



## BAB II

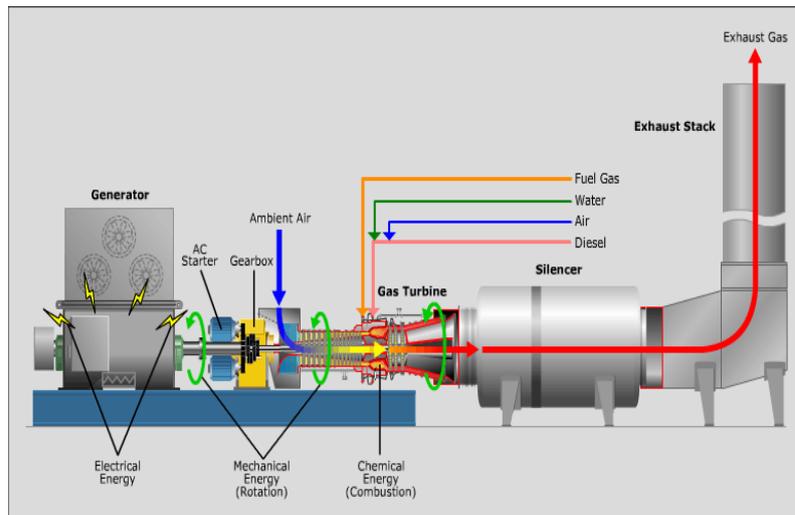
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Generator

Generator listrik adalah sebuah alat yang memproduksi energi listrik dari sumber energi mekanik, biasanya dengan menggunakan induksi elektromagnetik. Proses ini dikenal sebagai pembangkit listrik. Walau generator dan motor punya banyak kesamaan, tapi motor adalah alat yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Generator mendorong muatan listrik untuk bergerak melalui sebuah sirkuit listrik eksternal, tapi generator tidak menciptakan listrik yang sudah ada di dalam kabel lilitannya. Hal ini bisa dianalogikan dengan sebuah pompa air, yang menciptakan aliran air tapi tidak menciptakan air di dalamnya. Sumber energi mekanik bisa berupa resiprokat maupun turbin mesin uap, air yang jatuh melalui sebuah turbin maupun kincir air, mesin pembakaran dalam, turbin angin, engkol tangan, energi surya atau matahari, udara yang dimanfaatkan, atau apa pun sumber energi mekanik yang lain.

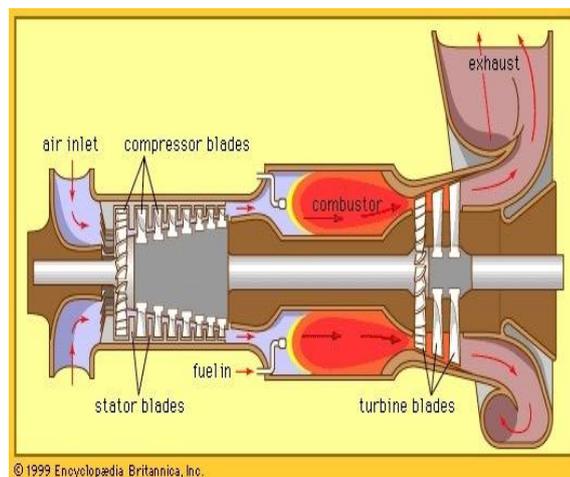
##### 2.1.1 Generator Turbin Gas

Generator turbin gas adalah suatu alat yang memanfaatkan gas sebagai fluida untuk memutar turbin dengan pembakaran internal sehingga dapat memutar generator lalu menghasilkan listrik. Didalam turbin gas, energi kinetik dikonversikan menjadi energi mekanik melalui udara bertekanan yang memutar roda turbin sehingga menghasilkan daya. Pada gambar 2.1 memperlihatkan sebuah gambaran dari konstruksi generator turbin gas.



Gambar 2.1 Konstruksi Generator Turbin Gas

Prinsip kerja dari turbin gas tidak jauh berbeda dengan turbin-turbin yang lain. Putaran dari rotor turbin, diakibatkan oleh adanya gas bertekanan yang melewati sudu-sudu turbin. Gas dengan tekanan tinggi didapatkan dari pembakaran bahan bakar dengan udara, sesaat sebelum masuk turbin. Ekspansi udara hasil proses pembakaran inilah yang digunakan untuk menggerakkan sudu-sudu turbin. Pada gambar 2.2 memperlihatkan bagaimana aliran fluida kerja turbin gas sehingga sudu – sudu turbin dapat bergerak.



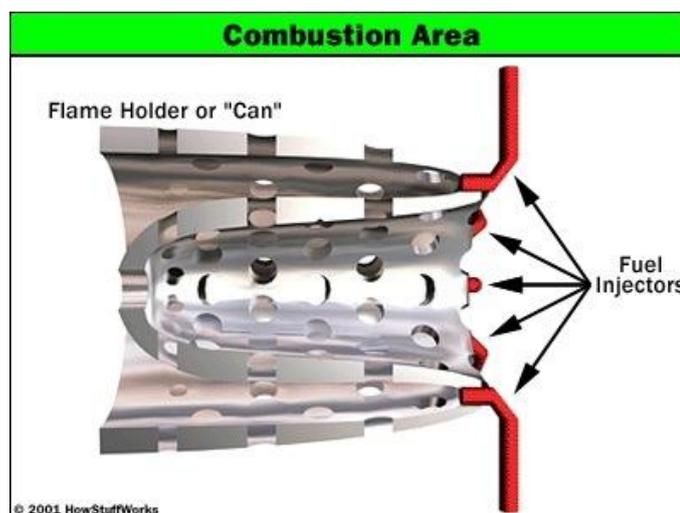
© 1999 Encyclopaedia Britannica, Inc.

Gambar 2.2 Aliran Fluida Kerja Turbin Gas



Udara masuk melalui sisi inlet akibat terhisap oleh kompresor. Kompresor ini berfungsi untuk memampatkan udara hingga mencapai tekanan tertentu. Biasanya, tekanan di akhir sudu kompresor mencapai 30 kali tekanan inlet kompresor. Pada sisi akhir kompresor udara bertekanan akan melewati difuser. Difuser ini berfungsi untuk mendukung kompresor meningkatkan tekanan udara.

