

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Isolator

Isolator merupakan alat tempat menopang kawat penghantar jaringan pada tiang-tiang listrik yang digunakan untuk memisahkan secara elektris dua buah kawat atau lebih agar tidak terjadi kebocoran arus (*leakage current*) atau loncatan bunga api (*flash over*) sehingga mengakibatkan terjadinya kerusakan pada sistem jaringan tenaga listrik. (Suswanto, 2009, p.65). Isolator berfungsi sebagai pemisah antar bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan. Selain itu, isolator juga berfungsi memikul beban mekanis yang di sebabkan oleh berat gaya tarik penghantar serta untuk menjaga agar tidak berubahnya jarak yang ada pada antar penghantar.

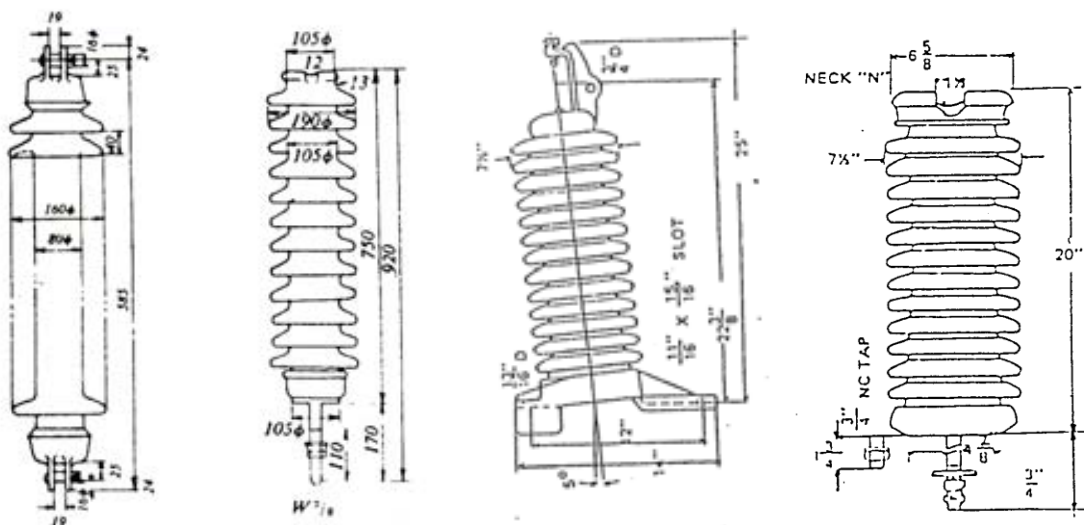
Isolator merupakan bagian yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Oleh karena itu untuk menentukan pilihan tentang isolator yang akan dipakai perlu mempertimbangkan syarat-syarat dari suatu isolator. Adapun syarat-syaratnya adalah sebagai berikut (Raina, dkk, 1985: 106):

- a. Isolator harus memiliki kekuatan mekanik yang tinggi sehingga mampu menahan berat dari kawat penghantar.
- b. Memiliki ketahanan isolasi yang tinggi untuk mencegah arus bocor ke tanah.
- c. Mampu menahan variasi temperatur yang besar, yaitu isolator tidak boleh pecah ketika terkena temperatur yang tinggi selama musim kemarau dan temperatur rendah selama musim hujan.
- d. Mampu mencegah peresapan gas pada tempat-tempat yang terpolusi serta pengaruh air dan udara lembab selama musim hujan.

2.2 Isolator Pos

Isolator jenis pos (*post type insulator*), digunakan pada tiang-tiang lurus (*tangent pole*) dan tiang sudut (*angle pole*) untuk sudut 5° sampai 15° . Dibandingkan dengan isolator jenis

pasak, isolator jenis pos ini lebih sederhana perencanaannya. Diameternya lebih kecil dan tak menggunakan kepingan-kepingan seperti isolator jenis pasak. Terdapat lekukan-lekukan pada permukaannya untuk mengurangi hantaran yang terjadi pada isolator. Makin tinggi tegangan isolasinya makin banyak lekukan-lekukan tersebut. Isolator jenis pos ini bagian atasnya diberi tutup (*cap*) dan bagian bawah diberi pasak yang terbuat dari bahan besi atau baja tempaan (Suswanto, 2009, p.73). Bahan yang digunakan untuk isolator jenis pos ini terbuat dari bahan porselin basah yang murah harganya. Isolator berjenis pos umumnya memiliki konstruksi seperti pada Gambar 2.1.

