

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Isolator adalah sebuah material yang tidak dapat menghantarkan listrik karena memiliki tahanan listrik yang tinggi. Fungsi isolator adalah memberikan batasan antara konduktor dengan konduktor, konduktor dengan tanah dan antara konduktor dengan tiang penyangga (*tower*) sehingga tidak terjadi kebocoran arus atau dalam hal gradien tinggi dan lompatan api (*flashover*). Isolasi terdiri dari isolasi padat, cair dan gas. Isolasi tersebut memiliki karakteristik dan sifat yang berbeda.

Sebuah atom, unit terkecil dari sebuah materi, tersusun dari sebuah inti dan elektron yang mengorbit inti tersebut. Suatu bahan diklasifikasi sebagai konduktor atau isolator umumnya tergantung pada jumlah elektron bebas yang dimilikinya, yang dapat digunakan untuk menghantarkan arus listrik. Sebuah bahan dengan isolasi tinggi kurang konduktif karena memiliki lebih sedikit elektron bebas. Menurut macam bahan yang dipakai, bahan isolasi dapat dibagi menjadi 3 jenis yaitu padat, cair dan gas, sedangkan berdasarkan fungsinya, bahan isolasi dapat digolongkan sebagai berikut:

1. Penyangga/penggantung (*solid supports*), berbentuk benda padat misalnya porselin, kayu, kertas.
2. Bahan pengisi (*filling media*), berupa bahan cairan atau gas, misalnya udara (paling murah), minyak, bitumen (bahan tambang seperti aspal).
3. Bahan penutup (*covering materials*), yaitu bahan yang biasanya terdapat pada bagian paling luar, berupa bahan padat atau cair, misalnya mika, porselin atau enamel.

Karakteristik semua macam isolator ditentukan oleh hukum yang sama, meskipun masing-masing mempunyai beberapa ciri perencanaan khusus. Pada dasarnya beban mekanis pada isolator merupakan gaya tarikan/tekanan (*stress*) yang harus mampu dilawan oleh suatu gaya di dalam isolator itu sendiri agar isolator itu tidak gagal. Untuk tegangan yang semakin tinggi diperlukan bahan isolasi yang mempunyai kekuatan isolasi yang lebih tinggi. Apabila tegangan yang diberikan 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 (Arismunandar, 1984:138).

Menggunakan udara sebagai isolator lebih efisien daripada yang biasa dilakukan, namun menggunakan kombinasi udara dan dielektrik padat lebih efisien lagi. Jarak antarmolekul dalam isolasi bahan padat lebih pendek daripada jarak antarmolekul bahan cair dan gas. Beberapa bahan, seperti kaca, kertas, atau teflon merupakan bahan isolator yang sangat baik. Beberapa bahan sintetis masih cukup baik dipergunakan sebagai isolator kabel, contohnya plastik dan karet. Bahan-bahan ini dipilih sebagai isolator kabel karena lebih mudah dibentuk atau diproses sementara masih dapat digunakan sebagai isolator pada tegangan menengah pada ratusan hingga ribuan volt (Fortescue, 1913:760).

2.2 Dielektrik Mika

Mika merupakan bahan isolasi mineral yaitu bahan yang diperoleh dari tambang. Secara umum ada 2 jenis mika yaitu muskovit dan flogopit. Flogopit (biotit) merupakan $K(Mg,Fe)_3(OH)_2[Si_3AlO_{10}]$ dan Muskovit merupakan $KAl_2(OH)_2[Si_3AlO_{10}]$ (Hegbom, Thor, 1997:148). Mika yang digunakan pada penelitian ini adalah berjenis Muskovit dengan resistivitas 10^{14} - $10^{16} \Omega \cdot m$.

Mika mempunyai elastisitas yang baik, resistansi serta kekuatan mekanik yang tinggi, tahan panas dan tahan terhadap pengaruh uap air. Konduktivitas termal mika juga lebih rendah daripada kebanyakan material keramik. Penggunaan mika sebagai bahan pengisi meningkatkan kekuatan dielektrik, mengurangi rugi-rugi dielektrik dan meningkatkan ketahanan panas serta kekerasan dari material (Johnson, 1965:98). Sifat kelistrikan mika untuk isolasi listrik diberikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sifat Kelistrikan dari Mika

Sifat	Mika Alami	Mika Sintetis
Kekuatan dielektrik (pada 30° C)	~1000 kV/mm	~1000kV/mm
Konstanta dielektrik ($\tan \delta$) (1 kHz – 3 GHz)	6.5 – 8.7	6.5
Rugi-rugi dielektrik		
50 Hz	0.03	–
1 MHz	0.001	0.0002
Tahanan permukaan (pada kelembaban 60%)	$10^{12} - 10^{14} \Omega \cdot m$	–
Tahanan volume (Konstan hingga 200° C)	$10^{15} - 10^{17} \Omega \cdot m$	$10^{15} - 10^{17} \Omega \cdot m$
Temperatur maksimum operasi	540°C	980°C

Sumber: Malik, 1997:150

Sebagai isolasi, mika telah digunakan selama bertahun-tahun di mana perlindungan termal dan elektrik diperlukan. Jika dibutuhkan, menggabungkan mika dengan serat atau

film untuk meningkatkan ketahanan fisiknya. Mika sangat stabil dan tidak bereaksi dengan minyak, air, banyak asam, alkali dan larutan (Deshpande, 2012:37).

Mika sebagai isolator dapat digunakan pada GIS (*Gas Insulated Switchgear*) bersama gas sulphurhexafluoride (SF_6) untuk meningkatkan isolasi. GIS sendiri merupakan rakitan dari banyak komponen, tertutup sangkar logam yang ditanahkan di mana media isolasi utamanya adalah Gas SF_6 dan biasanya termasuk bus, saklar, pemutus rangkaian dan peralatan yang terkait (Koch, 2014:4).

