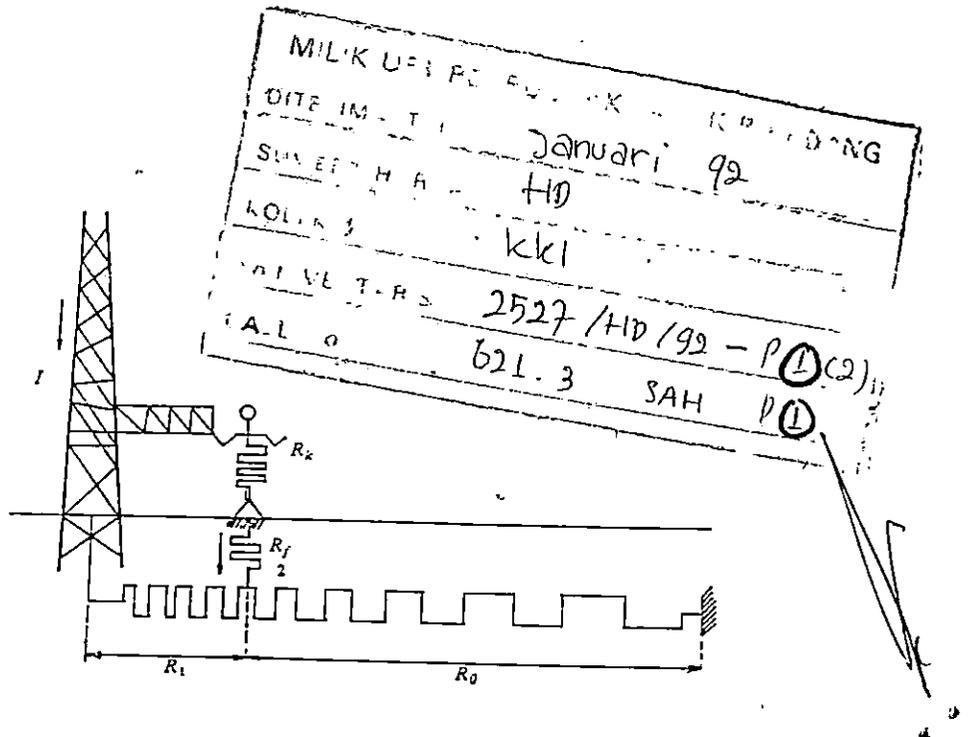


PENGGUNAAN BAJA UNTUK  
PENTANAHAN SISTEM TENAGA



oleh

Drs. Azwir Sahibudin

Drs. Ganefri

MILIK UPT PERPUSTAKAAN  
IKIP. PADANG

Jurusan Pendidikan Teknik Elektro

Fakultas Pendidikan Teknologi dan Kejuruan  
Institut Keguruan dan Ilmu Pendidikan Padang  
1990

## KATA PENGANTAR

Akhir-akhir ini sudah banyak usaha penulisan dan pengadaan buku-buku teknik dalam Bahasa Indonesia. Namun bagi FPTK IKIP Padang, khususnya Jurusan Pend. Teknik Elektro, hal ini masih saja dirasakan keterbatasan-keterbatasan terutama dalam mengungkapkan topik atau materi yang betul-betul sesuai dengan silabus dan materi kuliah yang telah ditetapkan.

Hal inilah yang mendorong penulis untuk menyusun buku ini sebagai bahan bacaan dalam mata kuliah Proteksi Sistem Tenaga dan mata kuliah Instalasi Listrik, yang diajarkan pada mahasiswa tahun III Jurusan Pendidikan Teknik Elektro FPTK IKIP Padang.

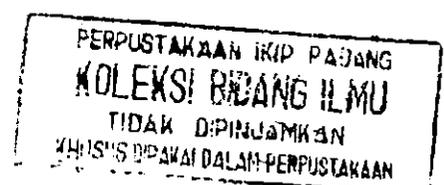
Dalam buku ini dibahas tentang sistem pentanahan, elektroda pentanahan, dan usaha meningkatkan keandalan pentanahan serta langkah-langkah dalam merencanakan pentanahan.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan-kekurangan baik dalam materi maupun sistematika penulisannya. Untuk itu saran-saran dan kritik yang membangun guna perbaikan buku ini akan diterima dengan senang hati.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah ikut membantu dalam penyusunan buku ini.

Harapan penulis semoga buku ini ada manfaatnya bagi segala pihak, terutama mahasiswa jurusan pendidikan Teknik Elektro FPTK IKIP Padang.

PENULIS.



## DAFTAR ISI

BAB	HALAMAN
HALAMAN JUDUL . . . . .	i
KATA PENGANTAR . . . . .	ii
DAFTAR ISI . . . . .	iii
DAFTAR TABEL . . . . .	v
DAFTAR GAMBAR . . . . .	vi
I. PENDAHULUAN . . . . .	1
II. SISTEM PENTANAHAN. . . . .	4
A. Umum . . . . .	4
B. Bahaya Kejutan (Shock) pada Manusia . . . . .	5
1. Tegangan Sentuh. . . . .	8
2. Tegangan Langkah . . . . .	10
3. Tegangan Pindah. . . . .	12
C. Tahanan Pentanahan. . . . .	14
1. Batang Elektroda Ditanam Tegak Lurus Permukaan Tanah. . . . .	15
a. Satu Batang Elektroda . . . . .	15
b. Beberapa Batang Elektroda . . . . .	16
2. Batang Elektroda Ditanam Sejajar Permukaan Tanah . . . . .	21
a. Satu Batang Konduktor Ditanam Horizontal. . . . .	22
b. Beberapa Batang Konduktor Ditanam Bersilangan dan Sejajar Permukaan Tanah . (Elektroda Grid). . . . .	23

D. Panjang Konduktor Pentanahan Grid Yang  
 Dibutuhkan. . . . . 28

III. ELEKTRODA PENTANAHAN . . . . . 32

    A. Bahan Elektroda Pentanahan. . . . . 32

    B. Luas Penampang Elektroda Pentanahan . . . . . 35

    C. Aspek Korosi Pada Logam . . . . . 38

IV. USAHA MENINGKATKAN KEANDALAN PENTANAHAN BAJA . . . . . 40

    A. Umum . . . . . 40

    B. Proteksi Katodik. . . . . 41

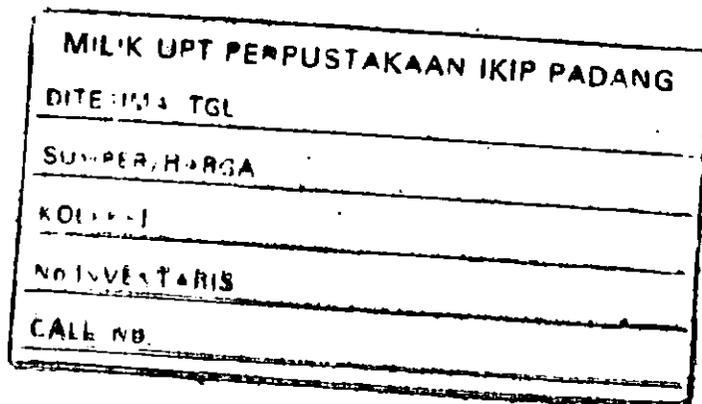
    C. Melapisi Elektroda Baja Dengan Logam Lain . . . . . 48

    D. Memperluas Penampang Elektroda Baja . . . . . 48

V. PERENCANAAN PENGGUNAAN BAJA UNTUK PENTANAHAN . . . . .

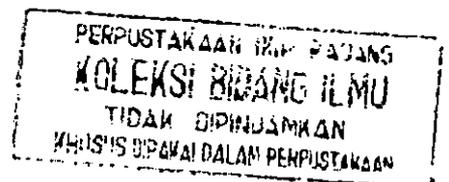
    GRID . . . . . 51

    DAFTAR KEPUSTAKAAN . . . . . 61



## DAFTAR TABEL

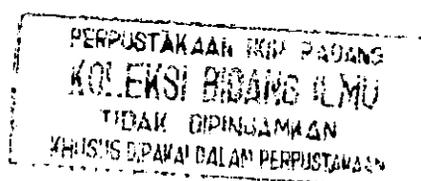
TABEL	HALAMAN
1. Tahanan Tubuh Manusia . . . . .	6
2. Luas Penampang Minimum Elektroda Pentanahan . . . .	36
3. Laju Korosi Logam Baja Dan Tembaga Ditanah . . . .	49
4. Harga Konstanta $T_m$ , $R_m$ , $T_c$ , $d$ , $s$ Logam Cu, Fe (baja) dan Al . . . . .	59



