atau kecepatan elektron pembentur yaitu: (Arismunandar, 1983)

$$v_c = \sqrt{\frac{2.e.v}{m_c}} \quad (2.2)$$

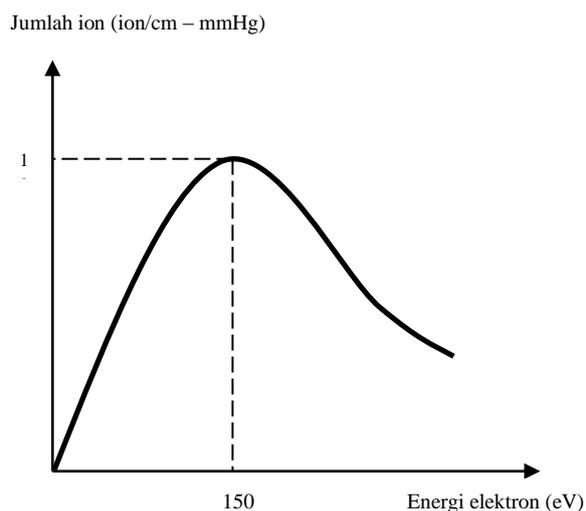
Jika kecepatan elektron v_c sangat lambat, misalnya oleh sebab tegangan yang diterapkan rendah maka tidak akan terjadi proses ionisasi karena energi yang dihasilkan tidak cukup kuat untuk membebaskan elektron berikutnya. (Arismunandar, 1983)

Jika kecepatan elektron v_c terlalu tinggi, maka ionisasi juga sulit terjadi. Dalam keadaan seperti ini ada kemungkinan elektron bebas tersebut dalam pergerakannya akan mendekati sesuatu atom, tanpa mengeluarkan elektron dari padanya. (Arismunandar, 1983)

Dari kedua hal tersebut dapat disimpulkan bahwa dalam proses ionisasi ada sesuatu kecepatan elektron yang optimum dimana kemungkinannya adalah maksimum. Yang dimaksud dengan kecepatan elektron yang optimum adalah suatu kecepatan yang tepat untuk dapat memecahkan atom menjadi elektron dan ion. Selain itu kecepatan yang optimum ini harus sering terjadi supaya bila gerakan yang pertama tidak dapat membentur atom, maka gerakan yang berikutnya diharapkan dapat membentur atom dan membebaskan elektron daripadanya. (Arismunandar, 1983)

Proses pelepasan (*discharge*) pada udara dan gas dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu pelepasan bertahan sendiri (*self sustaining discharge*) dan pelepasan tak bertahan (*non self sustaining discharge*). Dalam hal ini mekanisme kegagalan gas dan udara adalah suatu bentuk transisi dari keadaan pelepasan tak bertahan menuju pelepasan bertahan sendiri. Pelepasan dalam gas seperti diuraikan sebelumnya terjadi karena ada elektron elektron awal yang berasal dari radiasi kosmis dan radioaktivitas. (Arismunandar, 1983)

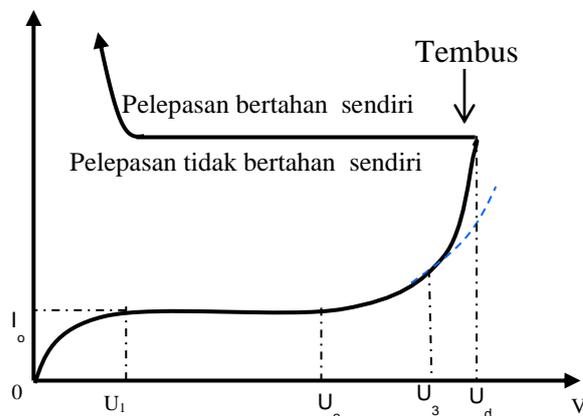
Karena gerakan elektron adalah fungsi dari tegangan dan arahnya berlawanan dengan gerakan arus listrik, maka jika suatu tegangan diterapkan antara dua elektroda (katoda dan anoda), arus yang bergerak menuju katoda akan bertambah perlahan – lahan sesuai dengan Bergeraknya elektron. Gerakan ini sesuai dengan arah kuat medan yang ada. Perubahan arus antara dua elektroda pelat sejajar sebagai fungsi dari kuat medan yang diterapkan untuk pertama kali diselidiki oleh *Townsend*. Menurut *Townsend* arusnya mula – mula naik sebanding dengan tegangan yang diterapkan. Bagian awal grafik ini linier sebab penambahan elektron yang dibebaskan sebanding dengan naiknya tegangan yang diterapkan. Selanjutnya, penambahan tegangan dari V_1 ke V_2 tidak akan menyebabkan penambahan arus. Arusnya konstan pada harga i_0 , yaitu arus foto listrik yang dihasilkan di katoda oleh penyinaran lembayung ultra (ultraviolet). Arusnya konstan karena semua elektron yang dibebaskan karena penyinaran tersebut sudah habis. Keadaan ini disebut kejenuhan. Gambar 2.1 merupakan grafik yang menunjukkan kemungkinan ionisasi di udara. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa untuk energy sebesar 150 eV akan dibebaskan 10 pasang ion yang terjadi jika elektronnya bergerak sepanjang 1 cm pada tekanan 1 mmHg. (Arismunandar, 1983)



