

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)

- Mahasiswa mampu menjelaskan konduksi & breakdown di gas
- Mahasiswa mampu menganalisis berbagai mekanisme kerusakan dan aplikasi dielektrik vakum, cair, padat dan komposit



TOPIK

- Proses Ionisasi
- Mekanisme Rincian Townsend
- Kerusakan pada Gas Elektronegatif
- Teori Streamer tentang Kerusakan pada Gas
- Hukum Paschen
- Rincian di Bidang Tidak Seragam dan Pelepasan Korona
- Fenomena dan Aplikasi Pasca Kerusakan
- Pertimbangan Praktis dalam Menggunakan Gas dan Campuran Gas untuk Tujuan Isolasi
- Isolasi Vakum

Pendahuluan

- Gas yang paling umum adalah Nitrogen (N₂), Karbon dioksida (CO₂), Freon (CCl₂F₂) dan sulfur hexafluoride (SF₆).
- Berbagai fenomena terjadi dalam dielektrik gas ketika tegangan diberikan. Ketika tegangan yang diberikan rendah, arus kecil mengalir antara elektroda dan insulasi mempertahankan sifat listriknya. Jika voltase yang diberikan besar, arus yang mengalir melalui insulasi meningkat sangat tajam, dan terjadi gangguan listrik.

- Pelepasan listrik dalam gas terdiri dari dua jenis, yaitu
 - i) pembuangan yang tidak berkelanjutan
 - ii) pemulangan mandiri
- Perincian dalam gas, yang disebut percikan gangguan adalah transisi dari pembuangan yang tidak berkelanjutan ke pelepasan yang berkelanjutan.
- Penumpukan arus tinggi dalam kerusakan disebabkan oleh proses yang dikenal sebagai ionisasi di mana elektron dan ion dibuat dari atom atau molekul netral, dan migrasi mereka ke anoda dan katoda masing-masing mengarah ke arus tinggi.

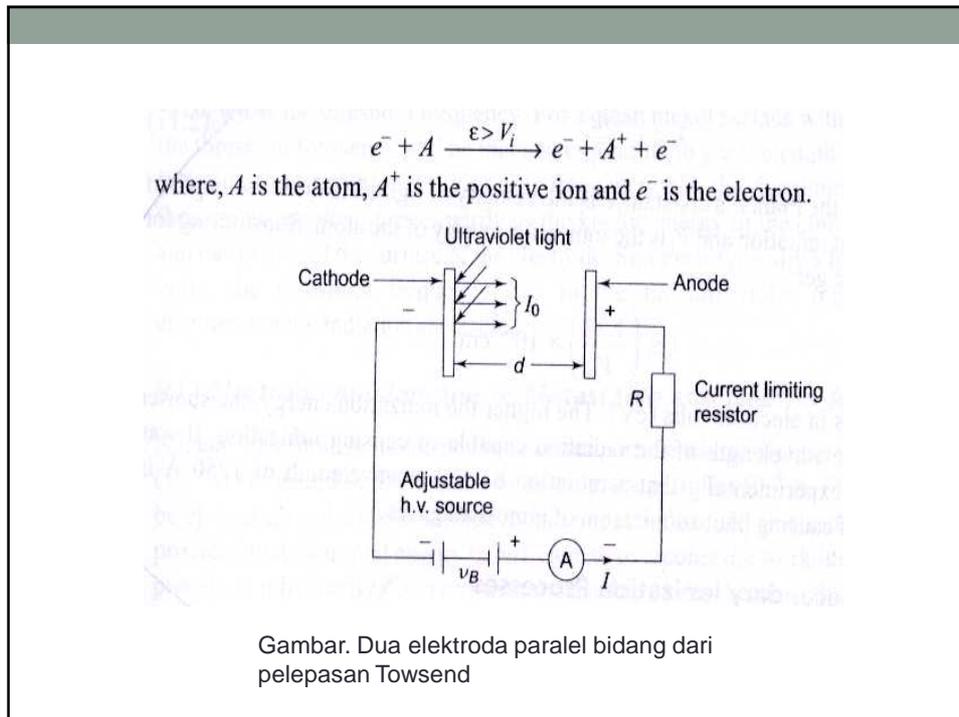
- Berbagai kondisi fisik gas, yaitu, tekanan, suhu, konfigurasi medan elektroda, sifat permukaan elektroda dan ketersediaan partikel konduktor awal diketahui mengatur proses ionisasi.

1. PROSES IONISASI

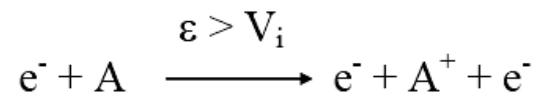
- Ketika tegangan tinggi diterapkan antara dua elektroda yang direndam dalam medium gas, gas menjadi konduktor dan terjadi gangguan listrik.
- Proses-proses yang terutama bertanggung jawab untuk pemecahan gas adalah ionisasi oleh tabrakan, foto-ionisasi dan proses ionisasi sekunder.
- Dalam mengisolasi gas (juga disebut gas yang menempelkan elektron), proses perlekatan juga memainkan peran penting.

1.1 Ionisasi oleh Tabrakan

- Ionisasi - Proses membebaskan elektron dari molekul gas dengan produksi simultan ion positif.
- Dalam proses ionisasi oleh tumbukan, elektron bebas bertabrakan dengan molekul gas netral dan menimbulkan elektron baru dan ion positif.
- Ketika medan listrik E diterapkan pada dua elektroda paralel bidang (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1), setiap elektron yang dimulai pada katoda akan semakin dipercepat antara tumbukan dengan molekul gas lain selama perjalanannya menuju anoda.