2.3 Dielektrik Udara

Udara termasuk ke dalam bahan isolasi yang banyak digunakan untuk mengisolasi peralatan listrik tegangan tinggi. Udara merupakan gas yang sangat penting untuk mengisolasi, udara memiliki keunikan karena secara umum dan tersedia tanpa biaya. Kekuatan dielektrik udara pada kondisi normal yaitu 30 kV/cm untuk medan seragam. Pelepasan sebagian yang terjadi pada udara seringkali terjadi ketika gradien tegangan pada bagian tertentu melebihi nilai yang dapat ditahan oleh udara (Laughton, 2003:7-8).

Proses kegagalan pada bahan isolasi gas sangat bergantung pada pembawa muatan dalam gas. Pembawa muatan dalam hal ini adalah elektron-elektron 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.

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:

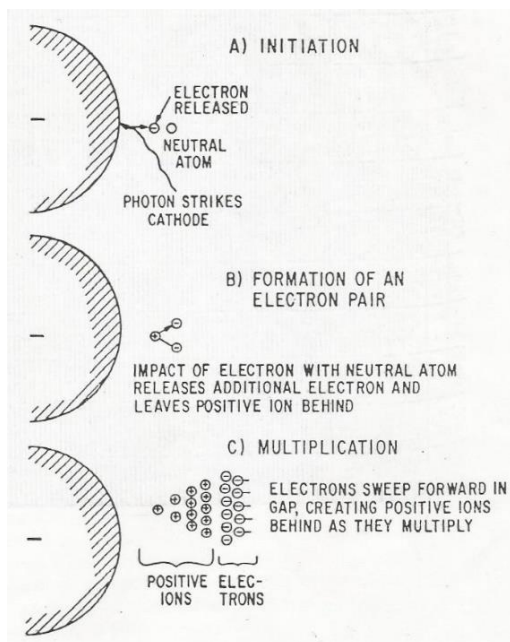
1. Pembangkitan ion dengan cara benturan elektron (*collision*), fotoionisasi, ionisasi oleh benturan ion-positif, ionisasi thermal, pelepasan elektron (*detachment*), ionisasi kumulatif, dan efek gamma sekunder.
2. Kehilangan ion dengan cara penggabungan (*attachment*) elektron, rekombinasi, dan difusi.

2.4 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 berupa ion-ion dan

elektron-elektron bebas yang akan mengakibatkan udara dan gas mengalirkan arus walaupun terbatas.

Pelepasan elektrik biasanya dipicu oleh medan listrik mempercepat elektron-elektron bebas yang bergerak melalui gas. Ketika elektron-elektron ini memperoleh energi yang cukup dari medan listrik, mereka menghasilkan ion-ion baru melalui tumbukan elektron. Proses ini dikenal sebagai ionisasi oleh tumbukan. Pelipatgandaan elektron, seperti diilustrasikan pada Gambar 2.1 hingga efek sekunder dari elektroda melakukan pelepasan sendiri. Elektron awal yang memulai proses ionisasi sering kali dihasilkan dari fotoionisasi sebuah foton dengan jarak tertentu memberi energi yang cukup pada sebuah atom, sehingga atom tersebut masuk ke dalam sebuah elektron dan ion bermuatan positif. Selama percepatan di dalam medan listrik, elektron-elektron bertabrakan dengan atom-atom nitrogen, oksigen, dan gas-gas yang ada. Kebanyakan tumbukan ini adalah tumbukan elastis (seperti tumbukan pada 2 buah bola biliard). Rugi-rugi elektron hanya sebagian kecil dari energi kinetik pada setiap tumbukan. Kadang, sebuah elektron mungkin menyambar sebuah atom dengan cukup keras, sehingga eksitasi terjadi, dan atom tersebut berubah ke tingkat energi yang lebih tinggi. Satu atau dua tingkat orbit berubah menyebabkan elektron kehilangan energi kinetiknya. Selanjutnya, pelepasan atom kembali ke tingkat normalnya mungkin terjadi, yang kemudian menghasilkan radiasi yang berlebihan dalam bentuk cahaya tampak (korona terlihat) dan gelombang elektromagnetik. Sebuah elektron mungkin juga bertabrakan dan bergabung kembali dengan sebuah ion positif, mengubah ion menjadi atom netral (Comber, 1987:169).



Gambar 2.1 Awal dari banjir elektron dari elektroda negatif
 Sumber: Comber, 1987:169

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 kosmik dari angkasa luar dan sebagainya yang semuanya dapat menyebabkan udara terionisasi.

Jika diantara elektroda diberikan 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. Besarnya energi tersebut adalah:

$$U = e.V = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v_c^2 \quad (2.1)$$

di mana:

e = muatan elektron

V = beda potensial antara kedua elektroda

m_e = massa elektron

v_c = 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 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.

Sebuah elektron tunggal yang dibebaskan karena 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 tumbukan elektron ditentukan oleh energi atau kecepatan elektron pembentur yaitu:

$$v_c = \sqrt{\frac{2.e.v}{m_e}}$$

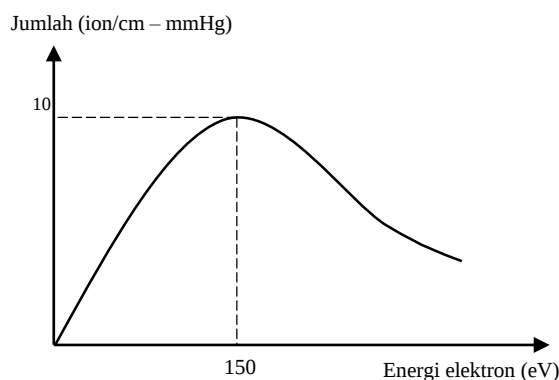
Jika kecepatan elektron v_c sangat lambat, misalnya oleh sebab tegangan yang diberikan rendah maka tidak akan terjadi proses ionisasi karena energi yang dihasilkan tidak cukup kuat untuk membebaskan elektron berikutnya. Energi pembebasan elektron beberapa logam diberikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Energi Pembebasan Elektron Beberapa Jenis Logam.