Gambar 2.1 Grafik kemungkinan ionisasi di udara.

Sumber: Arismunandar, 1984: 8

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 naik, maka elektron – elektron yang meninggalkan katoda makin lama makin dipercepat, sehingga elektron – elektron ini memiliki cukup energi untuk memungkinkan terjadinya ionisasi akibat benturan dengan atom atau molekul gas. Tumbukan – tumbukan ini akan menimbulkan elektron – elektron baru, yang kemudian juga memperoleh tambahan energi dari medan sehingga mampu melakukan ionisasi. Dengan demikian, jumlah elektron yang dibebaskan makin lama makin banyak dan arusnya pun makin besar. Jika tegangannya telah mencapai suatu harga kritis V_s , maka arus bertambah sangat cepat dan akhirnya akan terjadi pelepasan bertahan sendiri. Gambar 2.2 adalah grafik yang menunjukkan perubahan arus terhadap tegangan. (Arismunandar, 1983)



Gambar 2.2 Grafik pertumbuhan arus Townsend

Sumber: Arismunandar, 1983

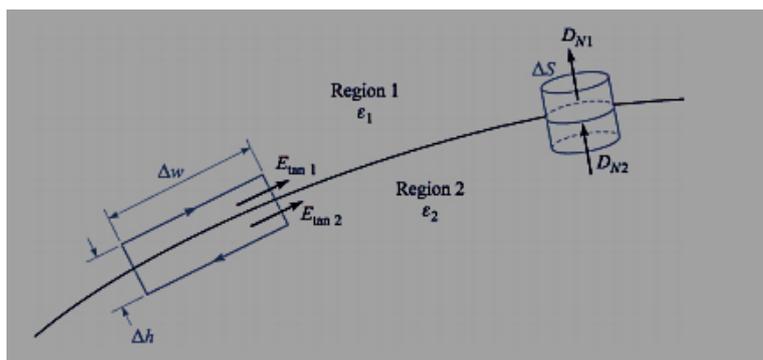
Selanjutnya, kenaikan tegangan dari V_1 ke V_2 tidak akan menyebabkan kenaikan arus. Arus konstan pada harga i_0 , yaitu arus fotolistrik yang dihasilkan di katoda oleh penyinaran ultra violet. Arus konstan karena semua elektron yang dibebaskan oleh penyinaran tersebut sudah habis. Keadaan ini disebut kejujuran. (Arismunandar, 1983)

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 naik, maka elektron – elektron ini memiliki cukup energi untuk memungkinkan terjadinya ionisasi akibat benturan dengan atom atau molekul gas. Tumbukan-tumbukan ini akan menimbulkan elektron – elektron baru, yang kemudian juga memperoleh tambahan energi dari medan sehingga mampu pula melakukan ionisasi. Dengan demikian, jumlah elektron yang

dibebaskan semakin lama semakin banyak dan arusnyapun semakin besar. Jika tegangan telah mencapai suatu harga kritis V_s , maka arus bertambah sangat cepat dan akhirnya akan terjadi pelepasan bertahan sendiri. (Arismunandar,1983)

2.5 Syarat Batas Bahan Dielektrik

Bahan isolasi yang baik jika dilihat dari fungsinya adalah bahan isolasi yang memiliki tahanan yang besar agar tidak mudah mengalirkan arus bocor. Sehingga bahaya yang timbul akibat adanya arus bocor dapat di minimalisir. Gambar 2.3 adalah gambar yang menunjukkan syarat batas bahan dielektrik sempurna. (William Hayt,2001)



Gambar 2.3 Syarat batas bahan dielektrik sempurna

Sumber: William Hayt, 2001:145

Dari Gambar 2.3, dipertimbangkan antarmuka antara 2 dielektrik yang memiliki permitivitas ϵ_1 dan ϵ_2 dan menempati daerah 1 dan 2. Maka persamaan tegangan dalam loop tertutup yang digunakan adalah (William Hayt, 2001)