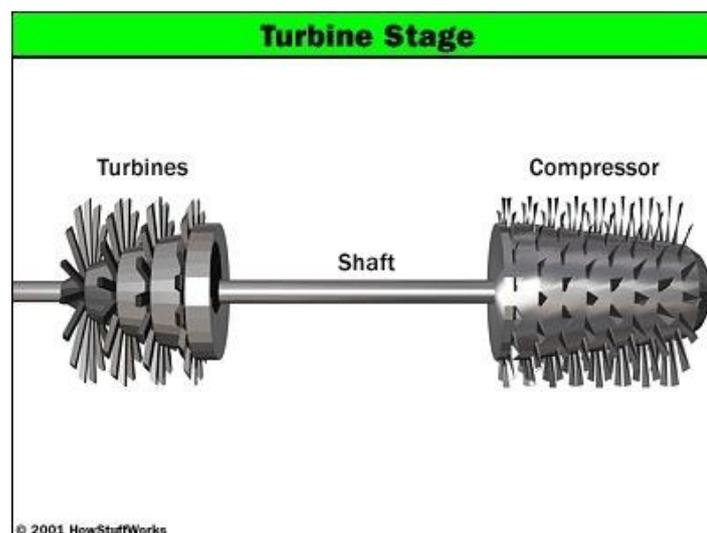
Proses selanjutnya adalah masuknya udara bertekanan yang keluar dari kompresor untuk menuju area pembakaran (biasa disebut *combustion chamber*). Di area ini, dilakukan injeksi bahan bakar diikuti dengan proses pembakaran bahan bakar tersebut di dalam udara. Pembakaran ini mengakibatkan terjadinya ekspansi dari udara sehingga volume udara hasil pembakaran meningkat, dan tentu saja temperaturnya yang juga meningkat. Proses pembakaran di dalam *chamber* tidak akan meningkatkan tekanan udara, karena peningkatan volume udara akibat pemanasan cepat mengakibatkan udara berekspansi ke sisi turbin. Pada gambar 2.3 memperlihatkan sebuah area pembakaran turbin gas tempat udara bertekanan masuk.



Gambar 2.3 Area Pembakaran Turbin Gas



Sedangkan kenaikan suhu udara hasil pembakaran, mengindikasikan kandungan energi dalam udara (entalpi) yang naik pula. Energi inilah yang akan dikonversikan menjadi tenaga putaran poros oleh turbin gas. Udara hasil pembakaran selanjutnya masuk ke sisi turbin. Turbin gas terdiri atas beberapa *stage* sudu. *Stage* pertama yang dilewati oleh udara pembakaran disebut sisi *high pressure stage* (tekanan tinggi), sedangkan sudu yang paling akhir disebut dengan sisi *low pressure stage* (tekanan rendah). Sudu-sudu dari tiap *stage* turbin uap berfungsi sebagai nozzle, yang akan mengubah energi panas yang terkandung di dalam udara hasil pembakaran untuk menjadi energi gerak. Selain sisi rotor, sudu turbin juga terdapat pada sisi stator. Pada gambar 2.4 menunjukkan bahwa kompresor dan turbin gas berada pada satu shaft (poros).



Gambar 2.4 Kompresor dan Turbin Gas Berada Pada Satu *Shaft*

Kompresor pada sistem turbin gas, berada pada satu poros (*shaft*) dengan turbin. Sebagian energi mekanis berupa rotasi poros yang dihasilkan oleh turbin, digunakan untuk memutar rotor kompresor. Pada pembangkit listrik, sebagian energi mekanis digunakan untuk memutar generator yang juga berada satu poros dengan turbin dan kompresor. Setelah melewati turbin ini gas tersebut akan



dibuang keluar melalui saluran buang (exhaust). Secara umum proses yang terjadi pada suatu sistem turbin gas adalah sebagai berikut:

1. Pemampatan (compression) udara di hisap dan dimampatkan
2. Pembakaran (combustion) bahan bakar dicampurkan ke dalam ruang bakar dengan udara kemudian di bakar.
3. Pemuaian (expansion) gas hasil pembakaran memuai dan mengalir ke luar melalui nozel (nozzle).
4. Pembuangan gas (exhaust) gas hasil pembakaran dikeluarkan lewat saluran pembuangan.

## 2.2 Sistem Pentanahan<sup>1</sup>

Salah satu pengaman yang paling baik terhadap peralatan listrik dari arus gangguan ataupun hubung singkat fasa ke tanah adalah dengan cara pentanahan. Cara ini juga dapat melindungi manusia dari bahaya yang timbul akibat gangguan listrik tersebut. Cara memasang pentanahan adalah dengan menghubungkan bagian dari peralatan tersebut dengan sistem pentanahan. Pentanahan adalah penghubung suatu titik rangkaian listrik dengan bumi. Agar sistem pentanahan dapat bekerja efektif, persyaratannya adalah sebagai berikut :

- Membuat jalur impedansi ke tanah untuk pengamanan manusia dan peralatan menggunakan rangkaian efektif.
- Dapat melawan dan menyebarkan gangguan berulang dan arus akibat surja hubungan.
- Menggunakan bahan korosi terhadap bagian kondisi kimiawi tanah, untuk meyakinkan kontinuitas sepanjang umur peralatan yang dilindungi
- Menggunakan sistem mekanik yang kuat namun mudah dalam pemeliharaan.

---

<sup>1</sup> Prih Sumardjati dkk, 2008. Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik. Jakarta.



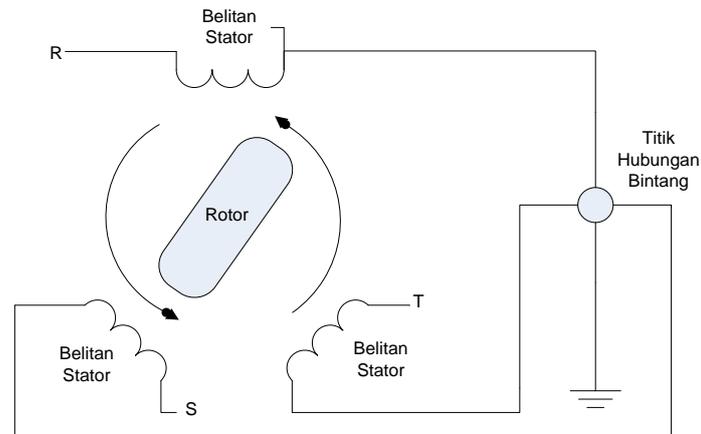
Tahanan untuk pentanahan semakin kecil semakin baik. Lebih jauh lagi, untuk pengamanan manusia dan peralatan diusahakan tahanan Pentanahan lebih kecil dari satu ohm. Hal ini tidak praktis unruk dilaksanakan dalam sistem transmisi dan distribusi. Di beberapa tempat tahanan sebesar 5 ohm mungkin sudah cukup memadai tanpa banyak gangguan. Pentanahan pada umumnya dipasang pada :

- Titik netral kumparan generator, trafo daya, trafo arus, trafo tegangan.
- Tiang saluran listrik.
- Badan konstruksi generator, trafo dan semua peralatan listrik berbahan konduktif.

### **2.3 Pentanahan Generator**

Dahulu sistem tenaga listrik tiga fasa tidak ditanahkan, terutama sistem tiga fasa merupakan sistem yang paling efisien dalam hal pemakaian konduktor tembaganya. Selain itu ketika terjadi gangguan ke tanah pertama tidak timbul arus gangguan dan hal ini merupakan suatu keuntungan meskipun peristiwa tersebut disertai oleh timbulnya kejutan listrik yang berbahaya. Pada gambar 2.5 menunjukkan bagaimana sebuah generator ditanahkan).

