

TEKNIK TEGANGAN TINGGI TEL12068

Dr Ir Dina Maizana MT

Mari kita berdoa menurut agama dan kepercayaan masing-masing sebelum kelas dimulai.

Doa dimulai...



CAPAIAN PEMBELAJARAN MATAKULIAH (CPMK)

1. Mahasiswa mampu menganalisa berbagai mekanisme kerusakan dan aplikasi dielektrik vakum, cair, padat dan komposit

Topik

1. PENDAHULUAN
2. BREAKDOWN INTRINSIK
3. BREAKDOWN ELECTROMECHANICAL
4. BREAKDOWN TERMAL
5. KERUSAKAN DIELEKTRIK PADAT DALAM PRAKTEK
6. RINCIAN DI DILEKTRIK KOMPOSIT
7. DILEKTRIK SOLID DIGUNAKAN DALAM PRAKTEK

Pendahuluan

- Bahan dielektrik padat digunakan dalam semua jenis peralatan dan perangkat listrik untuk mengisolasi satu komponen pembawa arus dari yang lain ketika beroperasi pada voltase yang berbeda.
- Dielektrik padat memiliki kekuatan pemecahan yang lebih tinggi dibandingkan dengan cairan dan gas. Dielektrik yang baik harus memiliki:
 - Kehilangan dielektrik yang rendah
 - Kekuatan mekanik yang tinggi
 - Harus bebas dari inklusi dan kelembaban gas
 - Tahan terhadap kerusakan termal dan kimia
- Jenis bahan isolasi padat:
 - Bahan organik (kertas, kayu dan karet)
 - Bahan anorganik (Mika, gelas dan porselen dan polimer sintetis)

Bahan Isolasi Padat



XLPE

Porcelain



Paper

Klasifikasi dielektrik padat

- Kerusakan pada dielektrik padat terjadi, jika kekuatan dielektrik padat kurang dari tegangan listrik.
- Mekanisme Breakdown dalam dielektrik padat tergantung pada waktu penerapan tegangan, dan dapat diklasifikasikan sebagai berikut:
 1. Kerusakan intrinsik atau ionik
 2. Kerusakan elektromekanis
 3. Kegagalan karena pohon dan pelacakan Kerusakan termal
 4. Elektrokimia, dan
 5. Kerusakan karena pelepasan internal

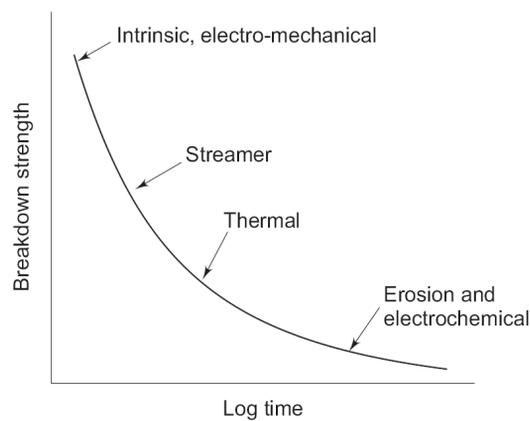


Fig. 4.1 Variation of breakdown strength with time after application of voltage

Kerusakan Intrinsik

- Intrinsic Breakdown terjadi jika diterapkan pada dielektrik padat meningkat menjadi 10^6 Volt / cm dalam durasi singkat dalam urutan 10^{-8} detik.
- Rincian ini tergantung pada keberadaan elektron bebas yang mampu bermigrasi melalui kisi dielektrik.
- Berdasarkan percobaan, kekuatan listrik maksimum yang tercatat adalah 15 MV / cm untuk Polyvinyl pada -196 0C. Kekuatan maksimum yang biasanya diperoleh berkisar dari 5 MV / cm hingga 10 MV / cm
- Ada dua jenis mekanisme pemecahan intrinsik, mis
- Kerusakan Elektronik dan Kerusakan Streamer (longsor salju).

Kerusakan Elektronik

- Diasumsikan bersifat elektronik (terjadi dalam waktu 10^{-8} detik)
- Kepadatan awal elektron konduksi (bebas) diasumsikan besar dan terjadi tumbukan elektron-elektron.
- Ketika medan listrik diterapkan, elektron memperoleh energi dan melintasi celah terlarang dari valensi ke pita konduksi.
- ini berulang, semakin banyak elektron yang tersedia di pita konduksi, yang akhirnya mengarah ke kerusakan.