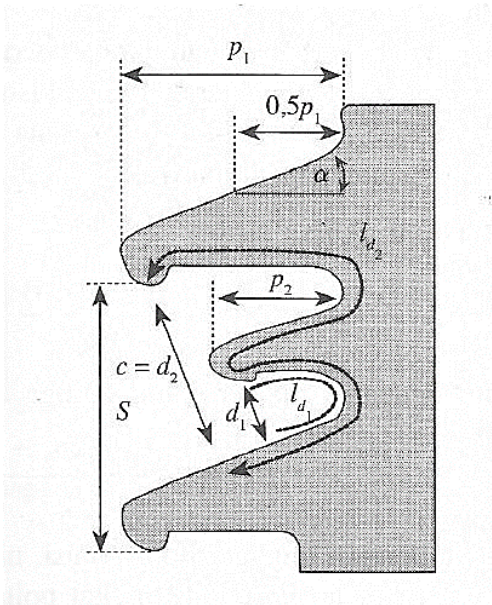


Gambar 2.1 Isolator Jenis Pos
Sumber: Tobing, (2012 p.73)

Kekuatan mekanis isolator jenis pos ini lebih tinggi dibandingkan isolator jenis pasak dan penggunaannya hanya pada jaringan distribusi primer untuk tiang lurus (*tangent pole*) pada sudut 5° sampai 15° . Isolator jenis pos yang digunakan untuk jaringan distribusi 20 kV, memiliki tegangan tembus sebesar 35 kV dengan kekuatan tarik (*tensile strenght*) sebesar 5000 pon.

2.3 Parameter isolator

Parameter geometris suatu isolator adalah suatu besaran yang membedakan profil suatu isolator dengan isolator lainnya. Parameter-parameter geometris suatu isolator dapat dijelaskan dengan bantuan Gambar 2.2. Parameter-parameter yang membedakan suatu isolator dengan isolator lainnya adalah sebagai berikut:



Gambar 2.2 Profil dan parameter isolator
 Sumber : Tobing (2012, p.145)

- Jarak minimum antar sirip (*shed*)
 c merupakan jarak minimum antar sirip berdekatan yang berdiameter sama, jarak ini perlu dipertimbangkan untuk mencegah penjematanan dua sirip yang berurutan pada saat kondisi hujan.
- Perbandingan jarak antar sirip dengan rentangan sirip (s/p)
 s (spasi) merupakan jarak vertikal antara dua titik yang sama pada sirip yang berurutan, sedangkan p merupakan jarak rentangan sirip maksimum. Rasio s/p menggambarkan pembatasan dalam pemilihan jarak bocor yang terlalu besar dan untuk menentukan sifat pembersihan sendiri dari isolator tersebut.
- Perbandingan jarak rambat dengan jarak bebas (l_d/d)
 Perbandingan jarak rambat dengan jarak bebas merupakan perbandingan yang dipertimbangkan untuk mencegah terjadinya hubung singkat lokal. Nilai perbandingannya tidak lebih daripada 5. Perbandingan diambil pada bagian isolator yang paling buruk.
- Sirip Selang-seling (*Alternating shed*)
 Parameter ini dipertimbangkan jika ada dua ukuran diameter sirip yang letaknya berselang-seling. Pada isolator seperti ini, selisih diameternya (p_1-p_2) tidak boleh kurang daripada 15 mm supaya kedua sirip tidak terhubung oleh air hujan.

- Kemiringan sirip

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

- Faktor jarak rambat (*creepage factor*)

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

- Faktor profil

Faktor profil merupakan faktor perbandingan jarak bocor yang disederhanakan (*simplified leakage distance*), l_s , dengan jarak rambat isolasi sebenarnya (*actual insulating creepage distance*), l_a , yang diukur antara dua titik yang ditetapkan sebagai spasi (s). Nilai PF bergantung pada banyak ukuran sirip dan dapat dituliskan sebagai:

Untuk isolator satu ukuran sirip:

$$FP = \frac{(2p+s)}{l_a} \dots\dots\dots (2-1)$$

Untuk isolator dengan sirip berselang-seling :

$$FP = \frac{(2p_1+2p_2+s)}{l_a} \dots\dots\dots (2-2)$$

Dimana :

FP = faktor profil isolator

p_1 = diameter sirip besar (mm)

p_2 = diameter sirip kecil (mm)

s = jarak vertikal antara dua titik yang sama pada sirip isolator (mm)

l_a = jarak rambat isolator sebenarnya (mm)

Dalam hubungannya dengan tingkat bobot polusi , nilai FP dianjurkan sebagai berikut:

- FP lebih besar daripada 0,8 untuk tingkat polusi ringan dan sedang.
- FP lebih besar daripada 0,7 untuk tingkat polusi berat dan sangat berat.

