

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Kabel harus mampu mengalirkan arus listrik tanpa ada pemanasan berlebih dan tegangan tetap normal. Pemanasan merupakan salah satu persoalan pada kabel tanah. Arus yang mengalir pada kabel menyebabkan sebagian energi listrik menjadi energi panas dan batas kapasitas pembebanan ditentukan dari seberapa besar kenaikan temperatur penghantar.

2.2 Konstruksi Kabel Tanah

Kabel merupakan penghantar yang berisolasi dan dilapisi oleh pelindung kabel guna menghindari pengaruh garam-garam tanah dan bahan kimia yang berada dalam tanah.

Konstruksi kabel sebagai penghantar berisolasi dibagi menjadi :

- Bagian Utama

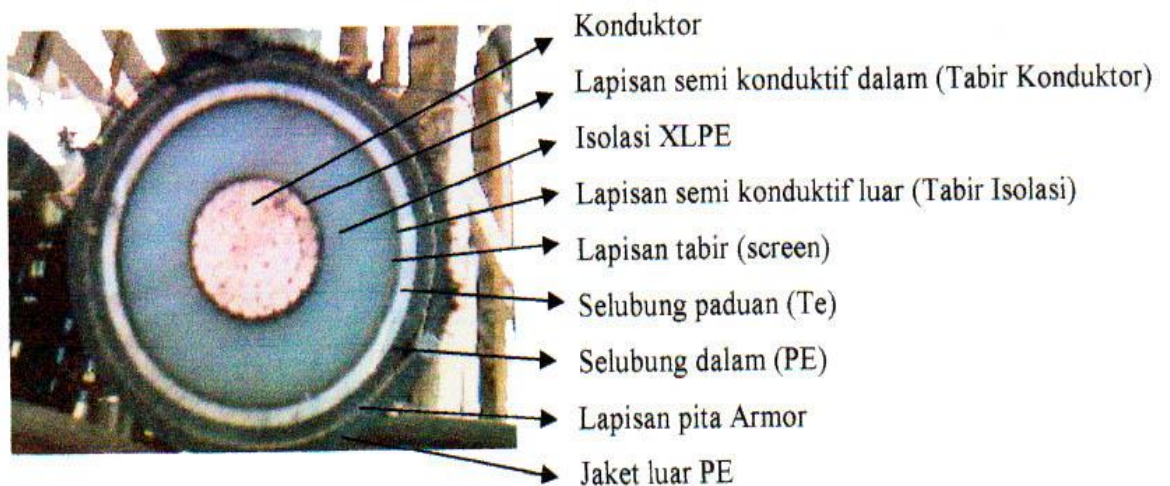
Bagian utama merupakan bagian yang harus ada (dimiliki) oleh kabel listrik, diantaranya :

1. Penghantar (konduktor).
2. Isolasi.

- Bagian Pelindung

Bagian pelindung ialah bagian-bagian dalam kabel yang berfungsi untuk melindungi penghantar dan isolasi agar dapat bekerja secara maksimum. Bagian tersebut diantaranya :

1. Tabir (screen).
2. Selubung (sheath).
3. Bantalan (bedding).
4. Perisai (armor).
5. Bahan Pengisi (Filler).
6. Jaket Kabel (serving)



Gambar 2.1. Konstruksi Kabel

2.2.1 Konduktor

Konduktor adalah bagian kabel yang berfungsi untuk menghantarkan arus listrik. Kuat hantar arus listrik konduktor sangat dipengaruhi oleh unsur-unsur campurannya, kemurnian dan ketidaksempurnaan dalam kristal logam. Unsur-unsur campuran selain mempengaruhi daya hantar arus listrik juga dapat mempengaruhi sifat-sifat mekanik dan fisika lainnya. Logam murni memiliki sifat daya hantar arus listrik yang lebih baik daripada logam yang memiliki kemurnian lebih rendah, tetapi kekuatan mekanis logam murni lebih rendah dibanding logam yang memiliki kemurnian yang lebih rendah.

Tabel 2.1.

Hantaran jenis berbagai logam dan paduannya pada suhu kamar

Logam	Hantaran Jenis (Ω -m)
Perak (Ag)	6.8×10^{-7}
Tembaga (Cu)	6.0×10^{-7}
Emas (Au)	4.3×10^{-7}
Aluminium (Al)	3.8×10^{-7}
Kuningan (70 % Cu-30% Zn)	1.6×10^{-7}
Besi (Fe)	1.0×10^{-7}
Baja Karbon (Fe-C)	0.6×10^{-7}
Baja Tahan Karat (Fe-Cr)	0.2×10^{-7}

Konduktor yang lebih banyak digunakan saat ini adalah :

- Tembaga, dengan kemurnian 99,99%.
- Alumunium, dengan kemurnian 99,3%.