## DAFTAR GAMBAR

GAMBAR	HALAMAN
1. Proses terjadinya tegangan sentuh . . . . .	9
2. Proses terjadinya tegangan langkah . . . . .	11
3. Proses terjadinya tegangan pindah pada kawat netral dirumah yang disuply dari trafo yang berada di gar- induk. . . . .	13
4. Rangkaian pengganti terjadinya tegangan pindah . . .	
5. Satu batang elektroda ditanam tegak lurus permukaan tanah . . . . .	16
6. Dua batang elektroda ditanam tegak lurus permukaan tanah. . . . .	18
7. Beberapa elektroda ditanam tegak lurus permukaan tanah . . . . .	20
8. Koefisien $K_1$ sebagai fungsi dari perbandingan panjang terhadap lebar daerah permukaan. . . . .	21
9. Sebatang Konduktor panjang $2L$ ditanam sejajar permukaan tanah . . . . .	23
10. Elektroda Pentanahan Grid dengan enam buah mesh. . .	24
11. Koefisien $K_1$ sebagai fungsi perbandingan panjang dengan lebar daerah pentanahan . . . . .	26
12. Koefisien $K_2$ . sebagai fungsi perbandingan dengan lebar daerah pentanahan . . . . .	27
13. Gradien tegangan di permukaan tanah pada pentana- han Grid. . . . .	30

TABEL	HALAMAN
14. Skema Proteksi katodik menggunakan arus tandingan .	42
15. Memproteksi logam lain dari korosi arus bocor dengan menghubungkannya dengan logam yang lebih aktif . . . . .	45
16. Memproteksi logam lain dari korosi arus bocor dengan menghubungkannya dengan struktur yang di proteksi . . . . .	46
17. Skema rangkaian proteksi katodik menggunakan anoda korban. . . . .	47
18. Rangkaian pengukuran tahanan jenis tanah dengan metode 4 elektroda . . . . .	53
19. Sistem proteksi trafo daya . . . . .	56
20. Sistem Proteksi rel daya. . . . .	57



## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

Bila dalam suatu gardu induk terjadi gangguan hubung singkat ke tanah, maka tanah disekitar titik gangguan akan mempunyai gradien tegangan yang dalam batas tertentu dapat membahayakan manusia sekitarnya. Untuk menghindari atau mengurangi bahaya tegangan lebih yang mungkin terjadi, peralatan seperti trafo, kaki menara, pemutus daya, dan lainnya harus ditanahkan melalui suatu elektroda pentanahan. Pada sistem tenaga listrik yang arus hubung singkat ke tanahnya kecil, maka sistem dapat ditanahkan dengan elektroda batang ditanam tegak lurus permukaan tanah. Akan tetapi bila arus gangguan ke tanah adalah besar atau tahanan jenis tanahnya besar, maka pentanahan seperti diatas tidak memadai lagi, dan pentanahan dilakukan dengan elektroda grid. Dengan elektroda grid ini, dapat diperoleh tahanan pentanahan yang kecil serta gradien tegangan yang lebih rata di permukaan tanah.

Pada umumnya bahan elektroda pentanahan yang banyak digunakan adalah tembaga karena mempunyai sifat yang baik seperti tahanan jenisnya rendah, sifat mekanisnya baik, cukup tinggi titik leburnya serta relatif tahan terhadap korosi. Akan tetapi harga tembaga ini cukup mahal, dan bila tembaga sukar diperoleh maka harganya akan semakin mahal, karena itu kita perlu untuk memikirkan penggunaan bahan lain seperti menggunakan baja misalnya yang lebih murah.

Elektroda pentanahan baja banyak dipakai untuk pentanahan pusat pembangkit, gardu induk ataupun pusat industri, walaupun masih terbatas pada tanah yang tidak terlalu korosif.

Korosif logam di tanah adalah reaksi elektrokimia dimana ion-ion logam larut ke tanah. reaksi ini berlangsung dalam suatu sel yang disebut elektrokimia. Pada anoda terjadi reaksi oksidasi, yaitu teroksidasinya logam anoda membentuk ionnya. Sedangkan pada katoda terjadi reaksi reduksi, umumnya berupa reduksi ion hidrogen  $H^+$  menjadi  $H_2$  atau reduksi oksigen  $O_2$  membentuk ion  $OH^-$  atau membentuk air  $H_2O$ .

Bila digunakan elektroda pentanahan baja maka elektroda tersebut harus diproteksi dari korosi untuk mencegah berkurangnya penampang elektroda. Ada beberapa cara yang dapat dilakukan untuk meningkatkan keandalan pentanahan baja, yaitu dengan memroteksinya secara katodik dimana dibuat agar logam selalu berada dalam daerah bebas, melapisi konduktor baja dengan logam lain seperti dengan logam seng ataupun dengan memperbesar penampang konduktor elektroda pentanahan setelah terlebih dulu memperkirakan besarnya korosi yang mungkin terjadi.

Dalam buku ini akan dicoba sedikit untuk membahas penggunaan baja untuk pentanahan sistim tenaga. Pada bab II dibahas tujuan pentanahan sistim kelistrikan serta menghitung tahanan pentanahan beberapa bentuk elektroda; pada bab III diuraikan faktor yang harus diperhatikan dalam

menggunakan baja untuk pentanahan, terutama faktor korosi. Sedangkan pada bab IV diterangkan usaha yang dilakukan untuk meningkatkan keandalan elektroda pentanahan baja, dan bab V memuat langkah-langkah perencanaan pentanahan dengan menggunakan baja.

## BAB II

### SISTIM PENTANAHAN

#### A. U m u m

Yang dimaksud dengan pentanahan dalam sistim kelistrikan adalah suatu tindakan pengamanan dalam instalasi yang rangkaiannya ditanahkan dengan cara mentanahkan badan peralatan /instalasi yang diamankan demikian rupa sehinga bila terjadi kegagalan isolasi, tercegahlah bertahannya tegangan sentuh yang ter lalu tinggi karena terputusnya arus oleh alat pengaman arus lebih.(Panitia revisi PUIL. Peraturan Umum Instalasi Listrik Indonsia. LIPI. Jakarta 1977). Pentanahan dilakukan dengan menghubungkan suatu struktur dengan tanah seperti bagian yang tidak bertegangan dalam keadaan normal dari generator, motor, rumah trafo, rumah pemutus daya serta rangka peralatan listrik lainnya, untuk mempermudah arus ke tanah bilamana peralatan tersebut mengalami gangguan hubungan singkat ke tanah. Arus listrik yang mengalir di tanah akan menyebabkan timbulnya gradien tegangan di tanah, dan dalam batas tertentu dapat membahayakan orang disekitarnya.

Secara umum, tujuan dari pentanahan sistim tenaga listrik dan peralatan adalah :

1. Untuk memperkecil bahaya kejutan ( shock ) pada manusia yang dapat disebabkan oleh tegangan sentuh, tegangan langkah ataupun tegangan pindah karena adanya

gradien tegangan di tanah pada saat gangguan hubung singkat ke tanah.

2. Untuk memperbaiki Lightning Performance saluran transmisi, yaitu jumlah gangguan pada saluran transmisi per satuan panjang per satuan waktu yang disebabkan oleh sambaran kilat, biasanya dinyatakan per 100 km per tahun. Salah satu faktor yang mempengaruhi lightning performance adalah tahanan kaki menara transmisi. Bila tahanan kaki menara besar, kemungkinan terjadinya flasover pada isolator akan lebih besar jika dibandingkan tahanan kaki menara yang kecil. Oleh karena itu, untuk mengurangi gangguan dilakukan dengan mentanahkan menara dengan menggunakan elektroda pentanahan untuk menurunkan tahanan kaki menara.
3. Untuk mengambil besaran urutan nol baik arus maupun tegangan guna keperluan proteksi peralatan ataupun manusia.

#### B. Bahaya Kejutan ( Shock ) Pada Manusia

Dari penyelidikan yang pernah dilakukan, diketahui bahwa arus listrik yang mengalir ditubuh manusia dalam batas batas tertentu dapat membahayakan. Besar arus yang melalui tubuh tergantung dari besar dan macam tegangan, serta besar tahanan tubuh itu sendiri. Besar tahanan tubuh tidak pasti dan berkisar antara 500 ohm hingga 100.000 ohm, tergantung jenis tegangan, keadaan kulit

pada tempat kontak serta jalannya arus di tubuh. Besar tahanan tubuh menurut beberapa ahli dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Tahanan Tubuh Manusia  
(Elan S. 1985)

: Diselidiki	: Tahanan	: Keterangan
: oleh	: (Ohm)	:
: Danziel	: 400 - 600	: Pengukuran dilakukan:
:	:	: pada sistem arus se-
:	:	: arah dimana arus di-
:	:	: batasi 10 Amper.
:	:	:
:	: 2330	: Tahanan tangan-ta-
:	:	: ngan pada arus 9 A
:	:	: dan fr. 60 Hz
:	:	:
: Laurent	: 3000	: Dilakukan pada sis-
:	:	: tem 50 Hz.
:	:	:

Pengaruh dari besarnya arus yang melalui tubuh bermacam-macam, dan menurut beberapa penelitian (Indra Prayatna. Studi Pentanahan Gardu Induk. ITB. Bandung. 1985) dapat disimpulkan :

1. Arus Persepsi ( Perception Current ), yaitu besar arus dimana tubuh mulai merasakan adanya arus mengalir seperti panasnya telapak

tangan yang memegang konduktor, dan menurut penelitian yang dilakukan di Electrical Testing Laboratories di New York terhadap 167 orang menunjukkan besar arus persepsi rata-rata untuk laki-laki adalah 1,1 mA dan wanita 0,7 mA.