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

Sumber: Arismunandar, 1984:29.

Di dalam proses ionisai dikenal sebuah satuan ionisasi atau probabilitas ionisasi yang didefinisikan sebagai jumlah pasangan ion yang dapat dibebaskan oleh sebuah elektron yang bergerak sepanjang lisan 1 cm dalam gas pada tekanan 1 mm Hg. Gambar 2.2 memperlihatkan grafik kemungkinan terjadinya ionisasi untuk udara. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa untuk nergi sebesar 150 eV akan dibebaskan 10 pasang ion yang terjadi jika elektronnya bergerak sepanjang 1 cm pada tekanan 1 mm Hg.



Gambar 2.2 Grafik propabilitas ionisasi untuk udara

Sumber: Arismunandar, 1984:8

2.4.1 Fenomena Korona pada Saluran Transmisi

Pelepasan korona terbentuk pada permukaan konduktor saluran transmisi ketika intensitas medan listrik pada permukaan konduktor melebihi kekuatan tembus pada udara. Bahkan di sebuah medan seragam di antara dua bidang elektroda sejajar di udara, beberapa kondisi mempengaruhi kekuatan tembus ini. Beberapa dari kondisi tersebut adalah tekanan udara, material elektroda, adanya uap air, peristiwa terionisasi, dan jenis tegangan.

Pada sebuah permukaan konduktor, sebuah partikel kontaminan menyebabkan konsentrasi gradien tegangan yang dapat menyebabkan pelepasan muatan. Kegagalan udara

menghasilkan cahaya tumpah, suara mendesis, getaran konduktor, ozon, dan lainnya, dan menyebabkan penghamburan energi yang disuplai oleh pembangkit. Korona telah diteliti di banyak aspek teoritisnya, dan hukum-hukum korona telah dirumuskan lebih dari setengah abad. Kebanyakan efek korona yang ditemui pada fenomena transmisi tegangan tinggi tidak memerlukan teori yang luas dalam pelepasan muatan dalam gas (Comber, 1987: 176-178).

2.4.2 Mekanisme Kegagalan dalam Gas

Proses pelepasan (*discharge*) pada udara dan gas dapat dibagi menjadi 2 bagian, yaitu pelepasan bertahan sendiri dan pelepasan tak bertahan sendiri. Dalam hal ini, mekanisme kegagalan gas dan udara merupakan suatu bentuk transisi dari keadaan pelepasan tak bertahan menuju pelepasan bertahan sendiri. Pelepasan dalam gas terjadi karena ada elektron-elektron awal yang berasal dari radiasi kosmis dan radioaktivitas.

Terdapat dua mekanisme kegagalan gas, yang bekerja dalam keadaan yang berbeda, yaitu:

1. Mekanisme *Townsend*
2. Mekanisme strimer (*streamer*) atau kanal.

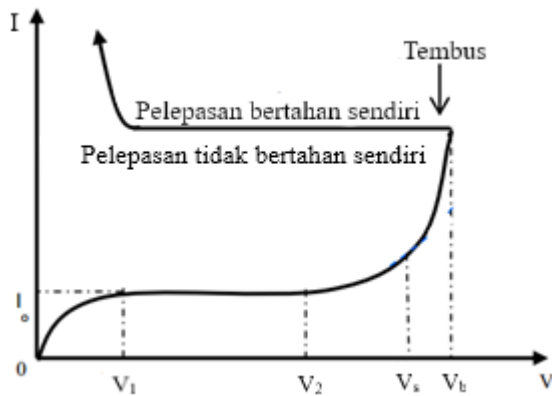
Proses dasar yang paling penting dalam kegagalan gas adalah ionisasi benturan oleh elektron. Namun proses ini sendiri tidak cukup untuk menghasilkan kegagalan.

Ada dua jenis proses dasar yang diketahui:

1. Proses atau mekanisme primer yang memungkinkan terjadinya banjir elektron (*avalanche*) elektron;
2. Proses atau mekanisme sekunder yang memungkinkan terjadinya peningkatan banjir elektron.

(Arismunandar, 1984:27-28)

Karena gerakan elektron adalah fungsi dari tegangan dan arahnya berlawanan dengan gerakan arus listrik maka jika suatu tegangan diberikan di 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 yang sejajar sebagai fungsi dari kuat medan yang diberikan untuk pertama kali diselidiki Townsend. Proses yang terjadi dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.3 menurut Townsend arus mula-mula naik sebanding dengan tegangan yang diterapkan. Bagian grafik ini linier sebab pertambahan elektron yang dibebaskan sebanding dengan naiknya tegangan yang diberikan.



Gambar 2.3 Proses Townsend

Sumber: Arismunandar, 1984:9

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 kejenuhan.

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. Ketika kuat medan naik, maka elektron-elektron ini memiliki cukup energi untuk memungkinkan terjadinya ionisasi akibat 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 arusnyaapun semakin besar. Jika tegangan telah mencapai suatu harga kritis V_s , maka arus bertambah sangat cepat dan akhirnya akan terjadi pelepasan bertahan sendiri (Arismunandar, 1984:10).

Untuk menjelaskan kenaikan arus ini, Townsend memperkenalkan suatu faktor α , sekarang dikenal sebagai koefisien suatu ionisasi Townsend, yang didefinisikan sebagai jumlah elektron yang dihasilkan di dalam jalur sebuah elektron yang bergerak sepanjang 1 cm searah dengan medan. Dengan demikian, kenaikan dn terhadap jumlah elektron n sepanjang jarak dx dapat ditulis sebagai:

$$dn = \alpha n dx$$

atau

$$n = n_0 e^{\alpha x}$$

Karena itu, arus sepanjang celah antara anoda dan katoda akan naik secara eksponensial pula. Arus sepanjang celah antara anoda dan katoda diberikan pada persamaan 2.2.