Kedua penghantar tersebut terpilih diantara jenis logam penghantar lain karena memenuhi nilai kompromi teknis ekonomi termurah.

Bentuk-bentuk penghantar yang digunakan dalam kabel ialah :

- Penghantar bulat tanpa rongga (pejal).
- Penghantar bentuk sektoral.
- Penghantar bulat berongga.

2.2.2 Isolasi

Isolasi pada kabel bertujuan untuk mencegah terjadinya aliran listrik dari penghantar beroperasi ke tanah atau penghantar lainnya yang berdekatan. Isolasi yang ideal harus mempunyai sifat-sifat sebagai berikut :

- Mampu menahan stress listrik yang ditimbulkan oleh tegangan bolak-balik
- Tahanan jenis yang tinggi
- Tidak menghisap air / uap air (non hygroskopis)
- Mudah dibengkokkan (fleksibel)
- Tidak mudah terbakar
- Sanggup menahan tegangan impuls yang tinggi
- Dapat bekerja pada suhu rendah atau suhu tinggi

Tidak mungkin suatu jenis isolasi mempunyai sifat-sifat yang telah disebutkan diatas, oleh karena itu diperlukan pemilihan jenis isolasi dengan pertimbangan yang sesuai dengan maksud dan tujuan kabel yang dipakai.

Jenis-jenis isolasi yang banyak digunakan adalah :

- Kertas yang diimpregnasi dengan minyak (oil impregnated paper tapes)
- XLPE (cross linked polyethylene)
- Karet (Rubber)
- PVC (Polyvinyl Chloride)
- PE (Polyethylene)

Saat ini isolasi XLPE merupakan jenis isolasi yang sangat luas pemakaiannya karena sifat mekanis yang cukup baik dan tidak menghisap air.

Keuntungan pemakaian XLPE :

- Tahan panas , sehingga tidak mudah meleleh.
- Temperatur kerja yang tinggi (90°C).
- Tahanan isolasi yang tinggi (10^{19} ohm-cm).
- Umur kabel relatif lebih lama.

Kerugiannya :

- Bila dipakai pada tegangan tinggi, proses penuaan yang mengurangi umur lebih cepat terjadi.
- Bila terdapat gelombang udara atau partikel didalam isolasi XLPE, maka akan mengakibatkan gejala treeing, sehingga akan menimbulkan kegagalan isolasi.

2.2.3 Lapisan Semi Konduktif

Lapisan semi konduktif adalah lapisan yang melingkupi setiap inti kabel yang bekerja pada tegangan tinggi. Tabir ini terbuat dari bahan kompon grafit.

Lapisan semi konduktif ada dua macam :

1. Lapisan semi konduktif dalam yang terpasang antara konduktor dengan isolasi.
2. Lapisan semi konduktif luar yang terpasang antara isolasi dengan tabir (screen).

Fungsi lapisan semi konduktif ialah :

1. Untuk mendapatkan distribusi medan listrik yang seragam sehingga tidak terjadi penumpukan tegangan pada celah-celah elemen penghantar.
2. Mencegah terjadinya korona discharge antara penghantar dan isolasi (celah-celah elemen penghantar).

2.2.4 Tabir (screen)

Tabir (screen) konduktif adalah lapisan yang terpasang antara lapisan semi konduktif dengan selubung dalam, bila kabel tidak dilengkapi dengan perisai (armor) maka lapisan ini dipasang antara lapisan tabir semi konduktif dan sarung kabel. Tabir (screen) ini dibuat dari bahan penghantar seperti tembaga.

Bentuk-bentuk pemasangan tabir (screen) pada kabel sebagai berikut :

- Pita yang dililitkan sepanjang kabel.
- Pita yang dipasang memanjang dan ditutup dengan cara mekanis.
- Pembalut berbentuk anyaman dipasang pada kabel.

2.2.4.1 Tabir Semi Konduktif

Tabir (screen) semikonduktif adalah lapisan yang melingkupi setiap inti kabel untuk kabel tegangan tinggi. Tabir (screen) ini dibuat dari bahan semi konduktor.