Ternyata dari pengalaman-pengalaman dengan sistem yang tidak ditanahkan banyak motor-motor listrik dalam instalasi industri mengalami kerusakan-kerusakan yang disebabkan oleh tegangan lebih yang timbul karena terjadinya busur listrik. Untuk mencegah terjadinya tegangan lebih tersebut maka generator atau sistem tenaga listrik ditanahkan dan biasanya dilakukan pentanahan secara langsung yang sangat efektif untuk membatasi tegangan fasa ke tanah. Juga beban-beban yang terpasang diantara fasa dan netral tetap dapat dilayani tanpa menimbulkan bahaya tegangan antara netral dengan tanah pada keadaan mengalami gangguan tanah. Pada gambar 2.5 memperlihatkan rangkaian bagaimana sebuah generator ditanahkan.



Gambar 2.5 Pentanahan Generator

Tegangan lebih yang bersifat transien harganya mencapai 5 atau 6 kali tegangan normalnya. Terjadinya tegangan lebih transien disebabkan oleh penyalaan dan pemadaman busur listrik pada rangkaian yang terdiri dari induktansi, kapasitansi dan tahanan.

Tujuan pentanahan titik netral generator pada garis besarnya adalah :

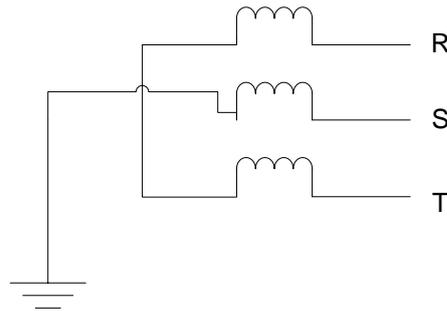
1. Untuk mengurangi kerusakan pada titik gangguan.
2. Untuk membatasi tegangan lebih transien / sementara.
3. Mendeteksi dengan peka terhadap kerusakan titik netral.
4. Menstabilkan titik netral yaitu menjaga supaya titik netral berada pada atau didekat potensial tanah.

### 2.3.1 Pentanahan Titik Netral Secara Langsung

Pada sistem-sistem yang netralnya ditanahkan secara langsung atau tanpa impedansi bila terjadi gangguan fasa ke fasa maka gangguan tersebut harus diisolir dengan membuka pemutus tenaga. Salah satu tujuan dengan mentanahkan titik netral secara langsung ialah untuk membatasi tegangan dari fasa-fasa yang tidak terganggu bila terjadi gangguan fasa ke tanah. Pentanahan titik netral secara langsung biasanya digunakan pada sistem yang bertegangan rendah (0 sampai 600 V), kadang-kadang digunakan juga pada sistem bertegangan menengah.



Untuk menjelaskan perihal pentanahan titik netral secara langsung, ditinjau masalah terjadinya gangguan ke tanah pada salah satu fasa generator yang titik netralnya ditanahkan secara langsung. Pada gambar 2.6 memperlihatkan sebuah rangkaian ekuivalen yang titik netralnya ditanahkan secara langsung.



Gambar 2.6 Pentanahan Secara Langsung

Keuntungan pentanahan secara langsung :

- Tegangan lebih pada fasa-fasa yang tidak terganggu relatif kecil
- Kerja pemutus daya untuk melokalisir lokasi gangguan dapat dipermudah, sehingga letak gangguan cepat diketahui
- Sederhana dan murah dari segi pemasangan.

Kerugian pentanahan secara langsung :

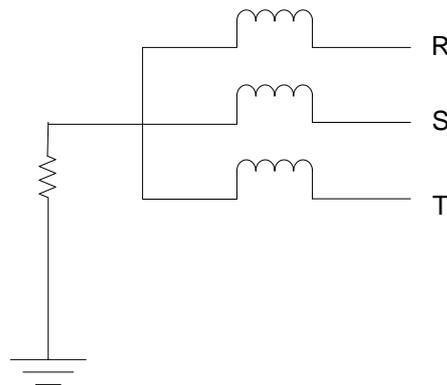
- Gangguan fasa ke tanah selalu mengakibatkan terputusnya daya
- Arus gangguan ke tanah besar, sehingga dapat membahayakan makhluk hidup dan peralatan listrik yang dilaluinya.

### 2.3.2 Pentanahan Titik Netral Melalui Tahanan<sup>2</sup>

Pentanahan titik netral melalui tahanan (resistance grounding) dimaksud adalah suatu sistem yang mempunyai titik netral dihubungkan dengan tanah melalui tahanan (resistor), sebagai contoh terlihat pada gambar 2.7 rangkaian pentanahan titik netral melalui tahanan.

---

<sup>2</sup> Jasa Pendidikan dan Pelatihan. PT. PLN (Persero).



Gambar 2.7 Penatanahan Melalui Tahanan.

Pada umumnya nilai tahanan pentanahan lebih tinggi dari pada reaktansi sistem pada tempat dimana tahanan itu dipasang. Sebagai akibatnya besar arus gangguan fasa ke tanah pertama-tama dibatasi oleh tahanan itu sendiri. Dengan demikian pada tahanan itu akan timbul rugi daya selama terjadi gangguan fasa ke tanah. Dengan memilih harga tahanan yang tepat, arus gangguan ketanah dapat dibatasi sehingga harganya hampir sama bila gangguan terjadi disegala tempat didalam sistem bila tidak terdapat titik pentanahan lainnya. Dalam menentukan nilai tahanan pentanahan akan menentukan besarnya arus gangguan tanah.

Keuntungan pentanahan melalui tahanan :

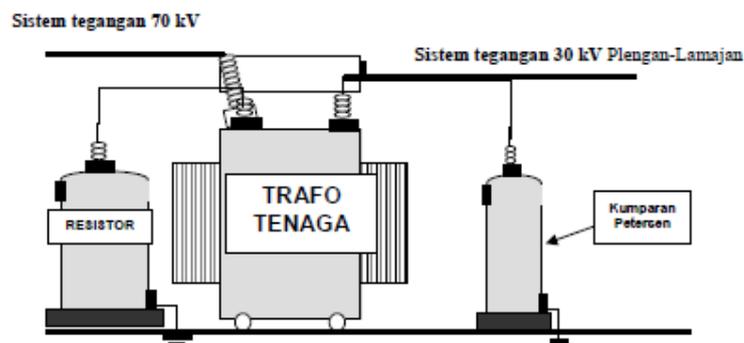
- Besar arus gangguan tanah dapat diperkecil
- Bahaya gradient voltage lebih kecil karena arus gangguan tanah kecil.
- Mengurangi kerusakan peralatan listrik akibat arus gangguan yang melaluinya.

Kerugian pentanahan melalui tahanan:

- Timbulnya rugi-rugi daya pada tahanan pentanahan selama terjadinya gangguan fasa ke tanah.
- Karena arus gangguan ke tanah relatif kecil, kepekaan rele pengaman menjadi berkurang dan lokasi gangguan tidak cepat diketahui.

