

Bab 1

PENDAHULUAN

1.1 PROSES PENGADAAN ENERGI LISTRIK

Energi listrik dihasilkan dari generator yang ada diberbagai pembangkit seperti (PLTA, PLTU, PLTD, PLTG, dll) biasanya adalah tegangan menengah (3 kV, 6, KV, 11 kV) dengan kapasitas daya 10 – 40 MVA. Untuk mendapatkan suplai daya yang lebih besar maka tegangan menengah yang dihasilkan dari pembangkit dinaikkan ketinggian tegangan yang lebih tinggi dengan menggunakan transformator penaik tegangan (*Step-Up*) yang ada di Gardu Induk pembangkit yakni dari 11 kV dinaikkan menjadi tegangan tinggi 150 kV. Tegangan tinggi 150 KV ini disalurkan melalui saluran transmisi sampai ke Gardu Induk pusat beban, dan disini tegangan tegangan tinggi 150 kV diturunkan menjadi tegangan menengah 20 kV dengan menggunakan transformator penurun tegangan (*Step-Down*) yang ada di Gardu Induk pusat beban

Tegangan menengah 20 kV disalurkan melalui saluran distribusi primer sampai ke trafo distribusi (gardu distribusi) yang tersebar di pusat kota. Sampai di Trafo distribusi, tegangan menengah 20 kV diturunkan menjadi tegangan rendah 380 Volt atau 220 Volt, dan disalurkan ke masing-masing konsumen tegangan rendah (TR) misalnya industri, perumahan, tempat perdagangan, rumah sakit, perkantoran dan lain-lain. Diagram segaris penyaluran energy listrik ke para pelanggan secara ditunjukkan pada gambar 1.1, dan secara skematis diperlihatkan pada gambar 1.2 yang terdiri dari lima sub-sistem utama yakni : 1) pusat pembangkit, 2) saluran transmisi, 3) gardu induk , 4) jaringan distribusi dan 5) beban/konsumen. Saat sistem beroperasi, pada sub-sistem transmisi akan terjadi rugi-rugi daya. Jika tegangan transmisi adalah arus bolak-balik tiga fasa , maka rugi-rugi daya yang terjadi sebesar

$$\Delta P_T = 3I^2R \text{ (Watt)} \quad 1.1$$

Dimana :

ΔP_T = rugi-rugi total transmisi (Watt)

I = arus pada kawat transmisi (A)

R = tahanan kawat transmisi perpesa (ohm)

Dengan mengabaikan arus kapasitif pada transmisi maka arus kirim sama dengan arus terima , sehingga arus pada jala-jala suatu transmisi arus bolak-balik tiga fasa adalah :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V_r \cos \theta} \quad 1.2$$

Dimana :

- P = daya beban pada ujung terima (Watt)
 V_r = tegangan fasa ke fasa ujung terima transmisi (Volt)
 $\cos \theta$ = faktor daya beban

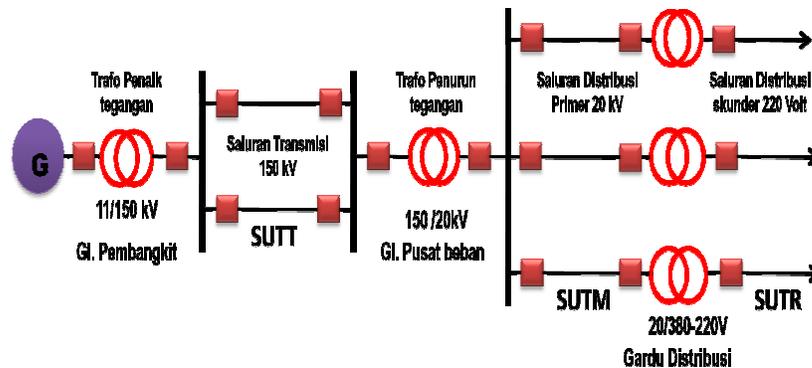
Substitusi persamaan (1.2) ke persamaan (1,1) maka diperoleh :

$$\Delta P_r = \frac{P^2 R}{V_r^2 \cos^2 \theta} (\text{Watt}) \quad 1.3$$

Dari persamaan (1.3) terlihat bahwa rugi-rugi transmisi berbanding lurus dengan besar tahanan konduktor dan berbanding terbalik dengan kuadrat tegangan transmisi. Artinya dengan menaikkan tegangan transmisi diperoleh pengurangan rugi-rugi daya yang lebih besar dari pada pengurangan tahanan konduktor. Jadi untuk mengurangi rugi-rugi daya pada saluran transmisi dapat dilakukan dengan mempertinggi / menaikkan tegangan transmisi dari tegangan menengah ke tegangan yang lebih tinggi melalui saluran (SUTT, SUTET). Hal ini dilakukan dengan beberapa pertimbangan sebagai berikut :

1. Memperkecil tahanan konduktor dengan memperbesar luas penampangnya ada batasnya karena penambahan luas penampang penghantar juga ada batasnya.
2. Perbaikan faktor daya beban dapat dilakukan dengan pemasangan kapasitor kompensasi (*shunt capacitor*), tetapi perbaikan yang diperoleh juga ada batasnya.
3. Rugi-rugi transmisi berbanding lurus dengan besar tahanan konduktor dan berbanding terbalik dengan kuadrat tegangan transmisi, sehingga pengurangan rugi-rugi yang diperoleh karena peninggian tegangan transmisi jauh lebih besar dari pada pengurangan rugi-rugi karena pengurangan tahanan konduktor.

Pertimbangan inilah yang mendorong perusahaan pembangkit tenaga listrik lebih cenderung menaikkan tegangan transmisi. Kecendrungan itu terlihat dari semakin meningkatnya tegangan transmisi dari tahun ketahun seperti yang ditunjukkan pada Tabel.1



Gambar 1.1 Diagram segaris pengadaan energi Listrik

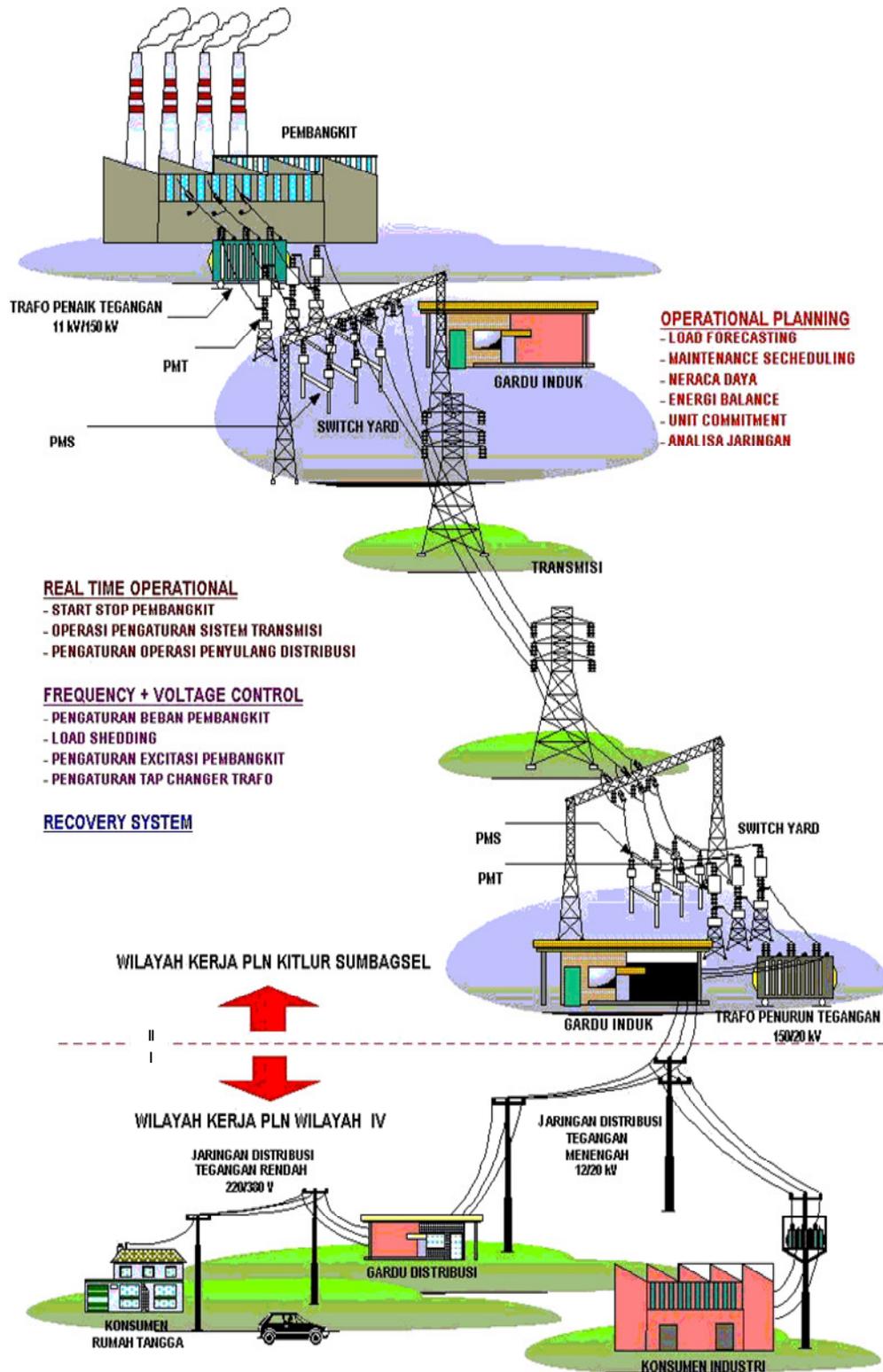
Meskipun peninggian tegangan transmisi akan mengurangi rugi-rugi daya, peninggian itu tetap ada batasnya karena tegangan tinggi menimbulkan beberapa masalah, antara lain:

1. Tegangan tinggi dapat menimbulkan korona pada kawat transmisi. Korona ini menimbulkan rugi-rugi daya dan dapat menimbulkan gangguan terhadap komunikasi radio.
2. Jika tegangan transmisi semakin tinggi, maka peralatan transmisi dan gardu induk membutuhkan isolasi yang volumenya semakin banyak agar peralatannya mampu memikul tegangan tinggi tersebut. Hal ini mengakibatkan kenaikan harga investasi.
3. Saat terjadi pemutusan dan penutupan rangkaian transmisi (*switching operation*), timbul tegangan lebih surja hubung sehingga peralatan sistem tenaga listrik harus dirancang mampu memikul tegangan lebih tersebut. Hal ini juga mengakibatkan kenaikan harga investasi.
4. Jika tegangan transmisi ditinggikan, menara transmisi harus semakin tinggi untuk menjamin keselamatan makhluk hidup di sekitar transmisi. Peninggian menara transmisi mengakibatkan transmisi mudah disambar petir. Sambaran petir pada transmisi akan menimbulkan tegangan lebih surja petir pada sistem tenaga listrik, sehingga peralatan sistem tenaga listrik harus dirancang mampu memikul tegangan lebih tersebut.
5. Peralatan sistem perlu dilengkapi dengan peralatan proteksi untuk menghindarkan kerusakan akibat adanya tegangan lebih surja hubung dan surja petir. Penambahan peralatan proteksi ini menambah biaya investasi dan perawatan.

Kelima hal diatas memberi kesimpulan, bahwa peninggian tegangan transmisi akan menambah biaya investasi dan perawatan. Tetapi telah dijelaskan sebelumnya bahwa mempertinggi tegangan transmisi akan mengurangi kerugian daya.

Tabel 1.1
Perkembangan Tenaga Transmisi Tenaga listrik di Eropa dan Amerika

Tahun	Negara	Tegangan
1882	Miesbach-Munchen	1,5 – 2 kV DC
1890	Deptford	10 kV
1892	Lauffen – Frankfurt	15 – 30 kV AC
1907	Stadwerke Munchen	50 kV AC
1912	Lauchhammer – Riesa	110 kV AC
1926	N. Pennsylvania	220 kV
1936	Boulder Dam	287 kV AC
1952	Harspranget – Hallsberg	380 kV AC
1959	USSR	525 kV AC
1965	Manicouagan – Montreal	735 kV AC
1966	Indiana – W. Virginia	765 kV AC
1966	USA, celile-sylmar	800 kV AC



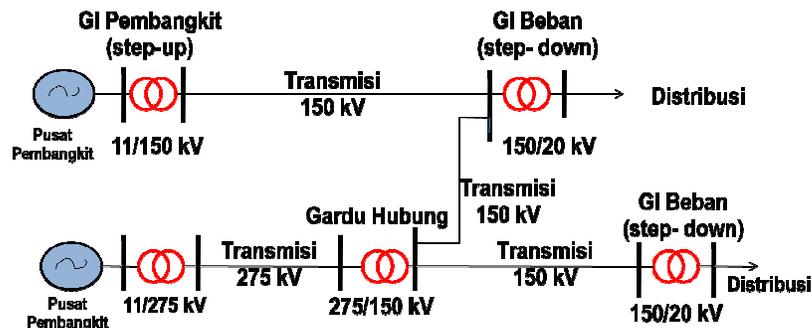
Gambar 1.2 Skema penyaluran energy listrik ke pelanggan

1.2 GARDU INDUK

Tegangan yang dibangkitkan generator terbatas dalam belasan kilovolt, sedangkan transmisi membutuhkan tegangan dalam puluhan bahkan ratusan kilovolt, sehingga antara pembangkit dan transmisi dibutuhkan suatu trafo daya untuk menaikkan tegangan (*step up*). Oleh karena itu semua perlengkapan atau peralatan yang terpasang disisi skunder trafo *step-up* harus mampu memikul tegangan tinggi.

Tegangan transmisi dalam puluhan kilovolt sampai ratusan kilovolt, sedangkan konsumen membutuhkan tegangan hanya dalam ratusan volt sampai puluhan kilo volt (220 volt – 20 kilo volt), sehingga antara transmisi dan konsumen perlu dipasang trafo daya untuk menurunkan tegangan (*step down*). Trafo-trafo daya ini bersama perlengkapan-perengkapan lainnya di sebut **Gardu Induk**. Berdasarkan fungsinya maka Gardu Induk terdiri dari beberapa jenis yakni Gardu Induk pembangkit, Gardu Induk pusat beban dan Gardu Induk hubung. Berdasarkan jenis trafo daya yang terpasang terdiri dari Gardu Induk *Step-up* dan Gardu Induk *Step-down*. Jenis-jenis gardu induk diatas ditunjukkan pada gambar 1.4

Berdasarkan cara pemasangannya maka gardu induk terdiri dari a) pasangan luar, b) pasangan dalam, c) setengah pasangan luar (*semi outdoor substation*), d) pasangan bawah tanah, e) gardu satuan (*unit substation*) dan f) Gardu jenis peti (*box type substation*). Gardu induk jenis pasangan luar adalah semua peralatan – peralatan tegangan tinggi dipasang diluar ruangan (memerlukan tanah yang luas) misalnya trafo utama, peralatan penghubung (switchgear). Sedang peralatan kontrolnya dipasangan didalam ruangan misalnya meja penghubung (switchboard) dan batere. Jenis ini pada umumnya dipakai dipinggiran kota dimana harga tanahnya murah.



Gambar 1.3 Diagram segaris sistem tenaga listrik interkoneksi

Gardu Induk pasangan dalam adalah semua peralatan tegangan tinggi (trafo utama, peralatan hubung, peralatan kontrol dipasang didalam ruangan). Jenis pasangan dalam pada umumnya dipakai pusat kota. Gardu Induk setengah pasangan luar (*semi outdoor substation*) dimana sebagian peralatan tegangan tinggi dipasang didalam gedung dan sebagian diluar gedung. Jenis ini dipakai dengan pertimbangan ekonomis, pencegahan kontaminasi garam, pencegahan gangguan suara, kebakaran dan sebagainya. Gardu Induk pasangan bawah tanah semua peralatan tegangan tinggi terpasang didalam tanah. Kecuali alat pendingin dan ruang

kontrolnya terletak diatas tanah. Jenis ini cocok untuk koa yang padat dan ramai, gardu induk ini dapat dibangun dibawah jalan raya. Gardu Induk jenis mobil dilengkapi dengan peralatan diatas kereta hela (trailer) atau semacam mobil truk. Gardu Induk ini dipakai dalam keadaan gangguan pada suatu GI guna untuk pencegahan beban lebih berkala dan guna untuk pemakaian sementara ditempat pembangunan. Gardu Induk Ini juga banyak dipakai untuk kereta api listrik dan juga dapat digunakan dalam keadaan darurat. Gardu satuan (*unit substation*) adalah gardu pasangan luar yang dipakai sebagai lawan (ganti) trafo 3 fasa dan lemari gardu distribusi (yang disebut dengan gardu hubung tertutup atau gardu hubung metal clad). Gardu jenis peti (*box type substation*) adalah gardu distribusi untuk tegangan dan kapasitasnya relative rendah dan tidak dijaga. Biasanya digunakan untuk desa-desa pertanian atau nelayan dengan kebutuhan kecil.

1.3 KOMPONEN GARDU INDUK

Peralatan-peralatan tegangan tinggi pada umumnya terdapat pada gardu induk. Adapun peralatan tegangan tinggi yang terdapat pada suatu gardu induk adalah : pemutus daya (CB), saklar pemisah (DS, DSL), pembagi tegangan capasitor (CC), trafo Tegangan (PT), penapis frekuensi tinggi (LT), saklar pembumian (ES), trafo arus (CT), pelindung tegangan lebih (LA), trafo daya (TD), konduktor tegangan tinggi, isolator tegangan tinggi dan capasitor tegangan tinggi

Pada penulisan buku ajar ini diuraikan tentang prinsip kerja dan karakteristik dari semua peralatan tegangan tinggi tersebut, kecuali penapis frekuensi tinggi tidak dibahas karena peralatan ini merupakan perangkat komunikasi radio yang lebih layak di bicarakan dalam teknik telekomunikasi radio. Pada tegangan rendah peralatan diatas juga ditemukan bahkan bukan barang baru dalam teknik kelistrikan khususnya pada instalsi listrik 380 volt. Pada pembahasan ini dikhususkan pada peralatan yang sama tetapi dikhususkan pada peralatan yang diterapkan pada tegangan tinggi.

1.4 PERBEDAAN PERALATAN TEGANGAN TINGGI DENGAN TEGANGAN RENDAH

Peralatan yang dipasang tegangan tinggi pada dasarnya sama dengan peralataan yang dipasangan pada tegangan rendah, perbedaannya hanya pada konstruksi. Ada lima hal yang membedakan konstruksi peralatan tegangan tinggi dengan peralatan tegangan rendah yaitu :

1. Sistem isolasi
2. Ukuran komponen peralatan yang menghantarkan arus
3. Sistem pendinginan
4. Penyambungan konduktor
5. Pelindung tegangan lebih

1.4.1 SISTEM ISOLASI PERALATAN TEGANGAN TINGGI

Tekanan medan elektrik yang terdapat pada isolasi peralatan listrik berbanding lurus dengan tegangan kerja (V) peralatan tersebut dan berbanding

terbalik dengan jarak susunan elektroda (s) yang terbentuk dalam peralatan tersebut. Hubungan secara matematis ditunjukkan pada persamaan 1.4

$$E = \frac{V}{s} \quad 1.4$$

Karena peralatan tegangan tinggi bekerja pada tegangan yang relatif tinggi maka isolasinya akan memikul tekanan medan elektrik yang tinggi. Oleh karena itu konstruksinyapun harus dirancang sedemikian rupa agar mampu memikul tekanan medan elektrik yang tinggi tersebut. Hal ini dapat dicapai dengan cara memperbesar dimensi bahan isolasi dan mengendalikan tekanan medan elektriknya. Dengan demikian suatu peralatan tegangan tinggi dapat ditandai dari dimensi system isolasinya yang nampak lebih besar dan ada upaya untuk mengendalikan tekanan medan elektriknya.

Hal inilah yang membuat biaya suatu peralatan tegangan tinggi didominasi oleh biaya pengadaan bahan isolasinya. Oleh karena itu perlu ada upaya untuk mengurangi biaya pemakaian bahan isolasi pada peralatan tegangan tinggi yaitu dengan mengendalikan tekan medan elektrik yang terjadi pada peralatan tersebut.. berikut ini akan diberikan dua cara pengendalian tekanan medan elektrik yang dijumpai sehari-hari sebagai berikut :

Cara pertama adalah dengan menata bagian-bagian peralatan yang membentuk susunan elektroda agar tekanan medan elektrik dapat berkurang. Jika dalam hal ini volume bahan isolasi yang digunakan adalah sama, maka bahan isolasi dengan susunan elektroda (a) dapat dipilih yang lebih murah karena sistem isolasi peralatan dengan susunan elektroda (a) tersebut memikul tekanan medan elektrik yang lebih rendah dari tekanan medan elektrik yang dipikul peralatan dengan susunan elektroda (b). Jika kekuatan dielektrik kedua peralatan adalah sama yaitu sama dengan E_{2maks} peralatan (b) . maka menurut persamaan 1.2, jarak elektroda (s) pada peralatan (a) dapat dikurangi sehingga volume isolasi peralatan (a) lebih kecil dari volume isolasi peralatan (b).

Cara kedua untuk menghemat pemakaian bahan isolasi peralatan tegangan tinggi adalah membuat elektroda perata tegangan yang berfungsi untuk meratakan distribusi tegangan pada system isolasi. Ada tiga jenis elektroda perata yaitu :

- a) Elektroda perata internal
- b) Elektroda perat eksternal
- c) Elektroda perata intermediasi

Eletroda perata intermediasi digunakan antara lain pada isolasi/ bushing trafo Bushing adalah isolator yang digunakan untuk mengisolir badan suatu peralatan dengan konduktor terminal tegangan tinggi yang menerobos badan peralatan tersebut. Seandainya elektroda perata tidak ada, maka distribusi tegangan pada tiap bagian isolasi adalaah seperti gambar 1.6a, dimana keadaan ini akan menimbulkan tekanan medan elektrik yang tidak merata pada bahan isolasi. Dengan adanya elektroda perata , maka distribusi tegangan pada setiap bagian isolasi semakin merata , dimana

keadaan ini akan menimbulkan tekanan medan elektrik yang lebih merata pada bahan isolasi

1.4.2 KONDUKTORPERALATAN TEGANGAN TINGGI

Untuk kapasitas penyaluran arus yang sama dengan peralatan tegangan rendah, komponen konduktor yang menghantaerkan arus pada peralatan tegangan tinggi berukuran lebih besar. Untuk memahami hal ini diambil contoh kabel tegangan tinggi. Suatu kabel tegangan tinggi dibungkus dengan bahan isolasi yang tebal. Jika kabel mengalirkan arus, pada setiap konduktor akan timbul rugi-rugi daya sebesar :

$$\Delta P = I^2 R \quad 1.5$$

Dimana ;

I = arus yang mengalir pada inti kabel

R = tahanan inti kabel

Rugi-rugi daya tersebut berubah menjadi panas yang menaikkan suhu konduktor dan isolasi kabel. Bahan isolasi adalah penghantar panas yang buruk, sehingga oenyebaran panas dari inti kabel ke media sekitar berkurang dan hal ini akan menyebabkan kenaikan suhu kerja konduktor. Untuk mengatasinya rugi-rugi daya harus dikurangi dengan memperkecil tahanan inti. Hal ini dilakukan dengan memperbesar ukuran penampang inti kabel. Misalnya untuk kawat telanjang (tembaga tanpa isolasi) dengan ukuran penampang 10 mm² dapat mengalirkan arus 110 amper. Jika dibungkus dengan isolasi PVC setebal 1 mm maka daya hantar arus turun menjadi 64 amper. Jika diinginkan daya hantar kabel tetap 110 amper yang dibungkus dengan PVC 1 mm maka luas penampang harus diperbesar menjadi 25 mm²

1.4.3 SISTEM PENDINGINAN PERALATAN TEGANGAN TINGGI

Pada pembahasan sebelumnya telah ditunjukkan bahwa bahan isolasi menghambat penyebaran panas dari komponen peralatan yang menjadi sumber panas sehingga kapasitas hantar arus berkurang. Untuk meningkatkan kapasitas daya hantar arus peralatan maka peralatan harus dilengkapi dengan peralatan pendingin. Misalnya inti kabel dibuat berbentuk pipa (*hollow conductor*) dan pada bagian dalam pipa dialirkan air pendingin atau dengan memasukkan kabel kedalam suatu pipa yang dialiri air pendingin, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.5. Pada trafo daya media pendingin (minyak) isolasinya dibuat bersirkulasi melalui radiatornya seperti ditunjukkan pada gambar 1.6

Gambar 1.5 Kabel dengan minyak bertekanan

Gambar 1.6 Trafo dengan radiator

1.4.4 PENYAMBUNGAN TEGANGAN TINGGI

Pada peralatan tegangan rendah ,penyambungan konduktor dengan konduktor lain , atau konduktor dengan terminal dapat dilakukan dengan menggunakan solder atau memintal konduktor satu dengan yang lain kemudian penyambungan tsb dibungkus dengan pita aisolasi

Pada peralatan peralatan tegangan tinggi hal ini tidak dapat dipraktekkan. Penyambungan harus dilakukan dengan suatu peralatan yang disebut “ *penyambung tegangan tinggi*”, yaitun suatu peralatn yang dirancang khusus untuk penyambungan antar konduktor tegangan tinggi. Pada gambar 1.7 ditunjukkan contoh penyambung tegangan tinggi yang digunakan pada suatu kabel.

Gambar 1.7 Penyambungan kabel tegangan tinggi

1.4.5 ALAT PELINDUNG PERALATAN TEGANGAN TINGGI

Pada sistem tenaga listrik ada empat tingkat tegangan yang mungkin dipikul oleh suatu peralatan yaitu :

1. tegangan kerja kontinu,
2. tegangan lebih frekuensi daya
3. tegangan lebih surja hubung
4. tegangan lebih surja petir.

Tegangan lebih frekuensi daya terjadi jika terjadi hubungansingkat jaringan satu fase ketanah, dimana keadaan ini akan mengakibatkan kenaikan tegangan pada kedua fase yang lain. Sedangkan tegangan lebih surja hubung terjadi pada saat pemutusan dan penutupan rangkaian transmisi (*Switching operation*). Jika tegangan transmisi suatu system tenaga listrik dinaikkan, maka menara transmisi harus semakin tinggi untuk menjamin keselamatan mahluk hidup disekitar transmisi. Peninggian menara transmisi mengakibatkan tarnsmisi mudah disambar petir. Sambaran petir pada transmisi akan menimbulkan tegangan lebih surja petir pada system tenaga listrik.Keberadaan tegangan lebih diatas mengharuskan peralatan memiliki bahan isolasi yang mampu memikul semua tingkat tegangan tinggi tersebut. Hal ini menyebabkan biaya pengadaan bahan isolasi semakin tinggi, sehingga harga suatu peralatan tegangan tinggi lebih ditentukan oleh biaya pengadaan isolasi. Untuk kapasitas yang sama, harga suatu peralatan tegangan tinggi jauh lebih mahal dari peralatan tegangan rendah. Oleh karena itu peralatan system perlu diperlengkapi denagn peralatan proteksi untuk menghindarkan kerusakan isolasi peralatn akibat adanya tegangan lebih surja hubung dan surja petir.

3 membuka sebelum batas waktu pemutusan kritis terlampaui, kestabilan sistem dapat dipertahankan.

Peranan pemutus daya dalam perawatan komponen sistem tenaga listrik dapat juga dijelaskan dengan Gambar 2.1 di atas. Misalkan trafo T_4 , hendak dirawat sehingga pemutus dari 7 dan 8 harus dibuka. Akibatnya aliran daya ke jaringan L_1 , akan terputus. Untuk mencegah pemutusan aliran daya, pemutus daya 9 ditutup sehingga jaringan L_2 dipasok dari trafo T_3 .

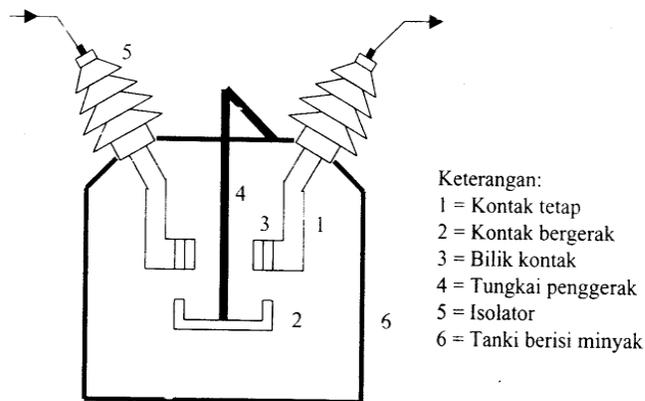
Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu pemutus daya agar dapat melakukan hal-hal di atas, adalah sebagai berikut:

1. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara kontinu.
2. Mampu memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus daya itu sendiri.
3. Dapat memutuskan arus hubung singkat demikian kecepatan t!7iggi agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, membuat sistem kehilangan kestabilan, dan merusak pemutus daya. itu sendiri.

2.2 HUBUNGAN RELE DAN PEMUTUS DAYA

Konstruksi suatu pemutus daya ditunjukkan pada Gambar 2.2. dan pemasangan pemutus daya pada gardu Induk ditunjukkan pada gambar 2.3. Bagian utama pemutus daya adalah kontak tetap dan kontak bergerak. Kontak bergerak dapat digerakkan secara manual atau dengan bantuan motor listrik atau sistem pneumatik. Jika kontak bergerak ditarik ke atas, maka pemutus daya dalam kondisi tertutup. Jika kontak bergerak didorong ke bawah, maka pemutus daya dalam kondisi terbuka.

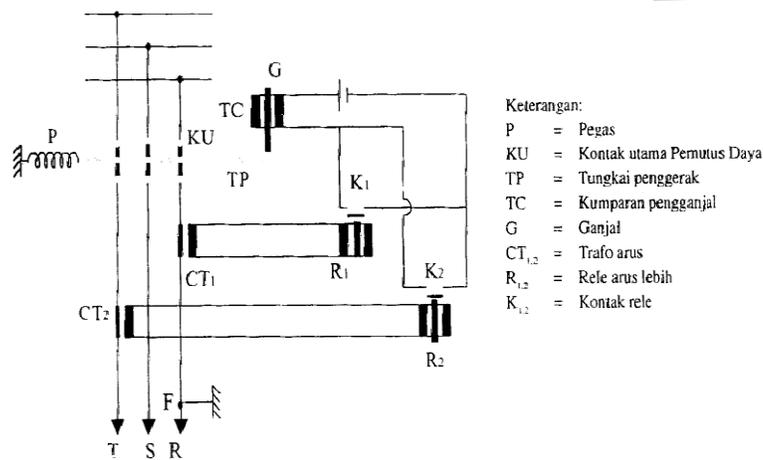
Hubungan kerja pemutus daya dan rele proteksi ditunjukkan pada Gambar 2.4. Misalkan hubung singkat terjadi pada fasa R. Akibatnya arus di fasa R melonjak relatif besar. Arus yang besar ini melalui kumparan primer CT_1 , akibatnya arus yang mengalir di kumparan sekunder CT_1 dan rele R, juga semakin besar. Jika arus tersebut melebihi setelah arus rele maka tele bekerja menutup kontak K, akibatnya arus mengalir pada kumparan pengganjal TC sehingga ganjal G tertarik ke atas. Akibatnya tungkai penggerak TP tertarik ke kiri dan kontak utama KU terbuka.



Gambar 2.2. Konstruksi Pemutus Daya



Gambar 2.3 Pemasangan pemutus daya pada Gardu Induk



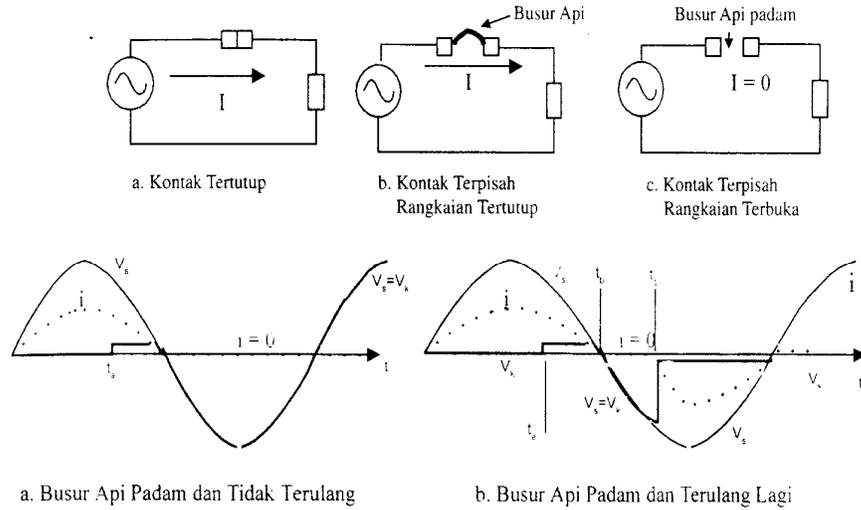
Gambar 2.4. Hubungan rele proteksi dan pemutus daya

2.3 PROSES PEMUTUSAN RANGKAIAN SUATU SISTEM

Proses pemutusan hubungan suatu rangkaian dapat dijelaskan dengan Gambar 2.5. Gambar 2.5.a. menunjukkan rangkaian saat dialiri arus bolak-balik. Jika kontak tertutup sempurna, maka tahanan antar kontak sangat kecil sehingga tegangan antar kontak dapat diabaikan. Misalnya kontak pemutus daya dibuka saat $t = t_a$ (lihat Gambar 2.5.d). Keadaan rangkaian menjadi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5.b.

Sesaat setelah pembukaan kontak akan timbul busur api di antara kontak, sehingga arus tetap mengalir pada rangkaian. Arus ini menimbulkan arus tegangan pada kontak, yaitu sebesar perkalian arus dengan tahanan busur api. Jatuh tegangan ini sangat kecil dibandingkan dengan puncak tegangan sumber dan berlangsung dalam selang waktu $t = t_b$. Selanjutnya pada saat $t = t_c$ (Gambar arus akan menjadi nol dan pada saat bersamaan tegangan antar kontak menjadi sama dengan tegangan sumber, dan berangsur naik menuju harga maksimal. Adanya beda tegangan di antara kontak dapat mengulangi terjadinya busur api. Misalnya pada saat $t = t_c$ (Gambar 2.5.e) timbul lagi busur api, maka arus kembali mengalir pada

rangkaian meskipun sebenarnya kontak pemutus daya sudah terpisah. Tegangan antar kontak yang menimbulkan pengulangan busur api adalah tegangan sumber saat $t = t_c$ dan disebut tegangan terpaan balik (*restrike voltage*). Hubungan rangkaian benar-benar terputus setelah busur api padam dan tidak berulang lagi. Dalam hal ini tegangan dan arus sesaat ditunjukkan pada Gambar 2.5.d dan rangkaiannya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5.c.

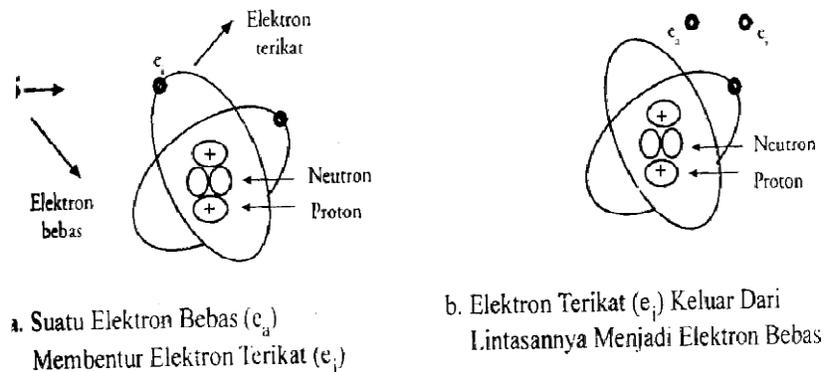


Gambar 2.5 Proses Pemutusan Hubungan Rangkaian

2.4 PROSES IONISASI, DEIONISASI, DAN EMISI

2.4.1 IONISASI

Terjadinya atau padamnya busur api berhubungan dengan peristiwa ionisasi, deionisasi, dan emisi. Berikut ini akan dijelaskan secara singkat tentang ketiga peristiwa tersebut.



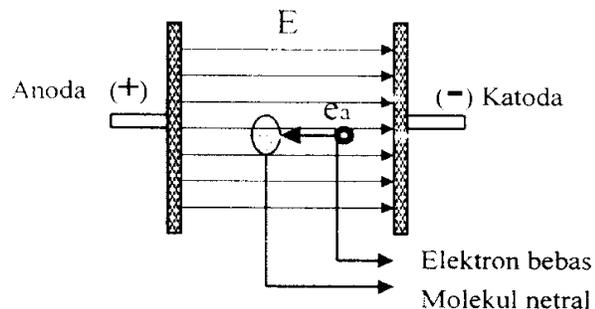
Gambar 2.6. Proses Ionisasi

Pada Gambar 2.6 ditunjukkan model suatu atom helium. Inti atom ini terdiri atas dua proton bermuatan positif dan dua neutron yang tidak bermuatan. Dua elektron bermuatan negatif berputar mengelilingi inti atom dengan lintasan berbeda. Dalam keadaan normal jumlah proton sama dengan jumlah elektron, sehingga suatu atom dalam keadaan normal akan bersifat netral. Oleh suatu proses, misalnya karena benturan suatu partikel dari luar, elektron dapat keluar dari lintasannya dan terlepas menjadi elektron bebas, sehingga partikel yang tersisa dalam atom tinggal ber-tpa dua proton, dua neutron, dan satu elektron. Karena muatan positif lebih banyak daripada muatan negatif, maka total muatan atom sekarang menjadi positif. Atom bermuatan positif ini disebut ion positif. Terlepasnya elektron dari ikatan atom netral sehingga terjadi elektron bebas dan ion positif disebut ionisasi. Ionisasi dalam gas dapat terjadi karena tiga hal, yaitu: adanya radiasi sinar kosmis, adanya massa yang membentur gas, dan kenaikan temperatur gas.

a. Radiasi Sinar Kosmis

Ruang di atas bumi secara terus-menerus dibombardir dengan partikel-partikel subatomik berenergi tinggi. Sebagian berasal dari matahari yang sering disebut sinar kosmis. Sebagian lagi berasal dari pemisahan bahan radioaktif yang setiap menit terjadi di dalam bumi, langit, dan organisme makhluk hidup. Partikel berenergi tinggi ini membentur elektron molekul netral sehingga elektron terlepas dari molekul netral. Peristiwa ini membuat gas selalu mengandung elektron-elektron bebas.

b. Ionisasi Benturan



Gambar 2.7. Ionisasi Benturan

Pada gambar 2.7 ditunjukkan suatu gas berada di antara dua elektroda plat sejajar. Kedua elektroda diberi tegangan searah, akibatnya timbul medan listrik di antara kedua elektroda yang arahnya dari anoda ke katoda. Di dalam gas dimisalkan ada satu elektron (e_a). Karena adanya medan listrik, elektron tersebut akan mengalami gaya yang arahnya menuju anoda.

Dalam perjalanannya menuju anoda, elektron itu membentur molekul-molekul netral gas. Jika energi kinetik elektron pembentur lebih besar daripada energi ikat elektron gas, maka elektron gas akan keluar dari lintasannya menjadi elektron bebas baru dan menyisakan ion positif. Ion positif akan mengalami gaya dan bergerak menuju katoda, sedangkan elektron bebas baru akan bergerak menuju anoda. Elektron baru ini akan mengadakan ionisasi benturan lagi, sehingga elektron bebas dan ion positif di dalam gas semakin banyak jumlahnya.

c. Ionisasi Thermis

Jika temperatur gas dalam suatu bejana tertutup dinaikkan, maka molekul-molekul gas akan bersirkulasi dengan kecepatan tinggi sehingga terjadi benturan antar molekul dengan molekul. Jika temperatur semakin tinggi, maka kecepatan molekul semakin tinggi, sehingga benturan antar molekul semakin keras dan dapat membuat terlepasnya elektron dari molekul netral.

2.4.2 DEIONISASI

Eka suatu elektron bebas bergabung dengan suatu ion positif, akan dihasilkan suatu molekul netral. Peristiwa penggabungan ini disebut deionisasi. Deionisasi akan mengurangi partikel bermuatan dalam suatu gas. Eka pada suatu gas terjadi aktivitas deionisasi yang lebih besar daripada aktivitas ionisasi., maka muatan-muatan bebas di dalam gas itu akan berkurang. Ada empat proses deionisasi yang berhubungan dengan pemadaman busur api pada suatu pemutus daya, yaitu:

- a). Deionisasi medan elektrik,
- b). Deionisasi rekombinasi,
- c). Deionisasi akibat pendinginan, dan
- d). Deionisasi tangkapan elektron.

a. Deionisasi Medan Elektrik

Telah dijelaskan sebelumnya, bahwa medan elektrik timbul di antara dua plat sejajar bertegangan. Medan elektrik ini akan menimbulkan gaya pada muatan-muatan gas yang terdapat di antara elektroda. Elektron bebas bergerak menuju anoda sedangkan ion positif bergerak menuju katoda. jika elektron bebas tiba di anoda, maka elektron akan masuk ke dalam. rnetal. Ion positif akhirnya akan mendekati permukaan katoda dan menarik elektron keluar dari permukaan katoda, bergabung mernbentuk r-.io'ickul gas netral. jika di antara kedua elektroda tidak terjadi.. proses ionisasi, maka medan elektrik akan melenyapkan semua elektron lepas dari gas dan mengubah semua ion positif menjadi molekul netral.

b. Deionisasi Akibat Rekornbinasi

Rekombinasi adalah pengurangan muatan karena penggabungan elektron bebas dengan ion positif Rekombinasi jarang terjadi dalam suatu gas. Peristiwa ini lebih mudah terjadi pada bidang batas antara gas dengan zat padat atau zat cair.

c. Deionisasi Akibat Pendinginan

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa di dalam, gas bertemperatur tinggi akan terjadi gerakan molekul-molekul gas yang dapat menimbulkan ionisasi thermis. Sebaliknya, pendinginan gas atau udara akan memperlambat gerakan molekul. Hal ini akan menghalangi terjadinya ionisasi thermis dalam gas tersebut, sehingga pembentukan elektron bebas dan ion positif dapat dicegah. Pendinginan gas atau udara tidak secara langsung mengurangi partikel bermuatan, tetapi hanya menghalangi terjadinya ionisasi thermis dalam. gas.

d. Deionisasi Tangkapan Elektron

Beberapa gas tertentu, seperti gas SF₆, mempunyai atom netral yang giat menangkap elektron bebas yang bergerak didekatnya. Penggabungan elektron bebas dengan atom netral menghasilkan ion negatif. Seandainya gas ini berada di antara dua elektroda plat sejajar bertegangan maka elektron bebas yang bergerak ke anoda akan ditangkap atom netralnya dan membentuk ion negatif. Ion negatif ini akan mengalami gaya dan bergerak menuju anoda. Tetapi karena massanya yang relatif besar, ia bergerak lebih lambat dan pergerakan elektron bebas, sehingga tidak mampu menimbulkan ionisasi. Dengan demikian, atom gas netral mencegah elektron bebas melakukan ionisasi atau mencegah terjadinya elektron baru hasil ionisasi.

2.4.3 EMISI

Emisi adalah peristiwa pelepasan elektron dari permukaan suatu logam menjadi elektron bebas di dalam gas. Ada dua proses emisi yang berhubungan dengan pembentukan busur api pada pemutus daya, yaitu emisi termis dan emisi medan tinggi.

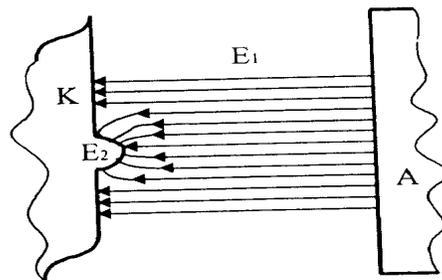
a. Emisi Termis

Suatu logam yang mempunyai titik lebur tinggi, seperti tungsten dan karbon, jika dipanaskan hingga bertemperatur tinggi, maka dari permukaannya akan dilepaskan elektron-elektron. Elektron tersebut keluar dari permukaannya dan menjadi elektron bebas di dalam gas. Proses inilah yang disebut emisi termis.

b. Emisi Medan Tinggi

Permukaan suatu logam tidak semuanya mulus, tetapi selalu ada titik-titik yang runcing. Jika logam tersebut dikenai medan elektrik seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8, elektron yang terdapat pada permukaan logam katoda (K) akan mengalami gaya yang arahnya menuju anoda (A).

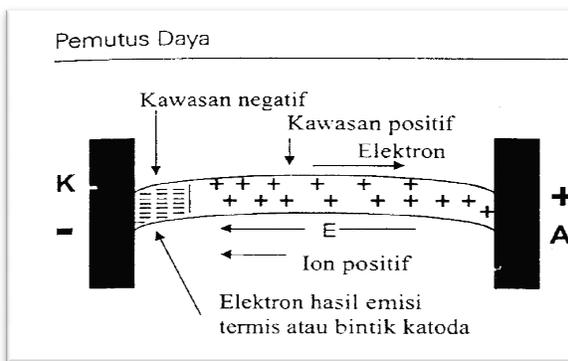
Elektron pada ujung runcing akan mengalami gaya yang lebih besar karena intensitas medan elektrik di titik tersebut relatif lebih besar dibandingkan dengan intensitas medan elektrik di bagian yang datar. Jika intensitas medan elektrik cukup besar, elektron bebas akan dilepaskan dari titik runcing tersebut. Pelepasan elektron dari ujung runcing ini sering juga disebut emisi titik katoda.



Gambar 2.8 Emisi Medan

2.5 PROSES TERJADINYA BUSUR API

Jika kontak pemutus daya dipisahkan, beda potensial di antara kontak akan menimbulkan medan elektrik di antara kontak tersebut, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9. Arus yang sebelumnya mengalir pada kontak akan memanaskan kontak dan menghasilkan emisi termis pada permukaan kontak. Sedangkan medan elektrik menimbulkan emisi medan tinggi pada kontak katoda (K). Kedua emisi ini menghasilkan elektron bebas yang sangat banyak dan bergerak menuju kontak anoda (A). Elektron-elektron ini membentur molekul netral media isolasi di kawasan positif. Benturan-benturan ini akan menimbulkan proses ionisasi. Dengan demikian, jumlah elektron bebas yang menuju anoda semakin bertambah dan muncul ion positif hasil ionisasi yang bergerak menuju katoda. Perpindahan elektron bebas ke anoda menimbulkan arus dan memanaskan anoda.



Gambar 2.9. Pembentukan Busur Api

Ion positif yang tiba di katoda akan menimbulkan dua efek yang berbeda. Jika kontak terbuat dari bahan yang titik leburnya tinggi, misalnya tungsten atau karbon, maka ion positif akan menimbulkan pemanasan di katoda. Akibatnya, emisi termis semakin meningkat. Jika kontak terbuat dari bahan yang titik leburnya rendah, misalnya tembaga, ion positif akan menimbulkan emisi medan tinggi. Hasil emisi termis dan emisi medan tinggi akan melanggengkan proses ionisasi, sehingga perpindahan muatan antar kontak terus berlangsung, ini yang disebut busur api.

Untuk memadamkan busur api tersebut perlu dilakukan usaha-usaha yang dapat menimbulkan proses deionisasi, antara lain dengan cara sebagai berikut:

- Meniupkan udara ke sela kontak, sehingga partikel-partikel hasil ionisasi dijauhkan dari sela kontak
- Menyernburkan minyak isolasi ke busur api untuk memberi peluang yang lebih besar bagi proses rekombinasi.
- Memotong busur api dengan tabir isolasi atau tabir logam, sehingga memberi peluang yang lebih besar bagi proses rekombinasi.
- Membuat medium pemisah kontak dari gas elektronegatif, sehingga elektron-elektron bebas tertangkap oleh molekul netral gas tersebut

Jika pengurangan partikel bermuatan karena proses deionisasi lebih banyak daripada penambahan muatan karena proses ionisasi, maka busur api akan padam. Ketika busur api padam, di sela kontak akan tetap ada terpaan medan elektrik. Jika suatu saat terjadi terpaan medan elektrik yang lebih besar daripada kekuatan dielektrik media isolasi kontak, busur api akan terjadi lagi.

2.6 TEGANGAN PEMULIHAN KONTAK

Jika pemutus daya digunakan memutuskan arus bolak balik, maka ada saatnya arus berharga nol dan pada saat itu busur api akan padam. Selanjutnya media sela kontak akan memulihkan dirinya menjadi isolasi, yaitu dengan berangsur-angsur menaikkan kekuatan dielektriknya. Pada saat bersamaan, tegangan di sela kontak yang tadinya sangat kecil menjadi relatif besar. Dengan kata lain, tegangan sela kontak dipulihkan dari harga yang sangat kecil ke suatu harga tegangan yang seharusnya terjadi pada sela kontak terbuka. Tegangan sela kontak selama busur api padam disebut tegangan pemulihan (recovery voltage).

Tegangan pemulihan ini menimbulkan terpaan medan elektrik di sela kontak. Kenaikan, kuat medan elektrik yang ditimbulkannya tergantung pada kenaikan tegangan pemulihan. Jika kenaikan terpaan medan elektrik lebih cepat daripada kenaikan kekuatan dielektrik sela, maka media sela kontak akan tembus listrik sehingga busur api timbul lagi. Dengan perkataan lain, pemutus daya gagal memutuskan arus. Oleh karena itu, kenaikan tegangan pemulihan pada suatu pemutus daya perlu diketahui. Dengan demikian, dapat ditentukan media sela kontak yang cocok untuk pemutus daya tersebut.

Tegangan pemulihan pada kontak suatu pemutus daya tergantung pada karakteristik rangkaian sistem yang hubungannya akan diputuskan. Berikut ini akan ditunjukkan tegangan pemulihan untuk lima jenis karakteristik rangkaian.

a. Rangkaian AC Resistif

Pada Gambar 2.10 ditunjukkan pembukaan suatu rangkaian resistif, persamaan tegangan pada rangkaian ini adalah:

$$V_s = V_k + V_r \quad 2.1$$

di mana:

V_s = tegangan sumber

V_k = tegangan sela kontak

V_r = tegangan resistor

Tegangan kontak adalah:

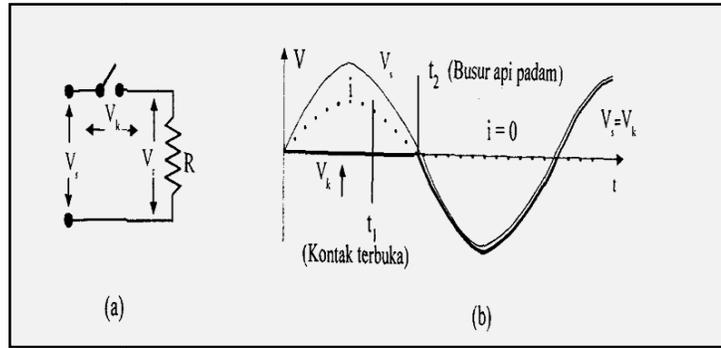
$$V_k = V_s - V_r \quad 2.2$$

Saat kontak tertutup, tegangan kontak adalah nol. Misalnya kontak dipisahkan saat $t = t_1$, maka timbul busur api dalam selang waktu t_1 s/d t_2 . Dalam selang waktu ini, tegangan kontak naik menjadai:

$$V_k = I R_a \quad 2.3$$

Dimana: I = arus busur api

R_a = tahanan busur api



Gambar 2.10 Tegangan Pemulihan Rangkaian Resistif

Karena tahanan busur api relatif kecil, tegangan kontak hanya beberapa puluh volt, sehingga dapat diabaikan. Kemudian busur api padam saat $t = t_2$ dan mulai saat ini arus pada rangkaian sama dengan nol, sehingga tegangan pada resistor juga sama dengan nol ($V_r = V_0$). Terhitung mulai $t = t_2$, tegangan pemulihan kontak menjadi:

$$V_k = V_s \quad 2.4$$

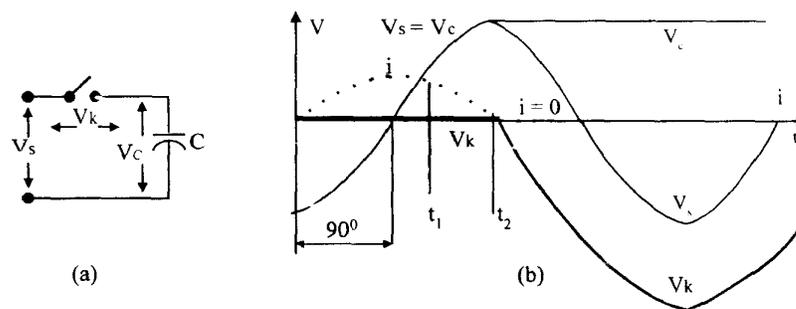
Kenaikan tegangan pemulihan sama dengan kenaikan tegangan sumber. Jika saat busur api mulai padam diambil sebagai acuan waktu, harga sesaat tegangan kontak adalah:

$$V_k = -\hat{V} \sin \omega t \quad 2.5$$

di mana: \hat{V} = nilai puncak tegangan sesaat sumber

b. Rangkaian AC Kapasitif

Pada Gambar 2.11.a ditunjukkan suatu rangkaian kapasitif sebelum kontak pemutus daya terbuka, arus pada rangkaian ini terdahulu 90° listrik dari tegangan, seperti ditunjukkan pada- Gambar 2.11.b.



Gambar 2.11 Tegangan Pemulihan Pada Rangkaian Kapasitif

Sebelum kontak terbuka, persamaan tegangan adalah sebagai berikut:

$$V_s = V_k + V_c \quad 2.6$$

di mana: V_c = tegangan pada kondensator

Jika tegangan kontak diabaikan, maka tegangan kondensator sama dengan tegangan sumber. Tegangan pada kontak dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V_k = V_s - V_c \quad 2.7$$

Misalkan saat $t = t_1$, kontak pemutus daya dibuka. Dalam selang waktu t_1 s/d t_2 timbul busur api. Selama ada busur api, tegangan kondensator sama dengan tegangan sumber. Saat arus sama dengan nol, yaitu saat $t = t_2$ busur api padam. Pada saat itu tegangan kapasitor sama dengan nilai puncak tegangan sesaat sumber, sehingga persamaan tegangan kontak setelah busur api padam adalah :

$$V_k = V_s - \hat{V} \quad 2.8$$

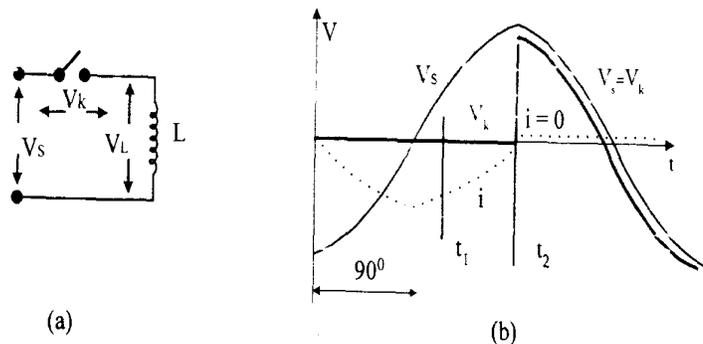
Jika saat busur api mulai padam diambil sebagai acuan waktu, maka nilai sesaat tegangan kontak adalah:

$$V_k = \hat{V} \cos \omega t - \hat{V} \quad 2.9$$

Bentuk gelombang tegangan pemulihan ditunjukkan pada Gambar 2.11.b. Terlihat bahwa kenaikan tegangan pemulihan relatif lambat dibandingkan dengan tegangan pemulihan pada rangkaian resistif. Tetapi tegangan kontak dapat mencapai dua kali harga puncak tegangan sesaat sumber. Hal ini memberi peluang terjadinya terpaan balik busur api

c. Rangkaian Induktif

Pada Gambar 2.12a ditunjukkan suatu rangkaian induktif Sebelum kontak pemutus daya terbuka, arus pada rangkaian ini terbelakang 90° listrik dari tegangan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11.b.



Gambar 2.12 Tegangan Pemulihan Pada Rangkaian Induktif

Sebelum kontak terbuka, persamaan tegangan adalah sebagai berikut:

$$V_s = V_k + V_L \quad 2.10$$

Dimana : V_L tegangan pada induktor

$$V_L = \frac{di}{dt} \quad 2.11$$

Jika. tegangan kontak diabaikan, tegangan di induktor akan sama dengan tegangan sumber. Tegangan pada kontak dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V_k = V_s - V_L \quad 2.12$$

Misalnya, saat $t = t_1$, kontak pemutus daya dibuka. Dalam selang waktu t_1 s/d t_2 timbul busur api. Selama ada busur api, tegangan induktor sama dengan tegangan sumber. Saat $t = t_2$, arus sama dengan nol, dan busur api padam. Pada saat itu tegangan induktor sama dengan nol (karena harga i pada persamaan 2.11 sama dengan nol), sehingga persamaan tegangan kontak setelah busur api padam adalah:

$$V_k = V_s \quad 2.13$$

Jika saat busur api mulai padam diambil sebagai acuan waktu, maka harga sesaat tegangan kontak adalah.

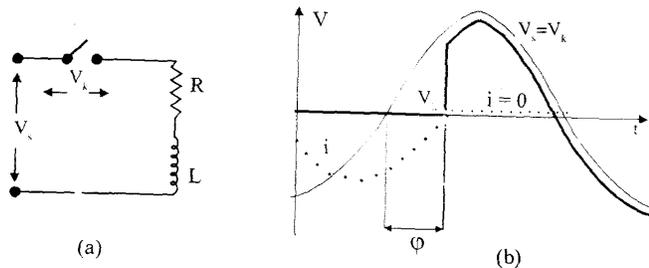
$$V_k = \hat{V} \cos \omega t \quad 2.14$$

Bentuk gelombang tegangan pemulihan ditunjukkan pada Gambar 2.12.b. Terlihat bahwa tegangan kontak tiba-tiba mencapai nilai puncak tegangan sesaat sumber. Kenaikan tegangan pemulihan relatif cepat dibandingkan dengan tegangan pemulihan pada rangkaian resistif. Hal ini memberi peluang yang besar bagi terjadinya terpaan balik busur api.

d. Rangkaian Seri Induktif-Resistif

Pada rangkaian ini arus terbelakang sebesar sudut fasa (θ) dari tegangan sumber di mana:

$$\text{Tg}^{-1} \theta = (2\pi f L)/R \quad 2.15$$

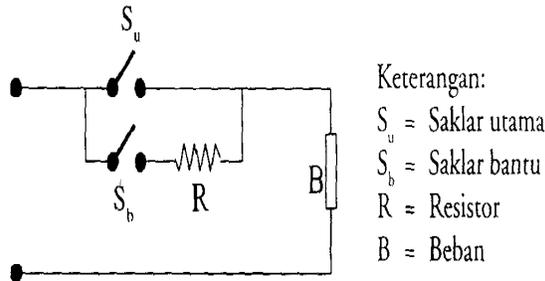


Gambar 2.13 Tegangan Pemulihan pada Rangkaian R-L

Analisis yang sama seperti halnya pada rangkaian induktif, memberikan bahwa saat busur api padam, tegangan kontak tiba-tiba naik dari nol ke suatu nilai tertentu yang lebih kecil daripada tegangan maksimum sumber dan besarnya tergantung pada besarnya sudut fasa θ . Semakin besar R , semakin kecil pula sudut fasa θ , dan kenaikan tegangan pemulihan semakin kecil. Dengan kata lain, keberadaan resistor R dalam rangkaian membuat kenaikan tegangan kontak semakin kecil.

Prinsip ini digunakan untuk mengurangi kenaikan tegangan saat pembukaan suatu pemutus daya. Pada Gambar 2.14 ditunjukkan suatu pemutus daya yang dilengkapi dengan suatu resistor. Sesaat setelah kontak utama S_u dibuka, kontak bantu S_b ditutup sehingga resistor R terhubung seri dengan beban B . Keberadaan

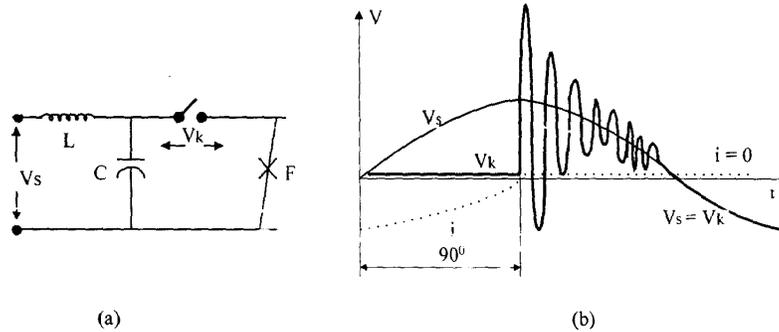
resistor ini akan mengurangi kenaikan tegangan pemulihan kontak utama, sehingga terpaan balik busur api dapat dihindarkan. Beberapa saat kemudian, kontak bantu dibuka sehingga rangkaian terbuka sempurna. Pada saat penutupan pemutus daya, dapat terjadi tegangan lebih transien. Besar tegangan transien ini dapat dikurangi dengan terlebih dahulu menutup kontak bantu, beberapa saat kemudian kontak utama ditutup.



Gambar 2.14 Pemutus Daya dengan Resistor Seri

e. Rangkaian Induktif-Kapasitif

Pada Gambar 2.15 menunjukkan suatu rangkaian yang merepresentasikan suatu trafo yang mencatu arus kepada suatu kondensator statis.



Gambar 2.15 Tegangan Pemulihan Pada Rangkaian L-C

Misalnya pada bagian transmisinya terjadi hubung singkat dan untuk melokalisirnya, pemutus daya dibuka. Saat busur api padam, induktor (L) dan kondensator (C) membentuk rangkaian osilator (L terhubung seri dengan C), sehingga terjadi tegangan yang berosilasi pada kondensato Saat busur api padam tegangan kontak sama dengan tegangan d kondensator. Oleh karena itu, tegangan kontak juga akan berosilasi sama halnya dengan tegangan kondensator. Frekuensi tegangan yang berosilasi ini adalah:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.16}$$

Tegangan yang dihasilkan adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 2. 15.b. Terlihat bahwa kenaikan tegangan pemulihan relatif lebih tinggi dibandingkan dengan kenaikan tegangan pemulihan pada rangkaian induktif. Kemungkinan terjadinya tegangan seperti ini harus dipertimbangkan dalam pemilihan suatu pemutus daya.

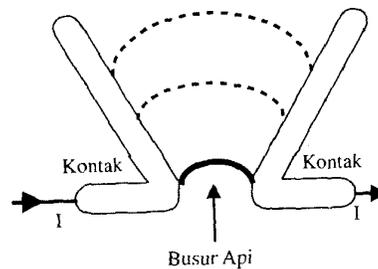
2.7 JENIS-JENIS PEMUTUS DAYA

Jenis-jenis pemutus daya yang ditemui saat ini adalah:

- Pemutus daya udara (*Air Circuit Breaker*)
- Pemutus daya minyak (*Oil Circuit Breaker*)
- Pemutus daya udara tekan (*Air-Blast Circuit Breaker*)
- Pemutus daya vakum (*Vacuum Circuit Breaker*)

2.7.1 PEMUTUS DA YA UDARA (*Air Circuit Breaker = ACB*)

Pemutus daya ini menggunakan metode pemadaman busur api yang paling sederhana, yaitu dengan memperpanjang lintasan busur apinya. Perpanjangan busur api dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain dengan menggunakan kontak sela tanduk, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.16.

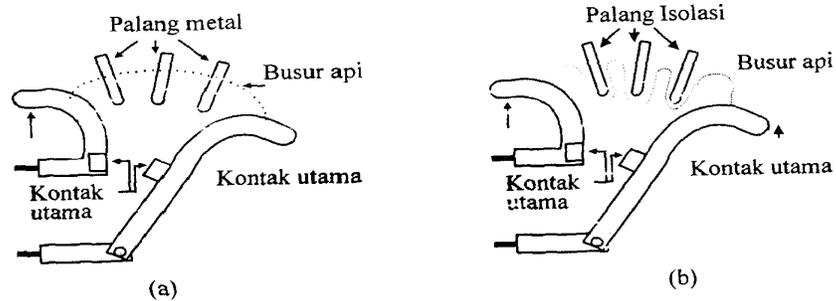


Gambar 2.16. Kontak Sela Tanduk

Saat kontak dipisahkan, busur api terbentuk pada bagian bawah kontakannya. Panas Yang ditimbulkan busur api membuat suhu di bagian bawah kontak lebih tinggi daripada suhu di bagian atasnya, sehingga terjadi aliran udara dari bawah ke atas. Aliran udara ini mendorong busur api bergerak ke atas. Busur api yang panjang sangat mudah dipadamkan oleh arus konveksi udara, sehingga busbar api sudah padam sebelum mencapai ujung tanduk. Pemutus daya seperti ini digunakan untuk rangkaian dc dan ac tegangan rendah, dengan arus pemutusan sampai ratusan ampere. Khusus untuk pemutus daya ac tegangan rendah, kontakannya dapat dibuat dari bahan bertitik-lebur rendah seperti kuningan dan tembaga. Busur api akan padam saat arus mencapai harga nol yang pertama, karena tegangan tidak cukup kuat menimbulkan emisi medan yang dapat mengawali terpaan balik busur api.

Letak isolasi pendukung kontak harus diatur sedemikian rupa, sehingga tidak gosong karena panas yang ditimbulkan, busur api. Penggosongan isolator akan memproduksi karbon sehingga isolator seakan-akan menjadi elektroda dan darinya keluar elektron hasil emisi termis yang dapat mengawali terjadinya terpaan busur api balik.

Untuk rangkaian bertegangan lebih tinggi, konstruksi kontak dan pemadam busur api dibuat seperti pada Gambar 2.17.a. Busur api yang sudah memanjang karena dorongan udara, dipotong-potong menjadi beberapa seksi oleh tabir metal. Sehingga busur api pada setiap seksi selain mengalami pemanjangan juga mengalami efek pendinginan. Pemutus daya ini digunakan untuk tegangan beberapa ribu volt dan dapat memutuskan arus beberapa ribu ampere.

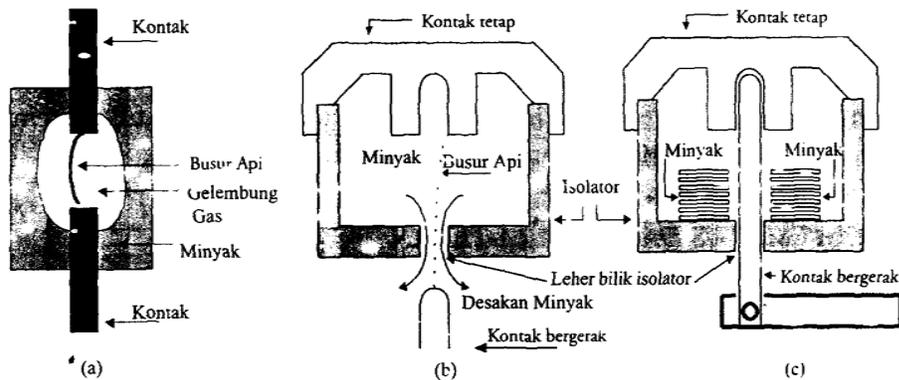


Gambar 2.17. Kontak Daya dengan Tabir :
(a) Metal dan (b) Tabir Isolator

Pemutus daya jenis lain adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 2.17.b. Tabirnya dibuat dari bahan isolator, sehingga busur api dipaksa menelusuri permukaan isolator. Dalam hal ini pemadaman busur api terjadi karena: (a) efek pemanjangan busur api, (b) efek pendinginan permukaan isolator dan (c) karena partikel bermuatan mempunyai peluang yang besar untuk mengadakan rekombinasi. Pemutus daya ini digunakan untuk memutus arus sampai 50 kA dan dapat digunakan pada rangkaian bertegangan sampai 10 W.

2.7.2 PEMUTUS DAYA MINYAK (Oil Circuit Breaker =OCB)

Konstruksi pemutus daya minyak telah diberikan pada Gambar 2.2. Saat kontak dipisahkan, busur api akan terjadi di dalam minyak, sehingga minyak menguap dan menimbulkan gelembung gas yang menyelubungi busur api, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.18.a.



Gambar 2.18 Gelembung Gas Pada Sela Kontak dan Bilik Kontak pada Pemutus Daya Minyak

Karena panas yang ditimbulkan busur api, minyak mengalami dekomposisi dan menghasilkan gas hidrogen yang bersifat menghambat produksi pasangan ion. Oleh karena itu, pemadaman busur api tergantung pada pemanjangan dan pendinginan busur api dan juga tergantung pada jenis gas hasil dekomposisi minyak.

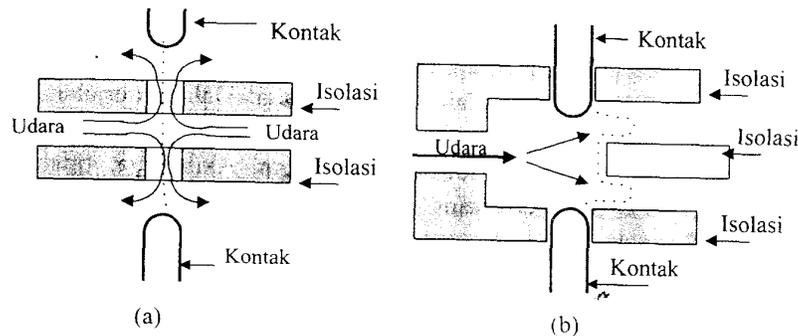
Pengembangan selanjutnya dari pemutus daya minyak adalah membuat bilik kontak seperti ditunjukkan pada Gambar 2.18.b dan 2.18.c.