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = 0 \quad (2.3)$$

Dengan persamaan (2.3) dan Gambar 2.3 didapatkan perhitungan:

$$E_{t1} = E_{t2} \quad (2.4)$$

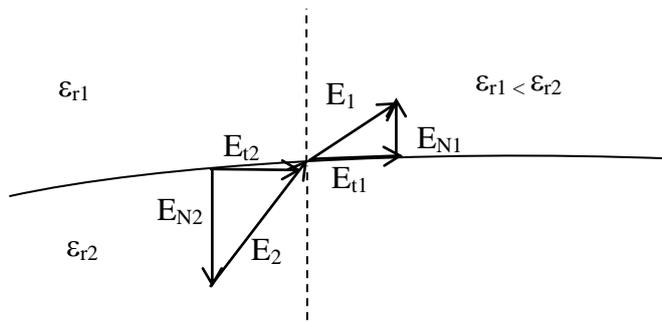
dan persamaan:

$$D_{N1} = D_{N2} \quad (2.5)$$

Dari persamaan (2.5) dapat ditentukan intensitas medan dalam arah normal yaitu:

$$\frac{E_{N1}}{E_{N2}} = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} \quad (2.6)$$

Dari persamaan (2.4) dan (2.6) dapat digambarkan intensitas medan dalam daerah 1 dan daerah 2 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Grafik Perubahan arus terhadap tegangan

Sumber : William Hayt, 2001:146

Dari Gambar 2.4, terdapat 2 daerah dimana daerah 1 dengan konstanta dielektrik ϵ_1 merupakan dielektrik sisipan kertas kraft dan daerah 2 merupakan daerah 2 dimana konstanta dielektrik ϵ_2 merupakan dielektrik udara. Dari gambar tersebut didapatkan intensitas medan dengan arah normal pada daerah 1 memiliki intensitas medan yang lebih kecil dibandingkan dengan intensitas medan 2 pada arah normal meskipun $E_{t1}=E_{t2}$ tetapi konstanta dielektrik sisipan kertas lebih besar dibandingkan konstanta dielektrik udara. (William Hayt,2001)

2.6 Kegagalan Pada Isolasi Gas

Secara garis besar isolator tegangan tinggi mempunyai dua fungsi, yaitu fungsi mekanik dan elektrik. Secara mekanik isolator berfungsi untuk mendukung atau menahan konduktor pada tegangan tinggi, sedangkan secara elektrik isolator berfungsi sebagai pemisah, yaitu untuk mencegah mengalirnya arus dari penghantar ke tanah atau ke menara penopang saluran udara. (Neidle,1999)

Dalam studi tentang pelepasan dalam gas dikenal dua jenis pelepasan yaitu pelepasan bertahan sendiri dan pelepasan tidak bertahan. Mekanisme kegagalan gas yang disebut percikan adalah peralihan dari pelepasan tak bertahan ke berbagai jenis pelepasan yang bertahan sendiri. Percikan (*spark*) biasanya terjadi tiba – tiba. (Noor,1999)

Sifat mendasar dari kegagalan percikan (*spark breakdown*) adalah bahwa tegangan pada sela jatuh karena prosen yang menghasilkan konduktivitas tinggi antara katoda dan anoda. Salah satu masalah dalam fisika pelepasan gas adalah bagaimana konduktivitas tinggi ini terjadi karena benturan elektronik, atomik, dan ionik serta karena gejala permukaan elektroda. (Arismunandar,1983)

Dewasa ini dikenal dua mekanisme kegagalan gas:

- a) mekanisme *Townsend* dan

b) Mekanisme strimer (*streamer*) atau kanal.

Pada masa yang lalu, ada pertentangan yang cukup besar mengenai mekanisme mana yang menentukan dalam kegagalan percikan. Namun, kini telah disepakati bahwa kedua mekanisme tersebut bekerja meskipun dalam keadaan yang berbeda. (Arismunandar,1983)

2.7 Proses – Proses Dasar Dalam Kegagalan Gas

Proses dasar yang paling penting dalam kegagalan gas adalah ionisasi benturan oleh elektron. Namun proses ini sendiri tidak cukup untuk menghasilkan kegagalan.