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (2.2)$$

(Kuffel, 1970)

Pada persamaan 2.2, α merupakan koefisien ionisasi awal elektron dan d merupakan jarak sela. Koefisien α berubah sesuai kuat medan, tekanan gas, dan kondisi lainnya yang mempengaruhi pasangan elektron yang dihasilkan.

Untungnya, pada teknik elektro tidak semua tumbukan menghasilkan elektron tambahan. Disini konsep persilangan tumbukan menjadi penting, seperti koefisiensi ionisasi dan potensial ionisasi. Persilangannya sangat kecil ($8 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ untuk nitrogen) bahwa beberapa ato, terjebak oleh elektron yang diberikan selama periode singkat perpindahannya. Sebuah elektron berpindah melewati gas pada tekanan 1 mmHg dan suhu 0°C menghasilkan hanya 10-100 tumbukan untuk setiap cm perpindahannya. Ketika tekanan meningkat, banyak atom/ cm^3 dan kemungkinan tumbukan meningkat. Banyaknya ion yang terbentuk dari sebuah elektron selama 1 cm perpindahannya disebut efisiensi ionisasi. Energi potensial minimum dari sebuah elektron bebas diukur dalam satuan elektron volt (eV), perlu sebelum terjadi ionisasi apapun. Pada potensial ini, yang disebut potensial ionisasi, kemungkinan ionisasi adalah 0. Saat energi elektron mulai meningkat diatas potensial ionisasi, kemungkinan ionisasi mulai meningkat secara drastis.

Selama perpindahannya, elektron tidak menyebabkan ionisasi melainkan tumbukan elastis dengan atom-atom pada jalurnya. Dengan masing-masing tumbukan elektron kehilangan sedikit energi, dan dapat mengalami kehilangan energi kinetik lainnya selama atom netral menangkap elektron dan elektron memancarkan energi berlebih. Pada udara, elektron mungkin melakukan 2×10^5 tumbukan sebelum tertempel. Beberapa molekul memiliki kemampuan menangkap elektron, contohnya, halogen dan uap air. Inilah salah satu alasan ketika kelembaban pada celah udara naik maka kekuatan celah udara juga meningkat. Uap air menangkap elektron terionisasi dan menghambat proses banjir elektron. Sekali sebuah atom menangkap elektron, maka ion negatif terbentuk. Karena ion ini merupakan partikel yang relative tidak bergerak, ion tersebut gagal mengionisasi gas melalui tumbukan kecuali pada kondisi energi ekstrim (Comber, 1987:170).

2.4.3 Proses Banjiran Townsend

Ketika sebuah medan listrik menekan celah pada udara, elektron dan ion alami di udara menyapu ke arah berlawanan dari polaritas elektroda dan menghasilkan arus lemah. Arus ini yang disebut sebagai konduktivitas alami udara. Ketika medan meningkat sekitar diatas 15 kV/cm, arus meningkat dengan cepat karena dua alasan: (1) proses ionisasi yang dibahas sebelumnya yang menghasilkan elektron baru di dalam gas; (2) ion-ion positif dan foton membombardir katoda dan melepaskan elektron baru. Pembebasan elektron dari katoda mewakili proses sekunder, dan ionisasi normal dengan tumbukan pada gas mewakili proses primer.

Arus meningkat pada kuat medan seragam yang tinggi ketika kekuatan tembus gas tidak melebihi persamaan 2.3, yang menyatakan pertumbuhan arus rata-rata sebelum kegagalan percikan terjadi.

$$I = I_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.3)$$

di mana:

I = arus sela (A)

I_0 = arus awal pada gas disebabkan sumber dari luar (A)

d = jarak sela (m)

α = Koefisien ionisasi pertama Townsend (proses primer)

γ = Koefisien ionisasi kedua Townsend (proses sekunder)

Penyebut pada persamaan (2.3) adalah secara sederhana persamaan, dan penyebut mengandung proses sekunder yang juga berpengaruh terhadap arus. Ditinjau dari persamaan (2.3) bahwa arus tidak akan mencapai nilai tak terhingga hingga penyebutnya bernilai nol. Bentuk determinasi ini terjadi apabila terjadi kondisi berikut:

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$$

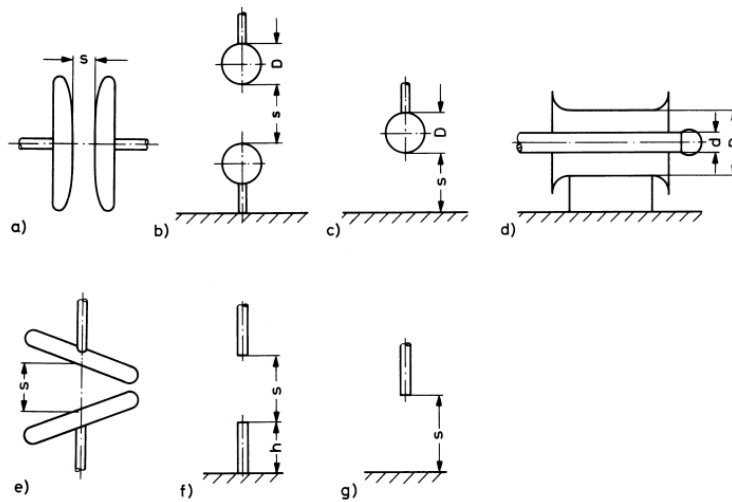
Kriteria tembus diberikan pada persamaan di atas meskipun secara konseptual berguna, jarang digunakan karena proses tembus sangat rumit (Comber, 1987:170).

