**Partial Discharge dan Kegagalan Bahan Isolasi**

Partial discharge (peluahan parsial) adalah peristiwa pelepasan/loncatan bunga api listrik yang terjadi pada suatu bagian isolasi (pada rongga dalam atau pada permukaan) sebagai akibat adanya beda potensial yang tinggi dalam isolasi tersebut Partial discharge dapat terjadi pada bahan isolasi padat, bahan isolasi cair maupun bahan isolasi gas. Mekanisme kegagalan pada bahan isolasi padat meliputi kegagalan asasi (intrinsik), elektro mekanik, streamer, thermal dan kegagalan erosi. Kegagalan pada bahan isolasi cair disebabkan oleh adanya kavitasi, adanya butiran pada zat cair dan tercampurnya bahan isolasi cair. Pada bahan isolasi gas mekanisme townsend dan mekanisme streamer merupakan penyebab kegagalan. Dari uraian di atas menunjukkan bahwa kegagalan isolasi ini berkaitan dengan adanya partial discharge**.**

**P**engukuran partial discharge pada peralatan tegangan tinggi merupakan hal yang sangat penting karena dari data data yang diperoleh dan interpretasinya dapat ditentukan reability suatu peralatan yang disebabkan oleh penuaan (agging) dan resiko kegagalan dapat dianalisa. Spesifikasi pengujian partial discharge tergantung pada tipe peralatan tes dan bahan isolasi yang digunakan pada proses konstruksi suatu peralatan.

Adanya partial discharge di dalam bahan isolasi dapat ditentukan dengan tiga metode yaitu : dengan pengukuran tegangan pada objek, dengan pengukuran arus di dalam rangkain luar dan mengukur intensitas radiasi gelombang elektromagnetik yang disebabkan karena adanya partial discharge.

**Mekanisme Kegagalan Bahan Isolasi Padat**

Mekanisme kegagalan bahan isolasi padat terdiri dari beberapa jenis sesuai fungsi waktu penerapan tegangannya. Hal ini dapat dilihat sebagai berikut :

[**Gambar-1**](https://www.elektroindonesia.com/elektro/en13-1.gif)**Grafik Kegagalan Isolasi**

Uraian masing masing jenis kegagalan pada bahan isolasi padat adalah :

* Kegagalan asasi (intrinsik) adalah kegagalan yang disebabkan oleh jenis dan suhu bahan ( dengan menghilangkan pengaruh luar seperti tekanan, bahan elektroda, ketidakmurnian, kantong kantong udara. Kegagalan ini terjadi jika tegangan yang dikenakan pada bahan dinaikkan sehingga tekanan listriknya mencapai nilai tertentu yaitu 106 volt/cm dalam waktu yang sangat singkat yaitu 10-8 detik
* Kegagalan elektromekanik adalah kegagalan yang disebabkan oleh adanya perbedaan polaritas antara elektroda yang mengapit zat isolasi padat sehingga timbul tekanan listrik pada bahan tersebut. Tekanan listrik yang terjadi menimbulkan tekanan mekanik yang menyebabkan timbulnya tarik menarik antara kedua elektroda tersebut. Pada tegangan 106 volt/cm menimbulkan tekanan mekanik 2 s.d 6 kg/cm2. Tekanan atau tarikan mekanis ini berupa gaya yang bekerja pada zat padat berhubungan dengan Modulus Young 

Dengan rumus Stark dan Garton 
Jika kekuatan asasi (intrinsik) tidak tercapai pada , maka zat isolasi akan gagal bila tegangan V dinaikkan lagi. Jadi kekuatan listrik maksimumnya adalah . Dimana :

F :gaya yang bekerja pada zat padat,  L: pertambahan panjang zat padat L:panjang zat padat, A:pertambahan zat yang dikenai gaya, d0:tebal zat padat sebelum dikenai tegangan V, d:tebal setelah dikenai tegangan V dan  0r:permitivitas