- Proses nya dapat direpresentasikan sebagai;



- dimana
- A adalah atom,
- A^{+} adalah ion positif dan
- e^{-} adalah elektron.
- ε : energi yang diperoleh
- V_i : potensi ionisasi

1.2 Foto-ionisasi

- Sebelum kita memasuki foto-ionisasi, penting untuk memahami bagaimana elektron dapat muncul dalam gas melalui emisi dari katoda.
- Proses ini membutuhkan sejumlah energi tertentu yang disebut fungsi kerja.
 - Pengeboman permukaan logam oleh partikel (seperti ion positif) dengan energi yang cukup
 - Iradiasi permukaan logam oleh radiasi gelombang pendek, fungsi kerja
 - Superposisi medan listrik eksternal yang kuat (emisi lapangan)
 - Pemanasan katoda dapat meningkatkan energi kinetik dan kecepatan elektron (emisi termo-ionik)

- Fenomena yang terkait dengan ionisasi oleh radiasi, atau photoionization, melibatkan interaksi radiasi dengan materi.
- Fotoionisasi terjadi ketika jumlah energi radiasi yang diserap oleh atom atau molekul melebihi potensi ionisasi.
- Proses dimana radiasi dapat diserap oleh atom atau molekul adalah;
 - i) eksitasi atom ke tingkat energi yang lebih tinggi.
 - ii) penyerapan terus menerus dengan eksitasi langsung atom atau disosiasi molekul diatomik atau ionisasi langsung dll.

- Ionisasi terjadi ketika $\lambda \leq c \cdot \frac{h}{V_i}$

h : Planck's constant = 6.62517×10^{-34} Js

c : velocity of light

λ : wavelength of the incident radiation

V_i : ionization energy of the atom (eV), $1 \text{ eV} = 1.6021 \times 10^{-19}$ J.

- Radiasi yang memiliki panjang gelombang 1250 \AA mampu menyebabkan photoionisasi hampir semua gas.

Ionisasi Termal

- Ionisasi termal adalah semua proses ionisasi yang disebabkan oleh kondisi termal dari gas.
- Istilah ionisasi termal, secara umum berlaku untuk aksi pengion molekul tabrakan, radiasi dan tabrakan elektron yang terjadi dalam gas pada suhu tinggi mendatang. Jika suatu gas dipanaskan sampai suhu cukup tinggi banyak atom gas atau molekul memperoleh kecepatan yang cukup tinggi untuk menyebabkan ionisasi pada tumbukan dengan atom atau molekul.
- Pada suhu tinggi ada kemungkinan ionisasi berikut: Ionisasi akibat tumbukan antar molekul gas yang bergerak dengan kecepatan tinggi pada suhu tinggi. Foto ionisasi karena radiasi termal oleh gas yang dipanaskan, Ionisasi di bawah tabrakan molekul dengan elektron terbentuk sebagai hasil dari yang pertama dua proses.

Ionisasi pada Permukaan Elektroda

- Pembebasan elektron dari ketebalan logam juga membutuhkan mount yang pasti pekerjaan yang harus dilakukan disebut energi pembebasan, yang berbeda untuk berbeda logam dan tergantung pada kondisi permukaannya
- Energi untuk pembebasan (ev) elektron

Kinds of Metal	Energy of liberation
Aluminum	1.8
Copper	3.9
Copper oxide	5.34
Iron	3.9
Silver	3.1.
Platinum	3.6
Barium oxide	1.0

2.3 Proses Ionisasi Sekunder

- Proses ionisasi sekunder yang menghasilkan elektron sekunder adalah proses yang mempertahankan pelepasan setelah terjadi ionisasi oleh tumbukan dan foto-ionisasi.
- a) Emisi Elektron karena Dampak Ion Positif
- Ion positif terbentuk karena proses ionisasi dan berjalan menuju katoda. Ion-ion positif ini dapat menyebabkan emisi elektron dari katoda dengan melepaskan energi kinetiknya.
- Probabilitas proses diukur sebagai whichi yang disebut koefisien ionisasi sekunder Townsend karena ion positif. I meningkat dengan kecepatan ion dan tergantung pada jenis gas dan bahan elektroda yang digunakan.

- b) Electron Emission due to Photons
- To cause an electron to escape from a metal, enough energy should be given to overcome the surface potential barrier. The energy is in the form of a photon of ultraviolet light of suitable frequency.
- The frequency (ν) is given by the relationship;

$$\nu = \frac{\phi}{h}$$

- dikenal sebagai frekuensi ambang batas. ϕ adalah fungsi kerja (eV) dari elektroda logam.

- c) Emisi Elektron karena Atom Metastabil dan Netral
- Atom atau molekul metastabil adalah partikel tereksitasi yang masa hidupnya sangat besar (10^{-3} detik) dibandingkan dengan masa hidup partikel biasa (10^{-8} detik).
- Elektron dapat dikeluarkan dari permukaan logam oleh dampak atom tereksitasi (metastable), asalkan total energi mereka cukup untuk mengatasi fungsi kerja.
- Atom netral dalam keadaan dasar juga menimbulkan emisi elektron sekunder jika energi kinetiknya tinggi (≈ 1000 eV).

2 Mekanisme Rincian Townsend

- Persamaan pertumbuhan arus TOWNSEND
- n_0 : elektron yang dipancarkan dari katoda.
- α : jumlah rata-rata tumbukan pengion yang dibuat oleh elektron per cm berjalan ke arah medan.
- α tergantung pada tekanan gas p dan E / p , dan disebut koefisien ionisasi pertama Townsend.
- n_x : jumlah elektron pada jarak apa pun x dari katoda. pada $x = 0$, $n_x = n_0$

• juga $\frac{dn_x}{dx} = \alpha n_x$ $\therefore n_x = n_0 e^{\alpha x}$ (2.1)

- Kemudian, jumlah elektron yang mencapai anoda ($x = d$) adalah

$$n_d = n_0 e^{\alpha d}$$

- Jumlah elektron baru yang dibuat rata-rata oleh setiap elektron adalah,

$$e^{\alpha d} - 1 = \frac{n_d - n_0}{n_0} \quad (2.2)$$

- Arus rata-rata di celah = jumlah elektron yang bergerak per detik

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (2.3)$$

- I_0 = arus awal di katoda.