2.4 Karakteristik Elektrik Isolator

Isolator terdiri dari elektroda yang terbuat dari bahan yang bersifat konduktor dan dipisahkan oleh bahan isolasi. Setiap bahan isolasi memiliki kekuatan dielektrikum, yaitu kemampuan untuk menahan tegangan yang mengenainya tanpa menjadi rusak. Susunan yang ada pada isolator disamakan dengan sebuah kapasitansi.

$$C = \varepsilon \frac{A}{4\pi d} \dots\dots\dots(2-3)$$

Di mana :

C = Kapasitansi suatu bahan (Farad)

ε = Konstanta dielektrikum

A = luas permukaan bahan (m^2)

d = diameter atau tebal bahan (m)

Makin besar nilai konstanta dielektrik suatu bahan isolasi maka makin besar pula kapasitansi isolator tersebut. konstanta dielektrik dari beberapa bahan isolator dapat dilihat pada Lampiran 2.

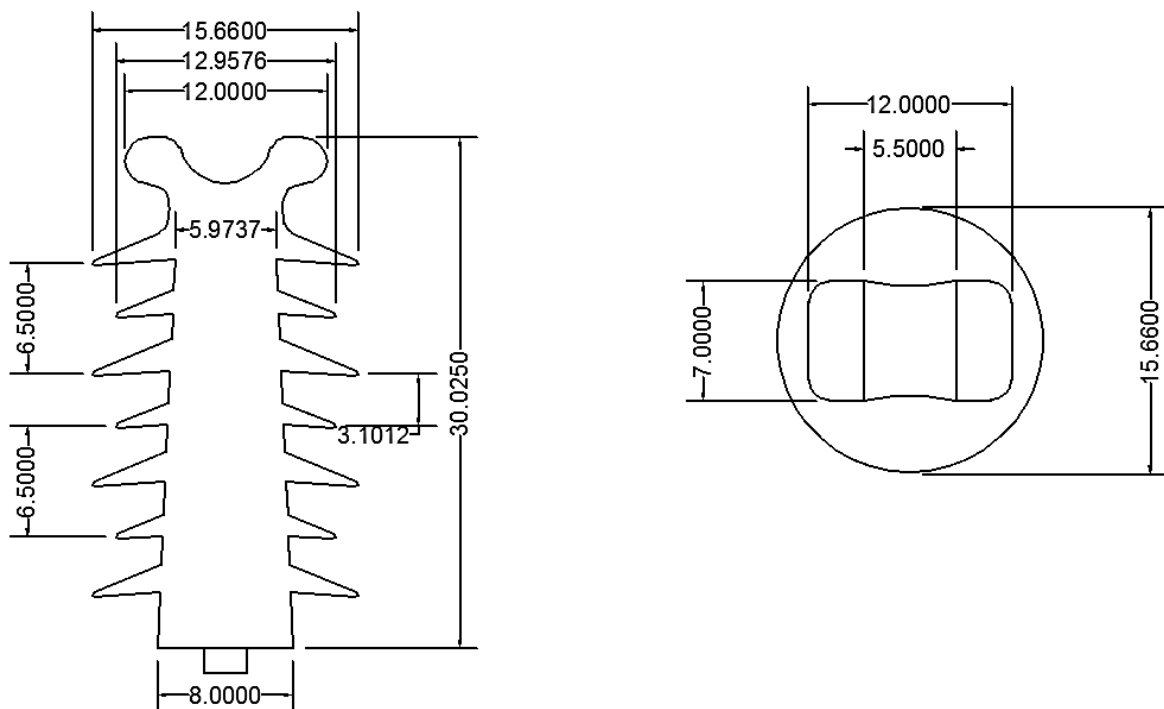
Nilai kapasitansi akan diperbesar lagi akibat kelembaban udara, panas udara, debu, serta adanya tegangan lebih yang dapat mempengaruhi bahan isolasi tersebut. Oleh sebab itu pendistribusian tegangan pada bahan isolasi tidak merata atau tidak seragam. Ada dua hal yang menyebabkan sistem isolasi pada isolator gagal menjalankan fungsinya, yaitu terjadinya peristiwa lewat-denyar (*flashover*) dan tembus listrik pada isolator yang menyebabkan isolator pecah (*breakdown*). Dasar pemilihan kekuatan dielektrik isolator adalah tegangan lewat-denyarnya.