* Kegagalan streamer adalah kegagalan yang terjadi sesudah suatu banjiran (avalance). Sebuah elektron yang memasuki band conduction di katoda akan bergerak menuju anoda dibawah pengaruh medan memperoleh energi antara benturan dan kehilangan energi pada waktu membentur. Jika lintasan bebas cukup panjang maka tambahan energi yang diperoleh melebihi pengionisasi latis (latice). Akibatnya dihasilkan tambahan elektron pada saat terjadi benturan. Jika suatu tegangan V dikenakan terhadap elektroda bola, maka pada media yang berdekatan (gas atau udara) timbul tegangan. Karena gas mempunyai permitivitas lebih rendah dari zat padat sehingga gas akan mengalami tekanan listrik yang besar. Akibatnya gas tersebut akan mengalami kegagalan sebelum zat padat mencapai kekuatan asasinya. Karean kegagalan tersebut maka akan jatuh sebuah muatan pada permukaan zat padat sehingga medan yang tadinya seragam akan terganggu. Bentuk muatan pada ujung pelepasan ini dalam keadaan tertentu dapat menimbulkan medan lokal yang cukup tinggi (sekitar 10 MV/cm). Karena medan ini melebihi kekuatan intrinsik maka akan terjadi kegagalan pada zat padat. Proses kegagalan ini terjadi sedikit demi sedikit yang dapat menyebabkan kegagalan total.
* Kegagalan termal, adalah kegagalan yang terjadi jika kecepatan pembangkitan panas di suatu titik dalam bahan melebihi laju kecepatan pembuangan panas keluar. Akibatnya terjadi keadaan tidak stabil sehingga pada suatu saat bahan mengalami kegagalan. Gambar kegagalan ini ditunjukkan seperti :

[**Gambar-2**](https://www.elektroindonesia.com/elektro/en13-2.gif)**Kegagalan Termal**

Dalam hukum konversi energi :

U0 = U1+U2, dimana :
U0:panas yang dibangkitkan
U1:panas yang disalurkan keluar
U2 :panas yang menaikkan suhu bahan
atau   dimana :
Cv: panas spesifik ; k : konduktivitas termal;  : konduktivitas listrik E: tekanan listrik.

Pada arus bolak balik terdapat hubungan langsung antara konduktivitas dengan dengan frekuensi dan permitivitas yaitu :
 =  1 0  r dan  r=  r' + j  r"
dimana  0 : konstanta dielektrik dan  r permitivitas relatif.

Karena adanya faktor ini, maka rugi rugi pada medan arus bolak balik lebih besar dari arus searah. Akibatnya kuat gagal termal pada tegangfan AC lebih kecil daripda kuat gagal termal medan arus DC. Kuat gagal termal untuk medan bolak balik juga menurun dengan naiknya frekuensi tegangan.

* Kegagalan Erosi, adalah kegagalan yang disebabkan zat isolasi pada tidak sempurna, karena adanya lubang lubang atau rongga dalam bahan isolasi padat tersebut. Lubang/rongga akan terisi oleh gas atau cairan yang kekuatan gagalnya lebih kecil dari kekuatan zat padat. Gambar kegagalan isolasi dan rangkaian ekivalennya ditunjukkan oleh gambar dibawah ini:

[**Gambar-3**](https://www.elektroindonesia.com/elektro/en13-3.gif)

**Kegagalan erosi dan rangkaian**

[**Gambar-4**](https://www.elektroindonesia.com/elektro/en13-4.gif)

**Bentuk Gelombang rongga isolasi**

**ekivalen padat**

Untuk t <<< d yang mecerminkan keadaan sebenarnya, bila rongga terisi gas, maka tegangan pada C1 adalah V1=  r. t/dt Va

dimana :

C1 :Kapasitansi rongga yang tebalnya t
C2 :Kapasitansi rongga yang tebalnya d
V1 :Tegangan pada rongga
Va :Tegangan terminal
 r :Permitivitas relatif zat isolasi padat

Jika tegangan AC yang dikenakan tidak menghasilkan kegagalan, maka bentuk gelombang yang terjadi pada rongga adalah V1, tetapi jika V1 cukup besar, maka bisa terjadi kegagalan pada tegangan V1'. Pada saat terjadi lucutan dengan tegangan V1' maka pada rongga tersebut terjadi busur api. Busur api yang terjadi diiringi oleh jatuhnya tegangan sampai V1" dan mengalirnya arus. Busur api kemudian padam. Tegangan pada rongga naik lagi sampai terjadi kegagalan berikutnya pada tegangan V1'. Hal ini juga terjadi pada setengah gelombang (negatif) berikutnya. Rongga akan melucut pada waktu tegangan rongga mencapai -V1'. Pada waktu gas dala rongga gagal, permukaan zat isolasi padat merupakan katoda - anodadengan bentuk yang ditunjukkan seperti berikut:

[**Gambar-5**](https://www.elektroindonesia.com/elektro/en13-5.gif)**Bentuk Gas dalam rongga saat mengalami kegagalan**

Benturan elektron pada anoda mengakibatkan terlepasnya ikatan kimiawi pada isolasi padat tersebut. Demikian pula pemboman katoda oleh ion ion positif akan mengakibatkan kenaikan suhu yang menyebabkan ketidakstabilan termal, sehingga dinding zat padat lama kelamaan menjadi rusak, rongga menjadi semakin besar dan isolasi menjadi tipis. Hubungan antara tegangan lucutan dan umur dinyatakan dengan  dimana : Vi : tegangan dimana mulai terjadi lucutan, Va : tegangan yang diterapkan n : nilai antara 3 dan 10 dan A adalah konstanta.

