

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Pada penelitian sebelumnya (Syakur, 2009) dengan judul kinerja *Arrester* akibat induksi sambaran petir pada jaringan menengah 20 kV, menjelaskan induksi yang terjadi akibat sambaran petir dan mensimulasikan dengan *software* EMTP (*Electromagnetic Transient Program*) dan memperlihatkan pengaruh sambaran berulang pada fasa dalam bentuk gelombang bagaimana jaringan sebelum *Arrester* bekerja dan sesudah *Arrester* bekerja.

Kemudian pada penelitian yang dilakukan oleh (Sintianingrum, 2016) dengan judul simulasi tegangan lebih akibat sambaran petir terhadap penentuan jarak maksimum untuk perlindungan peralatan gardu induk, menjelaskan jarak efektif pemasangan *Arrester* kemudian disimulasikan menggunakan *software* ATP (*Alternative Transient Program*) dan disini terlihat pada simulasi ATP bagaimana jaringan menggunakan *Arrester* dan tidak menggunakan *Arrester* dan jarak yang efektif untuk pemasangan *Arrester* sehingga dapat meredam gangguan sambaran petir tersebut.

Selain itu pada penelitian (Sinaga, 2014) dengan judul analisis usia *Arrester* pada jaringan distribusi terhadap sambaran kilat dengan menggunakan ATP-EMTP studi kasus PLN Ranting Johor Medan, menjelaskan bahwa kinerja

*Arrester* tidak selamanya baik. Kinerja ini dipengaruhi oleh beberapa faktor salah satunya jumlah sambaran yang terjadi , pada simulasi menggunakan ATP-EMTP menunjukkan nilai peredaman *Arrester* dalam waktu berkala.

Penelitian lain yang terkait dengan *Arrester* antara lain (Rahayu, 2014) dengan judul analisa proteksi petir pada gardu distribusi 20 kV PT. PLN (persero) rayon Inderalaya, menjelaskan perhitungan sambaran petir yang terjadi dengan menggunakan data yang di dapat dari instansi ataupun data lain yang berasal dari lapangan. Terdapat juga perhitungan yang menjelaskan pengaruh sambaran petir terhadap trafo dan penghantar jaringan 20 kV.

Pada penlitian (Rakholiya, 2016) yang berjudul *Analysis of MOV Surge Arrester Models by using Alternative Transient Program ATP-EMTP* membahas tentang analisis dari *Arrester* jenis MOV menggunakan program ATP-EMTP. *Software* ini dapat menunjukkan kinerja *Arrester* dan kemudian menampilkannya dalam bentuk grafik dan angka.

Penelitian lain dari (Trin Saengsuwan & Wichet Thipprasert, 2008) dengan judul *The Lightning Arrester Modeling Using ATP-EMTP* yang menganalisis pemasangan *Arrester* dengan *software* ATP-EMTP sehingga dapat diketahui kinerja dari *Arrester* tersebut yang dipasang. Hasil kinerja dari peredaman gangguan oleh *Arrester* yang berupa angka dan grafik dipakai untuk memprediksi jumlah pemasangan *Arrester* yang dapat meredam dengan baik jika gangguan sambaran petir terjadi.

## 2.2 Fenomena Petir

Fenomena Petir adalah sebuah puncak dimana muatan terkumpul di dalam awan ke sebuah awan yang berdekatan atau ke tanah (*ground*). Pemisahan elektroda, yaitu awan ke awan, atau awan ke *ground* sangatlah jauh, kisaran 10 km atau lebih. Mekanisme pembentukan muatan dalam awan cukuplah rumit dan prosesnya tidak menentu. Namun, banyak informasi yang telah dikumpulkan hingga lima puluh dan beberapa teori telah mencoba menjelaskan tentang fenomena ini.

Faktor-faktor yang mempengaruhi pembentuka atau terkumpulnya muatan dalam awan sangatlah banyak dan tidak menentu. Tetapi selama badai petir, muatan-muatan positif dan negatif menjadi terpisah karena arus udara yang besar dengan kristal es pada bagian atasnya dan hujan pada bagian bawah dari awan. Pemisahan muatan tergantung pada tingginya awan, yang berkisar dari 200 sampai 10.000 m, dengan pusat muatannya mungkin ada pada jarak 300 sampai 2000 m (Hutaruk, 1991). Biasanya petir disertai dengan suara gemuruh yang biasa disebut guruh atau biasanya dibilang geledek, suara yang kencang itu terjadi karena saat udara dilewati petir, terjadi pemanasan dan pemuaiian udara dengan sangat cepat sehingga udara menjadi plasma dan meledak menghasilkan suara yang menggelegar. Sebenarnya proses terbentuknya suara ini terjadi bersamaan dengan saat terjadi petir, namun biasanya guruh baru terdengar setelah petir terlihat. Petir merupakan gejala alam yang bisa kita analogikan dengan sebuah kapasitor raksasa, dimana lempeng pertama adalah awan (bisa lempeng negatif

atau lempeng positif) dan lempeng kedua adalah bumi (dianggap netral). Seperti yang sudah diketahui kapasitor adalah sebuah komponen pasif pada rangkaian listrik yang bisa menyimpan energi sesaat (*energy storage*).

### 2.3 Mekanisme Terjadinya Petir

Terjadinya petir akibat adanya perpindahan muatan negatif ke muatan positif. Petir merupakan lompatan bunga api dengan volume besar antara dua massa dengan muatan listrik yang berbeda. Petir terjadi minimal memiliki dua sambaran. Sambaran pertama bermuatan negatif mengalir dari awan ke tanah. Sambaran kilat ini biasanya memiliki percabangan yang dapat dilihat keluar dari jalur kilat utama. Sambaran kedua yang bermuatan positif inilah terbentuk dari dalam jalur kilat utama yang langsung keluar menuju awan. Kilat yang terbentuk turun sangat cepat ke bumi dengan kecepatan 96.000 km/jam. Sambaran pertama mencapai titik permukaan bumi dalam waktu milidetik dan sambaran kedua dengan arah berlawanan menuju awan dalam tempo 70 mikrodetik setelahnya. Terjadinya guruh karena saat udara dilewati petir, terjadi pemanasan dan pemuaiian udara dengan sangat cepat. Sehingga udara menjadi plasma dan meledak menghasilkan suara yang menggelegar. Sebenarnya proses terbentuknya suara ini terjadi bersamaan saat terjadinya petir. Suara guruh baru terdengar setelah petir terlihat. Keterlambatan suara guruh itu terjadi karena perbedaan kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8$  m/s ) dan kecepatan bunyi di udara ( 340 m/s ). Sesuai dengan rumus kecepatan (Hutaruk, 1991) :

$$S = V \times t \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

S = jarak ( m )

V = Kecepatan ( m/s )

t = waktu ( s )

Sehingga dapat dihitung jarak antara petir dan guruh dengan berpedoman pada berapa lama suara guruh terdengar setelah petir.