Longsor atau Streamer Breakdown

- Mirip dengan kerusakan dalam gas karena ionisasi kumulatif. Elektron konduksi memperoleh energi yang cukup di atas medan listrik kritis tertentu dan menyebabkan pembebasan elektron dari atom kisi dengan tabrakan.
- Gerak elektron dari katoda ke anoda akan mendapatkan energi dari medan dan kehilangannya selama tumbukan. Ketika energi yang diperoleh oleh elektron melebihi potensi ionisasi kisi, elektron tambahan akan dibebaskan karena tumbukan elektron pertama.
- Proses ini berulang dengan sendirinya menghasilkan pembentukan longsor elektron, dan kerusakan akan terjadi ketika longsor melebihi ukuran kritis tertentu.
- Dalam prakteknya, kerusakan tidak terjadi oleh pembentukan longsor tunggal, tetapi terjadi sebagai akibat dari banyak longsor yang terbentuk dan memanjang secara bertahap melalui seluruh ketebalan material seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.

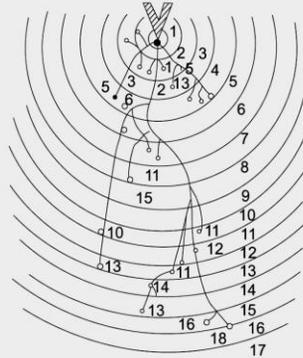


Fig. 4.2 Breakdown channels in perspex between point-plane electrodes. Radius of point 0.01 in, thickness 0.19 in. Total number of impulses 190. Number of channels produced 16; (n) point indicates end of nth channel. Radii of circles increases in units of 10^{-2} in.

Source: R. Cooper, *International Journal of Elec. Engg. Education*, vol. 1, 241 (1963)

Kerusakan Elektromekanis

- Ketika dielektrik padat mengalami medan listrik yang tinggi, kegagalan terjadi karena gaya tekan elektrostatis yang
- Dapat melebihi kekuatan tekan mekanis. Jika ketebalan spesimen dilakukan dan tekan pada ketebalan d berada di bawah tegangan V , maka tegangan tekan yang dikembangkan secara elektrik berada dalam kesetimbangan jika,

$$\epsilon_0 \epsilon_r \frac{V^2}{2d^2} = (Y) \text{Ln} \left[\frac{d_0}{d} \right] \quad \text{atau} \quad V^2 = d^2 \left[\frac{2Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right] \text{Ln} \left[\frac{d_0}{d} \right]$$

$Y = \text{the Young's modulus}$

Max. Electric stress before BD

$$\text{Mechanical instability occurs } d/d_0 = 0.6 \text{ or } d_0/d = 1.67$$

$$E_{\text{max}} = \frac{V}{d_0} = 0.6 \left[\frac{Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right]^{1/2}$$

EEET413 HIGH VOLTAGE ENGINEERING

Kerusakan termal

- Ketika medan listrik diterapkan pada dielektrik, arus konduksi, betapapun kecilnya, mengalir melalui material. Arus memanaskan spesimen dan suhu naik.
- Panas yang dihasilkan dipindahkan ke media sekitarnya dengan konduksi melalui dielektrik padat dan oleh radiasi dari permukaan luarnya.
- Kesetimbangan tercapai ketika panas yang digunakan untuk menaikkan suhu dielektrik, ditambah panas yang dipancarkan, sama dengan panas yang dihasilkan. Ketika medan listrik diterapkan pada dielektrik, arus konduksi, betapapun kecilnya, mengalir melalui material.
- Arus memanaskan spesimen dan suhu naik. Panas yang dihasilkan dipindahkan ke media sekitarnya dengan konduksi melalui dielektrik padat dan oleh radiasi dari permukaan luarnya. Kesetimbangan tercapai ketika panas yang digunakan untuk menaikkan suhu dielektrik, ditambah panas yang dipancarkan, sama dengan panas yang dihasilkan.