Ada dua jenis proses dasar yang diketahui:

- a) Proses atau mekanisme primer yang memungkinkan terjadinya banjir elektron (*avalanche*);
- b) proses atau mekanisme sekunder yang memungkinkan terjadinya peningkatan banjir elektron. (Arismunandar,1983)

Proses terpenting dalam mekanisme primer adalah proses katoda. Disini salah satu elektroda melepaskan (*discharge*) elektron, dan hal ini akan mengawali terjadinya suatu kegagalan percikan (*spark breakdown*). Dalam hal ini elektroda yang potensialnya lebih rendah yaitu katoda akan menjadi elektroda yang melepaskan elektron. Fungsi elektroda pelepas elektron adalah menyediakan elektron awal yang harus dilepaskan, mempertahankan pelepasan, dan menyelesaikan pelepasan. (Arismunandar,1983)

Pada proses katoda elektron awal yang dibebaskan dengan perantaraan peng-ion luar akan memulai terjadinya banjir elektron dari permukaan katoda. Elektron tersebut kemudian akan dipercepat oleh medan listrik menuju anoda. Di dalam medan listrik yang cukup kuat dalam pergerakannya menuju anoda elektron tersebut akan membentur molekul – molekul gas dan menghasilkan elektron – elektron baru. Elektron – elektron baru ini akan membentuk banjir elektron primer yang bergerak ke anoda. (Arismunandar,1983)

Pada proses benturan oleh elektron akan dihasilkan ion positif yang berasal dari molekul – molekul gas yang ditinggalkan oleh elektron. Ion positif ini akan bergerak dipercepat ke katoda, tetapi karena punya massa yang lebih besar dari massa elektron maka pergerakannya lebih lambat daripada elektron. Oleh karena itu, ion – ion positif pada umumnya tidak dapat mengionisasikan molekul – molekul gas. Di dalam ruang udara antara elektroda sekarang terbentuk banjir elektron yang bergerak cepat menuju anoda dan ion – ion positif yang bergerak lambat menuju katoda. (Arismunandar,1983)

Salah satu mekanisme terpenting pada mekanisme sekunder adalah emisi elektron karena benturan ion positif. Jika ion positif ditembakkan ke permukaan katoda maka akan dibebaskan elektron ke luar permukaan katoda. Kemungkinan bahwa benturan ion positif pada permukaan katoda akan membebaskan elektron tergantung dari jenis permukaan katoda akan membebaskan elektron tergantung dari jenis permukaan katoda dan energi ion positif yang menumbuk katoda. Tabel 2.1 menunjukkan tabel dari jenis logam dan energi pembebasan elektron. (Arismunandar,1983)

Table 2.1 Jenis Logam dan energi Pembebasan Elektron

Logam	Energi Pembebasan Elektron (eV)
Aluminium	1.8
Tembaga	3.9
Tembaga Oksida	5.34
Besi	3.9
Perak	3.1
Platina	3.6
Barium Oksida	1.0

Sumber: Arismunandar, 1983

2.8 Mekanisme Tembus Townsend

Pada mekanisme primer, medan listrik yang ada diantara elektroda akan menyebabkan elektron yang dibebaskan bergerak cepat, sehingga timbul energi yang cukup kuat untuk menimbulkan banjir elektron. Jumlah elektron n_e yang terdapat dalam banjir elektron pada lintasan sejauh dx akan bertambah dengan dn_e elektron. Maka besarnya elektron bebas tambahan yang terjadi dalam lapisan yang besarnya dx adalah (Kuffel,1970)

$$dn_e = \alpha \cdot n_e \cdot dx \quad (2.13)$$

dimana α adalah koefisien kesatuan ionisasi *Townsend*.

Ternyata jumlah elektron bebas dn_e yang bertambah akibat proses ionisasi sama besarnya dengan jumlah ion positif dn_+ baru yang dihasilkan.

Oleh karena itu persamaan (2) dapat dinyatakan sebagai:

$$dn_e = dn_+ = \alpha \cdot n_e(t) \cdot v_d \cdot dt \quad (2.14)$$

dimana:

dn_+ = jumlah ion positif baru yang dihasilkan,

n_e = jumlah total elektron,

V_d = kecepatan keluyur elektron.

Penyelesaian persamaan (3) pada medan uniform (α konstan), dengan syarat mula $n_e = n_0$, $x = 0$, memberikan hasil: (Kuffel,1970)

$$n_+ = n_0 \varepsilon^{\alpha d} \quad (2.15)$$

Jumlah elektron yang menumbuk anoda per detik sejauh d dari katoda sama dengan jumlah ion positif (Kuffel,1970)

$$n_+ = n_0 \varepsilon^{\alpha d} \quad (2.16)$$

Selanjutnya jumlah elektron yang meninggalkan katoda dan mencapai anoda:

$$n_e = \frac{n_0 \varepsilon^{\alpha d}}{1 - \gamma(\varepsilon^{\alpha d} - 1)} \quad (2.17)$$

atau

$$i = \frac{i_0 \varepsilon^{\alpha d}}{1 - \gamma(\varepsilon^{\alpha d} - 1)} \quad (2.18)$$