PERTUMBUHAN ARUS DALAM PRESENSI PROSES SEKUNDER

- Karena amplifikasi elektron $e^{\alpha d}$ terjadi di lapangan, probabilitas tambahan elektron baru yang dibebaskan di celah oleh mekanisme lain meningkat, yaitu;
 - i) Ion positif yang dilepaskan mungkin memiliki energi yang cukup untuk menyebabkan pembebasan elektron dari katoda ketika mereka menumbuknya.
 - ii) Atom atau molekul tereksitasi dalam longsoran dapat memancarkan foton, dan ini akan menyebabkan emisi elektron karena emisi foto.
 - iii) Partikel metastabil dapat berdifusi kembali menyebabkan emisi elektron.

- Elektron yang dihasilkan oleh proses ini disebut elektron sekunder, dan koefisien ionisasi sekunder γ didefinisikan dengan cara yang sama dengan α .
- γ disebut koefisien ionisasi sekunder Townsend dan merupakan fungsi dari tekanan gas p dan

$$\frac{E}{p}$$

- Asumsikan n_0' = jumlah elektron sekunder yang dihasilkan karena proses sekunder. n_0'' = jumlah total elektron yang meninggalkan katoda. Lalu $n_0'' = n_0 + n_0'$

Jumlah total elektron n yang mencapai anoda menjadi,

$$n = n_0'' e^{\alpha d} = (n_0 + n_0') e^{\alpha d}$$

$$n_0' = \gamma [n - (n_0 + n_0')] \quad (2.4)$$

atau

$$\therefore n = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.5)$$

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

Kriteria untuk breakdown TOWNSEND

- $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \Rightarrow$ kriteria breakdown townsend (2.6)
- Secara normal $e^{\alpha d} \gg 1$, persamaan di atas dikurangi ke

- $$\gamma e^{\alpha d} = 1 \quad (2.7)$$

- Untuk jarak celah yang diberikan dan pada tekanan yang diberikan, nilai tegangan yang memberikan nilai α dan γ yang memenuhi kriteria kerusakan disebut tegangan pecah percikan V_s dan jarak yang sesuai d_s disebut jarak percikan.

PENENTUAN EKSPERIMENTAL KOEFISIENSI α DAN γ

- Pengaturan eksperimental ditunjukkan pada Gambar 2.2

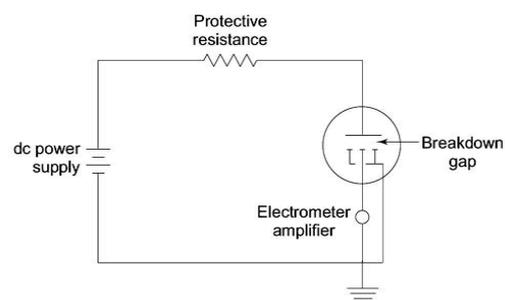


Fig. 2.2 Experimental arrangement to measure ionization coefficients α and γ

- Sistem elektroda ditempatkan di ruang ionisasi. Ruang dievakuasi ke ruang hampa sangat tinggi dari urutan 10^{-4} hingga 10^{-6} torr. Kemudian diisi dengan gas yang diinginkan.
- Katoda diradiasi menggunakan lampu ultra-violet untuk menghasilkan elektron inisiator (n_0).
- Kurva pertumbuhan arus tipikal dalam debit Townsend ditunjukkan pada Gambar 2.4. Di wilayah T_1 dan T_2 arus meningkat dengan mantap karena mekanisme Townsend.

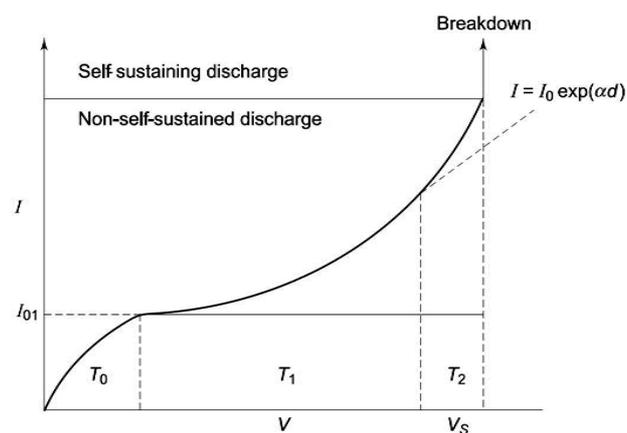


Fig. 2.4 Typical current growth curve in a Townsend discharge

- Untuk menentukan α dan γ , karakteristik V-I untuk pengaturan celah yang berbeda diperoleh. $\log I / I_0$ versus plot jarak diperoleh di bawah kondisi bidang konstan (E) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Kemiringan bagian awal kurva memberi nilai α . Kemudian dengan menggunakan persamaan (2.5), γ dapat ditemukan menggunakan titik pada bagian grafik yang naik.

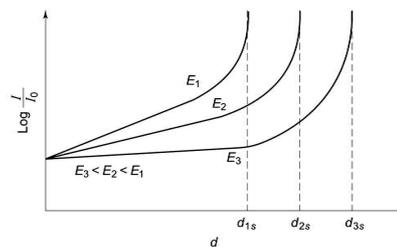


Fig. 2.5 Townsend type $\log(I/I_0)$ vs. d plot

3 KERUSAKAN DALAM GAS ELEKTRONEGATIF

- Proses yang memberikan kekuatan penguraian yang tinggi pada gas adalah ikatan elektron. Elektron bebas melekat pada atom atau molekul netral untuk membentuk ion negatif.
- Lampiran elektron merupakan cara efektif untuk menghilangkan elektron yang jika tidak akan menyebabkan pertumbuhan saat ini dan kerusakan pada tegangan rendah.
- Gas-gas di mana perlekatan memainkan peran aktif disebut gas elektronegatif.

- Proses lampiran yang paling umum adalah;



- Gas-gas yang terjadi proses perlekatan adalah SF₆, O₂, freon, CO₂ dan fluorocarbon. Persamaan pertumbuhan Townsend saat ini dimodifikasi untuk memasukkan ionisasi dan perlekatan.