#### 2.4 Tipe – Tipe Petir

Sebagian besar petir terjadi di dalam awan, namun terdapat pula petir dengan kekuatan yang cukup besar sampai ke tanah yang merupakan titik negatif terbesar.

Jenis-jenis petir dapat dikelompokkan menjadi sebagai berikut :

a. Petir dari awan ke tanah (CG)

Petir ini tergolong berbahaya dan paling merusak, berasal dari muatan yang lebih rendah lalu mengalirkan muatan negatif ke tanah. Terkadang petir jenis ini mengandung muatan positif (+) terutama pada musim dingin.

b. Petir dalam awan (IC)

Merupakan tipe yang paling sering terjadi antara pusat muatan yang berlawanan pada awan yang sama.

c. Petir antar awan (CC)

Petir ini terjadi antara pusat muatan dari dua awan yang berbeda. Pelepasan muatannya sendiri terjadi saat udara cerah antara awan tersebut.

d. Petir awan ke udara (CA )

Petir ini terjadi jika udara di sekitaran awan yang bermuatan positif (+) berinteraksi dengan udara yang bermuatan negatif (-). Jika ini terjadi pada awan bagian bawah maka merupakan kombinasi dengan petir tipe CG.

## 2.5 Akibat Sambaran Petir

Sambaran petir merupakan gangguan yang sering terjadi terutama di daerah atau wilayah yang memiliki tingkat curah hujan yang tinggi. Sambaran petir yang terjadi dapat dibedakan menjadi :

- a. Sambaran langsung
- b. Sambaran tidak langsung

Dari kedua jenis sambaran tersebut, sambaran langsung memiliki resiko atau akibat yang paling fatal karena terkena langsung pada objek sambarannya. Berikut adalah dampak sambaran petir yang umum terjadi :

a. Terhadap manusia

Jika sambaran petir terkena tubuh manusia baik secara langsung maupun tidak langsung dampaknya akan terasa bahkan dapat mengakibatkan kematian. Maka dari itu sambaran terhadap manusia sangatlah dihindari.

b. Terhadap bangunan

Jika sambaran petir mengenai langsung pada bangunan maka dapat mengakibatkan bangunan tersebut hancur dan mengalami kerusakan yang sangat fatal.

c. Terhadap jaringan listrik

Akibat sambaran langsung pada jaringan listrik dapat mengakibatkan putusnya kabel penghantar, pecahnya isolator dan kerusakan lainnya. Perlu perlindungan yang baik agar jaringan tetap aman dan pelayanan dapat terjamin. Namun gangguan yang sering terjadi pada jaringan lebih sering akibat sambaran tidak langsung. Akibat sambaran petir pada jaringan dapat ditunjukkan pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Akibat sambaran petir  
(sumber : PT.PLN Area Cilacap, 2015)

## 2.6 *Lightning Arrester*

*Lightning Arrester* merupakan alat proteksi bagi peralatan listrik terhadap tegangan lebih, yang disebabkan oleh petir atau surja hubung (*switching surge*). Alat ini bersifat sebagai *by-pass* di sekitar isolasi yang membentuk jalan dan mudah dilalui oleh arus kilat ke sistem pentanahan sehingga tidak menimbulkan tegangan lebih yang tinggi dan tidak merusak isolasi peralatan listrik. *By-pass* ini

harus sedemikian rupa sehingga tidak mengganggu aliran daya sistem frekuensi 50 Hz. Jadi pada keadaan normal *lightning Arrester* berlaku sebagai isolator (mempunyai tahanan yang besar sekali), tetapi bila ada arus tegangan surja pada peralatan listrik yang diamankannya, maka alat ini akan bersifat sebagai konduktor yang tahananannya relatif rendah (kecil), sehingga dapat mengalirkan arus yang tinggi ke tanah. Setelah surja hilang, *Arrester* harus dapat dengan cepat kembali menjadi isolasi atau bersifat isolator sehingga CB (*Circuit Breaker*) tidak sempat membuka. Karakteristik yang harus dipenuhi oleh *Arrester* yang ideal adalah sebagai berikut:

- a. Tegangan pelepasannya (*discharge voltage*), yaitu tegangan terminal yang pada waktu pelepasan, harus cukup, sehingga dapat mengamankan isolasi peralatan. Tegangan percikan disebut juga tegangan gagal sela (*gap breakdown voltage drop*). Data tegangan kerja pada *Arrester* ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Tegangan pelepasan *Arrester*

Tegangan <i>Arrester</i> (kV)	Tegangan Pelepasan (kV)
10	38
12	43
15	54
18	65



- b. *Arrester* harus mampu memutuskan arus dinamik, dan dapat bekerja terus seperti semula. Batas dari tegangan sistem dimana pemutusan arus susulan ini masih mungkin, disebut tegangan dasar (*rated voltage*) dari *Arrester*.
- c. Pada tegangan sistem yang normal, *Arrester* tidak boleh bekerja. Tegangan tembus *Arrester* pada frekuensi jala-jala harus lebih tinggi dari tegangan lebih sempurna yang mungkin terjadi pada sistem.
- d. Setiap gelombang *transient* dengan tegangan puncak yang lebih tinggi dari tegangan tembus *Arrester* harus mampu mengerjakan *Arrester* untuk mengalirkan arus ke tanah.
- e. *Arrester* harus mampu melalukan arus terpa ke tanah tanpa merusak *Arrester* itu sendiri dan tanpa menyebabkan tegangan pada terminal *Arrester* lebih tinggi dari tegangan sumbernya sendiri.
- f. Arus sistem tidak boleh mengalir ke tanah setelah gangguan diatasi (*follow current*). Arus ini harus dipotong begitu gangguan telah berlalu dan tegangan kembali normal.