### 2.3.3 Pentanahan Titik Netral Melalui Kumputan Petersen<sup>2</sup>

Sistem pentanahan dengan kumputan Petersen adalah dimana titik netral dihubungkan ke tanah melalui kumputan Petersen (Petersen Coil). Kumputan Petersen ini mempunyai harga reaktansi (XL) yang dapat diatur dengan menggunakan tap. Gambar 2.8 memperlihatkan petersen coil yang terpasang di PT PLN (Persero) P3B Region Jawa Barat, yaitu pada sistem 30 kV Plengan- Lamajan.



Gambar 2.8 Contoh Pentanahan Melalui Kumputan Petersen.

Pada hakekatnya tujuan dari pentanahan dengan kumputan Petersen adalah untuk melindungi sistem dari gangguan hubung singkat fasa ke tanah yang sementara sifatnya (temporary fault), yaitu dengan membuat arus gangguan yang sekecil-kecilnya dan pemadaman busur api dapat terjadi dengan sendirinya.

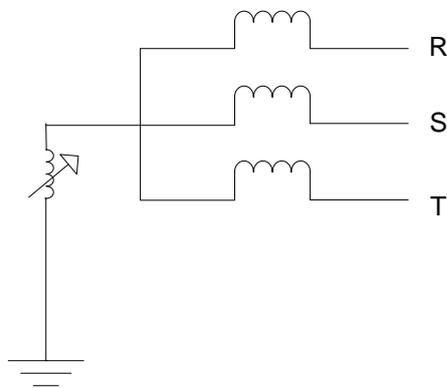
Kumputan Petersen berfungsi untuk memberi arus induksi (IL) yang mengkompensir arus gangguan, sehingga arus gangguan itu kecil sekali dan tidak membahayakan peralatan listrik yang dilaluinya. Arus gangguan ke tanah yang mengalir pada sistem sedemikian kecilnya sehingga tidak langsung mengerjakan rele gangguan tanah untuk membuka pemutusnya (PMT) dari bagian yang terganggu. Dengan demikian kontinuitas penyaluran tenaga listrik tetap berlangsung untuk beberapa waktu lamanya walaupun sistem dalam keadaan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, yang berarti pula dapat memperpanjang umur dari pemutus tenaga (PMT).

---

<sup>2</sup> Jasa Pendidikan dan Pelatihan. PT. PLN (Persero).



Sebaliknya sistem pentanahan dengan kumparan Petersen ini mempunyai kelemahan, yaitu sulit melokalisir gangguan satu fasa ke tanah yang bersifat permanen dan biasanya memakan waktu yang lama. Gangguan hubung singkat yang permanen itu dapat mengganggu bagian sistem yang lainnya. Oleh karenanya hubung singkat tersebut tetap harus dilokalisir dengan menggunakan rele hubung singkat ke tanah (Ground fault relay). Pada gambar menunjukkan 2.9 Rangkaian sistem pentanahan dengan kumparan Petersen.



Gambar 2.9 Pentanahan Melalui Kumparan Petersen.

Keuntungan pentanahan dengan kumparan Petersen :

- Arus gangguan dapat dibuat kecil sehingga tidak berbahaya bagi mahluk hidup.
- Kerusakan peralatan sistem dimana arus gangguan mengalir dapat dihindari.
- Sistem dapat terus beroperasi meskipun terjadi gangguan fasa ke tanah.
- Gejala busur api dapat dihilangkan.

Kerugian pentanahan dengan kumparan Petersen :

- Rele gangguan tanah sukar dilaksanakan karena arus gangguan tanah relatif kecil.
- Tidak dapat menghilangkan gangguan fasa ke tanah yang menetap pada sistem.



- Operasi kumparan Petersen harus selalu diawasi karena bila ada perubahan pada sistem, kumparan Petersen harus disetel (tuning) kembali.

## 2.4 Fungsi dan Tujuan Pentanahan

Fungsi pentanahan adalah mengalirkan arus gangguan kedalam tanah melalui suatu elektroda pemukiman yang ditanam dalam tanah. Selain itu juga berfungsi sebagai pengaman bagi peralatan dan manusia dari bahaya listrik. Arus gangguan yang mengalir pada elektroda pentanahan akan mengakibatkan perbedaan tegangan antara elektroda pada suatu titik dengan titik yang lain di permukaan tanah. Bila perbedaan maksimum sepanjang permukaan tanah ternyata masih besar, maka kondisi ini tidak menguntungkan karena akan membahayakan manusia yang sedang bekerja maupun peralatan yang digunakan. Perbedaan tegangan ini akan dirasakan di dalam dan disekitar gardu induk dimana sedang terjadi gangguan. Untuk mengurangi pengaruh tersebut, maka haruslah dapat direncanakan suatu sistem pentanahan dengan harga pentanahan yang sekecil mungkin.

Tujuan pentanahan peralatan – peralatan listrik antara lain :

- a. Membatasi tegangan antara bagian – bagian peralatan yang tidak dialiri arus listrik dengan bagian – bagian peralatan yang tidak dialiri arus listrik dengan tanah.
- b. Memperkecil bahaya kejut pada manusia maupun hewan.
- c. Menetralkan tegangan yang terjadi pada permukaan tanah.

## 2.5 Pentanahan Peralatan<sup>1</sup>

Pentanahan peralatan sistem pentanahan netral pengaman (PNP) adalah tindakan pengamanan dengan cara menghubungkan badan peralatan / instalasi yang diproteksi dengan hantaran netral yang ditanahkan sedemikian rupa sehingga apabila terjadi kegagalan isolasi tidak terjadi tegangan sentuh yang tinggi sampai bekerjanya alat pengaman arus lebih.

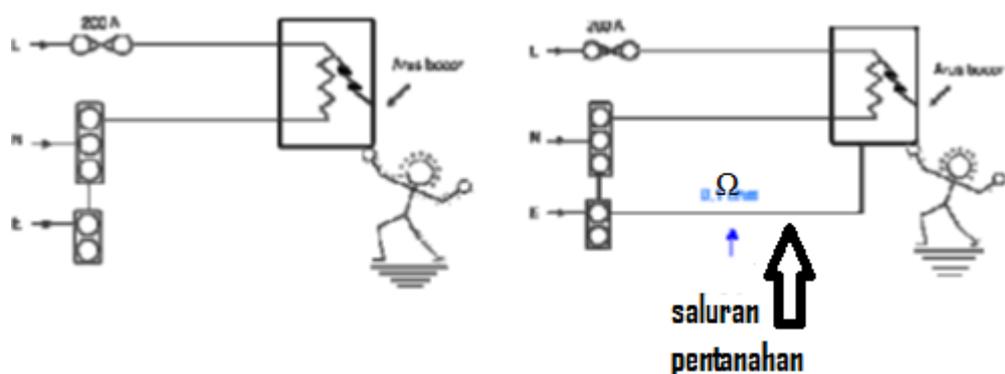
---

<sup>1</sup> Prih Sumardjati, dkk. Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik. 2008.