Pada Gambar 2.18.b ditunjukkan suatu kontak yang sudah dipisahkan. Busur api terjadi dalam bilik berisi minyak. Gas yang timbul karena tekompresi minyak menimbulkan tekanan terhadap minyak, sehingga, minyak juga terdorong ke bawah melalui leher bilik. Di leher bilik, minyak ini melakukan kontak yang intim dengan busur api. Hal ini akan menimbulkan pendinginan busur api, mendorong proses rekombinasi dan menjauhkan partikel bermuatan dari lintasan busur api.

Jenis bilik kontak yang lain ditunjukkan pada Gambar 2.18.c. Leher bilik terbuat dari laminasi isolasi. Jika kontak bergerak ke bawah, minyak akan mengalir dari sela-sela laminasi, sehingga minyak terdorong dengan arah radial menuju busur api. Ada juga pemutus daya yang dirancang. Dengan alat tambahan, sehingga busur api yang berada di luar leher bilik didorong ke arah horizontal menjauhi tabir isolator yang dicelupkan dalam minyak jenuh. Jenis pemutus daya ini dapat memutuskan arus hubung singkat sampai 10 kA pada rangkaian bertegangan sampai 500 kV. Minyak yang berada di antara kontak sangat efektif memutuskan arus. Kelemahannya adalah minyak mudah terbakar dan kekentalan minyak rmemperlambat pemisahan kontak, sehingga tidak cocok untuk sistem Yang membutuhkan pemutusan arus yang cepat.

2.7.3 PEMUTUS DAYA UDARA-TEKAN (*Air Ballas Circuit Breaker*)

Pada Gambar 2.19 ditunjukkan skema kontak pemutus daya udara tekan. Pemutus daya ini dirancang untuk mengatasi kelemahan pada pemutus daya minyak, yaitu dengan membuat media isolator kontak dari bahan yang tidak mudah terbakar dan tidak menghalangi pemisahan kontak.

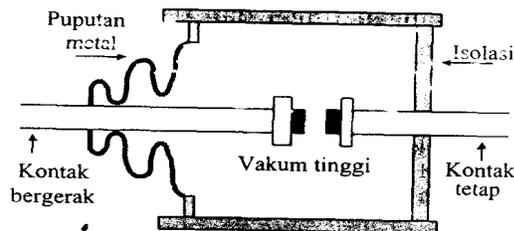


Gambar 2.19 Pemadaman Busur Api pada Pemutus Daya Udara Tekan

Sehingga pemisahan kontak dapat dilaksanakan dalam. waktu yang sangat cepat. Saat busur api timbul, udara bertekanan tinggi ditiupkan untuk mendinginkan busur api dan menyingkirkan partikel bermuatan dari sel kontak. Pada Gambar 2. 19a, udara ditiupkan paralel dengan busur api sedangkan pada Gambar 2.19b terlibat udara ditiupkan tegak lurus terhadap busur api dan mendorong busur api menelusuri permukaan tabir isolator, sehingga busur api bertambah panjang. Hal ini memberi efek pendinginan terhadap busur api dan memberi peluang bagi partikel bermuatan untuk mengadakan rekombinasi. Pemutus daya Jenis ini mampu memutus arus sampai 40 kA pada rangkaian ac bertegangan sampai 765 W.

2.7.4 PEMUTUS DAYA VAKUM (*Vacum Circuit Breacer = VCB*)

Pada pemutus daya vakum, kontak ditempatkan pada suatu bilik vakum seperti ditunjukkan pada Gambar 2.20. Untuk mencegah udara masuk ke dalam bilik, maka bilik harus ditutup rapat dan kontak Bergeraknya diikat ketat dengan perapat logam. Jika kontak dibuka, maka pada katoda kontak terjadi emisi termis dan medan tegangan yang tinggi yang memproduksi elektron-elektron bebas. Elektron hasil emisi ini bergerak menuju anoda. Dalam perjalanannya menuju anoda, elektron-elektron bebas ini tidak bertemu dengan molekul udara sehingga tidak terjadi ionisasi tumbukan. Akibatnya, tidak ada penambahan elektron bebas yang mengawali pembentukan busur api. Dengan kata lain, busur api dapat dipadamkan.



Gambar 2.20. Kontak Pemutus Daya Vakum

2.8 PERTIMBANGAN DALAM PEMILMAN PEMUTUS DAYA

Setiap pemutus daya dirancang sesuai dengan tugas yang akan dipikulnya. Ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam rancangan suatu pemutus daya, yaitu:

- Tegangan efektif tertinggi dan frekuensi daya jaringan di mana pemutus daya itu akan dipasang. Nilainya tergantung pada jenis pentanahan titik netral sistem.
- Arus maksimum kontinu yang akan dialirkan melalui pemutus daya. Nilai arus ini tergantung pada arus maksimum sumber daya atau arus nominal beban di mana pemutus daya tersebut terpasang.
- Arus hubung singkat maksimum yang akan diputuskan pemutus daya.
- Lamanya maksimum arus hubung singkat yang boleh berlangsung. Hal ini berhubungan dengan waktu pembukaan kontak yang dibutuhkan.
- Jarak bebas antara bagian yang bertegangan tinggi dan objek lain di sekitarnya.
- Jarak rambat arus bocor pada isolatornya.
- Kekuatan dielektrik media isolator sela kontak.
- Iklim dan ketinggian lokasi penempatan pemutus daya.

Tegangan pengenal suatu pemutus daya dirancang untuk lokasi yang ketinggiannya maksimum 1000 m di atas permukaan laut. Jika pemutus daya dipasang di lokasi yang ketinggiannya lebih dari 1000 m, maka tegangan operasi maksimum pemutus daya harus dikoreksi dengan faktor (Tabel 2.1)

Tabel 2.1. Faktor Koreksi Tegangan dengan Lokasi

Ketinggian (m)	Faktor Koreksi
1000	1.000
1212	0.98
1515	0.95
3030	0.80

2.9. KEMAMPUAN ARUS PEMUTUS DAYA

Kemampuan arus suatu pemutus daya dinyatakan dalam dua besaran, yaitu:

- Kemampuan pemutusan arus (*interrupting duty*), yaitu harga efektif arus hubung singkat simetri tertinggi yang dapat diputuskan pemutus daya tanpa menimbulkan kerusakan pada kontak pemutus daya.
- Kemampuan arus sesaat (*momentary duty*), yaitu harga efektif arus hubung singkat asimetri tertinggi yang dapat dipikul pemutus daya tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus daya.

Kedua kemampuan arus di atas ditetapkan dengan menghitung terlebih dulu harga efektif arus hubung singkat simetri (I'_{hs}) dan asimetri (I''_{hs}), di mana dalam perhitungan kedua arus ini reaktansi mesin-mesin dinyatakan seperti pada Tabel 2.2. Secara umum, kemampuan arus sesaat adalah:

$$I_m = 1,6 \times I''_{hs} \quad 2.1.7$$

Sedangkan untuk 1K tegangan di bawah 500 Volt, adalah:

$$I_m = 1,5 \times I''_{hs} \quad 2.1.8$$

Kapasitas daya sesaat pemutus daya adalah :

$$S_m = \sqrt{3} V_{pf} \times I_m \quad 2.1.9$$

di mana: V_{pf} = Tegangan fasa ke fasa sistem sebelum terhubung singkat
Kemampuan pemutusan arus pemutus daya adalah:

$$I_p = \kappa \times I'_{hs} \quad 2.2.0$$

Di mana κ adalah faktor pengali untuk memperhitungkan adanya komponen arus searah dalam periode subtransien. Faktor ini tergantung pada perbandingan X/R rangkaian sistem dilihat dari titik hubung singkat dan waktu pembukaan pemutus daya. Faktor κ untuk berbagai jenis pemutus daya dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Faktor κ dapat juga dihitung secara pendekatan dengan persamaan di bawah ini:

$$\kappa = \sqrt{1 + 2e^{-\left(\frac{2t_{op}\omega R}{X}\right)}} \quad 2.2.1$$

Dimana : t_{op} = waktu Pernbu' an pemutus daya (detik), $\omega = 2\pi f$ dan f adalah frekuensi sistem (Hz)

Sebagai pendekatan, harga X dapat diambil sama dengan harga Z dilihat dari titik hubung singkat. Sedangkan R adalah harga ekivalen dari semua resistor dilihat dari titik hubung singkat setelah semua reaktansi diabaikan. Kapasitas pemutusan arus adalah:

$$S_p = \sqrt{3} V_{pf} \times I_p \quad 2.22$$

Kemampuan pemutusan arus suatu pemutus daya dinyatakan dalam keadaan tegangan sama dengan tegangan maksimum pengenalnya. Pemutus daya tidak diperbolehkan bekerja di atas tegangan maksimum pengenalnya. Jika suatu pemutus daya bekerja pada tegangan di bawah tegangan maksimum pengenalnya, maka kemampuan pemutusan arus pemutus daya semakin besar, yakni menjadi:

$$I_s = I_{hsn} \times \frac{V_{mn}}{V_s} \quad 2.23$$

di mana:

- I_s = kemampuan pemutusan arus pada tegangan V ,
- I_{hsn} = kemampuan pemutusan arus pengenal pemutus daya
- V_{mn} = tegangan maksimum pengenal pemutus daya
- V_s = tegangan sistem di mana pemutus daya bekerja

Menurut persamaan di atas, kemampuan pemutusan arus pemutus daya semakin besar jika digunakan pada sistem yang tegangannya semakin rendah. Tetapi setiap pemutus daya ada batas maksimum kemampuannya dalam memutuskan arus hubung singkat, sehingga sekalipun tegangan sistem semakin rendah, kemampuan pemutusan arus tidak boleh melebihi harga maksimum tersebut. Harga maksimum kemampuan pemutusan arus suatu pemutus daya adalah:

$$I_{maks} = k \cdot I_{hsn} \quad 2.24$$

di mana harga k tergantung dari rancangan pembuat pemutus daya.

Tabel 2.2
Reaktansi Mesin untuk Perhitungan Arus Hubung Singkat

Jenis Mesin Listrik	Reaktansi untuk Perhitungan I_{hs}	
	Pemutusan I'_{hs}	Arus I''_{hs} Sesaat
Turbogenerator, Hidrogenerator dengan amortisi dan Kondensator	$1,0 X''_d$	$1,0 X''_d$
Hidrogenerator tanpa amortisi	$0,75 X''_d$	$0,75 X''_d$
Motor sinkron	$1,5 X''_d$	$1,0 X''_d$
Motor induksi ≥ 1000 HP, $n \leq 1800$ rpm		
Motor induksi ≥ 250 HP, $n = 3600$ rpm	$1,5 X''_d$	$1,0 X''_d$
Motor induksi $50 - 1000$ HP, $n \leq 1800$ rpm		
Motor induksi $50 - 250$ HP, $n = 3600$ rpm	$3,0 X''_d$	$1,2 X''_d$
Motor induksi ≤ 50 HP dan 1- fasa	Diabaikan	Diabaikan

Sebagai contoh, misalkan suatu pemutus daya mempunyai tegangan maksimum pengenal -74 kV, kemampuan pemutusan arus pengenal 6.000 A dan faktor $k = 2,2$. Kemampuan pemutusan arus maksimum pemutus daya ini adalah: $2,2 \times 6.000 \text{ A} = 13.200 \text{ A}$. Artinya, pemutus daya ini dapat dipasang pada suatu sistem yang tegangannya lebih-rendah dari 24 kV, asalkan arus hubung singkat yang akan diputuskannya tidak lebih dari 13.200 A

Tabel 2.3 : Faktor κ Berbagai Pemutus Daya

Jenis Pemutus Daya	Periode Waktu Pembukaan (Cycle)	Faktor κ
Umum	8	1.0
	5	1.1
	3	1.2
	2	1.4
Pemutus Daya yang dipasang di terminal generator di mana tingkat hubung singkat > 500 MVA	8	1.1
	5	1.2
	3	1.3
	2	1.5
Pemutus Daya Udara $\leq 600 \text{ V}$		1.25

Bab 3

SAKLAR PEMISAH

(Disconnecting Swith)

3.1 PENDAHULUAN

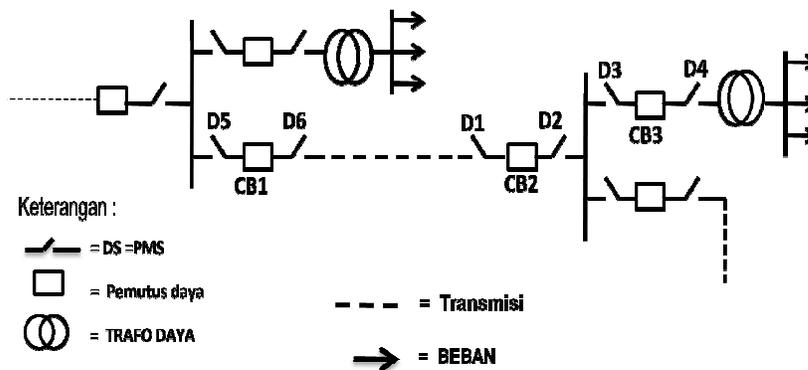
Untuk menjaga kontinuitas pelayanan, maka peralatan harus dirawat secara teratur. Saat perawatan tersebut dilaksanakan, maka seksi atau bagian yang dirawat harus dipisahkan dari sistem, sehingga bebas dari tegangan tinggi. Dengan demikian petugas dapat melaksanakan perawatan dengan aman. Untuk mencegah terjadinya bahaya tegangan tinggi, maka peralatan yang dirawat harus benar-benar terlihat oleh petugas bahwa peralatan sudah terpisah dari rangkaian sistem. Hal ini dapat dilakukan dengan alat yang disebut saklar pemisah. Saklar pemisah adalah peralatan yang dapat memutus dan menutup rangkaian yang arusnya rendah (± 5 ampere) atau pada rangkaian dimana pada saat saklar terbuka tidak terjadi perbedaan tegangan yang besar pada kutub saklarnya.

Pemasangan saklar pemisah pada gardu induk ditunjukkan pada Gambar 3.1 Sebelumnya telah dijelaskan bahwa jenis gardu induk terdiri atas gardu induk beban, gardu induk pembangkit, dan gardu induk hubung. Banyaknya saklar pemisah yang digunakan pada suatu gardu tergantung jenis gardu tersebut.



Gambar 3.1 Lokasi Penempatan Saklar Pemisah pada GI

Berdasarkan fungsinya, saklar pemisah dibagi atas tiga jenis yaitu saklar pemisah jaringan (D_1), saklar pemisah bus (D_2), saklar pemisah trafo (D_4) seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2.

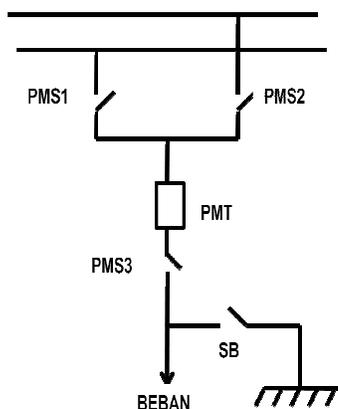


Gambar 3.2 Lokasi Penempatan Saklar Pemisah

Dari gambar 3.2 dapat ditunjukkan peranan saklar pemisah dalam perawatan peralatan system tenaga listrik. Jika pemutus daya CB_2 hendak dilakukan perawatan, maka kedua saklar pemisah D_1 dan D_2 harus dibuka agar CB_2 benar-benar bebas dari tegangan tinggi, baik yang berasal dari sumber maupun yang berasal dari induksi muatan pada kawat transmisi. Sebenarnya tegangan pada CB_2 dapat diiadakan dengan membuka CB_1 dan D_2 , tetapi kawat transmisi dapat bertegangan karena adanya induksi muatan yang diakibatkan awan bermuatan disekitarnya atau karena sambaran petir. Oleh karena itu, agar CB_2 benar-benar bebas dari tegangan, maka CB_2 harus dipisahkan dari jaringan. Hal ini dapat dilakukan dengan membuka D_1 dan D_2 serta membumikan terminal jaringan dengan saklar pembumian.

3.2 INTERLOK SAKLAR PEMISAH

Kesalahan operasi saklar pemisah dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan system lainnya, sehingga biaya pemeliharaan bertambah. Untuk mencegah kesalahan operasi, dibuat interlock antara saklar pemisah dengan pemutus daya dan antara saklar pemisah dengan saklar pembumian. Pemasangan pemisah pada jaringan keluaran suatu sistem ditunjukkan pada gambar 3.3



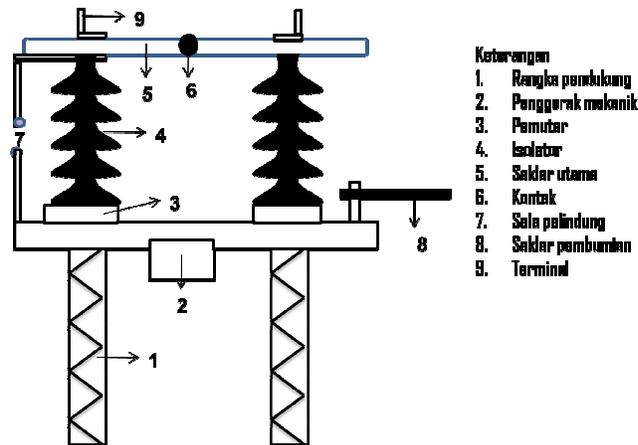
Gambar 3.3 Jaringan Keluaran Suatu Sistem

Untuk system seperti pada gambar 3.3 diatas interlok harus memenuhi syarat-syarat dibawah ini:

1. Saklar pemisah (PMS) tidak dapat ditutup sebelum pemutus daya (PMT) terkunci pada posisi terbuka.
2. Saklar pembumian (SB) tidak dapat ditutup hanya saat saklar pemisah terkunci pada posisi terbuka dan tidak ada busur api.
3. Saklar pemisah dapat ditutup hanya saat pemutus daya dan saklar pembumian dalam keadaan terbuka.
4. Pemutus daya hanya dapat ditutup setelah semua saklar pemisah terkunci dalam posisi terbuka.

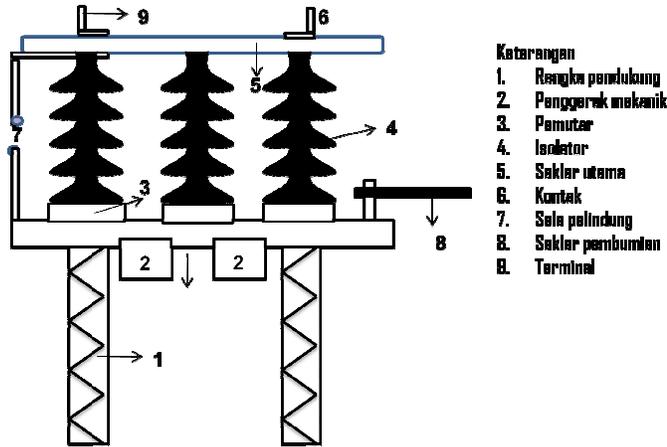
3.3 KONSTRUKSI SAKLAR PEMISAH

Dilihat dari jumlah kutubnya, saklar pemisah dibagi atas dua jenis, yaitu saklar pemisah kutub tunggal dan saklar pemisah 3 kutub. Berdasarkan pemasangannya dibagi atas pasangan dalam dan pasangan luar. Sedang ditinjau dari konstruksinya dibagi atas 2 jenis (a) tiga isolator pendukung, pendukung tengah berputar, pemisah ganda: dan (b) dua isolator pendukung, pemisah tunggal. Gambar kedua jenis saklar pemisah di atas ditunjukkan pada gambar 3.4 dan gambar 3.5.



Gambar 3.4 Saklar pemisah dua Isolator pemisah tunggal

Saklar pemisah di atas mempunyai dua saklar yaitu saklar utama dan saklar pembumian. Dalam prakteknya, setelah saklar utama dibuka, saklar pembumian ditutup. Kedua saklar ini mempunyai hubungan interlok, sehingga saklar pembumian dapat ditutup setelah saklar utama terbuka dan saklar utama tidak dapat ditutup sebelum saklar pembumian dibuka. Pengoperasian saklar dapat dilakukan dengan manual atau dengan peralatan elektro-mekanik. Jika dioperasikan dengan elektro-mekanik maka pengoperasiannya dapat dilakukan dilokasi pemasangannya atau dari ruang control. Saklar pemisah juga dilengkapi dengan kontak bantu untuk keperluan indikasi posisi dari kontak. Jika kekuatan dielektrik antara fasa dengan fasa dan antara terminal dengan terminal pada kutub yang sama lebih tinggi daripada kekuatan dielektrik ke tanah, maka saklar pemisah dilengkapi dengan sela pelindung.



Gambar 3.5 Saklar pemisah tiga Isolator pemisah ganda

3.4 DATA PENGENAL SAKLAR PEMISAH

Saklar pemisah dapat dibuat berkutub tunggal atau berkutub tiga dan ditandai dengan hal-hal berikut ini:

- Tegangan
- Arus Normal
- Tingkat isolasi
- Frekuensi
- Arus hubung singkat maksimum
- Tekanan (jika penggerak kontak menggunakan udara tekan)
- Tegangan untuk peralatan control dan indicator.

Tanda-tanda pengenalan di atas tergantung pada standar yang dianut dan menurut standar DIN VDE 0670 adalah sebagai berikut:

a) Tegangan Pengenal

Tegangan pengenalan suatu saklar pemisah ditetapkan sama dengan tegangan tertinggi system. Tegangan system tertinggi antara lain adalah : 3,6, 7,2, 12, 17,5, 24, 36, 52, 72,5, 100 , 123, 145, 170, 245, 300, 362, 420, 525 dan 785 kV.

b) Arus Normal

Arus pengenalan standar saklar pemisah yang ditemui dewasa ini antara lain adalah : 200, 400, 630, 800, 1.259, 1.600, 2.000, 2.500, 3.150, 4.000, 5.000, 6.300 Amper.

c) Arus Hubung singkat

Arus hubung singkat maksimum adalah arus hubung singkat tertinggi yang dapat dipikul saklar pemisah selama 1 detik. Menurut standar yang ada besarnya adalah: 8, 10, 12,5, 16, 20, 25, 31,5, 40, 50, 63, 100 kA.

d) Pengenal tingkat isolasi adalah seperti diberikan pada tabel 1.1

Tegangan Pengenal kV rms	Ketahanan Tegangan ac 50 Hz 1 menit		Ketahanan Tegangan Impuls Standar 1,2/50 μ s	
	Ke Tanah dan Antar Kutub	Antara Titik Yang Dipisahkan	Ke Tanah dan Antar Kutub	Antara Titik Yang Dipisahkan
3,6	10	12	24/40*	23/46*
7,2	20	23	40/60*	46/70*
12	28	32	60/75*	70/85*
24	50	60	95/125*	110/140*
36	70	80	145/170*	165/195*
72,5	140	160	325	375
145	185	210	450	520
245	360	415	850	950

e) Tegangan catu daya

Tegangan catu daya untuk peralatan bantu umumnya adalah sebagai berikut:

Untuk tegangan DC (volt) : 24 , 48, 110 , 220/240 Volt

Untuk tegangan AC (volt) : 110 (untuk satu fasa) , 240 (untuk satu fasa) dan dan 415 (untuk 3 faswa)

3.5 PENGUJIAN SAKLAR PEMISAH

Pengujian yang dilakukan terhadap saklar pemisah ada dua jenis pengujian yakni 1) pengujian jenis dan 2) pengujian rutin. Masing-masing pengujian tersebut duraikan pada berikut ini.

1) Pengujian jenis terdiri atas:

- a. Pengujian tegangan tinggi impuls
- b. Pengujian tegangan tinggi ac
- c. Pengujian perangkat control
- d. Pengujian temperature
- e. Pengukuran tahanan kontak
- f. Pengujian hubung singkat
- g. Pengujian saklar pembumian
- h. Uji pengoperasian
- i. Pengujian ketahanan mekanik

2). Pengujian rutin terdiri atas:

- a. Pengujian tegangan tinggi ac
- b. Pengujian perangkat control
- c. Uji pengoperasian
- d. Pengukuran tahanan kontak

3.6 SPESIFIKASI SAKLAR PEMISAH

Dalam setiap pembelian saklar pemisah, perlu diberikan keterangan mengenai hal-hal di bawah ini :

- a. Tegangan dan frekuensi nominal system, dan system pembumian.
- b. Keadaan lingkungan yang menyangkut: temperature, ketinggian, kelembapan, polusi, dan keadaan khusus lainnya.
- c. Jenis pasangan L pasangan luar atau pasangan dalam dan batas dimensi
- d. Jenis isolasi yang diinginkan
- e. Informasi pengenalan tegangan, frkuensi, arus normal, jumlah kutub, dan waktu maksimum arus hubung singkat.
- f. Informasi yang berhubungan dengan konstruksi, antara lain:
 - ❖ Pengoperasian
 - ❖ Tata letak pemasangan
 - ❖ Jarak antara fasa
 - ❖ Ruang untuk operator
 - ❖ Sela pelindung
 - ❖ Interlok
 - ❖ Jumlah dan jenis kontak Bantu (auxiliary switch)

Pembeli setidaknya-tidaknya memperoleh spesifikasi serta gambar-gambar teknis yang rinci tentang hal-hal dibawah ini :

a. Pengenal :

- ❖ Jumlah kutub
- ❖ Jumlah posisi kontak
- ❖ Tegangan
- ❖ Arus normal
- ❖ Frekuensi
- ❖ Arus hubung singkat maksimum

b. Sertifikat dan laporan hasil pengujian

c. Persyaratan konstruksi, meliputi :

- ❖ Jumlah pemisah per kutub
- ❖ Jarak pemisah per kutub
- ❖ Jenis kontak
- ❖ Pasangan luar atau pasangan dalam
- ❖ Media pemisah kontak
- ❖ Jarak bebas antara kutub dan antar bagian-bagian yang berbeda tegangan
- ❖ Jumlah tanki
- ❖ Jenis dan prosedur pengoperasian
- ❖ Tegangan catu daya untuk peralatan Bantu
- ❖ Daya untuk pengoperasian
- ❖ Jumlah (volume) dan tekanan udara atau minyak yang dibutuhkan untuk Pengoperasiannya
- ❖ Berat saklar pemisah dan alat mekanisnya

d. Waktu pengoperasian membuka dan menutup.

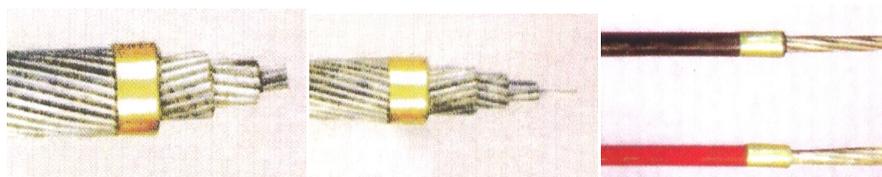
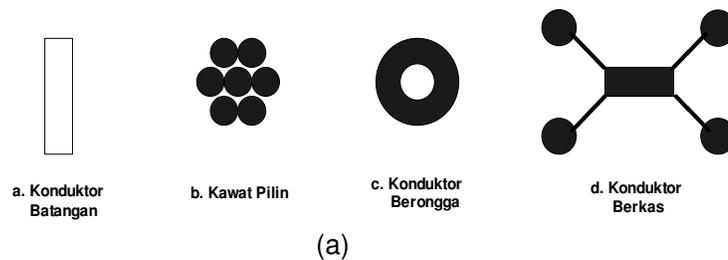
Bab 4

KONDUKTOR (Penghantar)

4.1 KAWAT TELANJANG

Konduktor pada umumnya terbuat dari bahan tembaga, aluminium dan aluminium campuran. Khusus untuk transmisi umumnya digunakan *All Aluminium Konduktor* (AAC), *All-Aluminium-Alloy Konduktor* (AAAC), *Aluminium Konduktor Steel Reinforced* (ACSR) dan *Aluminium Konduktor Alloy Reinforced* (ACAR).

Dilihat dari bentuk penampangnya, konduktor terdiri atas batangan, kawat pilin, konduktor berongga dan konduktor berkas. Bentuk-bentuk konduktor tersebut ditunjukkan pada gambar 4.1a dan 4.1b



(b)

Gambar 4.1 Bentuk-bentuk Konduktor

Konduktor batangan biasanya digunakan pada panel daya. Kawat pilin digunakan untuk jaringan distribusi dan transmisi, sedangkan konduktor berongga dan konduktor berkas digunakan transmisi tegangan tinggi. Konduktor berongga juga digunakan pada kabel yang mengalirkan arus besar.

Jika suatu konduktor bertegangan maka disekitar konduktor akan timbul medan elektrik, dan medan elektrik tertinggi terjadi pada permukaan konduktor. Kuat

medan elektrik tersebut tergantung kepada diameter dan kehalusan permukaan konduktor. Kuat medan elektrik pada permukaan konduktor akan semakin besar jika diameter konduktor semakin kecil dan permukaannya semakin kasar. Jika kuat medan elektrik di permukaan tersebut melebihi kekuatan dielektrik udara atau media di sekitarnya, maka pada udara atau media yang bersentuhan dengan permukaan konduktor akan terjadi pelepasan muatan. Peristiwa ini disebut dengan **korona**. Korona yang terjadi pada transmisi tegangan tinggi menimbulkan rugi-rugi daya dan gangguan komunikasi. Untuk mencegah korona, maka kuat medan elektrik di permukaan harus dikurangi hingga lebih kecil dari kekuatan dielektrik udara atau media disekitar. hal ini dapat dilakukan dengan memperbesar penampang konduktor, tetapi hal ini tidak ekonomis dan membuat konduktor semakin kaku. Cara yang lebih ekonomis adalah dengan menggunakan penghantar berkas. Cara lain adalah menggunakan konduktor berongga, dimana dengan cara ini dapat diperoleh konduktor berdiameter yang lebih besar dengan luas penampang yang sama dengan konduktor masif.

4.2 KABEL

Gambar 4.2 menunjukkan penampang konstruksi suatu kabel tiga fasa. Bagian utama dari suatu kabel adalah inti atau konduktor, bahan isolasi, bahan pengisi, bahan pengikat, bahan pelindung beban mekanik dan selubung pelindung luar, semua bahan tersebut harus membentuk suatu konstruksi yang membuat kabel fleksibel dan meskipun fleksibel tetap memiliki kekuatan mekanis yang memadai

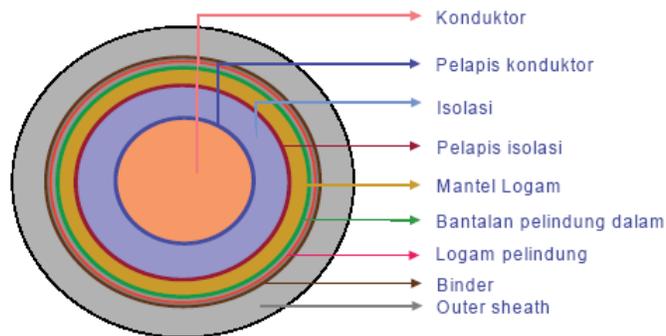
Kabel tegangan tinggi pada umumnya berinti tunggal dan berinti tiga, bahannya terbuat dari pilinan serat tembaga atau aluminium. Bentuk penampangnya tidak berupa lingkaran tetapi dibuat berbentuk sektoral agar dengan diameter luar yang tetap diperoleh luas penampang inti yang lebih besar. Atau dengan luas penampang inti yang tetap diperoleh diameter luar yang lebih kecil, sehingga ongkos pembuatannya lebih murah.

Inti dibungkus dengan bahan isolasi utama yang **sifat mekanisnya** yang utama adalah fleksibel, sehingga mudah digelar dan perubahan kekuatan mekanisnya tidak begitu kentara jika suhunya berubah-ubah dari suhu kamar sampai suhu operasi. **Sifat termalnya** yang utama adalah: memiliki ketahanan termal yang tinggi; koefisien muai panas rendah, daya hantar panas tinggi dan tidak mudah terbakar. **Sifat elektrik** bahan isolasi yang utama adalah: memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi agar diameter luar dapat dikurangi sehingga ongkos pembuatan kabel berkurang; tahanan isolasinya tinggi; dan rugi-rugi dielektriknya rendah. Sedangkan sifat kimianya adalah tidak bereaksi dengan asam dan alkali pada suhu kerja dan tidak menghisap air atau kedap air.

Bahan isolasi yang digunakan antara lain minyak, bahan polimer dan kertas yang diresapi minyak mineral. Jika bahan isolasi utama berupa bahan padat seperti polimer dan karet, maka karena permukaan konduktor yang tidak benar-benar mulus, maka diantara konduktor dengan isolasi utama dapat terjadi rongga. Untuk mengatasi hal ini maka diantara konduktor dengan isolasi utama dibuat lapisan tipis yang terbuat dari bahan silicon.

Ketiga inti kabel diikat dengan bahan isolasi yang disebut dengan isolasi pengikat. Ruang kosong yang terdapat diantara masing-masing isolasi utama maupun

antara isolasi utama dengan isolasi pengikat diisi dengan bahan isolasi yang kualitasnya lebih rendah, seperti jerami atau potongan-potongan kertas kemudian isolasi pengikat dibungkus dengan selubung yang terbuat dari lempengan timah. Permukaan luar selubung timah dilapisi dengan pita atau kawat baja untuk meninggikan kekuatan mekanis kabel. Lapisan baja ini harus dilapisi dengan bahan anti karat.



Gambar 4.2a Penampang Kabel Tegangan Tinggi



Gambar 4.2b Kabel (hantaran berisolasi)

Selubung timah dilapisi lagi dengan bahan yang sifatnya seperti bantal untuk melindungi isolasi pengikat dari tekanan mekanis yang berlebihan jika terjadi benturan mekanis pada bagian luar kabel kemudian bantalan diselubungi dengan pelindung yang berfungsi untuk melindungi kabel dari beban mekanis yang berasal dari luar kabel, bahannya terbuat dari baja anti karat. Lapisan terakhir adalah bahan pembungkus yang mencegah masuknya air kedalam pelindung.

Jika bahan isolasi utama kabel adalah kertas, maka kertas harus dikeringkan terlebih dahulu karena kertas yang dijumpai sehari-hari selalu lembab, sebab serat kertas menyerap air dari udara disekitarnya. Pengeringan kertas dilakukan dalam bejana vakum pada suhu 120 – 135 °C. Setelah itu dicelup dalam minyak mineral dan resin dalam bejana vakum dan dikeringkan dalam bejana yang tertutup rapat. Minyak harus memiliki kekentalan yang rendah pada suhu pencelupan tetapi kekentalannya tinggi pada suhu operasi kabel, koefisien muainya rendah dan titik bekunya harus

dibawah suhu operasi kabel, Resin adalah bahan tambahan untuk mencegah terjadinya oksidasi, sebab oksidasi dapat mempercepat penuaan dan menimbulkan pelapukan. Bahan tambahan juga diperlukan untuk mencegah penurunan viskositas minyak. Tegangan tembus listrik gabungan kertas dengan minyak lebih tinggi dari tegangan tembus masing-masing bahan jika sendiri-sendiri.

Ada kabel yang bahan isolasinya berupa serat yang diresapi minyak, jenis ini dibuat agar kabel lebih fleksibel sehingga mudah digelar. Penyambungan dalam jenis kabel ini beroleh keuntungan karena minyak tidak keluar dari ujung-ujung kabel sehingga tidak terjadi rongga-rongga udara dalam isolasi kabel. Kelemahan utama dari kabel ini terletak pada kemungkinan terjadinya gelembung gas pada saat beroperasi melayani beban yang berubah-ubah sehingga kabel mengalami pemanasan dan pendinginan secara bergantian. Karena koefisien pemuaian bahan isolasi kabel lebih besar dari bahan pembungkusnya (biasanya dari timah), maka pemanasan kabel akibat pembebanan maksimum akan mengakibatkan pemuaian bahan isolasi lebih besar dari pemuaian yang terjadi pada pembungkusnya, sehingga pembungkus tersebut membengkak. Pada saat beban berkurang akan terjadi pendinginan yang mengakibatkan bahan isolasi menyusut sehingga terdapat rongga-rongga diantara pembungkus dengan isolasi yang lama-kelamaan akan terisi dengan gas yang berasal dari bahan isolasi. Karena proses difusi rongga-rongga gas tersebut menyusup kepermukaan inti kabel, yaitu kawasan dimana intensitas medan elektrik maksimal. Di kawasan ini, rongga-rongga gas dapat mengalami tembus listrik sehingga terjadi peluahan sebagian di dalam kabel yang mengawali terjadi tembus listrik pada bahan isolasi. Peluahan sebagian tersebut dapat dicegah dengan mengurangi intensitas medan elektrik pada permukaan inti kabel, yaitu dengan menambah tebal bahan isolasi dan konsekuensinya ongkos pembuatan kabel semakin tinggi. Akibatnya, kabel ini hanya digunakan untuk tegangan bolak-balik sampai 35 kV saja. Diatas tegangan tersebut pengurangan intensitas medan elektrik dengan menambah tebal bahan isolasi tidak ekonomis lagi.

Jenis bahan isolasi kabel yang lain adalah kertas yang di resapi dengan minyak bertekanan. Kabel ini digunakan untuk transmisi tegangan tinggi. Minyak bertekanan akan mencegah terbentuknya rongga-rongga gas dalam kabel, karena aliran minyak dalam kabel akan segera mengisi rongga tersebut dengan minyak. Dengan cara ini, kelemahan yang terdapat pada kabel berisolasi serat dapat diatasi, tetapi ongkos pembuatannya lebih tinggi karena adanya perangkat tambahan, yaitu alat untuk membuat minyak tetap bertekanan.

4.3 PARAMETER KONDUKTOR

Jika suatu konduktor dialiri arus listrik maka pada konduktor akan timbul panas akibat rugi-rugi daya ($I^2 r$), dimana hal ini akan membuat suhu konduktor naik. Disamping itu, suhu konduktor juga dapat naik oleh karena adanya pemanasan yang berasal dari sumber panas disekitarnya, misalnya panas dari matahari, panas dari mesin-mesin dan lain-lain. Agar sifat fisis bahan konduktor tidak berubah, maka kenaikan suhu konduktor dibatasi sampai 75°C . Oleh karena itu arus kontiniu yang mengalir pada konduktor harus dibatasi, sedemikian hingga pada suhu 75°C , jumlah panas yang timbul pada konduktor sama dengan jumlah panas yang disebarkan konduktor kemudium sekitarnya. Arus tertinggi yang dapat dialirkan secara kontiniu

oleh suatu konduktor dimana arus tersebut tidak menimbulkan kenaikan suhu konduktor lebih dari 75 °C disebut daya hantar arus (current carrying capacity). Dalam pemilihan suatu konduktor, perlu diperhatikan agar arus kontiniu yang akan dialirkan tidak melebihi daya hantar arus konduktor yang dipilih.

Jarak antar konduktor atau spasi ditetapkan sedemikian sehingga tidak terjadi peluahan sebahagian atau korona dipermukaan konduktor. Untuk itu perlu pengetahuan tentang kuat medan elektrik pada permukaan masing-masing konduktor. Kuat medan elektrik tertinggi yang ditemukan harus lebih rendah dari kekuatan dielektrik bahan isolasi utama. Pada transmisi hantaran udara kuat medan pada permukaan konduktor direduksi dengan menggunakan penghantar berkas (bundled conductor). Dibawah ini diberikan kuat medan elektrik tertinggi pada permukaan konduktor sistim tiga fasa yang diperoleh secara pendekatan.

$$E_{maks} = \frac{k_b V}{n r_k \frac{\sqrt[3]{J_{12} J_{23} J_{31}}}{r_e}} \quad 4.1$$

Dimana:

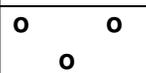
- J = Jarak antara konduktor fasa (meter)
- k_b = Factor koreksi kuat medan konduktor berkas yang tergantung kepada jumlah konduktor per fasa
- r_e = Jari-jari ekivalen konduktor (meter)
- r_k = Jari-jari luar konduktor (meter)
- n = Jumlah berkas konduktor per fasa

Untuk konduktor tunggal, r_e sama dengan jari-jari luar konduktor (r_k), sedang untuk konduktor berkas dihitung dengan persamaan dibawah ini:

$$r_e = \sqrt[n]{r_k s_1 \dots s_{n-1}} \quad 4.2$$

Dimana : s = Jarak antar berkas konduktor (meter) ,Nilai k tergantung kepada jumlah berkas konduktor per fasa, yang besarnya adalah seperti pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Faktor k_b Konduktor Berkas

n	Susunan	K_b
2		$1 + \frac{2r_k}{s}$
3		$1 + \frac{2r_k \sqrt{3}}{s}$
4		$1 + \frac{3r_k \sqrt{2}}{s}$

Jarak antar konduktor pada jaringan hantaran udara, selain dibatasi oleh medan tertinggi yang diijinkan, dibatasi juga oleh jauh ayunan konduktor jika di tiup angin. Jauh ayunan tergantung kepada kecepatan angin, diameter konduktor, berat jenis konduktor, lendutan dan jarak rentangan. Konduktor yang lebih ringan harus lebih besar jarak antar konduktornya dari pada konduktor yang lebih berat.

Hal lain yang di perhatikan dalam pemilihan konduktor adalah tahanannya. kekuatan mekanisnya, jari-jari geometris rata (GMR = Geometric Mean Radius) dan diameter luarnya. Tahanan konduktor berpengaruh terhadap rugi-rugi daya dan jatuh tegangan (*voltage drop*) pada konduktor. Semakin besar tahanannya semakin besar rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada konduktor tersebut. Sedangkan GMR dan diameter luar berpengaruh terhadap reaktansi induktif dan kapasitif konduktor. Untuk jaringan hantaran udara tiga fasa yang ditransposisi, reaktansinya dapat dihitung dengan rumus di bawah ini :

$$X_L = 12,566 \cdot 10^{-4} l f \ln \left\{ \frac{\sqrt[3]{J_{12} J_{23} J_{31}}}{\text{GMR}} \right\} \text{ Ohm}$$

4.3

$$X_c = \frac{2,862}{f l} 10^6 \ln \left\{ \frac{\sqrt[3]{J_{12} J_{23} J_{31}}}{r_c} \right\} \text{ Ohm}$$

Dimana : GMR = jari-jari geometris rata-rata konduktor (meter)
 F = frekuensi tegangan transmisi
 l = panjang transmisi (km)

4.4 PEMILIHAN UKURAN KONDUKTOR

4.4.1 Ditinjau dari segi Ekonomi

Ukuran konduktor transmisi dapat di tentukan berdasarkan pertimbangan ekonomi dan teknis. menurut Kelvin, biaya tahunan penyaluran adalah:

$$\text{Biaya Tahunan} = \frac{3 H_e I^2 R}{1000} + \frac{H_k b_u m'}{100} \quad 4.4$$

Dimana:

H_e = Harga energi terbuang (\$/KW-Tahun)
 I = Arus per-konduktor
 R = Tahanan per meter per konduktor
 H_k = Harga konduktor per kilogram
 m' = Bunga uang per tahun dalam persen

Harga minimum diperoleh jika harga tahunan energi terbuang sama dengan bunga dari bagian modal yang dipertimbangkan sebanding dengan berat konduktor, yaitu :

$$\frac{3 H_e I^2 R}{10} = H_k b_u m' \quad 4.5$$

Persamaan 4.5 dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{3H_e I^2 \rho}{10A} = H_k m A b_u \quad 4.6$$

Dimana :
 A = Luas penampang konduktor dalam (mm²)
 ρ = Tahanan jenis konduktor (Ohm mm²/m)
 m = Kerapatan konduktor (kg/cm)

Dari persamaan 4.6 diperoleh ukuran konduktor yang ekonomis sebagai berikut :

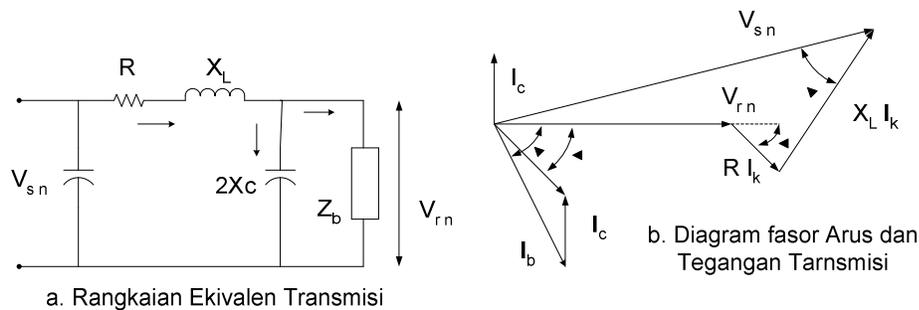
$$A = \sqrt{\frac{3H_e I^2 \rho}{10H_k m b}} \quad 4.7$$

4.4.2 Ditinjau dari segi Teknik

Dalam prakteknya, rumus Kelvin di atas jarang digunakan karena hasil yang diperoleh belum tentu memenuhi syarat teknik. Syarat-syarat teknis yang harus dipenuhi suatu konduktor adalah sebagai berikut:

1. Rugi-rugi Watt (I²R) yang terjadi pada konduktor tidak melebihi yang diizinkan.
2. Jatuh tegangan (ΔV) pada konduktor tidak melebihi yang diizinkan.
3. Saat beroperasi tidak terjadi korona pada permukaan konduktor.

Perhitungan ukuran konduktor dilakukan dengan meninjau rangkaian ekivalen nominal π transmisi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3.a. Diagram fasor tegangan dan arus transmisi ini diberikan pada gambar 4.3.b.



Gambar 4.3. Rangkaian Ekivalen dan Fasor Arus-Tegangan Transmisi

Terlihat bahwa arus yang mengalir pada konduktor transmisi adalah I_k, dimana arus ini dapat dihitung dengan persamaan 1.2. Artinya, konduktor harus mampu mengalirkan arus sebesar I_k, oleh karena itu, daya hantar arus konduktor terpilih

harus lebih besar dari I_k , jika rugi-rugi yang diizinkan pada transmisi adalah ΔP , maka tahanan konduktor maksimal adalah :

$$R = \frac{\Delta P}{3I_k^2} \quad 4.8$$

Menurut diagram fasor gambar 4.3.b, arus konduktor lebih kecil dari pada arus beban. Tetapi dalam perencanaan arus konduktor dapat dianggap sama dengan arus beban.

$$I_k = I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi} \quad 4.9$$

Dimana:

P_b = Besar beban yang diramalkan pada ujung penerima transmisi

V_r = Tegangan fasa-fasa ujung penerima transmisi

$\cos \varphi$ = Faktor daya beban yang diramalkan

Jika panjang transmisi adalah l kilometer, maka tahanan konduktor per kilometer adalah:

$$R' = R / l \quad 4.10$$

Pada lampiran A diberikan tabel yang memuat jenis, ukuran dan karakteristik konduktor tembaga dan aluminium. Pada tabel tersebut dapat dicari konduktor yang tahanannya perkilometer lebih kecil atau sama dengan R' . selanjutnya dengan rumus dibawah ini dihitung parameter transmisi berdasarkan karakteristik dari konduktor yang dipilih.

$$R_k = R'_k \times l \quad 4.11$$

Selanjutnya dapat dihitung arus dan tegangan jika transmisi menggunakan konduktor yang dipilih. Jika tegangan fasa ke netral ujung penerima adalah V_{rn} maka arus kapasitansi pada ujung penerima adalah:

$$I_c = \frac{V_{rn}}{2X_c} \quad 4.12$$

Arus pada konduktor transmisi terjadi:

$$i_k = \sqrt{(I_b \cos \varphi)^2 + (I_b \sin \varphi - I_c)^2} \quad 4.13$$

Sudut fasa arus konduktor transmisi adalah:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{I_b \sin \varphi - I_c}{I_b \cos \varphi} \right) \quad 4.14$$

Tegangan ujung pengirim fasa ke netral dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini :

$$V_{sn}^2 = (V_{rn} + I_k R_k \cos\alpha + I_k X_L \sin\alpha)^2 + (I_k X_L \cos\alpha + I_k R_k \sin\alpha)^2 \quad 3.15$$

Dengan demikian dapat dihitung tegangan jatuh pada konduktor yang dipilih, yaitu:

$$\Delta V = \frac{|V_{sn} - V_{rn}|}{V_{rn}} \times 100\% \quad 4.16$$

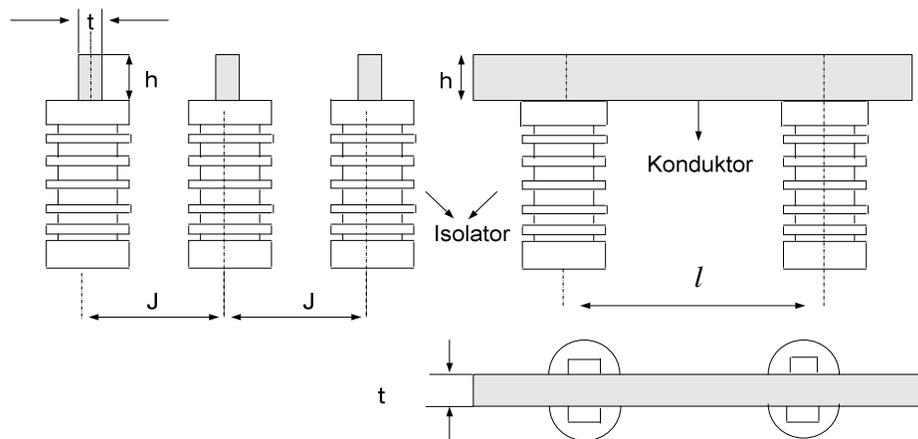
Jika $\Delta V > \Delta V_{izin}$, maka dipilih konduktor yang ukurannya lebih besar dari pilihan pertama dan prosedur perhitungan diatas diulang kembali sampai diperoleh $\Delta V \leq \Delta V_{izin}$.

4.5 REL DAYA

Konduktor digunakan juga sebagai rel daya pada gardu induk dan panel. Rel daya untuk gardu induk umumnya terbuat dari konduktor kawat, sedangkan untuk panel terbuat dari batangan konduktor. Ukuran konduktor dipilih sedemikian rupa, sehingga mampu memikul arus yang akan disalurkan. Kemampuan menghantar arus konduktor dapat dilihat pada lampiran A. jika pada rel mengalir arus hubung singkat, maka rel daya akan mengalami gaya elektromagnetik yang besarnya tergantung pada besarnya arus hubung singkat dan jarak antar rel. Oleh karena itu, jarak antar rel harus dirancang sedemikian rupa sehingga gaya yang diakibatkan arus hubung singkat tidak sampai merusak rel dan isolator penyangganya. Berikut ini akan diuraikan perihal gaya dan tekanan yang terjadi pada konduktor dan isolator penyangga suatu rel akibat arus hubung singkat.

a. Gaya dan Tekanan Pada Rel Tunggal

Pada gambar 4.4 ditunjukkan susunan rel suatu panel 3-fasa AC, dimana satu rel terdiri atas satu batang konduktor.



Gambar 4.4 Susunan Rel Daya Konduktor Tunggal

Jika arus simetri mengalir pada rel panel, maka tiap rel akan mengalami gaya. Gaya ini merupakan hasil interaksi arus pada suatu fasa dengan arus pada fasa yang lain. Karena arus fasa berbeda fasa 120° listrik satu dengan yang lain dan jarak antar fasa tidak sama, maka gaya pada setiap rel tidak sama. Gaya yang paling besar terjadi pada rel yang berada ditengah (Fasa S) karena rel ini mengalami gaya dari kedua rel disebelahnya.

Resultan gaya yang dialami rel tengah adalah:

$$F = \frac{\mu_0 0,86 I^2 l}{2 \pi J} = \frac{1,72 I^2 l}{J} \quad 4.17$$

Dimana:

- F = gaya pada rel tengah (Newton)
- μ_0 = permeabilitas media pengantara rel
= $4 \pi 10^9$ H/cm untuk udara
- I = arus simetris yang mengalir pada rel (kA)
- l = panjang rel (cm)
- J = jarak antar rel (cm)

Tekanan yang ditimbulkan gaya tersebut pada rel adalah:

$$\alpha = \frac{\alpha F l}{8 W} \quad 4.18$$

Dimana:

- σ = tekanan (stress) pada rel (N/cm²)
- α = factor jumlah penyangga terhadap tekanan rel (lihat tabel 3.2)
- W = momen tahanan rel (cm³)

Momen tahanan tergantung pada bentuk penampang rel. untuk penampang persegi empat besarnya adalah:

$$W = \frac{t h^2}{6} \quad 4.19$$

Dimana:

- t = lebar rel (cm)
- h = tinggi rel (cm)

Rel dinyatakan dapat memikul arus hubung singkat yang diperkirakan jika gaya akibat arus hubung singkat tersebut menimbulkan tekanan pada satu batang konduktor lebih kecil atau sama dengan kekuatan mulur (*yield strength*) rel.

$$\sigma \leq \sigma_m \quad 4.20$$

Dimana σ_m adalah kekuatan mulur rel (lihat karakteristik material lampiran B).

Gaya yang terjadi pada isolator penyangga adalah:

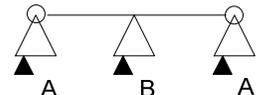
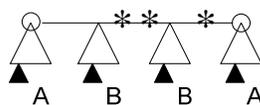
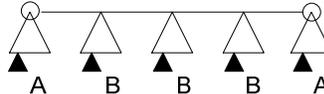
$$F_i = \beta F \quad 4.21$$

Dimana :

- Fi = gaya pada isolator (N)
- B = faktor penyangga terhadap gaya yang dialami isolator (tabel 4.2)

Isolator dinyatakan memenuhi syarat teknis jika gaya yang terjadi padanya tidak melebihi batas pembebanan maksimal isolator.

Tabel 4.2 Faktor Penyangga Terhadap Tekanan Rel dan Gaya Isolator

Susunan Penyangga	α	β	
		Isolator A	Isolator B
	1,0	A = 0,5	B = 0,5
	0,73	A = 0,375	B = 1,25
	0,5 [*] 0,73 ^{**}	A = 0,5	B = 1,0
	A = 0,5 [*] 0,7 ^{**}	A = 0,5	B = 1,1

b. Gaya dan tekanan pada rel batang ganda

Pada gambar 4.5 ditunjukkan susunan pada rel panel 3 fasa ac dimana setiap rel terdiri atas dua batang konduktor. Hal seperti ini dijumpai pada panel daya berkapasitas besar, dimana arus yang akan dialirkan sangat besar hingga diperlukan dua atau lebih batang konduktor, di beberapa tempat fasa. Agar konduktor-konduktor tersebut kokoh, di beberapa tempat diberi pengikat sehingga satu rel merupakan ikatan beberapa batangan konduktor. Dalam hal ini seikat konduktor yang membentuk rel fasa disebut konduktor fasa, sedangkan konduktor-konduktor yang membentuk satu rel disebut elemen konduktor.

Dalam panel ini ada dua jenis arus yang perlu dibedakan, yaitu: arus rel atau arus fasa (I_f) dan arus elemen konduktor (I_e). Arus fasa adalah arus yang mengalir pada satu rel sedang arus elemen konduktor adalah arus pada satu batang konduktor yang membentuk rel tersebut.

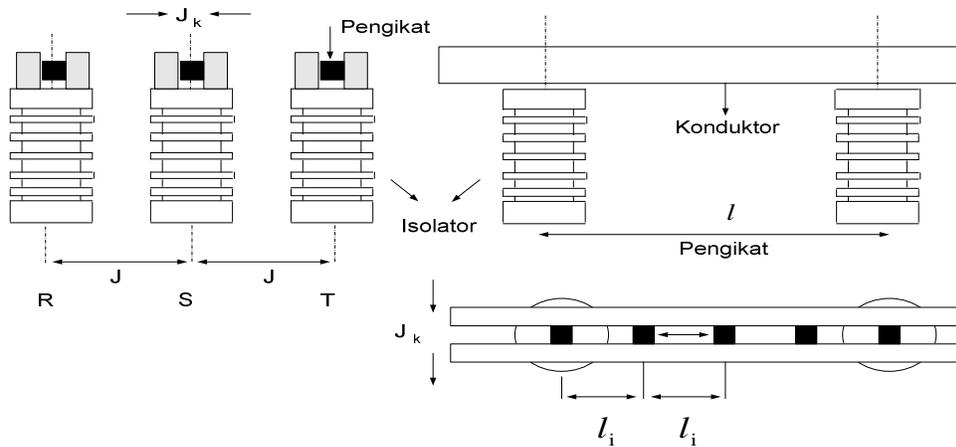
Besarnya arus elemen konduktor adalah sebagai berikut :

$$I_e = \frac{I_f}{n} \tag{4.22}$$

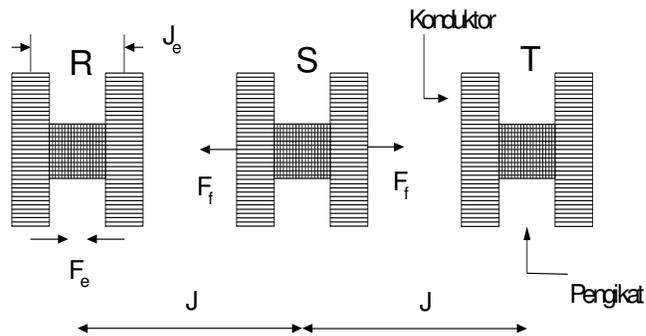
Dimana :

- I_e = Arus pada satu elemen konduktor
- I_f = Arus fasa atau arus rel
- n = Jumlah konduktor per rel

Gaya pada rel dan gaya pada elemen konduktor ditunjukkan pada gambar 4.6. Gaya yang timbul pada satu rel sebagai hasil interaksi antar arus fasa disebut gaya fasa (F_f). Gaya ini dapat dihitung dengan persamaan 4.17.



Gambar 4.5 Susunan Rel Batang Ganda Pada Suatu Panel Daya



4.6 Gaya Fasa dan Gaya Elemen Konduktor pada Rel Ganda

Pada satu rel terdapat dua atau lebih elemen konduktor yang masing-masing dialiri arus (I_e). Arus pada setiap elemen konduktor tersebut adalah se fasa. Jika banyak konduktor per fasa adalah dua, maka gaya yang dialami oleh satu elemen konduktor akibat arus elemen pada fasa itu sendiri adalah

$$F_{e-2} = \frac{1,72 I_e^2 l_i}{J_e} = \frac{1,72 (I_f / 2)^2 l_i}{J_e} \quad 4.23$$

Jika banyaknya konduktor per fasa adalah tiga, maka elemen konduktor yang berada ditengah akan mengalami dua gaya, yaitu gaya-gaya akibat interaksi arus elemen konduktor tengah dengan arus pada kedua elemen konduktor disebelahnya. Kedua gaya tersebut sama dan berlawanan arah, karena arus pada setiap elemen konduktor se fasa dan jarak masing-masing konduktor luar ke konduktor tengah adalah sama, sehingga gaya yang dialami konduktor tengah adalah nol. Konduktor akan mengalami dua gaya, masing-masing hasil interaksi arus pada elemen tersebut dengan elemen konduktor lainnya. Superposisi kedua gaya ini pada elemen konduktor luar adalah saling menjumlahkan dan besarnya adalah:

$$F_{e-3} = \frac{\mu_0 (I_f / 3)^2 l_i}{2\pi J_e} + \frac{\mu_0 (I_f / 3)^2 l_i}{2\pi (2J_e)} \quad 4.24$$

$$F_{e-3} = \frac{2,58(I_f / 3)^2 l_i}{J_e}$$

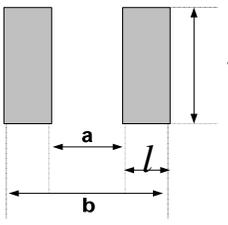
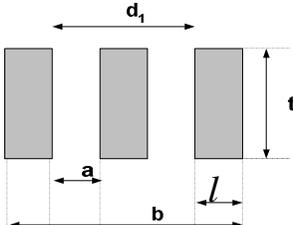
Tekanan pada rel akibat gaya fasa adalah :

$$\sigma_f = \frac{\alpha F_f l}{8k_e W_e} \quad 4.25$$

\Dimana :

- F_f = Gaya fasa dihitung dengan persamaan 4.17
- σ_f = Tekanan pada rel akibat gaya fasa, F_f (N/cm^2)
- α = Factor penyangga (lihat tabel 1.2)
- W_e = Momen tahanan ekivalen semua rel (cm^3), ditunjukkan pada (tabel 4.3)
- k_e = Factor perkalian momen inersia
 - = 0,6 untuk rel terdiri atas dua batang konduktor
 - = 0,5 untuk rel terdiri atas tiga atau lebih batang konduktor

Tabel 4.3 : Momen Tahanan Ekivalen (W_e) Konduktor batang Ganda

2 Konduktor	3 Konduktor
	
$t (b^3 - a^3) / 6b$	$t (b^3 - d_1^3 + l^3) / 6b$

Tekanan yang terjadi pada elemen konduktor karena gaya pada elemen konduktor tersebut adalah :

$$\sigma_e = \frac{F_e l_i}{16W} \quad 4.26$$

Dimana :

σ_e = Tekanan pada elemen konduktor akibat gaya konduktor, F_e (N/cm^2)

W = Momen tahanan satu elemen konduktor sesuai dengan persamaan 4.17

Resultan tekanan yang dialami batang konduktor adalah :

$$\sigma_t = \sigma_f + \sigma_e \quad 4.27$$

Konduktor dinyatakan memenuhi syarat jika dipenuhi :

$$\sigma_t \leq 1,5 \sigma_m \quad 4.28$$

$$\sigma_e \leq \sigma_m \quad 4.29$$

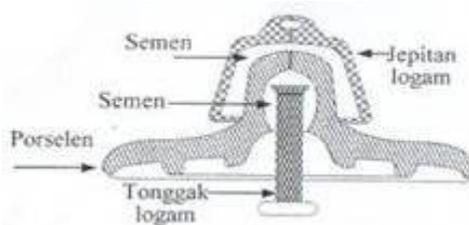
Selanjutnya gaya pada isolator penyangga dapat dihitung seperti halnya pada rel tunggal terdahulu.

Bab 5

ISOLATOR

5.1 UMUM

Pada instalasi tenaga listrik dan peralatan elektrik dijumpai konduktor-konduktor yang berbeda potensialnya. Dalam pengisolasian instalasi peralatan tersebut, hal pertama yang dilakukan adalah memisah masing-masing konduktor dengan jarak tertentu sehingga udara yang mengantarai suatu konduktor dengan konduktor lain berperan sebagai medium isolasi utama. Kemudian, konduktor-konduktor diikat penyangga dengan bantuan isolator. Konstruksi suatu isolator hantaran udara ditunjukkan pada gambar 5.1



Gambar 5.1. Penampang Isolator Piring

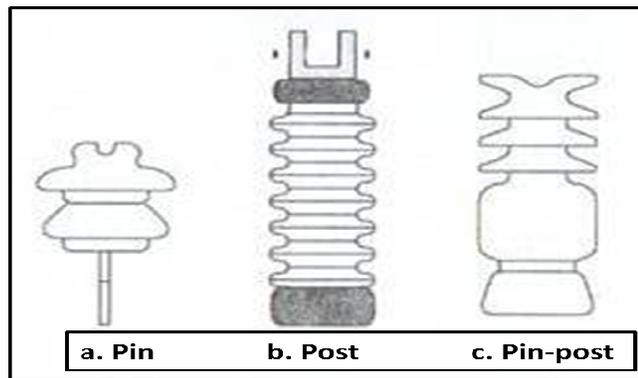
Isolator tegangan tinggi dijumpai pada jaringan transmisi, jaringan distribusi hantaran udara, gardu induk, panel pembagi daya, terminal ujung kabel dan peralatan tegangan tinggi. Pada jaringan hantaran digunakan sebagai penggantung dan penopang konduktor. Di gardu induk digunakan sebagai pendukung peralatan tegangan tinggi seperti saklar pemisah, pendukung konduktor penghubung dan penggantung rel daya. Pada peralatan tegangan tinggi digunakan sebagai mantel peralatan uji (trafo uji, pembagi tegangan, kapasitor, resistor) dan *bushing*. *Bushing* adalah isolator yang digunakan untuk mengisolir badan suatu peralatan dengan konduktor terminal tegangan tinggi yang menerobos badan peralatan tersebut. Dalam Bab ini, akan dijelaskan konstruksi, jenis-jenis, sifat elektrik dan sifat mekanik isolator; pengaruh polutan terhadap unjuk kerja isolator dan distribusi tegangan pada isolator dan usaha untuk meratakan distribusi tegangan tersebut.

5.2 KONSTRUKSI DAN JENIS ISOLATOR HANTARAN UDARA

Pada Gambar 5. 1, terlihat bahwa bagian utama dari suatu isolator terdiri dari bahan dielektrik, jepitan logam dan tonggak logam. Di samping itu ada semen untuk merekat jepitan logam dan tonggak logam dengan dielektrik. Umumnya dielektrik

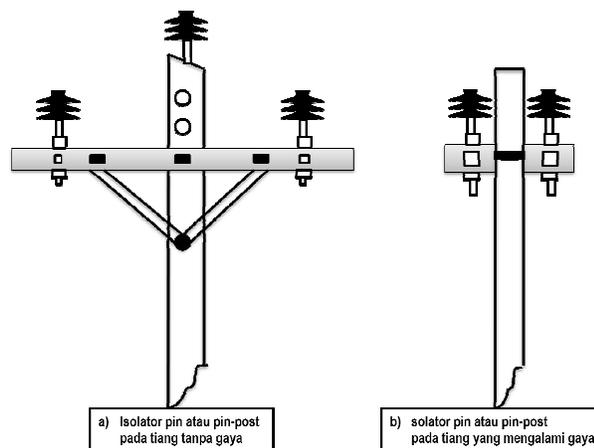
isolator terbuat dari bahan porselen, gelas, kertas dan karet-silikon (silicon rubber). Jepitan terbuat dari besi tuangan atau baja; dan untuk arus tinggi digunakan besi tuangan nonmagnetik atau logam putih agar tidak terjadi pemanasan yang berlebihan pada jepitan akibat magnetisasi. Konstruksi jepitan dan cara merekatnya ke bahan dielektrik akan menentukan kekuatan mekanis isolator.

Dilihat dari lokasi pemasangan, isolator terdiri dari isolator pasangan dalam (*indoor*) dan isolator pasangan luar (*outdoor*). Isolator pasangan luar dibuat bersirip untuk memperpanjang lintasan arus bocor dan mencegah terjadinya jembatan air yang terbentuk jika isolator dibasahi air hujan. Dilihat dari konstruksinya isolator terdiri dari isolator pendukung dan isolator gantung (*suspension*). Isolator pendukung terdiri dari tiga jenis, yaitu: isolator *pin*, isolator *post* dan isolator *pin-post*. Bentuk ketiga jenis isolator pendukung ini ditunjukkan pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2. Jenis-Jenis Isolator Pendukung

Isolator jenis *pin* digunakan untuk jaringan distribusi hantaran udara tegangan menengah, dipasang pada palang tiang tanpa beban tekuk seperti ditunjukkan pada Gambar 5.3a. Isolator *pin* dapat juga digunakan untuk tiang yang mengalami beban tekuk, dalam hal ini isolator dipasang ganda pada palang ganda, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.3.

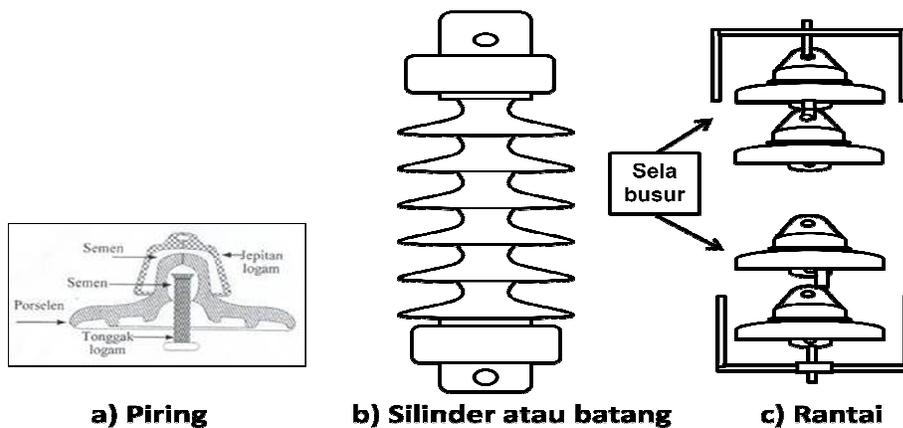


Gambar 5.3. Pemasangan Isolator Pin dan Pin-Post

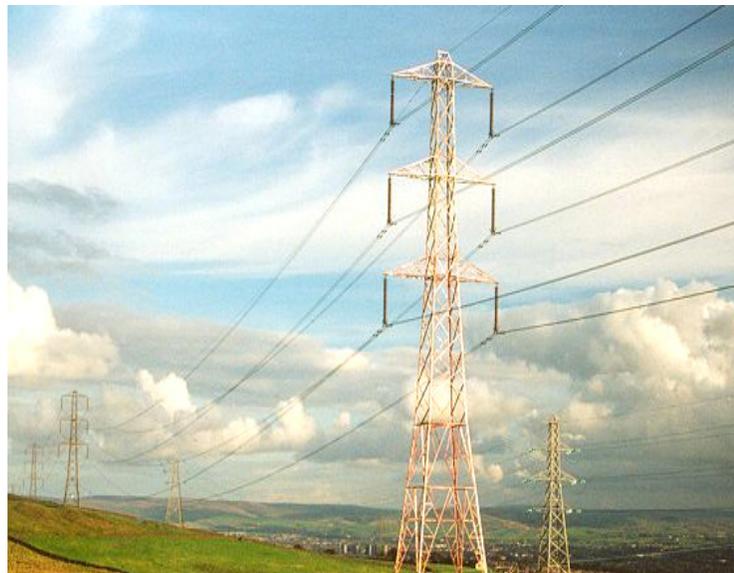
Jenis *pin-post* digunakan untuk jaringan distribusi hantaran udara tegangan menengah, dipasang pada tiang yang mengalami gaya tekuk. Isolator jenis *post*

digunakan untuk pasangan dalam, antara lain sebagai penyangga rel daya pada panel tegangan menengah. Isolator jenis *post* tidak bersirip seperti halnya jenis pin-post, karena isolator ini dirancang untuk pasangan dalam.