- 2. Let Go Current , yaitu besar arus dimana orang merasakan ototnya nyeri dan kaku. Arus maksimum dimana orang masih mampu memegang konduktor yang berarus dengan menggunakan ototnya disebut let go current. Penyelidikan yang dilakukan di University of Medical School terhadap 134 orang laki-laki adalah 16 mA dan wanita 10,5 mA.
- 3. Fibrilating Current , yaitu besar arus yang dapat menyebabkan jantung berhenti bekerja. membuat suatu hubungan antara besar arus yang dapat ditahan tubuh dengan lamanya arus mengalir, yaitu :

$$I^{2-k} \cdot t = 0,0135$$

$$I_k = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \dots \dots \dots (2.1)$$

(Dalziel C.F. Elektrik Shok Hazard, IEEE Spectrum. 1972)

dimana :

$I_k$  : besar arus yang mengalir di tubuh yang masih dapat ditahan tubuh, amper.

$t$  : lama arus mengalir di tubuh dalam detik, maksimum 3 detik.



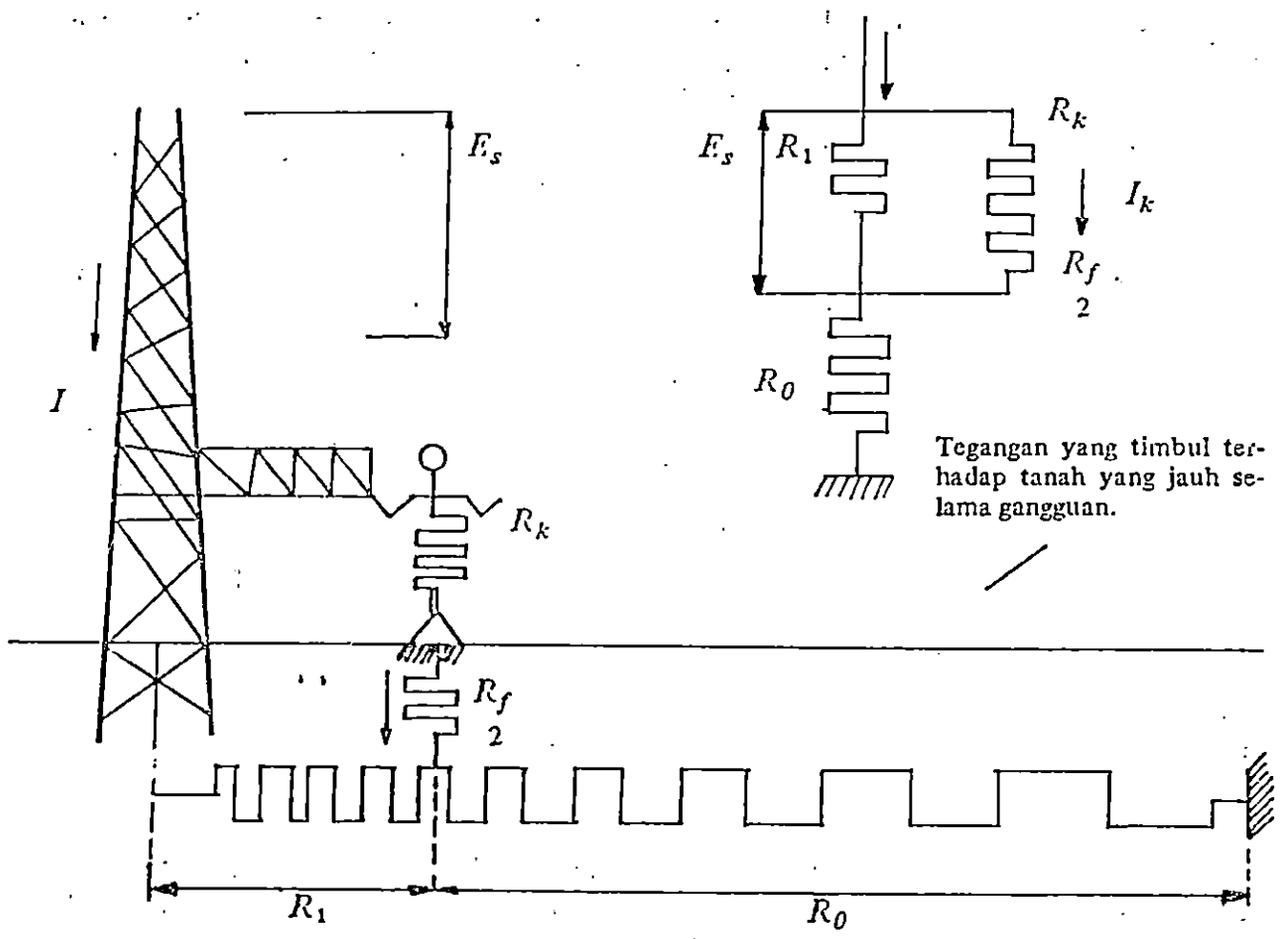
0,0135 merupakan konstanta empiris.

Menurut Dalziel, 99,5 % manusia tahan terhadap besar arus yang dihitung dengan persamaan 2.1 tanpa menyebabkan berhentinya jantung bekerja, dan hanya berlaku untuk lama arus mengalir maksimum 3 detik.

Adapun tegangan yang dapat menyebabkan kejutan akibat adanya gradien tegangan di tanah adalah :tegangan sentuh ( touch potensial ), tegangan langkah ( step potensial ), tegangan pindah ( transferred potensial ).

#### 1. Tegangan Sentuh

Tegangan sentuh adalah tegangan antara bagian logam yang sedang dilalui arus ke tanah dengan suatu titik di tanah, sejauh jangkauan orang normal yang berdiri dekat logam tersebut, biasanya diambil 1 meter. Pada gambar 1 , diperlihatkan proses terjadinya tegangan sentuh. Sebagai contoh diperlihatkan orang yang memegang menara yang sedang dialiri arus gangguan ke tanah, bilamana tahanan kaki menara besar, maka orang tersebut akan merasakan tegangan sentuh  $E_{\text{sentuh}}$  sehingga tubuh dialiri arus  $I_k$ .



Tegangan yang timbul terhadap tanah yang jauh selama gangguan.

Gambar 1 . Proses terjadinya tegangan sentuh (TS. Hutaauruk. Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan. Erlangga. Jakarta. 1987)

Dari rangkaian penggantinya besar tegangan sentuh dapat dihitung :

$$E_{\text{sentuh}} = (R_k + R_f/2 ) I_k \dots \dots \dots (2.2)$$

dimana :

- $E_{\text{sentuh}}$  : besar tegangan sentuh, volt.
- $R_k$  : tahanan tubuh manusia, ohm.
- $R_f$  : tahanan kontak telapak kaki ke tanah tanpa alas kaki, ohm.

$I_k$  : besar arus yang mengalir di tubuh, ampere.

Dalam buku pedoman gardu induk dari IEEE (Gatot Subandiomo. Menentukan Pentanahan Gardu Induk. ITB. 1974), besar tahanan tubuh  $R_k$  diasumsikan 1000 ohm, sedangkan besar tahanan telapak kaki  $R_f$  diasumsikan  $3 P_m$ , dimana telapak kaki dianggap sebagai plat berjari-jari 8 cm yang ditanam sejajar ke permukaan tanah. Jadi, besar tegangan sentuh yang diizinkan adalah :

$$E_{\text{sentuh}} = ( 1000 + 1,5 P_m ) \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

$$= \frac{( 116 + 0,17 P_m )}{\sqrt{t}} \dots \dots \dots (2.3)$$

dimana :

$E_{\text{sentuh}}$  : besar tegangan sentuh, volt.

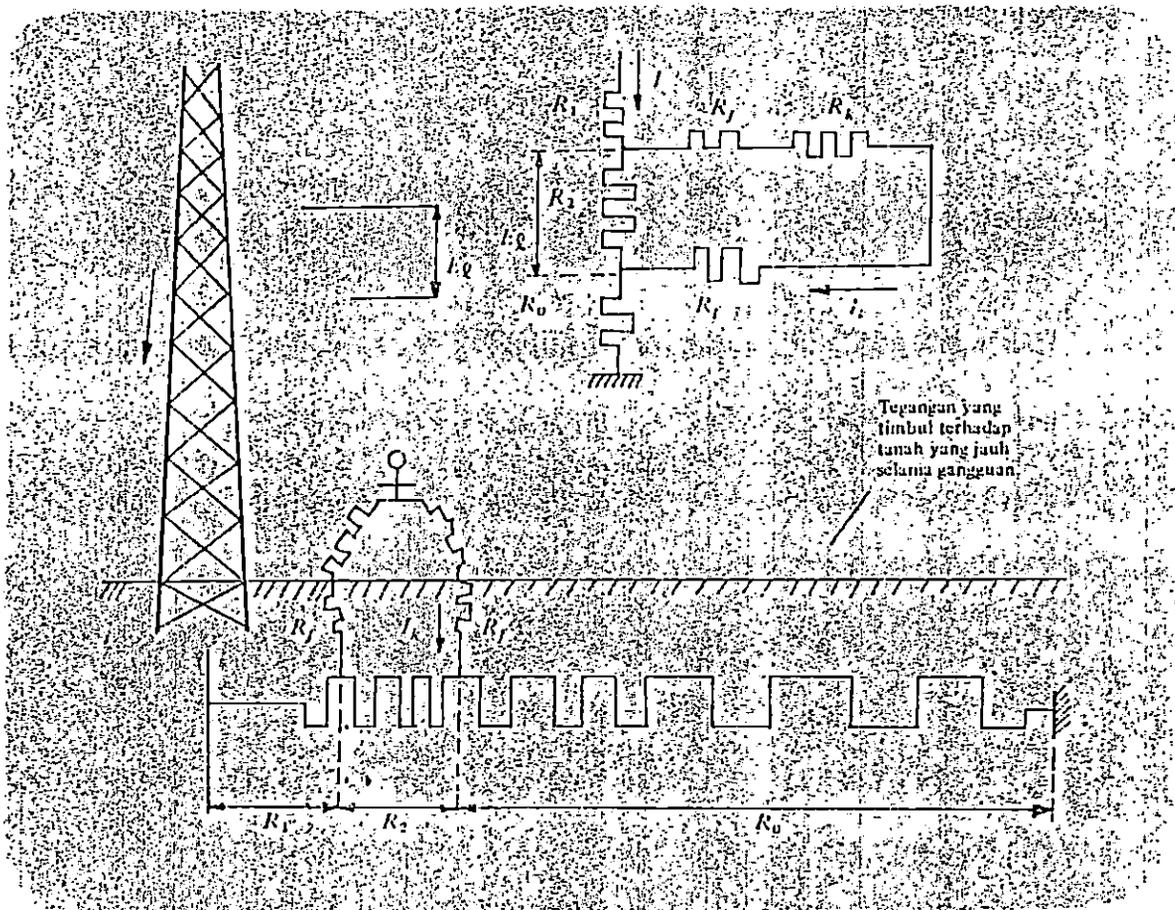
$P_m$  : tahanan jenis tanah di permukaan, ohm-meter.