Yang dimaksud dari pentanahan peralatan ini adalah bagian-bagian mesin yang secara normal tidak dilalui arus listrik namun dalam kondisi abnormal dimungkinkan dilalui arus listrik. Sebagai contoh adalah bagian-bagian mesin atau alat yang terbuat dari logam (penghantar listrik), seperti kerangka dan rumah mesin listrik, dan panel listrik. Selain tegangan sentuh tidak langsung ada dua potensi bahaya sengatan listrik yang dapat diamankan melalui pentanahan ini, yaitu tegangan langkah dan tegangan eksposur.

### 2.5.1 Tegangan Sentuh Tidak Langsung

Tegangan sentuh tidak langsung adalah tegangan pada bagian alat/instalasi yang secara normal tidak dilalui arus namun akibat kegagalan isolasi pada peralatan/instalasi, pada bagian-bagian tersebut mempunyai tegangan terhadap tanah. Bila tidak ada pentanahan maka tegangan sentuh tersebut sama tingginya dengan tegangan kerja alat/instalasi. Hal ini, sudah tentu, membahayakan manusia yang mengoperasikannya atau yang ada di sekitar tempat itu. Selama alat pengaman arus lebih tidak bekerja memutuskan rangkaian, keadaan ini akan tetap bertahan. Namun dengan adanya pentanahan secara baik, kemungkinan tegangan sentuh selama terjadi gangguan dibatasi pada tingkat aman (maksimum 50 V untuk ac). Pada gambar 2.10 menunjukkan gambaran manusia yang terkena tegangan sentuh tak langsung.



Gambar 2.10 Tegangan Sentuh Tidak Langsung.



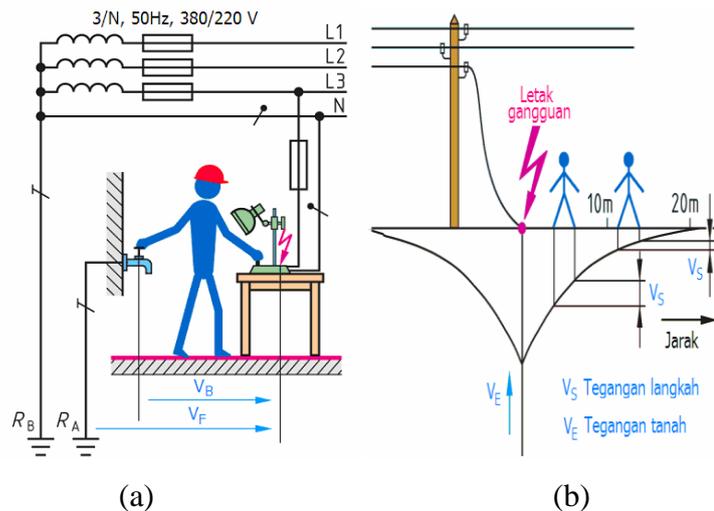
Dalam gambar ini terlihat jelas perbedaan antara sebelum dan setelah ada pentanahan pada alat yang terbungkus dengan bahan yang terbuat dari logam penghantar). Pada keadaan sebelum diketanahkan, bila terjadi arus gangguan (arus bocor), maka selungkup alat mempunyai tegangan terhadap tanah sama dengan tegangan sumber (tegangan antara L-N). Tegangan ini sudah tentu sangat membahayakan operator atau orang yang menyentuh selungkup alat tersebut dan pengaman arus beban lebih tidak bekerja memutuskan aliran bila tidak melampaui batas kerjanya. Sehingga kalau pun terjadi sengatan pada manusia alat pengaman ini masih belum akan bekerja karena arus listrik yang mengalir ke tubuh tidak cukup besar untuk bekerjanya pengaman akibat dari adanya tahanan tubuh yang relatif besar.

Sedangkan, pada keadaan setelah dilakukan pentanahan, maka bila terjadi arus gangguan, karena tahanan pentanahan sangat kecil (persyaratan), maka akan mengalir arus gangguan yang sangat besar sehingga membuat bekerjanya pengaman arus lebih, yaitu dengan memutuskan peralatan dari sumber listrik. Dalam waktu terjadinya arus gangguan ini, dan dengan tahanan pentanahannya sangat rendah, tegangan sentuh dapat dibatasi pada batas amannya.

### **2.5.2 Tegangan langkah**

Tegangan langkah adalah tegangan yang terjadi akibat aliran arus gangguan yang melewati tanah. Arus gangguan ini relatif besar dan bila mengalir dari tempat terjadinya gangguan kembali ke sumber (titik netral) melalui tanah yang mempunyai tahanan relatif besar maka tegangan di permukaan tanah akan menjadi tinggi. Pada gambar 2.11 Antara kran air dan dudukan lampu dalam keadaan normal tidak bertegangan. Tetapi ketika terjadi gangguan ke tanah, arus mengalir kembali ke sumber melalui pentanahan RA dan RB. Adanya aliran arus gangguan ini menimbulkan tegangan antara letak gangguan dan RA sebesar VF dan antara kran air dan dudukan lampu sebesar VB. Besar kedua tegangan ini ditentukan oleh besar arus gangguan dan tahanan pentanahannya. Semakin besar arus dan tahanan akan semakin besar pula tegangan sentuhnya. Besar tegangan ini harus dibatasi dalam batas aman begitu juga lama waktu terjadinya tegangan harus dibatasi sependek

mungkin. Lama waktu terjadinya tegangan ini dibatasi oleh waktu kerja alat pengaman arus lebih. Pada gambar 2.11 (a) menunjukkan ilustrasi manusia yang terkena tegangan sentuh dan 2.11 (b) tegangan langkah.



Gambar 2.11 (a) Tegangan Sentuh dan (b) Tegangan Langkah

*International Electrotechnical Commission (IEC)* merekomendasikan besar dan lama tegangan sentuh maksimum yang diperbolehkan seperti dalam tabel dihalaman berikutnya. Pada tabel 2.1 menunjukkan besar tegangan sentuh maksimum dan waktu pemutusannya.