Dilihat dari bentuknya, isolator gantung terdiri dari dua jenis, yaitu isolator piring (Gambar 5.4.a) dan isolator silinder (Gambar 5.4b). Isolator gantung digunakan untuk jaringan hantaran udara bertegangan menengah dan tegangan tinggi. Untuk transmisi tegangan tinggi, isolator piring dirangkai berbentuk rantai, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.4.c. Isolator rantai ada yang dilengkapi dengan tanduk busur (*arching horn*) untuk melindungi isolator saat terjadi lewat-denyar akibat tegangan lebih pada jaringan. Pada jaringan tegangan menengah digunakan pada tiang akhir dan tiang sambungan seperti ditunjukkan pada Gambar 5.5.



Gambar 5.4. Bentuk-Bentuk Isolator Gantung



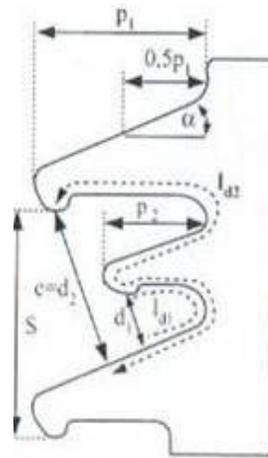
Gambar 5.5. Pemasangan Isolator pada transmisi

5.3 PARAMETER GEOMETRIS ISOLATOR

Parameter-parameter yang membedakan suatu isolator dengan isolator lainnya adalah sebagai berikut:

- Jarak minimum antar sirip (c)
- Perbandingan antara jarak spasi sirip dengan rentangan sirip (s/p)
- Perbandingan antara jarak rambat dengan jarak bebas ($1d/d$)
- Perbedaan antara dua jarak rentangan sirip berurutan ($P_1 - P_2$)
- Kemiringan sirip (α)

Arti dari parameter-parameter di atas dapat dilihat pada Gambar 5.6 dibawah ini.



Gambar 5.6. Profil Dan Parameter Suatu Isolator

a). Jarak minimum antar sirip (*shed*)

Jarak minimum antar sirip (c) dipertimbangkan dengan maksud supaya dua sirip berdekatan tidak dapat dijembatani air hujan. Berdasarkan pengalaman nilai c minimal adalah 30 mm. Untuk isolator yang panjang totalnya lebih kecil atau sama dengan 550 mm atau isolator yang mempunyai rentangan sirip (*shed overhang*) p lebih kecil atau sama dengan 40 mm, maka nilai c hingga 20 mm masih dapat diterima.

b). Perbandingan jarak antar sirip dengan rentangan sirip (s/p)

Perbandingan ini menentukan sifat pencucian alami (*self cleaning*) isolator. Nilainya tidak kurang dari 0.8. Pengalaman dilapangan menunjukkan bahwa nilainya untuk isolator jenis sirip mendatar (tanpa rusuk) dapat direduksi menjadi 0.65.

c). Perbandingan jarak rambat dengan jarak bebas ($1d/d$)

Perbandingan ini dipertimbangkan untuk mencegah terjadinya hubung singkat lokal. Nilainya tidak lebih rendah dari 5. Perbandingan diambil pada bagian isolator yang paling buruk misalnya pada bagian bawah isolator jenis anti kabut.

d). Sirip Selang-Seling (*Alternating shed*)

Parameter ini dipertimbangkan jika ada dua ukuran diameter dari sirip yang letaknya berselang-seling. Pada isolator yang seperti ini, selisih diameternya (p_1, p_2) tidak boleh kurang dari 15 mm supaya kedua sirip tidak terhubung oleh air hujan.

e). Kemiringan sirip

Kemiringan perlu dipertimbangkan karena hal ini menyangkut sifat pencucian sendiri isolator. Sudut permukaan atas isolator harus membentuk sudut lebih dari 5° kecuali untuk sirip tanpa rusuk, besar sudut itu dapat dikurangi menjadi 2° .

f). Faktor jarak rambat (*creepage factor*)

Parameter ini diperlukan jika isolator terdiri dari gabungan beberapa unit isolator, yaitu untuk menunjukkan karakteristik isolator secara keseluruhan. Parameter ini merupakan perbandingan antara total jarak rambat (1) dengan jarak terpendek antara bagian-bagian logam yang dikenakan tegangan normal pada isolator (s). Nilainya dianjurkan tidak lebih 3,5 di daerah yang polusinya ringan dan sedang, dan tidak lebih dari 4 untuk daerah yang bobot polusinya berat dan sangat berat.

g). Faktor profil (PF)

Faktor profil adalah perbandingan jarak bocor yang disederhanakan (*simplified leakage distance*), 1_s , dengan jarak rambat isolasi sebenarnya (*actual insulating creepage distance*), 1_a , yang diukur antar dua titik yang ditetapkan sebagai spasi (s). Nilai PF tergantung pada banyak ukura sirip dan dapat dituliskan sebagai berikut :

Untuk isolator satu ukuran sirip:

$$PF = (2p+s)/1_a \quad 5.1$$

Untuk isolator dengan sirip berselang-seling :

$$PF = (2p_1 + 2P_2 + s)/1_a \quad 5.2$$

Dalam hubungannya dengan tingkat bobot polusi, nilai PF dianjurkan adalah :

PF > 0,8 untuk tingkat polusi ringan dan sedang.

PF > 0,7 untuk tingkat polusi berat dan sangat berat.

5.4 BAHAN ISOLATOR

Karakteristik elektrik dan mekanik dari suatu isolator tergantung pada, konstruksi dan bahan yang digunakan. Telah dijelaskan sebelumnya bahwa bahan dari suatu isolator terdiri dari dielektrik, jepitan logam dan bahan perekat yang mengikat jepitan dengan dielektrik. Bahan dielektrik isolator harus memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi dan tidak dipengaruhi oleh kondisi disekitarnya. Bahan dielektrik untuk isolator umumnya adalah porselen, karena kekuatan dielektriknya tinggi dan

tidak dipengaruhi oleh kondisi disekitarnya. Sampel uji porselen yang tebalnya 1.5 mm, dalam medan elektrik seragam mempunyai kekuatan elektrik sebesar 22-28 kV_{rms}/mm. Jika tebal porselen bertambah maka kekuatan elektriknya berkurang karena medan elektrik di dalam isolator semakin tidak seragam. Bila tebal bertambah dari 10 mm hingga 30 mm, kekuatan elektrik berkurang, dari 80 kV_{rms}/mm menjadi 55 kV_{rms}/mm. Kekuatan dielektrik porselen pada tegangan impuls 50-70% lebih tinggi dari pada kekuatan dielektrik frekuensi daya.

Kekuatan mekanik dari porselen tergantung pada cara pembuatannya. Porselen sangat baik jika bekerja memikul beban tekan, tetapi sifat mekanisnya memburuk jika memikul beban tekuk dan semakin memburuk jika memikul beban tarik. Kekuatan mekanis porselen standar berdiameter 2-3 cm adalah 45000 kg/cm² untuk beban tekan, 700 kg/cm² untuk beban tekuk dan 300 kg/cm² untuk beban tarik. Kekuatan mekanik dari porselen suatu isolator tergantung pada konstruksi jepitan, cara menghubungkan porselen dengan jepitan, dan luas penampang porselen. Kekuatan mekanik dari porselen berkurang dengan penambahan luas penampang porselen dan pengurangan itu lebih besar pada kekuatan mekanik beban tarik dan beban tekuk.

Dewasa ini, gelas semakin banyak digunakan sebagai bahan dielektrik isolator piring dan isolator jenis pin. Isolator gelas lebih murah dari pada porselen dan karakteristik elektrik dan karakteristik mekanisnya tidak jauh ketinggalan dari porselen. Karakteristik elektrik dan mekanik gelas tergantung pada komposisi kimiawi dari gelas, khususnya pada kandungan alkali yang terdapat dalam gelas. Adanya larutan alkali dalam komposisi gelas akan menambah sifat higroskopisitas permukaan isolator sehingga konduktifitas permukaan isolator semakin besar. Akibatnya, sifat elektrik isolator gelas alkali tinggi lebih buruk daripada gelas alkali rendah atau dari porselen. Kekuatan elektrik gelas alkali tinggi adalah 17,9 kV_{rms}/mm dan gelas alkali rendah adalah 48 kV_{rms}/mm yakni dua kali lebih tinggi daripada kekuatan elektrik porselen.

Pada keadaan isolator bertegangan, sifat ion dari konduktivitas elektrik gelas alkali tinggi cenderung menguraikan gelas. Oleh karena itu, isolator gelas tidak dapat digunakan pada instalasi tegangan searah. Pada tegangan bolak-balik, penguraian elektrik secara praktis tidak ada sehingga penuaan isolator akibat penguraian elektrik berlangsung lebih lambat.

Dilihat dari proses pembuatannya, isolator gelas terdiri dari dua jenis, yaitu gelas yang dikuatkan (annealed glass) dan gelas yang dikeraskan (hardening glass). Kekuatan mekanik sampel uji gelas yang dikuatkan lebih besar daripada porselen karena regangan mekanik internal mudah dihilangkan saat proses penguatan. Pada porselen, regangan internal secara praktis tetap ada dan hal ini akan mengurangi kekuatan mekanisnya. Gelas alkalin memiliki koefisien pemuaian yang tinggi, sehingga isolator gelas mudah pecah jika dioperasikan pada suhu yang berubah & tajam. Hal ini membuat gelas dibatasi pemakaiannya hanya untuk instalasi pasangan dalam, tidak untuk instalasi yang mengalami perubahan yang tajam. Isolator untuk instalasi pasangan luar terbuat dari gelas alkali rendah yang diikuti dengan penguatan. Gelas alkalin hanya digunakan jika isolator membutuhkan pengerasan agar diperoleh kekuatan mekanik tinggi. Selama pengerasan, gelas dipanaskan sampai suhu mencapai suhu tinggi (650°C untuk gelas alkalin tinggi dan 780°C untuk gelas alkalin rendah). Setelah itu, udara dingin ditiupkan ke dalam gelas. Selama peniupan udara berlangsung, lapisan luar dari gelas menjadi keras bagian dalam terus berkurang

volumenya seiring dengan pendinginan. Proses ini bertujuan untuk membuat lapisan luar gelas beroleh kekuatan tekan dan bagian dalam gelas beroleh kekuatan tarik. Jika suatu beban tarik diberikan pada sebuah isolator, kerusakan mulai terjadi jika tekan pada lapisan luar hilang berlebihan. Dengan demikian akan dihasilkan suatu isolator yang lebih baik, bila dibandingkan dengan isolator dikuatkan.

Isolator gelas alkali rendah yang dikeraskan dapat menahan beban dinamis dengan baik, sehingga masih layak dipakai sekalipun pernah jatuh dari tempat tinggi. Tetapi ongkos pembuatannya tinggi sehingga hanya digunakan pada kasus-kasus di mana dibutuhkan kekuatan mekanik yang tinggi dan stabil pada setiap perubahan suhu.

Isolator jenis post, mantel peralatan uji tegangan tinggi dan *bushing* dapat dibuat dari bahan kertas yang dikeringkan melalui pemanasan. Suhu tinggi, kertas dilapisi dengan pernis, kemudian digulung membentuk tabung. Kemudian tabung ini diawetkan melalui proses pemanasan sehingga tabung menjadi kokoh, permukaannya berkilat, dan tidak menjadi lembut jika mengalami pemanasan ulang. Akhirnya permukaan isolator kertas dipernis lagi. Isolator kertas yang diproses seperti ini dimaksudkan untuk memperoleh kekuatan elektrik dan kekuatan mekanik yang cukup tinggi.

Pada Tabel 5.1 diperlihatkan perbandingan sifat mekanik dan elektrik dari porselen, gelas dan tabung kertas yang dikeringkan dengan pemanasan.

Tabel 5. 1
Karakteristik Elektrik dan Mekanik Bahan Dielektrik Isolator

Karak-teristik	Dielektrik			
	Porselen	Gelas		Tabung Kertas
		Alkali Rendah	Alkali Tinggi	
Tegangan tembus sampel uji kV_{rms}/mm	22-28	48	17,9	10-15
Permeabilitas, e	5,5-7	5,5	10	4,5
Tg d pada suhu 22°C, Ohm-cm	2-4	2-3	6-7	6
Tahanan permukaan pada kelembaban 65 %, Ohm	3×10^{13}	4×10^{14}	$1,5 \times 10^{12}$	10^{10}
Tahanan volume pada suhu 20°C, Ohm-cm	10^{13}	$4,5 \times 10^{14}$	4×10^{12}	10^{12}
Koefisien pemuaian	4×10^{-6}	5×10^{-6}	9×10^{-6}	
Kekuatan mekanis kg/cm^2 : Tekan	4500	7000	7000	400
Tekuk	700	6500		
		(Pengerasan 2500)		-
Tarik	300	600		500

5.5 KARAKTERISTIK ELEKTRIK ISOLATOR

Ditinjau dari segi kelistrikan, isolator dan udara membentuk suatu sistim isolasi yang berfungsi untuk mengisolir suatu konduktor bertegangan dengan kerangka

penyangga yang dibumikan sehingga tidak ada arus listrik yang mengalir dari konduktor tersebut ke tanah. Ada dua kejadian yang dapat menyebabkan sistem isolasi ini gagal melaksanakan fungsinya, yaitu terjadinya tembus listrik pada udara di sekitar permukaan isolator yang disebut peristiwa lewat-denyar (*flashover*) dan tembus listrik pada isolator yang menyebabkan isolator pecah. Kegagalan suatu isolator dapat terjadi karena bahan dielektrik isolator tembus listrik (*breakdown*) atau karena terjadinya lewat denyar (*flashover*) udara yang di sepanjang permukaan isolator. Dalam kasus yang pertama, karakteristik listrik tidak dapat pilih seperti semula dan sebagian dari isolator mengalami kerusakan mekanis sehingga tidak dapat digunakan lagi dan harus diganti. Pada peristiwa lewat denyar, kerusakan pada isolator hanya karena panas yang ditimbulkan busur api pada permukaan isolator. Jika rele proteksi bekerja, tegangan pada isolator tidak ada lagi, akibatnya busur api pun padam dengan demikian isolator tidak sempat mengalami kerusakan.

Semua isolator dirancang sedemikian hingga tegangan tembusnya lebih tinggi dari tegangan lewat denyarnya. Dengan demikian, kekuatan dielektrik suatu isolator ditentukan oleh tegangan lewat denyarnya kekuatan dielektrik dan nilai tegangan yang dapat dipikul isolator terjadi lewat denyar dapat diperkirakan dari tiga karakteristik isolator, yaitu tegangan lewat denyar bolak-balik pada keadaan b tegangan lewat denyar bolak-balik pada keadaan basah, dan karakter tegangan-waktu yang diperoleh dari tegangan surja standar.

Tegangan lewat denyar bolak-balik digunakan untuk memperkirakan kekuatan elektrik isolator jika memikul tegangan lebih internal. Sedang karakteristik tegangan-waktu digunakan untuk memperkirakan kekuatan elektrik isolator jika memikul tegangan lebih surja akibat sambaran pada jaringan. Tegangan lewat denyar bolak-balik kering adalah karakteristik utama dari isolator yang dipasang pada ruangan tertutup. Tegangan lewat denyar ditentukan pada keadaan permukaan isolator kering dan bersih. Tegangan lewat denyar dinyatakan pada keadaan standar, yaitu pada saat udara 20° C dan tekanannya 760 mmHg. Tegangan lewat denyar kering pada sembarang suhu dan tekanan udara dapat ditentukan dengan persamaan :

$$V = \partial V_s \tag{5.3}$$

di mana:

V = Tegangan lewat denyar isolator pada sembarang keadaan udara

V_s = Tegangan lewat denyar isolator pada keadaan standar

∂ = faktor koreksi udara $\partial = \frac{0.386b}{273 + \Psi}$

Ψ = temperatur udara (°C)

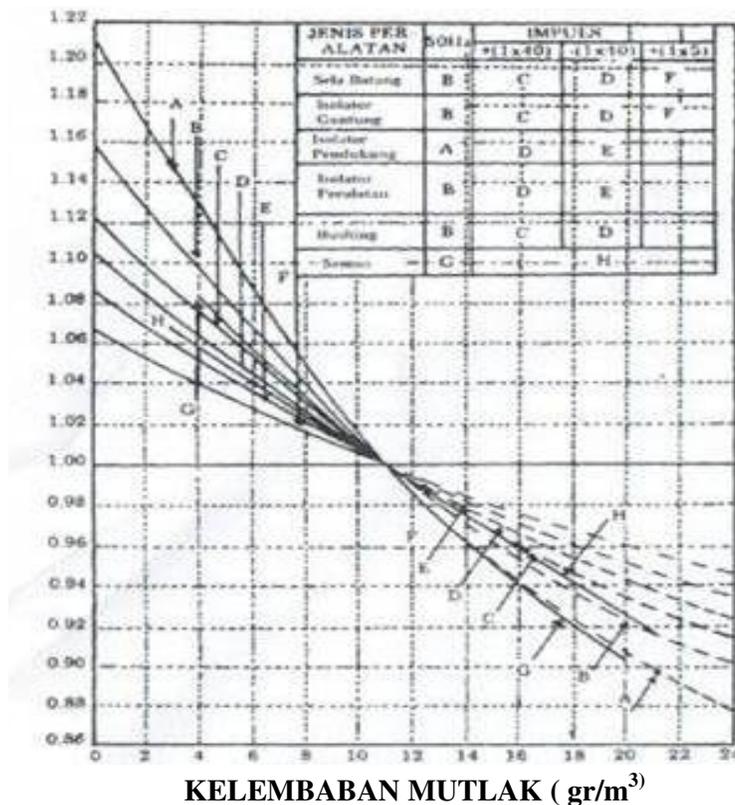
b = tekanan udara (mmHg)

Tegangan lewat denyar bolak-balik isolator bertambah dengan bertambahnya kelembaban udara. Jika V_s adalah tegangan lewat denyar isolator pada keadaan udara standar dan kelembaban 11 gr/m³, maka tegangan lewat denyar isolator pada sembarang suhu, tekanan dan kelembaban udara dapat ditentukan sebagai berikut:

$$V = \frac{\partial V_s}{k_h} \tag{5.4}$$

Di mana k_h adalah faktor koreksi yang tergantung kepada kelembaban udara. Kurva yang menyatakan hubungan k_h dengan kelembaban diperoleh secara empiris dan hasilnya adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 5.7. Tegangan lewat denyar bolak-balik basah suatu isolator sangat penting diketahui jika isolator itu akan dipasang di ruang terbuka.

Tegangan lewat denyar bolak-balik basah suatu isolator merupakan gambaran kekuatan dielektrik isolator tersebut pada saat basah karena air hujan. Sifat air hujan yang membasahi suatu isolator dicirikan atas tiga hal, yaitu intensitas dan konduktivitas air yang membasahi isolator tersebut. Oleh karena itu, dalam pengujian tegangan lewat denyar bolak-balik basah isolator, air yang membasahi isolator perlu distandarisasi. Menurut ciri air yang membasahi isolator saat pengujian adalah sebagai berikut: intensitas penyiraman 3 mm/menit, resistivitas air (r)= 10.000 ohm-cm dan arah penyiraman air membentuk sudut 45° dengan sumbu tegak isolator.



Gambar 5.7. Faktor Koreksi Kelembaban Udara

Tegangan lewat denyar bolak-balik basah suatu isolator juga tergantung kepada kondisi udara. Tetapi pengalaman menunjukkan bahwa yang lebih berpengaruh terhadap tegangan lewat denyar bolak-balik basah adalah tekanan udara sedang suhu tidak begitu berpengaruh. Jika lewat denyar terjadi pada suatu isolator basah, maka peluahan melintasi permukaan isolator yang basah dan celah udara. Oleh karena itu, kenaikan tegangan lewat denyar bolak-balik basah akibat kenaikan tekanan udara tidak pada setiap jenis konstruksi isolator. Jika celah udara yang dilalui

peluahan lebih panjang, maka pengaruh tekanan udara terhadap tegangan denyar basah semakin besar. Umumnya, setengah dari lintasan perlu merupakan celah udara. Dengan anggapan ini, tegangan lewat denyar basah pada sembarang tekanan udara dapat ditentukan sebagai berikut :

$$V = 0,5V_s \left(1 + \frac{b}{760} \right) \quad 5.5$$

di mana V_s adalah tegangan lewat denyar basah pada tekanan udara standar.

Karakteristik tegangan- waktu ditentukan hanya pada keadaan kering dan permukaan bersih, karena penurunan kekuatan elektrik isolator akibat air dapat diabaikan, hanya sekitar 2 - 3 %. Karakteristik tegar waktu diperoleh melalui pengujian isolator dengan tegangan impuls standar baik polaritas positif maupun dan polaritas negatif. Menurut IEC waktu muka dan waktu ekor tegangan impuls standar adalah **1,2 x 50 ms**. Tegangan lewat denyar impuls pada sembarang suhu dan tekanan dihitung dengan persamaan 5.3. Perlu diperhatikan bahwa faktor koreksi kelembaban k_h pada Gambar 5.7 berlaku untuk tegangan impuls terpotong pada waktu lebih dari 10 mikrodetik. Jika tegangan impuls terpotong di bawah 10 mikrodetik, koreksi dapat dikurangi sebanding dengan waktu pemotongan tegangan impuls. Sebagai contoh, menurut Gambar 5.7, $k_h = 1,06$ jika tegangan impuls terpotong lebih dari 10 mikrodetik. Dalam hal ini, penambahan koreksi adalah sebesar 0,06. Seandainya tegangan impuls terpotong 8 mikrodetik, maka penambahan koreksi adalah $0,06 \times 8/10 = 0,048$, dengan demikian faktor koreksi menjadi $k_h = 1,048$.

Pengujian impuls dilakukan dengan tegangan impuls standar penuh dan impuls terpotong 2 mikrodetik. Isolator harus mampu memikul tiga kali tegangan impuls standar penuh dan setelah itu harus mampu memikul tiga kali tegangan impuls standar terpotong.

5.6 KARAKTERISTIK MEKANIS ISOLATOR

Karakteristik mekanis suatu isolator ditandai dengan kekuatan mekanisnya, yaitu beban mekanis terendah yang mengakibatkan isolator tersebut rusak. Kekuatan mekanis ini ditentukan dengan membebani isolator dengan beban yang bertambah secara bertahap hingga isolator terlihat rusak. Kekuatan mekanis suatu isolator dinyatakan dalam tiga keadaan beban, yaitu kekuatan mekanis tarik, kekuatan mekanis tekan dan kekuatan mekanis tekuk.

Sebelum menetapkan kekuatan mekanis isolator untuk suatu konstruksi, perlu diketahui lebih dahulu beban mekanis yang akan dipikulnya dilapangan. Jika isolator akan digunakan pada jaringan hantaran udara, maka isolator harus mampu memikul berat konduktor dan beban tarik. Berat konduktor tergantung kepada luas penampang konduktor, jenis bahannya, jarak gawang dan ada tidaknya timbunan es pada konduktor. Tegangan mekanis karena beban tarik tergantung pada luas penampang konduktor, jarak gawang, suhu dan kecepatan angin. Bila jaringan hantaran udara menggunakan isolator jenis pin, maka semua beban di atas umumnya akan menimbulkan beban tektik pada isolator. Bila jaringan hantaran udara menggunakan isolator gantung, maka semua beban di atas akan menimbulkan regangan.

Isolator post biasanya digunakan untuk panel pembagi daya. Beban utama yang dipikulnya adalah berupa gaya tekuk akibat gaya mekanik antar konduktor baik pada kondisi operasi normal dan pada saat konduktor dialiri arus hubung singkat.

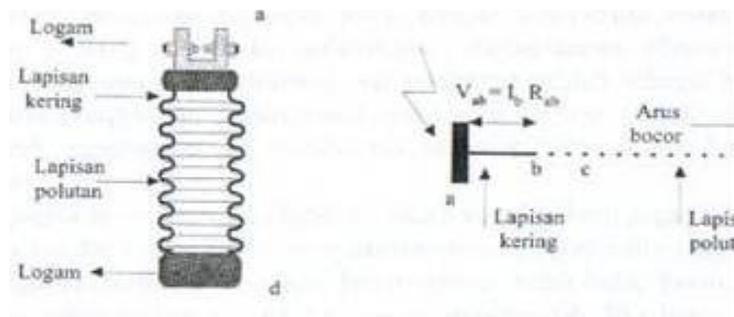
Dalam pengujian kekuatan mekanis dari suatu isolator, kerusakan selamanya terlihat, khusus pada pengujian isolator gantung, kerusakan dapat terjadi di dalam jepitan logam sehingga terlindung pandangan mata. Oleh karena itu, untuk isolator gantung, pengujian kekuatan mekanis dilakukan sambil memberi tegangan listrik pada tor sebesar 70-80 % tegangan lewat denyar bolak balik kering. Beban mekanis terendah yang menyebabkan isolator tembus listrik dinyatakan sebagai kekuatan mekanisnya. Tembus listrik ditandai dengan terputus hubungan listrik pada trafo uji yang digunakan untuk mencatu tegangan pada isolator.

Karakteristik utama dari suatu isolator gantung adalah kekuatan mekanis, satu jam, dan biasanya karakteristik ini dicantumkan pada permukaan setiap isolator gantung. Karakteristik ini ditentukan dengan membebani isolator secara serempak dengan beban mekanis sebesar 75 % kekuatan mekanis dan beban elektrik sebesar 75-80 % tegangan lewat denyar balik kering. Isolator harus mampu memikul beban tersebut selama jam tanpa menimbulkan kerusakan pada isolator. Dalam prakteknya beban tertinggi yang dapat dipikul suatu isolator ditetapkan sama dengan satu setengah kali kekuatan mekanis satu jam.

5.7 ISOLATOR TERPOLUSI

5.7.1 Pengaruh polutan terhadap kinerja isolator

Polutan yang terkandung di udara dapat menempel pada permukaan isolator dan berangsur-angsur membentuk suatu lapisan tipis permukaan isolator. Unsur polutan yang paling berpengaruh terhadap unjuk kerja isolator adalah garam yang terbawa oleh angin laut. Garam ini bersifat konduktif terutama pada keadaan cuaca berkabut atau pada saat hujan gerimis. Jika cuaca seperti ini terjadi, akan mengalir arus bocor dari kawat fasa jaringan ke tanah melalui lapisan konduktif yang menempel dipermukaan isolator dan tiang penyangga. Pada Gambar 5.8 ditunjukkan suatu isolator pendukung yang permukaannya dilapisi polutan konduktif dan rangkaian ekivalennya.



Gambar 5.8. Isolator Terpolusi Dan Rangkaian Ekivalennya

Lapisan polutan konduktif tersebut dapat dianggap sebagai suatu tahanan yang menghubungkan kedua jepitan logam isolator. Tahanan lapisan polutan jauh lebih rendah dari tahanan dielektrik padat isolator. Jika jepitan (a) bertegangan dan jepitan (b) dibumikan, maka arus bocor (I_b) akan mengalir melalui lapisan konduktif dari jepitan a ke b, sedang arus yang melalui dielektrik padat isolator dapat diabaikan.

Adanya arus bocor ini akan menimbulkan panas yang besarnya sama dengan kuadrat arus bocor dikali dengan tahanan lapisan polutan dari a ke d. Panas yang terjadi akan mengeringkan lapisan polutan dan pengeringan awal terjadi pada kawasan permukaan isolator yang berdekatan dengan jepitan logam isolator karena dikawasan ini dijumpai konsentrasi arus lebih tinggi. Pengeringan tersebut akan membuat tahanan lapisan polutan dikawasan jepitan isolator semakin besar. Misalkan lapisan polutan yang sudah kering adalah sepanjang a-b dan tahananannya adalah R_{ab} . Akibatnya beda tegangan pada lapisan polutan yang kering (V_{ab}) semakin besar dan menimbulkan kuat medan elektrik disekitarnya naik. Jika kuat medan elektrik ini melebihi kekuatan dielektrik udara disekitar isolator, maka akan terjadi peluahan dari titik a ke titik b. Busur api akibat peluahan ini membuat lapisan polutan yang kering (a-b) terhubung singkat, akibatnya arus bocor semakin besar. Arus bocor ini memanaskan lapisan polutan yang masih basah dan proses seperti (terulang lagi sehingga terjadi peluahan dari titik b ke titik c. Akibatnya panjang busur api akibat peluahan semakin bertambah, yaitu dari a ke c, demikian seterusnya secara berangsur-angsur busur api semakin panjang, dan saat busur api telah menghubungkan kedua jepitan logam isolator (a-d), maka terjadilah peristiwa lewat-denyar pada isolator.

Oleh karena itu, dalam perencanaan isolator jaringan perlu a informasi tentang tingkat bobot polusi dikawasan yang akan dijaringan tersebut. Informasi ini merupakan pedoman bagi perencana untuk menentukan parameter isolator yang layak digunakan pada kawasan tersebut. Sehubungan dengan hal ini, International Electrotechnical Commission (IEC) telah menerbitkan standar IEC 815 sebagai pedoman dalam pemilihan isolator dikawasan terpolusi. Dengan standar ini, dihitung jarak rambat isolator untuk suatu kawasan yang telah diketahui tingkat bobot polusinya.

5.7.2 PENENTUAN JARAK RAMBAT ISOLATOR

Jarak rambat nominal adalah jarak rambat total isolator atau lintasan terpendek menelusuri semua permukaan isolator yang menghubungkan, bagian konduktif atas isolator dengan bagian konduktif bawah isolator menurut IEC 8 15, jarak rambat nominal minimum dari suatu isolator, adalah sebagai berikut :

$$I_n = JRS \times V \times k_d \quad 5.7$$

di mana :

- I_n = jarak rambat nominal minimum (mm)
- JRS = jarak rambat spesifik minimum (mm/kV)
- V = tegangan sistem tertinggi fasa ke fasa (kV)
- k_d = faktor koreksi yang tergantung pada diameter isolator

Jika isolator akan digunakan untuk mengisolir bagian yang bertegangan fasa ke fasa, maka jarak rambat harus dikalikan dengan $\sqrt{3}$. Jarak rambat spesifik suatu isolator tergantung pada tingkat bobot polusi dikawasan pemasangan isolator. Menurut IEC 815, tingkat bobot polusi isolator dibagi atas empat tingkatan. Besar jarak rambat spesifik isolator pada masing-masing tingkat bobot polusi ditunjukkan pada Tabel 5.2

Tabel 5.2
Nilai JRS untuk Berbagai Tingkat Bobot Polusi Menurut IEC 815

Tingkat Bobot Polusi	JRS (mm/KV)
Ringan	16
Sedang	20
Berat	25
Sangat Berat	31

Hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa kinerja isolator menurun dengan bertambahnya diameter rata-rata isolator. Oleh karena itu perlu suatu faktor koreksi karena pertambahan diameter isolator untuk menaikkan jarak rambat isolator sedemikian hingga kinerja isolator semakin baik. Faktor koreksi diameter ini diberikan pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3
Faktor Koreksi Diameter Isolator Menurut IEC 815

Diameter Rata-rata (mm)	Faktor Koreksi (k_d)
$D_m < 300$	1
$300 \leq D_m \leq 500$	1,1
$D_m \geq 500$	1,2

5.7.3 PENETAPAN TINGKAT BOBOT POLUSI ISOLATOR

Menurut IEC 815, ayat 2, ada tiga metode untuk menentukan tingkat bobot polusi isolator disuatu kawasan, yaitu:

- a. Berdasarkan analisa kualitatif kondisi lingkungan seperti ditunjukkan pada Lampiran C.
- b. Berdasarkan evaluasi terhadap pengalaman lapangan tentang perilaku isolator yang sudah terpasang dikawasan tersebut.
- c. Berdasarkan pengukuran polutan isolator yang sudah terpasang yang sudah beroperasi.

Menurut IEC 815, penentuan tingkat bobot polusi menurut metode (c) di atas dapat dilakukan dengan salah satu cara di bawah ini:

1. Mengukur konduktivitas volume bahan polutan yang dikumpulkan dari lapangan dengan alat ukur direksional.
2. Mengukur deposit garam ekivalen dari polutan yang menenempel permukaan isolator atau metode "Equivalent Salt Deposit Density" (ESDD)
3. Mengevaluasi jumlah lewat denyar yang terjadi pada berbagai isolator yang berbeda ukuran panjangnya.
4. Mengukur konduktivitas permukaan isolator-isolator sampel.
5. Mengukur arus bocor isolator pada tegangan operasi sistem (nilai arus tertinggi selama beberapa kurun waktu tertentu yang berurutan)

Berikut ini akan dijelaskan prosedur pengukuran ESDD.

Untuk melarutkan polutan isolator, diambil air destilasi sebanyak 500 ml. Air pelarut ini ditempatkan dalam ruangan pendingin hingga temperatur air mencapai 20°C. Air diaduk agar temperatur merata. temperatur air mencapai 20°C, konduktivitas air diukur dengan alat pengukur konduktivitas. Konduktivitas air pelarut disetarakan dengan larutan garam NaCl dalam air murni. Kesetaraannya mencari konsentrasi garam dalam larutan air murni yang konduktivitasnya sama dengan konduktivitas air pelarut (D_1). Konsentrasi garam dalam suatu larutan air murni pada temperatur 20°C, dapat dihitung dengan persamaan di bawah ini:

$$D = \frac{(5.7 \times 10^{-4} \times \theta_{20})^{1.03}}{10} \quad 5.8$$

di mana:

- D = konsentrasi garam.(%)
- θ_{20} = 20 konduktivitas larutan pada temperatur 20° C (μ S/cm)

Selanjutnya polutan yang menempel pada isolator dilarutkan dalam air pelarut. Pekerjaan ini harus dilakukan dengan hati-hati, agar polutan dari luar isolator tidak ikut terlarut dalam air. Larutan ditempatkan dalam ruangan pendingin hingga temperturnya mencapai 20° C. Saat temperatur larutan polutan mencapai 20° C, konduktivitas larutan diukur dengan konduktivimeter. Kemudian dihitung konsentrasi ekivalen garam larutan polutan dengan persamaan 8.10 dan misalkan hasilnya adalah D_2 . Jika luas permukaan isolator telah diketahui, maka ESDD dihitung dengan rumus di bawah ini:

$$K = 10 \times G \times \frac{(D_2 - D_1)}{A} \quad 5.9$$

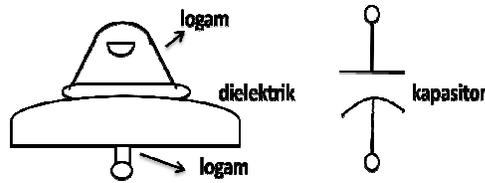
Dimana :

- K = ESDD (mg/cm²)
- G = volume air destilasi dalam gelas ukur (cc)
- A = luas permukaan isolator (cm²)

5.8 DISTRIBUSI TEGANGAN PADA ISOLATOR RANTAI

5.8.1 Kapasitansi Isolator

Dua konduktor yang dipisahkan oleh suatu dielektrik atau susunan “konduktor-konduktor” merupakan suatu susunan kapasitor. Semua isolator merupakan dua konduktor yang diantarai oleh suatu dielektrik. Pada Gambar 8.9 ditunjukkan contoh dari suatu isolator, yaitu satu unit isolator piring. Isolator tersebut membentuk suatu susunan “konduktor dielektrik-konduktor”, oleh karena itu isolator tersebut dapat dianggap merupakan suatu kapasitor.

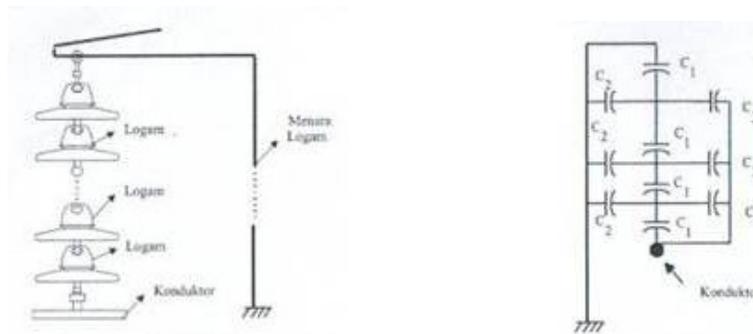


Gambar 5.9 Ekivalensi suatu isolator piring

Jika beberapa isolator piring dirangkai menjadi isolator rantai seperti pada Gambar 5.10.a, maka akan dijumpai tiga kelompok susunan “konduktor-dielektrik-konduktor”, masing-masing dibentuk oleh:

- Jepitan logam isolator-dielektrik isolator-jepitan logam di bawahnya. Susunan ini membentuk kapasitansi sendiri isolator (C_1).
- Jepitan logam isolator-udara-menara. Susunan ini membentuk kapasitansi jepitan logam isolator dengan menara yang dibumikan (C_2). Kapasitansi ini disebut kapasitansi tegangan rendah.
- Jepitan logam isolator-udara-konduktor transmisi. Susunan ini dibentuk oleh konduktor tegangan tinggi, maka disebut kapasitansi tegangan tinggi (C_3)

Oleh karena itu, isolator rantai dapat dianggap merupakan susunan dari beberapa unit kapasitor yang terhubung seperti pada Gambar 5.10b.



- Susunan “Konduktor-Dielektrik-Konduktor pada
- Susunan Kapasitansi pada Isolator Transmisi

Gambar 5.10 Susunan Konduktor- Dielektrik-konduktor” Pada Isolator Rantai

5.8.2 Pendekatan menghitung Distribusi Tegangan

Pendekatan dalam menentukan distribusi tegangan pada isolator rantai sama dengan menentukan distribusi tegangan pada transmisi panjang. Setiap kapasitansi yang dijumpai pada isolator rantai dianggap sebagai elemen kapasitansi seperti ditunjukkan pada Gambar 5.11

Di mana:

$$dC_1 = C_1 \frac{L}{dx} \quad 5.10$$

$$dC_2 = C_2 \frac{L}{dx} \quad 5.11$$

$$dC_3 = C_3 \frac{L}{dx} \quad 5.12$$

L = panjang seluruh isolator

Tegangan pada satu elemen kapasitor adalah sebagai berikut :

$$dV_x = -\frac{i_x + di}{j \omega C_1 L} dx$$

Karena $di_{xx} \ll i_x$, maka di_x dapat diabaikan, sehingga diperoleh :

$$dV_x = -\frac{i_x}{j \omega C_1 L} dx \quad 5.13$$

Jumlah arus pada titik X adalah :

$$di_x = di_3 - di_2 \quad 5.14$$

$$di_2 V_x j \omega C_2 \frac{dx}{L} \quad 5.15$$

$$di_3 = (V - V_x) j \omega C_3 \frac{dx}{L} \quad 5.16$$

Selanjutnya dV_x didiferensialkan terhadap x, maka diperoleh :

$$\frac{d^2 V_x}{dx^2} = -\frac{di_x}{j \omega C_1 L dx} \quad 5.17$$

$$\frac{d^2 V_x}{dx^2} = -\frac{d(i_2 - i_3)}{j \omega C_1 L dx} \quad 5.18$$

Persamaan 8.15 disubstitusi ke dalam persamaan 5.18, diperoleh :

$$\frac{d^2 V_x}{dx^2} = \frac{V_x}{L^2} \left(\frac{C_2 + C_3}{C_1} \right) - \frac{V C_3}{L^2 C_1} \quad 5.19$$

Misalkan

$$a = \sqrt{\frac{C_2 + C_3}{C_1}} \quad 5.20$$

Maka tegangan pada isolator ke n dihitung dari titik yang dibumikan (menara) dapat dirumuskan sebagai berikut :

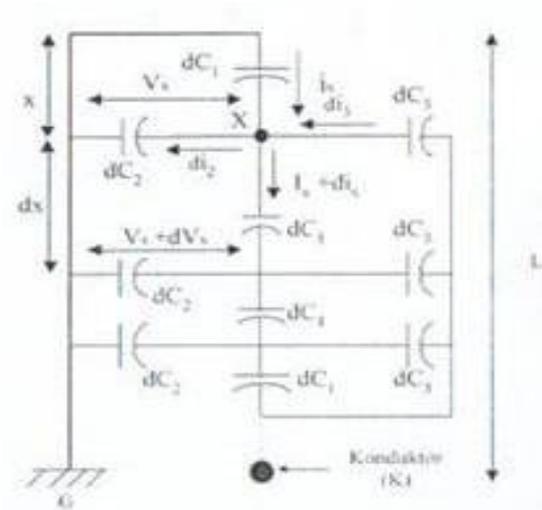
$$V_n = A \frac{C_2}{C_1} \text{Sinh}(a.n) + \frac{C_3}{C_2} \text{Sinh}[a(n - N)] + B \quad 5.21$$

$$A = \frac{V}{a^2 \text{Sinh}(a.N)} \quad 5.22$$

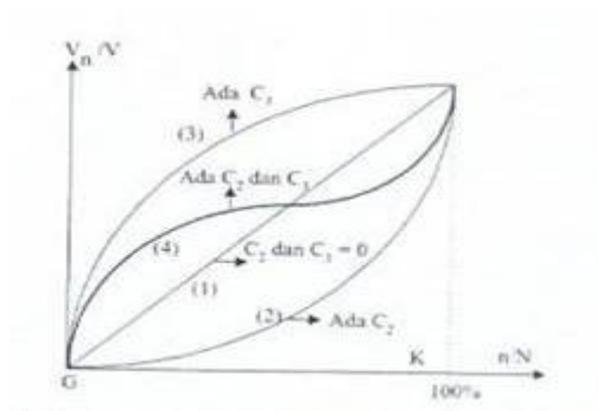
$$B = \frac{C_3 V}{C_3 C_3} \quad 5.23$$

di mana:

- V_n = tegangan antara isolator unit k dengan menara.
- V = tegangan fasa ke netral
- n = nomor unit isolator
- N = jumlah unit isolator piring yang digunakan



Gambar 5.11. Rangkaian Ekuivalen Isolator Rantai



Gambar 5.12. Distribusi Tegangan pada Isolator Rantai

Kurva distribusi tegangan pada isolator rantai adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 5. 12. Artinya, jika tegangan yang dipikul isolator adalah tegangan bolak-balik, maka distribusi tegangan pada setiap isolator tidak merata. Jumlah isolator yang digunakan dan kapasitansi C_1 , C_2 , dan C_3 mempengaruhi distribusi tegangan yang dipikul setiap unit isolator. Makin banyak jumlah isolator yang digunakan maka distribusi tegangan yang dipikul setiap unit isolator makin kecil. Penambahan jumlah unit isolator perlu dilakukan jika tegangan isolator yang terdekat ke kawat fasa lebih besar dari kekuatan dielektrik isolator tersebut.

Dalam pemilihan jenis isolator suatu transmisi perlu diketahui efisiensi dari isolator yang akan dipilih. Efisiensi dari suatu isolator yang akan dipilih. Efisiensi dari suatu isolator didefinisikan sebagai berikut:

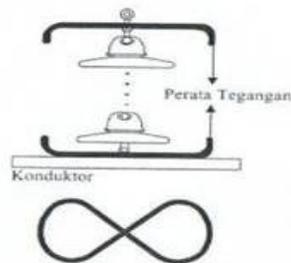
$$\eta = \frac{\text{Tegangan yang dipikul isolator rantai}}{N \times \text{Tegangan unit isolator terdekat pada kawat fasa}} \quad 5.24$$

Jika efisiensi suatu isolator semakin rendah maka tegangan pada unit isolator yang paling dekat dengan kawat fasa semakin besar. Kenaikan tegangan ini perlu diwaspadai supaya jangan sampai lebih besar dari kekuatan dielektrik isolator. Jika kekuatan dielektrik isolator yang dipakai rendah maka tegangan unit isolator yang paling dekat ke kawat fasa harus diperkecil. Hal ini dapat dilakukan dengan menambah jumlah isolator. Penambahan ini akan memperkecil efisiensi isolator. Dengan perkataan lain jika kekuatan dielektrik dari isolator yang dipakai rendah maka efisiensi isolator makin kecil.

5.8.3 PERATAAN DISTRIBUSI TEGANGAN ISOLATOR RANTAI

Pada Gambar 5.12 telah ditunjukkan pengaruh kapasitansi C_2 dan C_3 terhadap distribusi tegangan pada setiap piring isolator rantai. Distribusi tegangan pada setiap piring isolator tidak sama meskipun kapasitansi masing-masing isolator piring sama. Perataan distribusi tegangan adalah suatu usaha yang bertujuan membuat tegangan pada setiap isolator piring (DV) sama.

Kurva distribusi tegangan yang ideal adalah linier (kurva 1), yaitu jika kapasitansi ke menara C_2 , dan kapasitansi tegangan tinggi C_3 , tidak ada. Jika hanya ada kapasitansi ke menara, maka kurvanya menurun (kurva 2); dan jika hanya ada kapasitansi tegangan tinggi, maka kurvanya naik (kurva 3). Jika kedua kapasitansi ini (C_2 , dan C_3) diperhitungkan, maka kurva distribusi tegangan merupakan resultan kurva 2 dan kurva 3 yang diperoleh dengan superposisi kedua kurva tersebut (kurva 4). Untuk mendapatkannya, kurva 3 dikurangi sebesar DV, yaitu besar penyimpangan kurva 2 dari kurva distribusi linier (kurva 1). Hal ini memperjelas bahwa distribusi tegangan semakin linier akibat pengaruh adanya kapasitansi tegangan tinggi. Dengan kata lain, efek kapasitansi ke menara dapat dikompensasi dengan memperbesar nilai kapasitansi tegangan tinggi. Hal ini dilakukan dengan membuat elektroda perata pada jepitan konduktor seperti ditunjukkan pada Gambar 5.13.



Gambar 8. 13. Elektroda Perata pada Isolator Ranta

Misalkan titik X pada Gambar 5.11 adalah unit ke- n dari N elemen isolator rantai. Untuk harga C_2 tertentu dan C_1 yang konstan, C_3 harus dibuat sedemikian besarnya sehingga distribusi tegangan pada unit-unit isolator menjadi linier. Jatuh tegangan pada setiap isolator piring harus sama dengan ΔV , di mana $\Delta V = V/N$. Jika syarat ini dipenuhi, maka seharusnya dipenuhi $i_x = i_{x+1}$. Persamaan arus pada titik sambung tersebut adalah:

$$(V - V_x) \omega C_3 = V_x \omega C_2 \quad 5.25$$

Dengan $V_x = n \cdot \Delta V$ akhirnya diperoleh:

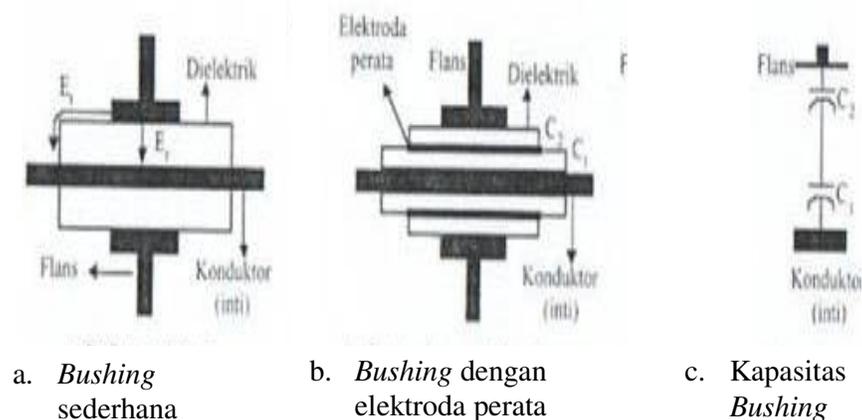
$$C_3 = C_2 \frac{n}{N - n} \quad 5.26$$

Jika kapasitansi ke menara C_2 diketahui baik melalui pengukuran atau penghitungan, maka dapat dicari harga kapasitansi tegangan tinggi C_3 agar diperoleh distribusi tegangan yang mendekati ideal.

5.9 BUSHING

5.9.1 Konstruksi Suatu Bushing

Biasanya, untuk keamanan elektrik, konduktor tegangan tinggi dilakukan menerobos suatu bidang yang dibumikan, melalui suatu lubang terbuka yang dibuat sekecil mungkin dan biasanya membutuhkan suatu pengikat padu yang disebut *bushing*. Konstruksi suatu *bushing* sederhana ditunjukkan pada Gambar 5.15.



Gambar 5. 15. Konstruksi Suatu *Bushing* Sederhana



Gambar 5. 15d. Bushing trafo daya

Bagian utama dari suatu *bushing* adalah inti atau konduktor, bahan dielektrik dan flans yang terbuat dari logam. Fungsi inti adalah menyalurkan arus dari bagian dalam peralatan ke terminal luar dan bekerja pada tegangan tinggi. Dengan bantuan flans isolator diikatkan pada badan peralatan yang dibumikan. *Bushing* untuk tegangan AC sampai 30 kV dibuat dari porselen atau damar tuang; untuk tegangan yang lebih tinggi bahan isolasi yang lebih disukai adalah minyak trafo, gulungan *hardboard* atau softpaper dan kombinasi dielektrik cair dan padat, kemudian dibungkus dengan kerangka Porselen.

Gambar 5.15.a mernperlihatkan tekanan elektrik aksial E_a , yang dapat menimbulkan peluahan luncur pada permukaan isolator. Tekanan elektrik radial E_r dapat menimbulkan peluahan parsial pada rongga-rongga yang terdapat di antara flans dengan bagian luar isolator dan di antara inti dengan bagian dalam isolator. Untuk mencegah terjadinya peluahan ini, maka di antara isolator dengan flans diberi lapisan konduktif dengan teknik penyemprotan; dan ujung lapisan yang terbentuk ditekuk untuk mengurangi efek medan pinggir.

Untuk mencegah peluahan parsial pada ruang-ruang udara terbuka yang terdapat di antara inti dengan bahan isolasi, maka di antara inti dengan isolator dibuat juga lapisan konduktif atau mengusahakan inti berpadu dengan isolator. Misalnya dengan membuat isolasi dari bahan damar tuang sehingga intinya melekat langsung dengan dielektriknya, dengan demikian peluahan parsial pada ruang di antara inti dengan isolator dapat dicegah. Masalah peluahan luncur dapat juga diatasi dengan mengurangi efek medan pinggir, yaitu dengan menekuk ujung elektroda dan membuat elektroda melekat ke bahan isolasi. Kemudian dengan pemilihan profil isolator yang tepat, maka kuat medan pada bidang miring yang berbatasan dengan udara dapat dikurangi di bawah nilai yang diizinkan. Jika tegangan suatu *bushing* porselen ditinggikan, maka pada harga suatu tegangan tertentu akan terjadi peluahan parsial pada rongga-rongga udara yang terdapat di antara elektroda dengan isolator dan jika tegangan terus dinaikkan maka akhirnya akan terjadi peristiwa lewat-denyar.

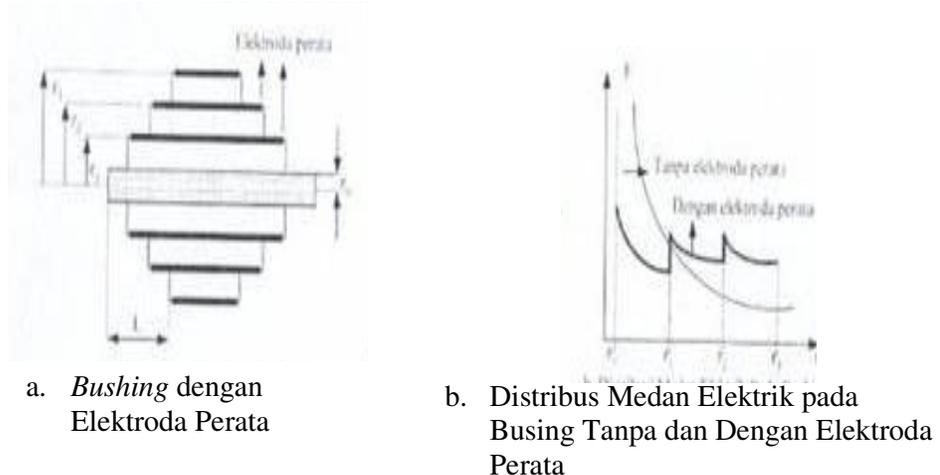
Dengan perkataan lain, kejadian lewat denyar pada *bushing* porselen lebih dahulu diawali dengan kejadian peluahan parsial. Pada *bushing* damar tuang, peristiwa lewat denyar tidak diawali dengan kejadian peluahan parsial, karena pada *bushing* ini tidak ditemukan rongga-rongga udara di antara elektroda dengan isolator.

Karena damar mudah dilekatkan ke metal dan dapat dicetak dalam berbagai bentuk, maka jenis isolasi damar menawarkan berbagai kemungkinan bentuk konstruksi.

Prinsip perataan distribusi tegangan pada awalnya tidak mempertimbangkan jenis bahan isolasi, tetapi akhirnya hal itu harus diperhatikan karena adanya hubungan tegangan awal peluahan pada pinggir elektroda yang runcing dengan ketebalan bahan isolasi yang menyelubungi elektroda tersebut. Jika tidak memakai tabir elektroda sebagai pengendali medan pinggir, maka harus dipilih bahan isolasi yang tipis.

5.9.2 PERATAAN DISTRIBUSI TEGANGAN PADA SUATU BUSHING

Bushing untuk tegangan di atas 60 kV biasanya dilengkapi dengan elektroda perata distribusi tegangan, yaitu elektroda tipis yang dipasang antara flans dengan inti (lihat Gambar 5.15b). Elektroda ini disebut elektroda perata atau sering juga disebut elektroda pengantara (*intermediate electrode*). Penambahan elektroda perata membuat diameter semakin besar. Untuk mengurangi penambahan diameter *bushing*, bahan elektroda perata dibuat dari bahan logam tipis (*foil*). Dengan adanya beberapa elektroda perata di antara inti dengan flans, maka beberapa kapasitor yang terhubung seri di antara inti dengan flans seperti ditunjukkan pada Gambar 5.15.c. Dengan mengatur diameter dan panjang elektroda perata, nilai kapasitansi dari setiap kapasitor dapat dibuat ($C_1=C_2$) sehingga potensial pada bidang batas antara bahan isolasi dengan medium sekitar menjadi sama rata. Hal ini mendorong perlunya dibuat pembagian kapasitansi yang merata dengan halus, yang diprakteknya hanya dapat direalisasi jika bahan isolasi terbuat dari gulungan pita tipis. Oleh karena itu, prinsip perata tegangan hanya dapat direalisasi jika bahan isolasi *bushing* terbuat dari *hardboard* atau *soft paper* dan film plastik. Pada Gambar 5.16, diperlihatkan efek elektroda perata terhadap distribusi medan elektrik pada suatu *bushing* silindris.



Gambar 5.16. Efek Elektroda Perata Terhadap Distribusi Medan Elektrik

Telah ditunjukkan pada Gambar 5.15, bahwa tekanan elektrik yang dialami oleh suatu *bushing* terdiri dari medan elektrik radial (E_r) dan aksial (E_a). Tekanan elektrik kritis terdapat pada bidang batas permukaan agar pemakaian isolasi optimal

maka ukuran elektroda perata isolasi dengan media sekitar. Komponen radial E_r dari kuat medan listrik sedemikian sehingga beda tegangan pada setiap lapisan merata, dapat menyebabkan tembusnya bahan isolasi, sementara komponen aksial E_a pada keadaan tertentu dapat menyebabkan peluahan luncur di sepanjang bidang batas. Kekuatan elektrik bahan isolasi ditentukan oleh tegangan yang menimbulkan terjadinya lewat denyar pada bidang batas, karena nilainya lebih rendah dari tegangan yang menimbulkan terjadinya tembus listrik pada isolator. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa tekanan berdekatan elektrik arah aksial jauh lebih kritis dari pada tekanan elektrik arah radial.

a) Perhitungan Tegangan Awal Peluahan (*Inception Voltage*)

Tebal lapisan dielektrik di antara dua elektroda perata sangat kecil dibandingkan dengan diameternya. Sehingga perhitungan tegangan awal peluahan dapat dilakukan seperti halnya pada model kapasitor plat sejajar, di mana tegangan awal peluahan parsial bolak-balik pada pinggir elektroda dapat dihitung secara pendekatan, yaitu:

$$V_e = k_k \left(\frac{s}{\epsilon_r} \right)^{0.5} \quad (kV) \tag{5.27}$$

di mana s adalah tebal lapisan dielektrik dalam cm dan k_k adalah faktor konfigurasi yang tergantung pada jenis elektroda dan dielektrik. Nilai k_k dapat diasumsikan seperti pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4. Faktor Konfigurasi Elektroda

Konfigurasi	k_k
Pinggir/ujung logam: di udara	8
dalam SF ₆	21
Pinggir metal atau grafit dalam minyak	30
Pinggir grafit di udara	12

b). Kapasitas satu lapisan

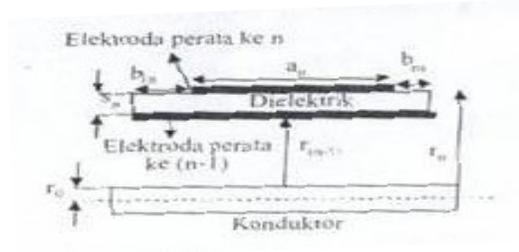
Agar pemakaian isolai optimal maka ukuran elektroda perata diatur sedemikian sehingga beda tegangan pada setiap lapisan merata, yaitu sebesar :

$$\Delta V = \frac{V}{N} \tag{5.28}$$

Dimana ΔV adalah beda tegangan diantara dua elektroda perata yang berdekatan, N adalah jumlah total lapisan.

Untuk memperoleh keadaan diatas, kapasitansi setiap kapasitor yang dibentuk oleh dua elektroda berdekatan harus sama ($C_1=C_2=.....C_{n-1} = C_n$). Ada dua kemungkinan yang dapat dilakukan untuk memperoleh keadaan tersebut, yaitu : mengatur tebal lapisan atau diameter elektroda, atau mengatur panjang elektroda perata. Ukuran elektroda perata suatu bushing dapat dihitung dengan bantuan Gambar 5.17, dimana ditunjukkan suatu lapisan dielektrik yang berbeda diantara

elektroda perata ke n dengan elektroda perata (n-1). Lapisan dinomori mulai dari titik pusat (n=0) sampai ke pinggir flans (n=N)



Gambar 5.17 Simbol Ukuran Elektroda Perata

Misalkan tebal lapisan dielektrik adalah :

$$S_n = r_n - r_{n-1} \tag{5.29}$$

Jika selisih pinggir dua elektroda berdekatan di sisi kiri b_{1n} sama dengan di sisi kanan b_m , maka diperoleh *bushing* yang simetris. Selisih Pinggir elektroda kiri dan karian akan berbeda jika dielektrik yang berbatasan dengan isolator *bushing* berbeda, misalnya pada trafo daya, di mana sebagian isolator *bushing* berbatasan dengan udara dan sebagian lagi berbatasan dengan minyak trafo. Dalam hal ini, bahagian isolator *bushing* yang berbatasan dengan udara lebih panjang dari bahagian isolator *bushing* yang terbenam dalam minyak trafo.

Dengan mengabaikan efek medan pinggir, maka kapasitansi yang dibentuk dua elektroda berdekatan adalah sebagai berikut:

$$C_n = \frac{2 \pi \epsilon_0 \epsilon_r a_n}{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}}} \tag{5.30}$$

di mana ϵ_r adalah permeabilitas relatif bahan dielektrik isolator *bushing*.

Karena semua kapasitor C_n terhubung seri satu dengan lainnya, dan tegangan pada setiap satu kapasitor sama sebesar ΔV , maka kapasitansi $C_n = \text{konstan} = C$. Ada dua kemungkinan perataan yang dilakukan, yaitu Perataan arah radial dan perataan tegangan arah aksial. Berikut ini akan dijelaskan perhitungan dimensi elektroda perata untuk masing-masing tersebut.

C). Perataan Tegangan Arah Radial

Untuk perataan tegangan radial arah radial, maka kuat medan radialnya $E_r = DV/S_n$ harus konstan. Hal ini dapat dipenuhi apabila tebal lapisan dielektrik S_n konstan. Dengan persamaan 5.34 dapat diturunkan kapasitansi C_{n+1} :

$$C_{n+1} = \frac{2 \pi \epsilon_0 \epsilon_r a_{n+1}}{\ln \frac{r_{n+1}}{r_n}} \tag{5.31}$$

Agar tegangan pada setiap lapisan sama, maka harus dipenuhi persyaratan $C_{n+1}=C_n$. Dengan mempersamakan persamaan 5.34 dengan 5.35, maka diperoleh:

$$a_{n+1} = a_n \frac{\ln \frac{r_{n+1}}{r_n}}{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}}} \quad 5.32$$

Bila lapisan dielektrik sangat tipis dibandingkan terhadap radius elektroda, atau $S_n = r_n - r_{n-1} \ll r_n$, maka dapat dituliskan:

$$a_{n+1} = a_n \frac{r_{n-1}}{r_n} \quad 5.33$$

Dengan persamaan 5.37 dapat ditentukan tebal lapisan berikutnya dengan menggunakan data tebal lapisan sebelumnya. Biasanya, lapisan paling dalam diketahui lebih dahulu, yaitu sama dengan konduktor di mana pemilihan radius konduktor ditentukan dengan mempertimbangkan arus yang akan dialirkannya. Tebal dielektrik S_n diperoleh dari ΔV yang dirancang pada satu lapisan dielektrik dan maksimal medan radial E_r yang diijinkan terjadi pada bahan dielektrik :

$$S_n = \frac{\Delta V}{E_{r \text{ maks}}} \quad 5.34$$

Jika panjang a_0 ditetapkan, maka ukuran elektroda-elektroda yang lain dapat ditentukan.

d). Perataan Tegangan Arah Aksial

Untuk perataan arah aksial, kuat medan aksialnya harus konstan:

$$E_a = \Delta V / b_n = \text{konstan} \quad 5.35$$

Kemudian selisih pinggir elektroda berdekatan pada setiap sisi (kiri dan kanan) harus sama panjang dan konstan: $b_{ln} = \text{konstan} = b_r$ $b_{rn} = \text{konstan} = b_r$

Dengan demikian panjang satu elektroda dapat dituliskan:

$$A_{n+1} = a_n - b_l - b_r, \text{ Agar } C_{n+1} = C_n$$

maka syaratnya adalah:

$$\ln \frac{r_{n+1}}{r_n} = \frac{a_{n+1}}{a_n} \ln \frac{r_n}{r_{n-1}} \quad 5.36$$

Dengan pendekatan bahwa lapisan dielektrik dianggap sangat tipis dibandingkan terhadap radius elektroda, atau $S_n = r_n - r_{n-1} \ll r_n$, maka dapat dituliskan:

$$S_{n+1} \approx S \frac{a_{n+1}}{a_n} \cdot \frac{r_n}{r_{n-1}} \quad 5.37$$

Dimensi lapisan berikutnya diperoleh dengan menggunakan data dimensi lapisan sebelumnya. Panjang lintasan lewat denyar L dihitung dengan pendekatan sebagai berikut (lihat Gambar 5.16.a):

$$L \approx N b_r \quad 5.38$$

Urutan perhitungan *bushing* dengan perata aksial adalah sbb:

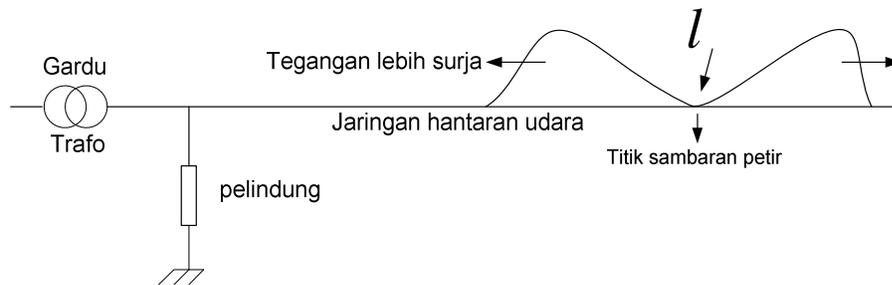
1. Tentukan terlebih dahulu jumlah lapisan N dengan berpedoman kepada pengalaman, bahwa tegangan pengisian tegangan AC (V_p) di antara dua lapisan adalah sekitar 12 W. Sebagai contoh, untuk *bushing* 110 W dengan V_p sebesar 260 kV maka banyak lapisannya adalah sekitar $N = 260/12 = 22$.
2. Pilih panjang lewat denyar L dengan pertimbangan bahwa L tegangan V_p , kuat medan rata-rata pada permukaan bidang harus lebih rendah dari batas yang ditentukan. Untuk udara batas kuat medan dapat dimisalkan sekitar 3 ... 4 kV/cm; dan di dalam minyak tergantung dari konstruksi dan komponen minyak yang digunakan. Tetapi secara umum dapat diambil nilainya sekitar 2 sampai 4 kali lebih tinggi dari yang diinginkan untuk udara. Dengan diketahui L , maka panjang b_r dan b_1 dapat dihitung dengan persamaan 5.43
3. Biasanya, radius inti r_0 dan panjang total a_0 sudah diketahui sebelumnya. Kemudian ditetapkan nilai awal r_1 , dengan demikian nilai r yang lain dapat dihitung dengan persamaan 5.42.
4. Akhirnya, dilakukan pemeriksaan terhadap hasil perhitungan. harus dipenuhi syarat bahwa kuat medan radial E_r tertinggi pada, tegangan sama dengan tegangan uji (V_p) tidak boleh melebihi kekuatan dielektrik bahan isolasi, dan tegangan kerja tertinggi yang diijinkan harus jauh lebih kecil dari V_e (lihat persamaan 5.33).

Bab 6

PELINDUNG TEGANGAN LEBIH (Arrester)

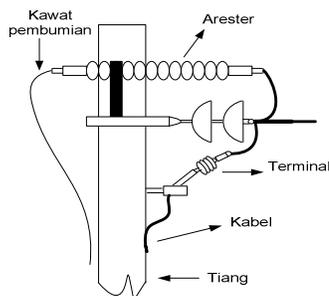
6.1 PENDAHULUAN

Sambaran petir pada jaringan hantaran udara merupakan suntikan muatan listrik. Suntikan muatan ini menimbulkan kenaikan tegangan pada jaringan, sehingga pada jaringan timbul tegangan lebih berbentuk gelombang impuls dan merambat ke ujung-ujung jaringan seperti ditunjukkan pada gambar 6.1. tegangan lebih akibat sambaran petir sering disebut surja petir.



Gambar 6.1 Tegangan Surja akibat Sambaran Petir

Jika tegangan lebih surja petir tiba di suatu gardu, maka tegangan lebih tersebut akan merusak isolasi peralatan gardu. Oleh karena itu, perlu dibuat alat pelindung agar tegangan surja yang tiba di gardu tidak melebihi kekuatan isolasi peralatan gardu. Pada keadaan tegangan jaringan normal, pelindung berperan sebagai isolasi. Tetapi jika ada surja petir tiba pada terminal pelindung, maka pelindung berubah menjadi penghantar dan mengalirkan muatan surja petir tersebut ke tanah.



Gambar 6.2 Arrester Pada Jaringan Distribusi

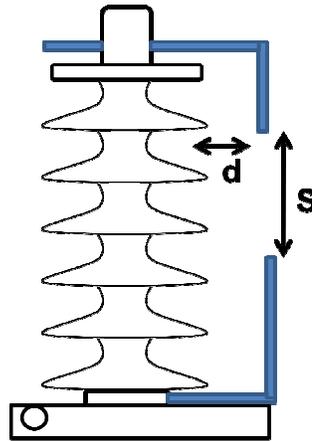
Ada dua jenis pelindung sistem tenaga listrik, yaitu sela batang dan arrester. Arrester terdiri atas dua jenis, yaitu jenis **tabung pelindung atau arrester ekspulsi** dan **arrester jenis katup**.

Arrester jenis katup terdiri atas empat jenis, yaitu :

- a. Jenis gardu
- b. Jenis saluran (15 – 69 kV)
- c. Jenis gardu untuk mesin-mesin (2,4 – 15 kV)
- d. Jenis distribusi untuk mesin-mesin (120 – 750 V)

Pada gambar 6.2 ditunjukkan suatu arrester yang dipasang pada sambungan kabel dengan jaringan hantaran udara.