Tegangan lewat denyar (*flashover voltage*) pada isolator terdiri dari tegangan lewat denyar bolak-balik, impuls dan tembus dalam minyak. Untuk tegangan lewat denyar bolak-balik dibagi menjadi dua kondisi, yaitu pada saat kering bersih yang merupakan nilai dasar karakteristik isolator dan pada saat kondisi basah yang menggambarkan kekuatan dielektrik isolator tersebut ketika basah karena air hujan.

Tegangan lewat denyar impuls merupakan tegangan lewat denyar yang terjadi bila tegangan impuls dengan standard gelombang yang diterapkan, menurut *International Electrotechnical Commision* (IEC) gelombangnya adalah $1,2 \times 50 \mu s$.

2.5 Konstruksi Isolator Pos Karet Silikon

Isolator pos secara umum memiliki konstruksi yang sama antara keramik atau gelas dengan karet silikon. Isolator pos memiliki bentuk seperti batang yang memiliki banyak lapisan sirip yang memenuhi bagian tubuh isolator dari bagian penopang hantaran sampai bagian pasak. Tetapi pada isolator pos karet silikon yang digunakan sebagai objek uji penelitian ini memiliki perbedaan pada diameter sirip yang ada pada bagian tubuh isolator pos tersebut. Sirip yang ada pada isolator karet silikon memiliki dua ukuran diameter pada sirip. Konstruksi isolator karet silikon dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Dimensi isolator karet silikon

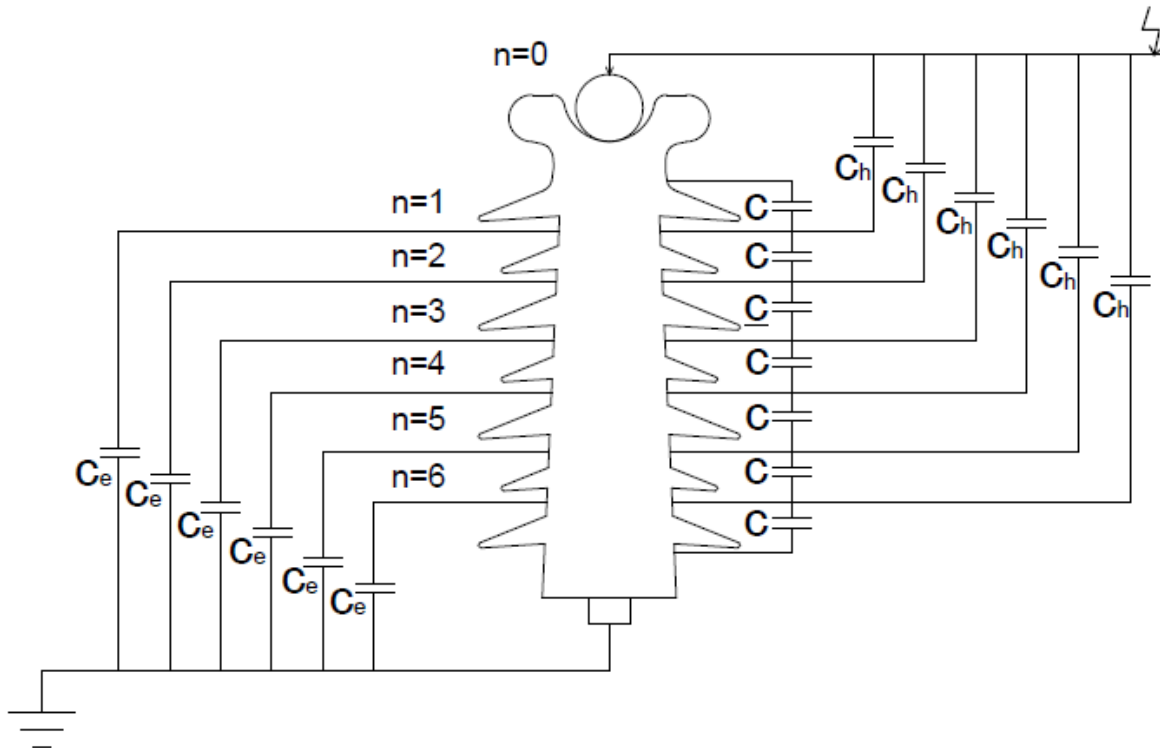
Sumber: Laboratorium Tegangan Tinggi JTE-UB