- Koefisien lampiran (η) didefinisikan sebagai jumlah tumbukan yang dilekatkan oleh satu elektron yang melayang satu cm ke arah medan.
- Dalam kondisi ini, arus yang mencapai anoda dapat ditulis sebagai;

$$\therefore I = I_0 \frac{\frac{\alpha}{\alpha-n} e^{(\alpha-n)d} - \frac{\eta}{\alpha-\eta}}{1 - \left[\gamma \frac{\alpha}{\alpha-n} (e^{(\alpha-n)d} - 1) \right]} \quad (2.8)$$

- Kriteria kerusakan Townsend untuk memasang gas;

$$\gamma \frac{\alpha}{\alpha - n} (e^{(\alpha - n)d} - 1) = 1 \quad (2.9)$$

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

Jeda waktu untuk breakdown

- Jeda waktu adalah perbedaan waktu antara penerapan tegangan yang cukup untuk menyebabkan kerusakan dan terjadinya kerusakan itu sendiri
- Waktu yang menyimpang antara penerapan tegangan yang cukup untuk menyebabkan kerusakan dan munculnya elektron yang memulai disebut jeda waktu statistik, ts.
- Waktu yang diperlukan untuk proses ionisasi untuk berkembang sepenuhnya hingga menyebabkan kerusakan disebut formative time lag, tf.

- Total jeda waktu, $t = t_s + t_f$, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Jeda waktu statistik tergantung pada jumlah pra-ionisasi yang ada. Jeda waktu formatif sebagian besar bergantung pada mekanisme pertumbuhan longoran salju. Jeda waktu formatif biasanya jauh lebih pendek daripada jeda waktu statistik.

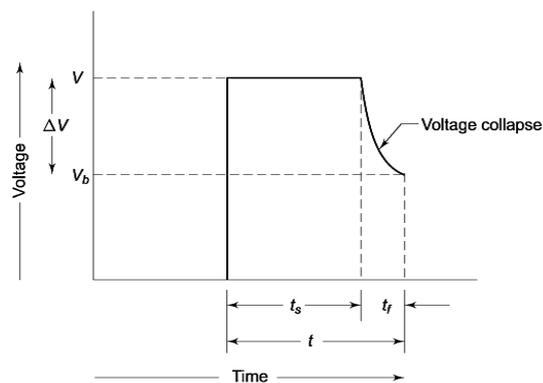


Fig. 2.8 Breakdown with a step function voltage pulse. t_s = statistical time; t_f = formative time; t = total time

4 TEORI STREAMER BREAKDOWN DI GAS

- Mekanisme Townsend ketika diterapkan pada kerusakan pada tekanan atmosfer ditemukan memiliki kelemahan tertentu, yaitu
- i) Pertumbuhan saat ini terjadi sebagai hasil dari proses ionisasi saja. Namun dalam praktiknya, voltase rusak ditemukan tergantung pada tekanan gas dan geometri celah.
- ii) Mekanisme memprediksi jeda waktu urutan 10^{-5} detik, sedangkan dalam praktiknya kerusakan diamati terjadi pada waktu yang sangat singkat dari urutan 10^{-8} detik.
- iii) Mekanisme Townsend memprediksi bentuk pelepasan yang sangat tersebar, tetapi dalam praktiknya, pelepasan ternyata bersifat filamenter dan tidak teratur.

- Mekanisme Townsend gagal menjelaskan semua fenomena yang dibahas ini dan diperkirakan, sekitar tahun 1940, Raether, Meek, dan Loeb secara independen mendukung teori streamer.
- Teori streamer memprediksi pengembangan pelepasan percikan api langsung dari longsor tunggal di mana memuat ruang dikembangkan oleh longsor itu sendiri telah disetujui mengubah longsor menjadi streamer plasma.

- Pertimbangkan gambar 2.11

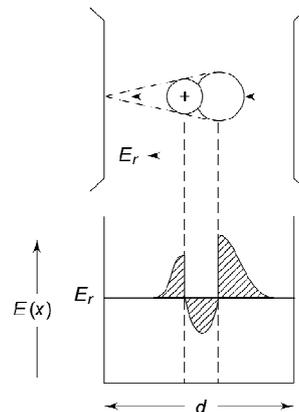


Fig. 2.11 *Field distortion in a gap due to space charge*

- Sebuah elektron tunggal yang dimulai di katoda dengan ionisasi membangun longsor salju yang melintasi celah.
- Elektron dalam longsor bergerak sangat cepat dibandingkan dengan ion positif. Ini meningkatkan medan, dan longsor sekunder terbentuk karena foto-ionisasi di wilayah muatan ruang angkasa. Ini terjadi pertama kali di dekat anoda ketika muatan ruang maksimum. Ini menghasilkan peningkatan lebih lanjut dalam biaya ruang.
- Prosesnya sangat cepat dan muatan ruang positif meluas ke katoda dengan sangat cepat yang menghasilkan pembentukan streamer.

- Begitu ujung streamer mendekati katoda, sebuah tempat katoda terbentuk dan aliran elektron mengalir dari katoda untuk menetralkan muatan ruang positif dalam streamer, hasilnya adalah percikan dan kerusakan telah terjadi.
- Medan E_r yang dihasilkan oleh muatan ruang pada jari-jari r diberikan oleh;

$$E_r = 5.27 \times 10^{-7} \frac{\alpha e^{\alpha x}}{\left(\frac{x}{p}\right)^{\frac{1}{2}}} V/cm$$

- α : Koefisien ionisasi pertama Townsend.
- p : tekanan gas dalam torr.
- x : jarak ke mana streamer telah diperluas di celah.

- Secara umum, untuk nilai pd di bawah 1000 torr-cm dan tekanan gas bervariasi dari 0,01 hingga 300 torr, mekanisme Townsend beroperasi, sementara pada tekanan dan nilai pd yang lebih tinggi, mekanisme streamer memainkan peran dominan dalam menjelaskan fenomena gangguan.