Fungsi tabir semikonduktif diantaranya :

- Untuk mendapatkan distribusi medan listrik yang seragam sehingga tidak terjadi penumpukan tegangan pada celah-celah elemen penghantar.
- Mencegah terjadinya corona discharge antara penghantar dan isolasi (celah-celah elemen penghantar)

Letak pemasangan lapisan tabir (screen) yaitu :

- Dipasang diantara tabir konduktif dan isolasi (outer semi conductive compound atau insulator screen), atau lebih dikenal sebagai tabir luar.

- Dipasang antara isolasi dan hantaran (inner semi conductive compound atau conductor screen), atau dikenal sebagai tabir dalam.

2.2.4.2 Tabir konduktif

Tabir (screen) konduktif adalah lapisan netral di luar isolasi untuk kabel tegangan menengah dan kabel tegangan tinggi. Lapisan ini dihubungkan dengan ground.

Fungsi dari tabir (screen) konduktif diantaranya :

- Untuk mendapatkan distribusi medan yang radial.
- Menjamin pentanahan sepanjang rangkaian bagian luar kabel untuk mengamankan manusia terhadap bahaya tegangan sentuh listrik.
- Mengalirkan arus kapasitif yang timbul dalam isolasi karena adanya tegangan fasa ke tanah.
- Mengalirkan arus gangguan hubung singkat ke tanah sampai pentanahan yang paling dekat.

2.2.5 Selubung (sheath)

Bahan selubung (sheath) dapat dibagi menjadi tiga golongan diantaranya :

1. selubung logam, misalnya timbel, aluminium.
2. selubung karet (sintetis), misalnya karet silikon (silicone rubber), polychloroprene.
3. Selubung plastic, misalnya PVC.

Fungsi selubung (sheath), sebagai berikut :

- Melindungi inti kabel dari pengaruh luar.
- Melindungi kabel terhadap korosi.
- Menahan gaya mekanis.
- Melindungi / mengamankan kabel terhadap gaya listrik dari luar.
- Mencegah masuknya uap air / cairan ke dalam kabel secara vertikal.
- Untuk kabel kertas yang diresapi minyak (impregnated paper), selubung juga mencegah keluarnya minyak.

2.2.6 Bantalan (bedding)

Bantalan berfungsi sebagai kedudukan perisai (armor) dan mencegah proses elektrolisa, sehingga tidak merusak bagian dalamnya. Bantalan diletakkan dibawah perisai (armor).

Pada kabel isolasi kertas, bantalan dilengkapi dengan kompon kedap air, dan mempunyai sifat-sifat sebagai berikut :

- Tidak bereaksi dengan selubung dan perisai namun tetap melekat dengan sempurna pada selubung dan perisai.
- Tidak mudah berubah dengan adanya perubahan temperatur.
- Tidak mudah sobek bila terkena getaran.

2.2.7 Perisai (armor)

Perisai (armor) berfungsi untuk melindungi bahan isolasi dari kerusakan mekanis, karena bahan isolasi mempunyai sifat mekanis yang kurang sempurna.

Berdasarkan bentuknya perisai dapat digolongkan menjadi tiga jenis yaitu :

- Perisai pita baja (steel tape armour).
- Perisai kawat baja (steel wire armour).
- Perisai alumunium (alumunium armour).

2.2.8 Bahan Pengisi (filler)

Bahan pengisi (filler) adalah bahan yang digunakan untuk mengisi ruang (celah) yang masih kosong antara ketiga inti kabel, supaya didapat bentuk kabel yang bulat, selain itu bahan pengisi berfungsi untuk memisahkan selubung dengan tabir (screen) logam. Hal ini untuk menghindari kemungkinan selubung luka akibat goresan tabir (screen) logam. Bahan pengisi untuk kabel kertas menggunakan jute (serat goni), sedangkan kabel XLPE menggunakan PVC.

2.2.9 Jaket Kabel (serving)

Jaket kabel ini dipasang diatas perisai (armor) yang berfungsi sebagai bantalan bagi perisai, dan juga sebagai komponen yang berhubungan langsung dengan tanah.

Pada kabel kertas, jaket kabel menggunakan bahan dari jute (serat goni), dan pada kabel XLPE jaketnya terbuat dari PVC.

2.3 Penandaan

Pada umumnya, kabel tegangan menengah inti tiga berisolasi XLPE juga menggunakan penandaan untuk memudahkan pekerja dalam mengidentifikasi kabel tersebut. Penandaan pada kabel biasanya terletak pada permukaan selubung luar kabel serta pada kemasan (drum). Pada permukaan selubung luar harus diberi tanda pengenal dengan cetak timbul yang jelas, tidak mudah terhapus, dengan jarak antara tidak melebihi 50 cm.