2.6 Perhitungan Distribusi Tegangan

Tegangan pada elektroda yang menyebabkan suatu bahan isolasi tembus listrik disebut tegangan tembus (*breakdown voltage*) yang di definisikan sebagai nilai tegangan yang

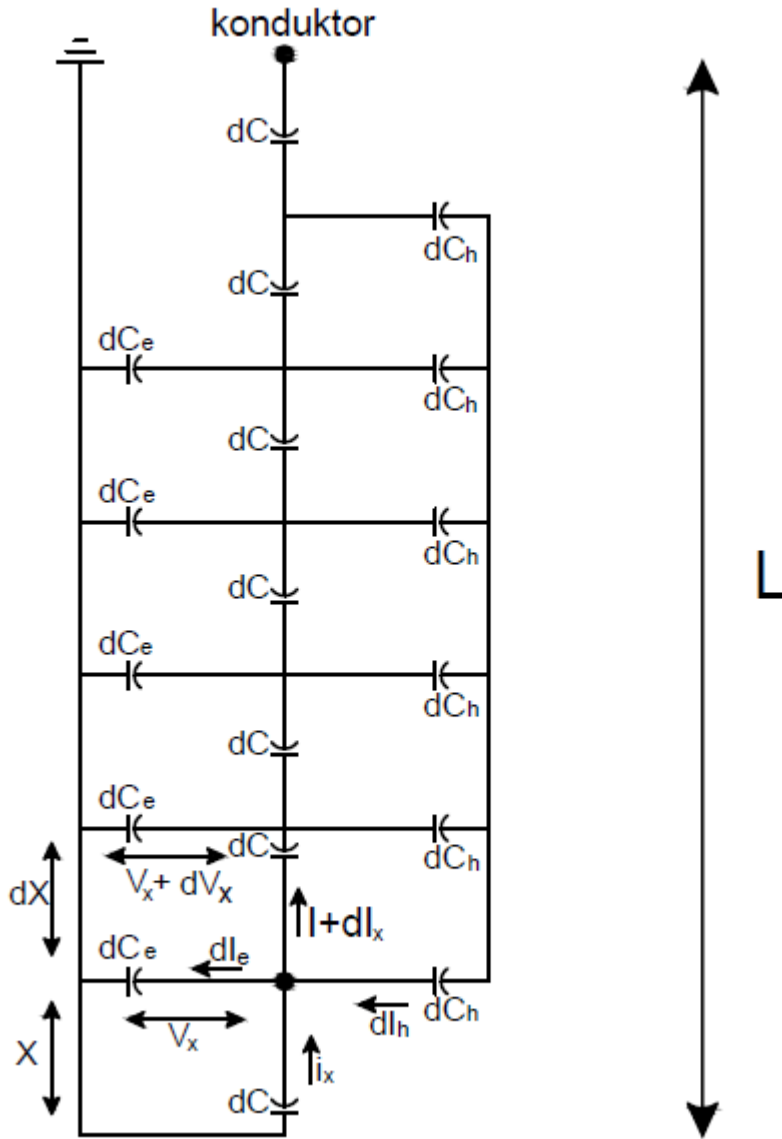
menimbulkan kuat medan elektrik pada suatu bahan isolasi sama dengan atau lebih besar daripada kekuatan dielektrik bahan isolasi tersebut.

Pada saluran udara tegangan tinggi, kawat penghantar yang bertegangan tinggi digantungkan pada isolator tegangan tinggi. Susunan isolator bersama menara penyanggah dan konduktor membentuk rangkaian kapasitif (kapasitansi bocor) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Kapasitansi itu masing -masing di bentuk oleh jepitan logam isolator-dielektrik-isolator jepitan logam dibawahnya, susunan ini membentuk kapasitansi sendiri isolator (C). Jepitan logam isolator–udara-menara, susunan ini membentuk kapaistansi ke tanah (C_e). Jepitan logam isolator-udara-konduktor transmisi, susunan ini membentuk kapasitansi ke kawat penghantar (C_h). Susunan kapasitansi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Susunan kapasitansi pada isolator karet silikon

Pendekatan dalam menentukan distribusi tegangan pada isolator karet silikon sama dengan menentukan distribusi tegangan pada transmisi panjang. Setiap kapasitansi pada Gambar 2.4 dianggap sebagai elemen kapasitansi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Sistem kapasitansi isolator karet silikon pada menara transmisi

Elemen-elemen kapasitansi pada Gambar 2.5 adalah

$$dC = C \frac{L}{dx} \dots\dots\dots (2-4)$$

$$dC_e = C_e \frac{dx}{L} \dots\dots\dots (2-5)$$

$$dC_h = C_h \frac{dx}{L} \dots\dots\dots (2-6)$$

L = panjang seluruh isolator.