5. Hukum PASCHEN

- Kriteria kerusakan dalam gas diberikan sebagai;

- $$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.10)$$

- α dan γ adalah fungsi E / p .

$$\frac{\alpha}{p} = f_1\left(\frac{E}{p}\right); \gamma = f_2\left(\frac{E}{p}\right)$$

- Juga

$$E = \frac{V}{d}$$

- Dari persamaan 2.9, dengan membiarkan = 0, persamaan dapat ditulis ulang sebagai

- $$f_2\left(\frac{V}{pd}\right) \left(e^{pd f_1 \frac{V}{pd}} - 1 \right) = 1 \quad (2.11)$$

- Persamaan (2.11) menunjukkan hubungan antara V dan pd .

- $$\therefore V = f(pd) \quad (2.12)$$

- Persamaan (2.12) dikenal sebagai hukum Paschen.

- Gambar 2.13 menunjukkan hubungan antara tegangan tembus dan pd .

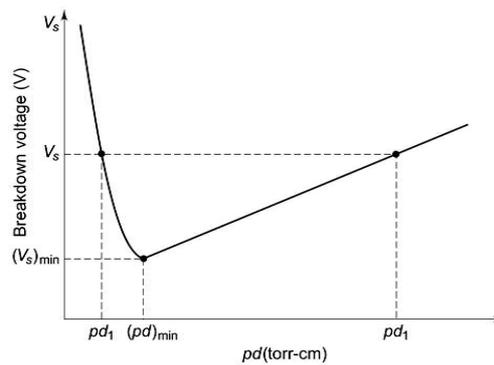
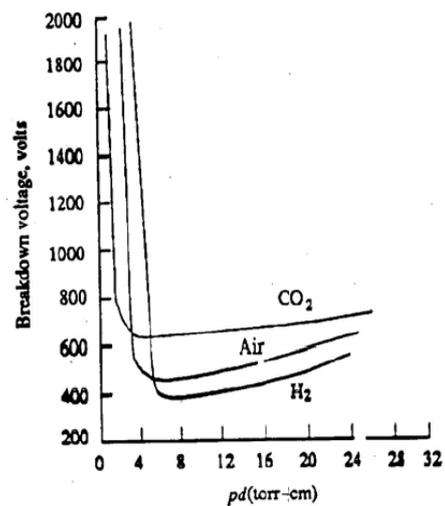


Fig. 2.13 Breakdown voltage- pd curve (Paschen's law)

- Kurva Paschen ditunjukkan pada Gambar 2.14 untuk tiga gas CO_2 , udara dan H_2 .



- Untuk efek suhu, hukum Paschen umumnya dinyatakan sebagai $V = f(Nd)$, di mana N adalah kerapatan molekul gas. Tekanan gas berubah dengan suhu menurut hukum gas $pV = NRT$, di mana v adalah volume gas, T adalah suhu dan R adalah konstanta. Berdasarkan hasil percobaan, potensi gangguan udara dinyatakan sebagai;

$$V = 24.22 \left[\frac{293pd}{760T} \right] + 6.08 \left[\frac{293pd}{760T} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ kV} \quad (2.13)$$

6. Breakdown pada medan tidak seragam dan pelepasan Korona

- 6.1 Pelepasan Korona
- Jika medan tidak seragam, peningkatan voltase pertama-tama akan menyebabkan pelepasan gas muncul di titik dengan intensitas medan listrik tertinggi. Bentuk pelepasan ini disebut pelepasan korona dan dapat diamati sebagai pendaran kebiruan.
- Pelepasan korona disertai dengan suara mendesis, dan udara di sekitar wilayah korona diubah menjadi ozon.
- Korona bertanggung jawab atas kehilangan daya yang cukup besar dari saluran transmisi tegangan tinggi, kerusakan isolasi dan peningkatan interferensi radionya.
- Gradien tegangan diperlukan untuk menghasilkan visual a.c. korona di udara pada permukaan konduktor disebut bidang awal korona.

- Ada perbedaan yang jelas dalam tampilan visual korona di bawah polaritas positif dan negatif dari tegangan yang diberikan.
- - Ketika voltase positif - korona muncul sebagai sarung putih kebiru-biruan seragam di seluruh permukaan konduktor.
- - Saat voltase negatif - seperti bintik kemerahan yang didistribusikan di sepanjang kabel.

- Tegangan awal dan kerusakan korona dari pengaturan bidang-bola ditunjukkan pada Gambar 2.15.
- a) Wilayah I (jarak kecil) - bidangnya seragam. Tegangan rusak tergantung pada jarak.
- b) Wilayah II (jarak yang cukup besar) - bidang tidak seragam. Tegangan rusak tergantung baik pada diameter bola dan jarak.
- c) Wilayah III (spasi besar) - bidang tidak seragam. Kerusakan didahului oleh corona. Tegangan awal corona terutama tergantung pada diameter bola

- Studi tentang kerusakan medan korona dan tidak-seragam sangat rumit dan penyelidikan masih berlangsung.