Penandaan tersebut antara lain berisi :

- a) Tanda standar SPLN 43.
- b) Tanda pengenal produsen.
- c) Kode pengenal jenis kabel.
- d) Jumlah inti dan luas penampang.
- e) Tegangan pengenal.
- f) Tanda Pengenal Badan Penguji.

Kabel tegangan menengah inti tiga berisolasi XLPE menggunakan kode pengenal jenis kabel (nomenklatur) seperti berikut :

Tabel 2.2. Arti simbol kabel type XLPE

Huruf Kode	Komponen
N	Kabel jenis standar dengan tembaga sebagai penghantar
NA	Kabel jenis standar dengan alumunium sebagai penghantar
2X	Isolasi XLPE (polietilen ikat silang)
CE	Penghantar konsentris pada masing-masing inti
Y	Selubung dalam PVC
2Y	Selubung luar PE (polietilen)
Y	Selubung luar PVC
FGb	Perisai kawat baja galvanis pipih
RGb	Perisai kawatbaja galvanis bulat
B	Perisai pita baja galvanis
Cm	Penghantar dipilin bulat dipadatkan

Penandaan kode pengenal dilengkapi dengan jumlah inti, luas penampang penghantar serta tegangan pengenal U_o/U . Selubung luar kabel harus berwarna merah.

2.4 Penandaan pada kemasan

Pada setiap kemasan harus tercantum penandaan yang jelas, mudah dibaca dan tidak mudah terhapus. Penandaan pada kemasan sekurang-kurangnya adalah :

- a. Nama standar SPLN 43
- b. Tanda Pengenal Produsen
- c. Kode pengenal jenis kabel
- d. Luas penampang penghantar
- e. Tegangan pengenal
- f. Panjang kabel dalam meter
- g. Arah gulungan dengan tanda anak panah
- h. Berat bersih dan kotor (sebagai informasi untuk transportasi)

1.5 Sumber-sumber Panas Yang Terjadi Pada Penghantar

Ada beberapa hal yang dapat menimbulkan terjadinya panas pada penghantar, tergantung dari instalasi serta lokasi pemasangannya. Panas yang terjadi dapat dinyatakan sebagai rugi-rugi kabel.

2.5.1 Rugi-rugi Joule Pada Konduktor

Rugi-rugi pada kabel umumnya disebabkan oleh karakteristik alami yang dimiliki oleh setiap kabel. Pada saat arus mengalir melewati kabel menyebabkan sebagian energi listrik berubah menjadi energi panas. Dalam sistem tersebut energi panas yang terjadi pada kabel merupakan rugi-rugi, hal tersebut dikenal

dengan istilah rugi-rugi joule. Dilambangkan dengan notasi W_c (W/m) dapat ditulis ke dalam persamaan :

$$W_c = I^2 R \quad (2.1)$$

dimana : W_c : Rugi-rugi konduktor

I : arus yang melewati konduktor

R : tahanan ac pada suhu kerja konduktor

Pada instalasi kabel tenaga, panas yang dihasilkan oleh rugi-rugi ini dikeluarkan melalui sekeliling tanah ataupun melalui udara.

2.5.2 Tahanan Pada Penghantar

Hubungan antara tahanan per satuan panjang pada suhu 20°C (R_{20}) dengan tahanan jenis konduktor dan luas penampang dari sebuah penghantar dinyatakan dengan persamaan :

$$R_{20} = \frac{\rho_{20}}{S} \quad (2.2)$$

Dimana : ρ_{20} = tahanan jenis listrik (electric resistivity) material konduktor pada suhu 20°C .

Dengan perubahan temperatur, tembaga dan aluminium dapat mengalami perubahan terhadap dimensi dan tahanan jenis (resistivity).

$$R' = R_{20} [1 + \alpha_{20} (\theta_{maks} - 20)] \quad (2.3)$$

dimana : α_{20} = koefisien temperatur tahanan pada suhu 20 °C

θ = temperatur konduktor yang sebenarnya

Kemudian kita hitung nilai tahanan AC (R) dengan persamaan sebagai berikut :

$$R = R' (1 + y_s + y_p) \quad (2.4)$$

dengan :

y_s = faktor skin efek

y_p = faktor efek proximity

Tabel 2.3

Tahanan Termal dan koefisien Suhu dari logam yang digunakan
berdasarkan konstruksi kabel