6.2 SELA BATANG



Gambar 6.3 Sela Batang

Pelindung yang paling sederhana adalah sela batang, seperti ditunjukkan pada gambar 6.3. jika beda tegangan antara sela melebihi tegangan tembus sela, maka akan terjadi percikan pada sela, dan membuat sela terhubung singkat. Jarak sela dapat disetel sedemikian hingga tepercik pada nilai tegangan yang diinginkan. Untuk mencegah terjadinya lompatan api pada isolatornya, maka harus dipenuhi syarat-syarat dibawah ini :

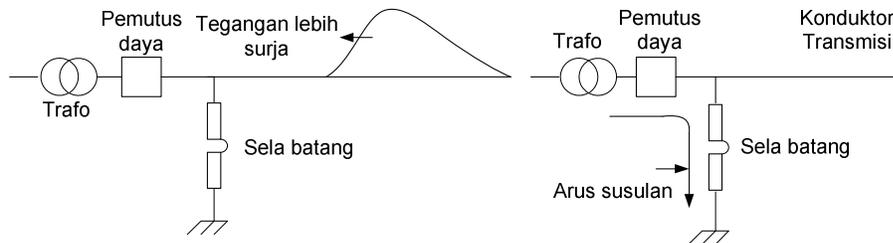
$$V_{\text{tenbus sela}} \approx 0,8 V_{\text{tegangan lompatan api isolator}} \quad 6.1$$

$$d \geq 1 / 3 S \quad 6.2$$

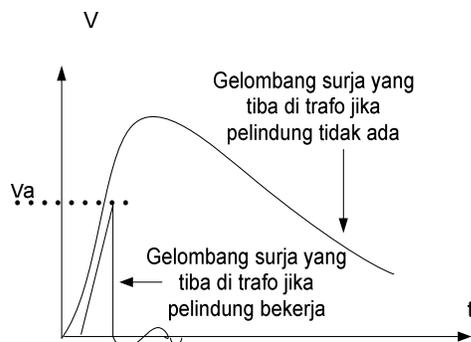
Pada gambar 6.4 ditunjukkan suatu sistim yang dilengkapi dengan pelindung sela batang. Misalkan suatu surja petir merambat menuju trafo. Jika surja petir telah tiba pada terminal pelindung, maka tegangan sela batang naik mengikuti kenaikan tegangan surja, seperti ditunjukkan pada gambar 6.5.

Pada saat tegangan sela mencapai tegangan percik sela (V_a), sela tepercik sehingga terjadi hubungan singkat satu fasa ketanah. Akibat tegangan diterminal

pelindung tiba-tiba menjadi nol dan arus surja mengalir ke tanah. Setelah arus surja nol, keadaan tetap terhubung singkat karena percikan pada sela tetap ada, dipertahankan oleh tegangan bolak-balik frekuensi sistem sendiri.



Gambar 6.4 Sistem Dengan Pelindung Sela Batang



Gambar 6.5 Tegangan pada Sela Batang

Akibat timbul arus hubung singkat frekuensi daya yang disebut arus susulan. Arus susulan ini diputuskan dengan membuka pemutus daya, akibatnya terjadi pemutusan aliran daya, yakni suatu keadaan yang tidak diinginkan terjadi pada sistem tenaga listrik. Besarnya arus susulan ini tergantung pada impedansi jaringan dan tahanan pembumian pelindung.

Kelemahan alat pelindung ini adalah :

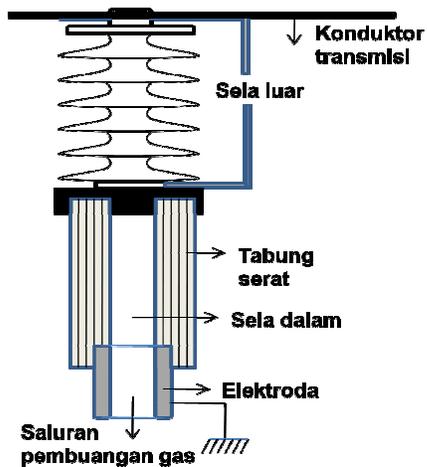
- a. Jika pelindung ini bekerja, harus terjadi pemutusan aliran daya pada sistem.
- b. Tegangan percik sela lebih besar pada tegangan surja bermuka curam, sehingga jarak sela harus diperkecil jika digunakan sebagai pelindung terhadap surja petir. Tetapi jarak sela yang pendek membuat sela tepercik jika dikenai surja hubung.
- c. Bekerjanya sela batang dipengaruhi kondisi udara sekitar, karena media pengantara sela adalah udara yang tegangan tembusnya tergantung kepada suhu, tekanan dan kelembapan.
- d. Bekerjanya sela batang juga tergantung pada polaritas tegangan surja.

Sela batang digunakan untuk melindungi *bhusing* trafo, isolator saluran udara tegangan tinggi, pemutus daya, dan sebagai pelindung cadangan. Jarak sela untuk berbagai tegangan sistem diberikan pada tabel 6.1

Tabel 6.1 Jarak Sela Batang untuk Berbagai Tegangan Sistem

Tegangan (kV)	Jarak Sela (cm)
33	23
66	35
132	65
275	123

6.3 ARRESTER EKSPULSI



Gambar 6.6 Arester Ekspulsi

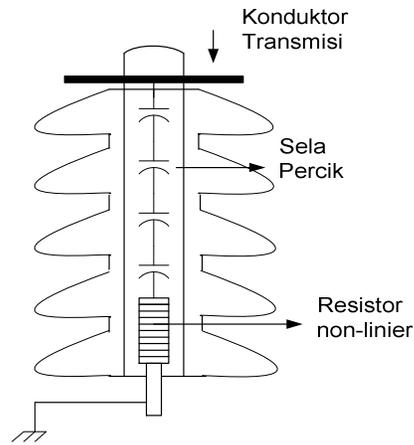
Pada Gambar 6.6 ditunjukkan konstruksi suatu arrester jenis ekspulsi. Arrester ini mempunyai dua jenis sela, yaitu sela luar dan sela dalam. Sela dalam ditempatkan didalam tabung serat. Bila di terminal arrester tiba suatu surja petir, maka kedua sela terpercik. Arus susulan yang terjadi memanaskan permukaan dalam tabung serat. Akibatnya tabung mengeluarkan gas. Arus susulan merupakan arus sinusoidal sehingga pada periode tertentu akan mencapai nilai nol, gas akan memadamkan arus susulan. Arus susulan paling lama bertahan dua periode. Biasanya sudah padam dalam waktu setengah periode setelah arus susulan terjadi. Tetapi, pemadaman arus susulan masih tergantung pada tingkat arus hubung singkat pada lokasi penempatan arrester.

Karakteristik Volt-waktu arrester ini lebih baik dari pada sela batang. Dapat digunakan untuk melindungi trafo distribusi bertegangan 3 – 15 kV, tetapi belum memadai untuk melindungi trafo daya. Dapat juga digunakan pada saluran transmisi untuk mengurangi besar tegangan surja petir yang masuk ke gardu induk

6.4 ARRESTER KATUP

Konstruksi arrester jenis katup diberikan pada Gambar 6.7. Arrester ini terdiri atas beberapa sela percik yang dihubungkan seri dengan resistor tak-linier. Resistor tak-linier mempunyai tahanan yang rendah saat dialiri arus besar dan mempunyai

tahanan yang besar saat dialiri arus kecil. Resistor tak-linier yang umum digunakan untuk arester terbuat dari bahan silikon karbid. Sela percik dan resistor tak-linier keduanya ditempatkan dalam tabung isolasi tertutup, sehingga kerja arester ini tidak dipengaruhi oleh keadaan udara sekitar.



Gambar 6.7 Arestor Katup

Jika suatu surja petir tiba pada terminal arrester dan membuat sela arrester tepercik, maka rangkaian ekivalen arrester adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 6.8.a. Tegangan pada terminal arrester saat mengalirkan arus surja adalah:

$$V_t = i_s \times R \quad 6.3$$

Dimana :

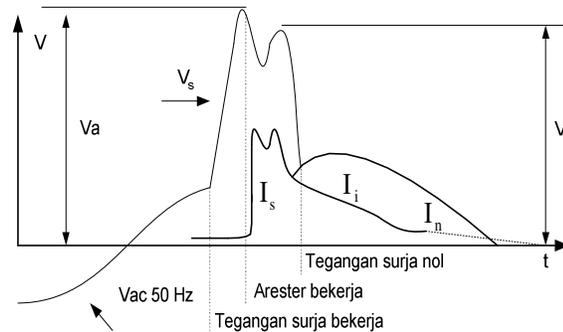
i_s = arus surja

R = tahanan resistor tak-linier

Gambar 6.8 Rangkaian Ekivalen dan Karakteristik Arestor

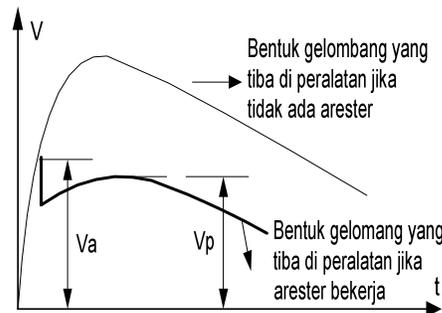
Misalkan karakteristik dari resistor tak-linier adalah seperti pada gambar 6.8.b dan arus surja yang mengalir pada arester adalah seperti pada gambar 6.8.c. Dalam selang waktu 0 s/d t_1 , arus surja naik dan mencapai nilai puncak $i_s = I_p$, dalam selang waktu ini tahanan R mengecil, sehingga kenaikan tegangan terminal arester dibatasi hanya sampai V_a . seandainya tahanan resistor R konstan. Maka saat arus surja mencapai nilai puncak, tegangan di terminal arester adalah $V_t = V_1$. Artinya tegangan sistim tetap tinggi, sehingga tujuan perlindungan tidak tercapai. Dalam selang waktu t_1 s/d t_2 , arus surja menurun, tahanan resistor R membesar. Saat arus surja menjadi nol, masih tersisa arus susulan yang relative kecil. Arus susulan ini juga akan semakin

kecil karena tahanan R semakin membesar, hingga akhirnya tersisa arus kecil yang disebut arus kendali. Biasanya arus kendali ini kurang lebih 50 A. saat tegangan sesaat sistim nol, percikan pada sela padam sehingga arus kendali menjadi nol dan tidak berlanjut lagi. Seluruh proses diatas ditunjukkan pada gambar 6.9.



Gambar 2.9. Tegangan Dan Arus Surja Pada Arrester Katup

Pada gambar 6.9 terlihat bahwa besarnya arus susulan tergantung pada saat tibanya tegangan surja. Jika tegangan surja tiba saat tegangan sesaat sistim mendekati nilai puncaknya, maka arus susulannya besar. Jika tegangan surja tiba saat tegangan sesaat sistim mendekati nilai nol, maka arus susulannya kecil. Tegangan di terminal arester sama dengan tegangan di terminal peralatan yang dilindunginya. Tegangan surja yang tiba pada suatu peralatan yang dilindungi dengan arester katup ditunjukkan pada gambar 6.10 dibawah ini.



Gambar 6.10 Tegangan Surja yang tiba Pada Peralatan

2.5 DATA PENGENAL ARESTER

Berikut ini akan diberikan data pengenalan suatu arester yang dibutuhkan dalam perencanaan perlindungan suatu peralatan.

a. Tegangan Pengenal

Adalah tegangan efektif tertinggi frekuensi sistim yang mungkin dipikul oleh arester. Cara menentukannya akan diuraikan pada sub-bab 2.6 berikut.

b. Arus Peluahan Nominal

Data ini menentukan klasifikasi arester menurut kemampuannya mengalirkan arus peluahan 10/ 20 μ s. Standart arus peluahan nominal yang sudah ada adalah:

- 10 kA, 10/20 μ s: digunakan pada gardu induk, gardu yang berada dikawasan yang sering terjadi petir dan sistim bertegangan > 66 kV.
- 5 kA, 10/20 μ s: digunakan pada gardu bertegangan \leq 66 kV.
- 2,5 kA, 10/20 μ s: digunakan pada system bertegangan \leq 22 kV.
- 1,5 kV, 10/20 μ s: digunakan pada sistim distribusi bertegangan \leq 22 kV.

c. Frekuensi Pengenal

Sama dengan frekuensi sistim dimana arester terpasang

d. Tegangan percik frekuensi daya

Adalah besar tegangan efektif frekuensi daya yang membuat terjadinya percikan disela arester. Tegangan percik frekuensi daya harus cukup tinggi agar sela arester tidak tepercik jika terjadi hubungan singkat satu fasa ketanah maupun pada saat terjadi operasi hubung-buka (Switching Operation). Biasanya, tegangan percik frekuensi daya ditetapkan \geq 1,5 kali tegangan pengenal arester.

e. Tegangan percik impuls maksimal

Adalah puncak tegangan surja 1,2/50 μ s, yang membuat sela arester pasti tepercik atau yang membuat arester pasti bekerja. Misalnya ada suatu arester mempunyai tegangan percik impuls maksimal 65 kV. Jika arester ini diberi tegangan impuls 65 kV- 1,2/50 μ s, sebanyak 5 kali, maka sela arester akan tepercik 5 kali.

f. Tegangan peluahan atau tegangan sisa

Adalah tegangan di terminal arester saat arester mengalirkan arus surja yang besarnya sama dengan arus peluahan nominal. Besar arus peluahan nominal arester antara lain 10 kA-10/20/ μ s, 5 kA-10/20/ μ s, dan lain-lain.

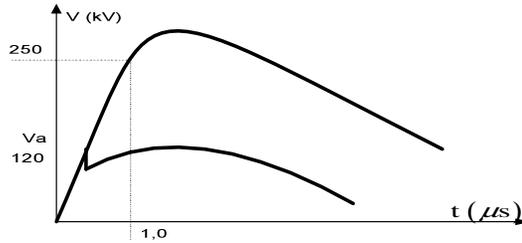
g. Tegangan dasar (Cut-Off Voltage)

Adalah tegangan efektif ac maksimal yang diperbolehkan terjadi di terminal arester, dimana arus susulan yang diakibatkan tegangan tersebut masih dapat dipadamkan

h. Tegangan gagal sela

Adalah besar tegangan yang membuat sela arester tepercik saat dikenai tegangan surja yang kecuraman muka gelombangnya 100 kV/ μ s/12 kV, tegangan pengenal arester. Contoh: tegangan gagal sela suatu arester 30 kV adalah 120 kV. Artinya, jikan arester ini dikenai tegangan 100 kV/ μ s/30/12 atau 250 kV/ms, maka sela

arester akan tepercik saat tegangan mencapai 120 kV. Untuk lebih jelasnya, lihat gambar 6.11.

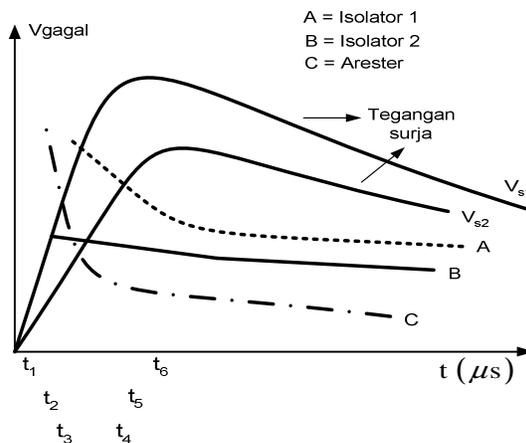


Gambar 6.11 Tegangan gagal sela

i. Karakteristik volt-waktu (V.t)

Adalah karakteristik yang menyatakan hubungan tegangan percikan sela arester dan waktu percikan, seperti ditunjukkan pada gambar 6.12. karakteristik ini dibutuhkan untuk melihat keberhasilan arester melindungi peralatan.

Jika tegangan surja yang datang adalah V_{s1} , maka isolator B terlebih dahulu tepercik, yaitu saat $t = t_1$, kemudian arester tepercik pada saat $t = t_2$, dan isolator A tepercik pada saat $t = t_3$. dalam hal ini arester gagal melindungi isolator B, tetapi berhasil melindungi isolator A.



Gambar 6.12 Karakteristik Volt-Waktu

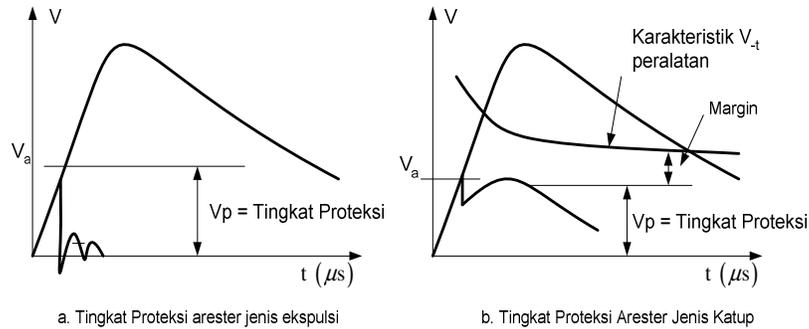
Jika tegangan surja yang datang adalah V_{s2} , maka arester terlebih dahulu tepercik, yaitu saat $t = t_4$. kemudian isolator B tepercik pada saat $t = t_5$ dan isolator A tepercik pada saat $t = t_6$. dalam hal ini arester berhasil melindungi kedua isolator.

j. Margin

Ketahanan suatu peralatan memikul tegangan surja petir, jika dipasang pada suatu sistim bertegangan tertentu disebut BIL

k. Tingkat Perlindungan

Adalah tegangan tertinggi pada terminal arrester saat arrester mengalirkan arus surja. Tingkat proteksi untuk arrester jenis ekspulsi dan jenis katup diberikan pada gambar 2.13. Untuk arrester jenis ekspulsi, tingkat perlindungan di tetapkan sama dengan tegangan percik sela (V_a). sedang untuk arrester jenis katup, tingkat proteksi ditetapkan sama dengan tegangan V_p , karena V_p berlangsung lebih lama dari V_a .



Gambar 2.13 Tingkat Proteksi Arrester

l. Arus Peluahan Maksimal

Adalah nilai puncak tertinggi dari arus surja 5/10 μs yang dapat dialirkan arrester tanpa merusak arrester. Dewasa ini, arus peluahan maksimal arrester dirancang 100 kA untuk jenis gardu dan 65 kA untuk arrester jenis saluran

2.6 TEGANGAN PENGENAL ARESTER

Suatu arrester dipasang diantara kawat fasa dan tanah. Oleh karena itu, dalam keadaan normal, arrester boleh jadi memikul tegangan sistim maksimum, yaitu:

$$V_m = 1,1 V_{fn} = 1,1 V_{nom} / \sqrt{3} \quad 6.4$$

Dimana:

- V_m = Tegangan maksimum sistim fasa ke netral
- V_{fn} = Tegangan nominal sistim fasa ke netral
- V_{nom} = Tegangan nominal sistim fasa ke fasa

Jika terjadi hubung singkat satu fasa ketanah, maka arrester yang terpasang pada fasa yang sehat naik tegangannya $k_g \sqrt{3}$ kali tegangan fasa ke netral sistim saat itu. Nilai k_g tergantung pada jenis pembumian netral sistim dan impedansi urutan nol dan impedansi urutan positif sistim. Dalam prakteknya, untuk sistim yang tidak dibumikan nilai $k_g = 1,0$. untuk sistim yang dibumikan efektif nilai $k_g \leq 0,8$ dan untuk sistim yang dibumikan tidak efektif nilai $k_g = 0,8 - 1,0$.

Suatu sistem dibumikan efektif jika salah satu syarat dibawah ini dipenuhi:

- $R_0 / X_0 < 1$ dan $X_0/X_1 < 3$, dimana R_0 adalah tahanan urutan nol, X_0 adalah reaktansi urutan nol, dan X_1 adalah reaktansi urutan positif sistem dilihat dari titik lokasi penempatan arrester.
- Semua titik netral trafo dibumikan langsung titik jika hanya sebagian dari trafo yang netralnya dibumikan, sistem tidak dibumikan efektif.
- Arus hubung singkat satu fasa ke tanah $\geq 0,6$ arus hubung singkat tiga fasa simetris.

Sistem yang dibumikan tidak efektif adalah sistem yang titik netral trafonya tidak semua dibumikan, atau pembumiannya dilakukan melalui resistor atau reaktor. Bila tegangan fasa ke netral sistem saat hubung singkat adalah maksimum (V_m), maka tegangan arrester pada fasa yang sehat adalah:

$$V_{\text{arrester}} = k_g \sqrt{3} V_m = 1,1 k_g V_{\text{nom}} \quad 6.5$$

Oleh karena itu, suatu arrester harus dirancang mampu memikul tegangan sebesar V_{arrester} diatas. Arrester yang dipilih adalah arrester yang tegangan pengenalnya mendekati V_{arrester} yang diperkirakan.

$$V_{\text{pengenal}} \approx 1,1 k_g V_{\text{nom}} \quad 6.6$$

Jika nilai $k_g < 0,75$, maka tegangan pengenal arrester ditambah dengan faktor keamanan 7,5 %, sehingga tegangan pengenal arrester menjadi :

$$V_{\text{pengenal}} \approx 1,075 (1,1 k_g V_{\text{nom}}) \quad 6.7$$

Pada tabel 2.2 diberikan contoh tegangan pengenal arrester produksi prancis. Setelah tegangan pengenal arrester ditetapkan, maka tegangan sisa atau tingkat proteksi arrester yang dipilih diketahui.

Tabel 4.2 : Tegangan Pengenal Arrester Buatan Prancis

Tegangan Nominal Arrester (kV)	Tegangan Sela Gagal (kV)	Tegangan Sisa/ Tingkat Proteksi (kV)
3,75	20	17
6,25	30	25
7,5	37	31
12,5	56	47
20	88	76
27,5	118	100
32,5	134	117
40	165	144

Jika Margin diambil 30 %, maka BIL peralatan yang dilindungi arrester adalah:

$$BIL = 1,3 V_p \quad 6.8$$

Dimana V_p adalah tingkat proteksi atau tegangan sisa arrester

2.7 LOKASI PENEMPATAN ARESTER

Arester ditempatkan sedekat mungkin dengan peralatan yang dilindungi. Tetapi untuk memperoleh kawasan perlindungan yang lebih baik, maka ada kalanya arester ditempatkan dengan jarak tertentu dari peralatan yang dilindungi. Jarak arester dengan peralatan yang dilindungi berpengaruh terhadap besarnya tegangan yang tiba pada peralatan. Jika jarak arester terlalu jauh, maka tegangan yang tiba pada peralatan dapat melebihi tegangan yang dapat dipikulnya. Hal ini dapat dijelaskan dengan konsep gelombang berjalan seperti yang akan dijelaskan berikut ini.

Pada gambar 6.15. ditunjukkan suatu gelombang tegangan merambat pada suatu jaringan yang impedansi surjanya Z_1 menuju suatu jaringan yang impedansi surjanya Z_2 . Titik T adalah titik pesambungan kedua jaringan, dapat berupa titik sambung jaringan hantaran udara dengan kabel, atau titik sambung jaringan dengan trafo atau ujung dari suatu jaringan, atau rel daya gardu induk dimana beberapa jaringan transmisi tersambung ke rel.

Gambar 2.15 Gelombang Berjalan dan Pantulnya

Keterangan:

- e_f = Gelombang tegangan yang datang
- i_f = Gelombang arus yang datang
- e_r = Gelombang tegangan yang dipantulkan
- i_r = Gelombang arus yang dipantulkan
- e_t = Gelombang tegangan yang diteruskan
- i_t = Gelombang arus yang diteruskan

Tegangan pada titik T dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$e_t = e_f + e_r \quad 6.9$$

Karena arus yang dipantulkan berpolaritas negative, maka arus pada titik T adalah sebagai berikut :

$$i_t = i_f + i_r \quad 6.10$$

menurut hokum Ohm:

$$i_f = \frac{e_f}{Z_1} \quad i_t = \frac{e_t}{Z_2} \quad i_r = \frac{e_r}{Z_1} \quad 6.11$$

Substitusi persamaan 2.11 ke dalam persamaan 2.10 diperoleh:

$$\frac{e_t}{Z_2} = \frac{e_f}{Z_1} - \frac{e_r}{Z_1} \quad 6.12$$

Dari persamaan 2.9 diperoleh tegangan e_r dan jika tegangan ini disubstitusikan ke dalam persamaan 2.12, maka diperoleh :

$$\frac{e_t}{Z_2} = \frac{e_f}{Z_1} - \frac{e_t - e_f}{Z_1}$$

$$\frac{e_t}{Z_2} + \frac{e_t}{Z_1} = \frac{2e_f}{Z_1}$$

Atau

$$e_t \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 Z_2} = \frac{2e_f}{Z_1}$$

Atau

$$e_t = e_f \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad 6.13$$

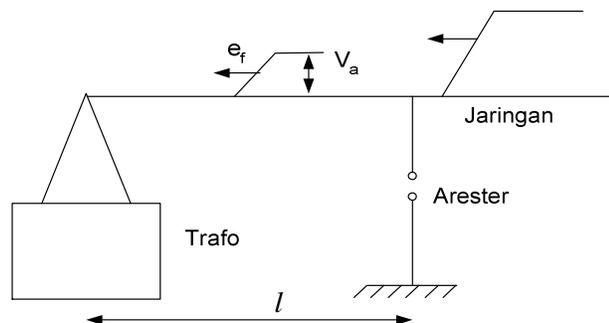
Dengan cara yang sama tegangan yang dipantulkan dapat diturunkan, diperoleh:

$$e_r = e_f \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad 6.14$$

Jika Z_2 adalah transformator, maka $Z_2 = \infty$, maka tegangan yang diteruskan pada terminal transformator adalah:

$$e_t = 2e_f \quad 6.15$$

Artinya, tegangan pada terminal transformator dua kali tegangan yang datang menuju terminal transformator. Sekarang dimisalkan ada suatu arrester terpasang diantara jaringan dengan transformator seperti ditunjukkan pada gambar 6.16.



Gambar 6.16 Transformator dan Arester Terpisah

Suatu gelombang tegangan (e_s) merambat menuju terminal transformator dan ketika gelombang tiba di terminal arrester, arrester bekerja sehingga gelombang yang diteruskan ke transformator adalah seperti gelombang e_f , dimana kecuraman muka gelombang sama dengan gelombang semula dan puncaknya sama dengan tegangan percik sela arrester (V_a). menurut persamaan 2.15, tegangan pada terminal

transformator adalah dua kali tegangan yang datang. Karena tegangan yang datang merupakan fungsi waktu, maka tegangan pada terminal transformator juga merupakan fungsi waktu. Jika $t = 0$ dihitung saat gelombang e_s tiba di terminal arester dan kecepatan merambat gelombang adalah v , maka waktu tempuh gelombang dari terminal arester ke terminal transformator adalah:

$$t = l/v \quad 6.16$$

Tegangan pada terminal transformator terbentuk dalam waktu tempuh $2t$ atau $2l/v$, yaitu waktu tempuh tegangan pantulan menuju arrester ditambah dengan waktu tempuh tegangan pantulan negative dari arrester kembali menuju terminal transformator. Tegangan maksimum terminal transformator pada pantulan pertama gelombang dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$V_t = V_a + 2t\lambda \quad 6.17$$

Atau

$$V_t = V_a + 2l/v \quad 6.18$$

Dimana :

- l = Jarak maksimal arrester dengan peralatan (m)
- V_t = Tegangan pada terminal transformator
- V_a = Tegangan percikan arrester (kV)
- λ = Kecuraman muka gelombang tegangan surja (kV/ μ s)
- v = Kecepatan merambat tegangan surja (m/ μ s)

Dalam prakteknya, tegangan mungkin lebih tinggi dari perkiraan diatas karena terjadinya ossilasi akibat adanya induktansi penghantar yang menghubungkan arrester dengan transformator dan adanya kapasitansi dari transformator itu sendiri. Di samping itu, saata arester bekerja mengalirkan arus surja kebumi, maka terjadi jatuh tegangan pada tahanan penghantar penghubung arrester dengan jaringan dan penghubung arester dengan elektroda pembumian. Jatuh tegangan ini dipengaruhi oleh kenaikan arus surja dan akan mengakibatkan kenaikan tegangan antara terminal arester dengan bumi. Adanya perbedaan potensial pembumian transformator dengan potensial pembumian arester juga menambah tegangan diantara isolasi transformator. Sehubungan dengan hal-hal diatas, adalah lebih baik membuat penghantar penghubung sependek mungkin dan menghubungkan elektroda pembumian arester dengan elektroda pembumian transformator. Tahanan pembumian diusahakan serendah mungkin, akan lebih jika dapat dibuat dibawah satu Ohm.

Jika diketahui tegangan maksimum yang dapat dipikul transformator (BIL) dalam kV, maka jarak maksimum arester dari peralatan dapat ditentukan sebagai berikut:

$$l_{maks} = \frac{V(V_t \text{maks} - V_a)}{2\lambda} \quad 6.19$$

Bab 7

KAPASITOR TEGANGAN TINGGI

7.1 PENDAHULUAN

Kapasitor tegangan tinggi adalah peralatan yang banyak digunakan instalasi tegangan tinggi. Kapasitor dapat diklasifikasi menurut penggunaannya, yaitu kapasitor sistem tenaga listrik, kapasitor laboratorium tegangan tinggi dan kapasitor pembangkit frekuensi tinggi.

Jenis kapasitor yang digunakan pada sistim tenaga listrik adalah :

1. Kapasitor daya frekuensi 50 atau 60 Hz.

Kapasitor ini ada tiga jenis yaitu: kapasitor shunt, seri dan penyadap. Kapasitor shunt digunakan untuk kompensasi beban induktif untuk pengaturan tegangan ujung transmisi. Kapasitor seri digunakan pada transmisi daya yang sangat panjang untuk mengkompensasi reaktansi induktif transmisi. Kapasitor penyadap digunakan untuk menyadap daya dari jaringan tegangan tinggi untuk keperluan daya yang tidak begitu besar.

2. **Kapasitor gandeng**, yaitu kapasitor yang digunakan untuk pembawa sinyal komunikasi antar gardu induk atau antar pusat pembangkit.
3. **Kapasitor pembagi tegangan**, yaitu kapasitor yang digunakan, pengukuran tegangan transmisi dan rel daya.
4. **Kapasitor filter**, kapasitor yang digunakan untuk konverter, pada sistem transmisi arus searah.
5. **Kapasitor perata**, yaitu kapasitor yang digunakan untuk meratakan distribusi tegangan pada peralatan tegangan tinggi seperti pada pemutus daya.

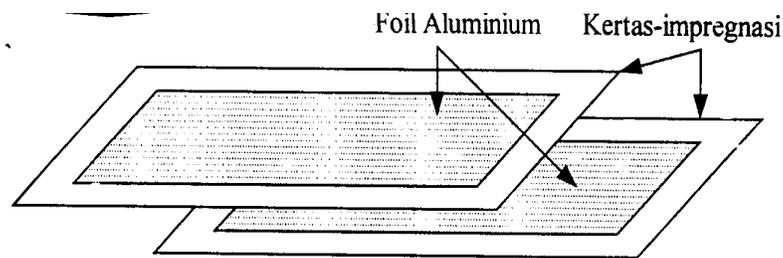
Jenis kapasitor yang digunakan dilaboratorium tegangan tinggi adalah:

1. Kapasitor perata, yaitu kapasitor yang digunakan untuk meratakan gelombang tegangan keluaran pembangkit tegangan tinggi searah.
2. Kapasitor impuls, yaitu kapasitor yang digunakan untuk pembangkit arus dan tegangan tinggi impuls.
3. Kapasitor standar, yaitu kapasitor yang digunakan untuk pengukuran faktor rugi-rugi dielektrik ($Tg \delta$).
4. Kapasitor pembagi tegangan, yaitu kapasitor yang digunakan untuk pengukuran tegangan tinggi.

Kapasitor pembangkit frekuensi tinggi digunakan pada rangkaian osilator pemancar radio komunikasi. Meski pada tegangan yang sangat tinggi, kapasitor dapat dibuat hampir ideal, yakni: rugi-rugi rendah dan tanpa induktansi sendiri.

7.2 KONSTRUKSI KAPASITOR

Bahan dasar dari satu sel kapasitor adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 7.1. Bagian utama dari satu sel kapasitor adalah dua elektroda yang terbuat dari foil aluminium yang dipisahkan oleh dielektrik berlapis. Agar kapasitor lebih andal, maka jumlah lapisan dielektrik dibuat sekurang-kurangnya dua lapis. Dengan demikian hubung singkat antara kedua elektroda yang terjadi karena adanya partikel konduktif pada kertas dapat dicegah. Tebal foil aluminium biasanya ± 7 mikron, sedang tebal dielektrik biasanya, antara 8-24 mikron, tergantung kepada tegangan kerja kapasitor

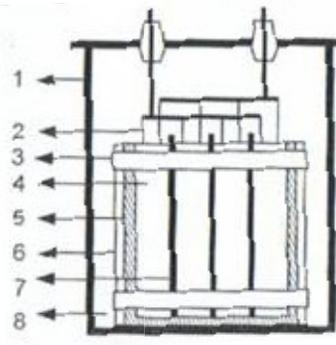


Gambar 7.1. Bahan Dasar Suatu Sel Kapasitor

Suatu kapasitor tegangan tinggi dibentuk dari beberapa sel kapasitor seperti ditunjukkan pada Gambar 7.2. Sel-sel kapasitor disusun /hubungan paralel atau seri tergantung kepada rancangan kapasitas tegangan kerjanya. Untuk memenuhi rancangan kapasitas daya diinginkan, maka beberapa sel kapasitor dihubungkan paralel. Sedang untuk memenuhi tegangan yang diinginkan, maka beberapa sel kapasitor dihubungkan seri.

Satu sel kapasitor (4) dibuat dari susunan kapasitor plat sejajar yang awalnya digulung berbentuk silinder. Untuk memperkecil diameter gulungan ditekan hingga berbentuk plat. Sel kapasitor yang sudah berbentuk plat ini dibungkus dengan beberapa lapis kertas isolasi dan disusun berdampingan dengan sel kapasitor lain. Antara satu kapasitor dengan sel kapasitor lain diberi isolasi pembatas (7) untuk mencegah kerusakan pada sel kapasitor lain jika sel kapasitor di sebelahnya mengalami kerusakan. Tiap sel juga dilengkapi dengan skring untuk memutuskan arus hubung singkat jika satu sel kapasitor mengalami tembus listrik. Untuk mengisolir susunan sel kapasitor dengan tanki digunakan isolasi kertas (5). Kemudian isolasi kertas dan semua sel kapasitor diikat dengan plat pengikat (3). Akhirnya dimasukkan dalam tanki baja atau bejana isolasi (1). Untuk menghantar panas yang terjadi pada kapasitor ke medium sekitar, maka tanki diisi dengan minyak isolasi yang tidak mengandung gelembung udara (8).

Sebelum susunan kapasitor dimasukkan ke dalam tanki, susunan kapasitor dikeringkan dengan metode pemanasan ruang vakum, hingga semua kertas isolasi kering dan semua gas keluar dari kertas.



1. Tanki
2. Terminal
3. Plat pengikat
4. Sel kapasitor
5. Isolasi kertas
6. Papan logam pelindung
7. Isolasi pembatas
8. Minyak isolasi

Gambar 7.2. Konstruksi Suatu Kapasitor Tegangan Tinggi

Jenis dielektrik yang digunakan umumnya adalah isolasi kertas-impregnasi. Bahan impregnasi dapat berupa minyak mineral atau cairan sintesis. Kekuatan dielektrik minyak mineral lebih tinggi, tetapi memiliki kelemahan seperti disebutkan di bawah ini:

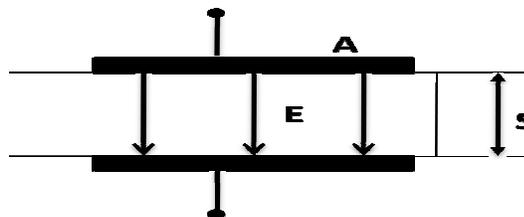
1. Konstanta dielektriknya rendah.
2. Distribusi tegangan tidak seragam.
3. Minyak mineral mudah teroksidasi, dan hasil oksidasinya berupa asam, air dan lumpur halus.
4. Mudah disusupi rongga udara. Pada tegangan tertentu di rongga udara akan terjadi peluahan listrik yang menghasilkan hidrogen dan molekul hidrokarbon berbobot rendah.
5. Mudah terbakar, sehingga membutuhkan alat pengaman dan mengakibatkan biaya pembuatan semakin besar.

Dengan menggunakan bahan cairan sintesis dimensi kapasitor semakin kecil karena:

1. Konstanta dielektrik cairan sintesis relatif lebih tinggi.
2. Cairan sintesis sulit disusupi rongga udara sehingga kejadian peluahan pada rongga udara tidak membatasi tegangan operasinya, dengan demikian dapat dioperasikan pada tegangan yang lebih tinggi.

6.3 DAYA DAN ENERGI SUATU KAPASITOR

Pada Gambar 7.3 ditunjukkan suatu kapasitor plat sejajar. Jika kapasitor diberi tegangan bolak-balik V berfrekuensi f , di mana efek medan pinggir diabaikan, maka dielektriknya akan memiliki medan elektrik sebesar:



Gambar 7.3 Kapasitor plat sejajar

$$E = V/s \quad 7.1$$

di mana s adalah tebal dielektrik.

Kapasitor selalu dirancang sedemikian hingga kuat medan elektrik pada dielektriknya sehomogen mungkin. Suatu kapasitor plat sejajar mempunyai kapasitansi sebesar:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{s} \quad (\text{farad}) \quad 7.2$$

di mana:

ϵ_0 = permeabilitas udara (Farad/m)

ϵ_r = permeabilitas relatif dielektrik

A = luas plat (m²)

s = tebal dielektrik (m)

Kapasitor akan menyimpan daya sebesar:

$$P = V^2 2 \pi f C = (V/s)^2 2 \pi f \epsilon_0 \epsilon_r A s \quad 7.3$$

Kerapatan daya, yaitu daya persatuan volume kapasitor adalah:

$$P = E^2 \cdot 2 \pi f \epsilon_0 \epsilon_r \quad 7.4$$

Dengan cara yang sama, diperoleh energi yang tersimpan pada kapasitor jika diberi tegangan searah V:

$$W = 1/2 V^2 C = 0,5 (V/s)^2 \epsilon_0 \epsilon_r A s \quad 7.5$$

Kerapatan energi, yaitu energi persatuan volume kapasitor adalah:

$$W^1 = 0,5 E^2 \epsilon_0 \epsilon_r \quad 7.6$$

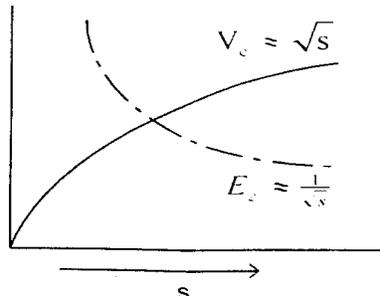
Kerapatan daya dan energi yang tinggi diperoleh jika konstanta dielektrik ϵ_r tinggi dan beroperasi pada kuat medan elektrik yang tinggi. Pada kapasitor plat sejajar sederhana seperti pada Gambar 7.1, cenderung terjadi peluahan luncur pada pinggir elektrodanya meskipun tegangan masih relatif rendah. Jika diberi tegangan bolak-balik, maka tegangan awal peluahan V_e dapat diperoleh dengan pendekatan, yaitu:

$$V_e \sim \sqrt{s} \quad 7.7$$

Dengan demikian kuat medan yang menyebabkan peluahan pada dielektrik adalah

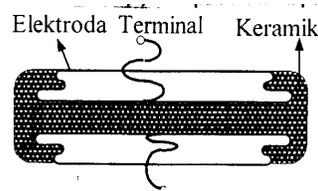
$$E_e = \frac{V_e}{s} \sim \frac{1}{\sqrt{s}} \quad 7.8$$

Kuat medan operasional E harus di bawah kuat medan awal E_e agar kerusakan dielektrik dapat dihindari. Kuat medan operasional yang tinggi dapat dicapai jika medan pinggir dikendalikan dengan memperbesar jari-jari kelengkungan pinggir elektroda atau dengan mempertipis lapisan dielektrik. Tetapi penggunaan lapisan dielektrik yang tipis membuat tegangan kerja kapasitor plat sejajar semakin rendah. Hubungan ketebalan dielektrik dengan pengurangan tegangan awal peluahan diberikan pada Gambar 9.4.



Gambar 6.4. Tegangan Mula dan Kuat Medan Kapasitor Plat Sejajar Tanpa Perata Kapasitansi

Contoh kapasitor plat sejajar yang menggunakan perata kapas adalah kapasitor keramik seperti ditunjukkan pada Gambar 6.5. Pinggir elektroda dibuat berbentuk lekukan dan menonjol.



Gambar 7.5. Penampang Kapasitor Keramik

Kapasitor seperti ini dapat digunakan untuk rangkaian frekuensi tinggi bertegangan sampai dengan 10 kV. Dielektrik yang digunakan adalah campuran khusus titanium dioksida dengan $\epsilon_r = 30 - 80$.

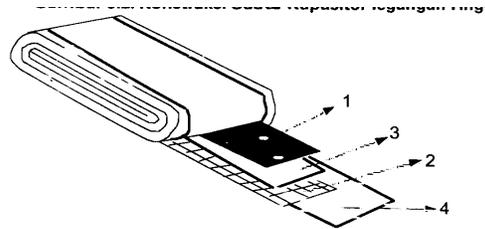
Faktor disipasi titanium ini dioksida menurun dengan naiknya frekuensi pada frekuensi di atas 1,0 MHz, $Tg \delta < 10^{-3}$ dan kekuatan dielektrik $E_d = 100-200$ kV/cm. Lapisan elektroda dibuat dengan menyemprotkan logam ke permukaan dielektrik. Pada kapasitor jenis konstruksi seperti ini, medan pinggir mempengaruhi nilai kapasitansi efektif kapasitor.

6.4 KAPASITOR GULUNG

Untuk memperoleh suatu kapasitor yang mampu memikul tegangan tinggi dan memiliki kapasitansi yang besar maka, digunakan dielektrik yang tipis, tetapi hal ini akan menimbulkan tekanan medan elektrik tinggi pada dielektrik, sehingga kapasitor membutuhkan bahan-bahan dielektriknya tinggi. Jika bahan-bahan elektroda terbuat dari foil alumunium, maka dielektrik bersama dengan elektroda membentuk lapisan tipis, sehingga dapat digulung berbentuk silinder dan berbentuk plat.

Pada Gambar 7.6 ditunjukkan konstruksi suatu sel kapasitor gulung plat. Elektroda kapasitor jenis ini biasanya terbuat dari foil alumunium yang tebalnya kurang lebih 10 mm. Karena akan digulung, maka dibutuhkan dua lembar dielektrik yang

disusun seperti pada gambar 7.6. tiap lembar dielektrik terdiri dari beberapa lapis kertas impregnasi atau film plastik.

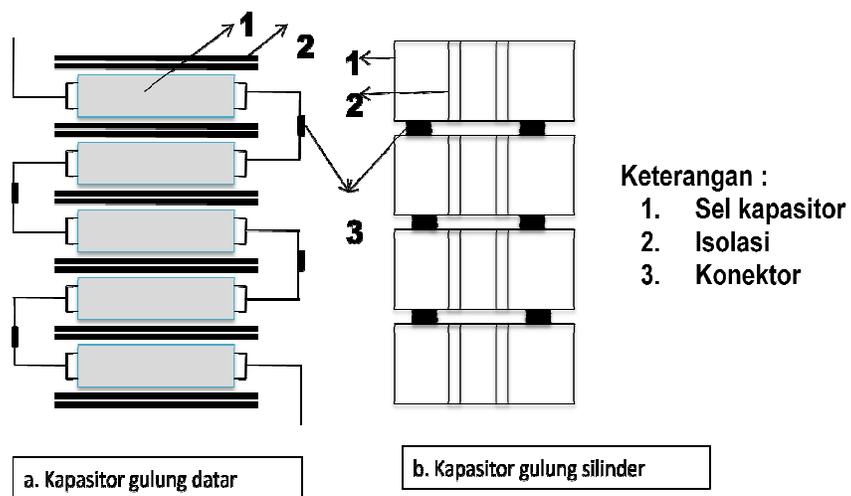


Keterangan :
 1,2 = Foil alumunium
 3,4 = Foil kertas isolasi

Gambar 7.6. Kapasitor Gulung Bentuk Datar

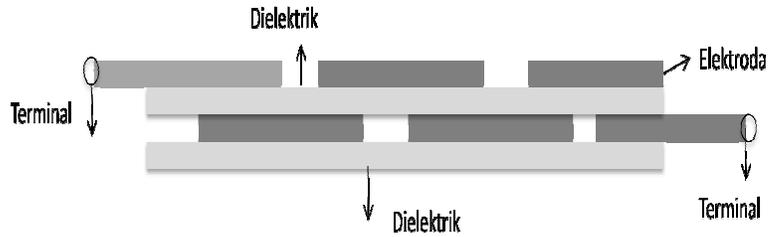
Dengan cara seperti ini luas efektif elektroda dapat mencapai beberapa meter kuadrat. Terminal dibuat dengan cara menyusun foil elektroda sedemikian sehingga tepi elektroda yang satu tidak menindih tepi elektroda lain. Cara lain adalah menyisipkan terminal antara foil elektroda dengan dielektrik dan letaknya dibuat berseberangan. Tegangan operasi suatu sel kapasitor gulung terbatas karena dielektriknya tipis. Oleh karena itu, untuk memperoleh kapasitor tegangan tinggi, beberapa sel kapasitor gulung disusun bertindih seperti pada gambar 7.7, kemudian sel kapasitor dihubungkan seri. Susunan seperti pada Ga 7.7.a, dilakukan pada sel kapasitor gulung berbentuk datar, sedang susunan seperti pada Gambar 7.7b, dilakukan pada sel kapasitor gulung berbentuk silinder.

Agar tinggi tumpukan kapasitor gulung silinder tidak terlalu maka dilakukan hubungan seri internal di samping hubungan eksternal. Untuk tujuan ini, beberapa foil elektroda disisipkan sekaligus menjadi penghubung ke elektroda yang lain seperti ditunjukkan pada Gambar 7.8. Hanya foil elektroda yang pertama dan yang terakhir yang nampak berperan sebagai terminal.



Keterangan :
 1. Sel kapasitor
 2. Isolasi
 3. Konektor

Gambar 7.7 Sambungan Seri Eksternal Kapasitor Gulung

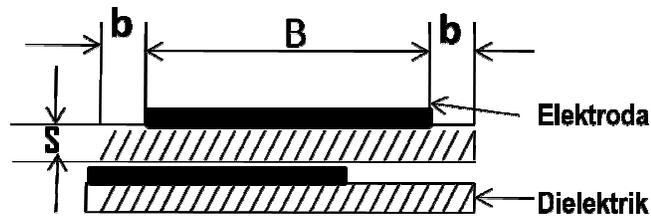


Gambar 7.8. Sambungan Seri Internal Kapasitor Gulung

6.5 RANCANGAN SUATU KAPASITOR GULUNG

A. KAPASITANSI GULUNGAN

Susunan elektroda dan dielektrik suatu kapasitor gulung diberikan pada pada Gambar 7.9. Kapasitor ini terdiri dari dua lapis foil logam sebagai elektroda dan dua lapis pita dielektrik. Misalkan tebal dielektrik s dan lebar foil logam yang tumpang tindih adalah B .



Gambar 6.9. Penampang Kapasitor Gulung

Karena digulung, maka kapasitansi yang diperoleh menjadi dua kali lipat. Jika panjang seluruh foil logam adalah L , maka besarnya kapasitansi yang diperoleh adalah :

$$C = 2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{B \cdot L}{s} \quad 7.9$$

Jarak tepi b dibutuhkan untuk mencegah terjadinya lewat denyar (flashover), biasanya dibuat 5-10 mm.

B. DIELEKTRIK

Bahan dielektrik untuk kapasitor digunakan kertas khusus yang tebalnya 10-20 mm dikombinasikan dengan bahan impregnasi, film plastik (polypropylene, polythlene, styroflex) atau gabungan keduanya. Masing-masing lapisan tidak boleh mempunyai titik-titik lemah karena pada titik-titik lemah mudah terjadi tembus listrik. Untuk mencegah hal ini dielektrik dibuat dari sejumlah lapisan dan disusun bertindih satu lain. Peluang bahwa pada setiap satu lapisan dari n lapisan terjadi titik lemah pada tempat yang sama adalah p_1^n di mana p_1 adalah peluang adanya titik lemah pada satu lapisan dielektrik. Jika memungkinkan untuk film plastik dipilih 2 lapisan sedang untuk

kertas yang diperkirakan mempunyai peluang titik lemah lebih besar, dibuat 3 - 6 lapisan.

Kapasitor pembagi tegangan dan kapasitor gandeng selalu diusahakan beroperasi pada suhu yang rendah. Suhu kerja suatu kapasitor tergantung pada kapasitansi, sedang kapasitansi tergantung pada jenis dielektrik. Dielektrik yang lebih disukai untuk kapasitor suhu rendah adalah 1 yang diimpregnasi dengan minyak mineral, di mana dapat diperoleh $\epsilon_r \approx 4,2$ dan $Tg \delta < 0,2$ %. Jika tegangan awal peluahan terlewat dan tetap berlangsung lama, maka bahan ini akan melembut (terbentuk *X-wax*) dan tembus listrik akan terjadi pada tepi elektroda.

Untuk kapasitor daya digunakan dielektrik kertas atau kertas-foil yang diimpregnasi dengan askarel (*chlorinated diphenyl*). Dengan bahan impregnasi askarel kerapatan daya yang besar dapat dicapai, yaitu sebesar $\epsilon_r = 5,5$; dan karena dapat dioperasikan pada kuat medan yang sedikit lebih tinggi, maka kerapatan daya jauh lebih besar. Walaupun demikian, pemakaian askarel dapat menimbulkan asam hidroklorik berbahaya pada pinggir logam, sehingga harus benar-benar dipastikan bahwa tegangan awal peluahan tidak dilewati, meskipun dalam waktu yang relatif singkat. Lebih jauh lagi, sebagai pengganti askarel, media impregnasi lain (misalnya, *isopropylbiphenyl*, adalah lebih baik ditinjau dari sudut pandang lingkungan, meski konstanta dielektriknya lebih rendah (2,7) tetapi masih mengizinkan beroperasi pada kuat medan yang lebih tinggi.

Kapasitor impuls membutuhkan kerapatan energi yang tinggi dan ditolerir bekerja pada tegangan di atas tegangan awal peluahan asalkan tegangan itu berlangsung dalam waktu yang singkat. Di samping minyak mineral, kastrolin dapat juga digunakan sebagai bahan impregnasi pada kertas ulung, hingga dapat dicapai $\epsilon_r \approx 5$. Faktor dissipasinya yang tinggi hampir 1%, tidak begitu mengganggu.

Dalam hal khusus gas secara teknis dapat dipakai sebagai media impregnasi, yakni jika digunakan film plastik. Sebagai contoh, dengan film polyetilen dapat diperoleh rugi-rugi dielektrik yang rendah $Tgd < 10^{-4}$ dan $\epsilon_r \approx 10$.

C. KUAT MEDAN KAPASITOR AC DAN DC

Besaran elektrik yang paling penting pada suatu kapasitor tegangan tinggi adalah kuat medan keria E sebab kerapatan daya dan energi sebanding dengan kuadrat kuat medan. Untuk tegangan bolak-balik perlu dipertimbangkan mekanisme penuaan yang berlangsung lama dan batas tegangan awal peluahan. Untuk suatu konfigurasi dengan bahan isolasi minyak mineral, pada tekanan $p = 1$ bar didapat

$$V_e = 30 \left(\frac{s}{r} \right)^{1/5} \text{ untuk kV untuk s dalam cm.} \quad 7.10$$

Menurut persamaan di atas, untuk 5 lapis dielektrik kertas gulung yang diimpregnasi dengan minyak, tebal masing-masing lapisan 10 mm dan $\epsilon_r = 4,2$, maka tegangan awal peluahan dapat dicari, yaitu $U_e \approx 1$ kV. Batas operasi kuat medan yang aman berada di bawah 20 V/mm. Pengalaman menunjukkan bahwa dengan

kertas askarel dapat diperoleh kuat medan sedikit lebih tinggi dari pada kertas yang diimpregnasi dengan minyak.

Kapasitor yang bekerja pada tegangan searah hampir tidak dipengaruhi efek medan pinggir. Dalam pengujian tegangan searah perhatian umumnya ditujukan terhadap tegangan tembus kritis dari gulungan, bukan terhadap tegangan awal peluahan. Pengamatan menunjukkan bahwa untuk ketebalan dielektrik tertentu, E_d akan meningkat tajam pada kertas yang lebih tipis. Peningkatan E_d ini adalah akibat berkurangnya peluang titik lemah, karena semakin tipis kertasnya semakin banyak jumlah lapisan yang membentuk dielektrik. Pada Tabel 7.1 ditunjukkan pengaruh jumlah lapisan terhadap kekuatan dielektrik rata-rata kertas gulung yang diimpregnasi dengan askarel, jika diuji dengan tegangan searah. Jenis kertas dalam pengujian ini adalah kerapatan $1,2 \text{ g/cm}^3$ dan ketebalan $10 - 60 \mu\text{m}$.

Tabel 7.1 Pengaruh Jumlah Lapisan Terhadap Kekuatan Dielektrik

Jumlah Lapisan	2	3	4
$E_d(V/\mu m)$	100	170	230

Syarat bahwa dielektrik harus dibagi-bagi sesering mungkin menjadi pegangan untuk semua tekanan tegangan. Dengan ketersediaan pabrik dan proses yang ada sekarang, tebal kertas kapasitor hanya dapat dibuat $\pm 6 \text{ mm}$. Agar penggunaan dielektrik optimum, perlu dilalukkan kompromi antara pemilihan kertas yang setipis mungkin dan biaya pembuatan yang meningkat dengan pengurangan tebal kertas.

Kuat medan efektif untuk berbagai jenis kapasitor dan bahan isolasi adalah seperti pada Tabel 7.2. Sebaran yang diberikan untuk tiap kasus di atas menunjukkan bahwa harga kuat medan efektif yang dapat diterima tergantung pada yang dipilih. Mempersiapkan bahan halnya dengan pembuatan sambungan pada gulungan. Untuk meyakini suatu konstruksi yang baru dapat beroperasi pada kuat medan ditetapkan perlu dilakukan pengujian lifetime (umur) yang komprehensif

**Tabel 7.2
Kuat Medan Efektif Berbagai Jenis Kapasitor Dan Bahan Isolasi**

Jenis Kapasitor	Isolasi	E (V/mm)
Kapasitor Daya AC	Kertas diimpregnasi	15-20
	askarel	
	Kertas foil diimpregnasi	35-40
	askarel	
Kapasitor Gandeng dan Pengukuran AC	Kertas diimpregnasi	10- 15
	minyak mineral	
Kapasitor Perata (DC)	Kertas diimpregnasi	80- 100
	minyak- mineral	

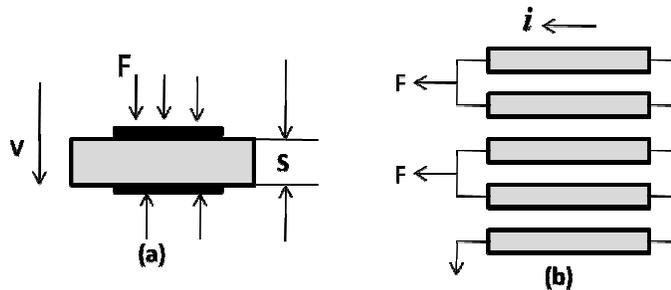
D. RANCANGAN KAPASITOR IMPULS

Pelepasan muatan yang tiba-tiba pada suatu kapasitor tegangan tinggi menimbulkan tekanan mekanik yang tinggi pada gulungan dan sambungannya. Hal ini harus diperhitungkan khususnya pada kapasitor impuls, tetapi juga untuk kapasitor tegangan searah dan bolak-balik yang dalam praktek mengalami lewat denyar eksternal. Pada Gambar 7.10 ditunjukkan gaya elektrostatis dan gaya elektromagnetik yang terjadi pada suatu kapasitor. Gaya elektrostatis pada permukaan kapasitor (F^1) dapat dihitung dengan persamaan energi :

$$F^1 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2 \quad 7.11$$

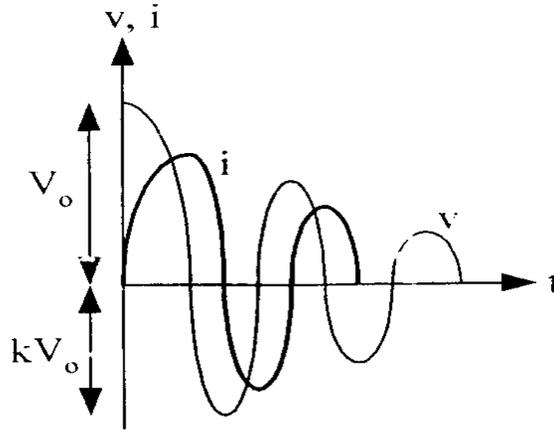
Jika dimisalkan $E = 75 \text{ V}/\mu\text{m}$ dan $\epsilon_r = 4,2$, maka diperoleh $F^1 \approx 10^5 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ bar}$. Seandainya terjadi peluahan yang tiba-tiba, tekanan F^1 mula-mula akan dipikul gulungan, kemudian menghilang dengan tiba-tiba. Bila peluahan berosilasi, maka tekanan yang terjadi juga berosilasi dengan frekuensi dua kali frekuensi peluahan, akibatnya timbul tekanan mekanik bolak-balik yang kuat pada elektroda logam dan lembaran-lembaran isolasi.

Gaya elektromagnetik (F) yang ditunjukkan dalam Gambar 9.10.b adalah hal yang sangat penting diperhitungkan. Konstruksi penghantar gulungan harus memiliki kualitas dan kekuatan mekanis yang tinggi agar mampu memikul gaya elektromagnetik tersebut. Arus peluahan i akan menginduksikan medan magnet. Besarnya medan magnet yang tak terhindarkan ini harus diusahakan seminimum mungkin. Pada kapasitor, impuls, jika memungkinkan sumbu penyalur arus pada setiap gulungan sama dengan sumbu gulungan lembaran logam.



Gambar 7.10. Gaya Mekanik Listrik dalam Kapasitor Gulungan

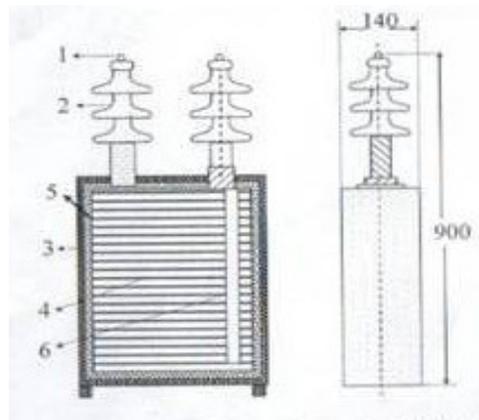
Nilai sesaat tegangan (v) dan arus (i) pada suatu kapasitor impuls sedang bekerja melepaskan muatannya diperlihatkan pada Gambar 7.11 Tekanan elektrik yang dihasilkannya dinyatakan oleh faktor osilasi k umur dari suatu kapasitor impuls dinyatakan dalam frekuensi pengoperasian kapasitor membuang muatan. Kapasitor impuls untuk eksperimen fisika, biasanya dirancang memiliki umur sekitar $N=10.000$ peluahan pada faktor $k = 0,8$. Jika kuat medan operasional kapasitor semakin tinggi (k semakin besar), maka umur kapasitor semakin pendek penurunan kuat medan operasional dari $k = 0,8$ menjadi $k = 0,5$, dapat menaikkan umur 4 kali lebih lama. Nilai umum kuat medan operasi kapasitor impuls sama dengan kapasitor tegangan searah, yaitu sekitar $80 - 100 \text{ V}/\mu\text{m}$.



Gambar 7.11. Nilai Sesaat Tegangan dan Arus Kapasitor

6.6 BEBERAPA JENIS RANCANGAN KAPASITOR

Konstruksi kapasitor daya lebih sering dan disukai menggunakan kumparan gulungan plat, dipress dalam bentuk paket-paket kubus dan ditutup rapat oleh pembungkus logam. Cara ini menjamin perpindahan panas yang baik dan pemuain bahan pengisi karena kenaikan suhu ditentukan oleh efek membran dinding pembungkus kapasitor tersebut.



Keterangan:

1. Baut penghubung
2. *Bushing* porselen
3. Kerangka baja
4. Kapasitas gulungan plat
5. Isolasikertas atau papan-tekan
6. Penghubung balik

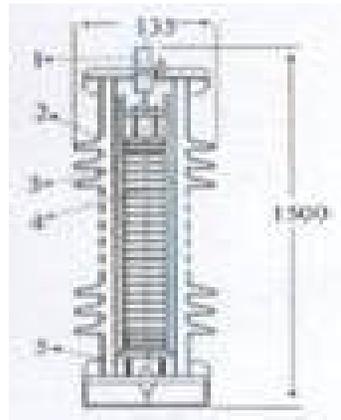
Gambar 7.12. Konstruksi Kapasitor Daya

Karena kapasitor daya umumnya bertegangan menengah dan ber kutub dua, maka penghubung antar terminal dan isolasi yang mengantairai gulungan dengan badan semuanya dapat ditata dengan baik. Gambar 7.12 memperlihatkan contoh konstruksi kapasitor daya.

Kapasitor gandeng dan juga kapasitor pembagi tegangan kapasitor dirancang untuk tegangan 110 kV ke atas, tetapi karena kapasitas dayanya rendah maka persoalan panas tidak menjadi masalah, sehingga dapat ditempatkan dalam bejana porselen. Pada Gambar 7.13 diperlihatkan contoh konstruksi sebuah kapasitor

gandeng. Gulungan plat yang ditunjukkan pada gambar dapat juga diganti dengan gulungan silindris yang dihubungkan seri secara internal. Dielektrik tidak boleh berhubungan dengan udara luar, oleh karena itu bejana kapasitor harus tertutup rapat untuk mengantisipasi timbulnya pengembangan dielektrik saat kapasitor beroperasi, maka pada bagian atas bejana kapasitor dipasang bantalan atau puputan.

Kapasitor impuls harus memiliki induktansi yang rendah, baik induktansi, yang terjadi dalam gulungan maupun yang terdapat pada ujung terminalnya. Kapasitor untuk generator tegangan impuls di atas 200 kV, konstruksinya dibungkus dengan bahan isolasi. Kapasitor impuls penyimpan energi dengan induktansi rendah harus menggunakan terminal berkonduktor pita atau konduktor koaksial.

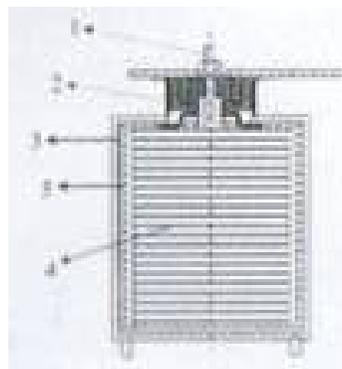


Keterangan:

1. Baut Terminal
2. Bejana porselen
3. Kapasitor gulung plat
4. Gibs penekan
5. *Bushing* terminal tegangan rendah

Gambar 7.13. Konstruksi Kapasitor Gandeng

Sebagai contoh pada Gambar 7.14 ditunjukkan konstruksi sebuah kapasitor impuls. Perbedaannya dengan kapasitor daya ditunjukkan pada gambar, di mana kapasitor ini menggunakan terminal konduktor pita dan arus balik melalui kerangkanya.



Keterangan:

1. Terminal pita
2. Bushing
3. Kerangka baja
4. Kapasitor gulung plat
5. Isolasi kertas atau papan tekan

Gambar 7.14. Konstruksi Kapasitor Impuls

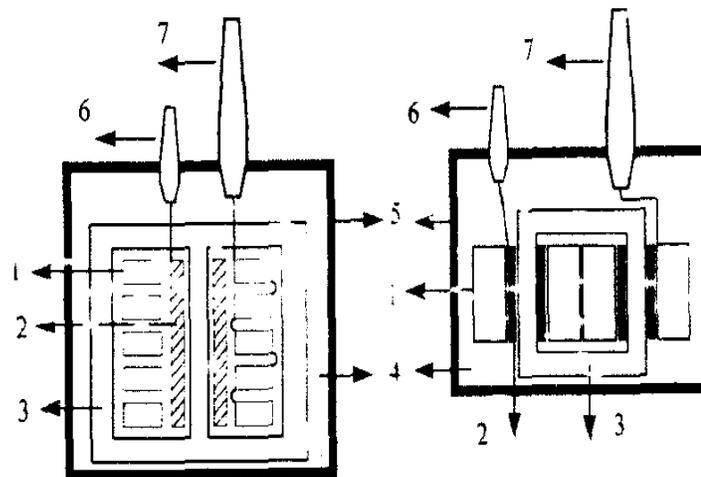
Bab 8

TRAFO DAYA

10.1 PENDAHULUAN

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, bahwa tegangan transmisi tenaga listrik harus bertegangan tinggi agar rugi-rugi daya pada transmisi sedikit. Oleh karena itu dibutuhkan trafo daya untuk: menyalurkan energi listrik dari generator bertegangan menengah ke transmisi bertegangan tinggi; dan untuk menyalurkan daya dari transmisi bertegangan tinggi ke jaringan distribusi bertegangan rendah.

Pada Gambar 8.1 ditunjukkan konstruksi umum dari suatu trafo, dan gambar 8.2 menunjukkan pemasangan trafo daya pada suatu gardu induk. Terlihat bahwa bagian utama dari suatu trafo adalah inti, dua set atau lebih kumparan dan isolasi. Inti trafo yang terbuat dari lembaran-lembaran baja silikon yang satu dengan lainnya diisolasi dengan pernis. Kumparan terbuat dari bahan tembaga, yang dihubungkan ke sumber energi disebut kumparan primer, sedang yang dihubungkan beban disebut kumparan sekunder. Bahan isolasi adalah kombinasi bal-n~ dengan dielektrik padat.



a. Trafo kumparan piring

b. Trafo kumparan silinder

- (1) Kumparan tegangan tinggi Kumparan tegangan rendah (3) Inti.
(4) Minyak isolasi (5) Tanki baja (6) Bushing tegangan rendah (7) Bushing tegangan tinggi

Gambar 8.1. Konstruksi Trafo



Gambar 8.2. Trafo daya pada suatu gardu induk

Jika kumparan primer dihubungkan ke sumber tegangan bolak balik, sementara kumparan sekunder dalam keadaan tidak dibebani, maka di kumparan tersebut mengalir arus yang disebut dengan arus beban nol (I_0). Arus ini akan membangkitkan fluks bolak-balik pada inti. Fluks bolak-balik ini dilingkupi oleh kumparan primer dan kumparan sekunder, sehingga pada kedua kumparan timbul gaya gerak listrik yang besarnya:

$$E_1 = 4,44 f N_1 \Phi \quad 8.1$$

$$E_2 = 4,44 f N_2 \Phi \quad 8.2$$

Di mana:

- E_1 = gaya gerak listrik kumparan primer
- E_2 = gaya gerak listrik kumparan sekunder
- N_1 = jumlah belitan kumparan primer
- N_2 = jumlah belitan kumparan sekunder
- f = frekuensi tegangan sumber
- Φ = fluks magnetik pada inti

Jika kumparan sekunder dibebani, maka pada kumparan tersebut mengalir arus sekunder (I_2). Arus sekunder akan menimbulkan fluks pada inti trafo yang berlawanan dengan fluks yang ditimbulkan arus I_0 , dengan perkataan lain menimbulkan demagnetisasi pada inti trafo. Untuk mengimbangnya, maka arus dikumparan primer harus bertambah menjadi I_1 hingga dipenuhi:

$$N_1 I_0 = N_1 I_1 - N_2 I_2 \quad 8.3$$

Gaya gerak listrik yang dibangkitkan pada kumparan menimbulkan medan elektrik yang kuat, teristimewa di sekitar belitan kumparan tegangan tinggi. Arus yang mengalir pada kumparan akan menimbulkan rugi-rugi tembaga (i^2r), sedang fluks pada inti akan menimbulkan rugi-rugi arus Eddely dan rugi-rugi histeresis, kedua rugi-rugi ini disebut rugi-rugi inti. Semua rugi-rugi ini akan menimbulkan suhu yang tinggi pada isolasi trafo. Di samping itu, arus pada kumparan juga menimbulkan gaya mekanik,

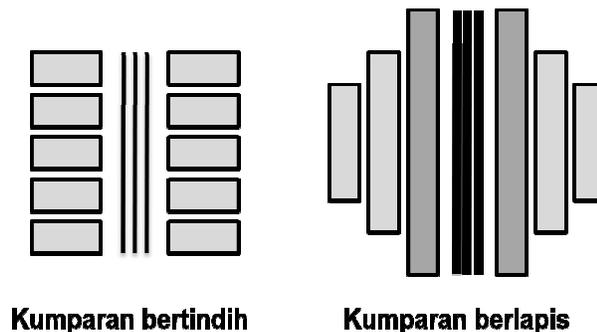
yang pada keadaan hubung gaya ini menimbulkan tekanan yang berat pada isolasi. Oleh karena itu, sistem isolasi harus memiliki kekuatan dielektrik yang cukup, memikul gaya mekanis yang besar dan dapat mendisipasikan dan rugi-rugi panas yang terjadi pada trafo ke medium sekitar.

Dalam bab ini, dibahas masalah isolasi belitan trafo, t sistem isolasi kertas-impregnasi minyak karena jenis isolasi inilah yang banyak ditemukan dalam konstruksi trafo di lapangan. Kemudian karena jenis isolasi ini banyak ditemukan konstruksi trafo di lapangan. Kemudian sedikit mengenai metode pendinginan isolasi dan pengujian trafo. yang akan dibahas ialah tentang peralatan distribusi, tegang; kumparan trafo, karena hal ini ada hubungannya dengan isolasi.

8.2 SUSUNAN DAN PENYAMBUNGAN KUMPARAN

8.2.1 JENIS SUSUNAN KUMPARAN

Pada suatu trafo, kumparan primer dengan kumparan sekunder (bergandengan erat secara magnetik. Kumparan dapat dibuat be piringan (*disc winding*) dan dibelitkan satu poros pada suatu inti Gambar 8.1a) atau berbentuk silindris (*cylindrical winding*) dan dibelitkan pada semua kaki inti (Gambar 8.1b). Kumparan-kumparan simteris disusun. agar gaya elektromagnetik yang terjadi pada saat mengalirkan arus hubung singkat merata pada setiap belitan.