**Mekanisme Kegagalan Isolasi Zat Cair**

Jika suatu tegangan dikenakan terhadap dua elektroda yang dicelupkan kedalam cairan (isolasi) maka terlihat adanya konduksi arus yang kecil. Jika tegangan dinaikkan secara kontinyu maka pada titik kritis tertentu akan terjadi lucutan diantara kedua elektroda. Lucutan dalam zat cair ini akan terdiri dari unsur-unsur sebagai berikut :

1. Aliran listrik yang besarnya ditentukan oleh karakteristik rangkaian
2. Lintasan cahaya yang cerah dari elektroda yang satu ke elektroda yang lain.
3. Terjadi gelembung gas dan butir butir zat padat hasil dekomposisi zat cair
4. Terjadi lubang pada elektroda

**1. Kegagalan Elektronik pada Zat Cair**

Jika elektroda memiliki bagian permukaan tidak rata (ada yang runcing) maka kuat medan yang terbesar terdapat pada bagian yang runcing tersebut. Kuat maksimum ini akan mengeluarkan elektron e1 yang akan memulai terbentuknya banjiran elektron. Elektron yang dihasilkan e1, e2, e3 dan en yang kemudian akan menyebabkan timbulnya arus konduksi dalam zat cair pada kuat medan yang tinggi. Arus yang timbul mempunyai kerapatan (*Schottky*) :



dimana :

J : kerapatan arus konduksi; J1: kerapatan arus termionik; Ea :kuat medan yang diterapkan; m : faktor ketidakrataan permukaan (=10 untuk permukaan halus)

Kondisi mulai terjadinya banjiran elektron, dip[eroleh dengan menyamakan perolehsn energi oleh elektron yang menempuh lintasan rata-rata yaitu U1 = F  = e E  , dengan energi untuk mengionisasi molekul U2= C.h dimana E : kuat medan yang diterapkan,
 : lintasan bebas rata rata, h : catu (kuantum) energi yang diperlukan untuk mengionisasikan molekul dan C : konstanta.

**2. Kegagalan gelembung atau Kavitasi pada Zat Zair**

Kegagalan gelembung atau kavitasi merupakan bentuk kegagalan isolasi zat cair yang disebabkan oleh gelembung-gelembung gas didalamnya. Sebab sebab timbulnya gelembung gas (*Kao dan Krasucki*) adalah :

* + Permukaan elektroda tidak rata, sehingga terjadi kantong kantong udara dipermukaannya
	+ Adanya tabrakan elektron sehingga terjadi produk-produk baru berupa gas
	+ Penguapan cairan karena adanya lucutan pada bagian bagian elektroda yang tajam dan tidak teratur
	+ Zat cair mengalami perubahan suhu dan tekanan

Medan listrik dalam gelembung gas yang ada dalam isolasi zat cair 
dimana  1 adalah permitivitas zat cair dan E0 adalah medan listrik dalam zat cair tanpa gelombung.

Bila Eb sama dengan batas medan ionisasi gas, maka akan terjadi lucutan pada gelombung. Hal ini akan mempercepat pembentukan gas karena dekomposisi zat cair dan dapat mengakibatkan kegagalan isolasi. Bentuk pengaruh medan terhadap gelembung udara ditunjukkan pada gambar-6.

[**Gambar-6**](https://www.elektroindonesia.com/elektro/en13-6.gif)**Pengaruh Medan terhadap gelembung udara**

Karena pengaruh medan yang kuat diantara elekroda maka gelobung gelombung udara dalam cairan tersebut akan berubah menjadi memanjang searah dengan medan. gelembung gelembung tersebut akan saling sambung menyambung dan membentuk jembatan yang akhirnya akan mengawali terjadinya kegagalan seperti dalam gambar:

[**Gambar-7**](https://www.elektroindonesia.com/elektro/en13-7.gif)**Kekuatan gagal medan gelombung**

Kekuatan gagal medan gelembung adalah :


dimana  1 dan  2 adalah permitivitas zat cair dan permitivitas gelembung , r jari jari awal gelembung (dianggap bola), Vb jatuh tegangan dalam gelembung dan  adalah gaya tegang (tension) permukaan zat cair.