$t$  : lama arus mengalir di tubuh, detik.

## 2. Tegangan Langkah

Tegangan langkah adalah tegangan yang timbul antara dua titik di permukaan tanah di sekitar elektroda pentanahan, dimana jarak kedua titik tersebut adalah sebesar langkah orang normal dan pada saat itu tanah dialiri arus  $m$  gangguan ke tanah.

Panjang langkah diasumsikan 1 meter. Dalam gambar 2 diperlihatkan proses terjadinya tegangan langkah pada orang yang berjalan di sekitar menara yang dialiri arus ke tanah.



Gambar 2. Proses terjadinya tegangan langkah (TS. Hutauruk. Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan. Erlangga. Jakarta. 1987)

Dari rangkaian pengganti pada gambar 2, besar tegangan langkah adalah :

$$E_{\text{langkah}} = ( R_k + 2 R_r ) I_k$$

sehingga besar tegangan langkah yang diizinkan dapat dihitung, yaitu :

$$E_{\text{langkah}} = ( 1000 + 2 \times 3 P_m ) \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

$$= \frac{116 + 0,7 p_s}{\sqrt{t}} \dots \dots \dots (2.4)$$

dimana :

$E_{\text{langkah}}$  : besar tegangan langkah, volt.

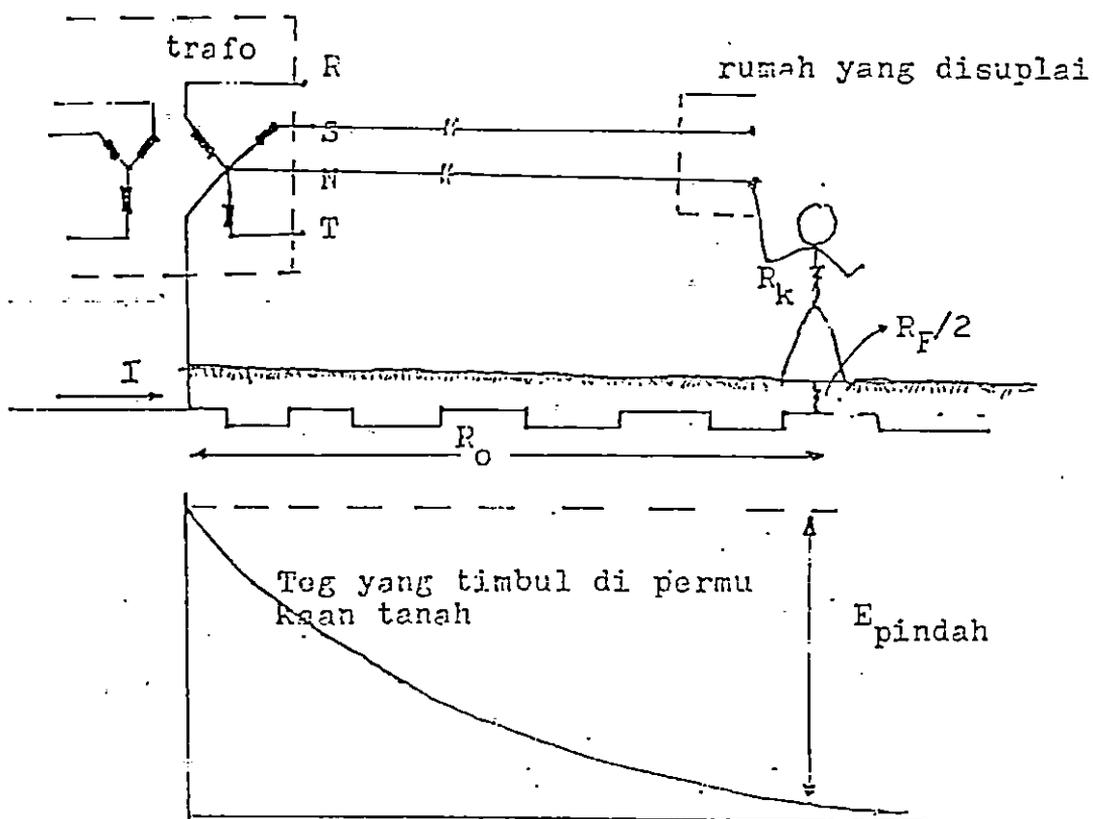
$P_m$  : tahanan jenis tanah di permukaan, ohm-m.

$t$  : lama arus mengalir ditubuh, detik

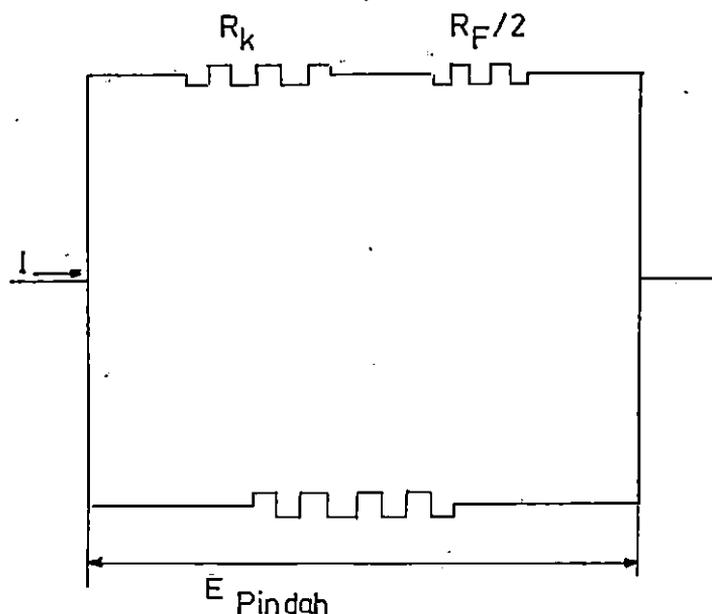
### 3. Tegangan Pindah

Proses terjadinya tegangan pindah adalah sama dengan proses terjadinya tegangan sentuh, hanya saja disini benda yang disentuh ditanahkan di tempat yang jauh. Sebagai contoh untuk melihat proses terjadinya tegangan pindah dapat dilihat pada gambar 3. Suatu transformator pengubah tegangan tinggi ke tegangan rendah di gardu induk, digunakan untuk mensuplai

rumah-rumah yang berada di sekitarnya. Titik netral trafo di sisi tegangan rendah ditantahkan, rumah disuplai menggunakan kawat fasa dan kawat netral. Bila digardu intuk terjadi gangguan hubung singkat ke tanah, maka akan timbul tegangan yang besar antara kawat netral dengan tanah di rumah yang disuplai, yang besarnya tergantung dari besarnya tahanan pentanahan.