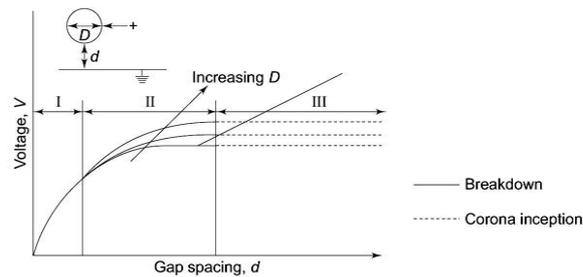
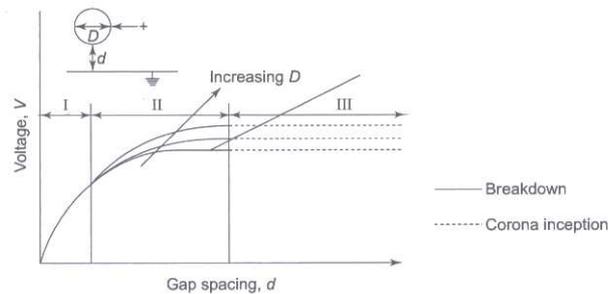


Fig. 2.15 Breakdown and corona inception characteristics for spheres of different diameters in sphere-plane gap geometry



Kerusakan dan karakteristik awal korona untuk bola dengan diameter berbeda di bidang - celah bidang

- Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa
 - a. Pada jarak kecil (wilayah I), bidangnya seragam, dan terutama tegangan rusaknya tergantung pada jarak.
 - b. Pada jarak yang agak besar (wilayah II), medan tidak seragam, dan tegangan tembus tergantung baik pada diameter bola dan jarak dan
 - c. Pada jarak yang besar (wilayah III), bidang tidak seragam, dan kerusakannya didahului oleh korona dan dikendalikan hanya dengan jarak. Tegangan awal korona terutama tergantung pada diameter bola.

- 6.2 Rincian dalam bidang yang tidak seragam ad dalam kriteria Townsend ditulis ulang dengan mengganti ad oleh

$$\int_0^d \alpha dx$$

- Dan menjadi;

$$\gamma \left(e^{\int_0^d \alpha dx} - 1 \right) = 1 \quad (2.14)$$

- Ketika menerapkan proses pemecahan bidang yang tidak seragam ke teori streamer, bidang yang dihasilkan oleh biaya ruang diubah sebagai;

- $$E_r = \frac{5.27 \times 10^{-7} \alpha_x e^{\int_0^x \alpha dx}}{\sqrt{\left(\frac{x}{p} \right)}} \quad (2.15)$$

- αx : nilai α di kepala longsor.
- Ketika ruang muatan ruang, E_r = bidang terapan di kepala longsor - pembentukan streamer tercapai.
- Dari sudut pandang rekayasa praktis, gap rod-rod dan gap sphere-sphere sangat penting, karena mereka digunakan untuk perlindungan peralatan listrik dan untuk pengukuran tegangan tinggi.

- Untuk kasus kabel paralel $E_w = 30md \left[1 + \frac{0.301}{\sqrt{dr}} \right]$
- Untuk kasus silinder koaksial $E_w = 31md \left[1 + \frac{0.308}{\sqrt{dr}} \right]$
- Dimana r adalah jari-jari konduktor, m adalah faktor ketidakteraturan permukaan yang menjadi sama dengan kesatuan dan d adalah faktor koreksi kerapatan udara relatif yang diberikan oleh
$$d = \frac{0.392b}{(273+T)}$$
- b adalah tekanan atmosfer (dalam torr)
- T adalah suhu dalam °C

7. FENOMENA POST-BREAKDOWN

- Fenomena yang terjadi di wilayah CG (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.20) adalah fenomena pasca-kerusakan (glow discharge, CE dan arc discharge, EG)

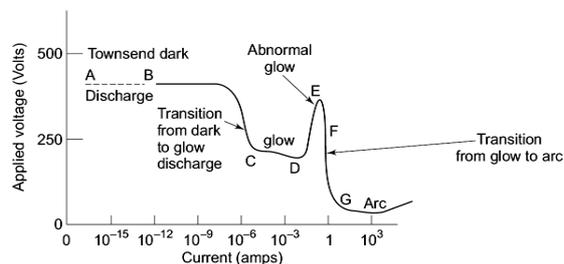


Fig. 2.20 *dc voltage-current characteristic of an electrical discharge with electrodes having no sharp points or edges*

8. PERTIMBANGAN PRAKTIS DALAM MENGGUNAKAN GAS UNTUK TUJUAN INSULASI

- Secara umum, sifat yang disukai dari dielektrik gas untuk aplikasi tegangan tinggi adalah;
- a) kekuatan dielektrik yang tinggi
- b) stabilitas termal dan ketidakaktifan bahan kimia terhadap bahan konstruksi.
- c) tidak mudah terbakar dan kelembaman fisiologis.
- d) suhu kondensasi rendah.
- e) perpindahan panas yang baik.
- f) ketersediaan siap dengan biaya moderat.

- SF₆ - memiliki sebagian besar persyaratan di atas memiliki kekuatan dielektrik yang lebih tinggi dan suhu pencairan yang rendah - dapat digunakan dalam berbagai memiliki sifat pendinginan busur yang sangat baik.
- Tambahan 30% SF₆ ke udara - meningkatkan kekuatan dielektrik udara sebesar 100%. Salah satu efek kualitatif dari pencampuran SF₆ ke udara adalah untuk mengurangi biaya keseluruhan gas, dan mencapai kekuatan dielektrik yang relatif tinggi atau hanya mencegah timbulnya korona.

- Gambar 2.21 menunjukkan kekuatan dielektrik gas, sebanding dengan dielektrik padat dan cair.

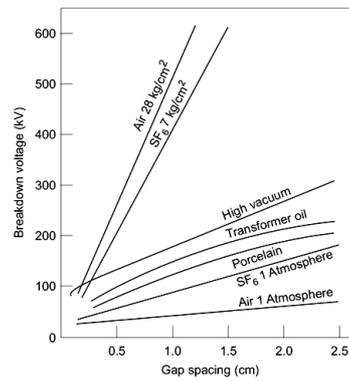


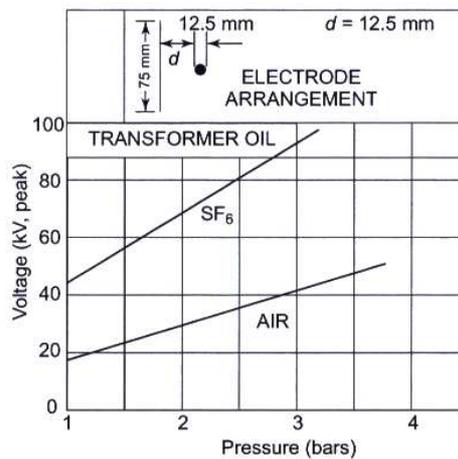
Fig. 2.21 dc breakdown strength of typical solid, liquid, gas and vacuum insulations in uniform fields