## 2.7 Tingkat Pengenal *Arrester*

Pemilihan *Lightning Arrester* dimaksudkan untuk mendapatkan tingkat isolasi dasar yang sesuai dengan *Basic Insulation Level (BIL)* dari peralatan yang dilindungi, sehingga didapatkan perlindungan yang baik. Dalam memilih *arrester* yang paling sesuai untuk keperluan tertentu, harus diperlukan beberapa faktor pendukung antara lain :

a. *Protective need* (keperluan proteksi)

Keperluan proteksi ini berhubungan dengan *insulation strength* dari alat yang harus diamankan.

b. *Sistem Voltage* (Keadaan tegangan sistem)

Sistem ini berhubungan dengan tegangan-tegangan yang mungkin timbul pada jepitan-jepitan *Arrester*.

c. Jenis/Type *Arrester*

Apakah *Arrester* yang dipakai jenis *station*, jenis *line*, jenis *distribution* atau *Arrester* jenis yang lainnya.

d. Faktor kondisi luar (normal atau abnormal)

Keadaan yang abnormal biasanya tempat yang tinggi (2000 meter dari permukaan laut), temperatur dan kelembaban udara yang tinggi serta pengotoran (*kontaminasi*).

e. Faktor ekonomi

Perbandingan antara ongkos pemeliharaan dan kerusakan bila tidak ada *Arrester*, atau bila dipasang yang lebih rendah mutu dan kualitasnya.

## **2.8 Tegangan Dasar *Arrester* / Pengenal *Arrester***

Tegangan dasar *Arrester* adalah tegangan efektif tertinggi frekuensi sistem yang mungkin dipikul oleh *Arrester* atau tegangan dimana penangkap petir masih dapat bekerja sesuai dengan karakteristiknya. Penangkap petir tidak boleh bekerja pada tegangan maksimum sistem yang direncanakan, tetapi masih tetap

mampu memutuskan arus ikutan dari sistem secara efektif. Penangkap petir umumnya tidak boleh bekerja jika ada gangguan fasa ke tanah di satu tempat dalam sistem. Karena itu tegangan pengenal dari penangkap petir harus lebih dari tegangan fasa ke tanah, jika demikian, maka *Arrester* akan melalukan arus ikutan sistem yang terlalu besar yang menyebabkan *Arrester* rusak akibat beban lebih (*thermal over loading*). Untuk mengetahui tegangan maksimum yang mungkin terjadi pada fasa yang sehat ke tanah sehingga gangguan satu fasa ke tanah perlu diketahui. Untuk menentukan tegangan dasar *Arrester* harus diketahui :

- a. Tegangan sistem tertinggi umumnya diambil harga 110 % dari tegangan nominal sistem.
- b. Koefisien pentanahan, didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan rms fasa sehat ke tanah dalam keadaan gangguan pada tempat dimana *Arrester* dipasang, dengan tegangan rms fasa ke fasa tertinggi dari sistem dalam keadaan tidak ada gangguan. Jadi tegangan pengenal dari *Arrester* adalah tegangan rms fasa ke fasa  $\times 1.10 \times$  koefisien pentanahan.
- c. Sistem yang ditanahkan langsung koefisien pentanahannya 0,8. *Arrester* disebut *Arrester* 80%. Sistem yang tidak ditanahkan langsung koefisien pentanahannya 1,0 yang disebut *Arrester* 100%. Menurut Rahman *Arrester* 100% juga dapat dihitung dengan persamaan 2.2.

$$V_{\max} = 1,1 V_{fn} = 1,1 V_{\text{nom}} \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan :

$V_{\max}$  = Tegangan maksimum sistem

$V_{fn}$  = Tegangan nominal sistem

$V_{\text{nom}}$  = Tegangan nominal sistem fasa ke fasa

Maka, Tegangan dasar *Arrester* = koef. pentanahan x  $V_{\max}$

### 2.9 Puncak Gelombang Yang Akan Mencapai Lokasi *Arrester*

Harga puncak tegangan surja yang datang atau yang masuk ke gardu induk datang dari saluran yang dibatasi oleh BIL. Dengan mengingat variasi tegangan *flashover* dan probabilitas tembus isolator, maka 20 % untuk faktor keamanannya, sehingga harga e ditunjukkan pada persamaan 2.3 (Dendy, 2013)

$$e = 1,2 \times \text{BIL saluran/trafo} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan :

e = Tegangan surja yang datang (KV)

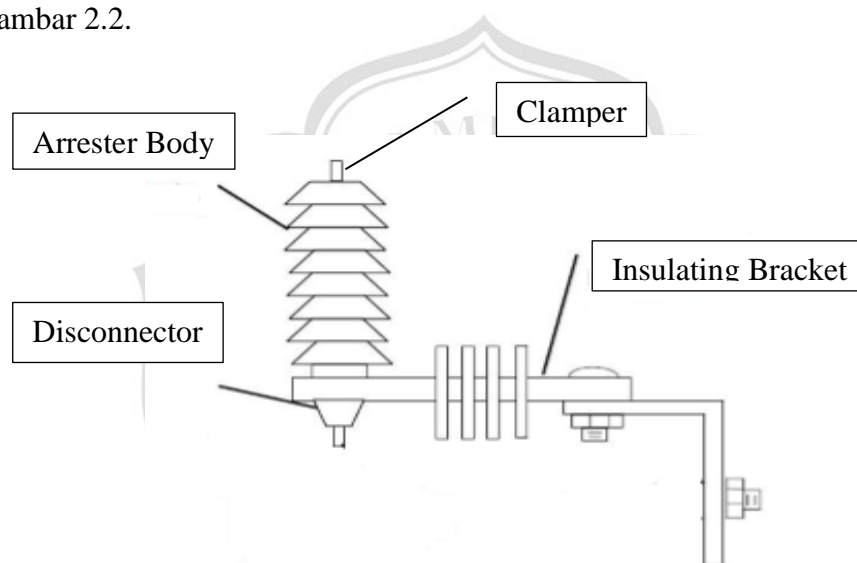
L = Jarak maksimum sambungan *arrester* ke *bushing* / isolator =  
*groundinglead* = 1,2 m

BIL = Tingkat isolasi dasar trafo (KV)

Ada dua jenis *Arrester* yang umum dipakai, yaitu *Arrester* jenis *ekspulsi* dan jenis katup. Salah satu dari jenis *Arrester* katup yaitu *Arrester* MOV (*Metal Oxida Varistor*).