2.5 Elektroda

Elektroda adalah elemen konstruksi tegangan tinggi tertentu yang digunakan sebagai saklar yang bergantung pada tegangan atau waktu. Dalam keadaan tidak bertegangan, elektroda sela biasanya dipisahkan oleh medium gas, sehingga proses tembus dapat diulangi.

Sela dengan dua elektroda berfungsi sebagai saklar bergantung pada tegangan, oleh karena itu digunakan sebagai pengaman untuk mencegah tegangan lebih, sebagai saklar dala

rangkaian. Beberapa konfigurasi elektroda yang umum digunakan sebagai sela-sela elektroda antara lain, pelat-pelat, bola-bola, bidang bola, silinde koaksial, silinder silang, batang-batang, dan jarum-jarum (Dieter Kind, 1993:105) seperti Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Jenis-jenis sela 2 elektroda

Sumber: Kind, 1993:105

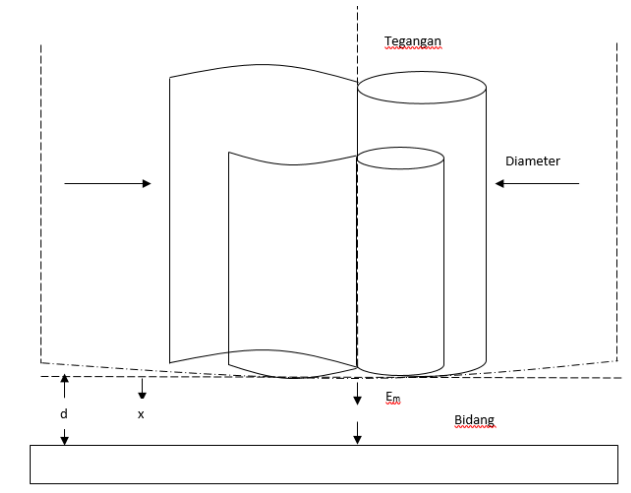
Keterangan Gambar 2.3:

- a. Pelat-pelat
- b. Bola-bola
- c. Bidang-bidang
- d. Silinder koaksial
- e. Silinder silang
- f. Batang-batang
- g. Bidang-batang

Tegangan (V) antara dua elektroda mungkin cukup terisolasi dengan menempatkan bahan isolasi homogen. Intensitas medan tembus E_b dianggap sebagai sesuatu konstanta karakteristik material antara elektroda tersebut. Jarak sela antara elektroda (d) dihitung sebagai $d = V/E_b$ untuk medan homogen. Elektroda yang digunakan dari bahan yang baik dan dalam ukuran tertentu, dimana distribusi medan antara elektroda dari bahan ditekankan pada nilai intensitas medan maksimum E_m tertentu.

Dengan analisis medan dapat disimpulkan bahwa kondisi $E_m = E_b$ akan memberikan solusi optimal untuk masalah isolasi. Hal ini berlaku apabila E_b memiliki nilai yang sangat spesifik yang berkaitan langsung dengan distribusi medan dan dapat dihitung untuk bahan isolasi pada umumnya, seperti gas. Namun, untuk dielektrik padat dan cair nilai-nilai tersebut

hanya cukup diketahui. Contoh sederhana dari sistem isolasi yang merupakan konfigurasi elektroda batang-bidang dengan isolasi udara diperlihatkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Konfigurasi elektroda Rod-bidang (dengan factor efisiensi η yang dipengaruhi oleh perubahan bidang elektroda rod = $V/(dE_m)$)
Sumber: Bekak dkk, 2012:2

Pada Gambar 2.5 jarak sela dan kerapatan udara diasumsikan tetap konstan. D diameter batang berbentuk hemispherical seperti ditunjukkan oleh garis putus-putus. Dua kuantitas medan dapat didefinisikan untuk setiap diameter batang D intensitas medan maksimum E_m pada ujung batang dan intensitas medan rata-rata $E_r = V/d$ untuk intensitas medan maksimum E_m dan intensitas medan rata-rata dapat ditentukan faktor efisiensi medan η yang telah dirumuskan oleh Schwaiger sebagai berikut:

$$\eta = \frac{E_r}{E_m} = \frac{V}{dE_m}$$

Jika tembus yang disebabkan oleh E_m saja, maka tegangan V_b diperoleh dari persamaan sebagai:

$$V_b = E_m d\eta = E_b d\eta$$

dengan ($E_m = E_b$)

Persamaan Schwaigener menggambarkan konsep faktor efisiensi medan. Untuk sembarang distribusi medan dipenuhi $0 \leq \eta \leq 1$, sehingga untuk medan tidak homogen mengurangi tingkat tegangan tembus susunan. Hal ini menunjukkan bahwa kerapatan fluks D dan E sebagai fungsi r .

Beda potensial (V) antara elektroda dalam dan elektroda luar dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$V = \int_{r_2}^{r_1} \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{r_2}^{r_1} E \, dr \\
&= \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho}{2\pi\epsilon_0} \, dr
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Dimana

$$V = \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \int \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{2\pi\epsilon_0} \ln r \Big|_{r_1}^{r_2}$$

Sehingga tegangan diantara susunan elektroda koaksial adalah

$$V = \frac{\rho L}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_1}{r_2}$$

Hubungan antara D dan E sebagai berikut:

$$D = E\epsilon_0 \tag{2.5}$$

(Bekak, 2012:A15-3).

2.5.1 Medan pada Susunan Elektroda Koaksial

Gambar 2.6 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:

$$Q = \oint \vec{D} \cdot \vec{ds}$$

$$Q = \iint \overline{D_{atas}} \cdot \vec{ds} + \iint \overline{D_{samping}} \cdot \vec{ds} + \iint \overline{D_{bawah}} \cdot \vec{ds}$$

dengan:

Q = muatan yang dilingkupi permukaan Gauss (C)

D = rata – rata kerapatan fluks

Ds = vektor luas differensial yang tegak lurus permukaan Gauss.