- Keseimbangan tercapai ketika panas yang digunakan untuk menaikkan suhu dielektrik, ditambah panas yang dipancarkan, sama dengan panas yang dihasilkan. Panas yang dihasilkan di bawah tegangan as E diberikan sebagai,

$$W_{dc} = E^2 \sigma \quad \text{W/cm}^2$$

σ = dc conductivity of the specimen

Panas yang dihasilkan di bawah bidang a.c,

$$W_{ac} = \frac{E^2 f \epsilon_r \tan \delta}{1.8 \times 10^{12}} \quad \text{W/cm}^2$$

f = frequency (Hz), δ = loss angle of the dielectric material
E = rms value

Panas mereda (W_T) diberikan oleh

$$W_T = C_v \frac{dT}{dt} + \text{div}(K \cdot \text{grad} \cdot T)$$

C_v = Specific heat of the specimen

T = temperature of the specimen,

K = thermal conductivity of the specimen

t = time over which the heat is dissipated

BD terjadi apabila

$W_{dc} > W_T$ for dc

$W_{ac} > W_T$ for ac

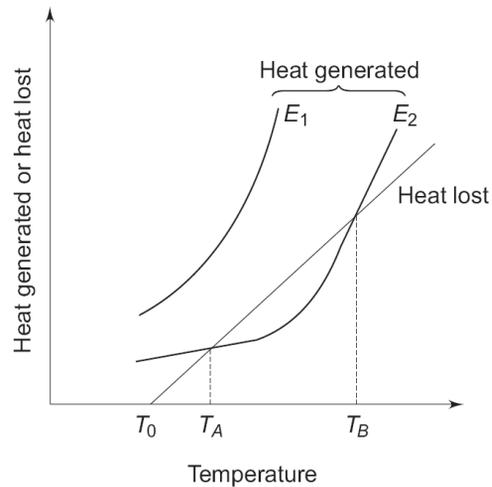


Fig. 4.3 *Thermal instability in solid dielectrics*

contoh

- Spesimen padat dielektrik memiliki konstanta dielektrik 4,2, dan $\tan \delta = 0,001$ pada frekuensi 50 Hz. Jika terkena medan bolak-balik 50 kV / cm, hitung panas yang dihasilkan dalam spesimen karena kehilangan listrik. Menggunakan persamaan

$$\begin{aligned}
 W_{ac} &= \frac{E^2 f \epsilon_r \tan \delta}{1.8 \times 10^{12}} \\
 &= \frac{(50 \times 10^3)^2 (50)(4.2)(0.001)}{1.8 \times 10^{12}} \\
 &= 0.291 \text{ mW/cm}^3
 \end{aligned}$$

Kerusakan Solid Dielektrik dalam Praktek

- Ada beberapa jenis kerusakan yang tidak termasuk dalam kerusakan intrinsik atau kerusakan termal tetapi terjadi setelah waktu yang lama, misalnya. kerusakan karena pelacakan di mana trek konduksi kering terbentuk pada permukaan insulasi.
- Trek ini bertindak sebagai jalur pengarah - mengarah ke gangguan bertahap.
- Jenis lain dalam kategori ini adalah kerusakan elektrokimia yang disebabkan oleh transformasi kimia seperti elektrolisis, pembentukan ozon dll. Kegagalan juga terjadi karena pelepasan sebagian yang dibawa di kantong udara di dalam isolasi.
- Kerusakan ini sangat penting dalam isolasi kertas diresapi yang digunakan pada kabel dan kapasitor HV.

Kerusakan Kimia dan Elektrokimia

- Di hadapan udara dan gas lainnya, bahan dielektrik mengalami perubahan kimia ketika mengalami tekanan listrik terus menerus. Beberapa reaksi kimia penting yang terjadi adalah:
- Oksidasi: Di hadapan udara atau oksigen, bahan-bahan seperti karet dan polietilen mengalami oksidasi sehingga menimbulkan retak permukaan.
- Hidrolisis: Ketika uap air atau uap air hadir pada permukaan dielektrik padat, hidrolisis terjadi dan material kehilangan sifat listrik dan mekaniknya. Bahan seperti kertas, pita kapas dan bahan selulosa lainnya memburuk dengan sangat cepat akibat hidrolisis.
- Tindakan Kimia: Degradasi kimia progresif dapat terjadi karena berbagai proses seperti ketidakstabilan kimiawi pada suhu tinggi, oksidasi, retak dan hidrolisis.

Kerusakan karena Penanaman Pohon dan Pelacakan

- Ketika dielektrik padat mengalami tekanan listrik untuk waktu yang lama, dua jenis tanda yang terlihat diamati.
 - a) Kehadiran jalur konduksi melintasi permukaan insulasi
 - b) Mekanisme dimana arus bocor melewati jalur konduksi, akhirnya mengarah ke pembentukan percikan.