Arus ini akan naik terus sampai terjadi peralihan menjadi pelepasan yang bertahan sendiri (*self sustaining*). Peralihan ini adalah percikan (*spark*) dan diikuti oleh perubahan arus dengan cepat dan pembilang menjadi 0 (Kuffel,1970).

$$\gamma (\varepsilon^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.19)$$

$$\text{karena } \varepsilon^{\alpha d} \gg 1 \quad (2.20)$$

$$\text{maka } \gamma \varepsilon^{\alpha d} = 1 \quad (2.21)$$

Secara teoritis, arus akan menjadi tak terhingga. Dalam praktek, hal ini tidak terjadi karena batasan oleh impedansi rangkaian. *Townsend* menamakan keadaan ini sebagai keadaan dimulainya percikan. Ada tiga kemungkinan kriteria *Townsend* untuk percikan sebagai berikut:

- a) untuk $\gamma \varepsilon^{\alpha d} < 1$, arus pelepasan tidak dapat bertahan sendiri, artinya sumber penghasil arus primer i_0 dihilangkan arus pelepasan berhenti mengalir.

- b) untuk $\gamma\varepsilon^{\alpha d} = 1$, jumlah pasangan ion $\varepsilon^{\alpha d}$ yang dihasilkan oleh satu banjiran elektron cukup besar sehingga ion positif yang dihasilkan itu pada pembenturan dengan katoda dapat membebaskan satu elektron sekunder, yang kemudian mengulangi proses banjiran. Karena itu pelepasan menjadi dapat bertahan sendiri (*self sustaining*) dan terus berlangsung tanpa sumber penghasil i_0 . Karena itu pula maka kriteria $\gamma\varepsilon^{\alpha d}$ menentukan ambang (*threshold*) percikan.
- c) untuk $\gamma\varepsilon^{\alpha d} > 1$, ionisasi yang dihasilkan dari banjiran yang berturut – turut menjadi kumulatif. Akibatnya pelepasan percikan tumbuh dengan cepat sebanding dengan kelebihan $\gamma\varepsilon^{\alpha d}$ dari 1. (Kuffel,1970)

Persamaan (8) dapat pula ditulis dalam bentuk keadaan tunak (*steady state*)

$$I = \frac{I_0 \varepsilon^{\alpha d}}{1 - \gamma(\varepsilon^{\alpha d} - 1)} \quad (2.22)$$

yang menyatakan pertumbuhan arus rata – rata sebelum kegagalan percikan terjadi. (Kuffel,1970)

2.9 Mekanisme Kegagalan Streamer

Mekanisme strimer (*streamer*) atau kanal menjelaskan pengembangan pelepasan percikan langsung dari banjiran tunggal dimana muatan ruang (*space charge*) yang terjadi karena banjiran itu sendiri mengubah banjiran tersebut menjadi strimer plasma. Sesudah itu kehantaran naik dengan cepat dan kegagalan terjadi dalam alur (*channel*) banjiran ini. (Arismunandar,1983)

Ciri utama teori kegagalan strimer, di samping proses ionisasi benturan (α) *Townsend*, adalah postulasi sejumlah besar fotoionisasi molekul gas dalam ruang di depan strimer dan pembesaran medan listrik setempat oleh muatan ruang ion pada ujung strimer. Muatan ruang ini menimbulkan distorsi medan dalam sela. Ion – ion positif dapat dianggap stasioner dibandingkan dengan elektron – elektron yang bergerak lebih cepat dan banjiran terjadi di sela dalam bentuk awan elektron yang membelakangi muatan ruang ion positif. (Arismunandar,1983)

Untuk kegagalan mekanisme *streamer*, terdapat dua jenis *streamer* yaitu (Arismunandar,1983)

- a. positif atau streamer yang mengarah ke katoda;
- b. negatif atau strimer yang menuju anoda.