## 2.10 Bagian-Bagian *Arrester*

*Arrester* jenis MOV (*Metal Oxide Varistor*) merupakan jenis *Arrester* yang digunakan oleh PT. PLN sebagai pengamanan pada jaringan distribusi 20 kV dari gangguan sambaran petir. *Arrester* ini dipasang untuk melindungi jaringan dari tegangan lebih yang ditimbulkan sambaran petir baik itu sambaran langsung maupun tidak langsung. Bagian-bagian *Lightning Arrester* dapat ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Bagian *Lightning Arrester*

(Sumber : SPLN D5.006, 2013)

Bagian-bagian *Arrester* terdiri dari :

- a. *Clamper* (agar penyambungan kabel atau kawat dari jaringan ke *Arrester* tidak memerlukan sepatu kabel serta jika *Arrester* dipergunakan untuk melindungi trafo atau kapasitor maka kabel *jumper* bisa langsung disambungkan dari

jaringan ke *Arrester* dan ke trafo secara langsung tanpa memutus kabel *jumper* pada terminal *Arrester*).

b. *Insulating Bracket*

Bagian *Arrester* yang berfungsi untuk menyangga atau menopang *Arrester* yang di tempatkan pada tiang listrik.

c. *Disconnecter* ( wajib untuk *Arrester* yang menggunakan *Wrapped silicone rubber housing*, dan tidak wajib jika *Arrester* menggunakan *housing direct Moulded*).

d. *Arrester Body*

Bagian utama *Arrester* yang berisi MOV (*Metal Oxide Varistor*).

## 2.11 Pentanahan ( *Grounding* )

Definisi *grounding* adalah sistem pentanahan yang berfungsi untuk meniadakan beda potensial sehingga jika ada kebocoran tegangan atau arus akan langsung dibuang ke bumi. Sistem pentanahan dapat bekerja secara efektif maka harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- a. Membuat jalur impedansi rendah ke tanah untuk pengamanan personil dan peralatan menggunakan rangkaian yang efektif.
- b. Dapat melawan dan menyebarkan gangguan berulang dan arus akibat surja hubung (*surge current*).

- c. Menggunakan bahan tahan terhadap korosi terhadap berbagai kondisi kimiawi tanah untuk meyakinkan kontinuitas penampilan sepanjang umur peralatan yang dilindungi.
- d. Menggunakan sistem mekanik yang kuat namun mudah dalam pelayanannya.

Dilihat dari pentingnya sistem grounding maka perlu diperhatikan dengan baik pemasangannya. Secara umum tujuan dari sistem pentanahan dan *grounding* pengaman adalah sebagai berikut :

- a. Mencegah terjadinya perbedaan potensial antara bagian tertentu dari instalasi secara aman.
- b. Mengalirkan arus gangguan ke tanah sehingga aman bagi manusia dan peralatan.
- c. Mencegah timbul bahaya sentuh tidak langsung yang menyebabkan tegangan kejut.

## 2.12 Tahanan Jenis Tanah

Faktor keseimbangan antara tahanan pengetanahan dan kapasitansi di sekelilingnya adalah tahanan jenis tanah ( $\rho$ ). Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tidaklah sama. Beberapa faktor yang mempengaruhi tahanan jenis tanah yaitu:

a. Pengaruh Keadaan Struktur Tanah

Kesulitan yang biasa dijumpai dalam mengukur tahanan jenis tanah adalah bahwa dalam kenyataannya komposisi tanah tidaklah homogen pada seluruh volume tanah, dapat bervariasi secara vertikal maupun horizontal, sehingga pada lapisan tertentu mungkin terdapat dua atau lebih jenis tanah dengan tahanan jenis yang berbeda, oleh karena itu tahanan jenis tanah tidak dapat diberikan sebagai suatu nilai yang tetap. Untuk memperoleh harga sebenarnya dari tahanan jenis tanah, harus dilakukan pengukuran langsung ditempat dengan memperbanyak titik pengukuran.

b. Pengaruh Unsur Kimia

Kandungan zat-zat kimia dalam tanah terutama sejumlah zat organik maupun anorganik yang dapat larut perlu untuk diperhatikan pula. Daerah yang mempunyai tingkat curah hujan tinggi biasanya mempunyai tahanan jenis tanah yang tinggi disebabkan garam yang terkandung pada lapisan atas larut. Pada daerah yang demikian ini untuk memperoleh pentanahan yang efektif yaitu dengan menanam elektroda pada kedalaman yang lebih dalam dimana larutan garam masih terdapat. Untuk mendapatkan tahanan jenis tanah yang lebih rendah, sering dicoba dengan mengubah komposisi kimia tanah dengan memberikan garam pada tanah dekat elektroda pembumian ditanam. Cara ini hanya baik untuk sementara sebab proses penggaraman harus dilakukan secara periodik, sedikitnya 6 (enam) bulan sekali.