-
- Pelacakan adalah pembentukan jalur konduksi kontinu di permukaan isolasi terutama karena erosi permukaan di bawah aplikasi tegangan. Dalam prakteknya, permukaan bahan dielektrik padat selalu memiliki konduktor film, yang terbentuk karena kelembaban. Pada penerapan tegangan, film mulai melakukan, menghasilkan generasi panas, dan permukaan mulai menjadi kering. Film konduksi menjadi terpisah karena pengeringan, dan oleh karena itu percikan api merusak permukaan dielektrik. Dengan bahan isolasi organik, karbon dielektrik di daerah percikan, dan daerah berkarbonisasi bertindak sebagai saluran penghantar permanen. Ini adalah proses kumulatif, dan kegagalan isolasi terjadi ketika trek berkarbonisasi menjembatani jarak antara elektroda

-
- Penyebaran saluran percikan selama pelacakan, dalam bentuk cabang-cabang pohon disebut treeing. P
 - Penebangan terjadi karena erosi material di ujung percikan.
 - Erosi mengakibatkan pengerasan permukaan dan karenanya menjadi sumber kontaminasi kotoran.
 - Pelacakan terjadi bahkan pada voltase sangat rendah dari urutan pertarungan 100 V, sedangkan penanaman pohon membutuhkan voltase tinggi

-
- Penanaman pohon dapat dicegah dengan memiliki permukaan yang bersih, kering, dan tidak rusak serta lingkungan yang bersih.
 - Materi yang dipilih harus tahan terhadap pelacakan. Pengujian standar untuk pelacakan: IEC 587 (1984), ASTM-D-495 (1973) dll.
 - Terkadang grease repellent grease digunakan. Tapi ini perlu pembersihan dan kemunduran yang sering.
 - Fenomena pohon diamati dalam kapasitor dan kabel, dan pekerjaan yang luas sedang dilakukan untuk menyelidiki penyebab sebenarnya dan alami dari fenomena ini.

- Bahan Dielektrik terletak di antara elektroda, Tegangan V_1 melintasi celah udara diberikan sebagai

$$V_1 = \frac{Vd_1}{d_1 + \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_1}\right)d_2}$$

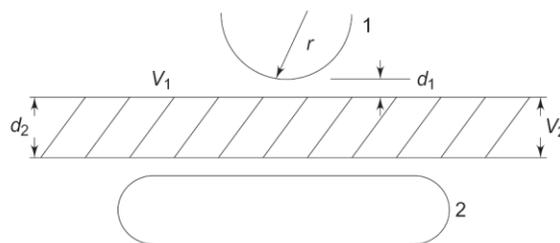
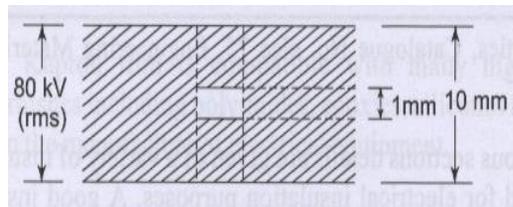


Fig. 4.4 Arrangement for study of treeing phenomenon 1 and 2 are electrodes

- Since $\epsilon_2 > \epsilon_1$, most of the voltage appears across d_1 , air gap. Sparking will occur in the air gap and, charge accumulation takes place on the surface of the insulation.

contoh

- Spesimen dielektrik padat konstanta dielektrik 4.0 yang ditunjukkan pada gambar memiliki kekosongan internal dengan ketebalan 1 mm. Spesimen setebal 1 cm dan dikenakan tegangan 80 kV (rms). Jika kekosongan diisi dengan udara dan jika kekuatan gangguan udara dapat diambil sebagai 30 kV (puncak) / cm, temukan tegangan di mana pelepasan internal dapat terjadi.