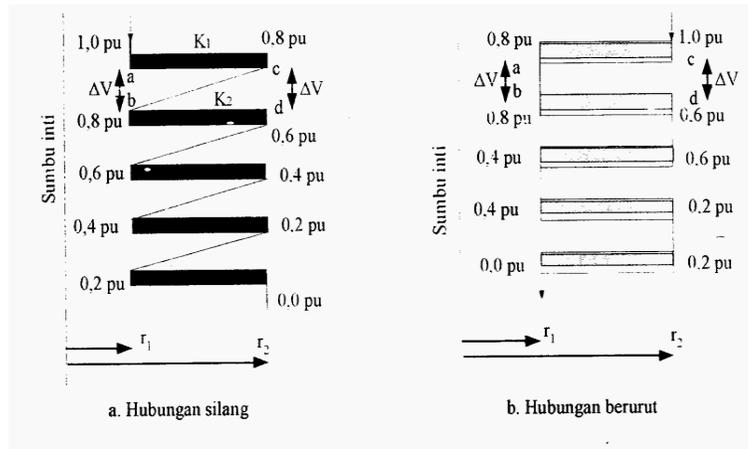
Gambar 8.3. Susunan Kumparan Tegangan Tinggi

Untuk penghantar dengan luas penampang yang sama, kumparan tegangan tinggi membutuhkan jarak bebas yang lebih besar baik untuk pengisolasian kumparan sdatu kumparan dengan kumparan lainnya. Trafo tegangan tinggi umumnya menggunakan kumparan silidris, karena biaya isolasinya lebih murah. Sebenarnya, belitan tegangan tinggi dapat dibuat dari beberapa elemen kumparan yang masing-masing dihubungkan seri. Elemen-elemen kumparan tersebut dapat disusun bertindih (Gambar 8.2.a)atau berlapis (Gambar 8.2b).

8.2.2 PENYAMBUNGAN KUMPARAN BERTINDIH

Pada kumparan susunan bertindih, tiap elemen kumparan ukurannya sama. Ada dua cara menghubungkan satu elemen kumparan dengan elemen kumparan

yang lain, yaitu hubungan bersilang dan hubungan berurut, kedua cara itu diperlihatkan pada Gambar 8.4. Pada hubungan bersilang, elemen-elemen kumparan dihubungkan secara seri, di mana konduktor penghubung melintasi ruang yang terdapat di antara satu elemen kumparan dengan elemen kumparan berikutnya sehingga menimbulkan masalah khusus bagi isolasi; tetapi beda tegangan di antara dua kumparan yang berjarak sama dari sumbu inti adalah sama ($\Delta V_{ab} = \Delta V_{cd}$).

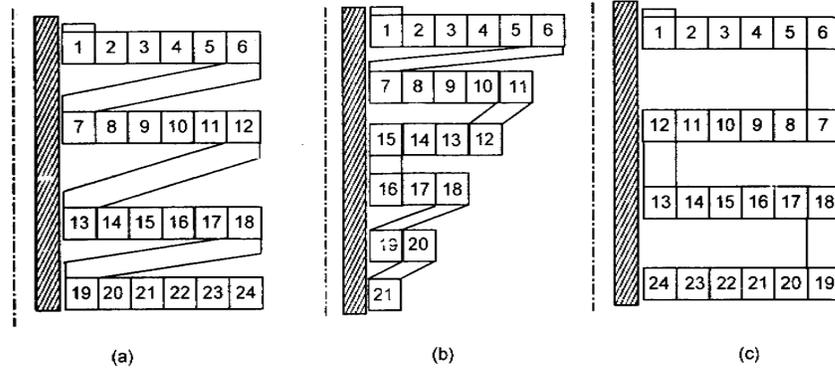


Gambar 8.4 Cara Penyambungan Elemen Kumparan

Dalam hubungan berurut, masalah isolasi karena penghubung elemen-elemen kumparan tidak ada, tetapi yang menjadi masalah adalah beda tegangan antara dua titik pada kumparan yang berdekatan yang berjarak sama dari sumbu inti. Jika jumlah unit kumparan dimisalkan 5 unit dan tegangan, kerja semua titik kumparan adalah 1,0 pu (lihat Gambar 8.3b), maka tegangan satu elemen, kumparan adalah 0,2 pu. Beda potensial antara titik a pada elemen kumparan paling atas dengan, titik b pada elemen kumparan di bawahnya (kedua titik berjarak r , dari sumbu inti) adalah $\Delta V_{ab} = 0$. Beda potensial antara titik c pada elemen kumparan paling atas dengan, titik d pada elemen kumparan di bawahnya (kedua titik berjarak r , dari sumbu inti) adalah $\Delta V_{cd} = 0,2$ pu.

Jadi, beda potensial di antara satu titik pada suatu kumparan yang berjarak r dari sumbu inti dengan satu titik pada kumparan berdekatan yang juga berjarak r dari sumbu inti, bervariasi dari nol sampai dua kali tegangan satu unit kumparan. Berbeda dengan hubungan silang, satu kumparan pada hubungan berurut tidak dapat dibelitkan bersinambungan, tetapi harus dihubungkan satu persatu.

Jika ukuran luas penampang konduktor cukup besar, maka satu elemen kumparan dapat dibuat terdiri dari satu konduktor dengan diameter elemen kumparan yang bervariasi sedemikian rupa, sehingga satu elemen kumparan elemen kumparan yang lain. Penyambungan antar elemen kumparan untuk kasus seperti ini dapat dilakukan seperti Pada Gambar 10.4. Ketiga cara penyambungan pada Gambar 10.4 memungkinkan elemen-elemen kumparan berkesinambungan tanpa solderan.



Gambar 8.5 Penyambungan Elemen Kumparan Belitan Tunggal

8.2.3 PENYAMBUNGAN ELEMEN KUMPARAN BERLAPIS

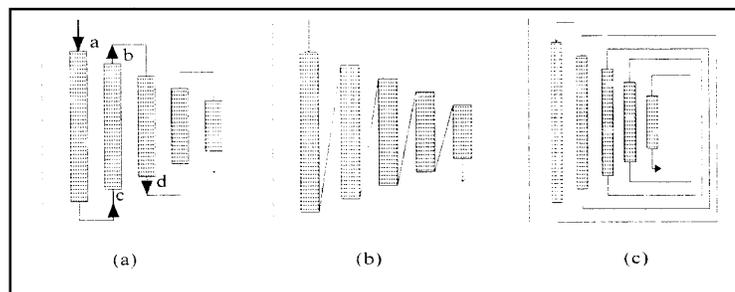
Dilihat dari arah belitan, maka elemen-elemen kumparan tegangan tinggi suatu trafo daya dibagi atas dua jenis, yaitu:

1. Arah belitan berlawanan, di mana arah belitan dua elemen kumparan yang berdampingan dibuat berlawanan, sehingga arah gaya gerak listrik pada dua elemen kumparan yang berdampingan menjadi berlawanan.
2. Arah belitan sama, di mana arah belitan semua elemen kumparan dibuat sama, sehingga arah gaya gerak listrik pada setiap elemen kumparan sama.

Jika arah belitan berlawanan, maka cara penyambungan adalah seperti pada Gambar 8.5.a. Untuk jenis arah belitan sama.. ada dua cara penyambungan, yaitu hubungan internal seperti ditunjukkan pada Gambar 8.5.b dan hubungan eksternal seperti ditunjukkan pada 8.5.c.

Perbedaan ketiga cara penyambungan di atas terletak pada panjang penyambung elemen-elemen kumparan yang dibutuhkan. penyambung terpendek dijumpai pada jenis arah belitan berlawanan dan disusul kemudian penyambung jenis arah belitan sama-hubungan internal. Tetapi melewati penyambung di antara lapisan seperti halnya pada hubungan internal kurang baik, oleh karena itu sebaiknya dilewatkan dari luar lapisan seperti halnya hubungan eksternal.

Satu hal yang perlu diperhatikan adalah beda tegangan di antara dua elemen kumparan yang berdampingan. Untuk jenis arah belitan berlawanan, beda tegangan antara elemen kumparan berdampingan menjadi berlipat ganda, yaitu pada titik penyambung di mana arah tegangan berlawanan arah (misalnya V_{12} dan V_{21} pada Gambar 8.5.a).



Gambar 8.6 Penyambungan elemen Kumparan Berlapis

8.3 KOMPONEN ISOLASI BELITAN TEGANGAN TINGGI

Konstruksi isolasi trafo daya, khususnya trafo bertegangan nominal tinggi, adalah sangat rumit. Masing-masing komponen transformer, yaitu belitan, elemen kumparan tegangan tinggi dan kumparan tegangan rendah harus diisolasi satu sama lain; elemen kumparan diisolasi juga terhadap bagian-bagian yang dibumikan, yaitu inti dan gandar. Dengan demikian isolasi trafo dapat dibagi atas tiga jenis, yaitu..

1. isolasi minor, yaitu isolasi yang mengisolasi' aritar satu belitan dengan belitan lain dalam satu elemen kumparan.
2. Isolasi mayor, yaitu isolasi yang mengisolasi kumparan tegangan tinggi dengan bagian yang bertegangan rendah. Isolasi ini dibagi lagi atas dua bagian, yaitu: isolasi utama, yang mengisolasi kumparan tegangan tinggi dengan kumparan tegangan rendah. dan isolasi gandar, yang mengisolasi belitan tegangan tinggi dengan gandar.
3. Isolasi fasa, yaitu isolasi antar kumparan tegangan tinggi dengan kumparan tegangan tinggi yang lain pada trafo tiga fasa.

Isolasi mayor, isolasi minor dan isolasi fasa, ketiganya disebut isolasi kumparan tegangan tinggi. Penamaan ini diberikan karena kumparan tegangan tinggi merupakan suatu elektroda yang harus diisolasi terhadap bagian trafo bertegangan rendah. Kegunaan isolasi kumparan adalah untuk mengisolasi satu elemen kumparan dengan elemen kumparan yang lain.

Media isolasi yang utama digunakan baik untuk isolasi mayor maupun isolasi minor adalah minyak trafo dikombinasikan dengan dielektrik padat (papan-tekan, bakelit, kertas, pita kain). Trafo daya diutamakan berisolasi minyak-kertas. Sifat isolasi ini lebih baik dari jenis isolasi yang lain, khususnya untuk trafo daya pengenal besar dan bertegangan tinggi. Untuk instalasi tegangan menengah dan pasangan dalam, biasanya digunakan trafo isolasi epoksi resin, dengan demikian resiko terbakar karena kerusakan pada trafo semakin kecil. Pada trafo, penggunaan dielektrik padat dibedakan atas tiga jenis, yaitu sebagai: pembungkus, isolasi dan partisi.

Pembungkus adalah isolasi dari satu lilitan dalam satu elemen kumparan, disebut sebagai isolasi lilitan-lilitan. Pembungkus terbuat dari dielektrik padat tipis, tebal keseluruhannya tidak lebih dari 1-2 mm, biasanya terbuat dari bahan kertas atau isolasi pernis. Isolasi ini melekat sangat rapat pada bagian trafo yang berperan sebagai elektroda dan tidak merubah intensitas medan elektrik pada sekelilingnya. Penggunaan pembungkus efektif jika medan agak uniform. Pembungkus akan merintang partikel nenempel pada elektroda, hal ini mencegah pembentukan jembatan konduktif pada frekuensi daya terutama pada kasus minyak dikotori oleh serat dan kelembaban.

Jika lilitan dibentuk dari konduktor berpenampang kecil (hanya beberapa mm²), maka digunakan kawat tembaga atau batang tembaga yang dipernis. Untuk luas penampang yang lebih besar, selalu digunakan penghantar segi empat berisolasi kertas. Untuk arus yang besar, digunakan penghantar pilin yang dipernis sebagian dan dibungkus dengan isolasi kertas untuk mencegah rugi-rugi tambahan. Isolasi kertas untuk penghantar dibuat berupa pita yang tebalnya 0,02 - 0,2 mm, dan dibelitkan semi bertindih.

Lapisan isolasi lebih tebal dari pembungkus, tebalnya mencapai 10 mm. Fungsinya adalah mereduksi intensitas medan elektrik di lingkungan sekitar elektroda.

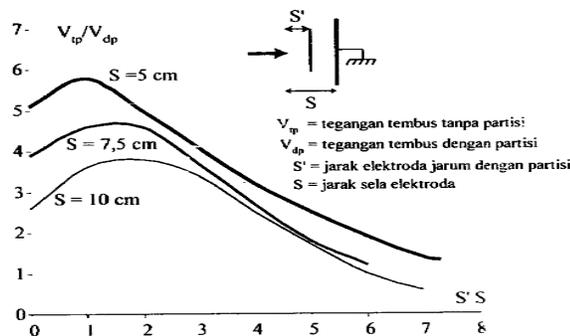
Berlawanan dengan pembungkus, isolasi digunakan pada medan elektrik yang sangat tidak seragam, sehingga keberadaan akan meratakan distribusi tegangan elektrik. Bahan isolasi adalah kertas tekan atau kertas lembut yang disusun sedemikian hingga memiliki alur untuk aliran minyak membawa panas. Tekanan elektrik bolak-balik 50 1-1 pada minyak dalam alur diijinkan sekitar 50 - 100 kV/cm. Dimensi dielektrik kertas dibuat sedemikian sehingga tembus listrik yang bersifat sementara pada minyak, tidak mengurangi kekuatan dielektrik hingga t bawah batas yang ditentukan.

Pemakaian kertas-keas untuk tegangan tinggi harus dihindarkan, jika masih memungkinkan memperoleh kertas-tekan yang pada saat yang bersamaan memiliki mekanis dan kekuatan dielektrik yang tinggi. Partisi dalam trafo dibuat dari pap an-tekan-elektrik, diolah dari kertas bakelit atau dipabrik dalam bentuk plat, tabung silinder, dan bentuk lain yang lebih rumit. Partisi dipasang pada kawasan medan tidak seragam yang kuat dan lemah. tetapi dampak keberadaannya berbeda.

Pada medan elektrik yang sangat tidak seragam, partisi dari dielektrik padat memainkan peranan yang sama dengan partisi yang berada dalam suatu sela susunan elektroda jarum-piring. Oleh karena itu, partisi harus ditempatkan di daerah di mana medan elektrik maksimum. Adanya partisi tipis dalam minyak dapat menambah tegangan tembus minyak pada 50 Hz menjadi dua kali lipat. Tetapi keberadaan partisi, akan mengakibatkan terjadinya ionisasi pad kawasan medan elektrik tertinggi saat tegangan masih di bawah tegangan tembus minyak ionisasi yang berlangsung lama tidak diijinkan karena hal itu tidak hanya karena hal itu tidak ham-1 menguraikan minyak tapi juga berangsur-angsur merusak partisi. Oleh karena itu metoda 1m hanya dapat digunakan untuk menaikkan tegangan, tembus minyak pada kasus tegangan yang berlangsung dalam waktu singkat.

Pada Gambar 8.6 ditunjukkan efek partisi terhadap tegangan tembus minyak di antara elektroda jarum-piring. Dimensi partisi harus besar supaya mencegah teriadinya peluahan pada pinggir partisi. Dalam prakteknya, dimensi partisi yang digunakan pada trafo harus sekecil mungkin dan karena itu partisi harus dibentuk sedemikian hingga membuat medan elektrik lebih rata dari yang dapat diterima.

Pada medan yang seragam fungsi utama partisi adalah mencegah terbentuknya jembatan konduktif dalam minyak. Oleh karena itu, efek partisi dalam minyak murni tidak banyak, tapi berguna jika minyak bercampur dengan serat, dalam hal ini partisi akan beraktivitas sebagai proteksi.



Gambar 8.6 Efek Partisi Terhadap Tegangan Tembus

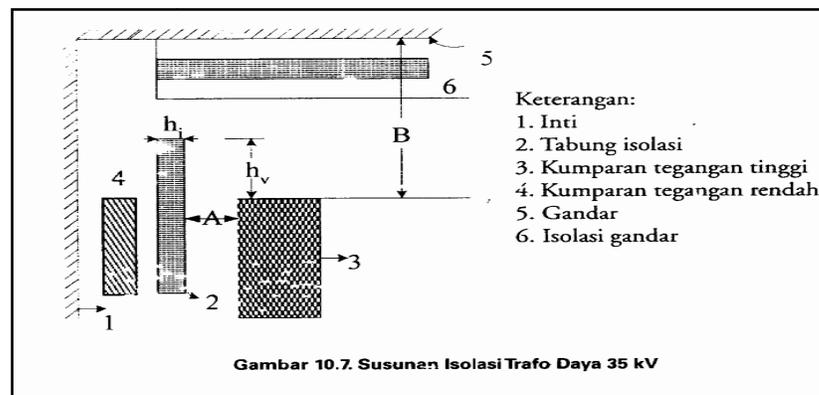
Semua efek partisi yang diutarakan di atas berlaku jika tebal partisi jauh lebih kecil daripada jarak sela elektroda. Jika partisi terlalu tebal, maka kuat medan elektrik dalam minyak akan bertambah besar, karena permitivitas minyak lebih rendah dari permitivitas dielektrik padat. Meskipun demikian, partisi tidak dapat dibuat terlalu tipis agar kekuatan mekanisnya tetap memadai. Di samping itu, adanya pembentukan jembatan konduktif meskipun dalam waktu yang singkat, akan membuat sebagian besar tegangan akan dikenakan pada partisi, sehingga kekuatan elektrik partisi harus cukup tinggi. Oleh karena itu, tebal partisi biasanya dibuat 4-9 mm.

Dielektrik padat pada trafo sering dijumpai hanya sebagai pemikul beban mekanis. Ada kemungkinan terjadi peluahan permukaan pada minyak disepanjang permukaan dielektrik padat. Tegangan lewat denyar pada permukaan dielektrik padat yang berada dalam minyak tergantung kepada bentuk medan elektrik, karena bentuk medan elektrik akan menentukan komponen tangensial dan normal medan elektrik. Jika komponen tangensial rendah, maka kemungkinan terjadinya peluahan permukaan semakin kecil.

8.4 KONSTRUKSI ISOLASI TRAFD D-AYA

8.4. 1. ISOLASI MAYOR

Susunan isolasi trafo daya sampai tegangan 35 kV ditunjukkan seperti pada Gambar 8.7. Isolasi di antara kumparan tegangan tinggi dengan kumparan tegangan rendah merupakan sela minyak yang terbagi-bagi oleh partisi. Kuat medan elektrik tertinggi terdapat di sudut pinggir atas kumparan tegangan tinggi. Oleh karena itu, dimensi tabung isolasi (2) dan isolasi gandar (6) harus memadai agar tidak terjadi peluahan pada sudut pinggir tersebut. Dimensi isolasi mayor trafo daya dapat dilihat pada Tabel 8. 1.



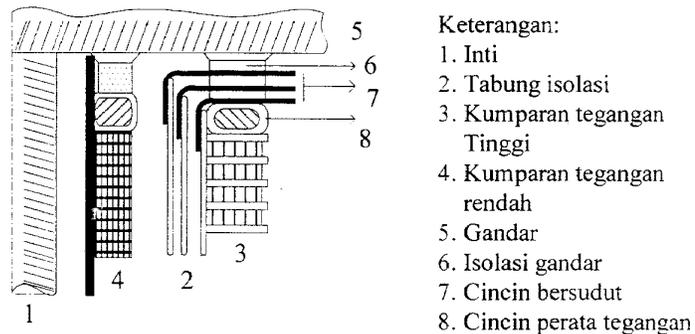
Gambar 8.7 Susunan isolasi trafo daya 35 kVA

Pada tegangan yang lebih tinggi medan elektrik pada sudut pinggir atas kumparan tegangan tinggi semakin besar, sehingga konstruksi isolasi pada sudut pinggir atas kumparan semakin rumit. Pada Gambar 8.8 ditunjukkan susunan isolasi trafo daya tegangan di atas 35 W. Di antara kumparan tegangan tinggi (3) dan tegangan rendah (4) terdapat tabung isolasi kertas-tekan (2), yang membagi minyak

menjadi beberapa bagian, sehingga tidak terbentuk jembatan konduktif dalam minyak yang secara baik, sambungan menghubungkan kedua kumparan.

Tabel 10.1
Dimensi Isolasi Mayor Trafo Daya

Kelas Tegangan Kumparan	Jarak ke inti (A, mm)	Jarak ke gandar (B, mm)	Jumlah silinder dan tebal (mm)	Uji tegangan KV _{rms}
3-6	8-10	20-25	1 x 2,5	25
10	10-12	25-30	1 x 3	35
35	27-30	70-80	1 x 5	85
110	57-67	110	2 x 6	200
150	95-10	180	3 x 6	275
220	130	260	4 x 6	400



Gambar 8.8 Susunan isolasi trafo daya diatas 35 kVA

Untuk mencegah terjadinya peluahan dari sudut ujung kumparan trafo menerobos minyak, maka digunakan cincin bersudut (7). Semakin tinggi tegangan nominal trafo semakin banyak tabung isolasi dan cincin bersudut yang digunakan, sehingga konstruksi isolasi trafo lebih rumit.

Sebuah elektroda perata tegangan berbentuk cincin (8) ditempatkan pada setiap kumparan untuk menyeragamkan medan elektrik di kawasan ujung kumparan. Tegangan pada cincin perata tegangan sama dengan tegangan lilitan terakhir dan hai us terbuka atau terbuat dari suatu resistor sehingga cincin perata tidak menimbulkan arus hubung singkat pada kumparan. Cincin perata dibalut dengan kertas-lembut. Kumparan dan tabung isolasi diikat secara mekanis oleh cincin bersudut (7) dan balok pengantara (6). Bahan cincin bersudut adalah kertas-tekan. Apr sirkulasi minyak tetap terjamin, maka bahan-bahan ini disusun dengan jarak yang tepat.

8.4.2. MINYAK ISOLASI

Minyak isolasi pada suatu trafo harus memiliki daya hantar panas yang baik agar dapat membawa panas yang terjadi pada inti dan kumparan kemedium sekitarnya. Karena kekuatan elektrik dan umur suatu trafo tergantung sepenuhnya

pada kualitas minyak isolasi, maka minyak isolasi yang digunakan pada suatu trafo harus memenuhi syarat-syarat di bawah ini:

- a) Mempunyai kekuatan elektrik yang tinggi.
- b) Mempunyai daya hantar panas yang baik.
- c) Mempunyai berat jenis yang rendah. Jika minyak berberat jenis rendah, maka partikel-partikel yang melayang-layang di dalam minyak akan segera mengendap pada dasar tangki. Hal ini sangat membantu dalam mempertahankan homogenitas minyak.
- d) Memiliki kekentalan yang rendah. Minyak yang encer lebih mudah dialirkan atau bersirkulasi, sehingga mendinginkan trafo lebih baik.
- e) Memiliki titik tuang rendah. Minyak dengan titik tuang yang rendah akan berhenti mengalir pada suhu yang rendah.
- f) Mempunyai titik nyala yang tinggi. Karakteristik titik nyala menentukan terjadinya penguapan dalam minyak. Jika titik nyala minyak rendah, maka minyak mudah menguap. Ketika minyak menguap, volumenya berkurang, minyak semakin kental dan campuran dengan udara di atas permukaan minyak membentuk bahan yang dapat meledak.
- g) Tidak merusak material isolasi dan material lain trafo.
- h) Unsur kimianya harus stabil agar usia pelayanannya panjang.

Spesifikasi minyak isolasi untuk trafo harus memenuhi persyaratan di atas. Menurut SPLN 49-1-1982, spesifikasi minyak isolasi baru dan yang sudah pernah dipakai diberikan pada Lampiran D. Biasanya, setelah suatu trafo beroperasi lama, akan terjadi pengasaman pada minyak isolasinya. Asam yang terjadi pada minyak cenderung mengakibatkan isolasi kumparan rapuh dan gampang retak ketika dikenai tekanan mekanik yang terjadi saat kumparan dialiri arus hubung singkat.

Tingkat keasaman sering ditandai dari bau yang menyengat. Pengasaman dalam minyak diikuti dengan pembentukan lumpur yang dapat menyumbat lorong-lorong, pendingin, sehingga pendinginan menjadi terhambat dan panas suhu minyak meninggi, dan hal ini dapat mengakibatkan tembus listrik thermal. Oleh karena itu, perlu memeriksa tingkat keasaman minyak trafo secara teratur, minimal sekali dalam setahun.

Tingkat keasaman dinyatakan dari hasil pengujian beberapa sampel, ukuran yang digunakan adalah banyaknya potasium hidroksida yang dibutuhkan untuk menetralkan keasaman 1 gram sampel.

Jika tingkat keasaman mencapai 0,5, minyak harus dikondisikan seperti semula atau diganti. Setelah itu, beban lebih harus dihindari, tingkat keasaman diperiksa setiap bulan, dan inti serta kumparan diangkat untuk melihat adanya endapan lumpur di sana. Tingkat keasaman endapan lumpur selalu lebih tinggi dari tingkat keasaman minyak. Jika endapan lumpur ada, maka bagian-bagian trafo yang berlumpur harus disemprot dengan minyak bersih dengan menggunakan alat penyemprot.

Jika tingkat keasaman mencapai 1,5, trafo tidak boleh dioperasikan lagi, dan minyaknya harus dikeluarkan. Inti dan belitan harus diangkat dan semua

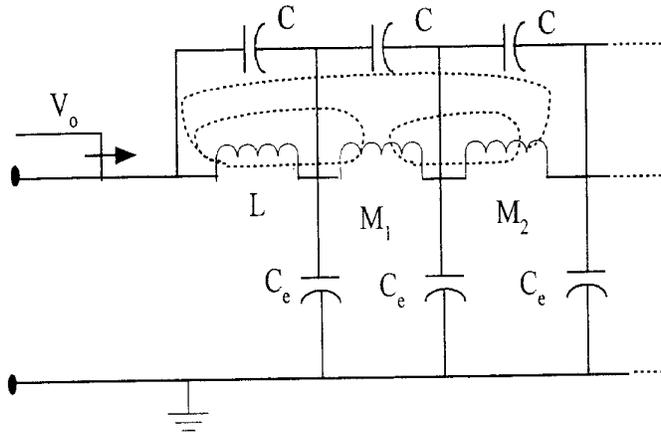
bagian-bagiannya dibersihkan dengan minyak baru, dan jika perlu dilakukan pembongkaran kumparan.

Jika tingkat keasaman ≥ 4 , maka bekas-bekas endapan lumpur pada inti dan Kumparan tidak mungkin dibuang, lebih praktis mengadakan penggantian secara keseluruhan.

8.5 DISTRIBUSI TEGANGAN PADA BELITAN

8.5.1 PERKIRAAN DISTRIBUSI TEGANGAN AWAL

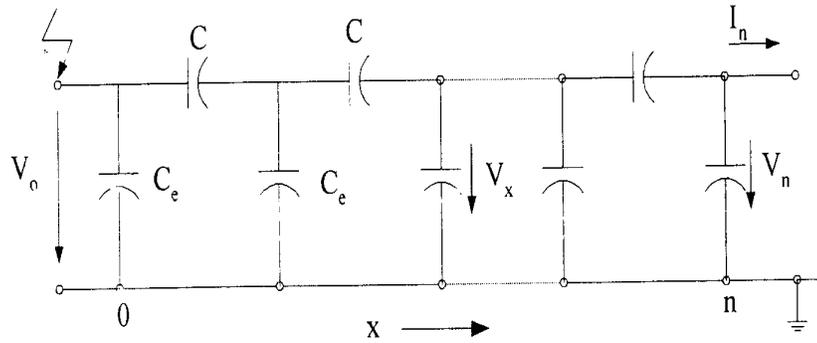
Panjang konduktor yang membentuk kumparan tegangan tinggi suatu trafo daya dapat mencapai beberapa ribu meter. Karena kumparan dibelitkan pada inti besi yang dibumikan, maka ada kapasitansi antara kumparan dengan tanah (C_e), ada induktansi sendiri (L) dan ada induktansi bersama antara satu belitan dengan belitan, didekatnya (M). Di samping itu, ada kapasitansi yang dibentuk satu belitan dengan belitan lain (C). Dengan demikian rangkaian ekuivalen satu elemen pendek kumparan adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 8.9.



Gambar 8.9 Rangkaian ekuivalen satu elemen pendek kumparan

Jika terminal trafo dihubungkan, secara tiba-tiba ke suatu sumber tegangan, maka akan timbul gelombang berjalan seperti halnya pada transmisi panjang. Jika suatu tegangan impuls diberikan pada terminal-terminal trafo, maka akan terjadi osilasi tegangan yang dapat menimbulkan tekanan elektrik yang tinggi pada lokasi tertentu dalam kumparan.

Tekanan elektrik yang tinggi tidak diizinkan terjadi pada isolasi suatu kumparan. Oleh karena itu, perlu diadakan penelitian yang intensif untuk menentukan distribusi tegangan di sepanjang konduktor yang membentuk suatu kumparan trafo. Analisa gelombang berjalan pada rangkaian seperti Gambar 10.9 sangat rumit. Oleh karena itu, untuk menghitung distribusi tegangan tersebut rangkaian ekuivalen disederhanakan menjadi seperti Gambar 10.10, di mana induktansi sendiri dan induktansi bersama diabaikan.



Gambar 8.10 Rangkaian ekivalen kumparan trafo

Rangkaian ini sangat , disederhanakan namun asumsi ini masih dapat digunakan. Sesaat setelah suatu tegangan langkah impuls diberikan, hanya kapasitansi jaringan yang diasumsikan berperan. Jika terminal dihubungkan ke sumber tegangan langkah V_0 sedang titik netral dibumikan ($V_n = 0$) maka distribusi tegangan sepanjang belitan dapat diturunkan dengan prinsip perhitungan tegangan pada isolator rantai yang telah dijelaskan pada sub-bab terdahulu, dan hasilnya adalah sebagai berikut :

$$V_x = V_0 \frac{\sin (n-x) \alpha}{\sinh n \alpha} \quad 8.4$$

Jika titik netral terisolasi (tidak dibumikan, 1.0) distribusi tegangan sepanjang belitan

$$V_x = V_0 \frac{\cos (n-x) \alpha}{\cosh n \alpha} \quad 8.5$$

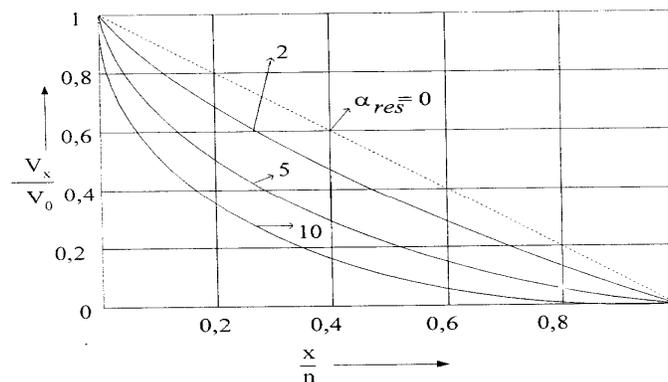
di mana:

$$= \sqrt{C_e / C} \quad 8.6$$

Misalkan resultas kapasitansi ke tanah $C_{e-res} = nC_e$ dan resultan kapasitansi bersama $C_{res} = C/n$. dengan pemisalan ini diperoleh

$$= \sqrt{\frac{C_{e.res}}{C_{res}}} \quad 8.7$$

Umumnya nilai $a = 0,5 - 10$.



Gambar 8.11 Distribusi awal dengan titik netral ditanahkan

Secara teori, distribusi tegangan pada saat $t = 0$ (sering disebut distribusi awal) untuk berbagai harga α_{res} dan titik netral dibumikan adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 8.11. Menurut gambar ini, pada saat $t = 0$, distribusi tegangan sepanjang belitan kumparan tidak merata, sebagian besar tegangan dipikul oleh beberapa elemen kumparan. Tekanan elektrik maksimum terdapat pada seksi pertama belitan dan dapat dihitung dengan pendekatan ($\sinh \alpha_{res} = \cosh \alpha_{res}$), besarnya untuk titik netral dibumikan dan untuk titik netral terisolasi adalah:

$$= \left(\frac{dV_x}{dx} \right) = \left(\frac{dV_x}{dx} \right) = \frac{V_o}{n} res \quad 8.8$$

Seandainya distribusi tegangan merata di sepanjang seksi kumparan, maka tegangan pada setiap seksi adalah:

$$V_n = \frac{V_o}{n} \quad 8.9$$

Jika persamaan 8.9 dibandingkan dengan persamaan 8.8, maka dapat disimpulkan bahwa saat $t = 0$, tekanan elektrik pada seksi pertama kumparan naik α_{res} kali dari nilai tekanan elektrik setelah mekanisme transien hilang. Jadi, nilai α_{res} sangat menentukan kenaikan tekanan elektrik pada seksi pertama kumparan. Oleh karena itu, kumparan trafo harus dirancang sedemikian hingga ratio kapasitansi ke tanal-, (C_e) dengan kapasitansi bersama (C) sekecil mungkin.

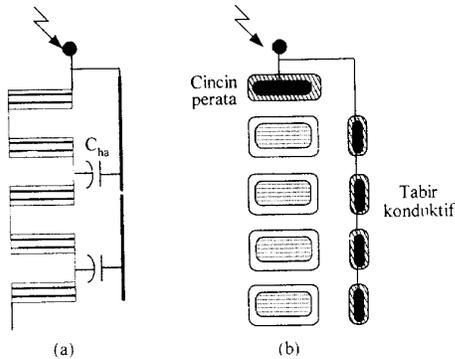
Penyimpangan distribusi tegangan awal dari distribusi tegangan akhir sangat berpengaruh terhadap tekanan tegangan impuls pada kumparan Selama berlangsungnya mekanisme transient. Meredam ossilasi dengan memperbesar tahanan kumparan tidak dilakukan karena hal itu akan memperbesar rugi-rugi tembaga trafo. Suatu trafo daya harus memiliki rugi-rugi yang kecil selama operasi normal. Satu-satunya jalan adalah menghindarkan terjadinya ossilasi yang berbahaya. Jika perbedaan distribusi tegangan awal dengan distribusi tegangan akhir semakin kecil, maka kemungkinan terjadinya ossilasi juga akan semakin kecil.

8.5.2 PEMERATAAN DISTRIB USI TEGANGAN

Telah ditunjukkan pada perhitungan di atas bahwa seksi pertama kumparan tegangan tinggi (terhitung dari terminal input) mengalami tekanan elektrik yang tinggi, melebihi dari normalnya. Oleh karena itu, isolasi seksi pertama kumparan dibuat lebih kuat. Tetapi cara seperti ini harus dilakukan dengan hati-hati, jangan sampai mengakibatkan, kapasitansi antar lilitan berkurang. Jika hal ini terjadi, maka α_{res} akan semakin besar sehingga distribusi tegangan menjadi semakin tidak merata.

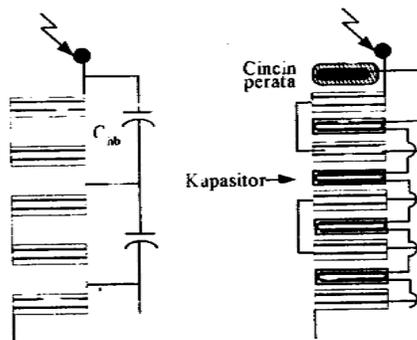
Kelebihan tekanan ellektrik dapat juga dikurangi dengan meratakan distribusi tegangan awal. Konsep pemerataan distribusi tegangan pada kumparan trafo daya analog dengan pemerataan distribusi tegangan pada isolator rantai, seperti yang telah dibicarakan pada sub bab 8.8.3. Pada isolator rantai, pemerataan distribusi tegangan dilakukan dengan menambah kapasitansi antara terminal tegangan tinggi dengan persambungan dua unit isolator. Hal yang seperti itu dapat dilakukan untuk pemerataan distribusi tegangan pada kumparan tegangan tinggi, yaitu menambah kapasitansi antara seksi kumparan dengan terminal tegangan tinggi. Konsep

penambahan kapasitansi ini ditunjukkan pada Gambar 8.12.a. Dalam prakteknya, penambahan kapasitansi ini dilakukan dengan memberi cincin perata tegangan dan memasang tabir konduktif mengelilingi seksi kumparan, yang dihubungkan dengan terminal tegangan tinggi, seperti ditunjukkan pada Gambar 8.12.b.



Gambar 8.12. Penambahan Kapasitansi Antara Seksi Kumparan dengan Terminal Tegangan Tinggi

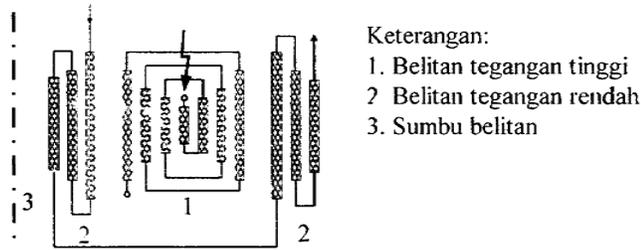
Cara kedua untuk meratakan distribusi tegangan awal adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 8.13. Dengan memparalelkan suatu kapasitor dengan kapasitansi antar belitan, maka kapasitansi total antar belitan (C_{ab}) semakin besar, sehingga C_{res} makin kecil, dan mengakibatkan distribusi tegangan pada kumparan semakin merata- Dalam hal ini, kapasitor tambahan membuat sirkulasi minyak di antara belitan terhalang.



Gambar 8.13 Pemerataan Distribusi Tegangan Dengan Memperbesar Kapasitansi Antar Belitan

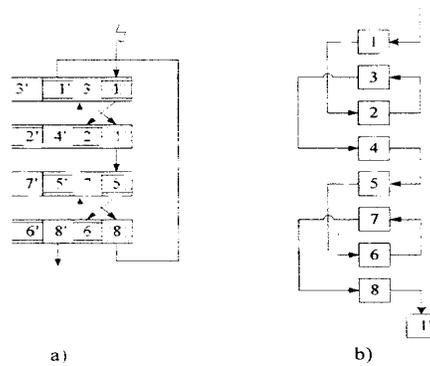
Oleh karena itu, konstruksi isolasi seperti ini digunakan untuk trafo bertegangan nominal sampai 35 kV saja.

Cara yang paling efektif untuk menambah kapasitansi antar belitan adalah dengan membuat kumparan tegangan tinggi terdiri dari beberapa kumparan silinder konsentris, di mana kumparan dihubungkan seperti ditunjukkan pada Gambar 8. 14.



Gambar 8.14. Skema Kumaran Berlapis Konsentris

Susunan kumaran yang biasa digunakan pada trafo daya bertegangan tinggi adalah susunan kumaran *interleaved* yang skemanya ditunjukkan pada Gambar 8.15.a. Aliran arus pada susunan kumaran ini ditunjukkan pada Gambar 8.15.b. Susunan ini bertujuan untuk memperbesar kapasitansi antar belitan.



Gambar 8.15. Susunan Kumaran *Interleaved*

Semakin banyak penghubung antar kumaran yang bersilang, semakin bertambah pekerjaan konstruksi, sehingga biaya pembuatan trafo semakin mahal. Suatu kumaran belitan tunggal yang dihubungkan seperti pada Gambar 8.4, memiliki $\alpha_{res} = 12$; sedang dengan susunan *interleaved* seperti pada Gambar 8.15, didapat harga $\alpha_{res} = 4$, bahkan dengan rancangan khusus didapat $\alpha_{res} = 2$. Semua metode pemerataan distribusi tegangan di atas tidak membuat distribusi tegangan benar-benar rata, tetapi dapat menurunkan tegangan lebih pada seksi kumaran dan membatasi amplitudo osilasi natural yang terjadi pada belitan trafo.

8.6 METOOE PENDINGINAN TRAFODAYA

Jika suatu trafo sedang beroperasi, maka akan timbul rugi-rugi inti dan tembaga pada trafo itu yang berubah menjadi panas. Minyak pendingin berperan menghantarkan panas yang terjadi pada inti dan kumaran trafo ke udara bebas. Ada dua bahan pendingin yang digunakan pada trafo daya, yaitu minyak mineral dan minyak sintesis. Dilihat dari sirkulasi minyak dalam trafo, maka metode pendinginan dibagi atas dua jenis:

1. Minyak bersirkulasi sendiri. Dalam hal ini, minyak digunakan sebagai media yang merendam inti dan kumparan trafo (*oil immersed*). Panas pada inti dan belitan trafo akan -menaikkan. suhu minyak, dan akibatnya minyak akan bersirkulasi secara alami. Saat minyak bersirkulasi, panas yang timbul pada inti dan kumparan dibawa ke permukaan tanki trafo.
2. Minyak bersirkulasi terpaksa (*forced oil*). Dalam hal ini, minyak di dalam trafo bersirkulasi atas bantuan sebuah pompa. Dengan cara ini diperoleh sirkulasi minyak yang lebih baik dibandingkan dengan cara di atas.

Dilihat dari metode penghantaran panas dari minyak ke udara bebas, maka pendinginan trafo dibagi atas tiga jenis, yaitu:

1. Pendinginan dengan udara alami (*air natural cooled*)
2. Pendinginan dengan udara yang dihembuskan (*air blast cooled*)
3. Pendinginan dengan air (*water cooled*)

1). Pendinginan udara alami

Dalam hal ini, panas dari permukaan tanki trafo disebarkan ke udara bebas secara alami. Pada trafo daya yang besar, luas permukaan tanki tidak cukup untuk menyebarkan panas yang dihasilkan oleh rugi-rugi inti dan tembaga. Oleh karena itu, permukaan tanki diperbesar dengan menambah radiator.



Gambar 8.16 Jenis Pendinginan Trafo

2). Pendinginan dengan hembusan udara

Dalam hal ini panas pada permukaan radiator disebarkan ke udara terbuka dengan meniupkan udara ke permukaan radiator. Tiupan udara tersebut diperoleh dari kipas. Dengan cara ini, untuk daya yang sama, ukuran trafo dapat dikurangi, sehingga biaya pembuatannya lebih murah. Trafo ini tidak boleh dibebani jika kipas udara tidak berfungsi.

3). Pendinginan dengan air

Trafo dilengkapi dengan alat penukar panas berupa pipa-pipa yang didalamnya mengalir air pendingin. Keuntungan yang diperoleh dengan metode ini akan lebih nyata jika air dapat diperoleh tanpa biaya. Kecuali pada pembangkit listrik tenaga air

metode ini tidak akan menghemat biaya jika masih diperlukan peralatan khusus untuk penyediaan air dan tempat pembuangan limbah. Trafo jenis ini tidak boleh dibebani jika pompa airnya tidak berfungsi. Dengan demikian diperoleh enam jenis pendinginan pada trafo daya, yaitu.

1. Minyak bersirkulasi sendiri-pendingin udara alami (Oil Immersed Natural Cooled/ON).
2. Minyak bersirkulasi sendiri-pendingin udara yang dihembuskan (Oil Immersed Air Blast/O13).
3. Minyak bersirkulasi sendiri-pendingin air (Oil Immersed Water Cooled/OW).
4. Minyak bersirkulasi terpaksa-pendingin udara alami (Forced Oil Natural Air Cooled/OFN).
5. Minyak bersirkulasi terpaksa-pendingin udara yang dihembuskan (Forced Oil Air Blast Cooled/OFB).
6. Minyak bersirkulasi terpaksa-pendingin air (Forced Oil Water Cooled/ OFW).

Jenis pendinginan menentukan biaya dari suatu trafo. Ada kalanya trafo memiliki dua metode pendinginan seperti ON/OFN atau ON/OB atau ON/O13 atau kadang-kadang dengan tiga sistem seperti ON/OB/OFB. Pemilihan jenis pendinginan yang digunakan tergantung kepada pembebanan. Saat trafo berbeban rendah, digunakan metode pendinginan ON. Bila beban melampaui nilai yang ditentukan, maka kipas atau pompa dihidupkan. Jika suatu trafo mempunyai lebih dari satu metode pendinginan, maka daya pengenal untuk setiap metode pendinginan biasanya dicantumkan pada papan nama trafo. Contohnya, suatu trafo dengan pendinginan ON/UB, 45/6u MVA. Hal ini berarti selama beban dibawah 45 MVA kipas tidak akan bekerja. Kipas akan bekerja secara otomatis ketika beban pada trafo melampaui 45 MVA.

Trafo dengan pendinginan jenis ON sangat menguntungkan, karena lebih sederhana, menggunakan kipas atau pompa sehingga tidak membutuhkan motor bantu. Pada unit yang kecil sampai 10 MVA penghematan biaya karena perubahan metode pendinginan dari jenis OP ke jenis pendinginan lainnya tidak begitu nyata. Tetapi pada unit yang lebih besar, perubahan jenis pendinginan dari ON ke jenis pendinginan yang lain akan menghemat biaya pembuatan dan mengurangi berat dan dimensi trafo, sehingga pengangkutannya lebih mudah dan biaya pembuatan fondasinya lebih murah.

8.7 PENGUJIAN TRAFU DAYA

Harga suatu trafo tegangan tinggi relatif mahal dibanding dengan harga komponen dalam sistem tenaga listrik. Di samping itu, trafo daya harus memiliki keandalan yang tinggi agar kontinuitas pelayanan sistem tenaga listrik terjamin. Oleh karena itu, pengujian trafo daya sebelum terpasang sesudah beroperasi mutlak dilakukan. Pengujian trafo daya dibagi atas jenis, yaitu:

1. Pengujian rutin.
2. Pengujian jenis.
3. Pengujian tambahan.

IEC telah mengeluarkan standar pengujian suatu trafo. Dalam standar ini dapat ditemukan rentang kondisi pengujian, hal-hal yang perlu diuji dan prosedur pelaksanaan. Secara umum pengujian rutin trafo meliputi hal-hal sebagai berikut :

1. Pengukuran resistansi belitan.
2. Pengukuran rasio polaritas dan hubungan fasa
3. Impedansi hubungan singkat
4. Rugi-rugi berbeban
5. Rugi beban nol dan arus beban nol.
6. Resistansi isolasi
7. Pengujian ketahanan tegangan lebih dengan induksi.
8. Pengujian ketahanan tegangan lebih dengan sumber terpisah.

Pengujian jenis dilakukan untuk rancangan baru suatu trafo atau jika dibutuhkan oleh pembeli. Pengujian jenis terdiri atas:

- a. Pengujian ketahanan tegangan impuls.
- b. Pengujian kenaikan temperatur.

Trafo harus dirancang sedemikian rupa sehingga lulus dari pengujian jenis ketahanan tegangan impuls. Kelulusan ini menunjukkan bahwa jumlah dan distribusi isolasi telah tersusun dengan baik, sehingga mampu memikul tekanan elektrik karena tegangan transien, khususnya isolasi antar belitan. Hal ini sangat penting untuk trafo yang kelas tegangannya lebih tinggi dan trafo yang kumparannya dilengkapi dengan sadapan. Adanya keharusan untuk mengadakan pengujian tegangan impuls tidak berpengaruh kepada penambahan bahan isolasi, tetapi mengharuskan penataan susunan isolasi kumparan yang mampu memikul tekanan elektrik transien. Ada kalanya diadakan juga pengujian impuls terpotong, karena setelah trafo beroperasi ada kemungkinan trafo tersebut dikenai tegangan impuls terpotong.

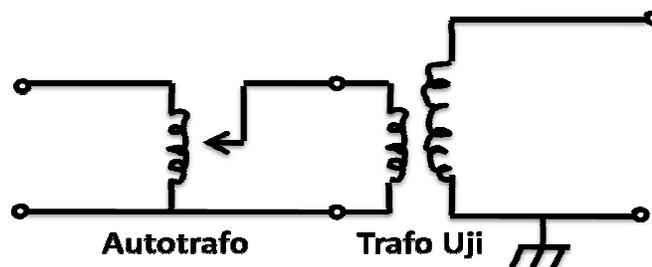
Pengujian tambahan adalah pengukuran impedansi fasa urutan nol dan hal lain yang dibutuhkan oleh pembeli. Hasil pengujian dibandingkan dengan gambaran yang telah dikemukakan pabrik. Jika perbedaan antara hasil pengukuran dengan ketetapan yang dibuat pabrik tidak lebih besar dari toleransi yang diizinkan, maka trafo dinyatakan lulus uji.

Bab 9

PEMBANGKIT TEGANGAN TINGGI BOLAK - BALIK

9.1 TRAFU UJI

Tegangan tinggi bolak-balik diperlukan antara lain untuk pengujian rugi-rugi dielektrik, pengujian korona, pengujian kekuatan dielektrik, dan pengujian ketahanan peralatan terhadap tegangan tinggi bolak-balik. Selain untuk pengujian, tegangan tinggi bolak-balik dibutuhkan juga untuk pembangkitan tegangan tinggi searah dan pembangkitan tegangan tinggi pulsa. Berikut ini akan diuraikan prinsip kerja, jenis-jenis, konstruksi, dan karakteristik pembangkit tegangan tinggi bolak-balik. Tegangan tinggi bolak-balik diperoleh dari suatu trafo yang disebut trafo uji, yaitu trafo satu fasa yang mempunyai perbandingan belitan yang jauh lebih besar dari pada trafo daya. Rangkaian pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik ditunjukkan pada gambar 3.1. belitan primer trafo ini dihubungkan ke sumber tegangan rendah bolak-balik, umumnya 220 volt/50 hz. Belitan sekundernya membangkitkan tegangan tinggi dalam ratusan kilo volt.



Gambar 9.1 Rangkaian Pembangkit Tegangan Tinggi Bolak-Balik

Besar tegangan pengujian yang diterapkan pada suatu peralatan tergantung pada jenis pengujian dan tegangan nominal peralatan. Oleh karena itu, tegangan keluaran trafo uji harus dapat bervariasi agar dapat memenuhi tegangan pengujian yang dibutuhkan. Untuk memenuhi kebutuhan ini, belitan primer trafo uji dihubungkan dengan auto trafo.

Biasanya salah satu terminal belitan tegangan tinggi dibumikan untuk meninggalkan tingkat keamanan pemakai selama pengujian. Jika trafo uji digunakan untuk membangkitkan tegangan tinggi searah dengan tegangan tinggi pulsa, maka terminal belitan sekundernya tidak dibumikan.

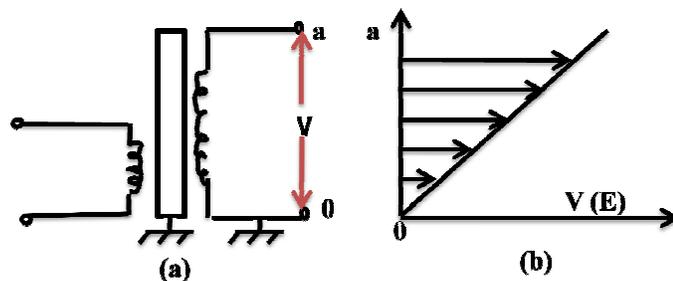
Karena beban trafo uji adalah isolator, maka arus keluarannya hanya beberapa ratus miliampere, sehingga kapasitas trafo uji hanya 5 – 10 KVA. Trafo uji tidak

dirancang untuk pemakaian yang kontinu, karena digunakan hanya saat-saat pengujian yang berlangsung dalam waktu singkat.

9.2 TERPAAN ELEKTRIK PADA ISOLASI TRAFU UJI

Bagian utama suatu trafo uji adalah isolasi, yang digunakan untuk mengisolir kumparan tegangan tinggi dengan inti, tanki, dan kumparan tegangan rendah. Harga suatu trafo uji terutama ditentukan oleh harga isolasinya. Isolasi ini dirancang agar mampu memikul tegangan maksimum yang dibangkitkan.

Saat trafo uji bekerja, terjadi terpaan elektrik pada isolasinya. Pada gambar 9.2 ditunjukkan besar terpaan elektrik pada isolasi trafo uji yang salah satu terminal sekundernya dibumikan.

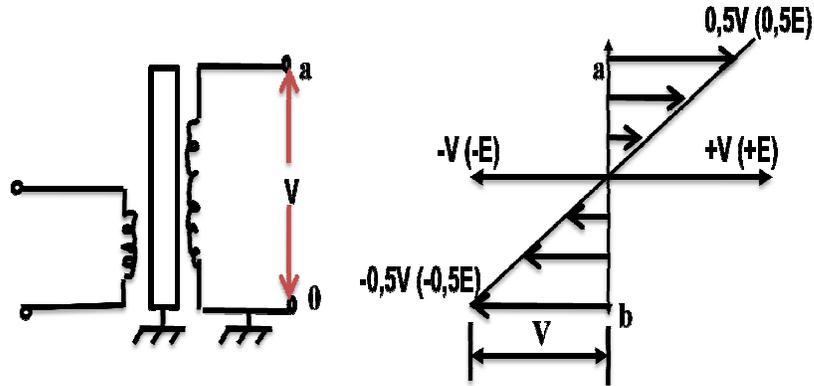


Gambar 9.2. Terpaan Elektrik Pada Isolasi Trafo Uji Satu Terminal Dibumikan

Tebal isolasi yang digunakan pada trafo uji sebanding dengan terpaan elektrik yang dipikul isolasi tersebut. Jika terpaan elektrik yang dipikul suatu isolasi semakin besar, maka isolasi semakin tebal sehingga volumenya isolasi semakin banyak. Oleh karena itu, terpaan elektrik pada isolasi trafo uji harus diusahakan sekecil mungkin agar isolasi yang digunakan juga sedikit mungkin. Konstruksi lilitan dan isolasinya harus dirancang sedemikian rupa sehingga dihasilkan terpaan elektrik cukup merata.

Terpaan elektrik pada suatu isolasi sebanding dengan tegangan yang dipikulnya. Sedangkan tegangan yang dipikul isolasi adalah beda tegangan kumparan dengan inti trafo. Distribusi tegangan disepanjang titik pada kumparan trafo uji adalah seperti pada gambar 3.2.b. oleh karena terpaan elektrik sebanding dengan tegangan, maka distribusi terpaan elektrik pada isolasi sama bentuknya dengan distribusi tegangan tersebut. Misalnya isolasi yang mengisolir terminal a dengan inti adalah t_1 . jika tegangan keluaran trafo uji adalah V , maka isolasi ini akan memikul tegangan sebesar V . tegangan ini dimisalkan menimbulkan terpaan elektrik pada isolasi t_1 sebesar E . selanjutnya ditinjau isolasi t_2 , yaitu isolasi yang mengisolir titik tengah kumparan dengan inti. Isolasi ini memikul tegangan $0,5$ Volt, sehingga terpaan elektrik pada isolasi t_2 adalah $0,5 E$. dengan demikian tebal isolasi t_2 seyogianya dapat dibuat setengah dari tebal isolasi t_1 .

Pada gambar 9.3 ditunjukkan distribusi terpaan elektrik pada isolasi trafo uji-tap tengah dibumikan. Jika tegangan keluaran trafo ini adalah V , maka tegangan diterminal a adalah $+0,5 V$ dan tegangan diterminal b adalah $-0,5 V$, sedang tap tengah bertegangan sama dengan nol



Gambar 9.3 Terpaan Elektrik Pada Isolasi Trafo Uji Tap Tengah Dibumikan

Distribusi tegangan pada kumparan sekunder dan distribusi terpaan elektrik pada isolasi diberikan pada gambar 3.3.b karena terpaan elektrik pada isolasi trafo ini setengah dari terpaan elektrik pada isolasi trafo uji satu terminal dibumikan (Gambar 3.2), maka volume isolasi trafo ini hanya setengah dari volume isolasi trafo uji-satu terminal dibumikan.

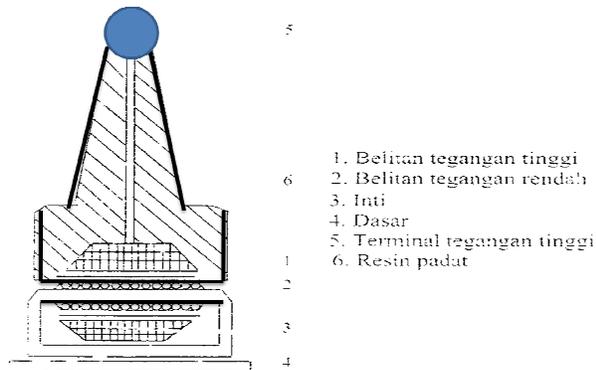
9.3 KONSTRUKSI TRAFU UJI

9.3.1 Profil Dan Isolasi Trafo Uji

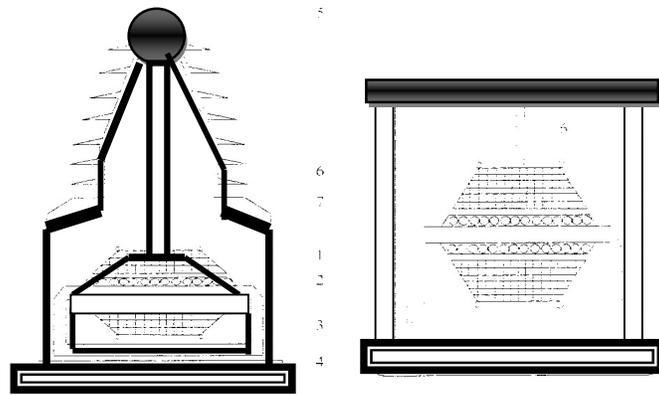
Dilihat dari jenis isolasi yang digunakan, konstruksi trafo uji terdiri atas dua jenis, yaitu trafo uji isolasi dammar (resin) dan trafo uji isolasi minyak. Konstruksi kedua jenis trafo uji inidi tunjukkan pada Gambar 9.4 dan 9.5.

Trafo jenis isolasi dammar digunakan untuk membangkitkan tegangan sampai 100 kV. Karena daya hantar panas isolasinya yang rendah, maka kapasitas trafo ini lebih rendah dari pada kapasitas trafo uji jenis minyak.

Trafo uji isolasi minyak terdiri atas dua jenis, yaitu jenis tanki (Gambar 9.5.a) dan jenis selubung isolasi (Gambar 9.5.b). wadah minyak isolasi pada trafo uji jenis tanki terbuat dari logam, sedang wadah minyak isolasi pada trafo uji jenis selubung terbuat dari isolasi, sehingga pendinginan pada trafo uji jenis tanki lebih baik dari pada trafo jenis selubung



Gambar 9.4. Trafo Uji Damar Pada



a. Jenis Tanki

b. Jenis Selubung Isolasi

Gambar 9.5 Konstruksi Trafo Uji Isolasi Minyak

- (1). Belitan tegangan tinggi, (2). Belitan tegangan rendah,
 (3). Inti Besi, (4). Dasar, (5) Terminal tegangan tinggi,
 (6) Isolasi, (7). Tanki Metal, dan (8). Dinding Penyekat

Tetapi trafo uji jenis tanki membutuhkan *bushing* sehingga untuk pembangkitan tegangan yang tinggi dibutuhkan *bushing* besar yang harganya mahal. Karena pendinginan pada trafo uji jenis selubung kurang baik, maka kapasitas trafo ini terbatas. Jika kapasitas trafo yang diinginkan besar, maka diperlukan pendinginan buatan atau perangkat penukar kalor.

Salah satu hal yang perlu dipertimbangkan dalam merancang trafo uji adalah bentuk terminal tegangan tingginya. Terminal tegangan tinggi trafo uji terbuat dari logam dan diusahakan mempunyai radius kelengkungan yang besar untuk mengurangi konsentrasi medan elektrik yang tinggi pada terminalnya. Hal ini perlu dilakukan untuk mencegah terjadinya korona pada terminal tersebut. trafo uji jenis selubung dapat membangkitkan tegangan yang lebih tinggi, karena terminal sekundernya adalah tutup selubungnya sendiri, dimana radius kelengkungannya relative lebih besar dari pada terminal trafo uji jenis tanki.

9.3.2 Belitan Trafo Uji

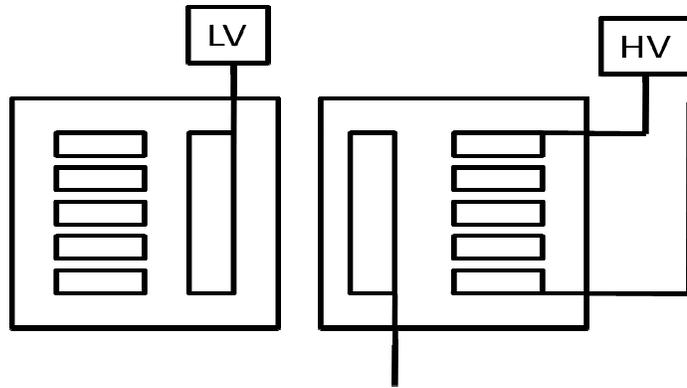
Ditinjau dari belitannya, trafo uji dibagi atas tiga jenis, yaitu :

- (a) Jenis *PolylayerPolyline Wound Disc Winding*,
- (b) Belitan kaskade, dan
- (c) Belitan Fortescue

Berikut ini akan dijelaskan susunan belitan ketiga jenis trafo uji di atas.

(a) Jenis *PolylayerPolyline Wound Disc Winding*

Susunan belitan trafo seperti ini ditunjukkan pada Gambar 3.6. kumparan primer dibelitkan pada inti. Kumparan sekunder terdiri atas beberapakumparan berbentuk lempengan kumparan sekunder dihubungkan seri.



Gambar 9.6. Trafo Uji Belitan *PolylayerPolyline Wound Disc Winding*

(b) Belitan Kaskade

Trafo jenis belitan kaskade digunakan untuk membangkitkan tegangan yang lebih tinggi dari 100 kV. Susunan kumparan trafo ini ditunjukkan pada Gambar 3.7.a.

Set kumparan pertama terdiri atas kumparan primer E_1 , kumparan kompensasi K_1 dan kumparan sekunder H_1 . Set kumparan pertama ini dibelitkan pada salah satu kaki inti trafo. Set kumparan kedua terdiri atas kumparan primer E_2 , kumparan kompensasi K_2 dan kumparan sekunder H_2 . Set kumparan kedua ini dibelitkan pada kaki inti trafo yang lain. Hubungan masing-masing kumparan tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.7.b.

Gambar 3.7 Trafo Belitan Kaskade

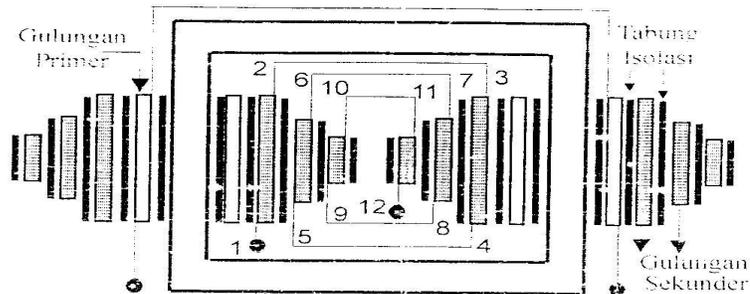
E = Kumparan Eksitasi, K = Kumparan Kompensasi,
H = Kumparan Tegangan Tinggi.

Jika kumparan primer E_1 dihubungkan ke sumber tegangan bolak-balik, maka timbul tegangan induksi di kumparan K_1 dan H_1 . Kumparan K_1 mencatu arus eksitasi ke kumparan primer E_2 , sehingga timbul tegangan induksi di kumparan Sekunder H_2 . Kumparan sekunder H_1 dan H_2 dihubungkan seri, sehingga tegangan keluaran trafo adalah jumlah tegangandi H_1 dan H_2 .

(c) Belitan Fortescue

Dalam Sub-Bab III.3 telah dijelaskan bahwa tegangan di kumparan sekunder sekunder terdistribusi tidak merata. Tegangan tertinggi dijumpai pada terminal yang tidak

dibumikan, sedang tegangan terendah terdapat pada terminal yang dibumikan. Oleh karena itu, isolasi terminal yang tidak dibumikan harus lebih tebal dari pada isolasi terminal yang tidak dibumikan. Hal ini dapat dilakukan dengan menempatkan terminal yang tidak dibumikan lebih jauh dari inti sedang bagian kumparan lainnya yang bertegangan lebih rendah ditempatkan lebih dekat ke inti. Prinsip inilah yang menjadi dasar pembuatan trafo uji belitan Fortescue. Trafo uji belitan Fortescue ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 9.8 Trafo Uji Belitan Fortescue

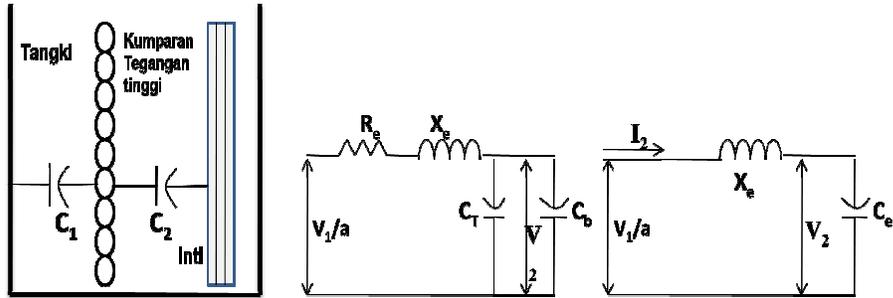
Gulungan primer ada dua, masing-masing ditempatkan pada kedua kaki intinya dan dihubungkan seri. Kumparan sekunder terdiri atas beberapa gulungan dan tiap gulungan berbeda ukuran tingginya. Gulungan yang tinggi dirancang untuk memikul tegangan rendah, sehingga dapat ditempatkan dekat ke inti.

Gulungan sekunder dibelitkan di sisi luar untuk memikul tegangan tinggi, sehingga tempatnya harus lebih jauh dari inti. Gulungan sekunder dibelitkan di sisi luar kumparan primer, dan disusun berlapis, berturut-turut mulai dari gulungan bertegangan rendah sampai gulungan bertegangan tinggi, sehingga terminal tegangan tinggi berada paling jauh dari inti.

Jumlah dan ukuran gulungan di kaki inti kiri sama dengan di kaki inti kanan. Hubungan antar gulungan adalah sebagai berikut : Gulungan pertama sekunder di kaki inti kiri dihubungkan ke gulungan pertama di kaki inti kanan, kemudian gulungan ini dihubungkan ke gulungan kedua di kaki inti kanan. Demikian seterusnya, hingga gulungan tegangan tinggi berada di luar gulungan tegangan rendah atau semakin tinggi tegangan gulungan semakin jauh dari intinya.

9. 5 RANGKAIAN EKIVALEN TRAFU UJI

Belitan tegangan tinggi dengan inti trafo merupakan suatu susunan kapasitor. Jika trafo uji adalah jenis tanki, maka tanki dengan belitan tegangan tinggi juga membentuk suatu susunan kapasitor. Pada trafo daya, kapasitansi kapasitor-kapasitor tersebut diabaikan. Tetapi pada trafo uji, kapasitansi itu diperhitungkan karena belitan tegangan tinggi trafo uji relative lebih panjang dari pada belitan tegangan tinggi trafo daya. Susunan yang membentuk kapasitor pada trafo uji ditunjukkan pada Gambar 9.9, dimana C_1 dan C_2 masing-masing adalah kapasitansi kumparan tegangan tinggi dengan inti dan tanki trafo. Kapasitansi ekuivalen dari C_1 dan C_2 dimisalkan C_T .



Gambar 9.9. Kapasitansi Dan Rangkaian Ekuivalen Trafo Uji

Jika kapasitansi benda uji yang terpasang di terminal sekunder adalah C_b dan rugi-rugi inti diabaikan, maka rangkaian ekuivalen trafo uji dilihat dari sisi sekunder adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 3.9.b. kapasitansi beban (C_b) dan kapasitansi kumparan tegangan tinggi (C_T) dapat diganti dengan kapasitansi ekuivalen C_e di mana $C_e = C_T + C_b$.

Adanya kapasitansi ini membuat arus pemuat trafo uji menjadi arus terdahulu (*leading*) dan dapat menimbulkan terjadinya resonansi. Untuk mengurangi arus terdahulu yang ditimbulkan kapasitansi ini, maka dibuat sela udara di dalam inti. Sedang resonansi dapat diredam dengan salah satu dari tiga cara berikut :

1. Mencegah harmonisa frekuensi tinggi masuk ke kumparan primer. Hal ini dilakukan dengan menggunakan filter antara sumber tenaga dan kumparan primer atau dengan menggunakan sumber tegangan sinusoidal.
2. Memasang reactor antara sumber tenaga dan kumparan primer.
3. Memasang suatu resistor diantara sumber tenaga dan kumparan primer.

Tahanan kumparan tegangan tinggi jauh lebih kecil dibandingkan dengan reaktansi bocor, maka tahanan ekuivalen kumparan (R_e) juga jauh lebih kecil dari pada reaktansi bocor ekuivalen (X_e), sehingga tahanan R_e dapat diabaikan. Dengan demikian rangkaian ekuivalen pada Gambar 9.9.c.

Menurut rangkaian 9.9.c, arus sekunder trafo uji adalah :

$$I_2 = \frac{V_1/a}{jX_e + \frac{1}{j\omega C_e}} = \frac{V_1/a}{j\omega L_e + \frac{1}{j\omega C_e}} \quad 9.1$$

Tegangan keluaran trafo uji adalah :

$$V_2 = I_2 \cdot Z_{ce} = \frac{V_1/a}{j\omega L_e + \frac{1}{j\omega C_e}} \times \frac{1}{j\omega C_e} \quad 9.2$$

Atau dapat dituliskan sebagai berikut :

$$V_2 = \frac{V_1/a}{1.\omega^2 C_e L_e} \quad 9.3$$

Terlihat bahwa tegangan keluaran trafo uji tergantung pada kapasitansi C_e , sedang C_e tergantung pada kapasitansi beban uji, sehingga tegangan keluaran trafo uji tergantung pada kapasitansi beban uji. Jika dimisalkan harga $\omega^2 C_e L_e = 0,2$, maka tegangan sekunder menjadi 1,25 tegangaffn sekunder trafo uji tidak dapat diperkirakan dengan melakukan pengukuran tegangan di sisi primer.