### c. Pengaruh Iklim

Untuk mengurangi variasi tahanan jenis tanah akibat pengaruh musim, pembedaan dapat dilakukan dengan menanam elektroda pembedaan sampai mencapai kedalaman dimana terdapat air tanah yang konstan. Pembedaan elektroda pembedaan memungkinkan kelembaban dan temperatur bervariasi sehingga harga tahanan jenis tanah harus diambil untuk keadaan yang paling buruk, yaitu tanah kering dan dingin. Proses mengalirnya arus listrik di dalam tanah sebagian besar akibat dari proses *elektrolisa*, oleh karena itu air di dalam tanah akan mempengaruhi konduktivitas atau daya hantar listrik dalam tanah tersebut. Tahanan jenis tanah dipengaruhi pula oleh besar kecilnya konsentrasi air tanah atau kelembaban tanah, maka konduktivitas daripada tanah akan semakin besar sehingga tahanan tanah semakin kecil.

### d. Pengaruh Temperatur Tanah

Temperatur tanah sekitar elektroda pembedaan juga berpengaruh pada besarnya tahanan jenis tanah. Hal ini terlihat sekali pengaruhnya pada temperatur di bawah titik beku air ( $0^{\circ}\text{C}$ ), dibawah harga ini penurunan temperatur yang sedikit saja akan menyebabkan kenaikan harga tahanan jenis tanah dengan cepat. Temperatur di bawah titik beku air ( $0^{\circ}\text{C}$ ) , maka air di dalam tanah akan membeku. Molekul-molekul air dalam tanah sulit untuk bergerak, sehingga daya hantar listrik tanah menjadi rendah sekali. Bila temperatur tanah naik, air akan berubah menjadi fase cair. Molekul-molekul dan ion-ion bebas bergerak sehingga daya hantar listrik tanah menjadi besar atau tahanan jenis tanah turun.

### 2.13 Metode Pengukuran Tahanan Jenis Tanah

Seperti yang telah dibahas pada bagian sistem pentanahan, betapa penting sistem pentanahan baik dalam sistem tenaga listrik ac maupun dalam pentanahan peralatan untuk menghindari sengatan listrik bagi manusia, rusaknya peralatan dan terganggunya pelayanan sistem akibat gangguan tanah. Untuk menjamin sistem pentanahan memenuhi persyaratan perlu dilakukan pengujian. Pengujian ini dilakukan setelah dilakukan pemasangan elektroda atau setelah perbaikan atau secara periodik setiap tahun sekali. Hal ini harus dilakukan untuk memastikan tahanan pentanahan yang ada karena bekerjanya sistem pengaman arus lebih akan ditentukan oleh tahanan pentanahan ini. Pada saat ini telah banyak beredar di pasaran alat ukur tahanan pentanahan yang biasa disebut *Earth Tester* atau *Ground Tester*. Alat ukur untuk beberapa fungsi sampai dengan yang banyak fungsi dan kompleks. Penunjukkan alat ukur ini ada yang analog ada pula yang digital dan dengan cara pengoperasian yang mudah serta aman. Untuk lingkungan kerja yang cukup luas, sangat disarankan untuk memiliki alat semacam ini.

Bahasan dalam bagian ini menjelaskan tentang prinsip-prinsip pengujian pengukuran tahanan pentanahan, teknik pengukuran yang presisi baik untuk elektroda tunggal maupun banyak.

#### a. Metode Von Werner

Metode ini disebut juga dengan metode empat batang karna menggunakan empat buah elektroda dalam pengukurannya. Cara pengukuran dilakukan dengan terlebih dahulu mengatur jarak antara elektroda. Jarak antar elektroda adalah

sejauh  $a$  meter, sehingga jarak antara terminal secara berurut adalah sama. Peralatan ukur akan mengalirkan arus melalui terminal 1 dan 4 lalu susut tegangan pada terminal 2 dan 3 akan diukur. Jika beda tegangan antara terminal 2 dan 3 adalah  $\Delta V$ , dan arus yang dialirkan melalui terminal 1 dan 4 adalah  $I$ , maka perbandingan ini adalah nilai tahanan pentanahan  $R$ .

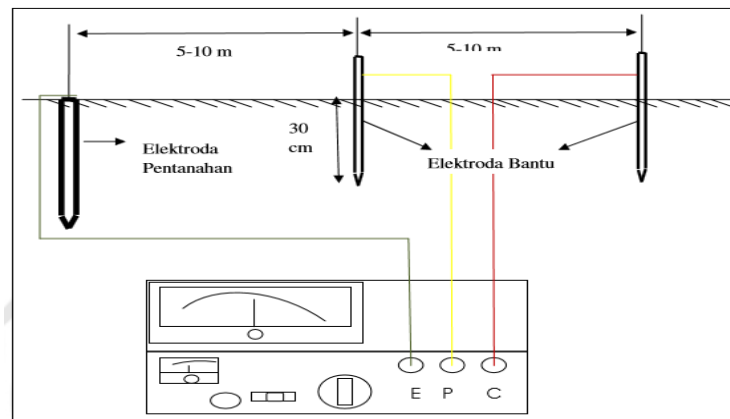
b. Metode Pengukuran Dengan Menggunakan Voltmeter dan Amperemeter.

Cara pengukuran adalah dengan cara penghantar pbumian dihubungkan dengan penghantar phasa instalasi melalui gawai proteksi arus lebih, sakelar, tahanan yang dapat diatur dari  $20 \Omega$  sampai  $1000 \Omega$ , dan Amperemeter. Antar titik sirkit setelah amperemeter dengan elektroda bumi bantu dipasang voltmeter. Jarak elektroda bantu disesuaikan dengan jenis elektroda yang digunakan. Jika elektroda batang atau pipa maka elektroda bantu harus berjarak sekurang-kurangnya 20 meter dari elektroda yang akan diukur. Pada saat sakelar dimasukkan, tahanan tersebut harus dalam keadaan maksimum. Setelah sakelar dimasukkan, tahanan diatur sedemikian rupa hingga amperemeter dan voltmeter menunjukkan simpangan secukupnya sesuai dengan apa yang diharapkan oleh operator. Hasil bagi dari tegangan dan arus yang ditunjukkan oleh alat ukur tersebut adalah tahanan pbumian yang diukur.