- Dari Gambar dapat diketahui itu
- $d_1 = 1 \text{ mm}$; $d_2 = 9 \text{ mm}$;
- $\epsilon_0 = 8.89 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
- $\epsilon_1 = \epsilon_0 \epsilon_r = 4.0 \epsilon_0$
- Using formula,

$$V_1 = \frac{V d_1}{d_1 + \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_1} \right) d_2} \quad V_1 = \frac{V \times 1}{\left(1 + \frac{9}{4} \right)} = \left(\frac{4V}{13} \right)$$

- The voltage at which the air void of 1 mm thickness break down is 3 kV/mm x 1 mm = 3 kV

$$V_1 = \frac{13V}{4} = \frac{13 \times 3}{4} = \frac{39}{4} = 9.75 \text{ kV(peak)}$$

Kerusakan karena Debit Internal

- Bahan isolasi padat mengandung rongga atau rongga di dalam medium atau di batas antara dielektrik dan elektroda.
- Rongga-rongga ini umumnya diisi dengan media dengan kekuatan dielektrik yang lebih rendah, dan konstanta dielektrik dari medium dalam rongga lebih rendah daripada insulasi itu.
- Karenanya medan listrik lebih tinggi dari yang melintasi dielektrik.
- Oleh karena itu, bahkan di bawah tegangan kerja normal, bidang dalam rongga dapat melebihi nilai kerusakannya, dan kerusakan terjadi.

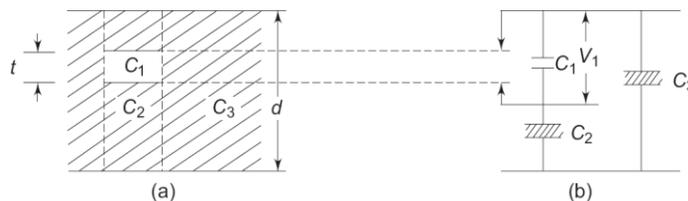


Fig. 4.5 *Electrical discharge in a cavity and its equivalent circuit*

C_1 : capacitance of the void or cavity.

C_2 : capacitance of the dielectric which is series with the void.

C_3 : capacitance of the rest of the dielectric.

V_1 : voltage across the void

V : applied voltage

d_1 : the thickness of the void

d_2 : : the thickness of the dielectric

- Ketika tegangan yang diberikan adalah V , tegangan yang melintasi void adalah

$$V_1 = \frac{Vd_1}{d_1 + \left(\frac{\epsilon_o}{\epsilon_1}\right)d_2}$$

Biasanya $d_1 \ll d_2$, dan jika kita mengasumsikan bahwa rongga diisi dengan gas, maka

$$V_1 = V\epsilon_r \left(\frac{d_1}{d_2}\right)$$

Ketika tegangan V diterapkan, V_1 mencapai kekuatan kerusakan medium dalam rongga (V_i) dan kerusakan terjadi. V_i disebut tegangan awal debit.

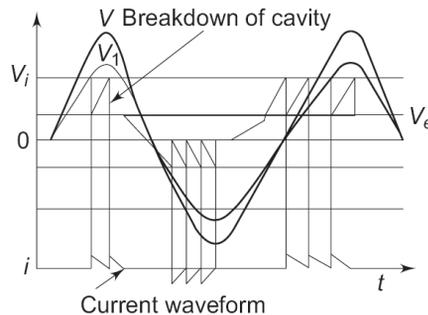


Fig. 4.6 *Sequence of cavity breakdown under alternating voltages*

Kerusakan dielektrik Komposit

- Bahan komposit terdiri dari bahan kimia yang berbeda atau dengan bahan komposisi yang berbeda secara seri atau paralel.
- Reaksi kimia terjadi ketika tegangan diberikan kepada mereka dan akan ada peningkatan yang substansial, jika tegangan diterapkan kontinu dan suhu tinggi hadir.
- Kondisi ini, komposit mengalami kerusakan kimia yang mengarah pada pengurangan kekuatan lis

-
- Contoh komposit
 - Padat / padat: Kabel
 - Padat / Cair: Kapasitor, transformator, switchgear yang diisi oli
 - Solid / SF6: Pemutus sirkuit dll

-
- Properti Dielektrik Komposit dari konstruksi berlapis
 - a) Efek dari beberapa lapisan
 - b) Pengaruh ketebalan lapisan
 - c) Efek Antarmuka

-
- Efek beberapa lapisan
 - Komposit dielektrik paling sederhana terdiri dari dua lapisan dari bahan yang sama.
 - Keuntungan
 - Memiliki kekuatan dielektrik yang lebih tinggi daripada lembaran tunggal dengan ketebalan total yang sama
 - Memiliki variasi luas dalam nilai kekuatan dielektrik pada titik yang berbeda pada permukaannya

-
- Pengaruh Ketebalan
 - Lapisan Peningkatan ketebalan lapisan memberikan peningkatan kerusakan
 - Saluran pemecah tegangan terjadi pada antarmuka hanya tidak secara langsung melalui lapisan lain.
 - Konstruksi berlapis sangat penting dalam kasus kertas isolasi karena ketebalan kertas itu sendiri bervariasi dari titik ke titik dan akibatnya kekuatan dielektrik di permukaannya tidak homogen.