Gambar 2.6 Susunan Elektroda Koaksial

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

$$Q = \rho L = \iint \overline{D}_{samping} \cdot \overline{ds} \quad (2.6)$$

Dengan:

ρ = kerapatan muatan pada elektroda (C/m^3)

L = panjang tabung Gauss (m)

$\overline{D}$ = rata – rata kerapatan fluks (C/m^2)

$\overline{ds}$ = rata – rata kerapatan fluks.

Karena pada bidang samping, $\overline{D}$ sejajar dengan $\overline{ds}$ dan arahnya radial maka persamaan menjadi:

$$\begin{aligned} \rho L &= D \iint ds \\ \rho &= D 2\pi r L \\ D &= \frac{\rho}{2\pi r} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Dan dalam bentuk vektor

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

Untuk dielektrik udara, berlaku:

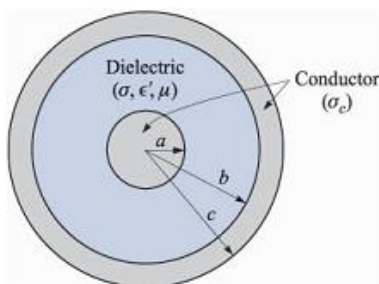
$$\begin{aligned} E &= \frac{D}{\epsilon_0} \\ E &= \frac{\rho}{2\pi\epsilon_0 r} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Dan dalam bentuk vektor

$$E = \frac{\rho}{2\pi\epsilon_0 R} \widehat{a}_r (V/m)$$

Hal ini menunjukkan bahwa kerapatan fluks D dan E sebagai fungsi r (Bekak dkk, 2012:2)

Ilustrasi penampang melintang susunan elektroda koaksial diberikan pada Gambar 2.7. Elektroda dalam dan elektroda luar merupakan konduktor dan diantara kedua elektroda diberikan dielektrik.

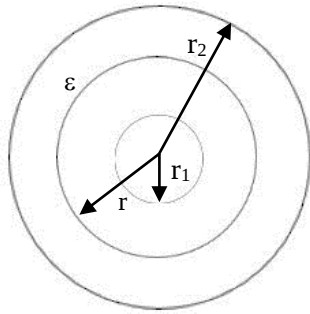


Gambar 2.7 Geometris dari susunan koaksial.

Sumber: Hayt (2001:442)

2.5.2 Kapasitansi Susunan Koaksial

Apabila dalam susunan elektroda disisipi oleh sebuah isolator maka kapasitansi dan tahanan yang ada di susunan elektroda koaksial tersebut dapat berubah semakin besar atau semakin kecil. Susunan elektroda koaksial diberikan pada Gambar 2.8, di mana r_1 adalah jari-jari elektroda dalam, r_2 adalah jari-jari elektroda luar, dan r adalah titik tertentu diantara jarak r_1 dan r_2 .



Gambar 2.8 Susunan elektroda koaksial.

Tegangan antar elektroda dengan jari-jari masing-masing r_1 dan r_2 diberikan pada persamaan (2.9)

$$V = E_m r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.9)$$

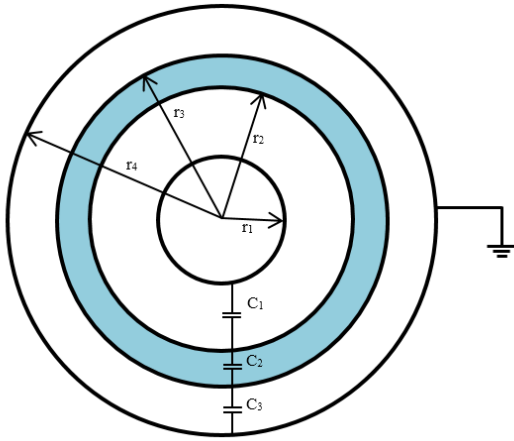
Sehingga hubungan antara tegangan V dan medan listrik E diberikan pada persamaan (2.10) berikut

$$E = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.10)$$

(Dhofir dkk, 2012:2)

Apabila pada susunan elektroda koaksial tersebut disisipi mika, maka mika akan menjadi *barrier* atau penghalang muatan sehingga arus bocor yang dihasilkan akan lebih kecil dibandingkan saat sebelum ada sisipan mika. Gambar 2.9 menunjukkan susunan elektroda koaksial dengan sisipan mika sehingga dielektrik yang digunakan adalah dielektrik udara dengan konstanta dielektrik ϵ_0 dan dielektrik mika dengan konstanta dielektriknya sebesar ϵ_1 .

Pada gambar tersebut, terdapat jari – jari elektroda dalam sebesar r_1 , jari – jari elektroda sisipan mika sebesar r_2 , dan jari – jari elektroda luar sebesar r_3 . Ketebalan mika yang digunakan merupakan selisih dari r_2 dan r_3 .



Gambar 2.9 Susunan elektroda koaksial dengan sisipan mika

Medan yang terdapat pada susunan elektroda dengan sisipan mika dapat dihitung dari persamaan (2.11)

$$E_x(r) = \frac{V_x}{r \ln(r_{x+1}/r_x)} \quad (2.11)$$

Atau

$$E_x(r) = \frac{V}{r l_x \epsilon_{rx} \sum_{i=1}^n \frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{l_i \epsilon_{ri}}} \quad (2.12)$$

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 (2.13)

$$E_{mx}(r_x) = \frac{V}{r_x \epsilon_{rx} \sum_{i=1}^n \frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{\epsilon_{ri}}} \quad (2.13)$$

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 pada persamaan (2.14) sebagai berikut.