c. Pengukuran tahanan tanah dengan menggunakan *Earth Tester*

Pengukuran tahanan jenis tanah biasanya dilakukan dengan cara metode tiga titik (*three-point methode*) dimaksudkan untuk mengukur tahanan pentanahan. Misalkan tiga buah batang pentanahan dimana batang 1 yang tahanannya hendak

diukur dan batang-batang 2 dan 3 sebagai batang pengentanahan pembantu yang juga belum diketahui tahanannya. Pengukuran dengan *Earth Tester* dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Pengukuran tahanan tanah dengan *Earth Tester*

(sumber : Yohanes Catur Wibowo, 2011)

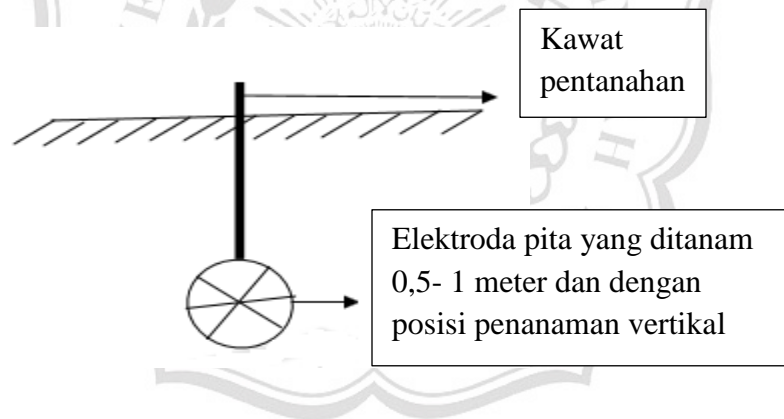
## 2.14 Elektroda Pentanahan

Elektroda pentanahan adalah penghantar yang ditanam dalam tanah dan membuat kontak langsung dengan tanah. Adanya kontak langsung tersebut bertujuan agar diperoleh pelaluan arus yang sebaik-baiknya apabila terjadi gangguan sehingga arus tersebut disalurkan ketanah. Menurut PUIL 2000 [3.18.11] elektroda adalah pengantar yang ditanamkan ke dalam tanah yang membuat kontak langsung dengan tanah. Bahan elektroda pentanahan biasanya digunakan bahan tembaga, atau baja yang bergalvanis atau dilapisi tembaga sepanjang kondisi setempat tidak mengharuskan memakai bahan lain misalnya

pada perusahaan kimia. Jenis-jenis elektroda yang digunakan dalam pentanahan adalah sebagai berikut:

a. Elektroda Pita

Elektroda pita adalah elektroda yang terbuat dari hantaran yang berbentuk pita atau berpenampang bulat atau hantaran pilin. Dalam pemasangan elektroda ini mempunyai kombinasi bentuk antara lain memanjang dengan cara radial, melingkar atau kombinasi dari bentuk tersebut. Jika keadaan tanah mengijinkan, elektroda pita harus ditanam sedalam 0,5 sampai 1,0m secara horisontal didalam tanah (PUIL, 2000 : 83). Pemasangan elektroda pita dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Pemasangan Elektroda Pita

(sumber : Yohanes Catur Wibowo, 2011)

Pentanahan untuk elektroda pita ditunjukkan pada persamaan 2.4 (Yohanes, 2011).

$$R_G = R_W = \frac{\rho}{\pi L_w} = \left[ \ln \left( \frac{2L_w}{\sqrt{d_w Z_w}} \right) + \frac{1,4 L_w}{\sqrt{A_w}} - 5,6 \right] \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan :

$R_w$  = Tahanan dengan kisi-kisi (grid) kawat (*Ohm*)

$\rho$  = Tahanan jenis tanah (*Ohm-meter*)

$L_w$  = Panjang total grid kawat (*m*)

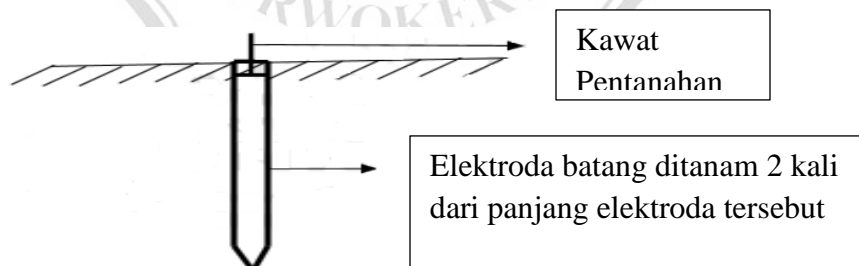
$d_w$  = Diameter kawat (*m*)

$Z_w$  = Kedalaman penanaman (*m*)

$A_w$  = Luasan yang dicakup oleh grid (*m*)

#### b. Elektroda Batang

Elektroda batang ialah elektroda dari pita atau besi baja yang dipasang tegak lurus (vertikal) ke dalam tanah. Umumnya digunakan batang tembaga dengan diameter 5/8 inc sampai 3/4 inc, panjang 4m Atau pipa galvanis dengan diameter 1 inc sampai 2 inc, panjang 6 m (PUIL, 2000 : 80). Pemasangan elektroda batang dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Pemasangan Elektroda Batang

(sumber : Yohanes Catur Wibowo, 2011)

Pentanahan untuk elektroda batang ditunjukkan pada persamaan 2.5 (Yohanes, 2011).

$$R_G = R_R = \frac{\rho}{2\pi L_R} = \left[ \ln \left( \frac{4L_R}{A_R} \right) - 1 \right] \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan :

$R_G$  = Tahanan Pentanahan (*Ohm*)

$R_R$  = Tahanan Pentanahan untuk batang tunggal (*Ohm*)

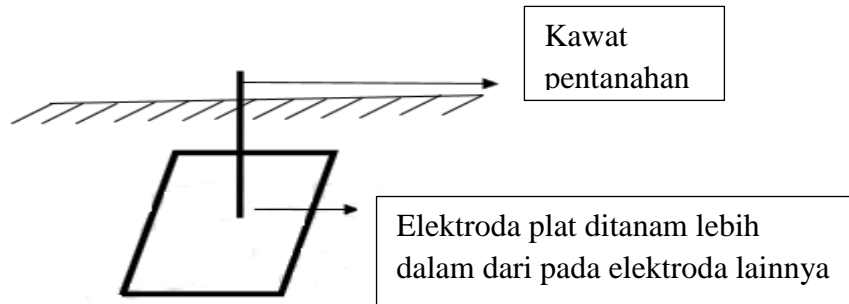
$\rho$  = Tahanan jenis tanah (*Ohm-meter*)