Gambar 3. Proses terjadinya tegangan pindah pada kawat netral di rumah yang disuplai dari trafo yang berada di G.I. (TS. Hutauruk. Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan. Erlangga. Jakarta. 1987)



Gambar 4. Rangkaian pengganti terjadinya tegangan pindah

### C. Tahanan Pentanahan

Bila dalam sistim tenaga terjadi kesalahan sehingga timbul arus ke tanah, maka tanah di sekitar titik gangguan akan mempunyai gradien tegangan yang dapat membahayakan, misalnya disebabkan oleh tegangan sentuh. Dari persamaan dasar  $V = I \cdot R$ , terlihat bila tahanan pentanahan  $R$  semakin besar, maka tegangan yang timbul akan semakin besar pula. Besar tahanan pentanahan tergantung dari dimensi, bentuk geometris, bahan elektroda dan tahanan jenis tanah dimana elektroda ditanam. Berdasarkan Peraturan umum Instalasi Listrik Indonesia 1977, dinyatakan bahwa pentanahan dari suatu instalasi harus dapat diukur. Besar tahanan pentanahan yang diinginkan dalam mentanahkan suatu struktur bermacam-

macam, misalnya untuk pentanahan gardu induk tahanan pentanahan biasanya  $< 0,5$  ohm, sedang untuk mentanahkan menara transmisi  $< 10$  ohm. (Elan S, Studi untuk Standarisasi Pengukuran Tahanan. ITB. 1978)

### 1. Batang Elektroda Ditanam Tegak Lurus Permukaan Tanah

Sistem pentanahan ini adalah sistim pentanahan yang paling sederhana, dimana batang konduktor ditanam dalam tanah secara tegak lurus permukaan tanah. H.B Dwight <sup>5</sup> telah menghitung besar tahanan pentanahan elektroda yang ditanam tegak lurus, yaitu :

#### a. Satu Batang Elektroda

Besar tahanan pentanahan suatu batang elektroda yang ditanam tegak lurus adalah :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 + 0,5 \frac{a}{L} - 0,06 \left( \frac{a}{L} \right)^2 + \dots \right) \quad (2.5)$$

(Indra Prayatna.1985)

dimana :

R : tahanan elektroda pentanahan, ohm

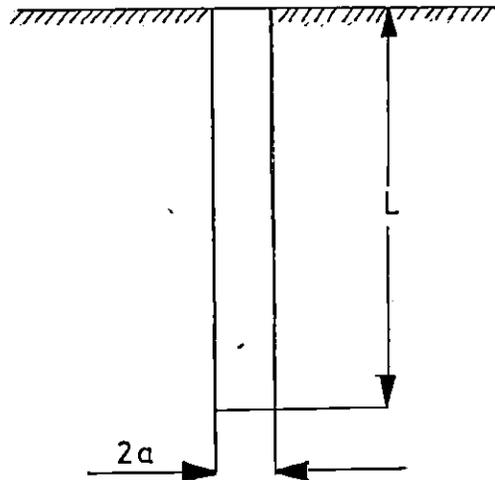
$\rho$  : tahanan jenis tanah, ohm, meter.

L : panjang batang elektroda, meter

a : jari-jari penampang batang elektroda, meter.

Bila  $a \ll L$ , tahanan pentanahan  $R$  menjadi lebih sederhana, yaitu :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \dots \dots \dots (2.6)$$



Gambar 5. Satu batang elektroda ditanam tegak lurus permukaan tanah.

#### b. Beberapa Batang Elektroda

Untuk memperoleh tahanan pentanahan yang lebih rendah, digunakan beberapa batang elektroda yang ditanam paralel. Penggunaan beberapa batang ini berarti memperluas kontak elektroda dengan tanah.

Untuk dua batang elektroda yang ditanam tegak permukaan tanah, besartahanan pentanahannya (Elan

S, Studi untuk Standarisasi Pengukuran Tahanan.

ITB. 1978) adalah:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 + \ln \frac{2L + \sqrt{S^2 + 4L^2}}{s} + \frac{S}{L} \right) \dots \dots \dots (2.7)$$

dimana :

R : tahanan elektroda pentanahan, ohm

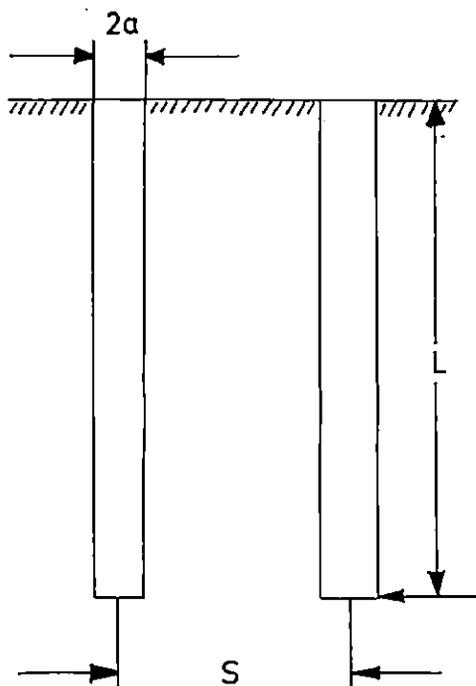
ρ : tahanan jenis tanah, ohm, meter.

L : panjang batang elektroda, meter

a : jari-jari penampang batang elektroda, meter.

s : jarak antara kedua elektroda, meter

MILIK UPT PERPUSTAKAAN  
IKIP PADANG



Gambar 6. Dua batang elektroda ditanam tegak lurus permukaan tanah.

bila  $s \gg L$ , maka tahanan pentanahan  $R$  menjadi :

$$R = \frac{p}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{p}{4\pi s} \left( 1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^2}{5s^4} \right) \dots \dots \dots (2.8)$$

sedangkan bila  $s \gg L$  maka ;

$$R = \frac{p}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} \right)$$

$$\left( \frac{s^2}{16L^2} \right) + \frac{s^4}{512 L^4} \dots\dots\dots) \quad (2.9)$$

Seperti telah dikatakan bahwa dengan memperbanyak batang elektroda yang ditanam, maka tahanan pentanahan akan semakin kecil. Tahanan pentanahan akan semakin kecil jika ditanam batang elektroda yang jumlahnya tidak terhingga dan tentu saja cara ini tidak ekonomis serta tidak mungkin dilakukan. S.J Schwarz telah menurunkan rumus untuk menentukan besar tahanan elektroda pentanahan sejumlah batang yang ditanam tegak lurus permukaan tanah, yaitu :

$$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{2 \cdot K_1 \cdot L}{VA} (\sqrt{n} - 1)^2 \dots (2.10)$$

dimana :

R : tahanan elektroda pentanahan, ohm

L : panjang batang elektroda, meter.

a : jari-jari batang elektroda, meter

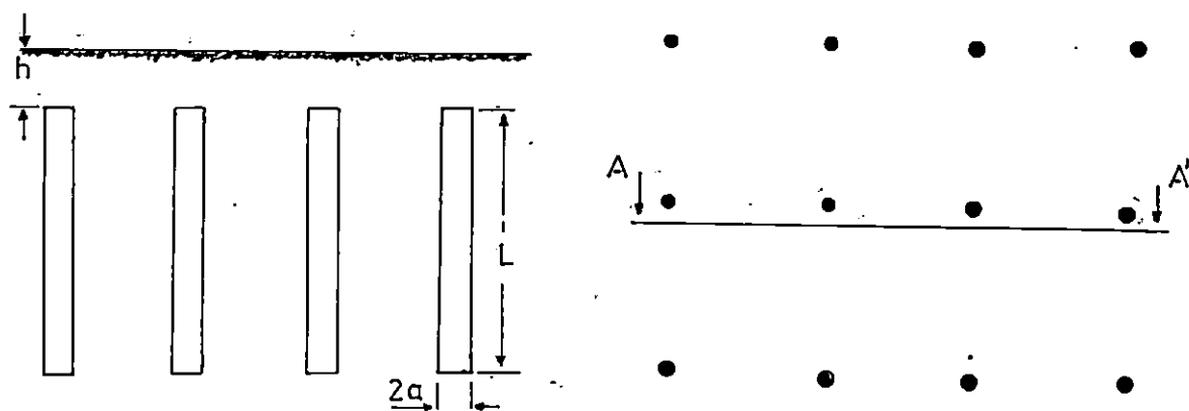
n : jumlah batang elektroda yang ditanam.

A : luas daerah pentanahan, m<sup>2</sup>

K<sub>1</sub> : konstanta yang besarnya tergantung dari harga h dan X.

h : kedalaman penanaman ( jarak antara ujung batang elektroda dengan permukaan tanah ), meter.

X : perbandingan panjang terhadap lebar daerah  
pentanahan.

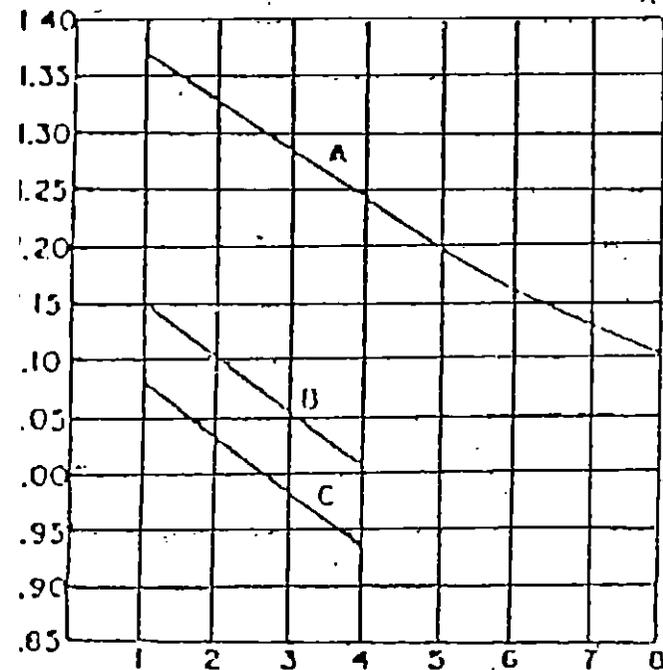


Susunan batang elektroda  
dilihat dari potongan AA

Susunan batang elektroda  
dilihat dari atas.