$$E_{mx}(r_x) = \frac{k}{r_x \epsilon_{rx}} \quad (2.14)$$

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 mika ($r_2 \leq r \leq r_3$)

$$E_2(r) = \frac{k}{r\epsilon_{r2}} = \frac{k}{6r} \quad (\epsilon_{r1}=3,5)$$

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 (2.15) berikut

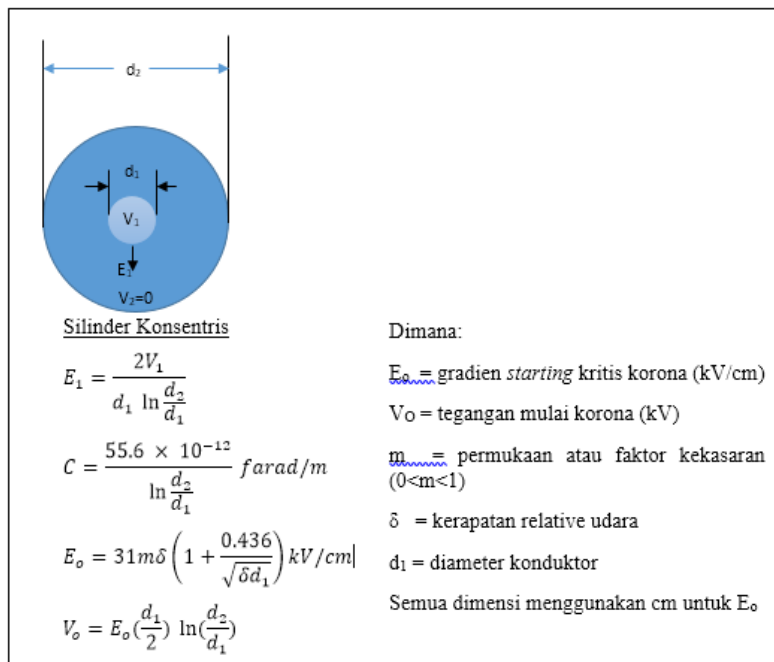
$$C_x = \frac{2\pi l_x \epsilon_0 \epsilon_{rx}}{\ln r_{x+1}/r_x} \quad (2.15)$$

dengan total kapasitansi dari susunan elektroda koaksial adalah:

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

2.5.3 Medan Tanpa Korona

Untuk beberapa aplikasi praktis, medan Laplace dihitung daripada medan yang lebih rumit dengan muatan ruang, saat adanya korona. Pada kasus ini, tidak merepresentasikan gradien yang sesungguhnya pada konduktor, hanya untuk memudahkan pendeskripsian tekanan tegangan.



Gambar 2.9 Hubungan dasar untuk gradien (E_1), kapasitansi (C), dan gradien starting (E_o)

Sumber: Comber, 1987:176

Medan listrik, $E = -\left(\frac{\partial V}{\partial x}\hat{a}_x + \frac{\partial V}{\partial y}\hat{a}_y + \frac{\partial V}{\partial z}\hat{a}_z\right)V$, pada saat tanpa korona medan listrik $E = \left(\frac{\partial V}{\partial x}\hat{a}_x + \frac{\partial V}{\partial y}\hat{a}_y + \frac{\partial V}{\partial z}\hat{a}_z\right)^2 V = 0$. Perhitungan dari medan saat kondisi ini digunakan untuk menilai gradien starting korona, seperti pada Gambar 2.10.

Pada ketidakteraturan permukaan, seperti tetesan air, permulaan korona ditentukan dari gradien ketidakteraturannya. Hal ini sangat sulit untuk diamati, dan pada kasus ini juga, ini adalah praktik umum untuk melihat gradien pada permukaan konduktor tanpa ketidakteraturan.

2.6 Arus Bocor

Arus bocor adalah arus yang mengalir melalui bagian atau permukaan konduktif dari material non-konduktif. Ada dua tipe arus bocor, yaitu arus bocor AC dan DC. Arus bocor AC disebabkan oleh adanya kombinasi paralel dari kapasitansi dan resistansi DC antara sumber tegangan (saluran AC) dan bagian konduktif dari peralatan yang ditanahkan. Semakin tinggi potensial tegangan yang diberikan di isolator menimbulkan arus bocor.

Arus bocor merupakan sebuah fenomena yang tak diharapkan, yang mengindikasikan bahwa sesuatu tidak semestinya terjadi. Kebocoran arus dalam peralatan juga dapat terjadi ketika sambungan listrik yang tidak disengaja terjadi antara tanah dan bagian energi atau konduktor. Tanah dapat menjadi titik acuan tegangan nol, atau pembumian. Idealnya, bocornya arus dari unit catu daya harus mengalir melalui sambungan tanah dan masuk ke pembumian instalasi.

Untuk peralatan non-medis, tingkat aman telah ditetapkan oleh sebuah organisasi internasional dan ditulis di standar keamanan IEC 950. Batasannya tertera pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Standar keamanan IEC 950

Peralatan	Tipe	Arus Bocor Maksimum
Terisolasi Ganda	Semua tipe	0.25 mA
Dibumikan	Dapat disentuh	0.75 mA
	Dapat dipindahkan (selain disentuh)	3.5 mA
	Peralatan yang tidak dapat bergerak (Secara permanen terhubung)	3.5 mA (Catatan 1)
1. Arus bocor yang lebih besar dari 3.5 mA diperbolehkan dalam kondisi tertentu.		

Sumber: Standar Keamanan IEC 950

Ketika sebuah peralatan listrik terhubung ke sumber energi, dimana arus bocor mengalir 100 mikroampere. Apabila kerangka dari peralatan ini terhubung dengan manusia yang ditanahkan, sangat kecil kemungkinan arus ini mengalir melalui manusia. Apabila diasumsikan manusia memiliki resistansi tubuh sebesar 500 ohm ke ground dan hubungan

ground ke peralatan memiliki resistansi sebesar 1 ohm, maka arus akan mengalir melalui manusia sebesar 0.2 mikroampere. Apabila hubungan ground rusak, semua arus bocor akan melalui tubuh manusia dan akan sangat berbahaya bagi keselamatan. Oleh karena itu, dibutuhkan isolasi yang baik.