Tabel 2.1 Besar Tegangan Sentuh dan Waktu Pemutusan Maksimum

Tegangan Sentuh RMS Maksimum (V)	Waktu Pemutusan Maksimum (detik)
<50	~
50	5
75	1
90	0,5
110	0,2



150	0,1
220	0,05
280	0,03

Berdasarkan tabel ini dapat dikatakan bahwa semakin tinggi tegangan sentuh semakin pendek waktu pemutusan yang dipersyaratkan bagi alat pengaman (proteksi) nya. Untuk tegangan sentuh kurang dari 50 V AC tidak ada persyaratan waktu pemutusannya, yang berarti bahwa tegangan itu diperkenankan sebagai tegangan permanen. Untuk dapat memenuhi persyaratan tersebut maka tahanan pentanahan sebesar:

$$R_B < \frac{50}{k I_n} (\Omega)$$

di mana:

$R_B$  = tahanan bumi

$I_n$  = arus nominal alat pengaman arus lebih (A)

$k$  = bilangan yang tergantung pada karakteristik alat pengaman

= 2,5 – 5 untuk pengaman lebur (sekering)

= 1,25 – 3,5 untuk pengaman jenis lainnya

Bila terjadi gangguan tanah, di mana ada salah satu saluran fasa putus dan menyentuh tanah, maka akan terjadi tegangan eksposur dengan gradien. Tegangan ini ditimbulkan oleh adanya arus gangguan tanah yang besar yang mengalir melalui tanah untuk kembali lagi ke sumber. Gradien tegangan semakin menurun dengan semakin jauhnya jarak dari letak gangguan. Tegangan ini sangat membahayakan orang yang ada di atas tanah/lantai sekitar terjadinya gangguan tersebut walaupun yang bersangkutan tidak menyentuh bagian-bagian mesin. Tegangan ini adalah tegangan antar kaki dan karena itulah kemudian disebut tegangan langkah.



Tegangan langkah harus dibatasi serendah mungkin dan dalam waktu yang sependek-pendeknya. Besar tegangan langkah diminimalisir dengan sistem pentanahan sedangkan waktu pemutusannya dilakukan dengan peralatan pengaman.

### 2.5.3 Tegangan Eksposur

Ketika terjadi gangguan tanah dengan arus yang besar akan memungkinkan timbulnya beda potensial antara bagian-bagian yang dilalui arus dan antara bagian-bagian yang tidak dilalui arus terhadap tanah yang disebut tegangan eksposur. Tegangan ini bisa menimbulkan busur tanah (*grounding arc*) yang memungkinkan terjadinya kebakaran atau ledakan. Arus gangguan tanah di atas 5 A cenderung tidak dapat padam sendiri sehingga menimbulkan potensi kebakaran dan ledakan. Dengan sistem pentanahan ini, membuat potensial semua bagian struktur, peralatan dan permukaan tanah menjadi sama (*uniform*) sehingga mencegah terjadinya loncatan listrik dari bagian peralatan ke tanah. Yang tidak kalah pentingnya adalah ketika terjadi gangguan tanah, tegangan fasa yang mengalami gangguan akan menurun. Penurunan tegangan ini sangat mengganggu kinerja peralatan yang sedang dioperasikan. Kejadian ini pula bisa mengganggu kerja paralel generator-generator sehingga secara keseluruhan akan mengganggu kinerja sistem tenaga. *Rural Electrification Administration* (REA), AS, merekomendasi tegangan langkah dan waktu pemutusan maksimum yang diperbolehkan seperti tabel di halaman berikutnya. Pada tabel 2.2 menunjukkan besar tegangan langkah yang diizinkan dan lama gangguannya.

Tabel 2.2 Tegangan Langkah dan Waktu Pemutusan Gangguan Maksimum

Lama Gangguan (detik)	Tegangan Langkah Yang Diizinkan (V)
0,1	7000
0,2	4950
0,3	4040



0,4	3500
0,5	3140
1	2216
2	1560
3	1280

## 2.6 Tahanan Jenis Tanah dan Tipe Tanah

### 2.6.1 Pengaruh Keadaan Struktur Tanah

Tanah merupakan campuran dari partikel cair, padat dan gas. Susunan tanah itu sendiri memberikan suatu petunjuk yang baik pada tingkat mana tahanan jenis tanah itu akan diperkirakan. Tahanan jenis tanah dipengaruhi beberapa faktor, oleh karena itu tahanan jenis tanah tidak dapat dikatakan sebagai nilai yang tetap.

Sering dicoba mengubah komposisi tanah dengan memberikan garam pada tanah yang dekat elektroda pentanahan untuk mendapat nilai tahanan jenis tanah yang rendah. Namun cara ini berfungsi untuk sementara, karena proses penggaraman harus dilakukan setidaknya enam bulan sekali. Pada tabel 2.3 menunjukkan berbagai macam jenis tanah dan tahanan jenisnya.

Tabel 2.3 Tahanan Jenis Berbagai Macam Tanah.<sup>3</sup>

1	2	3	4	5	6	7
Jenis Tanah	Tanah rawa	Tanah liat & tanah ladang	Pasir basah	Kerikil basah	Pasir dan kerikil kering	Tanah berbatu
Tahanan Jenis ( $\Omega$ -m)	30	100	200	500	1000	3000

<sup>3</sup> Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000.



Selain berdasarkan data diatas pengukuran tahanan jenis tanah dapat dihitung menggunakan rumus :

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot D \cdot R \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

$\rho$  = tahanan jenis rata – rata tanah (ohm-meter)

D = jarak antara batang elektroda terdekat (meter)

R = besar tahanan yang diukur (ohm)

### 2.6.2 Pengaruh Unsur Kimia<sup>4</sup>

Kandungan zat-zat kimia dalam tanah terutama sejumlah zat organik maupun anorganik yang dapat larut perlu untuk diperhatikan pula. Didaerah yang mempunyai tingkat curah hujan tinggi biasanyamempunyai 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 pembedaan ditanam. Cara ini hanya baik untuk sementara sebab proses penggaraman harus dilakukan secara periodik, sedikitnya 6 (enam) bulan sekali.

### 2.6.3. Pengaruh Iklim<sup>4</sup>

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.

---

<sup>4</sup> AS Pabla dan Abdul Hadi. 1991. Sistem Distribusi Daya Listrik. Penerbit Erlangga. Jakarta.



Kadangkala pembenaman elektroda pbumian 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. Dengan demikian tahanan jenis tanah akan dipengaruhi pula oleh besar kecilnya konsentrasi air tanah atau kelembaban tanah, maka konduktivitas daripada tanah akan semakin besar sehingga tahanan tanah semakin kecil.

#### **2.6.4. Pengaruh Temperatur Tanah<sup>4</sup>**

Temperatur tanah sekitar elektroda pbumian 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. Pada temperatur di bawah titik beku air ( $0^{\circ}\text{C}$ ) , air di dalam tanah akan membeku, molekulmolekul 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.

### **2.7 Komponen Pentanahan**

#### **2.7.1 Hantaran Penghubung**

Seperti yang kita ketahui pada instalasi listrik suatu penghantar yang berfungsi menghubungkan titik kontak pada bodi peralatan listrik dengan elektroda pentanahan. Pada generator atau transformator titik yang dihubungkan adalah titik netral dengan elektroda pentanahan.

---

<sup>4</sup> AS Pabla dan Abdul Hadi. 1991. Sistem Distribusi Daya Listrik. Penerbit Erlangga. Jakarta.