Gambar 7. Beberapa batang elektroda ditanam  
tegak lurus permukaan tanah.

Harga  $K_1$  diperoleh dari gambar 8.



Kurva A : untuk kedalaman penanaman  $h = 0$

Kurva B : untuk kedalaman penanaman

$$h = \frac{1}{10} \sqrt{A}$$

Kurva C : untuk kedalaman penanaman

$$h = \frac{1}{6} \sqrt{A}$$

perbandingan panjang terhadap lebar daerah pentanahan

Gambar 8. Koefisien  $K_1$  sebagai fungsi dari perbandingan panjang terhadap lebar daerah pentanahan (Ismail T, Pentanahan Gardu Induk, ITB. 1978) (Indra Prayatna . 1985)

## 2. Batang Elektroda Ditanam Sejajar Permukaan Tanah

Pada tanah yang bertahanan jenis tinggi, sulit untuk memperoleh tahanan pentanahan yang rendah bila menggunakan elektroda yang ditanam tegak lurus ke tanah dibandingkan dengan elektroda yang ditanam sejajar permukaan tanah. Pentanahan yang ideal adalah

pentanahan dengan menanam plat sejajar permukaan tanah, dimana dengan cara ini diperoleh gradien tegangan rata permukaan tanah. Akan tetapi cara seperti ini tidak pernah dilakukan orang karena tidak ekonomis dan sulit dalam pelaksanaannya. Untuk mendekati keadaan ini, orang melakukannya dengan cara menanam beberapa batang konduktor sejajar permukaan tanah dan satu sama lain dihubungkan sehingga membentuk jaringan. Pentanahan seperti ini disebut pentanahan grid.

a. Satu batang konduktor ditanam horizontal

Bila sebatang konduktor panjang  $2L$  ditanam sejajar dengan permukaan tanah pada kedalaman  $1/2h$ , besar tahanan pentanahannya telah dihitung oleh H.B Dwight, yaitu :

$$R = \frac{\rho}{4 \pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 + \ln \frac{2L + \sqrt{h^2 + 4L^2}}{h} + \frac{h}{2L} - \frac{\sqrt{h^2 + 4L^2}}{2L} + \dots \right) \dots \dots \dots (2.11)$$

dimana :

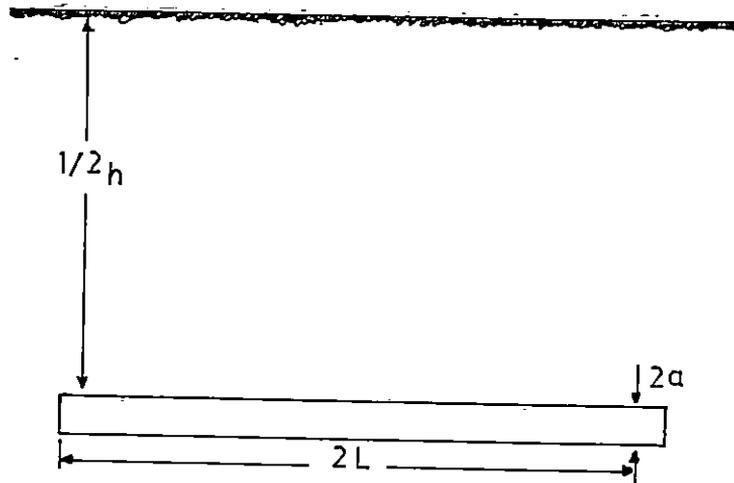
$R$  : tahanan elektroda pentanahan, ohm

$\rho$  : tahanan jenis tanah, ohm-meter.

$2L$  : panjang konduktor ditanam, meter

$1/2h$  : dalam konduktor ditanam, meter.

a : jari-jari batang elektroda, meter



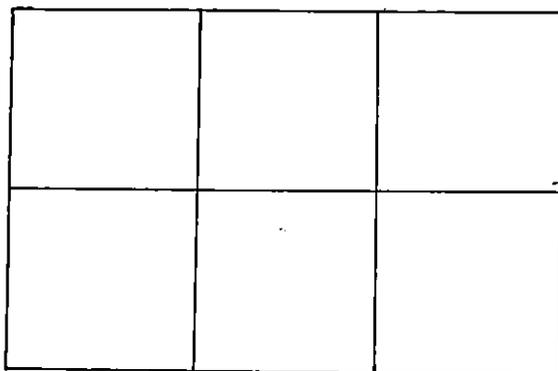
Gambar 9. Sebatang konduktor panjang  $2L$  ditanam sejajar permukaan tanah

b. Beberapa Batang Konduktor Ditanam Bersilangan Dan Sejajar Permukaan Tanah ( Elektroda Grid )

Pentanahan grid adalah pentanahan dimana beberapa batang elektroda secara bersilangan ditanam sejajar permukaan tanah. Umumnya ditanam dengan kedalaman beberapa feet. Bentuk fisis elektroda ini bermacam-macam, seperti bujursangkr, empat persegi panjang atau bentuk lainnya. Pada

gambar 10 diperlihatkan elektroda grid mempunyai 6 mesh.

Dengan memperluas elektroda grid serta memperbanyak jumlah mesh, akan diperoleh tahanan pentanahan yang semakin kecil serta gradien tegangan yang semakin rata dipermukaan tanah.



Gambar 10. Elektroda pentanahan grid dengan enam buah mesh.

Besar tahanan pentanahan elektroda grid ini telah dihitung Elan S. , yaitu :

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left( \ln \frac{2L}{a_1} + K_1 \frac{L}{\sqrt{A}} - K_2 \right) \dots \dots (2.12)$$

(Elan S. Studi Untuk Standarisasi Pengukuran Tahanan. ITB. 1985).

dimana :

R : tahanan elektroda pentanahan, ohm.

$\rho$  : tahanan jenis tanah, ohm meter.

L : panjang konduktor total elektroda, meter

A : luas daerah pentanahan,  $m^2$ .

$a_1$  :  $\sqrt{2}ah$ .

a : jari-jari konduktor elektroda, meter.

h : dalamnya konduktor ditanam, meter.

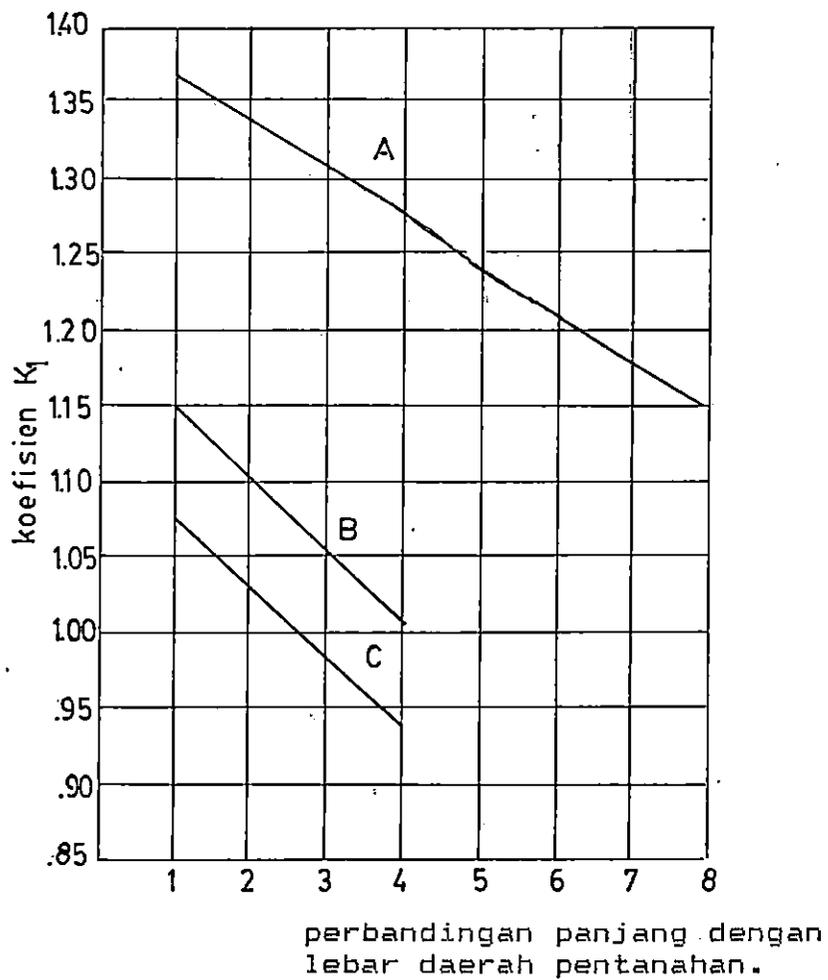
$K_1$  dan  $K_2$  adalah koefisien yang diperoleh dari gambar 11 dan 12 yang merupakan fungsi dari perbandingan panjang dengan lebar daerah pentanahan.

Keterangan gambar 11 dan 12.