Tegangan pada satu elemen kapasitor adalah

$$dV_x = - \frac{i_x + di_x}{j \omega C L} dx \dots\dots\dots (2-7)$$

Karena $di_x \ll i_x$, maka di_x dapat diabaikan, sehingga di peroleh

$$dV_x = -\frac{i_x}{j \omega C L} dx \dots\dots\dots(2-8)$$

Jumlah arus pada titik X adalah

$$di_x = di_e - di_h \dots\dots\dots(2-9)$$

$$di_e = V_x j \omega C_e \frac{dx}{L} \dots\dots\dots(2-10)$$

$$di_h = (V - V_x) j \omega C_h \frac{dx}{L} \dots\dots\dots(2-11)$$

Sehingga dV_x didiferensiasikan terhadap x sehingga diperoleh

$$\frac{d^2V_x}{dx^2} = -\frac{di_x}{j \omega C L dx} \dots\dots\dots(2-12)$$

$$\frac{d^2V_x}{dx^2} = -\frac{d(i_e - i_h)}{j \omega C L dx} \dots\dots\dots(2-13)$$

Persamaan 2.10 dan 9.15 disubstitusikan ke dalam pers. 9.17 sehingga diperoleh

$$\frac{d^2V_x}{dx^2} = \frac{V_x}{L^2} \left(\frac{C_e + C_h}{C_1} \right) - \frac{VC_h}{C} \dots\dots\dots(2-14)$$

Kemudian misalkan

$$a = \sqrt{\frac{C_e + C_h}{C}} \dots\dots\dots(2-15)$$

Maka tegangan pada isolator ke $-n$ dihitung dari titik yang ditanahkan (menara) dapat dirumuskan sebagai:

$$V_n = A \frac{C_e}{C} \sinh(a, n) + A \frac{C_h}{C_e} \sinh[a (n - N)] + B \dots\dots\dots(2-16)$$

$$A = \frac{V}{a^2 \sinh(a, N)} \dots\dots\dots(2-17)$$

$$B = \frac{C_h V}{C_e + C_h} \dots\dots\dots(2-18)$$

dengan

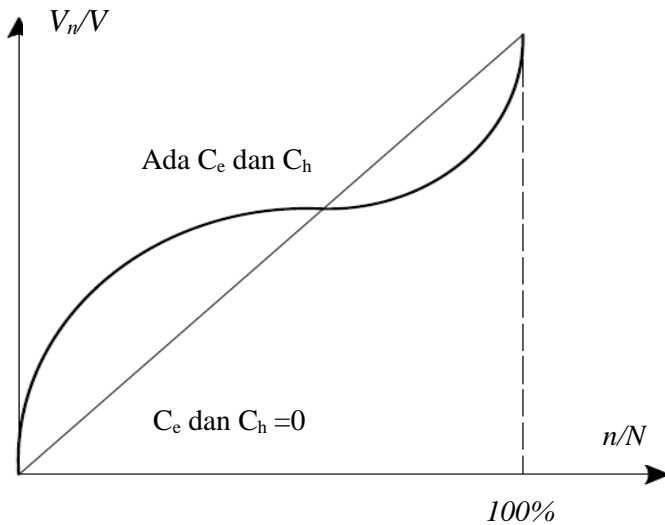
V_n = tegangan antara isolator unit n dengan menara

V = tegangan dari fasa ke netral

n = nomor unit isolator, dan

N = jumlah unit isolator yang digunakan

Menurut persamaan (2-16) kurva distribusi tegangan pada isolator adalah seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.6, artinya jika tegangan yang dipikul isolator adalah tegangan bolak-balik, distribusi tegangan pada setiap isolator tidak merata.



Gambar 2.6 Distribusi tegangan pada isolator

Sumber: Tobing, (2012, p.155)

Nilai kapasitansi C_e , C_h dan C sulit dihitung dengan tepat sehingga perhitungan tegangan pada setiap unit isolator dengan persamaan (2.16) hasilnya kurang akurat. Karena itu distribusi tegangan pada isolator rantai biasanya ditentukan dengan percobaan di laboratorium.