Pengertian hantaran pembumian sesuai PUIL 2000 adalah: penghantar dengan impedans rendah, yang secara listrik menghubungkan titik yang tertentu pada suatu perlengkapan instalasi atau sistem) dengan elektrode bumi. Fungsi dari hantaran bumi sesuai dengan pengertiannya adalah untuk menghubungkan rangkaian badan instalasi yang akan dibumikan dengan elektrode buminya. Bahan hantaran pembumian ini adalah tembaga dengan ukuran minimal sama penampangnya dengan saluran pelayanan atau 6 mm<sup>2</sup> minimal untuk PHB utama tetapi tidak perlu sampai 50 mm<sup>2</sup> untuk pembumian lainnya. Titik netral trafo, tiang akhir, PHB utama, tiang-tiang jaringan tegangan menengah perlu dilengkapi dengan terminal pembumian di mana terminal tersebut dilengkapi dengan mur dan baut yang baik atau sepatu kabel, ini dimaksudkan agar pentanahan sewaktu-waktu dapat dilepas untuk pemeriksaan tahanan pembumian.

### **2.7.2 Elektroda Pentanahan**

Yang dimaksud dengan elektroda pentanahan adalah penghantar yang ditanam dalam bumi dan membuat kontak langsung dengan bumi. Sedangkan menurut SNI 225-87/320.A.1, elektroda pentanahan adalah sebuah atau sekelompok penghantar yang mempunyai kontak yang erat dengan bumi dan mengantari hubungan listrik dengan bumi. Elektroda pentanahan merupakan bagian yang langsung menyebarkan arus ke dalam bumi, hubungan ini harus sebaik mungkin, tahan terhadap gangguan arus listrik, korosi maupun gangguan mekanik. Jadi yang diharapkan adalah hubungan listrik dengan impedansi yang serendah mungkin dan tahan lama. Beberapa macam elektroda pentanahan yang dipakai, diantaranya elektroda pita dan batang. Pasak tanah, batang logam, biasa digunakan untuk elektroda tanah. Tahanan antara elektroda dan tanah jauh lebih kecil dari yang biasanya diduga. Apabila elektroda bersih dari cat atau minyak, dan tanah dapat dipasak dengan kuat maka biro Standarisasi Nasional Amerika Serikat menyatakan bahwa tahanan kontak dapat diabaikan.

Pasak dengan tahanan seragam yang ditanam ketanah akan mengantarkan arus kesemua jurusan. Jika ditinjau suatu elektroda yang ditanam di tanah yang

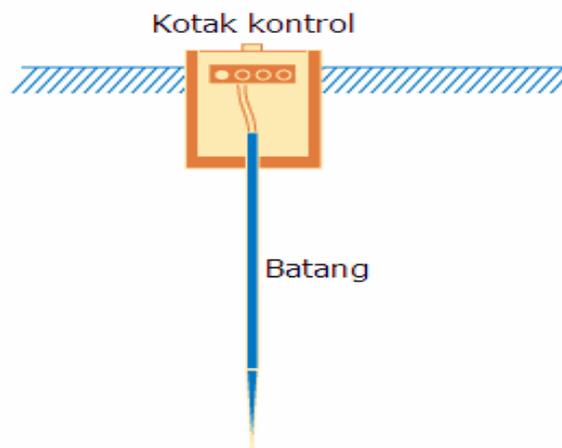


terdiri atas bagian – bagian tanah dengan ketebalan yang sama. Lapisan tanah terdekat dengan pasak sendirinya memiliki permukaan paling sempit, sehingga memberikan tahanan terbesar. Lapisan berikutnya, karena lebih luas, memberikan tahanan yang lebih kecil.

## 2.8 Jenis-Jenis Elektroda Pentanahan<sup>1</sup>

### 2.8.1 Elektroda Batang (Rod)

Elektroda batang ialah elektroda dari pipa atau besi baja profil yang dipancangkan ke dalam tanah. Elektroda ini merupakan elektroda yang pertama kali digunakan dan teori-teori berawal dari elektroda jenis ini. Elektroda ini banyak digunakan di gardu induk-gardu induk. Secara teknis, elektroda batang ini mudah pemasangannya, yaitu tinggal memancangkannya ke dalam tanah. Pada gambar 2.12 menunjukkan bagaimama penanaman sebuah elektroda batang.



Gambar 2.12 Elektroda Batang

---

<sup>1</sup> Prih Sumardjati, dkk. Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik. 2008.

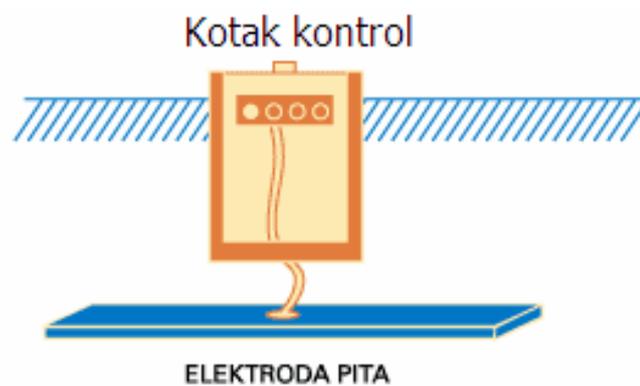


### 2.8.2 Elektroda Pita

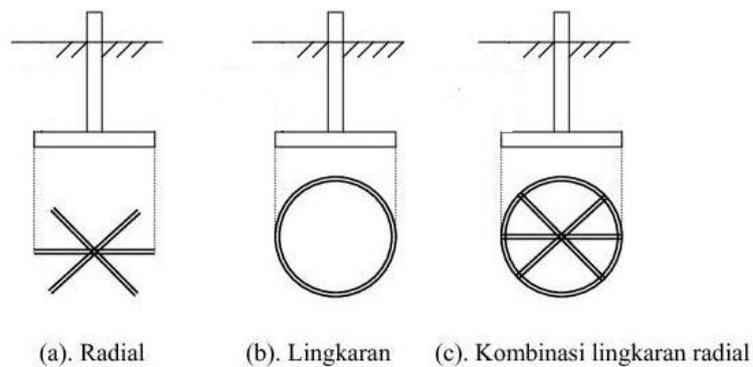
Elektroda pita ialah elektroda yang terbuat dari hantaran berbentuk pita atau berpenampang bulat atau hantaran pilin yang pada umumnya ditanam secara dangkal. Kalau pada elektroda jenis batang, pada umumnya ditanam secara dalam. Pemancangan ini akan bermasalah apabila mendapati lapisan-lapisan tanah yang berbatu, disamping sulit pemancangannya, untuk mendapatkan nilai tahanan yang rendah juga bermasalah.

Ternyata sebagai pengganti pemancangan secara vertikal ke dalam tanah, dapat dilakukan dengan menanam batang hantaran secara mendatar (horizontal) dan dangkal.

Di samping kesederhanaannya itu, ternyata tahanan pentanahan yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh bentuk konfigurasi elektrodanya, seperti dalam bentuk melingkar, radial atau kombinasi antar keduanya. Pada gambar 2.13 menunjukkan bagaimana penanaman sebuah elektroda pita. Dan pada gambar 2.14 menunjukkan jenis – jenis elektroda pita.