9. 6 TRAFO SUSUNAN KASKADE

Telah disebutkan bahwa terpaan elektrik menentukan tebal isolasi yang digunakan. Hubungan terpaan elektrik dengan tebal isolasi dapat dinyatakan dengan persamaan dibawah ini :

$$E = k_i d^{2/3}$$

di mana :

E = Terpaan elektrik (kV/cm)

k_i = Suatu Konstanta

d = Tebal isolasi (cm)

Misalkan dibutuhkan tegangan pengujian 600 kV. Kebutuhan ini dapat dipenuhi dengan satu unit trafo uji 600 kV atau 3 unit trafo uji 200 kV yang terhubung kaskade.

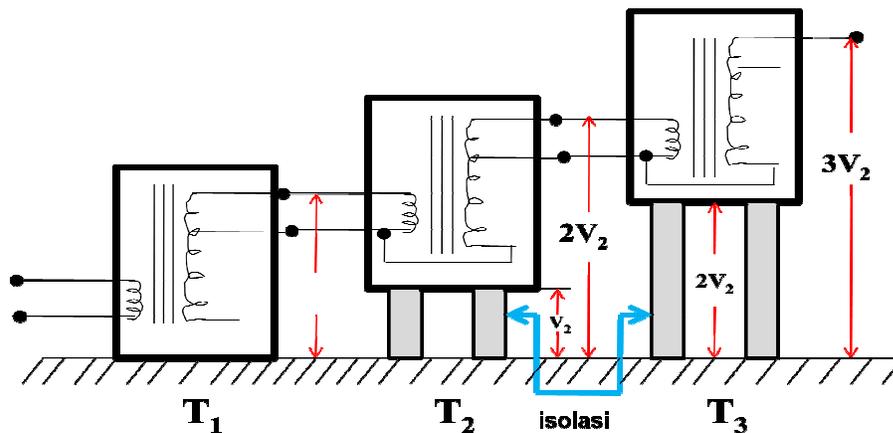
Tebal isolasi yang dibutuhkan untuk satu unit trafo uji 600 kV adalah :

$$d_1 = (600/k_i)^{3/2} = 14696,938 \times k_i^{2/3}$$

Tebal isolasi yang dibutuhkan jika kebutuhan tegangan 600 kV dipenuhi dengan 3 unit trafo 200 kV adalah :

$$d_3 = 3 \times (200/k_i)^{2/3} = 8485,2814 \times k_i^{2/3}$$

Perbandingan isolasi yang dibutuhkan adalah $d_3 = 0,577 d_1$, dengan perkataan lain 3 unit trafo 200 kV lebih murah dari pada 1 unit trafo 600 kV. Jadi untuk membangkitkan tegangan tinggi beberapa ratus kV, lebih menguntungkan jika beberapa unit trafo dihubungkan secara kaskade. Pada gambar 3.10 ditunjukkan susunan dan hubungan tiga unit trafo uji yang dihubungkan secara kaskade.



Gambar 9.10. Trafo Uji Susunan Kaskade

Dalam hubungan kaskade ini perlu diperhatikan kemampuan isolasi memikul tegangan ke tanah dan kapasitas kumparan primer masing-masing unit trafo. Misalnya ada N unit trafo masing-masing bertegangan nominal V_1/V_2 dan kumparan sekundernya masing-masing berkapasitas S_1 . Jika trafo-trafo ini dihubungkan kaskade maka kapasitas kumparan primer masing-masing trafo minimal adalah sebagai berikut :

$$S_n = N \times S_1 - (n - 1)S_1 \quad 9.5$$

Sedang isolasi trafo ke-n harus didukung dengan isolator tambahan yang mampu memikul tegangan sebesar :

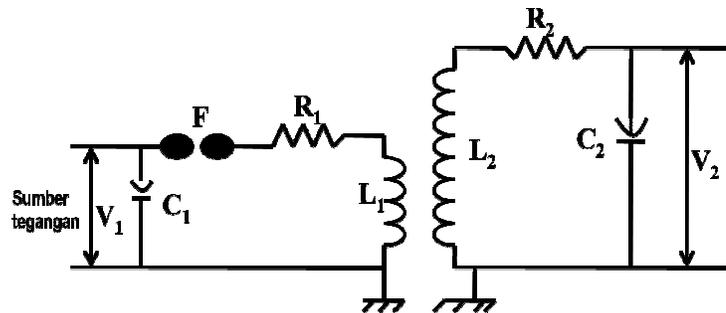
$$V_{i-n} = (n - 1) \times V_2 \quad 9.6$$

Sebagai contoh ditinjau isolasi untuk trafo uji tingkat ketiga. Beda potensial terminal tegangan tinggi trafo ini dengan tanah adalah sebesar $3V_2$. Oleh karena itu terminal tersebut harus diisolir dari tanah dengan isolasi yang mampu memikul tegangan sebesar $3V_2$. Terminal trafo telah diisolir dengan tankinya dengan isolasinya sendiri, yang dirancang hanya mampu memikul tegangan sebesar V_2 . Oleh karena itu, trafo uji harus diletakkan di atas isolator pendukung yang mampu memikul tegangan $2V_2$ sehingga terminal tegangan tinggi trafo uji terisolir dari tanah oleh dua isolasi, yaitu isolator kumparan sendiri dan isolator pendukung dimana gabungan kedua isolator ini mampu memikul tegangan $3V_2$.

9. 7 TRAF0 TESLA

Trafo Tesla adalah pembangkit tegangan tinggi bolak-balik frekuensi tinggi yang digunakan untuk melihat ada tidaknya keretakan dan kantong udara pada isolator. Rangkaian trafo ini ditunjukkan pada gambar 9.11.

Belitan primer dirancang dapat memikul tegangan sampai 10 kV, sedang belitan sekundernya dapat membangkitkan tegangan 500 – 1000 kV. Belitan primer dicatu oleh tegangan dc atau ac melalui kondensator pemuat C_1 . Jika sela F dipicu, maka terjadi arus osilasi frekuensi tinggi pada rangkaian primer. Arus primer berfrekuensi tinggi ini menginduksikan tegangan berfrekuensi tinggi di kumparan skunder.



Gambar 9.11. Trafo Tesla

Frekuensi osilasi tergantung kepada harga C_v , L_v , M , L_2 dan C_2 . Osilasi akhirnya teredam karena adanya tahanan kumparan R_1 dan R_2 .

Jika sela F dipicu, maka dengan mengabaikan tahanan kumparan, pada rangkaian primer dan sekunder berlaku persamaan sebagai berikut :

$$V_1 = \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad 9.7$$

$$0 = \frac{1}{C_2} \int_0^t i_2 dt + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \quad 9.8$$

Transformasi Laplace persamaan di atas adalah :

$$\frac{v_1}{s} = \left[L_1 s + \frac{1}{C_1 s} \right] I_2 + M s I_2 \quad 9.9$$

$$0 = [M s] I_2 + \left[L_2 s + \frac{1}{C_2 s} \right] I_2 \quad 9.10$$

Tegangan keluaran trafo Tesla adalah tegangan pada kondensator C_2 , yaitu :

$$V_2 = \frac{1}{C_2} \int_0^t i_2 dt \quad 9.11$$

Persamaan Laplace dari Persamaan 3.11 adalah :

$$V_2(s) = \frac{I_2}{C_2 s} \quad 9.12$$

Kemudian Persamaan 9.12 disubstitusi ke dalam Persamaan 9.10 dimana harga I_2 pada Persamaan yang diperoleh diambil dari persamaan 9.9. Penyelesaian persamaan akhir yang diperoleh adalah :

$$V_2 = \frac{M V_1}{\lambda L_1 L_2 C_1} \frac{1}{(\gamma_2^2 - \gamma_1^2)} [\cos \gamma_1 t - \cos \gamma_2 t] \quad 9.13$$

di mana :

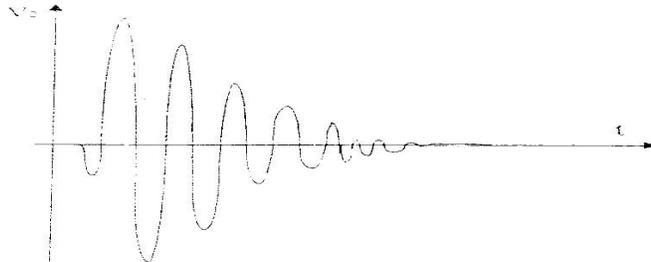
$$\lambda^2 = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} = 1 - K^2 \quad 9.14$$

$$-\gamma_{1,2} = \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2} \right)^2 - \omega_1^2 \omega_2^2 (1 - K^2)} \quad 9.15$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_1}} \quad 9.16$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad 9.17$$

Bentuk tegangan keluaran ditunjukkan seperti pada Gambar 9.12. Terlihat bahwa tegangan keluaran mempunyai harga maksimal.



Gambar 9.12. Tegangan Keluaran Trafo Tesla

Dengan mendiferensialkan persamaan 3.13 dan membuatnya sama dengan nol, harga maksimal tersebut dapat diperoleh, yaitu :

$$V_{2\max} = V_1 e \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad 9.18$$

$$e = \frac{2\sqrt{(1-\lambda)}}{\sqrt{(1-a)^2 - 4\lambda a}} \quad 9.19$$

$$a = \frac{L_2 C_2}{L_1 C_1} = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} \quad 9.20$$

Hubungan V_1 dan V_2 dapat juga diturunkan dengan konsep bahwa energi yang tersimpan di kondensator C_1 dipindahkan ke kondensator C_2 . karena adanya rugi-rugi $i^2 r$ di tahanan kumparan, maka energi yang dipindahkan itu tidak seluruhnya diterima kondensator C_2 , tetapi lebih kecil daripada energi yang tersimpan di C_1 . Jika efisiensi pemindahan energi adalah η , maka persamaan energi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{1}{2} C_2 V_2^2 = \eta \left(\frac{1}{2} C_1 V_1^2 \right) \quad 9.21$$

Sehingga tegangan keluaran trafo Tesla dapat dituliskan seperti di bawah ini :

$$V_2 = V_1 \sqrt{\eta \frac{C_1}{C_2}} \quad 9.22$$

Bab 10

PEMBANGKIT TEGANGAN TINGGI SEARAH

10.1 TUJUAN PEMBANGKITAN

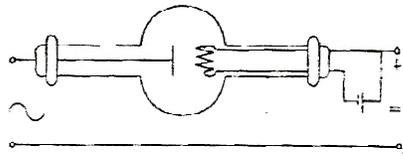
Tegangan tinggi searah dibutuhkan pada pengujian isolasi peralatan yang kapasitannya besar seperti kapasitor dan kabel. Seandainya kedua peralatan ini diuji dengan tegangan tinggi bolak-balik, pengujian akan membutuhkan arus kapasitif yang besar, padahal kapasitas arus trafo uji terbatas hanya dalam beberapa miliampere. Selain untuk pengujian peralatan, tegangan tinggi searah juga digunakan untuk penelitian fisika misalnya penelitian peluahan muatan dan penelitian sifat-sifat dielektrik. Tegangan tinggi searah digunakan juga untuk peralatan-peralatan sinar X, pengisap debu, penyemprot cat, dan pelapisan serbuk. Pembangkit tegangan tinggi pulsa juga membutuhkan tegangan tinggi searah antara 100 sampai 200 kV.

Tegangan tinggi searah dibangkitkan dengan menyearahkan tegangan tinggi bolak-balik. Rangkaian sama dengan rangkaian penyearah peralatan elektronika, tetapi semua komponennya dirancang untuk mampu memikul tegangan tinggi. Dalam bab ini akan dijelaskan hal-hal yang perlu diperhatikan dalam pembangkitan tegangan tinggi searah dan hal-hal yang membedakannya dengan penyearah tegangan rendah. Perihal prinsip kerja diode dan bentuk gelombang yang dihasilkan penyearah tidak perlu lagi dijelaskan, karena hal ini telah dianggap telah diperoleh dari kuliah elektronika daya.

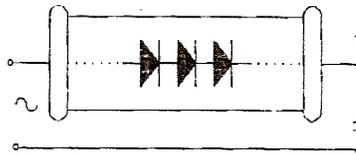
10.2 DIODA TEGANGAN TINGGI

Untuk membangkitkan tegangan tinggi searah digunakan diode tegangan tinggi jenis tabung hampa udara dan jenis semikonduktor, seperti ditunjukkan pada gambar 10.1 . Pada periode non-konduksi, di antara katode dengan film diode tabung hampa terdapat elektrik beberapa kV/cm. Oleh karena itu konstruksinya dibuat khusus agar tidak terjadi peluahan arus pada periode non-konduksi tersebut.

Diode semikonduktor tegangan tinggi terbuat dari beberapa diode tegangan rendah yang terhubung seri. Untuk menghemat ruangan, diode dirangkai dalam tabung isolasi. Untuk mencegah terjadinya peluahan muatan antara terminal yang berdekatan, maka tabung diisi dengan minyak isolasi. Bahan semikonduktor yang umum digunakan adalah Silikon, Germanium, dan Selenium. Karakteristik ketiga jenis semikonduktor ini diberikan pada Tabel 10.1.



(a) Diode Tabung Hampa



(b) Semikonduktor

Gambar 10.1 Diode Tegangan Tinggi

Tabel 10.1 Karakteristik Beberapa Jenis Semikonduktor

Bahan Semikonduktor	Selenium	Germanium	Silikon
- Tegangan balik puncak per elemen (Volt)	30 – 50	150 – 300	1000 – 2000
- Kapasitas pembebanan lapisan deplesi (A/cm ²)	0,1 – 0,5	50 – 100	50 – 150

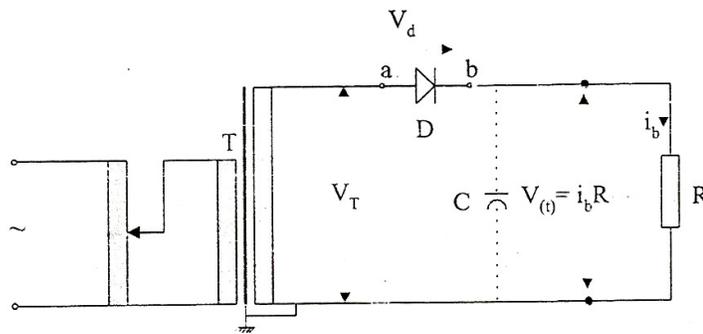
Perbandingan antara diode tabung dengan diode semikonduktor ditunjukkan pada Tabel -10.2 di bawah ini.

Tabel 10.2 : Perbandingan Diode Tabung Hampa dengan Semikonduktor

Diode Tabung Hampa	Diode Semikonduktor
- Tidak dapat segera dioperasikan karena diperlukan waktu untuk pemanasan filament	- Tidak memerlukan pemanasan
- Arus balik mendekati nol	- Arus balik relative besar
- Umur lebih lama	- Umur lebih singkat
- Harga lebih mahal	- Harga lebih murah

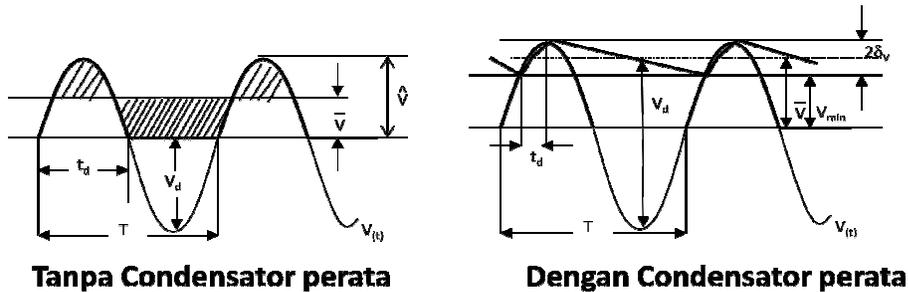
10.3 PENYEARAH SETENGAH GELOMBANG

Rangkaian penyearah setengah gelombang ditunjukkan pada Gambar 10.2. Bagian utama penyearah ini adalah trafo uji (T) dan diode tegangan tinggi (D). Jika dibutuhkan tegangan keluaran yang lebih rata maka di terminal keluaran dipasang kondensator perata (C). Tetapi penambahan kapasitor ini akan menambah biaya, karena harga kondensator tegangan tinggi cukup mahal. Benda uji disimbolkan dengan suatu resistor (R) yang nilai tahanannya dalam orde Megaohm.



Gambar 10.2 Rangkaian Penyearah Setengah Gelombang

Jika jatuh tegangan pada diode diabaikan, bentuk gelombang tegangan keluaran penyearah tanpa dan dengan kondensator perata adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.3



10.3 Tegangan Keluaran Penyearah Setengah Gelombang

Ada beberapa parameter yang perlu diperhatikan dalam penyearah ini, antara lain :

1. Waktu konduksi, yaitu lamanya diode melakukan arus dalam satu periode (t_d). Parameter ini menentukan kapasitas penyearah, karena parameter inilah yang menentukan panas yang timbul dalam diode. Pada penyearah dengan kondensator perata, waktu konduksi berlangsung lebih singkat sehingga kapasitasnya lebih besar dari pada penyearah tanpa kondensator perata.
2. Tegangan balik diode (*peak inverse voltage*), yaitu tegangan tertinggi yang dipikul diode saat diode tidak melakukan arus (V_d). Parameter ini menentukan spesifikasi tegangan diode yang digunakan. Spesifikasi tegangan diode harus sama dengan atau lebih besar dari pada V_d .
3. Faktor kerut (*ripple factor*), yaitu faktor yang menentukan ketidakteraturan tegangan keluaran, yang didefinisikan seperti persamaan di bawah ini :

$$\delta v = 1/2 (\hat{V} - V_{\min}) \quad 10.1$$

Jika faktor kerut kecil, maka tegangan keluaran semakin rata.

Tegangan keluaran penyearah dinyatakan dalam harga rata-rata atau dalam harga efektif. Untuk penyearah setengah gelombang tanpa kondensator peranta, harga rata-rata dan efektif tegangan keluaran pada keadaan tidak berbeban adalah sebagai berikut :

Harga rata-rata tegangan keluaran adalah :

$$\bar{V} = \frac{1}{\pi} \hat{V} \quad 10.2$$

Harga efektif tegangan keluaran adalah :

$$V_{\min} = \frac{1}{2} \hat{V} \quad 10.3$$

Tegangan balik yang dipikul dioda adalah :

$$V_d = \hat{V} \quad 10.4$$

Untuk penyearah setengah gelombang dengan kondensator perata, tegangan keluarannya diperoleh dengan mengacu kepada Gambar 4.3.b. Jika penyearah tanpa beban, maka harga rata-rata dan efektif tegangan keluaran adalah sama, yaitu sebesar tegangan puncak bolak-balik (ac). Bila penyearah dibebani, maka dalam setiap periode (T), tegangan keluaran searah akan turun dari harga puncak ke harga V_{\min} . Penurunan ini tergantung pada harga tahanan beban (R) dan kapasitansi kondensator perata (C). Menurut Gambar 4.3.b, harga rata-rata tegangan keluaran adalah sebagai berikut :

$$\bar{V} \approx \hat{V} - \delta v \quad 10.5$$

Persamaan di atas berlaku jika jatuh tegangan pada diode diabaikan. Tegangan balik yang dipikul diode adalah :

$$V_d = 2 \hat{V} \quad 10.6$$

Selanjutnya faktor ketidak rataan dapat dihitung dengan anggapan sebagai berikut :

$$t_d \ll T = \frac{1}{f} \quad \text{dan} \quad \delta v \ll \bar{V} \quad 10.7$$

Selama diode tidak melalukan arus (non-konduksi), kondensator perata mengosongkan muatan ke beban sehingga tegangan jondensator berkurang sebesar $2\delta v$. Jika waktu konduksi diode (t_d) sangat singkat, maka dalam satu periode, pengosongan muatan kondensator perata berlangsung selama waktu T. besarnya muatan yang dilepaskan dari kondensator perata yang mengakibatkan penurunan tegangan sebesar $2\delta v$ adalah :

$$q = 2 \delta v C \approx \int_0^T i_b dt = T \bar{I}_b \quad 10.8$$

Faktor kerut tegangan keluaran diperoleh dari persamaan di atas adalah sebagai berikut :

$$\delta v \approx \bar{I}_b \cdot \frac{1}{2fC} = k_d \cdot \bar{I}_b \quad 10.9$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa faktor kerut tegangan keluaran dapat diperkecil dengan memperbesar frekuensi tegangan sumber atau memperbesar kapasitas kondensator perata.

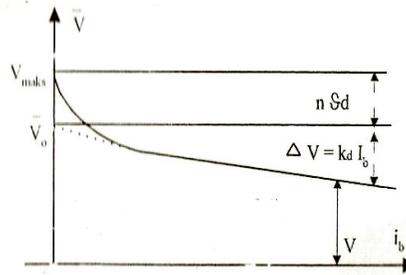
Jika persamaan 10.9 di atas disubstitusikan ke dalam Persamaan 4.5, maka diperoleh :

$$\bar{V} \approx \hat{V} - k_d \cdot \bar{I}_b \quad 4.10$$

Dalam prakteknya, pada diode semikonduktor selalu ada jatuh tegangan ketika diode tersebut melalukan arus, sehingga hubungan arus beban dengan tegangan keluaran tidak persis linier seperti Persamaan 4.10. Tetapi untuk arus yang besar, jatuh tegangan pada diode dapat dianggap konstan. Bila jatuh tegangan pada setiap unit diode dimisalkan sama dan konstan, yaitu sebesar J_d dan banyaknya diode yang dihubungkan seri adalah n , maka persamaan tegangan keluaran penyearah semikonduktor dapat ditulis sebagai berikut :

$$\bar{V} \approx \hat{V} - k_d \cdot \bar{I}_b - n \vartheta_d \quad 10.11$$

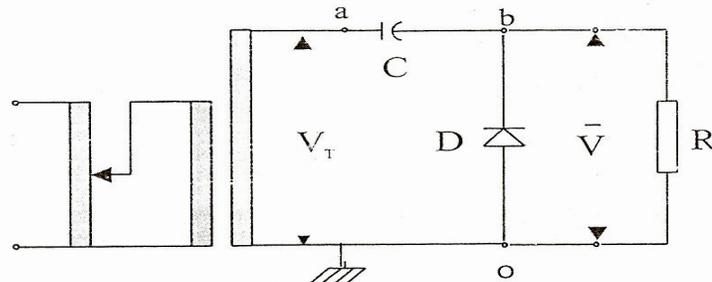
Menurut persamaan di atas, karakteristik beban penyearah semikonduktor ditunjukkan seperti pada Gambar 10.4.



Gambar 10.4. Karakteristik Beban Penyearah Semikonduktor

10.4 PENYEARAH VILLARD

Penyearah ini disebut pelipat ganda tegangan. Rangkaiannya ditunjukkan pada Gambar 10.5. Komponen utama penyearah ini adalah trafo uji (T), diode tegangan tinggi (D), dan kondensator tegangan tinggi (C).



Gambar 10.5 Rangkaian Penyearah Villard

Berikut ini akan digambarkan bentuk gelombang tegangan keluarannya dengan memisalkan penyearah tanpa beban. Saat tegangan titik o lebih positif dari pada tegangan titik a, diode D akan melakukan arus dan memuati kondensator C, sehingga tegangan kondensator naik sampai mencapai harga maksimal tegangan

sumber, V_{maks} . Selanjutnya tegangan titik a berkurang menuju nol, tetapi beda tegangan kondensator (V_{ah}) tetap karena kondensator tidak dapat mengosongkan muatannya melalui diode D. artinya, sekalipun tegangan titik a terus berubah, beda tegangan titik a-b akan tetap dipertahankan sebesar V_{maks} . Kurva tegangan masukan dan keluaran penyearah ini ditunjukkan pada Gambar 10.6. Tegangan masukan adalah V_{oa} , sedang tegangan keluaran adalah V_{ob} . Jika penyearah berbeban, maka kondensator akan mengosongkan muatannya melalui beban, sehingga tegangan kondensator berkurang. Pengurangan tegangan ini tergantung pada besarnya tahanan beban.

Gambar 10.6 Tegangan masukan dan keluaran penyearah Villard

Terlihat bahwa tegangan searah yang dihasilkan tidak rata, tetapi bervariasi dari harga nol sampai $2 V_{maks}$. Pada keadaan tidak berbeban, harga rata-rata tegangan keluaran adalah :

$$\bar{V} = V_{maks} \quad 10.12$$

Tegangan yang dipikul diode adalah V_{ob} , tegangan ini juga bervariasi dan tertinggi adalah :

$$V_d = \hat{V}_{ab} = 2 V_{maks} \quad 10.13$$

10.5 PENYEARAH GREINACHER

Penyearah ini juga merupakan pelipat ganda tegangan, hanya tegangan keluarannya lebih rata dari pada tegangan keluaran penyearah Villard. Rangkaiannya ditunjukkan pada Gambar 10.7. Komponen utama penyearah ini adalah trafo uji (T), dua diode tegangan tinggi (D_1 dan D_2), dan kondensator tegangan tinggi (C_1 dan C_2). Untuk menjelaskan prinsip kerja penyearah ini, rangkaian dibagi menjadi dua blok. Blok I, yaitu merupakan rangkaian penyearah Villard. Tegangan keluaran Blok I, yaitu tegangan di titik b merupakan masukan ke rangkaian Blok II.

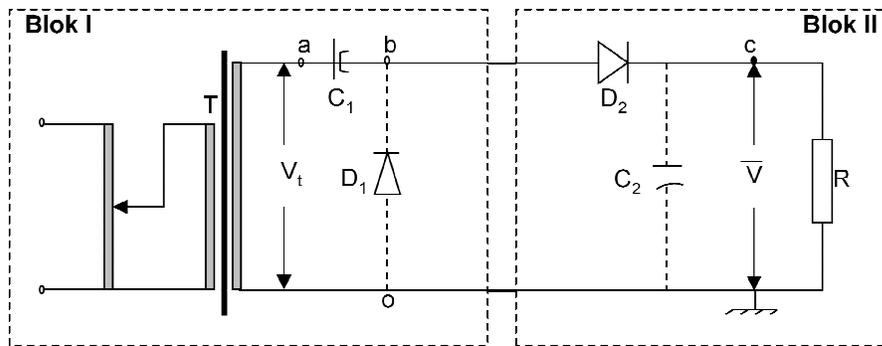
Bentuk tegangan keluaran rangkaian Villard adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.6, dimana terlihat bahwa tegangan di titik b bervariasi dari nol sampai $2V_{maks}$. Saat tegangan di titik b naik dari nol mencapai hingga $2V_{maks}$, diode D_2 melakukan arus mengisi kondensator C_2 , sehingga tegangan kondensator C_2 (tegangan titik c) naik mengikuti tegangan titik b, sampai tegangan kondensator C_2 mencapai $2V_{maks}$. Setelah tegangan titik b mencapai puncaknya, tegangan di titik b menurun menuju nol, tetapi kondensator C_2 tidak dapat melepaskan muatannya ke

titik b karena ditahan diode D_2 , sehingga tegangan kondensator C_2 tetap sebesar $2V_{maks}$. Jika penyearah berbeban, kondensator C_2 akan membuang muatannya ke beban sehingga tegangannya turun sedikit di bawah $2V_{maks}$. Penurunan tegangan ini tergantung pada besarnya tahanan beban. Bentuk gelombang tegangan keluaran penyearah ini diberikan pada Gambar 10.8.

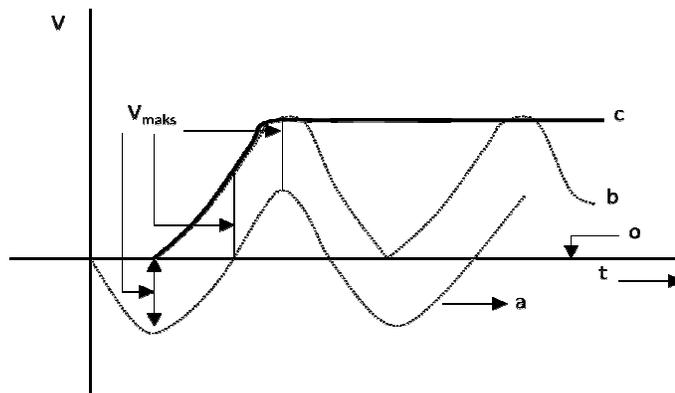
Pada kondisi tanpa beban, tegangan keluaran penyearah ini adalah beda tegangan titik o dengan titik c, yaitu :

$$V_{oc} = 2V_{maks} \quad 10.14$$

Tegangan yang dipikul diode D_1 adalah beda tegangan antara titik o dengan b. Tegangan ini bervariasi dari nol sampai tegangan tertinggi $2V_{maks}$. Tegangan yang dipikul diode D_2 adalah beda tegangan antara titik 0 dengan c. pada keadaan tidak berbeban, tegangan yang dipikul diode D_2 ini konstan sebesar $2V_{maks}$ dan berkurang sedikit jika penyearah dalam kondisi berbeban.



Gambar 10.7. Rangkaian Penyearah Greinacher



Gambar 10.8. Keluaran Penyearah Greinacher

Bab 11

PEMBANGKIT TEGANGAN TINGGI IMPULS

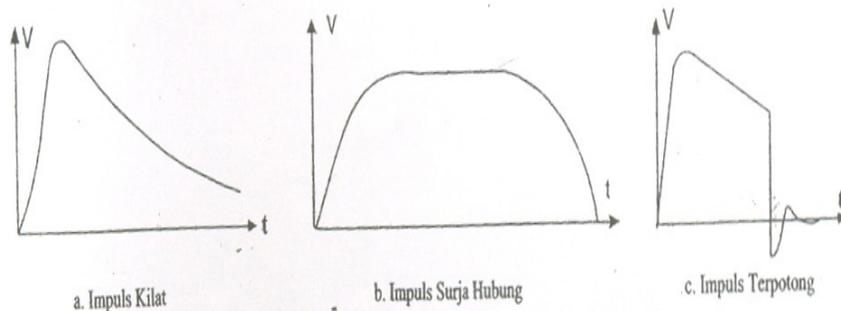
11.1 KEGUNAAN TEGANGAN TINGGI IMPULS

Adakalanya suatu sistem mengalami tegangan lebih karena adanya operasi hubung-buka (*switching operation*) atau karena sambaran petir pada komponen sistem. Oleh karena itu peralatan sistem harus dirancang mampu memikul kedua tegangan lebih tersebut. Untuk meyakinkan bahwa peralatan sistem mampu memikul kedua tegangan lebih tersebut, maka peralatan perlu diuji dengan tegangan tinggi impuls yang bentuk gelombangnya menyerupai bentuk gelombang tegangan lebih surja yang mungkin terjadi pada sistem. Selain untuk pengujian peralatan, tegangan tinggi impuls dibutuhkan juga untuk penyelidikan mekanisme tembus listrik bahan dielektrik.

Alat pembangkit tegangan tinggi impuls antara lain adalah: Generator impuls RLC, Generator impuls RC, dan Generator Marx. Prinsip kerja ketiga jenis generator tersebut akan diuraikan dalam bab ini.

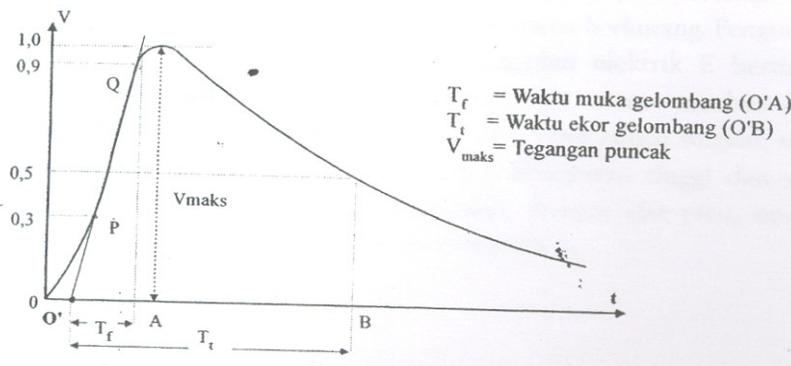
11.2 BENTUK TEGANGAN IMPULS STANDAR

Ada tiga bentuk tegangan impuls yang mungkin dialami sistem tenaga listrik, yaitu: tegangan impuls petir, tegangan impuls surja hubung, dan tegangan impuls terpotong. Bentuk ketiga jenis tegangan impuls di atas diberikan pada Gambar 11.1



Gambar 11.1 Jenis Tegangan impuls

Penelitian menunjukkan bahwa waktu untuk mencapai puncak gelombang dan waktu penurunan tegangan impuls petir sangat bervariasi sehingga untuk pengujian perlu dibuat standar tegangan impuls, yakni seperti diberikan pada gambar 11.2



Gambar 5.2 tegangan Impuls Petir Standar

Untuk tegangan impuls surja hubung, titik acuan waktu adalah titik nol waktu. Sedang untuk tegangan impuls surja petir ditentukan sebagai berikut:

1. Tentukan titik P pada muka gelombang di mana tegangan sama dengan 0,3 kali tegangan puncak, dan titik Q pada muka gelombang di mana tegangan sama dengan 0,9 kali tegangan puncak.
2. Tarik garis menghubungkan titik P dengan Q hingga memotong sumbu waktu. Titik potong garis penghubung ini dengan sumbu waktu adalah titik acuan waktu (O).

Suatu tegangan impuls dinyatakan dengan besar tegangan puncaknya, waktu muka (T_f) dan waktu ekor (T_t). Beberapa negara telah membakukan waktu muka dan waktu ekor. Menurut IEC waktu muka dan waktu ekor tegangan impuls adalah sebagai berikut

Tegangan impuls petir : $T_f \times T_t = 1,2 \times 50 \mu s$

Tegangan impuls surja hubung : $T_f \times T_t = 250 \times 2500 \mu s$

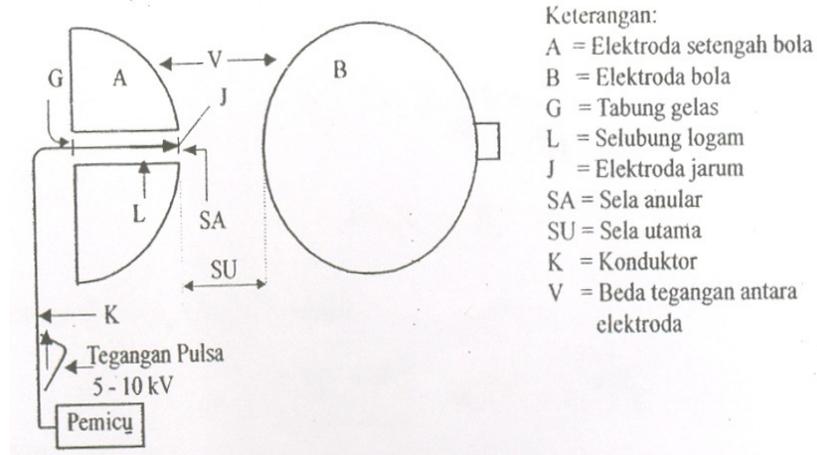
Dalam prakteknya, tegangan impuls petir yang dibangkitkan generator, beresilasi pada puncaknya. Kelebihan tegangan puncak karena osilasi ini dapat ditolerir hingga 0,05 kali tegangan puncak. Waktu muka dan waktu ekor juga tidak selalu tepat seperti yang diinginkan. Toleransi terhadap kedua waktu ini adalah sebagai berikut:

Tegangan impuls petir : $T_f \times T_t = (1,2 \pm 30 \%) \times (50 \pm 20 \%) \mu s$

Tegangan impuls surja hubung : $T_f \times T_t = (250 \pm 20 \%) \times (2500 \pm 60 \%) \mu s$

11.3 SELA PICU

Untuk pembangkitan tegangan tinggi impuls diperlukan suatu alat yang disebut sela picu. Alat ini terdiri atas dua elektroda, yaitu elektroda tegangan tinggi berbentuk bola dan elektroda berbentuk setengah bola, seperti ditunjukkan pada Gambar 11.3.



Gambar 11.3 Sela Picu

Elektroda setengah bola mempunyai lubang silinder yang (di dalamnya dimasukkan satu tabung gelas yang diselubungi logam. Di dalam tabung gelas terdapat satu jarum logam yang dihubungkan dengan alat picu (*triggering device*). Jarum logam dengan elektroda tanah mempunyai sela anular yang jaraknya kurang-lebih 1 mm.

Mula-mula kedua elektroda diberi tegangan V , akibatnya timbul medan elektrik E di antara kedua elektroda. Jarak antara kedua elektroda diatur sehingga kuat medan elektrik E mendekati kekuatan dielektrik udara. Apabila alat picu dioperasikan, maka ia akan menghasilkan satu tegangan pulsa (5 - 10 kV) yang diteruskan ke jarum logam. Akibatnya terjadi percikan di sela anular yang mengakibatkan jarak konduktif sela utama berkurang. Pengurangan jarak konduktif sela utama membuat kuat medan elektrik E bertambah melebihi kekuatan dielektrik udara, sehingga sela utama tembus listrik.

Kedua elektroda terhubung singkat dalam waktu yang sangat singkat, seperti layaknya suatu saktar yang menutup dengan kecepatan tinggi dan segera membuka dengan kecepatan tinggi pula. Jadi, dengan alat picu, operator dapat mengendalikan tembus listrik pada elektroda.

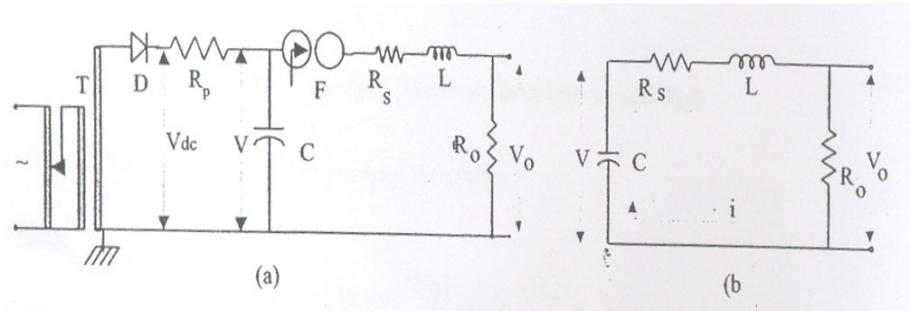
11.4 GENERATOR IMPULS RLC

11.4.1 Prinsip Kerja Generator Impuls RLC

Rangkaian generator ini ditunjukkan pada Gambar 11.4.a. Generator ini membutuhkan sumber tegangan tinggi dc yang tegangan keluarannya dapat diatur dan dilengkapi dengan sela picu F.

Sumber tegangan tinggi dc, melalui resistor R_p mengisi kondensator p pemuat C. Misalkan tegangan kondensator pemuat adalah V . Jika sela picu dioperasikan, maka sela elektroda F terhubung singkat dalam waktu yang singkat. Melalui sela picu, muatan kondensator C dilepaskan ke rangkaian R_s , L, dan R_s . Tahanan resistor R_p dibuat besar, untuk menghambat muatan yang datang dari sumber tegangan tinggi dc selama proses pelepasan berlangsung. Karena pelepasan muatan berlangsung

dalam waktu yang sangat singkat dan tahanan resistor R_p dibuat besar, maka muatan yang datang dari sumber tegangan dc dapat dianggap tidak ada. Oleh karena itu, selama proses pelepasan muatan, tidak ada muatan yang sempat mengisi kondensator pemuat C. Artinya, hanya muatan kondensator pemuat C yang dilepaskan ke rangkaian R_s , L, dan R_o . Dengan demikian, rangkaian ekivalen generator setelah sela picu bekerja dapat dibuat seperti Gambar 11.4.b.



Gambar 11.4. Rangkaian Generator Impuls RLC

Persamaan arus pada rangkaian ini adalah:

$$V = \frac{1}{C} \int i \, dt + (R_o + R_s)i + L \frac{di}{dt} \quad 11.1$$

Tegangan kondensator pemuat (V) adalah konstan, sehingga derivasi persamaan 11.1 terhadap waktu adalah sebagai berikut:

$$0 = \frac{1}{C} i + (R_o + R_s) \frac{di}{dt} + L \frac{d^2i}{dt^2} \quad 11.2$$

Atau

$$0 = \frac{1}{C} i + R \frac{di}{dt} + L \frac{d^2i}{dt^2} \quad 11.3$$

Dimana

$$R = R_o + R_s \quad 11.4$$

Penyelesaian Persamaan 11.3 adalah :

$$i = \frac{V(\alpha_2 + \alpha_1)}{R(\alpha_2 - \alpha_1)} (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) \quad 11.5$$

Dimana

$$\alpha_1 = \frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad 11.6$$

$$\alpha_2 = \frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad 11.7$$

Harga R,L, dan C dapat diatur sedemikian rupa agar harga dibawah tanda akar positif, sehingga α_1 dan α_2 menjadi bilangan nyata dan positif. Hal ini dapat dipenuhi jika :

$$\left(\frac{R}{2L}\right) > \sqrt{\frac{1}{C}} \quad 11.8$$

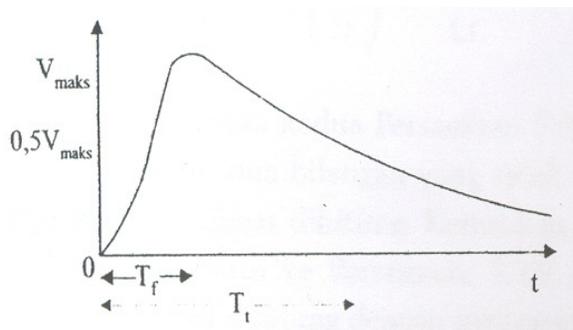
Tegangan keluaran generator adalah tegangan pada resistor R_o , yaitu :

$$V_o = i R_o \quad 11.9$$

Substitusi Persamaan 5.5 ke dalam Persamaan 11.9 diperoleh :

$$V = \frac{VR_o(\alpha_2 + \alpha_1)}{R(\alpha_2 - \alpha_1)} (\epsilon^{-\alpha_1 t} - \epsilon^{-\alpha_2 t}) \quad 11.10$$

Kurva Persamaan 11.10 adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 11.5



Gambar 11.5 Kurva tegangan Keluaran Generator Impuls RLC

Kurva Persamaan 5.10 dapat disederhanakan menjadi :

Dimana :

$$V_o = K(\epsilon^{-\alpha_1 t} - \epsilon^{-\alpha_2 t}) \quad 11.11$$

$$K = \frac{VR_o(\alpha_2 + \alpha_1)}{R(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad 11.12$$

11.4.2 HARGA MAKSIMAL DAN EFISIEN TEGANGAN

Harga maksimal Persamaan 11.10 diperoleh dengan membuat turunan pertamanya sama dengan nol [$dV/dt = 0$]. Dari derivasi ini diperoleh waktu dimana tegangan mencapai nilai maksimal, yaitu :

$$T_f = \frac{-1}{\alpha_2 - \alpha_1} \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad 11.13$$

Harga T_f diatas disubstitusi ke Persamaan 11.10, maka diperoleh tegangan maksimal :

$$V_{\text{maks}} = \frac{V R_o (\alpha_2 + \alpha_1)}{R(\alpha_2 - \alpha_1)} \left(\frac{\alpha_1 - \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}{\epsilon^{\alpha_1 - \alpha_2}} - \epsilon^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \right) \quad 11.14$$

Efisiensi tegangan adalah perbandingan harga maksimal tegangan keluaran dengan tegangan dc pada kondensator pemuat C. Dari Persamaan 11.14 di atas diperoleh efisiensi tegangan sebagai berikut :

$$\eta = \frac{V_{\text{maks}}}{V} = \frac{V R_o (\alpha_2 + \alpha_1)}{R(\alpha_2 - \alpha_1)} \left(\frac{\alpha_1 - \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}{\epsilon^{\alpha_1 - \alpha_2}} - \epsilon^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \right) \quad 11.15$$

11.4.3 MENENTUKAN HARGA R, L, DAN C

Dalam merencanakan suatu generator impuls terlebih dulu ditentukan spesifikasi tegangan keluarannya, yaitu: tegangan puncak (V_{maks}), waktu muka gelombang T_f , dan waktu ekor gelombang T_t . Disamping itu, ditentukan juga kapasitas generator (W) dan efisiensi tegangannya (η). Dengan diketahuinya semua spesifikasi di atas, maka besarnya komponen R,L dan C dapat ditentukan.

Kapasitas generator impuls dinyatakan sebagai energi yang dilepaskan dari kondensator pemuat, yaitu :

$$W = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} C \left(\frac{V_{\text{maks}}}{\eta} \right) \text{(Joule)} \quad 11.16$$

Dari Persamaan 11.16 di atas, kapasitansi kondensator pemuat dapat dihitung. Persamaan 11.13 menyatakan bahwa waktu muka gelombang tegangan adalah sebagai berikut :

$$T_f = \frac{-1}{\alpha_1 - \alpha_2} \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad 11.17$$

Diketahui juga bahwa saat $t = T_t$, besar tegangan menjadi setengah dari tegangan maksimal ($V = 0,5V_{\text{maks}}$). Jika harga – harga ini disubsitusi ke Persamaan 11.11, maka diperoleh :

$$\epsilon^{-\alpha_1 T_t} - \epsilon^{-\alpha_2 T_t} = \frac{1}{2} (\epsilon^{-\alpha_1 T_f} - \epsilon^{-\alpha_2 T_f}) \quad 11.18$$

Persamaan 11.13 dan 11.17 merupakan dua persamaan dengan dua bilangan yang tidak diketahui, yaitu α_1 dan α_2 . Dengan diketahui harga α_1 dan α_2 , maka harga ini disubsitusi ke Persamaan 11.6 dan 11.7

$$\alpha_1 = \frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L} \right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

$$\alpha_2 = \frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L} \right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

Jika harga C sudah diketahui, maka kedua Persamaan 11.6 dan 11.7 diatas merupakan dua persamaan dengan dua bilangan yang tidak diketahui, yaitu R dan L, sehingga harga R dan L dapat dihitung. Kemudian substitusi harga η, R, α_1 dan α_2 yang telah diketahui ke Persamaan 5.15, maka diperoleh harga Ro. Selanjutnya harga R_s dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 11.4.

Bila dilakukan secara manual, perhitungan menurut cara di atas memerlukan waktu dan sulit dilaksanakan. Oleh karena itu perhitungan harga komponen R,L dan C dapat dilakukan dengan pendekatan sebagai berikut :

Jika Persamaan 11.6 dan 11.7 dibandingkan, maka dapat dianggap α_1 dan α_2 . Dalam prakteknya, $T_i \gg T_f$. Kedua anggapan ini menghasilkan anggapan baru :

$$e^{-\alpha_1 T_i} - e^{-\alpha_2 T_i} \gg e^{-\alpha_1 T_f}$$

Sehingga Persamaan 5.17 dapat disederhanakan menjadi :

$$e^{-\alpha_1 T_i} = \frac{1}{2} (e^{-\alpha_1 T_f} - e^{-\alpha_2 T_f})$$

Misalkan $T_i = kT_f$, maka persamaan di atas menjadi :

$$e^{-\alpha_1 k T_f} = \frac{1}{2} (e^{-\alpha_1 T_f} - e^{-\alpha_2 T_f}) \quad 11.18$$

Harga T_f pada persamaan 11.13 dapat dituliskan sebagai berikut :

Dimana :

$$T_f = \frac{-1}{\alpha_1(1-\beta)} \ln \beta \quad 11.19$$

Dimana :

$$\beta = \alpha_2 / \alpha_1 \quad 11.20$$

Substitusi harga T_f pada Persamaan 11.19 ke dalam Persamaan 11.18, diperoleh :

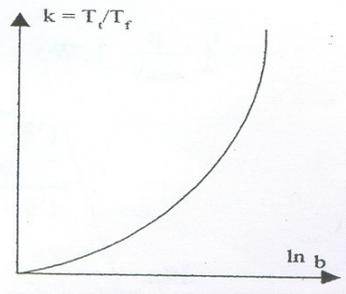
$$e^{\frac{k}{1-\beta} \ln \beta} = \frac{1}{2} \left(e^{\frac{1}{1-\beta} \ln \beta} - e^{\frac{\beta}{1-\beta} \ln \beta} \right) \quad 11.21$$

Merujuk ke Persamaan 11.21 dapat dicari harga k untuk berbagai harga $\ln \beta$, seperti contoh yang diberikan pada Tabel 11.1 dibawah ini :

Tabel 5.1
Hubungan k dan $\ln \beta$

$\ln \beta$	k
2	4
4	9
6	
7	115

Berdasarkan tabel tersebut dapat dibuat kurva yang menyatakan hubungan antara k dan $\ln \beta$ seperti ditunjukkan pada Gambar 11.6



Gambar 5.6 Kurva $\ln \beta$ vs k

Persamaan 11.6 dan 11.7 dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\alpha_1 = \gamma - \delta \quad 11.22$$

$$\alpha_2 = \gamma + \delta \quad 11.23$$

Dimana

$$\gamma = R \sqrt{2L} \quad 11.24$$

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{C}} = \sqrt{\gamma^2 - \frac{1}{C}} \quad 11.25$$

Persamaan 11.22 dan 11.23 disubsitusi ke dalam persamaan 11.20 menghasilkan :

$$\beta = \alpha_1 / \alpha_2 = \frac{\gamma - \delta}{\gamma + \delta} \quad 11.26$$

Persamaan 11.26 disubsitusikan ke dalam persamaan 11.19, maka waktu muka gelombang T_f menjadi :

$$T_f = \frac{1}{2\delta} \ln \frac{\gamma + \delta}{\gamma - \delta} \quad 11.27$$

Dari persamaan diatas diperoleh harga δ seperti dibawah ini :

$$\delta = \frac{1}{2T_f} \ln \beta \quad 11.28$$

Jika T_f dan T_t diketahui, maka dari kurva pada gambar 5.7 dapat ditentukan $\ln \beta$, dengan demikian harga β dan δ dapat dihitung. Selanjutnya harga γ dapat dihitung dari Persamaan 11.26, dimana harga γ adalah sebagai berikut :

$$\gamma = \frac{\beta + 1}{\beta - 1} \delta \quad 11.29$$

Seterusnya harga C , γ , dan δ disubsitusi ke Persamaan 11.25, maka diperoleh harga L sebesar :

$$L = \frac{1}{C(\gamma^2 - \delta^2)} \quad 11.30$$

Setelah harga L diketahui, harga R dapat dihitung dengan Persamaan 11.24 :

$$R = \frac{2\gamma}{C(\gamma^2 - \delta^2)} \quad 11.31$$

Persamaan 11.15 dapat ditulis dengan mengganti harga α_1 dan α_2 seperti yang diberikan pada Persamaan 11.22 dan 11.23

$$\eta = \frac{V_{\text{maks}}}{V} = \frac{R_o \gamma}{R \delta} \left(\epsilon^{\frac{1}{1-\beta} \ln \beta} - \epsilon^{\frac{\beta}{1-\beta} \ln \beta} \right) \quad 11.32$$

Selanjutnya Persamaan 11.32 digunakan untuk menghitung harga R_o , dan setelah harga R_o diketahui, harga R_s dapat dihitung dengan persamaan 11.4

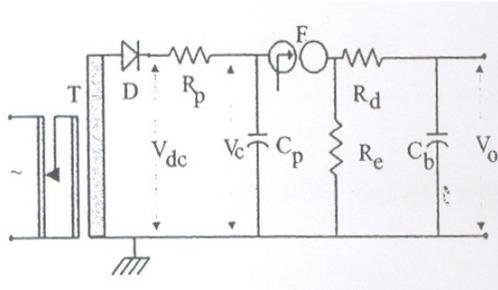
Secara ringkas tahap – tahap penentuan harga C, L, R_o , dan R_s adalah sebagai berikut

1. Tentukan $k = \frac{T_t}{T_f}$
2. Dari kurva "k-vs-ln", tentukan nilai β
3. Tentukan $\delta = \frac{1}{2T_f} \ln \beta$
4. Dari nilai ln β yang telah diketahui, tentukan β
5. Hitung $\gamma = \frac{\beta + 1}{\beta - 1} \delta$
6. Tentukan harga $C = 2W \left(\frac{\eta}{V_{\text{maks}}} \right)^2$
7. Hitung $L = \frac{1}{C(\gamma^2 - \delta^2)}$
8. Hitung $R = \frac{2\gamma}{C(\gamma^2 - \delta^2)}$
9. Hitung $R_o = \frac{\eta R \delta}{\gamma \left(\epsilon^{\frac{1}{1-\beta} \ln \beta} - \epsilon^{\frac{\beta}{1-\beta} \ln \beta} \right)}$
10. Hitung $R_s = R - R_o$

11.5 GENERATOR IMPULS RC

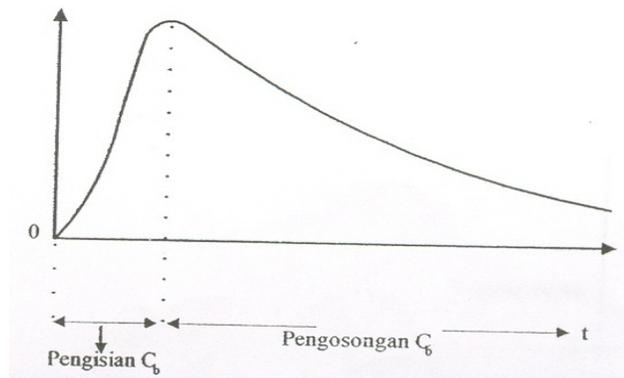
Rangkaian generator impuls RC diberikan pada Gambar 11.7. Generator ini membutuhkan sumber tegangan tinggi dc yang tegangan keluarannya dapat diatur dan dilengkapi dengan sela picu F. Tahanan resistor R_c dibuat jauh lebih besaer daripada tahanan resistor R_d .

Sumber tegangan dc, melalui resistor R_p mengisi kondensator pemuat C_p hingga tegangan kondensator dimisalkan mencapai V. Jika sela picu dioperasikan, maka sela elektroda F terhubung singkat dalam waktu yang sangat singkat. Kondensator C_p mengosongkan muatannya mengisi kondensator C_b sehingga tegangan C_b naik (tegangan keluaran V_o naik).



Gambar 11.7 Rangkaian Generator Impuls RC

Pengisian kondensator C_b adalah melalui resistor R_d yang tahanannya kecil, sehingga pengisian kondensator C_b berlangsung cepat, akibatnya kenaikan tegangan V_o juga berlangsung cepat. Kemudian kondensator C_b mengosongkan muatannya ke resistor R_e melalui resistor R_d sehingga tegangan kondensator C_b berkurang (tegangan keluaran V_o menurun). Karena tahanan R_e dibuat besar, maka proses pengosongan muatan itu berlangsung lambat, sehingga penurunan tegangan V_o juga berlangsung lambat. Dengan demikian bentuk tegangan keluaran V_o adalah seperti pada Gambar 11.8. Pada gambar terlihat, tegangan naik dengan cepat dan kemudian turun dengan lambat.



Gambar 11.8. Gelombang Tegangan Keluaran Generator Impuls RC

Persamaan tegangan keluaran generator ini diturunkan seperti halnya dengan generator impuls RLC. Setelah mengadakan beberapa pendekatan, hasilnya adalah sebagai berikut

$$V_o = \frac{V_c}{R_d C_b} \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left[e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2} \right] \quad 11.33$$

Dimana :

$$T_1 = R_e (C_p + C_b) \quad 11.34$$

$$T_2 = R_d \frac{C_p \cdot C_b}{C_p + C_b} \quad 11.35$$

Efisiensi generator dapat dihitung dengan rumus pendekatan dibawah ini :

$$\eta = \frac{C_p}{C_p + C_b} \quad 11.36$$

Hubungan T_1 dan T_2 dengan waktu muka dan ekor gelombang adalah sebagai berikut

$$T_f = k_2 T_2 \quad 11.37$$

$$T_t = k_1 T_1 \quad 11.38$$

Harga k_1 dan k_2 untuk beberapa bentuk tegangan impuls petir diberikan pada tabel 11.2 berikut :

Tabel 11.2
Harga k_1 dan k_2 untuk tegangan Impuls petir

Tf/Tt	1,25/5	1,2/50	1,2/200
k_1	1,44	0,37	0,7
k_2	1,49	2,96	3,15

Waktu muka dan ekor gelombang untuk tegangan impuls surja hubung adalah sebagai berikut :

$$T_f = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2} \quad 11.39$$

$$T_t = T_1 \ln \frac{2}{\eta} \quad 11.40$$

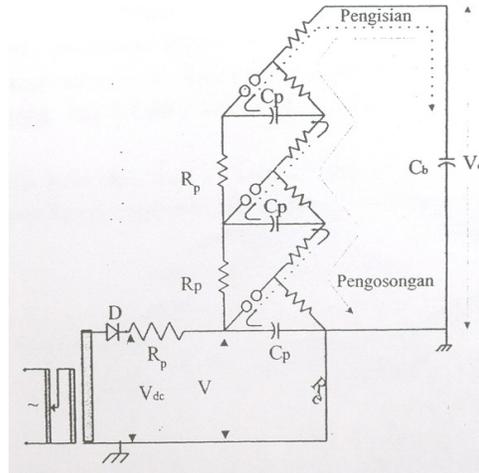
Persamaan diatas hanya berlaku jika $T_1 \geq 10T_t$

11.6 GENERATOR IMPULS RANGKAIAN MARX

Generator ini merupakan generator irnpuls RC yang disusun bertingkat untuk memperoleh tegangan keluaran yang lebih tinggi. Pada Gambar 11.9 ditunjukkan rangkaian generator impuls Marx tiga tingkat. Generator ini mempunyai tiga kondensator pemuat sehingga dinamai generator Marx tiga tingkat. Selain itu, generator ini mernpunyai tiga sela picu yang dapat dipicu dalam waktu bersamaan.

Mula-mula ketiga kondensator pemuat C_p dimuati hingga tegangan masing-masing kondensator sama dengan V . Kemudian sela F dipicu, sehingga ketiga kondensator pemuat terhubung seri dengan total tegangan sama dengan $3V$. Ketiga kondensator C_p mengosongkan muatannya, mengisi kondensator C_b melalui ketiga resistor R_d yang nilainya dibuat kecil, sehingga proses pengisian kondensator C_b berlangsung cepat, dengan demikian kenaikan tegangan kondensator C_b juga berlangsung cepat. Selanjutnya kondensator beban C_b mengosongkan muatannya ke tanah melalui resistor-resistor R_d dan R_e yang semuanya terhubung seri, sehingga tegangan kondensator berkurang. Karena tahanan R_e yang dibuat jauh lebih besar daripada R_d , maka pengosongan kondensator C_b berlangsung lambat. Dengan

demikian pengurangan tegangan kondensator C_b juga berlangsung lambat. Bentuk tegangan keluaran trafo ini sama dengan bentuk keluaran tegangan generator impuls RC, yakni seperti ditunjukkan pada Gambar 11.8.



Gambar 11.9. Rangkaian Generator Impuls Marx

Persamaan tegangan keluaran generator ini juga sama dengan persamaan tegangan keluaran generator impuls RC, yakni sebagai berikut:

$$V_o = \frac{nV_c}{R_d C_b} \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left[e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2} \right] \quad 11.41$$

Dimana:

$$T_1 \approx nR_e (C_p / n + C_b) \quad 11.42$$

Dan

$$T_2 = R_d \frac{C_p \cdot C_b}{C_p + C_b} \quad 11.43$$

Bab 12

PENGUKURAN & PENGUJIAN TEGANGAN TINGGI

12.1 PENDAHULUAN

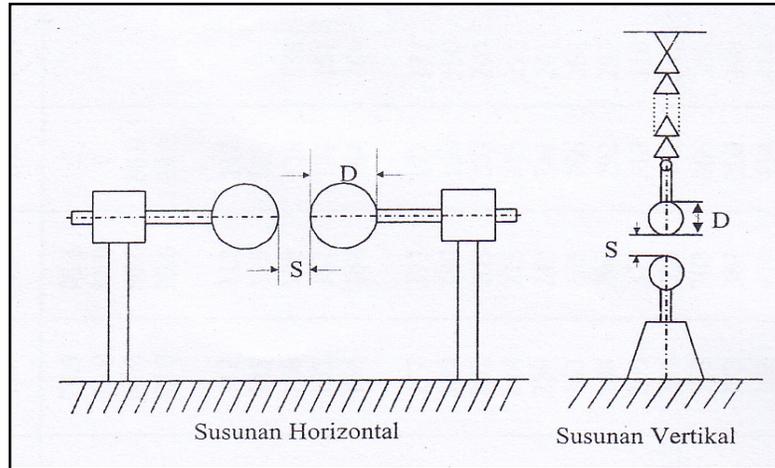
Pengukuran tegangan tinggi berbeda dengan pengukuran tegangan rendah, sehingga perlu penjelasan khusus mengenai pengukuran ini. Ada tiga jenis tegangan tinggi yang akan diukur dalam pengujian tegangan tinggi yaitu : tegangan tinggi bolak-balik, tegangan tinggi searah, dan tegangan tinggi impuls. Jenis-jenis alat ukur yang digunakan untuk pengukuran tegangan tinggi ditunjukkan pada Tabel 12.1

Tabel 12.1
Jenis alat Ukur Tegangan Tinggi

No	Nama Alat Ukur	Jenis Tegangan yang diukur
1	Sela Bola standar	Tegangan Tinggi AC Tegangan Tinggi DC Tegangan Tinggi Impuls
2	Trafo Ukur	Tegangan Tinggi AC
3	Pembagi Kapasitor	Tegangan Tinggi AC Tegangan Tinggi Impuls
4	Pembagi Tahanan	Tegangan Tinggi AC Tegangan Tinggi DC Tegangan Tinggi Impuls
5	Voltmeter Elektrostatis	Tegangan Tinggi AC Tegangan Tinggi DC
6	Voltmeter Puncak	Tegangan Tinggi AC Tegangan Tinggi DC
7	Chubb & Fortesque	Tegangan Tinggi AC

12.2 ALAT UKUR ELEKTRODA BOLA STANDAR

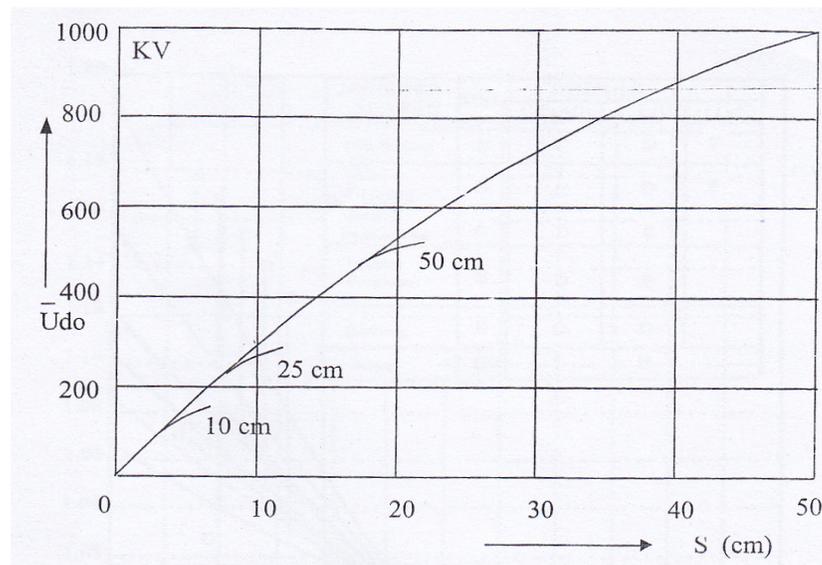
Elektroda bola standar digunakan untuk mengukur tegangan tinggi bolak-balik, tegangan tinggi searah, dan tegangan impuls. Pada Gambar 12.1 ditunjukkan elektroda bola standar yang disusun horisontal dan vertikal.



Gambar 12.1. Susunan Elektroda Bola Standar

Diameter elektroda bola terdiri atas beberapa ukuran standar, antara lain: 2 cm, 10 cm, 50 cm, bahkan ada yang berukuran sampai 200 cm. Pada keadaan udara standar, yaitu temperatur udara 20°C , tekanan udara 760 mmHg dan kelembapan mutlak 11 gr/m^3 , tegangan tembus sela bola standar untuk berbagai jarak sela bola adalah tetap seperti contoh yang diberikan Pada Tabel 12.2 dan Tabel 12.3.

Berdasarkan Tabel 12.2 dan 12.3, dapat dibuat kurva yang menyatakan hubungan tegangan tembus elektroda bola dan jarak sela untuk berbagai diameter elektroda, seperti ditunjukkan pada Gambar 12.2.



Gambar 12.2. Hubungan Tegangan Tembus dengan Jarak Sela

Misalnya, dilakukan pengukuran tegangan keluaran suatu trafo uji dengan elektroda bola berukuran $D = 10 \text{ cm}$, di mana keadaan udara pada saat pengukuran itu sama dengan keadaan udara standar. Jika jarak sela dibuat 0,5 cm maka menurut

tabel 6.2, sela bola akan tembus listrik bila diberi tegangan 16,8 W Tegangan keluaran trafo uji dinaikkan bertahap sampai terjadi tembus listrik pada sela bola. Pada saat terjadi tembus listrik pada sela bola, tegangan keluaran trafo uji sudah mencapai 16,8 kV.

Khusus untuk pengukuran tegangan tinggi impuls, harga tegangan tembus yang tercantum pada Tabel standar disebut tegangan tembus 50%. Arti pernyataan ini akan lebih jelas dengan contoh berikut : Misalnya jika suatu elektroda bola berdiameter 10 cm, berjarak 1 cm, dan berada pada keadaan udara standar, diberi N kali tegangan impuls sebesar 31,7 W, maka sela bola akan tembus sebanyak 0,5 N.

Dalam prakteknya, keadaan udara saat pengujian tidak selalu sama dengan keadaan standar. Oleh karena itu hasil pengukuran pada keadaan udara sembarang adalah sebagai berikut:

$$\hat{V} = \delta \hat{V}_s \quad 12.1$$

dimana:

\hat{V} = Tegangan sela bola pada saat pengujian (keadaan udara sembarang)

\hat{V}_s = Tegangan tembus sela bola standar

δ = Faktor koreksi udara

Faktor koreksi udara tergantung kepada suhu dan tekanan udara, besarnya adalah sebagai berikut :

$$\delta = \frac{0,386p}{273 + \theta} \quad 12.2$$

dimana:

θ = temperatur udara ($^{\circ}\text{C}$)

p = tekanan udara (mmHg)

Sebenarnya kelembapan udara juga mempengaruhi tegangan tembus sela bola. Jika hal ini diperhitungkan maka tegangan tembus elektroda bola menjadi sebagai berikut :

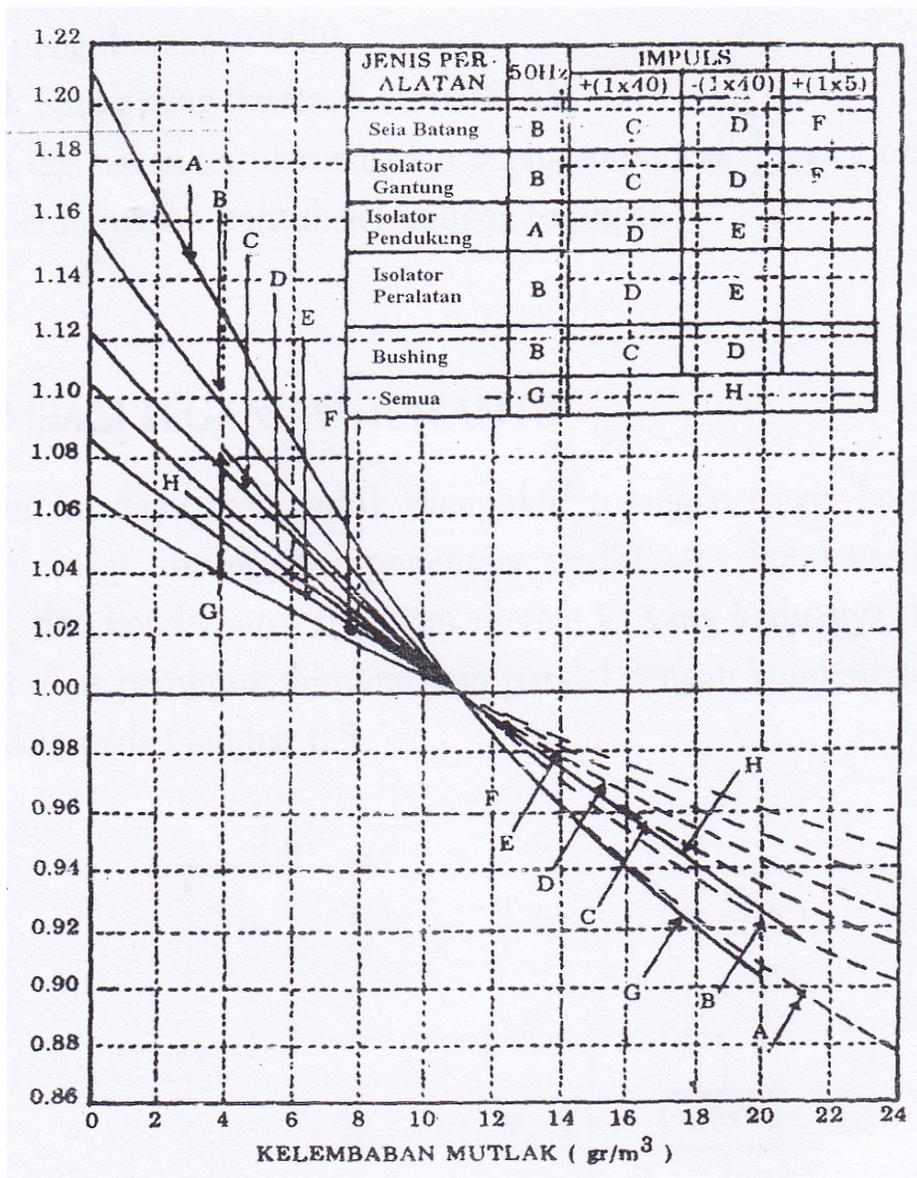
$$\hat{V} = \frac{\delta \hat{V}_s}{k_b} \quad 12.3$$

di mana k_b , adalah faktor koreksi yang tergantung pada kelembapan udara.