**3. Kegagalan Bola Cair dalam Zat Cair**

Jika suatu zat isolasi cair mengandung sebuah bola cair atau jenis cairan lain, maka dapat terjadi kegagalan akibat ketidakstabilan bola cair tersebut dalam medan listrik. Bola cair yang dikenai medan E akan beruabah bentuk menjadi sferoida seperti ditunjukkan dalam gambar berikut dengan medan di dalamnya sebesar E2, maka hubungan antara kedua medan adalah : dan 

 1 permitivitas zat cair isolasi dan  2 adalah permitivitas zat cair



**Gambar-8 Medan listrik bentuk sferoida**

**4. Kegagalan Butiran Padat dalam Zat Cair**

Kegagalan ini disebabkan oleh adanya butiran (particle) didalam bahan isolasi yang akan menyebabkan terjadinya kegagalan seperti yang ditunjukkan dalam gambar di bawah.

Besarnya gaya yang bekerja pada butiran dalam medan tak homogen (*Kok*) :



dimana : R jari jari butiran dan E gradien tegangan

[**Gambar-9 Kegagalan butiran Padat**](https://www.elektroindonesia.com/elektro/en13-9.gif)

Jika  2 >  1, maka arah gaya yang bekerja pada butiran searah dengan tekanan listrik maksmum (FA) sehingga gaya akan mendorong butiran ke arah bagian yang kuat dari medan.
Jika  2 <  1, maka arah gaya berlawanan dengan tekanan listrik maksimum (FB). Gaya F ini akan besar bila  2 besar. Untuk butiran penghantar  2  sehingga F=1/2 R3 grad.E2.

Untuk medan yang seragam, medan poaling kuat ditempat yang seragam, disini grad.E2=0. Oleh sebab itu butiran akan tertarik ke tempat dimana medannya seragam. Akibatnya butiran akan sejajar diantara kedua elektroda dan seolah olah membentuk jembatan yang mengawali terjadinya kegagalan isolasi. Adanya butiran penghantar diantara elektroda akan mengakibatkan pembesaran medan dalam zat cair didekat permukaan butiran. Pembesaran medan ini ditentukan oleh bentuk butiran.

**5. Kegagalan Campuran Zat Cair-Padat**

Kegagalan isolasi cair-padat (isolasi kertas dicelup dalam minyak) biasanya disebabkan oleh pemburukan. Pemburukan yang dapat menyebabkan kegagalan isolasi cair-padat yaitu :

* + Pemburukan karena pelepasan dalam (internal discharge)
	+ Pemburukan elektro-kimiawi

Jika campuran dielektrik zat cair-padat memiliki kekuatan gagal yang berbeda beda maka jika tegangan listrik dinaikkan, akan terjadi kegagalan pada zat yang paling lemah. Hal ini dapat mengakibatkan kegagalan parsial (partial discharge). Pelepasan ini mengakibatkan pemburukan perlahan lahan karena :

1). Disintegrasi dielektrik padat yang diakibatkan pemboman oleh elektron dan ion yang dihasilkan.
2). Aksi kimiawi pada dielektrik karena ionisasi gas
3). Suhu tinggi di daerah pelepasan.

Pemburukan elektro-kimiawi terjadi karena ion-ion yang dibebaskan oleh arus pada elektroda bisa menyebabkan kerusakan. Derajat kerusakan yang terjadi tergantung pada sifat ion yang terbawa dan reaksi kimia dengan ionisasi. Kerusakan bisa terjadi pada tegangan DC maupun AC.

**Mekanisme Kegagalan Isolasi Gas**

Proses dasar dalam kegagalan isolasi gas adalah ionisasi benturan oleh elektron.
Ada dua jenis proses dasar yaitu :

* Proses primer, yang memungkinkan terjadinya banjiran elektron
* Proses sekunder, yang memungkinkan terjadinya peningkatan banjiran elektron

Saat ini dikenal dua mekanisme kegagalan gas yaitu :

* Mekanisme Townsend
* Mekanisme Streamer

**1. Mekanisme Kegagalan Townsend**

Pada proses primer, elektron yang dibebaskan bergerak cepat sehingga timbul energi yang cukup kuat untuk menimbulkan banjiran elektron. Jumlah elektron Ne pada lintasan sejauh dx akan bertambah dengan dNe, sehingga elektron bebas tambahan yang terjadi dalam lapisan dx adalah dNe =  Ne.dx . Ternyata jumlah elektron bebas dNe yang bertambah akibat proses ionisasi sama besarnya dengan jumlah ion positif dN+ baru yang dihasilkan, sehingga dNe = dN+ =  Ne.(t).dt; dimana :