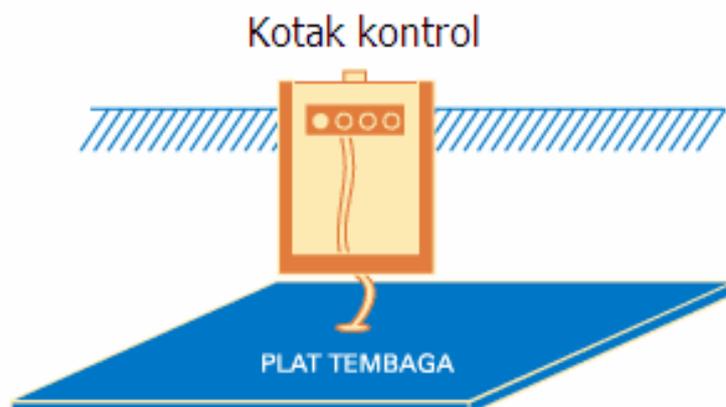
Gambar 2.13 Elektroda Pita



Gambar 2.14 Jenis – Jenis Elektroda Pita

### 2.8.3 Elektroda Pelat

Elektroda pelat ialah elektroda dari bahan pelat logam (utuh atau berlubang) atau dari kawat kasa. Pada umumnya elektroda ini ditanam dalam. Elektroda ini digunakan bila diinginkan tahanan pentanahan yang kecil dan sulit diperoleh dengan menggunakan jenis-jenis elektroda yang lain. Pada gambar 2.15 menunjukkan bagaimana penanaman sebuah elektroda pelat.



Gambar 2.15 Elektroda Pelat



## 2.9 Menghitung Tahanan Pentanahan

Persamaan untuk tahanan dari berbagai sistem elektroda cukup rumit dan dalam beberapa hal dapat dinyatakan dengan pendekatan – pendekatan. Semua pernyataan dalam persamaan – persamaan itu diperoleh dari hubungan  $R = \rho L / A$  dan didasarkan pada asumsi bahwa tahanan tanah seragam pada seluruh volume tanah, kendati hal ini tidak mungkin / sangat jarang ada. Menurut standar PUIL 3.13.2.10 nilai tahanan Pentanahan untuk seluruh sistem yang layak digunakan ialah dibawah 5  $\Omega$ . Rumus yang digunakan yaitu :

### 2.9.1 Elektroda Batang

1 . Untuk elektroda tunggal

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \dots\dots\dots \Omega \text{ (2.2)}^1$$

2 . Untuk elektroda lebih dari satu.  $s > L$  ; s adalah jarak antar elektroda

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi L} \left( 1 - \frac{L}{3s^2} + \frac{2}{5} \frac{L^4}{s^4} \right) \dots\dots\dots \Omega \text{ (2.3)}^1$$

3 . Untuk elektroda lebih dari satu.  $s < L$  ; s adalah jarak antar elektroda

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \right) \dots\dots\dots \Omega \text{ (2.4)}^1$$

Keterangan :

$\rho$  = tahanan jenis tanah (ohm-cm)

L = panjang pasak tanah (cm)

a = jari – jari penampang pasak (cm)

R = tahanan pasak ke tanah (ohm)

s = jarak antar elektroda (cm)

<sup>1</sup> Prih Sumardjati, dkk. Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik. 2008.



### 2.9.2 Elektroda Pita

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left( \ln \frac{8W}{\sqrt{dZ}} + \frac{1,4L}{\sqrt{A}} - 5,6 \right) \dots\dots\dots\Omega \text{ (2.5)}^1$$

Keterangan :

$\rho$  = tahanan jenis tanah (ohm-cm)

L = panjang grid kawat (cm)

d = diameter kawat (cm)

Z = kedalaman penanaman (cm)

A = luasan yang dicakup grid (cm<sup>2</sup>)

### 2.9.3 Elektroda Pelat

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln \left( \frac{8W}{0,5W + T} \right) - 1 \right] \dots\dots\dots\Omega \text{ (2.6)}^1$$

Keterangan :

$\rho$  = tahanan jenis tanah (ohm-cm)

L = panjang grid kawat (cm)

w = lebar pelat (cm)

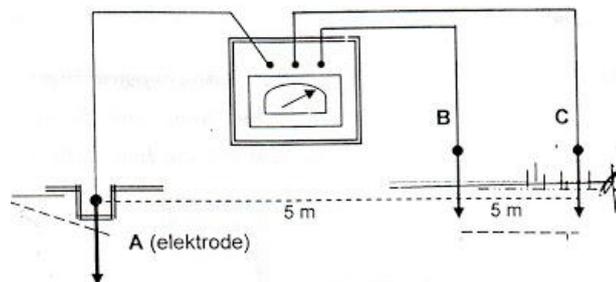
T = tebal pelat (cm)

---

<sup>1</sup> Prih Sumardjati, dkk. Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik. 2008.

## 2.10 Mengukur Tahanan Pentanahan

Tujuan pentanahan peralatan adalah usaha untuk mengamankan system apabila terjadi hubung singkat pada peralatan, selanjutnya arus hubung singkat tsb akan disalurkan ketanah dan tidak membahayakan bagi orang dan peralatan, terutama pada peralatan listrik yang rangka (bodi) terbuat dari logam harus ditanahkan. Pengukuran perlu dilakukan sebelum system dioperasikan pertama kali, waktu pemeliharaan atau setelah system ada gangguan. Sewaktu pelaksanaan pengukuran pentanahan, saluran (kawat) dari electrode ke rangka peralatan harus dilepas. Pengukuran dilakukan pada electrode dengan alat ukur Earth Tester. Pelaksanaan pengoperasian Earth Tester sbb: Prop (A) di hubungkan dengan electrode (di bak kontrol). Prop (B) dan (C) ditancapkan ketanah dengan jarak antara 5 sd. 10 m. Maka alat ukur akan menunjukan besar dari R-tanah lihat pada gambar 2.16.



Gambar 2.16 Penggunaan Earth Tester

Standar besar R-tanah untuk electrode pentanahan  $\pm 5$  Ohm. Apabila belum mencapai nilai 5 Ohm, maka electrode bisa ditambah dan dipasang diparalel. Pentanahan paling ideal apabila electrode bias mencapai R-tanah = 0. Ada kendala ketika suatu saat kita membangun sistem Grounding, setelah diukur dengan Earth Tester Nilai yang muncul 100 ohm (maks), kalau acuannya PUIL mungkin anda diwajibkan menurunkannya.. Ada trik sederhana dengan menambah Rods sesuai dengan rumus mencari Nilai 2 tahanan yang di-paralelkan. (Rod dianalogikan sebagai tahanan). Elektrode bumi selalu harus ditanam sedalam mungkin dalam tanah, sehingga dalam musim kering selalu terletak dalam lapisan tanah yang basah.