Kurva yang menyatakan hubungan k_b dengan kelembapan ditunjukkan pada Gambar 12.3.

Kurva tersebut diperoleh secara empiris, oleh karena itu hasilnya tidak selalu tepat, sehingga faktor koreksi ini sering tidak diperhitungkan. Bila demikian halnya, maka tegangan tembus elektroda bola pada keadaan udara sembarang dihitung menggunakan Persamaan 12.1.

Elektroda bola standar sering digunakan dalam pengukuran tegangan tinggi, karena harganya murah. Sedangkan keburukan dari alat ukur ini adalah: tidak dapat menunjukkan hasil pengukuran secara kontinu; hasil pengukurannya dipengaruhi keadaan udara, sehingga suhu, tekanan, dan kelembapan udara harus selalu diperiksa selama pengukuran; hasil pengukuran juga dipengaruhi benda-benda yang ada di sekitar elektroda.



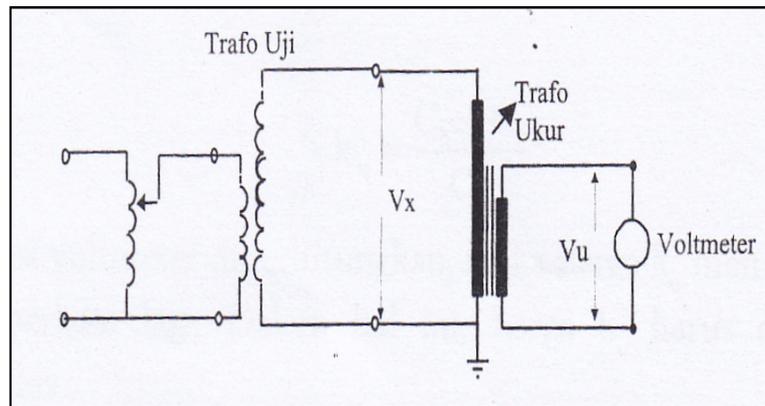
Gambar 12.3. Faktor Koreksi Kelembaban

Untuk memperoleh ketelitian yang tinggi, hal-hal di bawah ini perlu diperhatikan :

1. Jarak sela $s < D$.
2. Jarak sela $s > 5\%$ jari-jari elektroda.
3. Permukaan elektroda tidak boleh berdebu.
4. Elektroda harus licin (jangan dibersihkan dengan pembersih yang kasar).
5. Jarak benda di sekitar elektroda $> (0,25 + V/300)m$.
6. Untuk mencegah osilasi saat terjadi percikan, sebuah resistor yang tahanannya > 500 ohm diserikan dengan elektroda bola.

12.3 TRAFU UKUR TEGANGAN (POTENTIAL TRANSFORMER)

Trafo ukur adalah trafo stepdown yang dirancang khusus untuk pengukuran tegangan tinggi. Kumparan tegangan tinggi dihubungkan ke terminal yang akan diukur, sedangkan kumparan tegangan rendahnya dihubungkan dengan voltmeter atau alat ukur tegangan rendah lainnya. Rangkaian pengukuran ditunjukkan pada Gambar 12.4.



Gambar 6.4. Pengukuran dengan Trafo Ukur

Jika tegangan pada voltmeter adalah V_u , maka tegangan tinggi yang hendak diukur adalah:

$$V_s = a V_u \quad 12.4$$

Di mana a adalah faktor transformasi trafo ukur.

Sifat-sifat alat ukur ini antara lain adalah :

1. Harganya mahal.
2. Hasil pengukurannya teliti.
3. Cocok untuk pengukuran di atas 100 W
4. Dapat digunakan untuk mengukur tegangan puncak, harga efektif tegangan, dan menunjukkan bentuk gelombang tegangan.

12.4 PEMBAGI TEGANGAN KAPASITIF

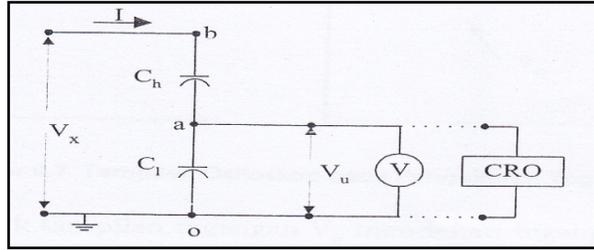
Alat ukur ini digunakan untuk mengukur tegangan tinggi bolak-balik dan tegangan tinggi impuls. Komponennya terdiri atas kondensator tegangan tinggi C_h dan kondensator tegangan rendah C , yang keduanya dihubungkan seri. Alat ukur penunjuk dihubungkan paralel dengan kondensator C , seperti ditunjukkan pada Gambar 11.5.

Kapasitansi ekuivalen dari kedua kondensator C_h dan C_p adalah

$$C_{ab} = \frac{C_b \cdot C_1}{C_b + C_1} \quad 12.5$$

Jika frekuensi tegangan adalah ω , maka impedansi ekuivalennya adalah :

$$Z_{ab} = \frac{1}{\omega \cdot C_{ab}} = \frac{C_b + C_1}{\omega \cdot C_b \cdot C_1} \quad 12.6$$



Gambar 11.5 Pembagi tegangan kapasitif

Jika impedansi voltmeter jauh lebih besar daripada impedansi kondensator C_1 , maka arus yang mengalir ke voltmeter dapat diabaikan, sehingga arus I dapat dianggap sebagai berikut:

$$I = \frac{V_s}{Z_{ab}} = V_s \frac{\omega C_b \cdot C_1}{C_b + C_1} \quad 12.7$$

Tegangan yang diukur voltmeter adalah V_{ab} , yaitu:

$$V_{ao} = V_u = I Z_{ao} \quad 12.8$$

di mana:

$$Z_{ao} = \frac{1}{\omega C_1} \quad 12.9$$

Substitusi Persamaan 12.7 dan 12.9 ke Persamaan 12.8, diperoleh :

$$V_u = \frac{V_s \cdot \omega C_b \cdot C_1}{\omega C_1 (C_b + C_1)} = \frac{V_s \cdot C_b}{C_b + C_1} \quad 12.10$$

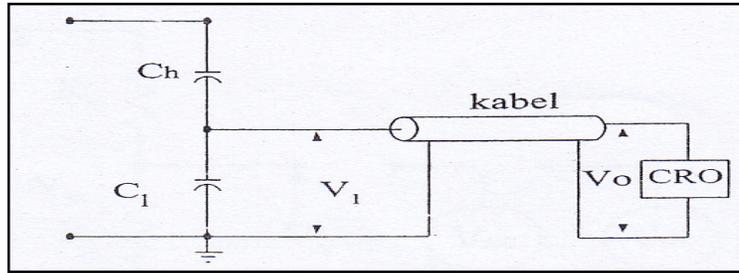
Tegangan tinggi yang diukur adalah :

$$V_s = \frac{C_b + C_1}{C_b} V_u = k_u \cdot V_u \quad 12.11$$

di mana:

$$k_u = \frac{C_b + C_1}{C_b} \quad 12.12$$

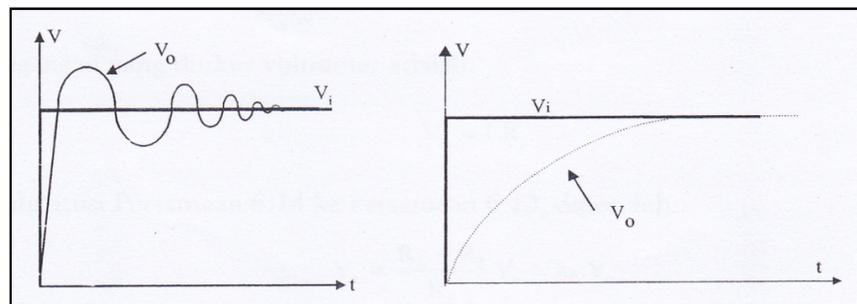
Jika impedansi voltmeter diperhitungkan, maka harga k_u menurut Persamaan 12.12 tidak berlaku lagi. Dalam hal ini, harga k_u harus dicari menurut prosedur di atas. Bila pembagi tegangan digunakan bersama osiloskop untuk mengukur tegangan tinggi impuls seperti pada Gambar 12.6, maka impedansi surja kabel penghubung akan mempengaruhi hasil pengukuran.



Gambar 12.6 Pengukuran dengan osiloskop

Kabel mempunyai kapasitansi ke tanah dan induktansi sendiri yang terdistribusi sepanjang kabel. Parameter kabel ini membuat bentuk gelombang yang ditampilkan osiloskop (V_o) berbeda dengan bentuk tegangan yang masuk ke kabel (V_i).

Misalkan tegangan yang masuk ke kabel berbentuk tegangan langkah (step). Tetapi bentuk tegangan yang ditampilkan osiloskop adalah seperti pada Gambar 12.7.a atau 12.7.b. Bentuk gelombang yang ditampilkan tergantung pada besarnya parameter kabel tersebut.

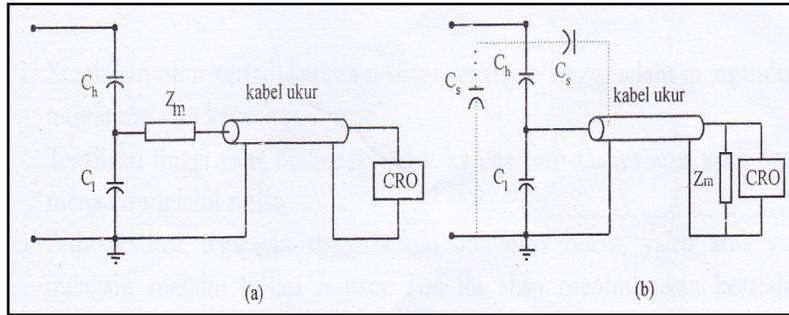


Gambar 12.7 Tampilan Osiloskop pada pengukuran tegangan impuls

Supaya bentuk tampilan tegangan V_o mendekati tegangan yang diukur V_p maka dipasang suatu impedansi matching (Z_m) yang terhubung seri atau paralel dengan kabel, seperti ditunjukkan pada Gambar 12.8.

Keburukan pembagi tegangan kapasitif ini antara lain adalah :

1. Hasil pengukuran dipengaruhi oleh kapasitansi kabel ukur.
2. Kesalahan bisa terjadi karena adanya kapasitansi antara k1 (12.8.b). Kapasitansi sasar dijumpai juga antara kondensator C_h dan selubung kabel. Hal ini berpengaruh terhadap hasil pengukuran terutama pada saat pengukuran tegangan tinggi impuls.



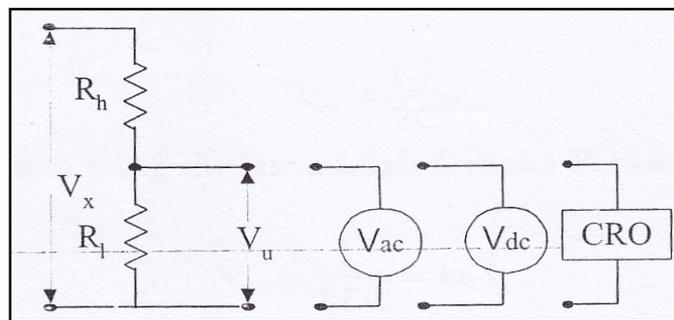
Gambar 12.8 Hubungan impedansi matching

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam penggunaan pembagi tegangan kapasitif adalah:

1. Kabel ukur harus kabel koaksial yang konduktor luarnya ditanahkan. Hal ini dimaksudkan untuk mencegah pengaruh induksi dari pembagi tegangan terhadap inti kabel.
2. Untuk mengurangi pengaruh induksi pembagi tegangan terhadap osiloskop, maka jarak osiloskop dan pembagi tegangan harus relatif jauh.
3. Sebaiknya osiloskop diberi perisai (shielding) untuk mencegah pengaruh induksi dari pembagi tegangan terhadap tampilan osiloskop.

12.5 PEMBAGI TEGANGAN RESISTIF

Pembagi tegangan ini digunakan untuk pengukuran tegangan tinggi searah, tegangan tinggi impuls, dan tegangan tinggi bolak-balik. Pembagi tegangan ini terdiri atas dua resistor yang terhubung seri, yaitu resistor tegangan tinggi R_h dan resistor tegangan rendah R_l . Resistor tegangan tinggi dibuat dari konduktor yang dibelitkan pada suatu inti yang terbuat dari bahan dielektrik. Alat ukur tegangan rendah dihubungkan paralel dengan resistor tegangan rendah R_l , seperti ditunjukkan pada Gambar 12.9.



Gambar 12.9 Pembagi tegangan resistif

Hubungan tegangan yang diukur (V_x) dengan yang ditunjukkan alat ukur (V_u) diturunkan seperti halnya pada pembagi tegangan kapasitif. Jika tahanan dalam alat

ukur jauh lebih besar daripada R_v maka arus yang mengalir pada kedua resistor R_h dan R_l adalah:

$$I = \frac{V_s}{R_b + R_c} \quad 12.13$$

Tegangan yang diukur voltmeter adalah:

$$V_u = I R_l \quad 12.14$$

Substitusi Persamaan 12.14 ke Persamaan 12.13, diperoleh:

$$I = \frac{R_b + R_c}{R_l} V_u = k_u \cdot V_u \quad 12.15$$

di mana:

$$k_u = \frac{R_b + R_c}{R_l} \quad 12.16$$

Pembagi tegangan resistor harganya murah, tetapi kurang teliti karena:

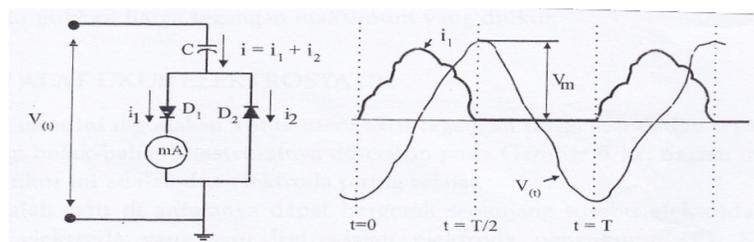
1. Kesalahan ukur terjadi karena resistor tegangan tinggi selalu mengandung induktansi dan kapasitansi parasit.
2. Tegangan tinggi yang diukur terbatas, karena terbatasnya arus yang dapat mengalir melalui resistor.
3. Pada resistor tegangan tinggi selalu ada arus bocor, yaitu arus yang mengalir melalui isolasi resistor. Hal ini akan menimbulkan kesalahan ukur.

12.6 ALAT UKUR CHUBB & FORTESCUE

Alat ukur ini digunakan untuk mengukur tegangan tinggi ac yang terdiri atas satu unit kondensator tegangan tinggi, dua diode yang dihubungkan antiparalel, dan satu, ammeter dc. Rangkaian pengukuran ditunjukkan pada Gambar 12. 10. a.

Arus yang melalui kondensator C terdahulu 90° listrik dari tegangan. Arus ini merupakan jumlah arus yang mengalir pada kedua diode. Arus yang mengalir pada ammeter adalah arus yang dilewatkan diode D_p seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12.10.b. Pada setiap periode T , arus i_1 mengalir selama setengah periode. Dalam periode $(0 - T/2)$, arus sesaat yang mengalir pada, ammeter adalah:

$$i_1 = C \frac{dv}{dt} \quad 12.17$$



Gambar 12.10 Alat Ukur Chubb & Fortesque dan kurva arus pengukuran

Jika frekuensi tegangan yang diukur adalah f , maka Persamaan 12.20 menjadi:

$$I_1 = \frac{1}{T} \int i_1 dt = \frac{1}{T} \int C \frac{dv}{dt} dt = \frac{1}{T} C \int_{V_{(t=0)}}^{V_{(t=T/2)}} dv \quad 12.18$$

Hasil integrasi persamaan 12.18 adalah sebagai berikut :

$$i_1 = \frac{1}{T} CV \Big|_{V_{t=0}}^{V_{t=T/2}} = \frac{C}{T} \{V_m - (-V_m)\} \quad 12.19$$

Dari persamaan diatas diperoleh harga maksimal tegangan tinggi yang diukur yaitu :

$$V_m = \frac{i_1 T}{2C} \quad 12.20$$

Jika frekuensi tegangan yang diukur adalah f , maka persamaan 12.20 menjadi :

$$V_m = \frac{i_1}{2fC} = k_c \cdot i_1 \quad 12.21$$

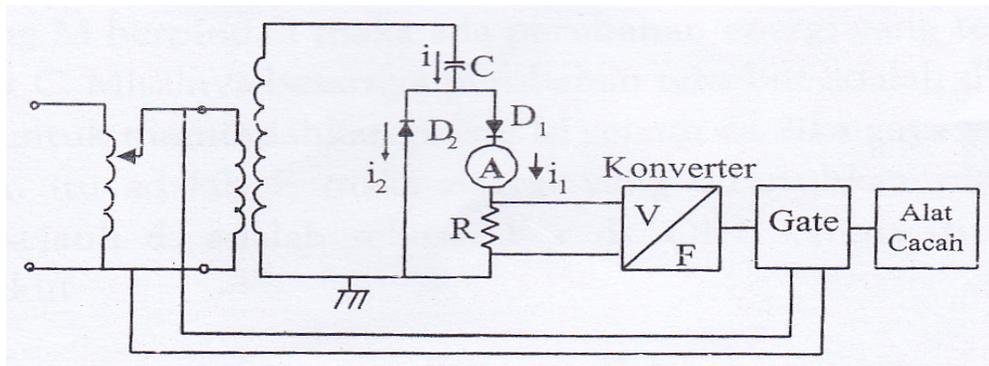
di mana:

$$k_c = \frac{1}{2fC} \quad 12.22$$

Hasil pengukuran tergantung pada harga rata-rata arus i_1 , sedang harga rata-rata arus ini tergantung pada bentuk gelombangnya. Bentuk gelombang arus i_1 tergantung pada bentuk gelombang tegangan. Terlihat bahwa arus menjadi nol pada saat tegangan mencapai harga puncak atau saat $t = T/2$. Bila dalam periode ($0 - T/2$) gelombang tegangan mempunyai puncak maka arus menjadi nol saat tegangan mencapai puncak, atau sebelum $t = T/2$. Dengan perkataan lain, bentuk gelombang arus berubah sehingga harga rata-ratanya tidak sama lagi dengan Persamaan 6.19. Oleh karena itu, pengukuran ini tidak dapat digunakan jika bentuk gelombang tegangan mempunyai puncak.

Persamaan 12.21 menunjukkan bahwa hasil pengukuran tergantung pada frekuensi, oleh karena itu pengukuran harus dilengkapi dengan frekuensimeter.

Untuk menghilangkan pengaruh frekuensi ini, alat ukur dilengkapi dengan alat cacah digital, seperti ditunjukkan pada Gambar 12. 11.



Gambar 12.11 Alat ukur Cnubb & Fortesque Digital

Arus I_1 menimbulkan jatuh tegangan pada resistor R yang besarnya $V = I_1 \cdot R$. Tegangan ini dikonversikan mejadi besaran f_m , di mana:

$$f_m \propto V \propto I_1 \quad 12.23$$

Selanjutnya frekuensi ini menjadi masukan ke gerbang bersama-sama dengan frekuensi tegangan sumber, f Gerbang dirancang membuka dalam waktu A di mana $\Delta t = 1/f$.

Jumlah pulsa yang dikirim ke alat cacah adalah:

$$n = f_m \cdot \Delta t \propto \frac{f_m}{f} \propto \frac{R \cdot I_1}{f} \quad 12.24$$

Menurut Persamaan 12.21, arus $I_1 = 2 f C V_m$, dan jika harga ini disubstitusi ke Persamaan di atas, maka diperoleh $n \propto V$ atau tidak tergantung pada frekuensi. Skala alat cacah dapat diset agar secara langsung menunjukkan harga tegangan maksimum yang diukur.

12.7 ALAT UKUR ELEKTROSTATIK

Alat ukur ini digunakan untuk mengukur tegangan tinggi searah dan tegangan tinggi bolak-balik. Konstruksinya diberikan pada Gambar 12.12. Bagian utama alat ukur ini adalah dua elektroda piring sejajar.

Salah satu di antaranya dapat bergerak sepanjang sumbu elektroda (M) dan elektroda yang satu lagi adalah elektroda pengukuran (P). Kedua elektroda ini merupakan susunan kondensator yang kapasitansinya sebagai berikut:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{s} \quad 12.25$$

di mana:

A = Luas permukaan piring M

E = Permittivitas udara

s = Jarak sela elektroda

Jika elektroda pengukuran bertegangan, maka timbul medan elektrik (E) di antara kedua elektroda. Agar distribusi medan elektrik tersebut merata, maka di sekeliling piring bergerak diberikan perisai. Medan elektrik ini akan menimbulkan gaya pada muatan-muatan bebas yang terdapat pada elektroda M. Satu muatan q akan mengalami gaya sebesar:

$$F = q E \quad 12.26$$

Misalnya, total gaya yang dialami semua muatan adalah F dan gaya ini membuat piring (M) bergerak sejauh ds menuju elektroda pengukuran (P). Pergerakan ini akan menggerakkan reflektor sehingga posisi sinar pantul pada garbs skaia berpindah. Perpindahan sinar pantul ini sebanding dengan jarak perpindahan piring M. Perpindahan piring M sebanding dengan gaya yang dialaminya dan gaya ini sebanding dengan medan elektrik pada elektroda pengukuran. Oleh karena itu, perpindahan posisi sinar pantul pada skala sebanding dengan tegangan yang diukur. Berikut ini akan dijelaskan hubungan tegangan yang diukur dengan gaga F .

Jika piring M berpindah maka ada perubahan energi yang tersimpan pada kondensator C. Misalnya besarnya perubahan tersebut adalah dW . Energi ini digunakan untuk memindahkan piring M sejauh ds . Jika gaya yang membuat perpindahan itu adalah F , maka energi yang dibutuhkan piring M untuk berpindah sejauh ds adalah sebesar $F \times ds$. Oleh karena itu dapat ditulis sebagai berikut:

$$dW_c = -F \cdot ds \quad 12.27$$

Persamaan di atas memberikan:

$$F = \frac{dW_c}{ds} \quad 12.28$$

Energi yang tersimpan dalam kondensator C adalah:

$$W_c = \frac{1}{2} V^2 C \quad 12.29$$

Substitusi Persamaan 12.29 ke Persamaan 12.28, menghasilkan:

$$F = - \frac{d\left(\frac{1}{2} V^2 C\right)}{ds} \quad 12.30$$

Substitusi Persamaan 12.25 ke Persamaan 12.30 menghasilkan:

$$F = - \frac{1}{2} \frac{dV^2 \epsilon_0 \cdot A}{s \cdot ds} = - \frac{1}{2} V^2 \epsilon_0 A \frac{d}{ds} \frac{1}{s} \quad 12.31$$

Akhirnya diperoleh:

$$F = \frac{1}{2} V^2 \epsilon_0 \cdot A \frac{1}{s^2} = k_r \cdot V^2 \quad 12.32$$

di mana:

$$k_r = \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot A \frac{1}{s^2} \quad 12.33$$

Terlihat bahwa gaya F sebanding dengan kuadrat tegangan V . Akibatnya, alat ukur ini kurang teliti saat mengukur tegangan yang besarnya berada pada jangkauan ukur yang rendah.

12.8 PENGUKURAN & PENGUJIAN TEGANGAN TINGGI BOLAK-BALIK (AC)

12.8.1 Tujuan Pengujian

Tujuan pengujian tegangan tinggi bolak-balik adalah agar mahasiswa mampu menjelaskan cara-cara pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik dan dapat menjelaskan cara-cara pengukuran tegangan tinggi bolak-balik

Tegangan tinggi bolak-balik banyak dipergunakan untuk pengujian peralatan listrik, untuk pengujian, pembangkitan tegangan searah dan impuls. Pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik dapat mempergunakan trafo dengan perbandingan belitan yang tinggi jenis dua belitan dan jenis tiga belitan (untuk keperluan rangkaian kaskade). Trafo tegangan tinggi bolak-balik untuk keperluan pengujian mampu menghasilkan tegangan yang sangat tinggi namun menghasilkan daya yang kecil.

Untuk keperluan pengujian peralatan tegangan tinggi kapasitif seperti kabel tegangan tinggi, kondensator atau pengujian peralatan berisolasi gas SF₆ yang memiliki daya reaktif yang besar dilakukan cara kompensasi disisi primer atau sekunder dengan menggunakan rangkaian resonansi seri.

12.8.2 Cara Pengukuran Tegangan Tinggi Bolak-balik

Untuk mengukur tegangan tinggi bolak-balik dilakukan cara-cara berikut:

- Sela percik bola.
- Pembagi tegangan kapasitif
- Penentuan tinggi tegangan berdasarkan besar harga pembanding belitan.

Ketiga jenis pengukuran tersebut akan diuraikan sebagai berikut :

a) Pengukuran tegangan tinggi bolak-balik dengan sela percik bola.

Tembus elektrik suatu sela udara terjadi setelah beberapa μ s dicapai tegangan tembus. Pada saat itu dianggap tegangan sistem konstan. Oleh karena itu tegangan tembus gas selalu terjadi pada nilai puncak tegangan bolak-balik frekuensi rendah (hingga 500 kHz) sehingga metode ini dapat dipergunakan untuk pengukuran tegangan puncak bolak-balik.

Tegangan tembus udara tergantung pada kuat medan listrik tembus udara, diameter bola yang akan mempengaruhi efisiensi medan listrik pada permukaan konduktor dan jarak sela.

Dalam suatu persamaan dinyatakan bahwa tegangan tembus udara adalah :

$$U_{do} = E_d \cdot s \cdot \eta \quad 12.34$$

Dimana :

- U_{do} : tegangan tembus udara (kV)
 E_d : Kuat medan listrik tembus udara (kV/cm)
 s : jarak sela konduktor (cm)
 η : efisiensi medan listrik konduktor (berdasarkan tabel berikut)

Tabel 12.2. Tabel efisiensi medan listrik konduktor

p	η
1	1
1,5	0,85
2	0,732

$$P = \frac{s+r}{r} \quad 12.35$$

dengan interpolasi maka Efisiensi didapat :

$$\frac{P - P1}{P2 - P1} = \frac{\eta - \eta1}{\eta2 - \eta1} \quad 12.36$$

Pada kondisi normal (**temperatur udara 20°C dan tekanan 1atm :1013 mbar**) diasumsikan kuat medan listrik tembus udara (**E_d**) sebesar **30 kV/cm**, sehingga tegangan tembus udara (U_{do}) bisa dihitung.

Tegangan tembus sela udara (U_d) pada kondisi udara yang berbeda-beda tergantung kepada kerapatan udara yang dipengaruhi oleh tekanan dan temperatur udara pada saat pengukuran. Tegangan tembus sela udara (U_d) pada kondisi udara yang berbeda-beda dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$U_d = 0,289 \frac{p}{273+t} U_{d0} \quad 12.36$$

dimana:

- p = tekanan udara (mbar)
- t = temperatur udara ($^{\circ}\text{C}$)

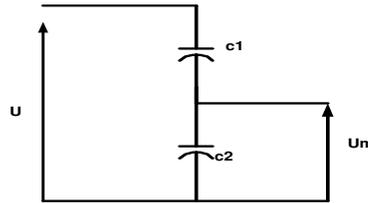
Pada pengujian ini, besar tegangan tembus sela bola dengan diameter 100 mm pada kondisi normal (20°C dan tekanan 1013 mbar (1 atm)) menggunakan tabel VDE 0433-2 sebagai berikut:

Tabel 12.3. Tabel VDE 0433-2

S (mm)	10	20	30	40	50
U_{d0} (Kv)	31.7	59	84	105	123

b) Pengukuran tegangan tinggi bolak-balik dengan pembagi kapasitif.

Rangkaian pengukuran seperti gambar 12.12 dibawah ini:



Gambar 12.12. Rangkaian pembagi tegangan kapasitif

Dengan pembagi kapasitif dapat terukur nilai puncak dan nilai efektifnya.

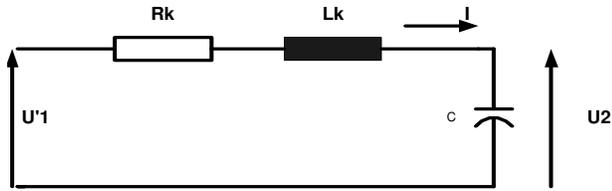
$$U = \frac{C_1 + C_2}{C_1} U_m \quad 12.37$$

dimana :

- U = Tegangan tinggi
- U_m = Tegangan yang terukur
- C_1 = Kapasitor tegangan tinggi
- C_2 = Kapasitor pembagi

c) Penentuan tinggi tegangan berdasarkan besar harga pembanding belitan.

Unjuk kerja trafo uji ditentukan oleh kapasitansi diri dan kapasitansi beban luar. Secara pendekatan rangkaian ekivalen trafo uji dapat dilihat pada gambar 12.13 dibawah ini.



Gambar 12.13. Rangkaian ekuivalen trafo uji

Jika $R_k \ll \omega L_k$ maka $U'_1 = U_2$

Dengan rangkaian ekuivalen, diperoleh tegangan sekunder dengan perbandingan belitan trafo. Jika diasumsikan bahwa rugi-rugi belitan trafo tegangan tinggi cukup kecil maka didapatkan persamaan:

$$U_2 = n.U_1 \quad 12.38$$

dimana :

U_1 = tegangan primer yang terukur.

N = perbandingan belitan trafo

U_2 = tegangan sekunder trafo.

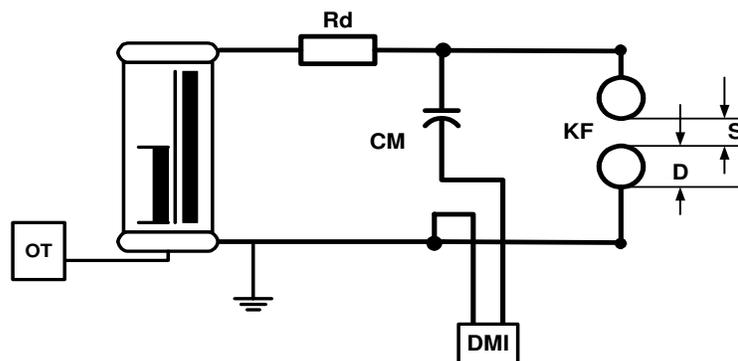
12.8.3 Peralatan yang digunakan dalam pengujian

Pada percobaan ini akan dipergunakan peralatan sebagai berikut:

- T = Trafo uji dengan perbandingan belitan 2x220 V/100 kV.
Daya 5 kVA.
- KF = Konduktor bola (diameter bola = 100 mm).
- CM = Kapasitor pengukuran tegangan AC, 100pF
- SM = Alat ukur tegangan AC
- Rd = Resistor Redaman (375 ohm)
- SHVC = Set of High Voltage Connection
- OC = Oscilloskop

12.8.4 Prosedur pengukuran & Pengujian Tegangan Tinggi AC dengan sela bola

Rangkaian percobaan untuk pengukuran tegangan tinggi bolak-balik dengan menggunakan sela bola ditunjukkan pada gambar 12.14



Gambar 12.14 Pembangkitan tegangan bolak-balik 1 tingkat.

Langkah-langkah pengukuran & pengujian

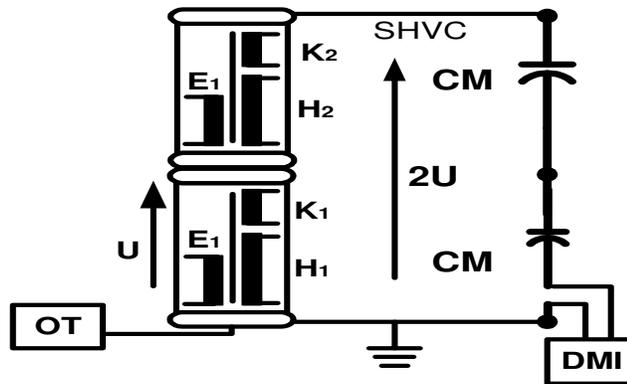
1. Susun rangkaian sesuai dengan gambar rangkaian (12.14), kemudian periksa rangkaian apakah sudah sesuai dengan gambar, atur jarak sela bola sesuai dengan data yang kita inginkan.
2. Pastikan pintu Sangkar Faraday dalam keadaan terkunci dan discharge rod sudah dilepas dari rangkaian.
3. Periksa nilai seting (set up) pada alat pengukuran DMI 551
 - Jenis tegangan
 - Faktor pembagi tegangan (Voltage divider) AC 1 tingkat: n: **676** VoltSetiap terjadi perubahan, tekan tombol setup.
4. Sebelum diberikan tegangan input melalui operating terminal (OT), lepaskan discharge rod dari rangkaian.
5. Berikan tegangan input melalui OT dengan prosedur
 - Lepaskan tombol emergency stop
 - Ubah posisi kunci OT pada posisi 1 (on)
 - Tekan tombol ready (hitam)
 - Tekan tombol hijau
 - Naikkan tegangan input sampai terjadi tembus pada sela bola. Nilai tegangan AC (rms) dapat terbaca pada **DMI 551**.
6. Ukur tegangan puncak pada saat terjadi tembus pada sela bola, untuk setiap jarak sela $S = 10, 15, 20, 25, 30$ mm. Lakukan masing-masing percobaan sebanyak 3 kali dan diambil nilai rata-ratanya. Setiap kali terjadi tembus tekan tombol HV off (warna merah), turunkan tegangan input, tekan tombol emergency stop, hubungkan peralatan dengan discharge rod.
7. Ukur suhu setiap jarak sela bola saat pengukuran.
8. Buat kurva tegangan puncak bolak-balik terhadap jarak sela yang didapatkan dari percobaan yaitu:
 - U_1 : Tegangan puncak bolak-balik dengan memperhatikan tekanan dan temperatur udara.
 - U_2 : Tegangan puncak bolak-balik yang terukur melalui DMI 551.
 - U_3 : Tegangan puncak bolak-balik yang didapatkan dengan perbandingan belitan. Bentuk kurva tegangan tinggi yang terukur dapat dilihat dengan menggunakan osiloskop yang terpasang pada alat ukur digital.

12.8.5 Prosedur pengukuran & Pengujian Tegangan Tinggi AC dengan kaskade transformator

Rangkaian percobaan untuk pengukuran tegangan tinggi bolak-balik dengan menggunakan kaskade transformator ditunjukkan pada gambar 12.15

Langkah-langkah pengukuran & pengujian

1. Susun rangkaian percobaan seperti gambar 12.14 dimana : E = Belitan eksitasi trafo, H = Belitan tegangan tinggi trafo dan K = Belitan kopling trafo



Gambar 12.14. Rangkaian percobaan kaskade trafo

2. Lakukan prosedur percobaan seperti no 1-3 diatas. (Voltage divider untuk tegangan AC 2 tingkat (n): **1466,89** Volt.
3. Berikan tegangan input pada OT 10, 20, 30,..... 100 Volt dan catat tegangan output yang dihasilkan pada DMI 551.
4. Naikkan tegangan input sampai pada rangkaian percobaan terdengar noise. Catat tegangan tinggi saat terjadi noise tersebut.

12.9 PENGUKURAN & PENGUJIAN TEGANGAN TINGGI SEARAH (DC)

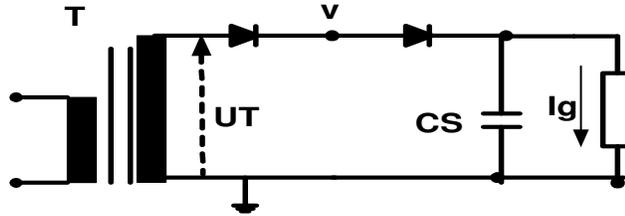
12.9.1 Tujuan pengujian

1. Mampu menjelaskan cara-cara pembangkitan tegangan tinggi searah.
2. Dapat memahami dan menjelaskan prinsip pelipatgandaan tegangan menurut Villard dan Greinacher.
3. Dapat memahami dan menjelaskan pengaruh penggunaan kapasitor
4. Mampu melakukan pengukuran tegangan tinggi searah.

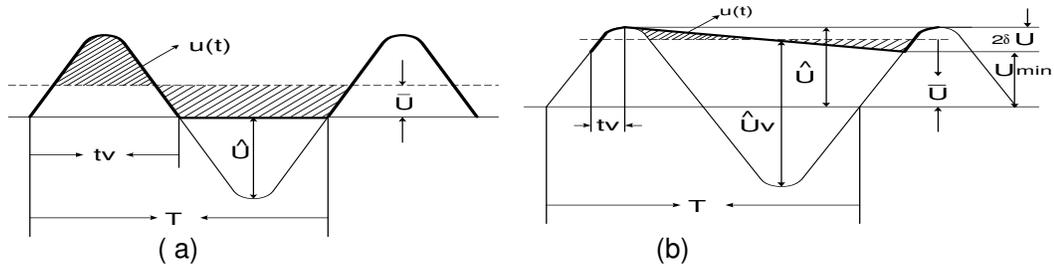
Tegangan tinggi searah banyak digunakan untuk pengujian dan penelitian susunan isolator dengan kapasitansi fungsi seperti kabel dan kapasitor. Pemanfaatan tegangan tinggi searah banyak dijumpai pada instalasi elektrostatik (penyaring gas buang, peralatan pengecatan), peralatan kedokteran (alat rontgen) dan pada fisika inti (pemercepat muatan). Pada umumnya pembangkitan tegangan tinggi searah dilakukan dengan penyearahan tegangan tinggi bolak-balik melalui dioda Selenium, Germanium dan Silizium. Dioda Selenium memiliki volume yang lebih besar, efisiensi yang rendah dan kapasitas penyaluran arus yang rendah.

a) Rangkaian penyearah setengah gelombang

Pembangkitan tegangan tinggi searah yang paling sederhana diperlihatkan pada gambar 12.15. Transformator tegangan tinggi (T) dengan tegangan sekunder U_T dihubungkan dengan tahanan beban R melalui suatu dioda penyearah V. Pengaruh kapasitor perata C dapat dilihat pada gambar 12.15.a dan 12.15.b.



Gambar 12.15: Rangkaian pembangkitan tegangan DC



Gambar 12.15. Kurva keluaran tegangan DC

- a. Tanpa kapasitor perata C
- b. Dengan kapasitor perata C

Dimana :

- T_v = lama pengaliran arus pada dioda
- \bar{U} = harga rata-rata
- \hat{U} = harga puncak tegangan tinggi yang ditahan dioda
- δU = $\frac{1}{2} (\bar{U} - U_{\min})$
- $\delta U / \bar{U}$ = factor ripple

Ripple tegangan diperoleh dengan: $t_v \ll T = 1/f$ dan $\delta U \ll \bar{U}$

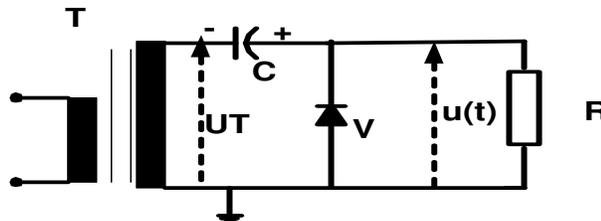
$$2 \delta U = \frac{1}{C} \int_0^T i_g dt = \frac{T \bar{I}_g}{C} = \frac{\bar{I}_g}{fC} \quad 12.38$$

Ripple tegangan dapat diperkecil dengan cara menaikkan:

- Kapasitansi kapasitor perata.
- Frekuensi

b) Rangkaian pelipat ganda tegangan searah.

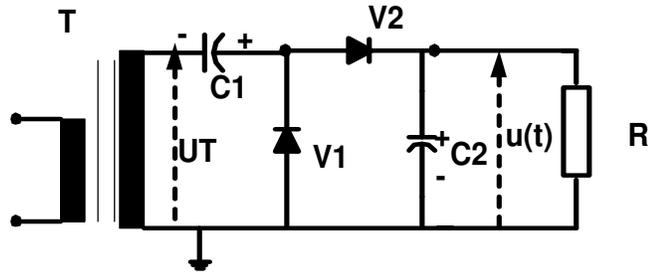
Tegangan searah dapat dilipatgandakan dengan rangkaian menggunakan 1) **rangkaian penyearah Villard** dan 2) **rangkaian penyearah pengganda Greinacher**. Rangkaian penyearah Villard ditunjukkan pada gambar 12.16 dan rangkaian penyearah Pengganda Greinacher ditunjukkan pada gambar 12.17



Gambar 12.16: Rangkaian pengganda tegangan Villard

Pada setengah gelombang positif, C akan dimuati sampai puncak tegangan U_T . Pada setengah gelombang negatif, arus akan mengalir melalui dioda dan kembali terjadi pengisian kapasitor, sehingga tegangannya mencapai nilai $2 U_T$. Pada saat kapasitor mencapai nilai puncak $2 U_T$ terjadi pelepasan muatan ke arah tahanan R sehingga terukur $2 U_T$ pada saat tegangan input mencapai puncak tegangan positif berikutnya dimana kapasitor kembali dimuati tegangan sebesar U_T . Pada gelombang negatif berikutnya kembali arus mengalir melalui dioda dan kembali mengisi kapasitor. Pada saat yang bersamaan tegangan pada tahanan terukur nol Volt.

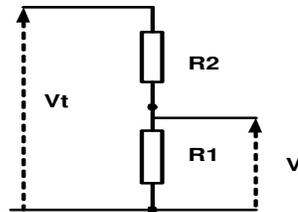
Rangkaian Greinacher adalah penyempurnaan rangkaian Villard dengan penambahan dioda V_2 dan kapasitor perata C_2 .



Gambar 12.17 Rangkaian pengganda dua Greinacher

12.9.2 Pengukuran tegangan tinggi searah

Biasanya untuk pengukuran tegangan tinggi searah, digunakan pembagi tegangan resistif dengan harga tahanan yang tinggi. Cara lain untuk pengukuran tegangan tinggi searah adalah seperti pada pengukuran tegangan tinggi bolak-balik yaitu dengan menggunakan tembus sela bola. Prinsip pembagi tegangan resistif diterangkan menurut gambar 12.18



Gambar 12.18: Pembagi tegangan resistif

Alat ukur dihubungkan secara paralel dengan resistansi R_1 . Besar tegangan yang terukur pada alat ukur menurut pembagian tegangan resistif yaitu:

$$V = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_t \quad 12.39$$

$$V_t = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V \quad 12.40$$

Dimana :

V_t	=	tegangan tinggi
V	=	tegangan yang terukur
R_1	=	resistansi pembagi
R_2	=	resistansi tinggi

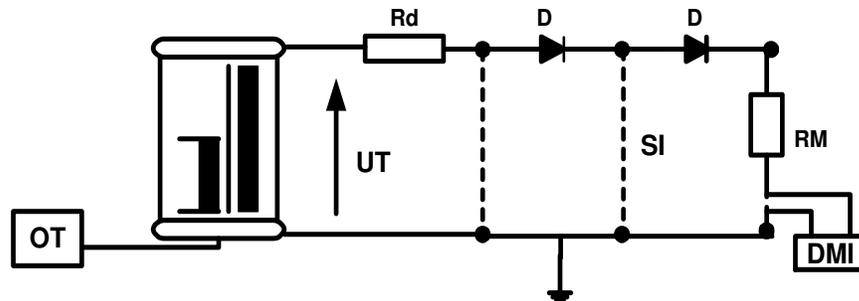
12.9.3 Peralatan yang digunakan untuk pengujian & pengukuran

Pada percobaan ini akan dipergunakan peralatan sebagai berikut:

T	=	Trafo uji dengan harga pembanding belitan 2x220 V/100 kV, dengan daya nominal 5 kVA.
D	=	Dioda penyearah dengan kemampuan tegangan penahanan 140 kV dan arus pengenal 5 mA
GM	=	Alat ukur tegangan searah yang dihubungkan ke pembagi tegangan resistif.
RD	=	Tahanan = 375 Ω
RM	=	Pembagi tegangan resistif dengan harga tahanan 280 M Ω .
CS	=	Kapasitor perata =25000 pF, 1200 pF.
SI	=	Support Insulator
GS	=	Grounding Switch
OC	=	Osciloskop
EL	=	Discharge Resistor

12.9.4 Prosedur pengukuran Penentuan besar faktor ripple

1. Buat rangkaian seperti gambar 12.19



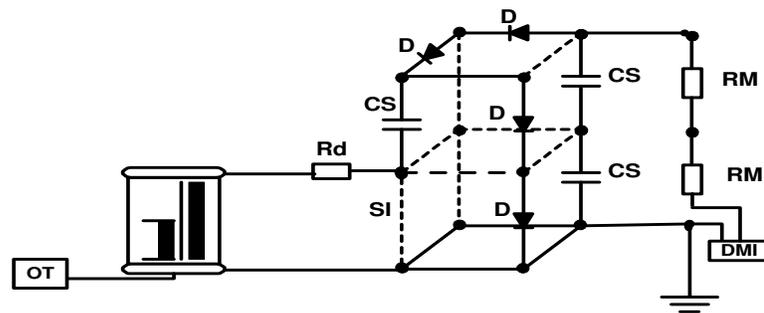
Gambar 12.19 Rangkaian penentuan besar faktor ripple

2. Pastikan pintu dalam keadaan terkunci sebelum melakukan percobaan.
3. Masukkan setup DC (DMI 551)
 - Devider : 18774 Volt.
 - Ripple : Vpp
 - Flash : Display
 - Detection at : 20 %
 - Trip detection : HV off at 140 kVTekan tombol setup.
4. Berikan tegangan input melalui OT dengan prosedur lepaskan emergency stop, posisi kunci pada 1 (on), tekan tombol ready (hitam), hijau dan naikan tegangan input pada trafo sebesar 10, 20, 30, 40, 50 sampai 100 Volt.

5. Catat nilai tegangan output yang terlihat pada display DMI 551 (rms, ripple % ripple_{p-p}) pada tabel.
6. Setiap selesai pengambilan data, tekan tombol merah (HV off), turunkan tegangan hingga tegangan minimum kemudian tekan emergency stop.
7. Pada tegangan input 50 V gambarkan bentuk gelombang yang dihasilkan dengan cara menghubungkan kabel pengukuran ke osciloskop.
8. Lakukan prosedur percobaan 5 sampai 8 untuk penambahan kapasitor perata 1200 pF dan 25000 pF dengan cara menghubungkan secara paralel kapasitor perata dengan resistor RM.
9. Hitung nilai arus yang mengalir pada resistor RM untuk ke tiga percobaan, catat sebagai nilai I_g .
10. **Jika telah selesai melakukan percobaan ini, turunkan tegangan, hubungkan rangkaian dengan discharge rod.**

Rangkaian pengganda dua tegangan menurut Greinacher

1. Buat rangkaian seperti gambar 12.20



Gambar 12.20. Rangkaian Pengganda Greinacher

2. Lakukan prosedur percobaan pada poin 2-6 dengan nilai **devider 35548 Volt** dan tegangan input dari 10, 20, 30... 100 volt.
3. Hitung nilai arus yang mengalir pada resistor RM , catat sebagai nilai I_g .
4. **Jika telah selesai melakukan percobaan ini, turunkan tegangan, hubungkan rangkaian dengan discharge rod**

12.10 PENGUKURAN & PENGUJIAN TEGANGAN TINGGI IMPULS

12.10.1 Tujuan Pengujian

- Untuk menjelaskan cara pembangkitan tegangan tinggi impuls dan pengukurannya
- Untuk menjelaskan fungsi distribusi tegangan tembus sela elektroda
- Untuk memahami prinsip pelipat ganda Marx

Dalam keadaan beroperasi, peralatan-peralatan elektrik selain mampu dibebani tegangan kerjanya, juga harus memiliki ketahanan terhadap pembebanan tegangan lebih impuls akibat sambaran petir maupun akibat proses pengoperasian saklar daya.

Penguasaan cara pembangkitan tegangan tinggi impuls diperlukan, agar dapat dihasilkan bentuk tegangan yang mendekati kejadian pembebanan transien yang terjadi di jaringan dan agar dapat dilakukan penelitian dasar tentang tembus elektrik.

12.10.2 Besaran-besaran pengenalan pada tegangan tinggi impuls

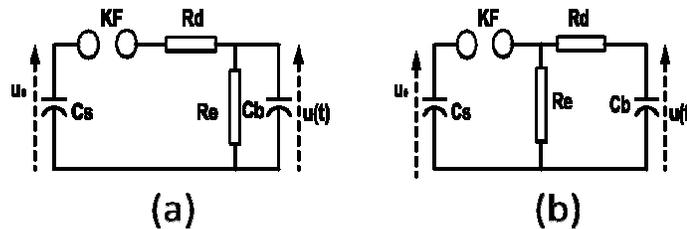
Tegangan tinggi impuls adalah tegangan tinggi dengan polaritas tertentu (satu polaritas) yang terjadi dalam waktu yang sangat singkat. Bentuk dan lama tegangan impuls ditentukan oleh cara pembangkitannya. Bentuk-bentuk tegangan impuls:

1. impuls persegi
2. impuls terpotong
3. impuls eksponensial ganda

Tegangan impuls persegi adalah tegangan impuls yang tiba-tiba menjadi nol pada saat mencapai puncak atau pada saat didahi atau dipunggung gelombang. **Tegangan impuls eksponensial ganda** dipergunakan untuk menirukan tegangan petir atau tegangan surja hubung. Perbedaan antara tegangan petir dan tegangan surja hubung ditentukan oleh waktu dahi dan waktu punggung. Tegangan impuls petir memiliki bentuk 1,2/50 yang berarti waktu dahi (T_s)=1,2 μ s dan waktu setengah punggung (T_r)=50 μ s. Tegangan surja hubung memiliki bentuk 250/2500 yang berarti waktu dahi (T_s)=250 μ s dan waktu setengah punggung (T_r)=2500 μ s. Waktu puncak (T_d) yaitu waktu dimana tegangan memiliki tinggi sebesar 0,9 \hat{U}

12.10.3 Pembangkitan Tegangan Impuls

Rangkaian dasar pembangkitan tegangan impuls petir dan impuls hubung adalah sama, yang berbeda hanya besar elemen-elemen rangkaiannya. Rangkaian dasar yang biasa digunakan adalah rangkaian a dan b seperti terlihat pada gambar. 12.21



Gambar 12.21. Rangkaian dasar pembangkitan tegangan tinggi impuls

Kapasitor impuls C_s diisi muatan dengan tegangan tinggi searah sampai tegangan sebesar U . Dengan penyalaan sela percik F terjadi pelepasan muatan mengisi kapasitor beban C_b sampai tegangan puncak dari sela percik, kemudian ke tahanan pelepas R_e . Tegangan impuls diperoleh dari terminal kapasitor C_b . Kurva tegangan impuls dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$U(t) = \frac{U_o}{R_d C_b} \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} (e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}) \quad 12.41$$

Tampak bahwa tegangan impuls merupakan selisih dari dua fungsi eksponensial yang meluruh dengan konstanta waktu T_1 dan T_2 . Dengan pendekatan $R_e C_s \gg R_d C_b$ dihasilkan persamaan untuk rangkaian b.

$$T_1 \approx (C_s + C_b) \quad T_2 \approx R_d \frac{C_s C_b}{C_s + C_b}$$

Nilai efisiensi dari rangkaian pembangkitan ditentukan oleh :

$$\eta = \frac{\hat{U}}{U_0} \leq \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad 12.42$$

Dimana :

\hat{U} = Tegangan puncak impuls
 U_0 = Tegangan DC

Nilai T_1 dan T_2 menentukan bentuk impuls. Karena umumnya $T_1 \gg T_2$ maka kondisi untuk menyederhanakan perhitungan T_1 dan T_2 dari elemen rangkaian juga terpenuhi. Konstanta waktu T_1 dan T_2 terkait dengan karakteristik tegangan impuls melalui faktor yang bergantung pada perbandingan $\frac{T_s}{T_r}$ berikut:

$$T_s = k_2 T_2 \quad T_r = k_1 T_1$$

Faktor skala untuk bentuk-bentuk impuls yang penting diberikan pada tabel berikut:

$\frac{T_s}{T_r}$	1,2/5	1,2/50	1,2/200
k_1	1,44	0,73	0,70
k_2	1,49	2,96	3,15

Jika diinginkan waktu dahi (T_s) yang singkat, maka peluahan muatan yang mengisi kapasitor C_b harus secepat mungkin, dicapai tegangan \hat{U} . Sedang waktu punggung (T_r) yang lama ditentukan oleh tahanan pelepas R_e yang lebih besar daripada R_d . Konstanta waktu peluahan muatan ke kapasitor C_b yang menentukan waktu dahi secara pendekatan adalah $R_d C_b$. Peluruhan tegangan impuls dalam rangkaian a terjadi dengan konstanta waktu $C_s(R_d + R_e)$ dan untuk rangkaian b terjadi dengan konstanta waktu $C_s R_e$. Nilai efisiensi dari rangkaian pembangkitan ditentukan oleh :

$$\eta = \frac{\hat{U}}{U_0} \leq \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad 12.43$$

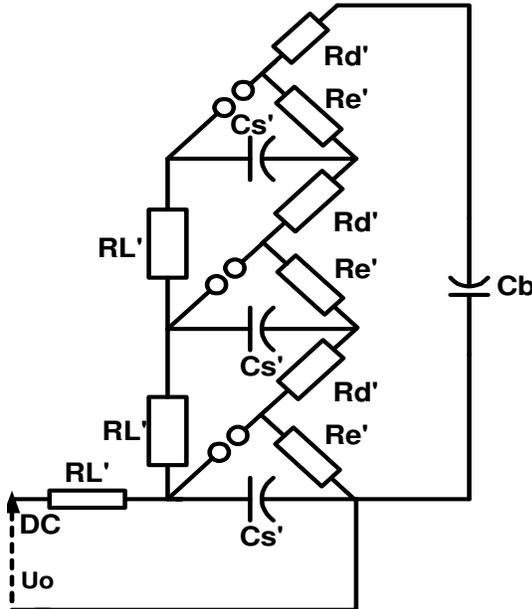
Dimana :

\hat{U} = Tegangan puncak impuls
 U_0 = Tegangan DC

Energi impuls ditentukan oleh :

$$W = \frac{1}{2} C_s U_0^2 \quad 12.44$$

Untuk pembangkitan tegangan impuls yang sangat tinggi biasanya digunakan rangkaian pelipat ganda Marx seperti terlihat pada gambar.12.22



Gambar 12.22. Rangkaian pelipat ganda Marx 3 tingkat

Sejumlah kapasitor impuls yang sama, secara paralel menerima pengisian muatan dan secara seri terjadi peluahan muatan. Dengan demikian jumlah keseluruhan tegangan pemuat sesuai dengan jumlah tingkat rangkaian. Pengisian muatan pada kapasitor impuls C_s' adalah melalui tahanan ohmik tinggi R_L' yang dipasang paralel, sampai dicapai tegangan pemuat setiap tingkat sebesar U_0 . Dengan penyalaan semua sela percik, maka kapasitor C_s' terhubung secara seri dan terjadi peluahan muatan ke kapasitor beban C_b melalui tahanan peredam R_d' . Selanjutnya peluahan muatan dari semua kapasitor akan melalui tahanan pelepas R_e' dan R_d' . Rangkaian kaskade Marx n tingkat dapat dibuat rangkaian pengganti satu tingkatnya menjadi rangkaian b dengan besaran-besarannya menjadi:

$$\begin{aligned} U_0 &= n \cdot U_0' & R_d &= n \cdot R_d' \\ C_s &= \frac{1}{n} C_s' & R_e &= n \cdot R_e' \end{aligned} \quad 12.45$$

12.10.4 Pengukuran Tegangan Impuls

Pengukuran tegangan tinggi impuls dapat dilakukan dengan sela percik bola, karena kejadian tembus elektrik sela udara terjadi beberapa mikro detik setelah dicapai tegangan ambang tembus. Dengan demikian sela percik bola dapat dipergunakan untuk pengukuran tegangan puncak impuls yang tidak terlalu cepat dan untuk waktu punggong (T_2) 50 ms. Hal ini berlaku dengan anggapan bahwa didalam

ruang antara sela bola terdapat pembawa muatan yang cukup, dimana tembus elektrik akan langsung terjadi jika telah dicapai tinggi kuat medan listrik tertentu.

12.10.5 Waktu kelambatan penyalaan

Kejadian tembus elektrik pada gas merupakan akibat perkembangan avalans dengan adanya ionisasi tumbukan molekul-molekul gas. Pada sela udara, peluahan muatan dapat diawali jika terdapat muatan pembawa dalam ruang medan listrik. Jika pembawa muatan tidak tersedia, maka walaupun tegangan ambang ionisasi telah dilampaui namun peluahan muatan baru diawali setelah selang waktu kelambatan t_s . Setelah terbentuk avalans elektron yang pertama, untuk pengembangan kanal peluahan muatan selanjutnya sampai terjadi tembus listrik memerlukan waktu pembentukan t_a . Jumlah waktu tersebut t_a dan t_s disebut waktu kelambatan penyalaan tembus elektrik.

$$t_v = t_s + t_a \quad 12.46$$

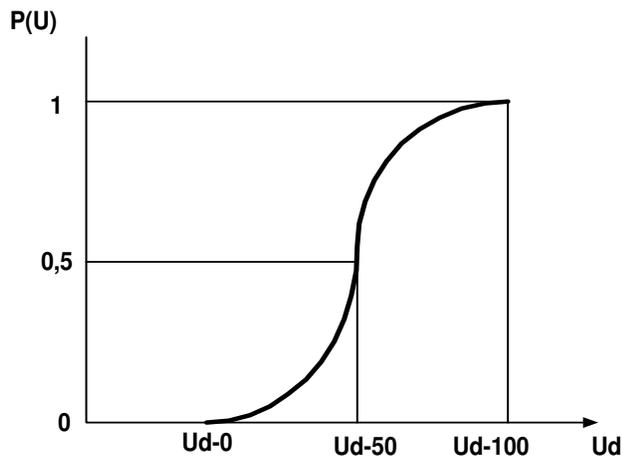
Dimana :

- t_s = Waktu kelambatan pembentukan pembawa muatan
- t_a = Waktu pembentukan pembawa muatan

12.10.6 Probabilitas tembus elektrik.

Dengan adanya waktu keterlambatan maka pada pengukuran tegangan puncak impuls dengan sela percik bola tidak dapat diketahui berapa besar perbedaan harga puncak tegangan U dengan tinggi tegangan tembusnya (\hat{U}_d). Perbedaan ini hanya dapat diketahui jika dilakukan percobaan berulang kali pada sela bola tersebut.

Syarat terjadinya tembus elektrik secara pendekatan dapat dipergunakan kriteria waktu, dimana jika sewaktu setelah dicapai tegangan ambang ionisasi melebihi waktu kelambatan penyalaan t_v maka dapat dipastikan bahwa tembus elektrik akan terjadi. Karena adanya simpangan pada t_a dan t_s maka waktu pembentukan t_v akan tidak konstan. Harga rata-rata dari t_v berarti juga harga rata-rata tegangan tembus U_{d-50} (harga probabilitas tembus P untuk harga puncak \hat{U} suatu tegangan impuls. Fungsi distribusi tegangan tembus impuls pada suatu sela percik bola seperti gambar 12.23



Gambar 12.23. Fungsi distribusi tegangan tembus impuls pada sela bola

- U_{d-0} : disebut tegangan ketahanan yaitu nilai tegangan dimana tidak terjadi tembus listrik. Nilai ini sangat penting untuk perhitungan kekuatan dielektrik suatu material isolasi.
- U_{d-50} : disebut tegangan tembus 50 % yaitu nilai tegangan yang jika diterapkan pada suatu material isolasi selama satu detik mengakibatkan tembus listrik pada isolasi.
- U_{d-100} : disebut tegangan tembus 100 %, yaitu jika diterapkan pada suatu material isolasi akan mengakibatkan tembus listrik. Nilai tegangan ini disebut sebagai batas kegagalan isolasi.

Jika fungsi distribusi tembus dapat didekati dengan bentuk kurva distribusi normal maka U_{d-50} dapat didekati sebagai tegangan tembus rata-rata :

$$U_{d-50} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{di} \quad 12.47$$

$$s = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_{di} - U_{d-50})^2 \right)} \quad 12.48$$

$$U_{d-0} = U_{d-50} - 3s \quad 12.49$$

$$U_{d-100} = U_{d-50} + 3s \quad 12.49$$

Dimana :

- U_{di} = Tegangan tembus pada percobaan ke- i
 n = Jumlah percobaan tembus
 s = Standar deviasi

12.10.7 Peralatan yang digunakan dalam pengujian

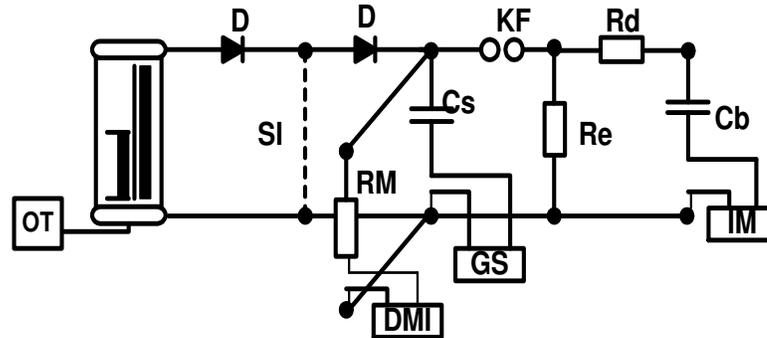
Pada percobaan ini akan dipergunakan peralatan sebagai berikut:

- T = Trafo uji dengan perbandingan belitan 2x220 V/100 kV.
 Daya 5 kVA.
- D = Dioda
- C_s = Kapasitor pengisian : 25000 pF
- KF = Sela bola
- R_d = Resistor redaman : 375 Ω
- R_e = Resistor peluahan: 2400 Ω
- C_b = Kapasitor pengukuran : 1200 pF
- RM = Resistor pengukuran : 280 M Ω
- DM = Alat pengukuran tegangan searah
- IM = Alat pengukuran tegangan impuls
- GS = Grounding Switch
- SI = Support Insulator
- RL = Resistor Pengisian : 2.5 M Ω

12.10.8 PROSEDUR PERCOBAAN

4.1 Menentukan efisiensi pembangkitan tegangan impuls.

1. Susun rangkaian seperti gambar.
(rangkaian ini menggunakan prinsip rangkaian b)



Gambar 12.24. Rangkaian pembangkitan tegangan tinggi impuls

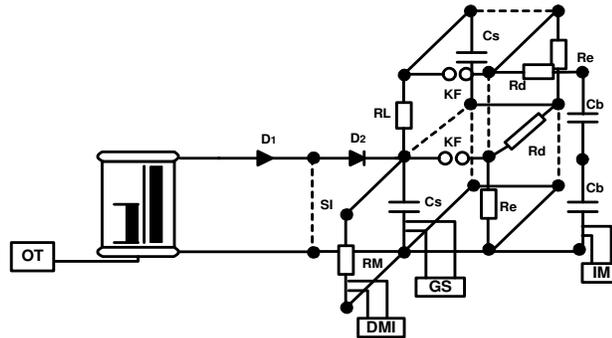
2. Atur jarak sela bola sebesar 20 mm.
3. Masukkan Voltage Divider Impulse (DMI 551): 398.1 V
Perhatikan polaritas tegangan
Jenis tegangan : Low (400)
Masukkan Voltage Divider DC : 18774 V
4. Pastikan pintu dalam keadaan terkunci sebelum melakukan percobaan.
5. Berikan tegangan input melalui OT dengan prosedur lepaskan emergency stop, posisi kunci pada 1 (on), tekan tombol ready (hitam), hijau dan naikan tegangan input pada trafo hingga terjadi tembus pada sela bola.
6. Setelah terjadi tembus, tekan tombol merah (HV off), turunkan tegangan hingga tegangan minimum kemudian tekan tombol emergency stop.
7. Catat nilai tegangan output DC dan Impuls yang terlihat pada display DMI terhadap jarak sela bola.
8. Ulangi percobaan hingga 10 kali.
9. Jika telah selesai melakukan percobaan ini, turunkan tegangan, hubungkan rangkaian dengan discharge rod.

4.2. PENENTUAN FUNGSI DISTRIBUSI TEGANGAN TEMBUS.

1. Susun rangkaian seperti gambar pada percobaan 4.1
2. Lakukan prosedur 2-5 pada percobaan 4.1
3. Tentukan tegangan tembus rata-rata (U_{d-50}) berpatokan pada tegangan pengisian C_s (tegangan DC) terhadap jarak sela bola yang didapatkan pada percobaan 4.1. (tegangan pengisian C_s rata-rata)
4. Dengan kenaikan dan penurunan nilai tegangan kapasitor C_s sebesar 1 kV, catat probabilitas tembus sela bola untuk 10 kali pembebanan sehingga didapatkan probabilitas 0 % dan probabilitas 100 %
5. Setiap memulai memberikan input tegangan, pastikan bahwa tegangan pada kapasitor C_s nol.

4.3. Rangkaian pelipat ganda Marx.

1. Susun rangkaian seperti gambar 12 25 sbb :



Gambar 12.25. Rangkaian Pelipat Ganda Mark

2. Atur kedua sela bola pada jarak 20 mm.
3. Masukkan nilai setting impuls pada DMI 551: 798.8, polaritas tegangan, tegangan Low (400) dan setting DC : 18774 V
4. Berikan tegangan input sehingga terjadi tembus pada sela bola.
5. Setelah terjadi tembus, tekan tombol merah (HV off), turunkan tegangan hingga tegangan minimum kemudian tekan tombol emergency stop.
6. Catat tegangan DC pada Cs, tegangan impuls yang terbaca pada display DMI 551.
7. Lakukan untuk 10 kali percobaan.

TUGAS

1. Dengan besar elemen rangkaian untuk masing-masing percobaan, hitunglah waktu dahi dan waktu punggung dan efisiensi tegangan yang dibangkitkan dan gambarkan bentuk rangkaiannya.
2. Bandingkan efisiensi dari hasil pengukuran dengan hasil perhitungan.
3. Berikan analisa terhadap kedua hasil tersebut.
4. Gambarkan kurva fungsi distribusi tegangan tembus yang didapatkan dari percobaan 4.2 (berdasarkan perhitungan)
5. Gambarkan kurva fungsi distribusi tegangan tembus yang didapatkan dari percobaan 4.2
6. Tentukan tegangan ketahanan, tegangan tembus rata-rata dan tegangan kegagalan isolasi dari kedua kurva diatas.
7. Berapakah efisiensi dan nilai penyimpangan tegangan impuls yang dihasilkan dari rangkaian pelipat ganda Marx terhadap tegangan impuls yang dihasilkan pada percobaan 4.1. Berikan analisa saudara.

TUGAS PENDAHULUAN

1. Analisa rangkaian percobaan b, dan turunkan persamaan rangkaian tersebut untuk mendapatkan kurva tegangan impuls (eksponensial ganda) berikut konstanta waktunya.
2. Jelaskan prinsip kerja rangkaian percobaan pelipat ganda Mark (2 tingkat).

12.11 PENENTUAN EFEK POLARITAS TEGANGAN PADA ELEKTRODA TERHADAP TEGANGAN TEMBUS

12.11.1 Tujuan pengujian

Tujuan pengujian adalah untuk menjelaskan pengaruh polaritas tegangan terhadap tembus sela udara. Peristiwa terjadinya tembus udara diantara dua buah konduktor yang bertegangan tinggi diawali dengan adanya ionisasi atom udara. Pada medan listrik yang tidak homogen, misalnya pada susunan elektroda bola-plat atau jarum-plat pada daerah dengan medan listrik tinggi, terjadi ionisasi tumbukan diudara sesaat setelah tegangan ionisasinya (tegangan insepasi) terlewati. Karena mobilitasnya yang tinggi, elektron-elektron akan dengan cepat meninggalkan daerah ionisasi. Dalam perjalanannya dari katoda ke anoda elektron dapat menumbuk atom udara lain sehingga kembali dihasilkan elektron bebas. Sedangkan ion-ion yang bergerak lambat menuju katoda akan membentuk muatan ruang positif sehingga distribusi medan listriknya berubah.

Pada elektroda negatif, elektron bergerak menuju elektroda positif. Ion-ion positif yang tertinggal akan menyebabkan kenaikan kuat medan listrik yang sangat tinggi tepat pada permukaan elektroda negatif, sedang daerah ruang medan lainnya hanya memiliki medan listrik yang kecil, sehingga pengembangan kanal peluahan muatan ke arah elektroda positif menjadi terhambat.

Pada elektroda positif, elektron-elektron bergerak menuju elektroda positif. Ion-ion positif yang tertinggal memperbesar kuat medan listrik ke arah elektroda negatif sehingga terjadi peningkatan medan listrik didaerah tersebut dan memudahkan pengembangan kanal peluahan muatan.