-
- Perbedaan dalam ketebalan memberikan permukaan kasar ke kertas yang dapat menghasilkan tegangan medan listrik yang sebanding dengan saluran pembuangan.
 - Permukaan kertas yang kasar juga membantu impregnasi yang lebih baik saat luka rapat.
 - Keberadaan area dengan ketebalan lebih rendah di kertas dapat menyebabkan BD pada titik ini pada tegangan yang jauh lebih rendah

Efek Antarmuka

- Debit biasanya terjadi pada antarmuka dan besarnya debit tergantung pada resistansi permukaan dan kapasitansi yang terkait. Jika konduktivitas permukaan meningkat, besarnya debit juga meningkat, mengakibatkan kerusakan dielek
- Properti dielektrik komposit lainnya Tegangan awal pembuangan tergantung pada ketebalan dielektrik padat, konstanta dielektrik keduanya Perbedaan konstanta dielektrik antara cairan dan padatan tidak secara signifikan mempengaruhi laju perubahan medan listrik pada tepi elektroda.trik.

Mekanisme Kerusakan dalam Dielektrik Komposit.

- Kerusakan jangka pendek, Jika tegangan medan listrik sangat tinggi, kegagalan dapat terjadi dalam hitungan detik atau bahkan lebih cepat tanpa kerusakan substansial pada permukaan isolasi sebelum BD. Ini karena hasil dari satu atau lebih debit ketika tegangan yang diberikan dekat dengan nilai kerusakan. cepat ketika medan listrik dalam isolasi sedemikian rupa sehingga membantu
- Kerusakan terjadi lebih banyak partikel bermuatan dalam debit untuk menembus ke dalam isolasi.

-
- Kerusakan, juga penuaan isolasi. BD ini menghasilkan proses pelepasan termal dan parsial. Pelepasan sebagian biasanya terjadi dalam volume sistem isolasi komposit. Akumulasi muatan dan konduksi pada permukaan insulasi juga memberikan kontribusi yang signifikan terhadap penuaan dan kegagalan insulasi.
 - i. Penuaan dan kerusakan karena pembuangan sebagian
 - ii. Penuaan dan kerusakan karena akumulasi muatan pada permukaan isolator.

Dielektrik Padat Digunakan dalam Praktek

- Bahan organik
- Bahan anorganik
- Polimer sintetik

-
- Bahan Organik
 - Diproduksi dari nabati atau hewani Insulator yang baik dan dapat dengan mudah diadopsi untuk aplikasi praktis
 - Sifat mekanik dan listrik selalu memburuk dengan cepat ketika suhu melebihi 100 derajat C.
 - Digunakan setelah dirawat dengan pernis atau impregnasi dengan minyak.
 - Sebagai contoh: kertas dan papan pers yang digunakan dalam kabel, kapasitor dan transformator.

-
- Bahan anorganik
 - Sifat mekanik dan listrik, tidak menunjukkan suhu reduksi yang cukup hingga 250 derajat C.
 - Misalnya: gelas dan keramik tahan terhadap polutan atmosfer, kinerja luar biasa dalam berbagai kondisi suhu dan tekanan. banyak digunakan untuk isolator, bushing.

Dielektrik Padat Digunakan dalam Praktek

- Polimer sintetik
- Memiliki sifat isolasi yang sangat baik Mudah dibuat dan diterapkan pada peralatan
- Memiliki suhu leleh rendah dalam kisaran 100 - 120 derajat C Sangat fleksibel dan dapat dicetak dan diekstrusi
- Banyak digunakan untuk bushing, isolator dll.