 : koefisien ionisasi Townsend
dN+: junlah ion positif baru yang dihasilkan
Ne : jumlah total elektron
Vd : kecepatan luncur elektron

Pada medan uniform,  konstan, Ne = N0, x = 0 sehingga Ne = N0   x
Jum;lah elektron yang menumbuk anoda per detik sejauh d dari katoda sama dengan jumlah ion positif yaitu N+ = N0 x

Jumlah elektron yang meninggalkan katoda dan mencapai anoda adalah :


Arus ini akan naik terus sampai terjadi peralihan menjadi pelepasan yang bertahan sendiri. Peralihan ini adalah percikan dan  diikuti oleh perubahan arus dengan cepat dimana karena   d >> 1 maka  0   dsecara teoritis menjadi tak terhingga, tetapi dalam praktek hal ini dibatasi oleh impedansi rangkaian yang menunjukkan mulainya percikan.

**2. Mekanisme Kegagalan Streamer**

Ciri utama kegagalan streamer adalah postulasi sejumlah besar foto ionisasi molekul gas dalam ruang di depan streamer dan pembesaran medan listrik setempat oleh muatan ruang ion pada ujung streamer. Muatan ruang ini menimbulkan distorsi medan dalam sela. Ion positif dapat dianggap stasioner dibandingkan elektron-elektron yang begerak cepat dan banjiran elektron terjadi dalam sela dalam awan elektron yang membelakangi muatan ruang ion positif. Medan Er yang dihasilkan oleh muatan ruang ini pada jari jari R adalah :



Pada jarak dx, jumlah pasangan elektron yang dihasilkan adalah    x dx sehingga :



R adalah jari jari banjiran setelah menempuh jarak x, dengan rumus diffusi R= (2Dt).
Dimana t = x/V sehiungga  dimana :
N : kerapatan ion per cm2, e : muatan elektron ( C ),  0 : permitivitas ruang bebas, R: jari jari (cm), V : kecepatan banjiran, dan D : koefisien diffusi.

**Lokasi dan Pengukuran Partial Discharge**

Partial discharge yang merupakan peristiwa pelepasan/loncatan bunga api listrik pada suatu bagian dari bahan isolasi padat kemungkinan terjadinya meliputi pada :

* + Rongga terhubung langsung pada elektroda
	+ Rongga dalam isolasi
	+ Rongga yang dipisahkan oleh elektroda
	+ Permukaan elektroda
	+ Titik elektroda yang berbentuk kanal
	+ Rongga isolasi yang berbentuk kanal

**Kesimpulan**

1. Partial discharge merupakan proses atau peristiwa pelepasan/loncatan bunga api listrik yang terjadi pada suatu bagian bahan isolasi yang disebabkan oleh adanya beda potensial yang tinggi dalam bahan isolasi.
2. Partial discharge dapat terjadi pada bahan isolasi padat, bahan isolasi cair maupun bahan isolasi gas.
3. Kegagalan pada bahan isolasi padat meliputi : kegagalan intrinsik, kegagalan elektromekanik, kegagalan streamer, kegagalan termal dan kegagalan erosi.
4. Kegagalan pada bahan isolasi cair meliputi:
	1. Kegagalan elektronik pada zat cair
	2. Kegagalan gelembung (kavitasi) yang disebabkan oleh permukaan elektroda yang tidak merata, adanya tabrakan elektron, penguapan cairan dan akibat perubahan suhu dan tekanan
	3. Kegagalan bola cair dalam zat cair
	4. Kegagalan butiran padat dalam zat cair
5. Mekanisme kegagalan pada bahan isoalsi gas meliputi mekanisme kegagalan Townsend dan mekanisme kegagalan streamer

**Daftar Pustaka**

* A.Arismunandar, "Teknik Tegangan Tinggi Suplemen", Galia Indonesia, 1983 C.Mayonx and C.Laurent, " Contribution of PD to Electrical Breakdown of Solid Insulation Material", IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, August 1995, vol. 2 No. 4, p.641
* Davit A.Nattrass, "Partial Discharge Measurement and Interpretation", IEEE Electrical Insulation Magazine, May/June 1988, vol. 4 No.13
* Dieter Kind/Herman Karnen, "High Voltage Insulation Technology", Friedr, Vieweg and Sohn Verlagsgesells chaff mbH, Braunsch Weight, 1985
* Dieter Kind, "Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi, penerbit ITB Bandung, 1993
* D.V Razevig, "High Voltage Engineering", Khana Publisher, Delhi, 1979
* Edward Gulski, "Diagnosis of HV Component by Digital PD Analyzer, IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, August 1995, vol.2 No.4 p.630