- Kekuatan Impuls Petir SF₆ / Campuran Gas Lainnya

<i>Mixture Ratio</i>	<i>Breakdown Strength (kV/cm)</i>
100% SF ₆ gas	89.0
1% SF ₆ /99% Nitrogen	80.0
10% SF ₆ /90% Nitrogen	78.0
20% SF ₆ /80% Nitrogen	76.5
40% SF ₆ /60% Nitrogen	75.6
10% SF ₆ /90% CO ₂	76.5
20% SF ₆ /80% CO ₂	76.5
40% SF ₆ /60% CO ₂	75.5
10% SF ₆ /90% Air	77.0
20% SF ₆ /80% Air	76.5
40% SF ₆ /60% Air	75.6

- SF₆/N₂ mixtures is the one that has been found to be a good replacement for SF₆.

- Tegangan BD sebagai fungsi tekanan



9. INSULASI VAKUM

- Dengan tidak adanya partikel, seperti dalam kasus vakum sempurna, seharusnya tidak ada konduksi. Namun dalam praktiknya, keberadaan elektroda logam dan permukaan insulasi dalam ruang hampa, tegangan yang cukup tinggi akan menyebabkan kerusakan.
- Dalam sistem vakum, tekanan selalu diukur dalam satuan mm mercury (Hg). 1 mm Hg = 1 Torr Tekanan atmosfer standar = 760 mm Hg pada 20 ° C. Vakum dapat diklasifikasikan sebagai;
 - a) vakum tinggi: 1 x 10⁻³ hingga 1 x 10⁻⁶ Torr
 - b) vakum sangat tinggi: 1 x 10⁻⁶ hingga 1 x 10⁻⁸ Torr
 - c) vakum sangat tinggi: 1 x 10⁻⁹ dan di bawahnya
- Untuk keperluan isolasi listrik, rentang vakum umumnya digunakan dalam ruang hampa tinggi.

- Kerusakan Vakum Dalam ruang hampa udara yang tinggi, sebuah elektron melintasi celah tanpa menemui benturan. Oleh karena itu pertumbuhan saat ini sebelum kerusakan tidak dapat disebabkan oleh pembentukan guguran elektron.
- Namun jika gas dibebaskan di celah vakum, maka kerusakan dapat terjadi oleh proses Townsend.
- Tiga kategori mekanisme kerusakan dalam ruang hampa udara.
 - a) Mekanisme pertukaran partikel
 - b) Mekanisme emisi lapangan
 - c) Teori rumpun

- Gambar 2.22 menunjukkan mekanisme pertukaran partikel. Rincian akan terjadi jika koefisien produksi elektron sekunder melebihi kesatuan;
- $(AB + CD) > 1$ (2.16)
- dimana:
- A: melepaskan ion positif dari dampak partikel bermuatan (elektron) di anoda.
- B: elektron yang dibebaskan dari dampak setiap ion positif (A).
- C: foton - dari dampak partikel bermuatan (elektron) di anoda. D: elektron yang dibebaskan dari dampak setiap foton (C).

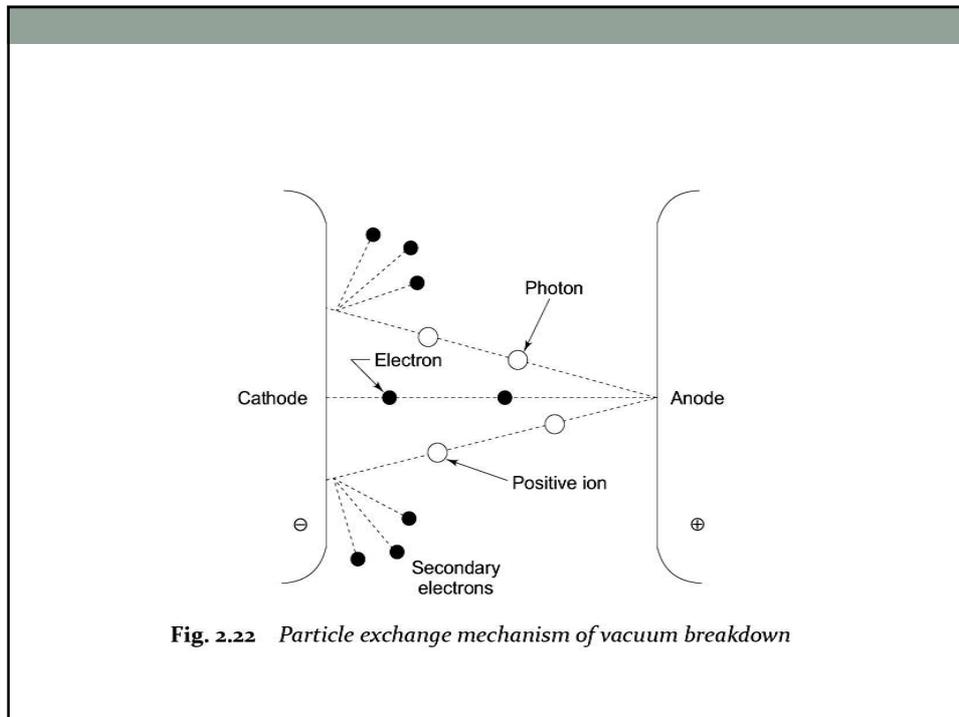


Fig. 2.22 Particle exchange mechanism of vacuum breakdown

- Trump and Van de Graff showed that the coefficients in equation (2.16) were too small for the process of breakdown to take place. Then the theory was modified to allow for the presence of negative ions, and the criterion for breakdown becomes;
- $$(AB + EF) > 1 \quad (2.17)$$
- E and F represent the coefficients for the negative and positive ion liberation by positive and negative ions.