Material	Resistivity (ρ) Ohm.m at 20 °C	Temperatur Coefficient (α_{20}) per K at 20°C
a) Conductor		
Copper	1.7241×10^{-8}	3.93×10^{-3}
Alumunium	2.8264×10^{-8}	4.03×10^{-3}
b) Sheaths and Armor		
Lead or lead alloy	21.4×10^{-8}	4.0×10^{-3}
Steel	13.8×10^{-8}	4.5×10^{-3}
Bronze	3.5×10^{-8}	3.0×10^{-3}
Stainless steel	70×10^{-8}	Negligible
Aluminium	2.84×10^{-8}	4.03×10^{-3}

Tabel. 2.4Nilai koefisien k_s dan k_p

Type of conductor	k_{sk}	k_{sp}
Round, stranded	1	0.8
Round, stranded	1	1
Round, compact	1	0.8
Round, compact	1	1
Round, segmental	0.435	0.37
Hollow, helical stranded	-	0.8
Sector-shaped	1	0.8
Sector-shaped	1	1

2.5.3 Rugi-rugi Joule Pada Tabir (Screen), Selubung (Sheath), Perisai (Armor) dan Pipa (Pipe)

Rugi-rugi ini disebabkan oleh aliran arus pada penghantar yang menyebabkan komponen tabir (screen) kabel, selubung (sheath) dan armor (perisai) mengalami panas.

Rugi-rugi pada perisai pelindung (protective armor) terbagi dalam beberapa kategori, tergantung pada tipe kabel, material dari armor dan metode instalasi. Perisai pada kabel inti-satu (single core) tanpa selubung metalik biasanya memiliki perisai non-magnetik karena rugi-rugi pada kawat baja atau pita perisai akan

tinggi. Untuk kabel dengan perisai magnetik, rugi-rugi perisai dihitung berdasarkan asumsi besarnya rugi-rugi selubung pada penghantar dan metode perhitungan.

Untuk kabel dengan selubung metalik dan perisai non-magnetik, rugi-rugi dihitung seperti rugi-rugi pada selubung, tapi menggunakan kombinasi tahanan selubung dan perisai pada kondisi parallel, dimana diameter rata-ratanya sama dengan nilai diameter selubung dan perisai. Prosedur yang sama juga diberlakukan untuk kabel inti-dua dan inti-tiga yang memiliki selubung metalik dan kawat perisai magnetik, rugi-rugi Eddy (arus pusar) pada perisai harus dipertimbangkan. Untuk kabel inti-dua atau inti-tiga yang memiliki perisai pita baja, rugi-rugi Eddy (rugi arus pusar) dan rugi-rugi hysteresis pada pita keduanya harus dipertimbangkan dengan efek dari perisai pada rugi selubung.

2.5.4 Faktor Rugi-rugi Pada Selubung dan Perisai

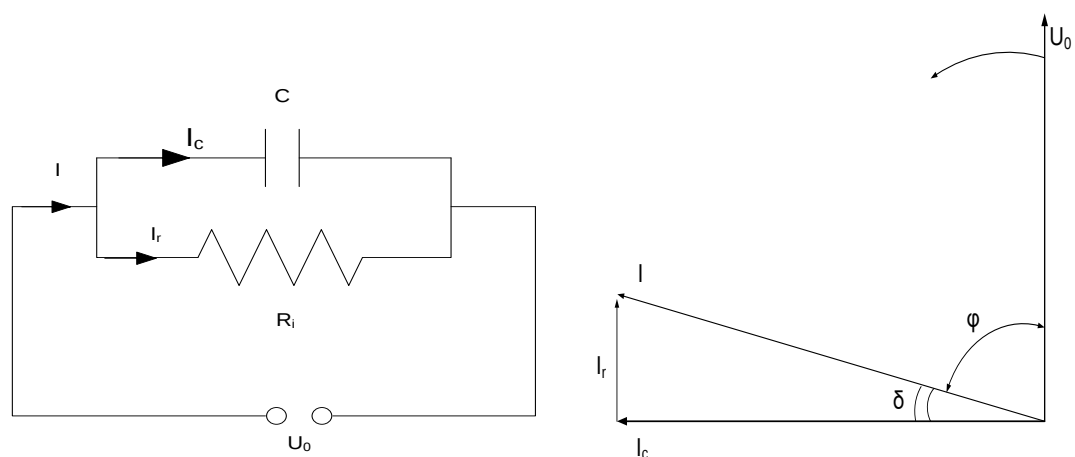
Arus bolak-balik pada penghantar akan mengalirkan tegangan AC pada selubung kabel, dengan demikian arus yang mengalir pada selubung penghantar menyebabkan panas dan akan menimbulkan rugi-rugi joule.