Untuk strimer positif, medan muatan ruang yang tinggi terjadi dekat anoda. Tetapi di tempat – tempat lain kerapatan ion rendah dan arena itu kehadiran ion – ion positif saja tidak menimbulkan kegagalan dalam sela. Namun dalam gas yang mengelilingi banjiran timbul fotoelektron-fotoelektron oleh foton – foton dipancarkan dari gas yang sangat terionisasi pada tangkai (stem) banjiran. Elektron – elektron ini mengawali timbulnya banjiran bantu (*auxiliary*) yang jika medan muatan ruang yang terjadi karena banjiran utama kira – kira besarnya dengan medan luar akan mengarah pada tangkai banjiran utama. Pelipat gandaan terbesar dalam banjiran bantu ini akan terjadi sepanjang sumbu banjiran utama dimana medan muatan ruang menunjang medan luar. Ion – ion positif yang tertinggal di belakang banjiran ini akan memanjang dan mengerikan (*intensify*) muatan ruang banjiran utama ke arah katoda dan proses ini berkembang menjadi strimer yang merambat sendiri artinya tindakan ini membentuk plasma yang menghantar memperdekatkan anoda dan katoda. Sesudah itu strimer terus memanjang sehingga merentangi sela membentuk saluran penghantar berupa gas terionisasi antara elektroda. (Arismunandar,1983)

Untuk strimer negatif, yang menuju ke anoda membuat postulat bahwa strimer akan terjadi bila mekanisme banjiran awal menghasilkan jumlah elektron yang cukup dan sekarang timbul medan muatan ruang yang kira – kira sebanding dengan medan yang diterapkan. (Arismunandar,1983)

2.10 Medan Pada Susunan Elektroda Koaksial

Pada gambar 2 memperlihatkan sebuah susunan elektroda koaksial dengan radius elektroda dalam r_1 dan radius r_2 . Dengan menggunakan Teorema Gauss, dapat ditentukan intensitas medan listrik diantara elektroda tersebut. Penerapan Teorema Gauss dengan jari – jari permukaan Gauss r , maka

$$Q = \oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.23)$$

Karena \mathbf{D} pada susunan koaksial arahnya radial, maka integral pada bidang atas dan bawah hasilnya nol, dan menjadi :

$$Q = \rho L = D_r 2\pi r L \quad (2.24)$$

dengan:

ρ = kerapatan muatan pada elektroda

L = panjang tabung

Karena pada bidang samping, $\bar{\mathbf{D}}$ sejajar dengan $\bar{d\mathbf{s}}$ dan arahnya radial maka persamaan menjadi:

$$D = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (2.25)$$

Dan dalam bentuk vector

$$\mathbf{D} = \frac{\rho}{2\pi r} \widehat{a}_r \text{ (C/cm}^2\text{)} \quad (2.26)$$

Untuk dielektrik udara, berlaku:

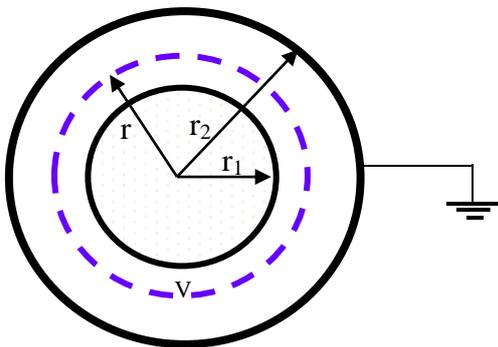
$$E = \frac{D}{\epsilon_0} \quad (2.27)$$

$$E = \frac{\rho}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (2.28)$$

Dan dalam bentuk vector

$$\mathbf{E} = \frac{\rho}{2\pi\epsilon_0 r} \widehat{a}_r \text{ (V/m)} \quad (2.29)$$

Hal ini menunjukkan bahwa kerapatan fluks D dan E sebagai fungsi r.



Gambar 2.5 Susunan elektroda koaksial dengan dielektrik udara

Sumber: William Hayt, 2001

Gambar 2.5 menunjukkan gambar susunan elektroda koaksial dengan dielektrik udara dengan konstanta dielektriknya adalah ϵ_0 . Pada gambar tersebut untuk jari – jari elektroda dalam adalah r_1 dan untuk elektroda luar adalah r_2 sehingga jarak antar elektroda adalah selisih dari r_1 dan r_2 . Hubungan antara tegangan dan intensitas medan listrik pada jarak r diberikan pada persamaan (2.34). Kemudian untuk medan yang ada pada susunan elektroda koaksial dengan jari jari r_1 dan r_2 tanpa sisipan kertas dapat menggunakan persamaan sebagai berikut. (William Hayt, 2001)

$$E = \frac{V}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.30)$$

dimana

E = medan pada susunan elektroda koaksial

V = beda potensial anantara elektroda dalam dan luar

r = jari – jari antara elektroda dalam dan luar

Sehingga medan maksimal pada susunan elektroda koaksial dapat dihitung dari persamaan: (William Hayt, 2001)

$$E_m = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.31)$$

dan untuk medan maksimal yang menyebabkan tembus pada dielektrik udara dapat dihitung dengan persamaan:

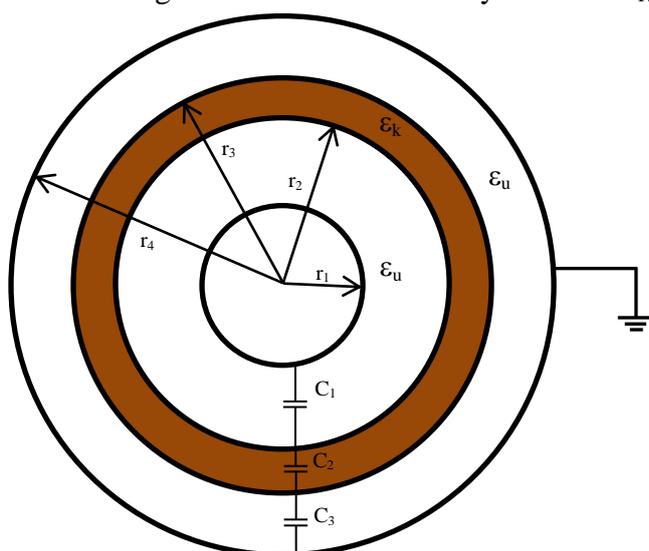
$$E_{dm} = \frac{V_d}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.32)$$

dimana

E_{dm} = medan maksimal yang menyebabkan tembus pada dielektrik udara

V_d = tegangan tembus pada dielektrik udara

Apabila pada susunan elektroda koaksial tersebut disisipi kertas kraft, maka kertas kraft akan menjadi *barrier* atau penghalang muatan sehingga arus bocor yang dihasilkan akan lebih kecil dibandingkan saat sebelum ada sisipan kertas. *Gambar 2.6* merupakan gambar dari susunan elektroda koaksial dengan sisipan kertas kraft sehingga dielektrik yang digunakan adalah dielektrik udara dengan konstanta dielektrik ϵ_0 dan dielektrik kertas kraft dengan konstanta dielektriknya sebesar ϵ_1 . (William Hayt, 2001)



Gambar 2.6 Susunan elektroda koaksial dengan sisipan kertas kraft

Sumber: William Hayt, 2001

Pada gambar tersebut, terdapat jari – jari elektroda dalam sebesar r_1 , jari – jari elektroda sisipan kertas kraft sebesar r_2 , dan jari – jari elektroda luar sebesar r_3 . Ketebalan kertas kraft yang digunakan adalah t yang merupakan selisih dari a dan b dan ρ merupakan

lokasi penempatan kertas kraft. Pada r_3 merupakan jari - jari letak sisipan kertas dengan rata - rata dari jari – jari a dan b. Medan yang terdapat pada susunan elektroda dengan sisipan kertas kraft dapat dihitung dari persamaan sebagai berikut. (William Hayt, 2001)

$$E_x(r) = \frac{V_x}{r \ln(r_{x+1}/r_x)} \quad (2.33)$$

Atau

$$E_x(r) = \frac{V}{r l_x \epsilon_{rx} \sum_{i=1}^n \frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{l_i \epsilon_{ri}}} \quad (2.34)$$

dimana

E = medan pada susunan elektroda koaksial

V = beda potensial antara elektroda dalam dan luar

V_x = jatuh tegangan pada lapisan x

r = jari – jari antara elektroda dalam dan luar

Untuk kasus susunan elektroda koaksial $l_x = l_i$, sehingga medan maksimal pada susunan elektroda koaksial dapat dihitung dari persamaan: (William Hayt, 2001)

$$E_{mx}(r_x) = \frac{V}{r_x \epsilon_{rx} \sum_{i=1}^n \frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{\epsilon_{ri}}} \quad (2.35)$$

dan apabila $k = \frac{V}{\sum_{i=1}^n \frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{\epsilon_{ri}}}$ maka persamaan intensitas medan maksimal untuk setiap

lapisan dapat dituliskan sebagai berikut.

$$E_{mx}(r_x) = \frac{k}{r_x \epsilon_{rx}} \quad (2.36)$$

Untuk susunan elektroda koaksial pada *Gambar 2.6*, intensitas medan pada setiap lapisan adalah :

Lapisan ke-1 : Lapisan udara ($r_1 \leq r \leq r_2$)

$$E_1(r) = \frac{k}{r \epsilon_{r1}} = \frac{k}{r} \quad (\epsilon_{r1}=1)$$

Lapisan ke-2 : Lapisan sisipan kertas ($r_2 \leq r \leq r_3$)

$$E_2(r) = \frac{k}{r \epsilon_{r2}} = \frac{k}{3,5r} \quad (\epsilon_{r1}=3,5)$$