- b) Teori emisi lapangan
- i) Mekanisme pemanasan anoda

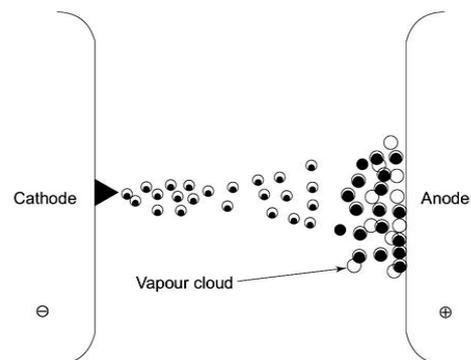


Fig. 2.23 Electron beam anode heating mechanism of vacuum breakdown

- Elektron yang diproduksi di mikro-proyeksi kecil pada katoda karena emisi lapangan membombardir anoda menyebabkan kenaikan suhu lokal dan melepaskan gas dan uap ke dalam celah vakum. Elektron-elektron ini mengionisasi atom-atom gas dan menghasilkan ion positif.
- Ion-ion positif ini tiba di katoda, meningkatkan emisi elektron primer karena pembentukan muatan ruang dan menghasilkan elektron sekunder dengan membombardir permukaan. Proses ini berlanjut sampai jumlah elektron yang cukup diproduksi untuk memunculkan kerusakan.

- ii) Mekanisme pemanasan katoda

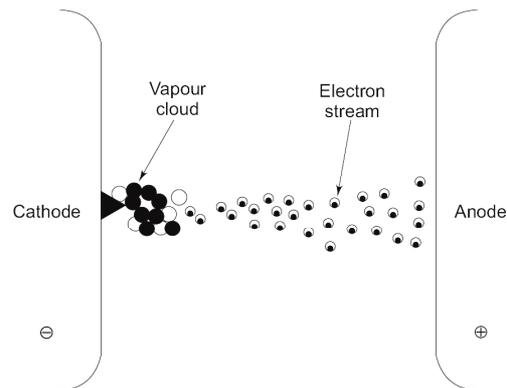
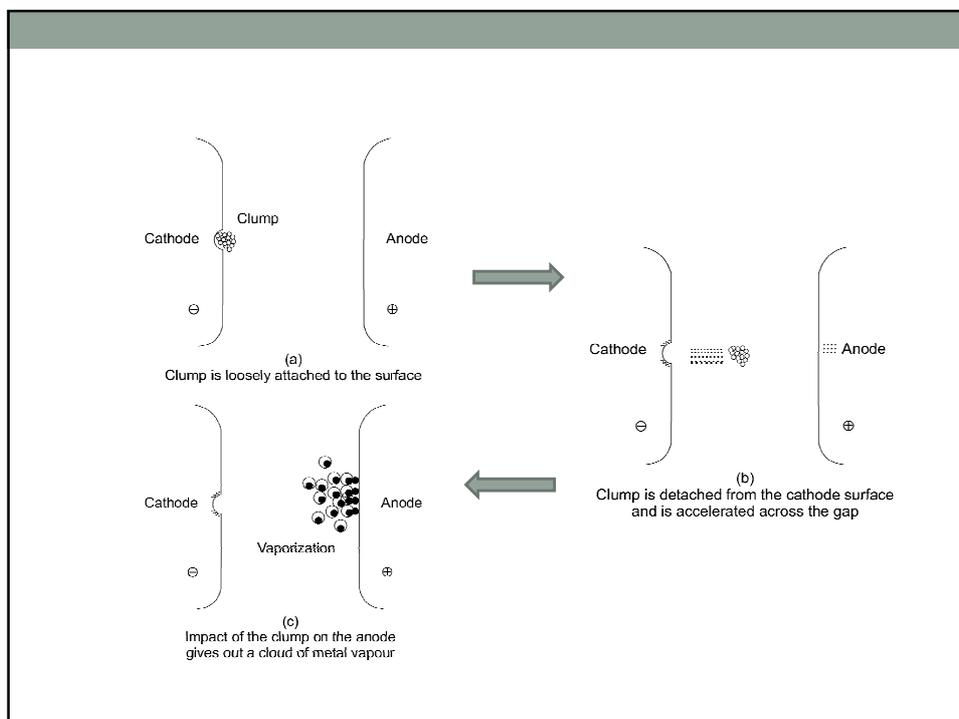


Fig. 2.24 Breakdown in vacuum caused by the heating of a microprojection on the cathode

- Titik tajam pada permukaan katoda bertanggung jawab atas keberadaan arus pra-gangguan. Arus ini menyebabkan pemanasan resistif pada ujung titik dan ketika kerapatan arus kritis tercapai, ujung meleleh dan meledak, sehingga memulai pelepasan vakum.
- Bukti eksperimental menunjukkan bahwa kerusakan terjadi pada proses ini ketika medan listrik katoda efektif berada pada urutan 10^6 hingga 10^7 V / cm.

- iii) Mekanisme rumpun
- Pada dasarnya teori ini dikembangkan berdasarkan asumsi-asumsi berikut;
- i) Sebuah partikel yang terikat longgar (rumpun) ada pada salah satu permukaan elektroda.
- ii) Partikel ini terisi ketika tegangan tinggi diberikan, dan terlepas dari elektroda induk dan dipercepat melintasi celah.
- iii) Kerusakan terjadi karena pelepasan dalam uap atau gas yang dilepaskan oleh dampak pada elektroda target.



- Meskipun telah ada banyak pekerjaan yang dilakukan pada fenomena kerusakan vakum, sejauh ini, tidak ada satu teori pun yang mampu menjelaskan semua pengukuran dan pengamatan eksperimental yang tersedia.
- Faktor eksperimental yang paling signifikan yang mempengaruhi mekanisme kerusakan adalah; panjang celah, geometri dan bahan elektroda, keseragaman permukaan dan perawatan permukaan, adanya partikel asing dan tekanan gas residu di celah vakum.

Tugas

- Jelaskan mekanisme tegangan tembus pada media isolasi udara

Thank you for coming