Misalnya kita memiliki dua elektroda yang dipisahkan oleh suatu material isolasi dan ditempatkan di lingkungan luar ruangan. Beberapa kontaminan dalam bentuk embun dan partikel debu akan tersimpan pada permukaan isolasi dan arus bocor dari elektroda melalui kontaminan. Arus bocor tersebut akan memanaskan embun dan menyebabkan kerusakan pada lapisan embun. Lapisan-lapisan ini akan bertindak sebagai elektroda dan menimbulkan percikan diantara lapisan. Percikan-percikan tersebut akan menyebabkan karbonisasi dan penguapan dari isolasi dan menyebabkan *carbontracks* yang permanen pada permukaan isolasi (Wadhwa, 2007:33).

Pengukuran arus bocor dilakukan untuk memastikan bahwa isolasi yang digunakan memberikan perlindungan yang memadai terhadap sengatan listrik. Ada beberapa prosedur yang harus diikuti saat melakukan pengukuran arus bocor. Produk yang diuji harus ditempatkan pada permukaan non konduktif dan berjarak setidaknya 20 cm dari permukaan logam yang dibumikan. Rangkaian dan kabel yang digunakan untuk pengukuran harus berada sejauh mungkin dari *power supply* dan permukaan logam yang dihubungkan ke *ground*. (Eisner Safety Consultant, 2009:1-4)

Untuk menghitung arus bocor, dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.16)$$

Untuk menghitung arus bocor tanpa sisipan dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$I = \frac{E_m r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{R_u} \quad (2.17)$$

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 mika 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 mika maka hambatan total (R_T) adalah

hambatan udara dijumlahkan dengan hambatan sisipan kertas sehingga arus bocor dapat dihitung dengan persamaan:

$$I = \frac{E_m \epsilon_r \sum_{i=1}^n \frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{\epsilon_{ri}}}{R_u + R_s} \quad (2.18)$$

dimana

I = arus bocor (A)

ϵ_r = permitivitas bahan dielektrik (F/m)

R_u = hambatan udara (Ω)

R_s = hambatan mika (Ω)

E_m = medan maksimal susunan elektroda koaksial (kV/m)

r = jari – jari antar susunan elektroda koaksial (m)

r_1 = jari – jari elektroda dalam (m)

r_2 = jari – jari elektroda luar (m)

(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.

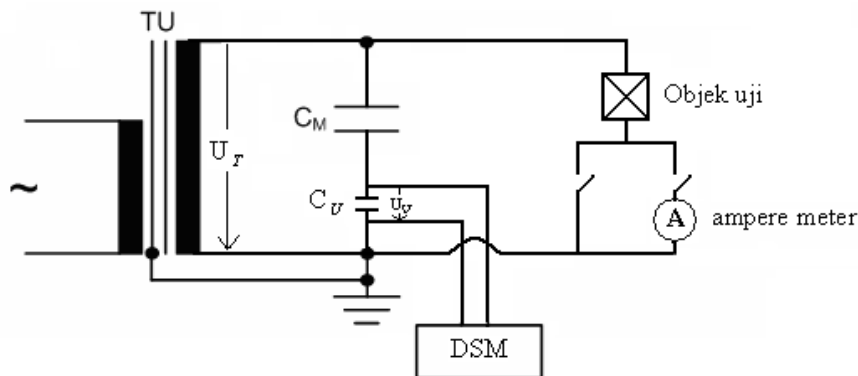
2.7 Pembangkitan dan Pengukuran Tegangan Tinggi Bolak-Balik

Dalam laboratorium diperlukan tegangan tinggi bolak-balik untuk percobaan dan pengujian dengan arus bolak-balik serta untuk membangkitkan tegangan tinggi searah dan pulsa. Trafo uji yang biasa digunakan untuk keperluan tersebut memiliki daya yang lebih rendah serta perbandingan belitan yang jauh lebih besar daripada trafo daya.

Untuk membangkitkan tegangan tinggi bolak-balik di laboratorium, maka digunakan transformator uji tegangan tinggi tiga belitan (dapat digunakan untuk rangkaian bertingkat kaskade. Jenis transformator ini memiliki perbandingan belitan yang sangat besar antara belitan tegangan tinggi H dan belitan tegangan rendah atau eksitasi E. Rangkaian pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik diberikan pada gambar 2.11.

Transformator uji tegangan tinggi tersebut mampu menghasilkan tegangan yang sangat tinggi namun menyerap daya yang lebih rendah dibanding dengan trafo daya.

Keuntungan lainnya ialah dapat membangkitkan tegangan tinggi hingga di atas ratusan kV dengan menyusun beberapa trafo uji tersebut secara seri atau susunan kaskade. Susunan rangkaian pembangkitan tegangan bolak-balik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.10 Rangkaian pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik

Sumber: Kind, 1993: 116

Keterangan:

- TU : Trafo uji tegangan tinggi 1 fasa 3 belitan 220 V / 100 kV, 5kVA
 CM : Kapasitor tegangan tinggi
 CU : Kapasitor ukur
 DSM : Alat ukur tegangan tinggi AC

Ampere meter pada rangkaian Gambar 9 hanya digunakan pada saat melakukan pengukuran arus bocor. Untuk melakukan pengukuran tegangan tinggi AC, ampere meter dilepas dari rangkaian. Hubungan antara nilai puncak tegangan tinggi dengan tegangan terukur $\hat{U}_U$ dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\hat{U}_U = \frac{C_M}{C_M + C_U} \hat{U}_T \quad (2.19)$$

dengan:

- $\hat{U}_U$: Tegangan terukur
 $\hat{U}_T$: Tegangan tinggi
 C_M : Kapasitor tegangan tinggi
 C_U : Kapasitor ukur