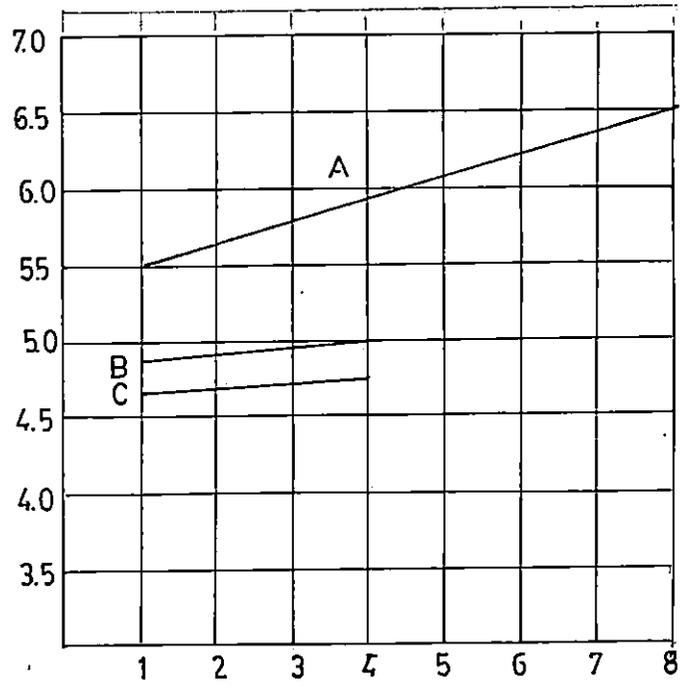
Kurva A : untuk kedalaman penanaman  $h = 0$ .

Kurva B : untuk kedalaman penanaman  $h = 1/10 \sqrt{A}$

Kurva C : untuk kedalaman penanaman  $h = 1/6 \sqrt{A}$ .



Gambar 11. Koefisien  $K_1$  sebagai fungsi perbandingan panjang dengan lebar daerah pentanahan. (Indra Prayatna 1985)



perbandingan panjang dengan lebar daerah pentanahan.

Gambar 12. Koefisien K<sub>2</sub> sebagai fungsi perbandingan panjang dengan lebar daerah pentanahan. (Indra Prayatna 1985)

Kemudian Laurent juga menghitung tahanan pentanahan grid yang persamaannya lebih sederhana, yaitu :

$$R = \frac{P}{4 \cdot r} + \frac{P}{L} \dots \dots \dots (2.13)$$

(Indra Prayatna. Studi Pentanahan gardu Induk .ITB. 1985)

dimana :

- R : tahanan elektroda pentanahan, ohm
- r : tahanan jenis tanah, ohm-meter.

- $L$  : panjang konduktor total elektroda, meter.  
 $r$  : jari-jari bidang lingkaran yang luasnya sama dengan luas bidang yang dicakup oleh elektroda grid, meter.

Adapun keuntungan sistim pentanahan grid ini adalah :

- 1). Memungkinkan untuk memperoleh tahanan pentanahan yang rendah dengan cara memperluas daerah pentanahan, sedangkan kedalaman penanaman tidak perlu besar sehingga memudahkan pelaksanaan penanaman.
- 2). Dihasilkan gradien tegangan yang lebih rata di permukaan tanah.

#### D. Panjang Konduktor Pentanahan Grid Yang Dibutuhkan

Agar sistim pentanahan grid yang direncanakan aman, maka kita perlu untuk menentukan panjang konduktor elektroda yang diperlukan agar bila terjadi gangguan hubung singkat ke tanah, maka arus yang melewati tubuh yang diakibatkan tegangan sentuh ataupun tegangan langkah masih dalam batas yang aman. Adapun sebagai dasar perhitungan dalam menentukan panjang konduktor pentanahan adalah besarnya tegangan sentuh, bukan tegangan langkah. Alasannya adalah :



1. Umumnya tegangan sentuh lebih besar dari tegangan langkah, dan lagi pula tubuh lebih tahan terhadap arus yang mengalir melewati kaki-kaki dibanding-kan lewat tangan kaki.
2. Tegangan pindah lebih sulit dibatasi dan biasanya konduktor yang dapat mempunyai tegangan pindah diisolasi.

Dalam pentanahan grid tegangan sentuh yang diambil sebagai dasar perhitungan adalah tegangan mesh, yaitu tegangan titik pusat mesh dengan peralatan yang ditanahkan. Hal ini disebabkan oleh karena tegangan mesh lebih besar dari tegangan sentuh yang berjarak 1 meter dari konduktor pentanahan, dengan demikian tegangan mesh ini lebih berbahaya.

Dalam buku pedoman pentanahan gardu induk IEEE besarnya tegangan mesh ini adalah :

$$E_{\text{mesh}} = K_m \cdot K_1 \cdot P \cdot I / L \dots \dots \dots (2.14)$$

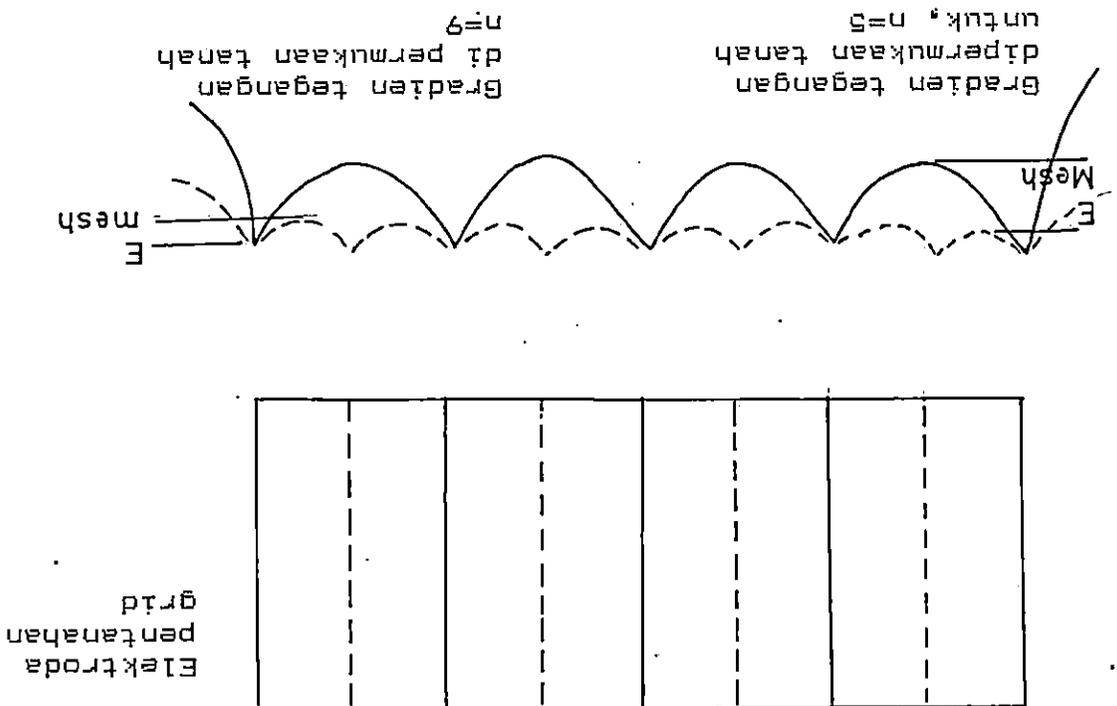
dimana :

$E_{\text{mesh}}$  : besar tegangan mesh, volt.

$$\frac{1}{1} \ln \frac{2\pi}{16 h \cdot d} + \frac{1}{1} \ln \left( \frac{4.6 \cdot 8 \cdot 10 \cdot 12 \dots (n-1)}{3.5 \cdot 7 \cdot 9 \cdot 11 \dots (n-1) - 1/2} \right)$$

$K_m$  : adalah koefisien yang besarnya tergantung dari jarak antar konduktor elektroda D (meter); diameter konduktor d (meter); kedalaman penanaman h (meter) dan jumlah konduktor elektroda yang dipasang sejajar lebar daerah pentanahan n.

Gambar 13. Gradien tegangan di permukaan tanah pada pentanahan grid.



$K_1$  : adalah faktor koreksi ketidak homogenan arus per satuan panjang mengalir ke tanah di elektroda grid. Arus ke tanah per satuan panjang paling kecil di pusat Mesh, lebih besar ke pinggir dan terbesar di sudut. Besar  $K_1$  ini didapat secara empiris dan besarnya menurut IEEE adalah :

$$0,65 + 0,172 n.$$

Dari persamaan 2.3 dan 2.14 dapat ditentukan panjang minimal konduktor total pentanahan grid yang aman, yaitu :

$$K_m \cdot K_1 \cdot P \cdot I/L = \frac{116 + 0,17 P_g}{\sqrt{t}}$$

$$L = \frac{K_m \cdot K_1 \cdot P \cdot I \cdot \sqrt{t}}{116 + 0,17 P_g} \dots \dots \dots (2.15)$$

dimana :

$L$  : panjang minimal konduktor total elektroda grid, ( meter).

$K_m$  : koefisien mesh.

$K_1$  : koefisien ketidak homogenan arus mengalir ke tanah di elektroda grid.

$P$  : tahanan jenis tanah rata-rata, ohm-meter.

$I$  : besar arus hubung singkat ketanah, amper.

$P_g$  : tahanan jenis tanah di permukaan, ohm-meter.