12.11.2 Peralatan yang digunakan dalam pengujian

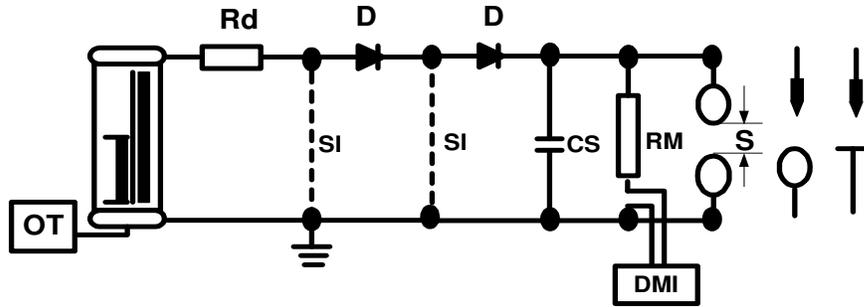
Peralatan yang digunakan untuk pengujian dalam penentuan efek polaritas tegangan pada elektroda terhadap tegangan tembus adalah sbb :

- T = Trafo uji dengan harga pembanding belitan 2x220 V/100 kV, nominal 5 kVA.
- D = Dioda penyearah dengan kemampuan tegangan penahanan 140 kV.
- RM = Pembagi tegangan resistif dengan harga tahanan 280 M Ω .
- CS = Kapasitor perata =25000 pF.
- KF = Sela elektroda
- GS = Grounding Switch
- Rd = Resistor redaman = 375 ohm
- SI = Support Insulator

12.11.3 Prosedur Pengujian

a) Pengukuran tegangan tembus dengan memperhatikan efek polaritas

1. Buat rangkaian seperti gambar 12.25



Gambar 12.25
Pengukuran tegangan tembus dengan memperhatikan efek polaritas

2. Masukkan setup DC (DMI 551)
 - Divider : 18774 Volt.
 - Ripple : V_{pp}
 - Flash : HV off
 - Detection at : 20 %
 - Trip detection at : HV off
 - : 140 kV

Tekan tombol setup.
3. Pastikan pintu dalam keadaan terkunci dan discharge rod sudah dilepas dari rangkaian sebelum melakukan percobaan.
4. Berikan tegangan input melalui OT dengan prosedur lepaskan emergency stop, posisi kunci pada 1 (on), tekan tombol ready (hitam), hijau dan naikan tegangan input hingga terjadi tembus pada sela bola.
5. Ukurlah tegangan tembus elektrik pada sela elektroda tersebut dengan jarak sela s: 10, 15, 20 mm, masing-masing sebanyak 3 kali percobaan, ambil nilai rata-ratanya. Catat tegangan tembus yang terbaca pada display DMI 551 terhadap jarak sela elektroda.
6. Setiap terjadi tembus pada sela elektroda, tekan tombol HV off, turunkan tegangan sampai batas minimum kemudian tekan emergency stop.
7. Lakukan prosedur percobaan yang sama untuk polaritas yang berbeda dengan membalikkan polaritas dioda.
8. Lakukan prosedur percobaan yang sama untuk konduktor bola-jarum, bola-plat dan jarum-plat.

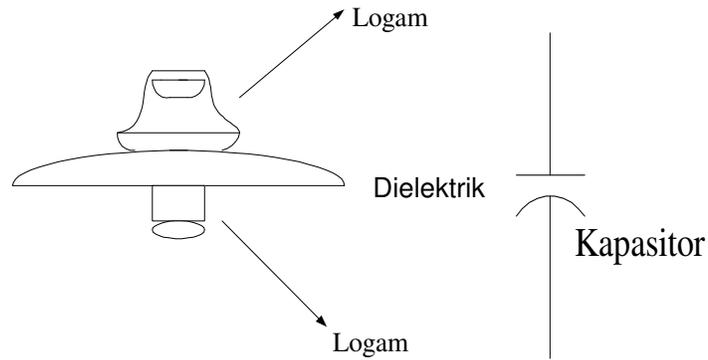
12.12 DISTRIBUSI TEGANGAN PADA ISOLATOR RANTAI

12.12.1 TUJUAN

Tujuan pengukuran dan pengujian distribusi tegangan isolator rantai adalah untuk mengukur dan menentukan distribusi tegangan AC pada isolator rantai. Pada saluran transmisi udara tegangan tinggi, penghantar-penghantar tegangan tinggi digantungkan pada rantai isolator. Isolator ini dihubungkan satu dengan yang lainnya oleh metal sehingga membentuk sambungan beberapa isolator untuk mendapatkan tegangan kerja yang diinginkan.

Dua konduktor yang dipisahkan oleh suatu dielektrik atau susunan "konduktor-dielektrik-konduktor" merupakan suatu susunan kapasitor. Isolator merupakan dua

konduktor yang diantarai oleh suatu dielektrik. Ekuivalensi suatu piringan isolator dapat dilihat pada gambar 12.26.



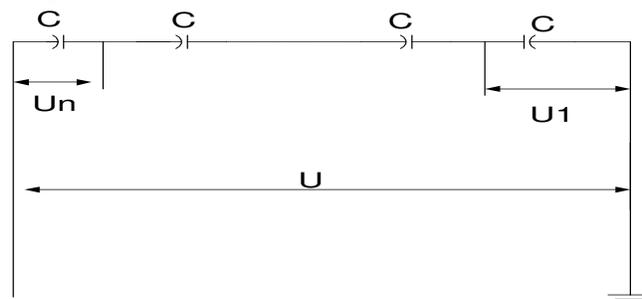
Gambar 12.26 Ekuivalensi satu piringan isolator rantai

Untuk transmisi tenaga listrik dari suatu tempat ke tempat lain dengan tegangan tinggi, saluran tegangan tinggi digantungkan pada rantai isolator (suspensi) yang direncanakan dengan cara yang berbeda-beda menurut kebutuhannya. Pada suatu rantai yang panjang, tegangan tidak didistribusikan secara merata. Ketidakrataan dari tegangan ini disebabkan oleh adanya pengaruh:

1. Pengaruh kapasitansi antara penghubung tiap isolator atau kapasitansi sendiri (C).
2. Pengaruh kapasitansi antara penghubung isolator dengan tanah/menara atau kapasitansi shunt terhadap tanah (C_e)
3. Pengaruh kapasitansi antara penghubung isolator dengan penghantar tegangan tinggi atau kapasitansi shunt terhadap elektroda tegangan tinggi (C_h).

12.3.1 Distribusi tegangan dengan mengabaikan C_e dan C_h

Karena kapasitansi antara penghubung rantai isolator dengan tanah (C_e) dan kapasitansi C_h diabaikan maka hal ini akan sama keadaannya kalau isolator tersebut dikenakan tegangan searah. Dalam tegangan searah, tegangan sepanjang rantai isolator didistribusikan secara merata. Rangkaian pengganti untuk keadaan ini dipresentasikan pada gambar 12.27



Gambar 12.27 Rangkaian pengganti isolator rantai dengan pengabaian C_e dan C_h

Untuk menganalisa distribusi tegangan sepanjang isolator rantai maka perhatikan gambar (12.29) :

$$\begin{aligned} dC_e &= C_e dx / (L) \\ dC_h &= C_h dx / (L) \\ dC &= C dx / (L) \end{aligned}$$

dimana: L = panjang isolator rantai

$$dU_x = (I_x + dl_x) / (j\omega C \cdot L) \quad 12.50$$

$$dl_x \ll I_x, \text{ jadi } dl_x \sim 0$$

$$-dl = dl_e + dl_L$$

$$dl_e = U_x j\omega \cdot C_e dx / (L)$$

$$dl_L = (U - U_x) j\omega \cdot C_h dx / (L) \quad 12.51$$

Kita differensialkan dU_x terhadap x

$$\begin{aligned} d^2U_x / (dx^2) &= (1 / (j\omega C L)) \cdot (dl_x / dx) \\ &= (1 / (j\omega C L)) \cdot ((dl_e - dl_L) / dx) \end{aligned} \quad 12.52$$

Substitusi persamaan (12.51) ke persamaan (12.52) maka didapat:

$$\frac{d^2 U_x}{dx^2} = \frac{U_x}{L} \cdot \left(\frac{C_e + C_h}{C} \right) - \frac{U}{L^2} \cdot \frac{C_h}{C}$$

Misalkan :

$$a = x / L$$

$$U_a = U_x / U$$

$$K = \sqrt{\left(\frac{C_e + C_h}{C} \right)}$$

Maka :

$$U_a = \frac{1}{C_e + C_h} \left[C_e \frac{\sinh K \cdot a}{\sinh K} + C_h \left(1 - \frac{\sinh K(1-a)}{\sinh K} \right) \right]$$

$$U_x = \frac{1}{C_e + C_h} \left[C_e \frac{\sinh K \cdot a}{\sinh K} + C_h \left(1 - \frac{\sinh K(1-a)}{\sinh K} \right) \right] U_a$$

$$U_x = U_a \cdot U$$

Dengan memasukkan syarat batas

$$\begin{array}{lll} \text{pada } a=0 & U_a=0 & \text{atau } U_x=0 \\ & a=1 & U_a=1 \quad \text{atau } U_x=U \end{array}$$

dimana:

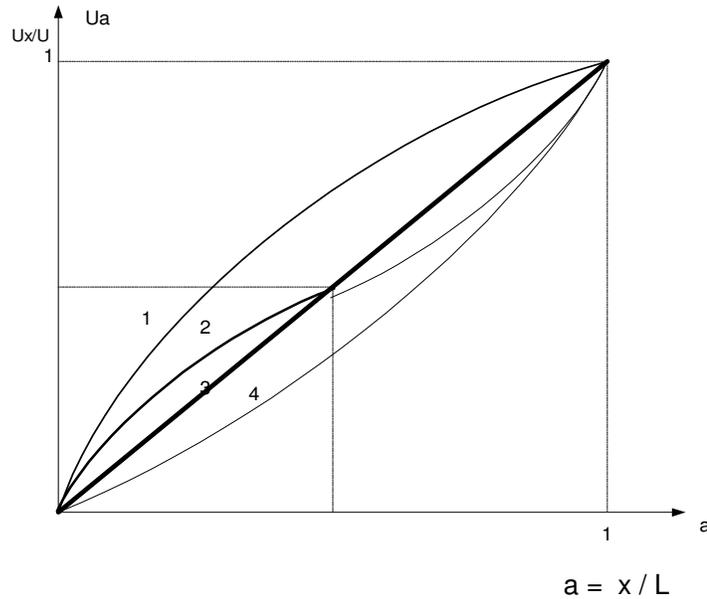
U_x : tegangan pada isolator ke-x (kV)

U_a : tegangan pada isolator ke-x(%)

U : tegangan pembebanan isolator rantai = tegangan penghantar ke tanah (kV)

- x : titik penjepitan
 L : banyak titik penjepitan (7)

Karakteristik U_a terhadap a dengan harga-harga C_e dan C_h yang berubah-ubah dapat dibuat secara pendekatan seperti pada gambar. Kurva perbandingan U_a terhadap a untuk harga C_e dan C_h yang berbeda-beda ditunjukkan :



Gambar 12.29
Kurva perbandingan U_x / U dari suatu isolator rantai untuk harga-harga C_e dan C_h yang berbeda

1. $C_h > C_e$
2. $C_h = C_e$
3. $C_h = C_e = 0$
4. $C_h < C_e$

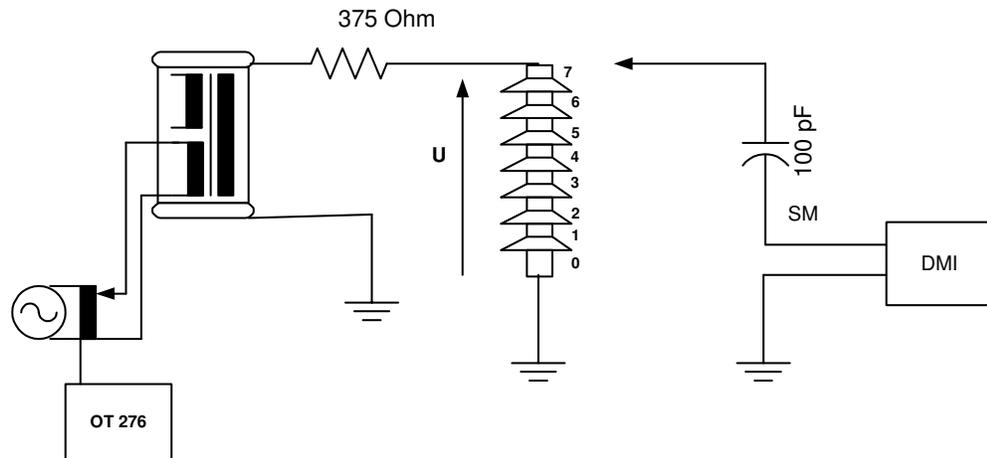
Dari **Gambar 12.29** dapat dilihat bahwa untuk harga-harga C_h dan C_e yang lebih kecil maka distribusi tegangan pada isolator rantai mendekati unifoem, dan terlihat bahwa untuk $C_e = C_h = 0$ distribusi tegangan sepanjang isolator rantai adalah merata.

12.12.3 Peralatan yang digunakan

Peralatan yang digunakan dalam percobaan ini adalah :

- T : Trafo uji dengan perbandingan belitan 2x220 V/100 kV. Daya 5 kVA.
 CM : Kapasitor pengukuran tegangan AC, 100 pF
 SM : Alat ukur tegangan AC

12.12.4 Rangkaian percobaan



12.12.5 PROSEDUR PERCOBAAN

Keamanan: Setiap pemindahan jepitan sela bola harus didahului dengan pentanahan semua titik sambungan isolator. Rangkaian yang digunakan adalah rangkaian pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik 1 tingkat. (perhatikan voltage devidernya).

1. Rangkai peralatan seperti gambar di atas.
2. Periksa rangkaian pentanahan dan trafo.
3. Pastikan discharge rod telah dilepas dari rangkaian dan pintu sangkar faraday telah terkunci.
4. Periksa nilai seting (setup) pada alat pengukuran DMI 551
 - Jenis tegangan
 - Faktor pembagi tegangan (Voltage divider) AC 1 tingkat: $n: 676$ Volt.Setiap terjadi perubahan, tekan tombol setup
5. Pasang titik penjepitan pada titik penjepitan 7, naikkan tegangan input sebesar 25 V kemudian catat tegangan output pada DMI sebagai $U=U_x=U_7$. (Tegangan U mewakili 7 lempeng isolator)
6. Lanjutkan ke titik penjepitan 6 naikkan tegangan input sebesar 25 V, catat tegangan output sebagai $U_x=U_6$. (Tegangan U_6 mewakili 6 lempeng isolator).
7. Lakukan percobaan hingga titik penjepitan 1.
8. Plot kurva $U_a=U_x/U$ sebagai fungsi $a= x/L$ (seperti gambar 6.5)
9. Ambil kesimpulan dari kurva yang didapat.

12.13 TUJUAN PENGUJIAN TEGANGAN TINGGI

Kegagalan isolasi peralatan sistem tenaga listrik akan menimbulkan kerugian yang besar bagi perusahaan pembangkit tenaga listrik, karena kegagalan ini mengakibatkan adanya pengeluaran uang untuk biaya penggantian peralatan yang

rusak dan mengakibatkan penjualan energi terganggu. Oleh karena itu kualitas isolasi peralatan diuji untuk menjamin peralatan dapat bekerja pada tegangan normal. Disamping itu, isolasi peralatan perlu diuji untuk melihat kemampuannya memikul tegangan lebih, sebab tegangan lebih dapat terjadi pada sistem tenaga listrik karena terjadinya hubung singkat satu fasa ke tanah, atau karena adanya sambaran petir pada komponen sistem maupun karena adanya proses hubung-terbuka pada rangkaian sistem.

Harga suatu peralatan tegangan tinggi didominasi harga isolasinya. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian untuk menemukan isolasi baru yang lebih murah daripada isolasi yang ada sekarang. Dalam penelitian ini dilakukan juga pengujian tegangan tinggi. Dengan demikian pengujian tegangan tinggi dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. Pengujian yang bertujuan meneliti sifat-sifat listrik dielektrik temuan baru.
2. Pengujian yang bertujuan memeriksa kualitas isolasi peralatan listrik.
3. Pengujian yang bertujuan mengetahui ketahanan isolasi peralatan listrik memikul tegangan lebih tersebut di bawah ini:
 - a. Tegangan normal dalam waktu yang tidak terbatas.
 - b. Tegangan lebih frekuensi sistem dalam waktu yang terbatas.
 - c. Tegangan lebih impuls kilat dan surja hubung.

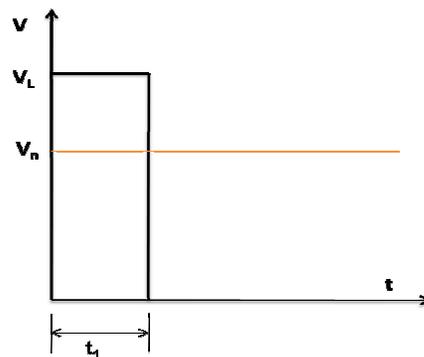
Tegangan lebih frekuensi sistem adalah akibat adanya hubung singkat satu fasa ke tanah pada sistem. Tegangan lebih ini berlangsung sesaat, karena beberapa saat setelah hubung singkat terjadi, pemutusan daya akan melokalisasi bagian sistem yang terganggu.

Tingkat tegangan dan waktu pelaksanaan pengujian ketahanan isolasi frekuensi sistem ditunjukkan pada gambar 12.12

di mana:

V_n = Tegangan normal peralatan

V_L = Tegangan lebih dalam waktu t_1



Gambar 12.30 Tegangan dan Batas Waktu Pengujian

12.14 JENIS-JENIS PENGUJIAN

Jenis tegangan yang diuji pada suatu peralatan tergantung pada tegangan kerja peralatan dan jenis tegangan lebih yang mungkin dipikul peralatan tersebut.

Jenis tegangan yang mungkin diuji terhadap suatu peralatan adalah tegangan tinggi searah, tegangan tinggi bolak-balik, atau tegangan tinggi impuls. Pada umumnya peralatan tegangan tinggi diuji dengan tegangan tinggi bolak-balik dan impuls. Pengujian dengan tegangan tinggi searah dilakukan hanya pada peralatan yang mempunyai kapasitansi besar.

Pengujian tegangan tinggi dapat dikelompokkan berdasarkan dampak pengujian terhadap benda uji, yaitu:

1. Pengujian tidak merusak, antara lain meliputi:

- a. Pengukuran tahanan isolasi.
- b. Pengukuran faktor rugi-rugi dielektrik.
- c. Pengukuran korona.
- d. Pengukuran konduktifitas.
- e. Pemetaan medan elektrik, dan sebagainya.

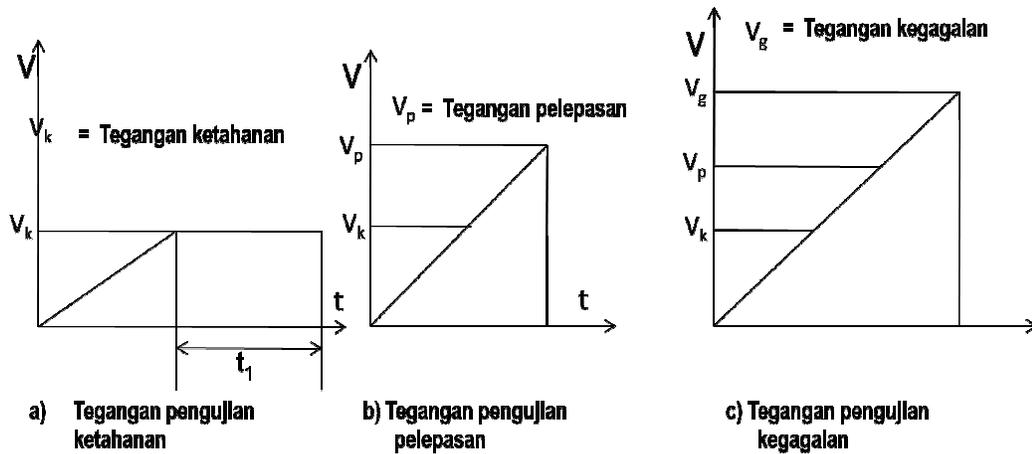
2. Pengujian bersifat merusak, yaitu:

- a. Pengujian ketahanan (*Withstand Test*).
- b. Pengujian peluahan (*Discharge Test*).
- c. Pengujian kegagalan (*Breakdown Test*).

Pada **pengujian ketahanan**, tegangan diberikan pada benda uji bertahap sampai suatu nilai di atas tegangan normalnya. Kemudian tegangan dipertahankan tetap dalam waktu terbatas, misalnya selama t_1 . Setelah selang waktu t_1 tercapai, hubungan ke sumber tegangan segera dibuka, sehingga tegangan benda uji sama dengan nol. Jika isolasi peralatan tidak tahan memikul tegangan lebih tersebut, akan terjadi arus bocor yang besar. Oleh karena itu alat penguji dilengkapi dengan detektor arus bocor.

Pengujian peluahan bertujuan mengukur tegangan yang membuat terjadinya peluahan pada benda uji. Tegangan uji diberikan di atas tegangan pengujian ketahanan dan dinaikkan secara bertahap sampai terjadi peluahan. Kemudian hasil pengukuran dinyatakan dalam keadaan standar. Hasil pengukuran pada keadaan standar dibandingkan dengan hasil yang diharapkan atau harga menurut spesifikasi. Jika hasil pengukuran lebih tinggi daripada spesifikasi atau hasil atau hasil yang diharapkan, maka benda uji dinyatakan lulus uji. Sebaliknya, jika hasil pengukuran lebih rendah daripada spesifikasi atau hasil yang diharapkan, maka benda uji dinyatakan gagal uji.

Pengujian kegagalan bertujuan untuk mengukur tegangan tembus benda uji. Tegangan pengujian kegagalan lebih tinggi daripada tegangan pengujian peluahan, dan dinaikkan secara bertahap samapai benda uji tembus listrik. Evaluasi hasil pengujian sama seperti evaluasi hasil pengujian peluahan. Untuk lebih jelasnya, tingkat tegangan yang diuji pada pengujian merusak ditunjukkan pada Gambar 12.13



Gambar 12. 31 Tingkat Tegangan pada Pengujian Merusak

12.15 PENGUJIAN TEMBUS LISTRIK DIELEKTRIK PADAT

Mekanisme tembus listrik dielektrik padat tergantung kepada durasi tegangan yang dipikul oleh dielektrik tersebut. Oleh karena itu, tegangan tembus dielektrik padat tergantung kepada waktu pengujian. Ada tiga metode atau cara dalam memberikan tegangan pengujian berdasarkan *American Standard Test Method (ASTM D-149)*, yaitu:

1. Metode A: Pengujian waktu singkat (*Short Time Test*)
2. Metode B: Pengujian bertangga (*Step-by-Step Test*)
3. Metode C: Pengujian kenaikan tegangan perlahan (*Slow Rate-of-Rise Test*)

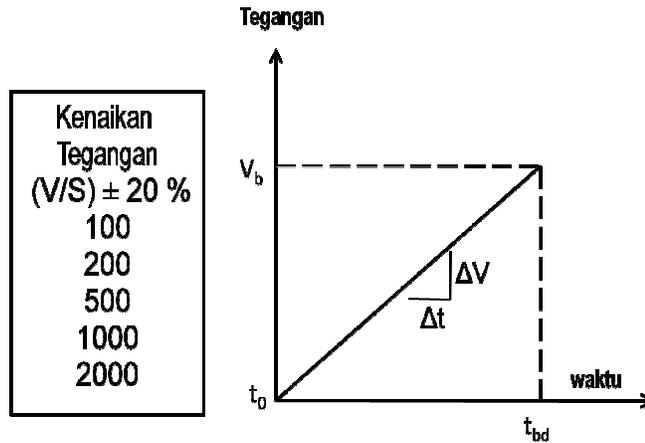
Berikut ini akan dijelaskan prosedur pengujian untuk ketiga jenis pengujian di atas.

12.15.1 Pengujian Waktu Singkat (*Short-Time Test*)

Pada metode pengujian waktu singkat, dielektrik diuji dengan tegangan yang naik secara bertahap mulai dari nol, lalu naik dengan kecepatan tertentu, misalkan 100 V/s sehingga terjadi tembus listrik pada bahan dielektrik. Waktu yang dibutuhkan hingga terjadinya tembus listrik haruslah antara 10 sampai 20 s. Jika dengan kenaikan tegangan yang pertama (dalam contoh ini 100 V/s) tembus listrik terjadi bukan pada interval 10 – 20 s, dicari variasi kenaikan tegangan lain yang membuat tembus listrik dalam interval waktu tersebut. Profil tegangan pada pengujian waktu singkat diberikan pada Gambar 12.14.

Pengujian awal untuk menentukan variasi kenaikan tegangan yang cocok dan yang akan digunakan disebut "*preliminary test*". Setelah didapat variasi yang cocok, variasi kenaikan inilah yang digunakan untuk pengujian bahan dielektrik uji. Pada umumnya, beberapa material menggunakan variasi kenaikan tegangan sekitar 500 V/s. Jika bahan dielektrik yang diuji berbeda, maka dipilih variasi kenaikan tegangan yang sama untuk masing-masing dielektrik. Namun apabila interval waktu 10 – 20 s

tersebut tidak tercapai, maka pada laporan hasil pengujian harus dicantumkan waktu terjadinya tembus listrik (t_{bd}).



Gambar 12.14. Profil Tegangan dari Pengujian Waktu Singkat

12.15.2. Pengujian Bertangga (*Step-by-Step Test*)

Tegangan pengujian dibuat seperti Gambar 12.15. dengan tegangan uji awal salah satu dari tegangan uji yang diberikan pada Tabel.1.

Tabel 12.1 Tegangan Awal dan Kenaikkan Tegangan Pengujian

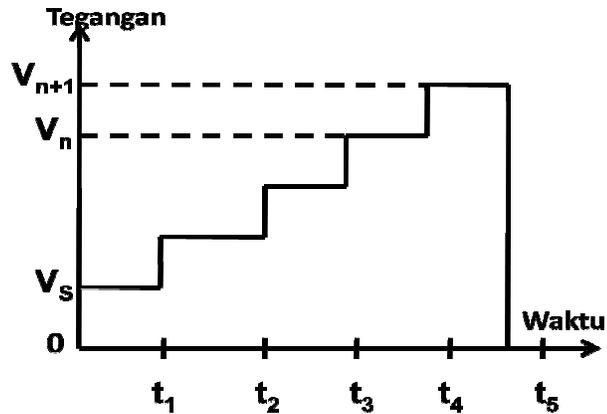
Tegangan awal V_s (kV)	Kenaikkan Tegangan		Batasan
	Bila V_s (kV)*	Kenaikkan	
0.25	≤ 5	0.25	$(t_1-t_0) = (t_2-t_1) = (t_3-t_2) = 60 = 5$ s
0.5	> 5 s/d 10	0.25	
1	> 10 s/d 25	1	
2	> 50 s/d 100	5	20-300
5			20-300
10			$120 \leq t_{BD} \leq 720$ sekon
20	> 100	10	$(t_{bd}$ biasanya melebihi 720 s jika tangga waktu yang digunakan 300 sekon)
50			
100			

*) $V_s = 0.5 (V_{bd}$ uji waktu singkat), kecuali batasan tidak dapat terpenuhi

Nilai tegangan awal V_s dipilih kurang lebih 50% dari taksiran tegangan tembus atau dari hasil pengujian tegangan tembus waktu singkat yang telah dilakukan sebelumnya. Jika tegangan pengujian awal yang di pilih menyimpang dari nilai yang diberikan pada tabel 1, maka tingkat kenaikkan tegangan dibuat sebesar 10% dari tegangan awal yang dianjurkan V_s , tetapi tetap di bawah tegangan awal yang dipilih.

Kepada benda uji diberikan tegangan mulai dari nol hingga sebesar tegangan awal dengan kenaikkan yang cepat tanpa menimbulkan tegangan transien. Setelah tegangan awal dilalui dengan sukses, maka dengan cara yang sama pengujian diteruskan dengan tegangan berikutnya. Setelah pengujian awal, maka waktu yang

dibutuhkan untuk menaikkan tegangan dari tegangan awal ke harga tegangan langkah pengujian berikutnya diperhitungkan sebagai waktu berlangsung pengujian.



Gambar 12.31 . Profil Tegangan Pengujian Bertangga

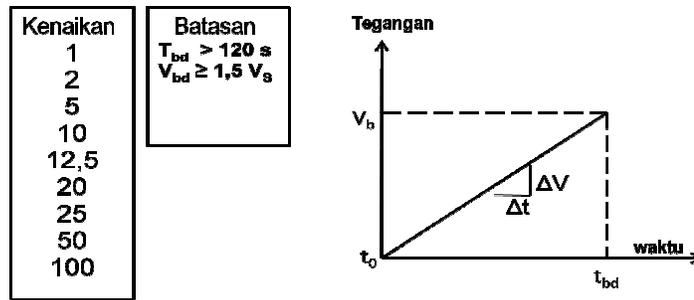
Jika tembus listrik terjadi pada saat berlangsungnya kenaikan tegangan dari suatu tingkat tegangan (V_n) ke tingkat tegangan di atasnya (V_{n+1}), maka dielektrik dinyatakan dapat menahan tegangan V_n . Jika tembus listrik terjadi sebelum tegangan V_{n+1} diakhiri, maka dielektrik dinyatakan mampu menahan tegangan V_n . Tegangan tembus listrik dielektrik dinyatakan sama dengan tegangan V_{n+1} .

Diinginkan bahwa tembus listrik terjadi pada langkah ke 4 s/d 10, tetapi waktunya tidak kurang dari 120 sekon ($t_{bd} \geq 120$ s). Jika ada sejumlah sampel diuji dan tembus listrik terjadi pada step ketiga atau waktu pengujian kurang dari 120 sekon ($t_{bd} < 120$ s), maka sampel yang terbesar dari satu grup sampel diuji dengan tegangan mula V_s yang lebih rendah. Jika tembus listrik tidak dapat terjadi sebelum pada langkah kedua belas atau $t_{bd} < 720$ s, tegangan pengujian V_s dapat dinaikkan.

12.15.3 Pengujian dengan Kenaikkan Tegangan Perlahan (*Slow Rate-of-Rise Test*)

Tegangan uji awal V_s yang diberikan pada benda uji diambil dari hasil pengujian waktu singkat. Lalu tegangan dinaikkan perlahan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5, sehingga terjadi tembus listrik, dengan syarat bahwa waktu tembus t_{BD} harus lebih dari 120 sekon. Apabila lebih dari satu spesimen dielektrik yang diuji mengalami tembus listrik pada waktu kurang dari 120 sekon, maka tegangan mula (initial voltage V_s) dikurangi atau variasi kenaikan tegangannya yang diubah atau kedua-duanya.

Jika lebih dari satu spesimen dielektrik uji mengalami tembus listrik pada tegangan yang kurang dari 1,5 V, maka nilai V_s dikurangi. Jika tembus listrik terjadi pada tegangan 2,5 V_s dan waktu tembusnya lebih dari 120 sekon, maka nilai V_s dinaikkan.



Gambar 12.31 . Profil Pengujian Kenaikkan Tegangan Perlahan

12.16 KONDISI PENGUJIAN

Peralatan listrik yang dipasang di ruangan terbuka adakalanya basah karena hujan dan embun . Pengujian peluahan pada suatu isolator menunjukkan bahwa tegangan peluahan dipengaruhi kondisi kebasahan yang terjadi pada isolator. Pada kondisi hujan, hasil pengujian dipengaruhi oleh intensitas penyiraman, resistivitas air, dan sudut penyiramannya. Oleh karena itu peralatan yang dipasang di ruangan terbuka perlu diuji dalam keadaan basah. Peralatan yang dipasang di ruang tertutup terlindung dari hujan, sehingga cukup diuji dalam keadaan kering. Dengan demikian ada dua kondisi pengujian, yaitu pengujian pada kondisi kering dan pengujian pada kondisi basah.

Untuk pengujian kondisi basah dibutuhkan hujan tiruan. Alat ini terdiri atas pipa-pipa horizontal, disusun paralel dan disangga sedemikian rupa sehingga posisinya berada di atas benda uji. Pada setiap pipa dipasang nozel-nozel yang tersusun merata di sepanjang pipa. Air dipompa ke dalam pipa dan keluar menyembur dari nozle. Debit air dapat dikendalikan supaya intensitas air yang keluar dari nozle dapat diatur.

Posisi pipa juga harus dapat dikendalikan supaya arah penyiraman dapat diatur. Hujan tiruan yang dihasilkan harus memenuhi spesifikasi sebagai berikut;

- Intensitas penyiraman : **3 mm/menit**
- Resistivitas air (r) : **10.000 ohm-cm**
- Sudut penyiraman : **45°**

12.17 EVALUASI HASIL PENGUJIAN PELUAHAN

Setelah selesai mengadakan pengujian peluahan terhadap suatu peralatan listrik, maka perlu ditetapkan apakah peralatan lulus uji atau tidak. Secara umum, prosedur untuk menetapkan hasil pengujian adalah sebagai berikut:

1. Catat temperatur, tekanan, dan kelembaban di tempat pengujian.
2. Hitung faktor koreksi δ .
3. Catat hasil pengukuran tegangan pengujian (V_p).

4. Hitung hasil pengujian pada keadaan standar dengan rumus di bawah ini:

$$V_s = \frac{V_p}{\delta}$$

5. Lihat hasil yang diharapkan pada keadaan standar. Hal ini dapat diperoleh dari spesifikasi peralatan atau dari standar yang ada. Misalkan hasil yang diharapkan adalah V_{ss} .
6. Bila $V_s \geq V_{ss}$, maka peralatan dinyatakan lulus uji.
7. Bila $V_s < V_{ss}$, maka peralatan dinyatakan gagal uji.

Bab 13

PENGUJIAN ISOLASI TIDAK MERUSAK

13.1 TUJUAN PENGUJIAN

Kualitas suatu sistem isolasi dapat ditentukan dari hasil pengukuran tahanan isolasi, pengukuran faktor rugi-rugi dielektrik, dan pengukuran peluahan parsial. Semua pengukuran ini termasuk pengujian tidak merusak.

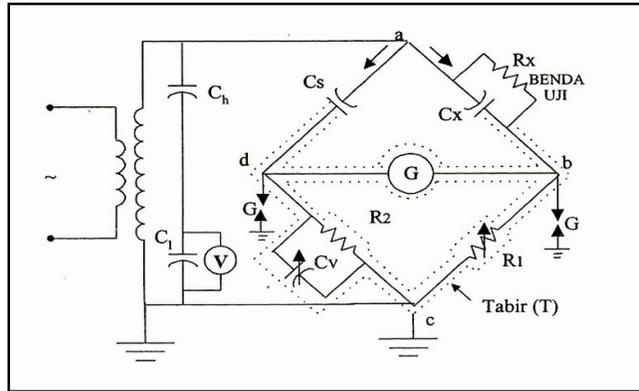
Dalam prakteknya, kualitas isolasi semakin buruk setelah isolasi digunakan dalam waktu yang lama. Hal ini terjadi karena (1) kenaikan temperatur isolasi setelah beroperasi, (2) kelembapan udara di sekitar isolasi, (3) beban mekanis yang dipikul isolasi, (4) korona pada bagian-bagian peralatan yang runcing yang berdekatan dengan isolasi, dan (5) tegangan lebih yang menerpa isolasi. Memburuknya kualitas isolasi yang semakin kecil dapat ditandai dengan $Tg \delta$ yang semakin besar dan tahanan isolasi yang semakin kecil. Oleh karena itu, pengukuran tahanan isolasi dan pengukuran $Tg \delta$ perlu dilakukan secara rutin agar kondisi buruk yang terjadi dapat diketahui sedini mungkin, sehingga penggantian atau perbaikan peralatan dapat segera dilakukan sebelum terjadi kerusakan yang fatal. Dengan demikian kerugian yang besar dapat dihindarkan.

Dalam bab ini akan dijelaskan prinsip pengukuran faktor rugi-rugi dielektrik, tahanan isolasi, dan peluahan parsial. Pengertian tentang ketiga sifat dielektrik ini telah diberikan pada Bab II terdahulu.

13.2 PENGUKURAN FAKTOR RUGI-RUGI DIELEKTRIK ($Tg \delta$)

Alat untuk mengukur $Tg \delta$ adalah jembatan Schering seperti ditunjukkan pada Gambar 13.1. Benda uji dipresentasikan sebagai resistor R_x yang paralel dengan kondensator C_x . Prinsip kerjanya sama dengan prinsip kerja jembatan Wheatstone, hanya sumber tegangannya bukan baterai tetapi tegangan tinggi ac. Agar pengukuran lebih teliti, maka semua resistor yang digunakan pada alat ini tidak mengandung induktansi.

Tahanan resistor R_1 bervariasi antara $0,01 - 10^4$ Ohm. Kapasitansi ke tanah dari cabang bertegangan tinggi (titik b dan d) harus dihindarkan, supaya tidak ada kapasitansi lain di samping kapasitansi yang ada pada alat ukur. Oleh karena itu, semua bagian bertegangan rendah dilindungi dengan tabir logam (T) yang ditanahkan.



Gambar 13.1 Jembatan Schering

C_s adalah kondensator standar, 50 – 500 μF , dengan rugi-rugi dielektrik yang dapat diabaikan. Impedansi komponen R_1 , R_2 , dan C_v dibuat sedemikian rupa sehingga tegangan V_{ab} dan V_{cd} tidak melebihi 20 V. Bila benda uji tembus listrik, maka tegangan terminal b dan d naik dan dapat merusak komponen R_1 , R_2 , dan C_v . Untuk mencegahnya dipasang sela protector G.

R_1 dan C_v diatur hingga dicapai kondisi seimbang, di mana galvanometer G menunjuk nol. Pada kondisi ini berlaku :

$$Z_{ab} Z_{cd} = Z_{ad} Z_{bc} \quad 13.1$$

Dimana :

$$Z_{ab} = \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x}; Z_{bc} = R_1; Z_{ad} = \frac{1}{j\omega C_s}$$

dan

$$Z_{dc} = \frac{R_2}{1 + j\omega C_v R_2} \quad 13.2$$

Substitusi Persamaan 13.2 ke dalam Persamaan 13.1 diperoleh :

$$C_x = \frac{C_s R_2}{R_1} \quad 13.3$$

$$R_x = \frac{1}{\omega C_x \text{Tg } \delta} \quad 13.4$$

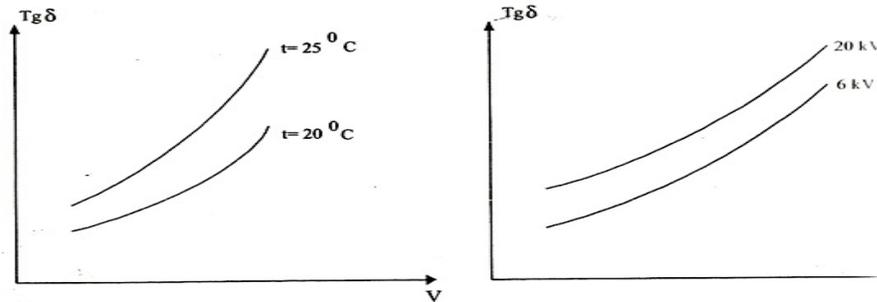
$$\text{Tg } \delta = \omega C_v R_2 \quad 13.5$$

Dalam prakteknya, bila frekuensi tegangan sumber 50 Hz, tahanan resistor R_2 dibuat 1000 π Ohm. Jika C_v dinyatakan dalam satuan microfarad, maka Persamaan 8.5 menjadi :

$$\text{Tg } \delta = 0,1 C_v \quad 13.6$$

Dewasa ini jembatan Schering sudah dibuat otomatis sehingga kondisi seimbang diatur secara otomatis. Tanpa melakukan perhitungan, hasil pengukuran $\text{Tg } \delta$ dan C_x dapat ditampilkan dan dicetak.

Pengukuran $Tg \delta$ dilakukan dalam dua keadaan : **pertama** mengukur $Tg \delta$ sebagai fungsi tegangan pengujian pada temperatur konstan; dan **kedua** mengukur $Tg \delta$ sebagai fungsi temperatur pada tegangan yang konstan. Kedua pengukuran ini akan menghasilkan kurva seperti Gambar 13.2 di bawah ini.



Gambar 13.2 Kurva Hasil Pengukuran $Tg \delta$

13.3 PENGUKURAN TAHANAN DIELEKTRIK PADAT

13.3.1 Metode Pengukuran Langsung

Pengukuran tahanan dielektrik meliputi pengukuran tahanan permukaan dan tahanan volume. Jika suatu dielektrik ditempatkan di antara dua elektroda ukur yang diberi tegangan, maka arus yang diberikan sumber tegangan merupakan jumlah arus permukaan dengan arus volume. Karena itu, tahanan isolasi dapat ditulis sebagai berikut :

$$R = \frac{V}{I} = \frac{V}{I_p + I_v} \quad 13.7$$

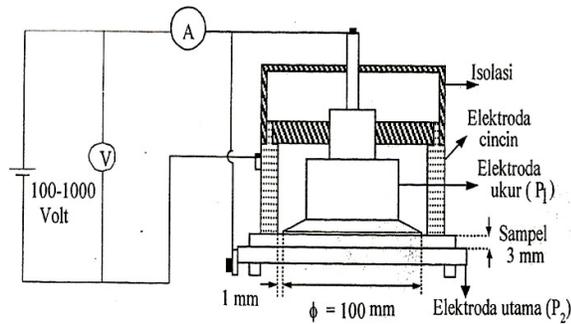
Jika I_v dibuat sama dengan nol, maka tahanan yang terukur adalah tahanan permukaan, yaitu :

$$R_p = \frac{V}{I_p} \quad 13.8$$

Jika I_p dibuat sama dengan nol, maka tahanan yang terukur adalah tahanan volume, yaitu :

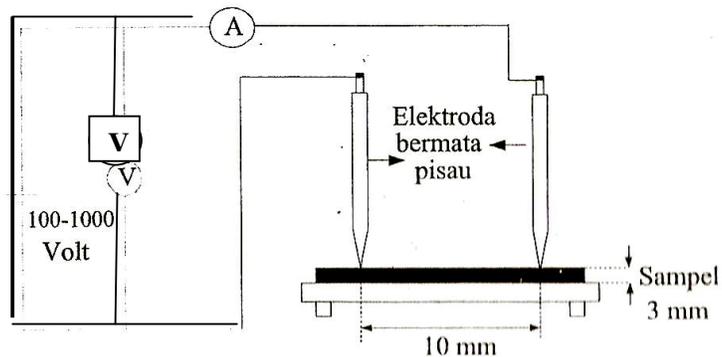
$$R_v = \frac{V}{I_v} \quad 13.9$$

Pengukuran tahanan isolasi membutuhkan dua elektroda piring masing-masing berukuran antara 5 – 10 cm dan satu elektroda cincin. Lebar cincin sekurang-kurangnya dua kali tebal dielektrik yang diuji. Tebal dielektrik uji umumnya sama 3 – 12 mm. Susunan elektroda dan rangkaian pengukuran tahanan permukaan ditunjukkan pada Gambar 13.3. Dalam pengukuran ini, arus volume diusahakan sama dengan nol, hal ini dilakukan dengan menyamakan tegangan kedua elektroda P_1 dan P_2 .



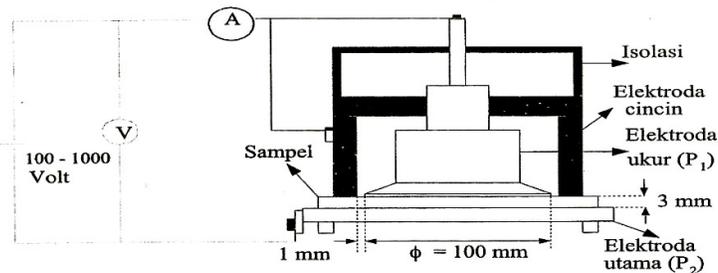
Gambar 13.3. Pengukuran Tahanan Permukaan

Tahanan permukaan dapat juga diukur dengan menggunakan elektroda bermata pisau yang panjang 10 cm. jarak antara kedua elektroda dibuat 1 cm. Rangkaian pengukur ditujukan seperti pada gambar 13.4. Tahanan permukaan dapat dihitung berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus.



Gambar 13.4. Pengukuran Tahanan Permukaan Dengan Elektroda Bermata Pisau

Susunan elektroda dan rangkaian pengukuran tahanan volume ditunjukkan pada Gambar 13.5. Dalam hal ini, arus permukaan diusahakan sama dengan nol, yang dilakukan dengan menyamakan tegangan elektroda P_1 dengan elektroda cincin.

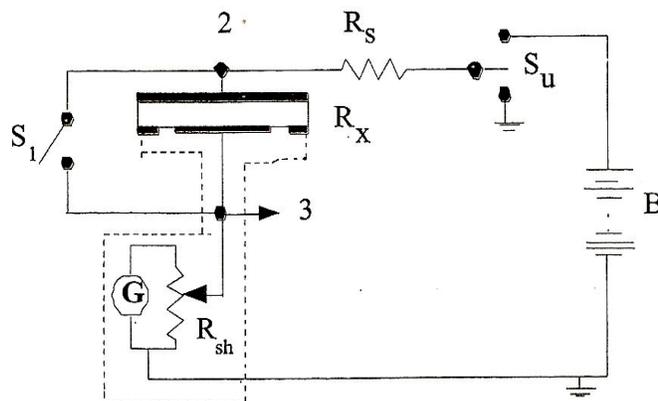


Gambar 13.5. Pengukuran Tahanan Volume

Tegangan yang digunakan untuk pengukuran tahanan isolasi adalah tegangan searah 100 – 1000 Volt.

13.3.2 Metode Pengukuran Tidak Langsung

Karena arus yang mengalir pada suatu isolasi sangat kecil, maka pengukuran tahanan dengan menggunakan ammeter seperti metode di atas sulit dilaksanakan. Oleh karena itu arus diukur dengan menggunakan galvanometer. Ada dua metode pengukuran dengan galvanometer, yaitu (1) rangkaian seri, di mana resistor shunt terhubung seri dengan dielektrik yang akan diuji; (2) rangkaian paralel, dimana resistor shunt terhubung paralel dengan dengan dielektrik yang akan diuji. Pada Gambar 13.6 ditunjukkan pengukuran tahanan volume suatu dielektrik dengan rangkaian seri. Elektroda pengukuran sama seperti pada pengukuran langsung (Gambar 13.5).



Gambar 13.6. Pengukuran Tahanan Isolasi Rangkaian Seri

B adalah sumber tegangan dc yang stabil dan dapat membangkitkan tegangan antara 500 – 1000 V. Galvanometer harus mempunyai sensitifitas yang tinggi dan diparalelkan dengan suatu resistor shunt (R_{sh}). Penunjukan pada galvanometer dapat diatur dengan mengatur resistor shunt, dengan demikian diperoleh ketelitian pengukuran $\pm 10\%$. Resistor standar (R_s) terbuat dari bahan manganin, 10^6 Ohm dengan ketelitian $\pm 10\%$. Mula-mula saklar S_1 dibuka dan S_u dihubungkan ke sumber tegangan, dalam hal ini resistor standar dengan dielektrik yang diuji terhubung seri. Resistor shunt diatur hingga Galvanometer G menunjukkan penyimpangan yang besar atau dapat terbaca. Dicatat nilai faktor pengali resistor shunt dan penyimpangan galvanometer. Kemudian saklar S_u dibumikan untuk membuang muatan dari elektroda uji. Berikutnya, saklar S_1 ditutup dan S_u dihubungkan ke sumber tegangan, dalam hal ini yang terukur sekarang hanya resistor standar. Resistor shunt diatur kembali hingga Galvanometer G menunjuk penyimpangan yang besar atau dapat dibaca. Dicatat kembali nilai faktor pengali resistor shunt dan penyimpangan galvanometer. Setelah selesai pengukuran, saklar S_u dibumikan untuk membuang muatan dari beda uji ke tanah.

Tahanan isolasi dihitung dengan rumus di bawah ini :

$$R_x = \frac{D_s F_s - D_x F_x}{D_x F_x} R_s \quad 13.10$$

Di mana D_s dan F_s adalah penyimpangan galvanometer dan faktor pengali resistor shunt pada saat saklar S_1 tertutup (yang terukur hanya resistor standar); D_x dan F_x adalah penyimpangan galvanometer dan faktor pengali resistor shunt pada saat saklar S_1 terbuka (beda uji terhubung seri dengan resistor standar).

Radius efektif elektroda pengukuran adalah :

$$r = r_1 + \frac{g}{2} - \tau \quad 13.11$$

di mana :

$$\tau = \frac{2d}{\pi} \ln \cosh \frac{\pi g}{4d} \quad 13.12$$

r_1 = Radius elektroda P_1

g = Jarak sela elektroda P_1 dengan elektroda cincin

d = Tebal dielektrik

Setelah R_x diketahui, tahanan jenis dielektrik dapat dihitung dengan rumus di bawah ini :

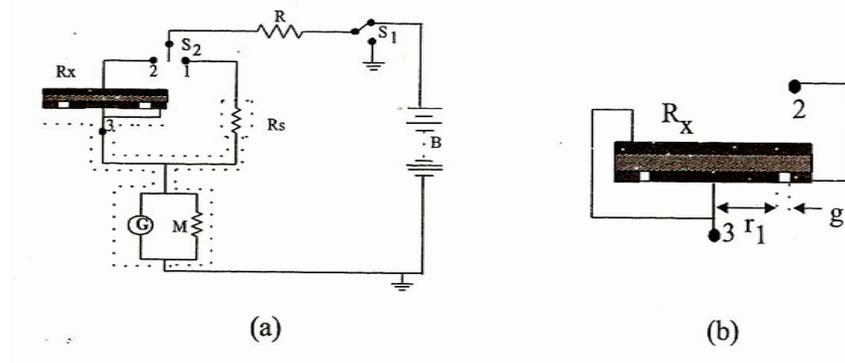
Tahanan jenis volume :

$$\rho_v = \frac{R_x \pi r^2}{t} \quad 13.13$$

Tahanan jenis permukaan :

$$\rho_p = \frac{\pi (2r_1 + g)}{g} R_x \quad 13.14$$

Metode pengukuran tahanan volume suatu dielektrik dengan rangkaian paralel ditunjukkan pada Gambar 13.7.a. Dalam hal ini, elektroda pengukuran tetap sama seperti pada rangkaian seri. Jika yang hendak diukur adalah tahanan permukaan, maka elektroda yang dihubungkan ke terminal pengukuran adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 13.7.b.



Gambar 8.7. Pengukuran Tahanan Isolasi Paralel

Mula-mula Galvanometer G dikalibrasi dengan resistor standar R_s , yaitu dengan memindahkan saklar S_2 pada posisi 1 dan mencatat penyimpangan pada galvanometer. Misalkan penyimpangan galvanometer adalah D_s . kemudian saklar S_2

dipindahkan ke posisi 2, dan dicatat penyimpangan pada galvanometer. Misalkan hasil yang diperoleh pada keadaan ini adalah D_x . Setelah selesai pengukuran, saklar S_1 dibumikan untuk membuang muatan dari benda uji ke tanah.

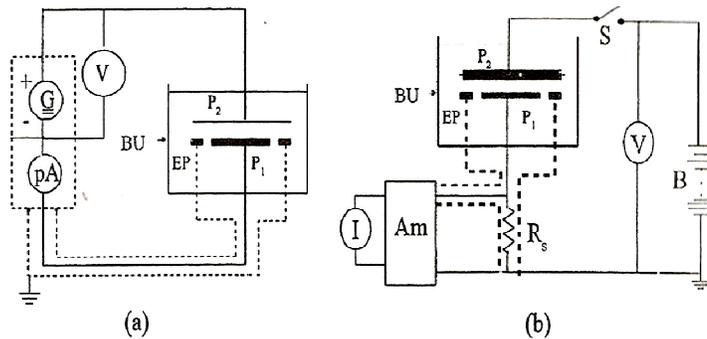
Dengan metode ini, tahanan isolasi adalah seperti rumus di bawah ini :

$$R_x = \frac{D_s}{D_x} R_s \quad 13.15$$

13.4 PENGUKURAN KONDUKTIFITAS DIELEKTRIK CAIR

Konduktivitas dielektrik cair dapat diukur dengan salah satu metode yang ditunjukkan pada gambar 8.8. Elektroda ukur bersama-sama dengan dielektrik cair dimasukkan ke dalam suatu bejana (B). elektroda ukur terdiri dari dua piring logam P_1 dan P_2 yang ukurannya sama. Untuk meratakan distribusi medan listrik di antara kedua elektroda, maka sebuah elektroda cincin yang disebut elektroda pelindung (EP) dipasang mengelilingi elektroda P_1 .

Alat ukur picoammeter pada rangkaian pengukuran Gambar 13.7.a sangat sensitive terhadap pengaruh medan luar. Untuk mencegah pengaruh medan luar terhadap arus pengukuran, maka kabel dan alat ukur diberi tabir pelindung, dengan demikian kesalahan pengukuran dapat dikurangi.



Gambar 13.8. Pengukuran Konduktivitas Dielektrik Cair

Prinsip kerja metode pengukuran pada Gambar 13.8.a didasarkan kepada hukum Ohm :

$$R = \frac{V}{I} = \frac{d}{\sigma A} = \frac{d}{\sigma \pi r^2} \quad 8.16$$

dimana :

- V = Tegangan sumber
- I = Arus sumber
- d = Jarak sela elektroda
- A = Luas efektif permukaan elektroda
- r = Radius efektif elektroda ukur

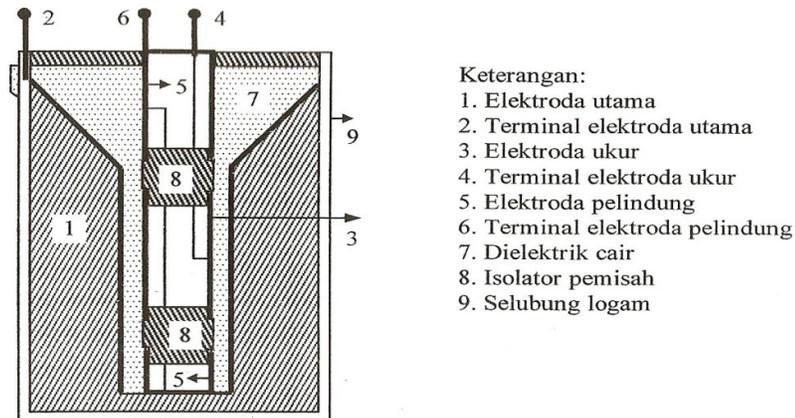
Dengan demikian konduktivitas dapat dihitung dengan rumus di bawah ini :

$$\sigma = \frac{I d}{\pi r^2 V} \quad 13.17$$

Arus yang terukur umumnya berkisar beberapa pikoampere. Untuk itu dapat digunakan galvanometer kumparan putar yang peka ataupun pengukur arus dengan penguat elektronik yang jauh lebih peka.

Bila metode pengukuran menggunakan penguat dc seperti pada Gambar 13.8.b, ketelitian gabungan penguat dan indicator harus $\pm 10\%$. Untuk memperkecil kesalahan ukur, maka tahanan isolasi antara elektroda pelindung (EP) dengan elektroda utama (P_1) harus lebih kecil dari $100R_s$. Sumber tegangan searah untuk pengukuran ini dapat dilengkapi dengan stabilisator tegangan. Besar tegangan yang dibutuhkan 250 Volt. Setelah saklar S ditutup, maka arus yang sangat kecil mengalir pada resistor tersebut. Besaran jatuh tegangan pada resistor standar menjadi input bagi penguat dc. Jika indicator I merupakan alat ukur tahanan, maka indicator secara langsung menunjukkan nilai tahanan benda uji. Pengukuran dilakukan satu menit setelah saklar S ditutup. Tabir pelindung berguna untuk mengurangi efek arus bocor, untuk mengurangi kesalahan pengukuran.

Jenis elektroda lain yang dapat digunakan untuk pengukuran dielektrik cair adalah elektroda silinder seperti ditunjukkan pada Gambar 13.9.



Gambar 13.9. Elektroda Silinder Untuk Pengukuran Resistivitas Dielektrik Cair

Resistivitas volume jika menggunakan elektroda silinder adalah sebagai berikut :

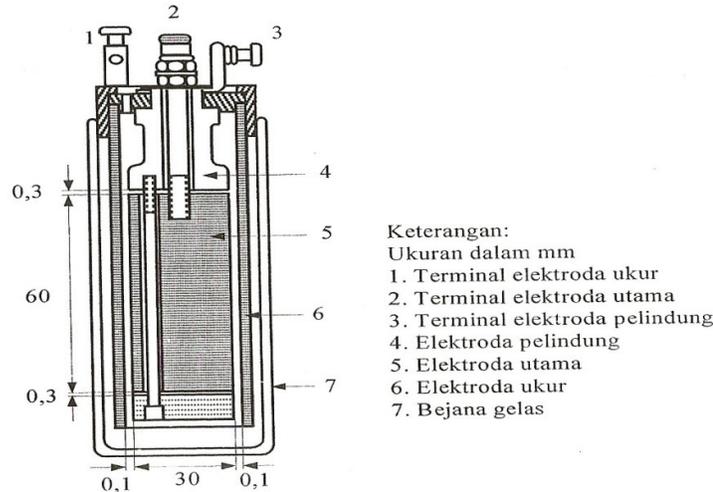
$$\rho_p = \frac{2\pi R_x l}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \text{ (Ohm-m)} \quad 13.18$$

dimana :

- l = panjang efektif elektroda ukur (m)
- d_1 = diameter luar elektroda ukur (m)
- d_2 = diameter dalam elektroda utama (m)

Contoh ukuran elektroda standar menurut JIS C 2101, yang digunakan untuk pengukuran konduktivitas dielektrik cair pada gambar 13.10.

Sebelum pengukuran dimulai, elektroda harus dicuci bersih. Tahanan udara di antara elektroda pada keadaan kosong dan bersih harus lebih besar dari tahanan isolasi sampel uji, pada umumnya lebih dari 10^{14} Ohm. Jika ukuran tahanan isolasi sampel tidak diketahui, maka elektroda harus dibersihkan sehingga alat ukur yang digunakan untuk mengukur tahanan udara di antara kedua elektroda menunjukkan nilai maksimum.



Gambar 8.10. Elektroda Standar Untuk Pengukuran Resistivitas Dielektik Cair

Setelah elektroda dibersihkan, elektroda dibilas dengan sampel uji dua atau tiga kali. Selanjutnya, elektroda diisi dengan 25 cc dengan sampel dielektrik cair yang akan diukur. Kemudian bejana uji ditutup dengan rapat. Pengukuran dilakukan dengan menghubungkan bejana uji dengan rapat. Pengukuran dilakukan dengan menghubungkan terminal elektroda-elektroda sesuai dengan rangkaian pada Gambar 13.8. Bila kapasitas elektroda tanpa dielektrik cair diketahui adalah C , maka resistivitas volume dapat dihitung dengan rumus di bawah ini :

$$\rho_p = 3,6 \pi C R_x \quad 13.19$$

Nilai C untuk elektroda dengan ukuran seperti pada Gambar 13.9 adalah ± 50 pF. Jika nilai C belum diketahui, maka pengukuran C dilakukan dengan menggunakan alat ukur faktor rugi-rugi dielektrik (jembatan Schering).

13.5 PENGUKURAN PELUAHAN PARSIAL

Peluahan sebagian merupakan salah satu penyebab kerusakan pada bahan isolasi. Oleh karena itu pengukuran aktifitas peluahan sebagian adalah hal yang sangat penting dalam peralatan tegangan tinggi. Diharapkan dengan memonitor aktifitas peluahan sebagian dengan kontiniu dapat diketahui kerusakan isolasi secara dini sehingga tidak sampai merusak sistem atau peralatan secara keseluruhan.

Pengukuran peluahan sebagian umumnya dilakukan dengan mendeteksi pulsa listrik dalam rangkaian tegangan tinggi. Sensitifitas pengukuran mengalami

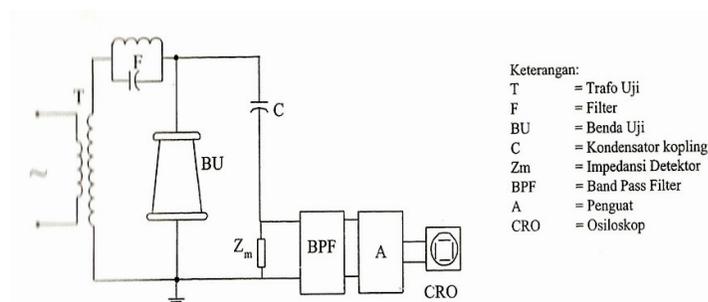
keterbatasan dengan adanya deru (*noise*) yang terjadi pada saat pengukuran, di mana kehadiran deru ini menyebabkan masalah dalam pengukuran peluahan sebagian. Oleh karena itu, pengukuran peluahan sebagian harus mampu membedakan deru yang terjadi karena peluahan sebagian dan deru yang datang dari sumber yang lain.

Pengukuran ini bertujuan untuk mengukur nilai tegangan yang membuat benda uji mengalami peluahan, inilah yang disebut tegangan mulai peluahan sebagian (*partial discharge inception voltage*). Setelah peluahan terjadi beberapa saat, tegangan diturunkan dan diukur pada tegangan berapa peluahan itu padam, dan nilai tegangan inilah yang disebut dengan tegangan pemadaman peluahan (*partial discharge extinction voltage*).

Telah dijelaskan sebelumnya, bahwa peristiwa peluahan parsial ditandai dengan timbulnya arus pulsa yang sangat kecil. Frekuensi arus pulsa ini berada di antara 100 kHz – 10MHz. alat ukur peluahan parsial ada yang mengukur langsung arus pulsa tersebut dan ada yang mengamati intensitas gelombang electromagnet yang dirasiasikan arus pulsa, yang terakhir ini disebut pengukuran tidak langsung. Berikut ini akan dijelaskan prinsip kerja kedua alat tersebut.

13.5.1 Pengukuran Langsung

Detektor peluahan parsial dengan pengukuran langsung ditujukan pada Gambar 13.11. Untuk mencegah masuknya sinyal peluahan parsial yang terjadi pada trafo uji, dipasang filter F. Bila pada benda uji terjadi peluahan parsial, maka arus pulsa akan mengalir pada impedansi Z_m , sehingga menimbulkan beda potensial yang sangat kecil pada impedansi tersebut. Beda potensial inilah yang menjadi sinyal bagi detector. Melalui filter BPF sinyal diteruskan ke penguat A sehingga teramati pada osiloskop. Filter BPF menapis sinyal yang diakibatkan arus berfrekuensi rendah yang bukan berasal dari peluahan parsial, tetapi meneruskan sinyal frekuensi tinggi yang ditimbulkan arus pulsa peluahan parsial.

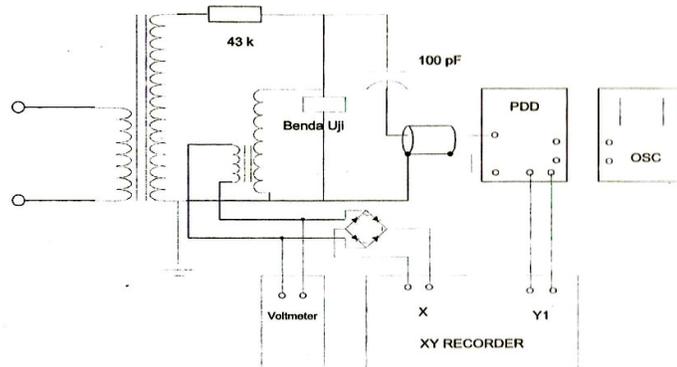


Gambar 13.11. Detektor Peluahan Parsial Pengukuran Langsung

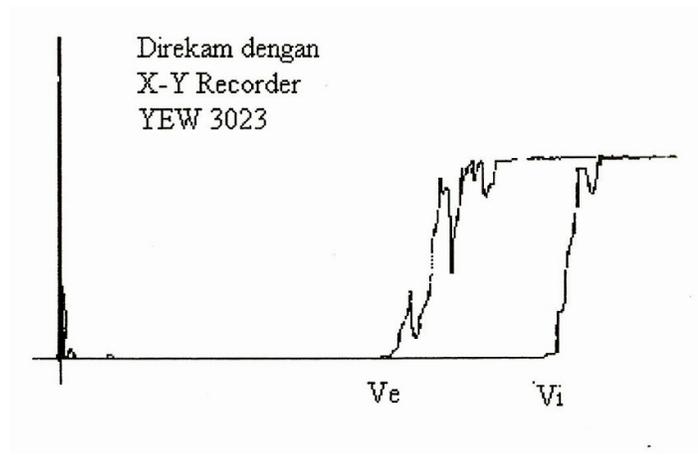
Untuk memperoleh hasil pengukuran yang lebih akurat, maka digunakan rekoder “X – Y” dan rangkaian pengukuran disusun seperti pada Gambar 13.12. Dalam pengukuran ini, rekoder akan merekam tegangan pada sumbu X dan arus peluahan pada sumbu Y, kedua-duanya sebagai fungsi waktu. Jika tegangan pada benda uji dinaikkan, rekoder akan merekam kenaikan tegangan tersebut dan besarnya

arus peluahan yang terjadi. Jika peluahan belum terjadi, arus peluahan sama dengan nol dan hasil rekaman berimpit dengan waktu (X).

Jika peluahan terjadi, maka arus peluahan mulai naik. Nilai tegangan pada titik mulai adanya arus peluahan merupakan nilai tegangan mulai pemadaman (V_i). Untuk lebih jelasnya, contoh hasil pengukuran diberikan pada Gambar 13.13. Setelah peluahan berlangsung beberapa saat, tegangan pengujian diturunkan sampai arus peluahan menunjuk nol. Nilai tegangan pada saat arus peluahan menunjuk nol merupakan tegangan pemadaman peluahan (V_e).



Gambar 13.12. Rangkaian Pengukuran Tegangan Mulai (V_i) dan Pemadaman (V_e) Peluahan Sebagian



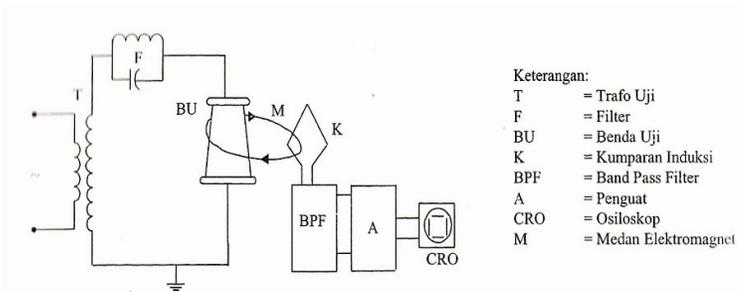
Gambar 8.13. Contoh Hasil Pengukuran Rekoder X-Y

13.5.2 Pengukuran Tidak Langsung

Detektor peluahan parsial dengan pengukuran tidak langsung ditunjukkan pada gambar 13.14. Peralatan hampir sama dengan pengukuran langsung, hanya cara memperoleh sinyal pulsa peluahan yang berbeda.

Bila pada benda uji terjadi peluahan parsial, maka akan terjadi arus pulsa berfrekuensi tinggi. Arus ini menimbulkan medan elektromagnet yang diradiasi ke

sekitar benda uji. Medan elektromagnet ini menginduksikan gaya gerak listrik pada kumparan K dan gaya gerak listrik inilah yang menjadi sinyal bagi detektor. Melalui filter BPF sinyal diteruskan ke penguat A sehingga teramati pada osiloskop. Filter BPF menapis sinyal yang diakibatkan arus berfrekuensi rendah yang bukan berasal dari peluahan parsial, tetapi meneruskan sinyal yang ditimbulkan arus pulsa peluahan parsial.

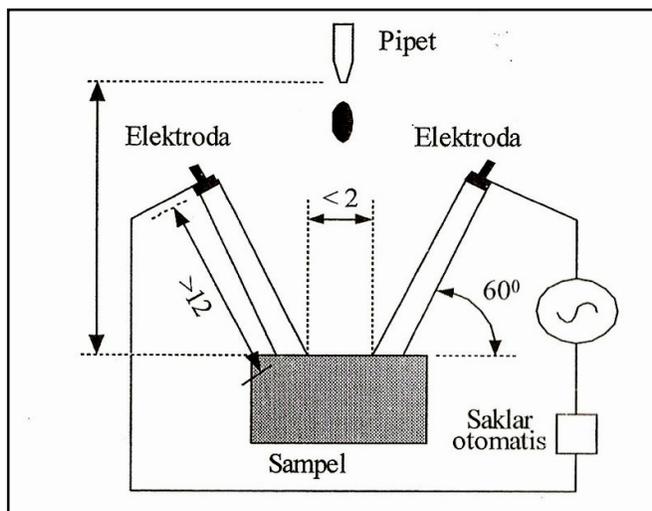


Gambar 8.14. Detektor Peluahan Parsial Pengukuran Tidak Langsung

13.6 PENGUJIAN KERAK ISOLASI

Pengujian kerak pada bahan isolasi dilakukan disesuaikan dengan uraian di atas. Metode pengujian menurut VDE adalah dengan menempatkan dua elektroda platina di atas sampel yang tebalnya ≥ 3 mm, seperti ditunjukkan pada Gambar 13.15.

Elektroda diberi tegangan 380 Volt ac dan melalui pipet ditetaskan larutan air dengan konduktifitas tertentu setiap 30 detik di atas permukaan slarutan ini akan menimbulkan arus bocor. Hasil pengujian ditetapkan berdasarkan jumlah tetesan larutan yang menimbulkan terbukanya saklar otomatis pada rangkaian pengujian atau dapat ditentukan berdasarkan ukuran kedalaman terbesar dari rongga yang terjadi akibat arus bocor.



Gambar 13.14. Rangkaian pengujian Kerak