Lapisan ke-1 : Lapisan udara ($r_3 \leq r \leq r_4$)

$$E_3(r) = \frac{k}{r \epsilon_{r3}} = \frac{k}{r} \quad (\epsilon_{r1}=1)$$

Kapasitansi sendiri dari susunan elektroda koaksial pada *Gambar 2.6* untuk setiap lapis secara umum dinyatakan oleh persamaan sebagai berikut:

$$C_x = \frac{2\pi l_x \epsilon_0 \epsilon_{rx}}{\ln r_{x+1}/r_x} \quad (2.37)$$

dengan total kapasitansi sendiri adalah:

$$\sum_{i=1}^3 \frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (2.38)$$

2.11 Arus Bocor

Arus bocor merupakan arus yang mengalir menembus atau melalui permukaan isolasi. Isolasi berfungsi untuk memisahkan secara elektrik dua buah penghantar atau lebih yang saling berdekatan, sehingga tidak terjadi kebocoran arus. Arus bocor juga disebabkan oleh rongga-rongga pada bahan isolasi, yang disebabkan kesalahan pada pembuatan bahan isolasi tersebut (Giancoli,1998). Tahanan isolasi mempengaruhi besarnya arus bocor. Tahanan isolasi akan semakin besar jika penghantar semakin panjang. Arus listrik secara normal akan melewati konduktor kabel, sedangkan arus bocor yang tidak diinginkan akan mengalir secara radial dari konduktor melalui dielektrik ke lapisan pelindung. Dalam kabel maka penampang akan menjadi lebih besar bila berawal dari konduktor.

Pengukuran arus bocor dilakukan untuk memastikan agar isolasi yang digunakan memberikan perlindungan yang memadai terhadap sengatan listrik. Ada beberapa prosedur yang harus diikuti saat melakukan pengukuran arus bocor. Isolasi yang diuji harus ditempatkan pada permukaan non konduktif dengan jarak minimal 20 cm dari permukaan logam yang dihubungkan dengan *ground*. Rangkaian dan kabel yang digunakan untuk pengukuran harus berada sejauh mungkin dari *power supply* dan permukaan logam yang dibumikan. (Eisner Safety Consultant, 2009: 1-4). Untuk menghitung arus bocor, dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.39)$$

Untuk menghitung arus bocor tanpa sisipan dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$I = \frac{E_m r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{R_u} \quad (2.40)$$

Dari persamaan (2.40) dapat dilihat bahwa arus bocor dipengaruhi oleh intensitas medan maksimal, tahanan udara, dan jari – jari elektroda luar dan dalam. Semakin besar

intensitas medan maksimal yang dihasilkan maka arus bocor yang terjadi juga akan semakin besar. Sedangkan intensitas medan maksimal dipengaruhi oleh tegangan, sehingga semakin besar tegangan maka semakin besar intensitas medan. Maka arus bocor juga akan bertambah besar dengan bertambahnya tegangan.

Dan apabila susunan elektroda koaksial disisipi kertas kraft sebagai penghambat muatan, maka ada perubahan total dari hambatan (R) yang awalnya sebelum ada sisipan hanya ada hambatan udara (R_u) dan setelah terdapat sisipan maka hambatan total (R_T) adalah hambatan udara dijumlahkan dengan hambatan sisipan kertas sehingga arus bocor dapat dihitung dengan persamaan: (William Hayt, 2001)

$$I = \frac{E_m x r_x \varepsilon_{rx} \sum_{i=1}^n \frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{\varepsilon_{ri}}}{R_u + R_s} \quad (2.41)$$

dimana

I = arus bocor (A)

ε_r = permitivitas bahan dielektrik

R_u = hambatan udara (ohm)

R_s = hambatan kertas kraft (ohm)

E_m = medan maksimal susunan elektroda koaksial

r = jari – jari antar susunan elektroda koaksial

r_1 = jari – jari elektroda dalam

r_2 = jari – jari elektroda luar (William Hayt, 2001)

Dari persamaan (2.41) dapat dilihat bahwa arus bocor dipengaruhi oleh intensitas medan maksimal, permitivitas lapisan bahan, tahanan udara, tahanan sisipan kertas, dan jari – jari elektroda luar dan dalam. Semakin besar intensitas medan maksimal yang dihasilkan maka arus bocor yang terjadi juga akan semakin besar. Sedangkan intensitas medan maksimal dipengaruhi oleh tegangan, sehingga semakin besar tegangan maka semakin besar intensitas medan. Maka arus bocor juga akan bertambah besar dengan bertambahnya tegangan.