$L_R$  = Panjang elektroda (*m*)

$A_R$  = Diameter elektroda (*m*)

#### c. Elektroda Plat

Elektroda pelat adalah elektroda dari bahan pelat logam (utuh atau berhubung) atau dari kawat kasa. Elektroda pelat ditanam tegak lurus di dalam tanah dan umumnya cukup dengan plat ukuran 4m x 0,5m. Untuk memperoleh tahanan yang lebih rendah, maka beberapa plat dapat digunakan secara bersama dengan rangkaian paralel (PUIL 2000 : 80). Pemasangan elektroda plat dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Pemasangan Elektroda Plat

(sumber : Yohanes Catur Wibowo, 2011)

Pentanahan untuk elektroda plat ditunjukkan pada persamaan 2.6. (Yohanes, 2011)

$$R_G = R_P = \frac{\rho}{2\pi L_P} \left[ \ln \left( \frac{8W_P}{0,5W_P + T_P} \right) - 1 \right] \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan :

$R_P$  = Tahanan pentanahan plat (Ohm)

$\rho$  = Tahanan jenis tanah (Ohm-meter)

$L_P$  = Panjang Plat (m)

$W_P$  = Lebar Plat (m)

$T_P$  = Tebal Plat (m)

## 2.15 Konduktor Pentanahan

Konduktor Pentanahan merupakan bagian penting dari pentanahan karena konduktorlah yang berfungsi mengalirkan gangguan menuju tanah. Konduktor



yang digunakan untuk pentanahan harus memenuhi beberapa persyaratan antara lain :

- a. Memiliki daya hantar jenis yang cukup besar sehingga tidak akan memperbesar beda potensial lokal yang berbahaya.
- b. Memiliki kekerasan secara mekanis pada tingkat yang tinggi terutama bila digunakan pada daerah yang tidak terlindung terhadap kerusakan fisik.
- c. Tahan terhadap peledakan dari kebusukan sambungan listrik, walaupun konduktor tersebut akan terkena *magnitude* arus gangguan dalam waktu yang lama.
- d. Tahan terhadap korosi.

Konduktor Pentanahan juga rentan terhadap kerusakan akibat usia maupun kerusakan akibat sebab lainnya sehingga konduktor tidak dapat berfungsi secara maksimal. Beberapa hal yang mempengaruhi konduktor pentanahan (*grounding*), yaitu :

- a. Panjang/Kedalaman Elektroda Pentanahan (*Grounding*)

Satu cara yang sangat efektif untuk menurunkan tahanan tanah adalah memperdalam elektroda *grounding* (pentanahan). Tanah tidak tetap tahanannya dan tidak dapat diprediksi. Ketika memasang elektroda pentanahan, elektroda berada di bawah garis beku (*frosting line*). Cara ini dilakukan agar tahanan tanah tidak akan dipengaruhi oleh pembekuan tanah di sekitarnya. Secara umum, menggandakan panjang elektroda *grounding* (pentanahan) bisa mengurangi

tingkat tahanan 40%. Kejadian-kejadian dimana secara fisik tidak mungkin dilakukan pendalaman batang elektroda Pentanahan (*grounding*) di daerah-daerah yang terdiri dari batu, granit, dan sebagainya. Dalam keadaan demikian, metode alternatif yang menggunakan semen pentanahan (*grounding cement*) bisa digunakan.

b. Diameter Elektroda Pentanahan (*Grounding*)

Menambah diameter elektroda pentanahan (*grounding*) berpengaruh sangat kecil dalam menurunkan tahanan. Misalnya, bila diameter elektroda digandakan tahanan pentanahan hanya menurun sebesar 10%.

c. Jumlah Elektroda Pentanahan (*Grounding*)

Cara lain menurunkan tahanan tanah adalah menggunakan banyak elektroda pentanahan (*grounding*). Dalam desain ini, lebih dari satu elektroda dimasukkan ke tanah dan dihubungkan secara paralel untuk mendapatkan tahanan yang lebih rendah. Agar penambahan elektroda efektif, jarak batang tambahan setidaknya harus sama dalamnya dengan batang yang ditanam. Tanpa pengaturan jarak elektroda pentanahan (*grounding*) yang tepat, bidang pengaruhnya akan berpotongan dan tahanan tidak akan menurun.

## 2.16 Pengertian gangguan dan klasifikasi gangguan

Gangguan adalah suatu ketidaknormalan (*interferes*) dalam sistem tenaga listrik yang mengakibatkan mengalirnya arus yang tidak seimbang dalam sistem tiga fasa. Gangguan juga dapat didefinisikan sebagai semua kecacatan yang

mengganggu aliran arus normal ke beban. Gangguan dapat diklasifikasikan sebagai :

- a. Gangguan asimetris, merupakan gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada fasanya menjadi tidak seimbang, gangguan ini terdiri atas :
  - Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah
  - Gangguan hubung singkat dua fasa
  - Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah
- b. Gangguan simetris, merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus dan tegangan tetap setiap fasanya setelah gangguan terjadi. Gangguan ini terdiri atas :
  - Gangguan hubung singkat tiga fasa
  - Gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah
- c. Gangguan transient (*temporer*), merupakan gangguan yang hilang dengan apabila pemutus tenaga terbuka dari saluran transmisi untuk waktu yang singkat dan setelah itu dihubungkan kembali.
- d. Gangguan permanen, merupakan gangguan yang tidak hilang atau tetap ada apabila pemutus tenaga terbuka pada saluran transmisi untuk waktu yang singkat dan setelah itu dihubungkan kembali.