Klasifikasi Bahan Isolasi Padat

Organic	Inorganic	Synthetic Polymer	
		Thermoplastic	Thermosetting
Cotton	Asbestos	Polyethylene	Epoxy resin
Paper	Ceramics	Polystyrene	Melamine
Pressboard	Glass	Polyvinylchloride	Bakelite
Rubber	Mica	Polycarbonate	Elastomers
Wood		Perspex	Crosslinked

Dielektrik Padat Digunakan dalam Praktek

- Kertas dan Papan
- Kertas bersifat higroskopis,
- Kertas tisu atau kertas Kraft digunakan untuk keperluan isolasi.
- Pressboard digunakan pada transformer dan bushing sebagai bahan pendukung dan penghalang isolasi.
- Serat
- Ketika digunakan untuk keperluan listrik akan memiliki kemampuan untuk menggabungkan kekuatan Dan daya tahan dengan kehalusan dan fleksibilitas yang ekstrim.
- Jenis serat: katun, goni, falx, wol, sutra, nilon, teflon dan fiberglass
- Fiberglass menyerap sangat sedikit air dan karenanya memiliki ketahanan yang sangat tinggi.
- Mika
- Memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi (700 kv / mm-1000kV / mm), kerugian dielektrik yang rendah (0,03), kekuatan mekanik yang baik, tahan terhadap suhu tinggi.



- Kaca
- Konstanta dielektrik bervariasi 3,7 - 10
- Kehilangan dielektrik bervariasi 0,004 - 0,02
- Kekuatan dielektrik bervariasi 3000 hingga 5000 kV / cm dan menurun dengan naiknya suhu.
- Digunakan sebagai penutup dan untuk penyangga internal pada bohlam listrik, kapasitor.



- Keramik
- Dapat dibagi dua kelompok:
- Keramik dengan permitivitas rendah ($\epsilon_r < 12$) digunakan sebagai isolator
- Keramik dengan permitivitas tinggi ($\epsilon_r > 12$) digunakan sebagai Kapasitor



- Karet
- Sifat elastis tinggi.
- Kotoran umum, perubahan kimia karena penuaan, kadar air, variasi suhu dan frekuensi berpengaruh pada sifat listrik karet.



- Plastik
- Sangat banyak digunakan sebagai bahan isolasi karena sifat dielektriknya yang sangat baik
- Jenis plastik: polyethylene, plastik fluorocarbon, nilon, polivinil klorida, poliester, polistren,



Contoh

- Kapasitor silinder koaksial harus dirancang dengan panjang efektif 20 cm. Kapasitor diharapkan memiliki kapasitansi 1000 pF dan beroperasi pada 15 kV, 500 kHz. Pilih bahan isolasi yang sesuai dan berikan dimensi elektroda

- Kapasitansi kapasitor silinder koaksial adalah

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (1)$$

- Dimana
- l - panjang dalam meter
- d_1 - diameter elektroda dalam
- d_2 - diameter elektroda luar
- ϵ_r - konstanta dielektrik

- Memilih polietilen, konstanta dielektrik Dan kekuatannya adalah 200kV / cm Membiarkan faktor keamanan 4, stres maksimum $E_{\max} = 50\text{kV} / \text{cm}$

$$E_{\max} = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2)$$

- Dari (1), $\ln \frac{d_2}{d_1} = \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\text{capacitance}}$

$$\ln \frac{d_2}{d_1} = \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{2\pi \times 8.84 \times 10^{-12} \times 2.3 \times 0.2}{1000 \times 10^{-12}}$$

$$= 0.02556$$

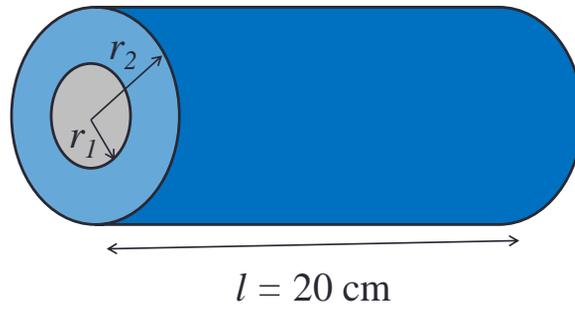
$$\frac{r_2}{r_1} = 1.026$$

Dari (2),

$$r_1 = \frac{V}{E_{\max} \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{15}{(50)(0.02556)} = 11.74 \text{ cm}$$

$$r_2 = 1.026 \times 11.74 = 12.05 \text{ cm}$$

- Ketebalan insulasi adalah 3,1 mm



Thank you for coming