Rangkaian pengujian adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4. Pada gambar ini ditunjukkan suatu isolator rantai yang terdiri atas 7 unit isolator. Untuk mengukur tegangan pada jepitan isolator digunakan elektroda bola-bola standar dengan panjang sela tertentu. Pada panjang sela ini, nilai tegang tegangan tembus elektroda bola-bola standar dapat diketahui misalnya nilainya adalah V_{sb} .

Mula-mula terminal tegangan tinggi trafo uji (A) dihubungkan pada jepitan isolator ke-7, sedang terminal elektroda bola-bola (B) dihubungkan pada jepitan isolator ke-1. Kemudian tegangan keluaran trafo uji dinaikan secara bertahap dengan kecepatan 1 kV/detik sampai udara pada sela bola tembus listrik. Secara bersamaan dicatat tegangan yang dibangkitkan pada belitan sekunder trafo uji.

Misalkan nilainya adalah V_1 , tegangan V_1 yang terukur ini merupakan tegangan yang dipikul semua isolator sementara tegangan yang dipikul elektroda bola-bola adalah tegangan yang dipikul isolator ke-2 sampai ke-7. Sedang tegangan pada elektroda bola-bola standar ketika tembus listrik adalah V_{sb} . Dengan demikian tegangan yang dipikul isolator ke-1 dalam persen tegangan keseluruhan isolator adalah

$$V_1 = \frac{(V_1 - V_{sb})}{V_1} \times 100 \% \dots \dots \dots (2-19)$$

Selanjutnya terminal elektroda bola-bola (B) dihubungkan pada jepitan isolator ke-2, dan prosedur diatas di ulang kembali. Misalkan tegangan tarfo uji yang membuat elektroda bola – bola (B) mengalami tembus listrik adalah V_2 . Tegangan V_2 ini juga merupakan tegangan yang dipikul isolator sementara elektroda bola-bola memikul tegangan isolator ke-3 sampai ke-7. Dengan demikian tegangan yang dipikul isolator ke-1 dan ke-2 adalah

$$V_2 + V_1 = \frac{(V_2 - V_{sb})}{V_2} \times 100 \% = V_{1,2} \dots \dots \dots (2-20)$$

Sementara itu , persentase tegangan yang dipikul isolator ke- 2 adalah

$$V_2 = V_{1,2} - V_1 \dots \dots \dots (2-21)$$

Prosedur diatas dilakukan berurutan menurut posisi terminal elektroda bola-bola (B) pada jepitan isolator ke-3, 4, 5, dan seterusnya hingga berakhir pada jepitan ke-6. Pada setiap posisi terminal elektroda bola-bola dihitung persentase tegangan pada isolator yang berkenaan dengan posisi terminal elektroda tersebut.

Kemudian, persentase tegangan pada isolator ke-7 adalah

$$V_7 = 100\% - (V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_6) \dots \dots \dots (2-22)$$

Dengan diketahuainya persentase tegangan pada setiap unit isolator, untuk tegangan transmisi tertentu dapat dihitung tegangan pada setiap unitnya. Informasi ini digunakan untuk mengetahui ada tidaknya unit isolator yang memikul tegangan lebih besar daripada spesifikasi tegangannya (Tobing, 2012, p. 155-157).

2.7 Arus Bocor

Timbulnya arus bocor diawali oleh adanya lapisan konduktif pada permukaan isolator. Pembentukan lapisan konduktif disebabkan adanya kontaminasi air pada permukaan isolator sehingga menyebabkan penurunan nilai tahanan pada permukaan isolator. Penurunan ini menyebabkan terjadinya arus bocor pada permukaan. Arus bocor yang mengalir pada permukaan isolator memiliki temperatur yang tinggi sehingga menyebabkan penguapan sebagian pada permukaan isolator.

Pada kondisi basah jalur konduktif yang terbentuk pada permukaan isolator akan mengalirkan arus dari konduktor ke tanah. Arus bocor merupakan fungsi dari nilai resistansi permukaan isolator yang terkontaminasi, artinya dengan meningkatnya nilai arus bocor ini diikuti dengan menurunnya nilai resistansi pada permukaan isolator. Karena arus bocor merupakan hasil pengukuran, maka sesuai dengan hukum Ohm menyatakan bahwa arus listrik

(I) yang mengalir dalam sebuah bahan, berbanding lurus dengan tegangan (V), dan berbanding terbalik dengan resistansi (R). Sehingga dapat dinyatakan dengan Persamaan 2-22 dan 2-23 seperti di bawah ini.

$$I = \frac{V}{R} \dots \dots \dots (2-22)$$

$$R = \frac{V}{I} \dots \dots \dots (2-23)$$

Beberapa kejadian yang sering terjadi akibat mengalirnya arus bocor adalah pemanasan pada permukaan isolator yang dapat mempercepat penuaan, terbentuknya pita kering (*dry band*), munculnya busur listrik (*arc*), dan terjadinya loncatan api (*flashover*) yang dapat menurunkan hidrofobisitas isolator.