Setiap gangguan memiliki komponen untuk mempermudah dalam perhitungannya. Komponen-komponen yang seimbang atau simetris ini dibagi menjadi tiga komponen urutan :

- a. Komponen urutan positif, yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan berbeda sudut fasanya  $120^\circ$  dan mempunyai urutan yang sama dengan fasa aslinya.
- b. Komponen urutan negatif, yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan berbeda sudut fasanya  $120^\circ$  dan mempunyai fasor urutan yang berlawanan dengan fasa aslinya.
- c. Komponen urutan nol, yang terdiri dari tiga fasor yang sama simetris besarnya dan berbeda fasa nol derajat.

Impedansi urutan dapat didefinisikan sebagai suatu impedansi yang dirasakan oleh arus urutan bila tegangan urutannya dipasang pada peralatan atau sistem tersebut. Seperti juga tegangan dan arus di dalam metode komponen simetris dan tak simetris. Impedansi yang dikenal ada tiga macam yaitu :

- a. Impedansi urutan positif ( $Z_1$ ), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan positif.
- b. Impedansi urutan negatif ( $Z_2$ ), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan negatif.
- c. Impedansi urutan nol ( $Z_0$ ), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan nol.

Cara yang biasa dilakukan dalam menghitung besar arus gangguan hubung singkat pada komponen simetris adalah memulai perhitungan pada rel daya tegangan primer di gardu induk untuk berbagai jenis gangguan, kemudian menghitung pada titik-titik lainnya yang terletak semakin jauh dari gardu induk tersebut. Impedansi saluran suatu system tenaga listrik tergantung dari jenis konduktornya yaitu dari bahan apa konduktor itu dibuat yang juga tentunya pula dari besar kecilnya penampang konduktor dan panjang saluran yang digunakan jenis konduktor ini. Komponen simetris lazim digunakan di dalam menganalisa gangguan yang tidak simetris di dalam suatu sistem kelistrikan seperti gangguan satu fasa ke tanah, gangguan tiga fasa dan gangguan dua fasa ke tanah.

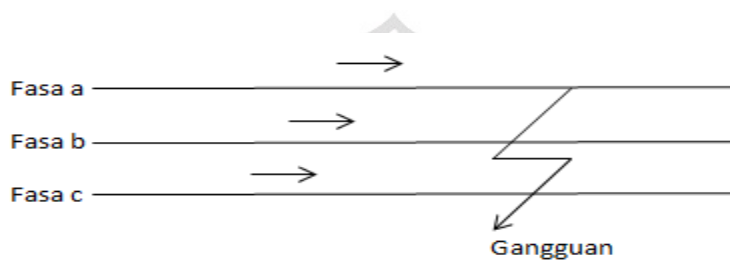
Dimana fasa ini mempunyai komponen urutan (*sequence*):

- a. Komponen urutan nol (*Zero sequence component*), adalah tiga buah fasor yang arah bersamaan sama dengan magnitudes urutan nol (*zero sequence*).
- b. Komponen urutan positif (*positif sequence*), adalah 3 fasor yang mempunyai beda sudut  $\pm 120^\circ$  antara fasa sama dengan magnitudes dari urutan positif (*positif sequence*).
- c. Komponen urutan negatif (*negatif sequence component*), adalah 3 buah fasor yang mempunyai beda sudut  $\pm 120^\circ$  antara fasa sama dengan magnitudes dari urutan negatif (*negatif sequence*).

## 2.17 Jenis-jenis Gangguan

### a. Gangguan Satu Fasa ke Tanah

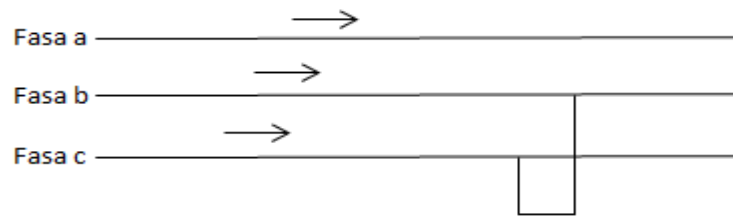
Kemungkinan terjadinya adalah akibat dari *back flashover* antara tiang ke salah satu kawat fasa sesaat setelah tiang tersambar petir yang besar. Bisa juga terjadi saat kawat fasa tersentuh pohon yang cukup tinggi. Gangguan ini dapat dianggap fasa *a* mengalami gangguan dapat ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Gangguan hubung singkat satu fasa

### b. Gangguan Dua Fasa (fasa-fasa)

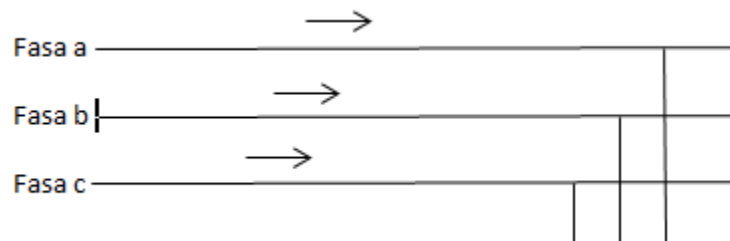
Kemungkinan terjadinya bisa disebabkan oleh putusnya kawat fasa tengah pada distribusi dengan konfigurasi tersusun vertikal. Kemungkinan lain adalah dari rusaknya isolator distribusi sekaligus dua fasa. Gangguan seperti ini biasanya menjadi gangguan dua fasa ketanah atau bisa juga akibat *back flashover* sambaran petir. Pada gangguan hubung singkat fasa ke fasa, arus saluran tidak mengandung komponen urutan nol dikarenakan tidak ada gangguan yang terhubung ke tanah. Gangguan dua fasa dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Gangguan hubung singkat dua fasa

### c. Gangguan Tiga Fasa

Kemungkinan terjadinya adalah dari sebab putusnya salah satu kawat fasa yang letaknya paling atas pada distribusi dengan konfigurasi kawat tersusun vertikal. Kemungkinan terjadinya memang sangat kecil tetapi dalam analisisnya tetap harus diperhitungkan. Sebab lain adalah akibat pohon yang cukup tinggi berayun tertiuip angin kencang sehingga penyentuh ketiga kawat distribusi. Gangguan tiga fasa dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Gangguan hubung singkat tiga fasa