Rugi-rugi joule pada selubung penghantar tergantung pada jenis, bahan perisai, dan metode pemasangannya. Penghantar inti tunggal berselubung logam umumnya mempunyai perisai non magnetik. Rugi-rugi pada perisai dihitung seperti selubung penghantar dan metode perhitungannya tergantung pada pengikatan selubung penghantar. Untuk penghantar yang mempunyai selubung logam dan perisai non magnetik, rugi-rugi dihitung sama seperti rugi-rugi selubung penghantar.

2.5.5 Rugi-rugi Dielektrik

Apabila pada dielektrik kabel bekerja tegangan bolak-balik, maka dielektrik yang terjadi membuat kabel tersebut bersifat seperti kapasitor besar. Sehingga akan terjadi arus pengisian (charging current) pada kabel. Pada dielektrik akan terjadi pergeseran muatan setiap kali terjadi perubahan arah tegangan (50 kali/detik) menghasilkan panas dan rugi-rugi joule yang disebut rugi-rugi dielektrik.

Untuk satu satuan panjang penghantar, magnitude arus pengisian yang diperlukan adalah fungsi dari konstanta dielektrik pada isolasi, dimensi kabel, dan tegangan kerja. Isolasi kabel adalah material yang respon dielektriknya menghasilkan sifat kapasitif (mampu menyimpan muatan) dan sifat konduktif (mengalirkan muatan). Material ini dapat dinyatakan sebagai sebuah resistor dan kapasitor dalam hubungan parallel.



Gambar.2.2

Representasi isolasi kabel

Bila tegangan U_0 diberikan pada rangkaian, arus I akan membentuk sudut ω terhadap tegangan. Saat tegangan U_0 diberikan pada rangkaian ini, arus I akan membentuk sebuah sudut ω terhadap tegangan (gambar 2). Arus ini terbentuk dari 2 buah komponen diantaranya arus kapasitif (pengisian) I_c dan arus resistif (bocor) I_r . pada kasus ini material isolasinya baik magnitude dari vektor arus bocor jauh lebih kecil dari pada vektor arus pengisian. Sudut rugi-rugi δ sangat kecil. Arus pengisian dan arus bocor dapat dicari dengan persamaan :

$$I_c = j.\omega.C.U_0 \text{ dan } I_r = [U_0/R_i] \quad (2.9)$$

dimana :

C = kapasitansi isolasi

$$\omega = 2\pi f$$

f = frekuensi sistem

$$j = \sqrt{-1}$$

Untuk menghitung C , efek dielektrik kabel dijabarkan melalui konsep permitivitas relatif, dengan ε :

$$\varepsilon = [C/C_0] \quad (2.10)$$

Dimana C_0 adalah kapasitansi berdasarkan ukuran dan konstruksi dengan hampa udara (vacuum) sebagai dielektrik dan ε sering dianggap sebagai konstanta dielektrik, sehingga :

$$C = \varepsilon.C_0 = \frac{\varepsilon}{18 \ln \left[\frac{D_i}{D_c} \right]} . 10^9 \quad (2.11)$$

dimana :

D_i = diameter luar isolator termasuk tabir (tembaga)

D_c = diameter konduktor, termasuk tabir (screen)

Pengukuran lain dari dielektrik adalah faktor disipasi dinotasikan $\tan \delta$, dan dinyatakan sebagai faktor rugi-rugi isolator pada frekuensi daya.

$$\tan \delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{U_0}{R_i C_w \omega} = \frac{1}{R_i C \omega} \quad (2.12)$$

dimana :

U_0 : Tegangan pada dielektrik (Volt)

f : frekuensi (Hz)

C : kapasitansi dielektrik (Farad)

Semakin kecil nilai $\tan \delta$, maka semakin baik kondisi isolator tersebut. Pada medan listrik dan frekuensi sistem, faktor rugi-rugi akan mengalami pertukaran dengan temperatur.

Rugi-rugi dielektrik per unit panjang pada beberapa fasa didapat dari persamaan :

$$W_d = \frac{U_0^2}{R_i} = \pi \cdot C_1 \cdot U_0^2 \cdot \tan \delta \quad (2.13)$$