2.8 Metode Elemen Hingga

Andika *et al* (2016) menyatakan bahwa metode elemen hingga atau *finite element method* (FEM) merupakan salah satu metode numerik yang sering digunakan untuk menyelesaikan permasalahan struktur, termal dan elektromagnetik. Dalam metode ini permasalahan diselesaikan dengan menggunakan pendekatan prinsip dasar proses diskretasi. Proses diskretisasi pada elemen hingga adalah proses pembagian pada pemodelan struktur objek dengan membaginya dalam elemen-elemen kecil yang jumlahnya tidak terbatas tergantung objek tersebut.

Elemen-elemen tersebut adalah bentuk mesh-mesh kecil yang terdapat pada obyek tersebut. Metode perhitungannya adalah menghitung mesh-mesh kecil yang nantinya digabung menjadi suatu bentuk yang lebih besar untuk digabungkan. Hasil yang didapatkan berasal dari nilai pendekatan yang kontinu terhadap yang berhubungan antar bagian meshnya sehingga menjadi bentuk yang diharapkan. Sebagai contoh dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Diskretisasi garis lengkung dengan elemen kotak

Untuk menyelesaikan suatu solusi dengan FEM yang sederhana, domain di bagi kedalam bentuk elemen segitiga. Pokok dari metode ini terletak pada waktu pertama kali memperkirakan potensial listrik (V) pada setiap elemen segitiga dan pada setiap nodal dalam segitiga dalam suatu aplikasi. Nilai potensial listrik pada dasarnya terletak pada nodal yang terdapat sudut-sudut segitiga. Setelah itu potensial listrik yang berada pada elemen segitiga dihubungkan antara satu dengan yang lain dengan bentuk dan ukuran segitiga yang berbeda sehingga dapat diketahui potensial listrik pada tiap-tiap nodal.

Pada mode elektrostatik, potensial listrik (V) berkaitan erat dengan medan listrik (E) yang dirumuskan sebagai berikut :

$$E = -\nabla V \dots\dots\dots(2-24)$$

Dengan menggunakan Maxwell,

$$\nabla \cdot D = \rho_v \dots\dots\dots(2-25)$$

Dan hubungan,

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \dots\dots\dots(2-26)$$

Dimana polarisasinya dianggap nol, sehingga diperoleh persamaan :

$$\nabla \cdot \nabla V = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \dots\dots\dots(2-27)$$

Dengan,

E = intensitas medan listrik (volt/meter)

V = potensial listrik (volt)

D = kerapatan fluks listrik (coloumb/ meter²)

Persamaan (2-27) merupakan persamaan *Poisson*, Gradien potensial listrik ganda pada persamaan (2-27) dapat diuraikan menjadi persamaan sebagai berikut:

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} a_x + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} a_y + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} a_z = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \dots\dots\dots(2-28)$$

Jika ρ_v merupakan kerapatan muatan ruang sama dengan nol dengan kondisi bahwa dengan kondisi bahwa muatan titik dan kerapatan muatan permukaan sebagai kondisi batas dan sebagai sumber medan, maka

$$\nabla^2 V = 0 \dots\dots\dots(2-29)$$

Persamaan (2-28) merupakan persamaan *Laplace*. Pada koordinat kartesius, bentuk persamaan Laplace adalah :

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} a_x + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} a_y + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} a_z = 0 \dots\dots\dots(2-30)$$

Dengan menerapkan persamaan *laplace* pada daerah yang mempunyai kerapatan muatan ruang nol, persamaan tersebut menyatakan bahwa konfigurasi konduktor akan menimbulkan medan yang memenuhi persamaan $\nabla^2 V = 0$. Masing- masing berbeda menurut potensial dan laju perubahan terhadap koordinat. Tiap medan listrik memenuhi persamaan *laplace* jika $\rho_v = 0$, yang digunakan untuk mendapatkan nilai potensial listrik dan medan listrik.

Inti dari metode elemen hingga adalah diskretisasi, yaitu pembentukan elemen-elemen mesh kecil dengan jumlah yang tak terbatas. Dengan mengetahui nilai potensial (V) pada satu elemen segitiga maka akan didapatkan nilai medan listrik di permukaan isolator tersebut.