$t$  : lamanya arus mengalir di tanah, detik.

## **BAB III**

### **ELEKTRODA PENTANAHAN**

#### **A. BAHAN ELEKTRODA PENTANAHAN**

Pemilihan bahan yang akan digunakan untuk maksud teknis haruslah didasarkan atas pertimbangan teknis dan ekonomis agar diperoleh suatu sistim yang andal, memenuhi persyaratan teknis dengan biaya seminimal mungkin. Dalam pentanahan sistim tenaga, faktor yang harus dimiliki penghantar adalah tahanan jenisnya rendah, sifatnya mekanisnya baik, cukup tinggi titik leburnya dan relatif tahan terhadap korosi. Sampai saat ini tembaga merupakan bahan yang paling banyak dipakai karena sifat teknisnya yang baik walaupun harganya cukup mahal. Bila tembaga menjadi langka sehingga terlalu mahal, maka haruslah dipikirkan penggunaan bahan lain yang lebih murah seperti baja. Baja juga memiliki sifat teknis yang baik, hanya agak mudah terkorosi dibandingkan dengan tembaga. Sifat mekanik, lebur dan tahanan jenis tidaklah menjadi masalah utama bila digunakan sebagai elektroda pentanahan, adapun yang menjadi masalah utama adalah korosi.

Korosi adalah rusaknya logam karena bereaksi dengan lingkungannya. Proses korosi ini berlangsung secara elektrokimia dalam suatu sel yang disebut sel korosi. Ada empat mekanisme yang terjadi dalam sel korosi, yaitu :  
Larutnya logam anoda, pindahnya elektroda dari anoda ke

katoda, dan mengalirnya arus ion dalam elektrolit, serta mengalirnya arus elektron di logam.

Kecenderungan logam terkorosi ditentukan oleh besar perubahan energi bebas sel korosinya, makin negatif perubahannya makin cenderung logam terkorosi. Ada hubungan antara besar perubahan energi bebas dengan potensial sel korosi, sehingga untuk melihat kecenderungan terjadinya korosi cukup dengan melihat potensial sel korosi. Potensial selkorosi ini merupakan selisih potensial logam katoda dengan logam anoda, dan besar potensial logam ini (biasanya cukup disebut dengan elektroda) dapat dihitung dengan persamaan Nernst, yaitu :

$$E = E^{\circ} + \frac{R.T}{n.F} \ln \frac{(a_{ok})}{(a_{red})}$$

(Indra Prayatna. 1985)

dimana :

- E : potensial elektroda, volt.
- $E^{\circ}$  : potensial elektroda standart, volt.
- R : konstanta gas, 8,3144 Joule/mol.derajat.
- T : temperatur absolut, derajat Kelvin.
- n : jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi.
- F : konstanta Faraday, 96500 Coulomb/mol.
- $a_{ok}$  : konsentrasi atau aktivitas unsur hasil oksidasi mol/litar.

area : konsentrasi atau aktivitas unsur hasil reduksi  
mol/liter.

Pada dasarnya semua logam dapat digunakan untuk elektroda pentanahan karena tahanan jenisnya sangat kecil dibandingkan dengan tahanan jenis tanah. Tembaga mempunyai konduktifitas yang tinggi serta relatif tahan terhadap korosi, sehingga banyak dipakai sebagai elektroda pentanahan. Akan tetapi dengan adanya jaringan tembaga ditanah, akan menyebabkan timbulnya sel korosi galvanis antara tembaga dengan struktur baja yang ditanam yang dihubungkan dengan elektroda pentanahan, seperti pipa atau saluran, rangka peralatan mesin maupun listrik. Untuk menghindari terkorosinya struktur akibat aksi galvanis, dapat dilakukan bila hanya sejenis logam saja yang ditanam di tanah, oleh karena itu sangat tepat bila baja digunakan untuk elektroda pentanahan.

Elektroda baja telah banyak dipakai untuk pentanahan sistim tenaga seperti pada pusat-pusat pembangkit, gardu induk ataupun di pusat industri; hanya saja terbatas pada daerah yang tidak terlalu korosif.

Adapun keuntungan pemakaian elektroda baja adalah :

1. Menghilangkan aksi galvanis yang disebabkan adanya perbedaan logam yang ditanam di tanah.
2. Pada umumnya lebih murah dari tembaga.
3. Biaya pentanahan dapat lebih murah.

## B. Luas Penampang Elektroda Pentanahan

Arus yang mengalir di elektroda petanahan menyebabkan suhu elektroda naik. Kenaikan ini haruslah berada dalam batas-batas yang diizinkan untuk menghindari leburnya elektroda ataupun sembungannya, sehingga mempengaruhi tahanan pentanahan. Oleh karena itu haruslah ditentukan luas penampang elektroda yang dapat menahan arus gangguan. Pada Tabel 2. Dapat dilihat luas penampang minimum elektroda pentanahan.



Luas penampang yang diperlukan untuk menghindari leburnya elektroda tergantung dari bahan atau logam yang digunakan, tipe sambungan, arus gangguan dan lama arus mengalir di elektroda. Dengan asumsi tidak ada paas yang hilang selama arus mengalir, luas penampang minimum elektroda pentanahan dapat dihitung dengan persamaan 3.1;

(Elan S. Studi Untuk Standarisasi Pengukuran Tahann Pentanahan. ITB. 1978)

$$A = I \sqrt{\frac{0,00104 \cdot R_m \cdot T_c \cdot t}{(1+T_c \cdot T_m)} \cdot \frac{s \cdot d \cdot \log \frac{1+T_c \cdot T_m}{1+T_c \cdot T_o}}{(1+T_c \cdot T_o)}} \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

dimana :

- A : luas penampang elektroda pentanahan minimum, mm<sup>2</sup>.
- I : besar arus gangguan yang mengalir di elektroda, A.
- R<sub>m</sub> : tahanan jenis logam elektroda, mikro ohm-cm.
- d : masa jenis logam elektroda, gram/cm<sup>3</sup>.
- s : panas jenis logam elektroda, kalori/gram.°C.
- T<sub>c</sub> : koefisien temperatur logam elektroda, °C<sup>-1</sup>.
- T<sub>o</sub> : temperatur lingkungan dimana logam ditanam, °C.
- T<sub>m</sub> : temperatur maksimum logam elektroda yang diizinkan, °C.

Selain untuk menghindari leburnya penghantar elektroda, penampang juga harus mampu menahan gaya mekanik luar yang mungkin timbul. Di USA, luas penampang minimum elektroda pentanahan tembaga yang banyak digunakan adalah  $107,2 \text{ mm}^2$ , dan kekuatan mekanis tembaga berpenampang  $107,2 \text{ mm}^2$  ini sama dengan baja yang berpenampang  $61 \text{ mm}^2$ . (Indra Prayatna.1985). Akan tetapi untuk elektroda baja berkurangnya penampang elektroda akibat korosi harus diperhatikan.

#### C. Aspek Korosi Pada Logam

Korosi adalah rusaknya logam karena berinteraksi dengan lingkungannya, berlangsung secara elektrokimia.

Ada beberapa pengertian mengenai korosi :

1. Rusaknya logam atau berubahnya bentuk suatu material karena bereaksi dengan lingkungannya.
2. Rusaknya material karena sebab non mekanis.
3. Kembalinya logam ke bentuk asalnya berupa bijih (ore).

Logam seperti baja, aluminium diperoleh berupa bijih yang kemudian dimurnikan dengan memberikan panas atau energi yang tinggi sehingga logam ini berada pada tingkat energi yang lebih tinggi dibandingkan energinya dalam bentuk bijih. Oleh karena adanya kecenderungan sistim untuk kembali ke tingkat energi yang lebih rendah, menyebabkan logam tersebut mudah kembali ke bentuk bijih atau oksida, dan bila hal tersebut terjadi maka disebut logam terkorosi. Lingkungan sangat berpengaruh dalam

mempercepat proses korosi, seperti lingkungan yang lembab, kandungan oksigen, kandungan garam ataupun keasaman tanah.

## BAB IV

### USAHA MENINGKATKAN KEANDALAN PENTANAHAN BAJA

#### A. Umum

Setelah elektroda pentanahan ditanam dalam tanah, maka akan sulit untuk melakukan pemeriksaan ataupun mengganti elektroda yang rusak. Jika elektroda terbuat dari logam yang aktif seperti baja korosi merupakan suatu masalah. Korosi akan menyebabkan luas penampang elektroda berkurang sehingga ada kemungkinan elektroda tidak dapat lagi menahan arus gangguan yang timbul, oleh karena itu faktor korosi haruslah dipertimbangkan dalam menentukan luas penampang elektroda pentanahan.

Sistim pentanahan yang andal adalah sistim yang diharapkan. Untuk meningkatkan keandalan elektroda pentanahan baja dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu :

1. Memproteksi elektroda baja secara katodik.
2. Melapisi elektroda baja dengan logam lain.
3. Memperluas penampang elektroda baja.

Proteksi katodik dimaksudkan agar baja selalu berfungsi sebagai katoda dalam suatu sel korosi, ini dapat dilakukan dengan menggunakan sumber luar atau mengkopel baja, dengan logam yang lebih aktif seperti seng Zn atau magnesium Mg.

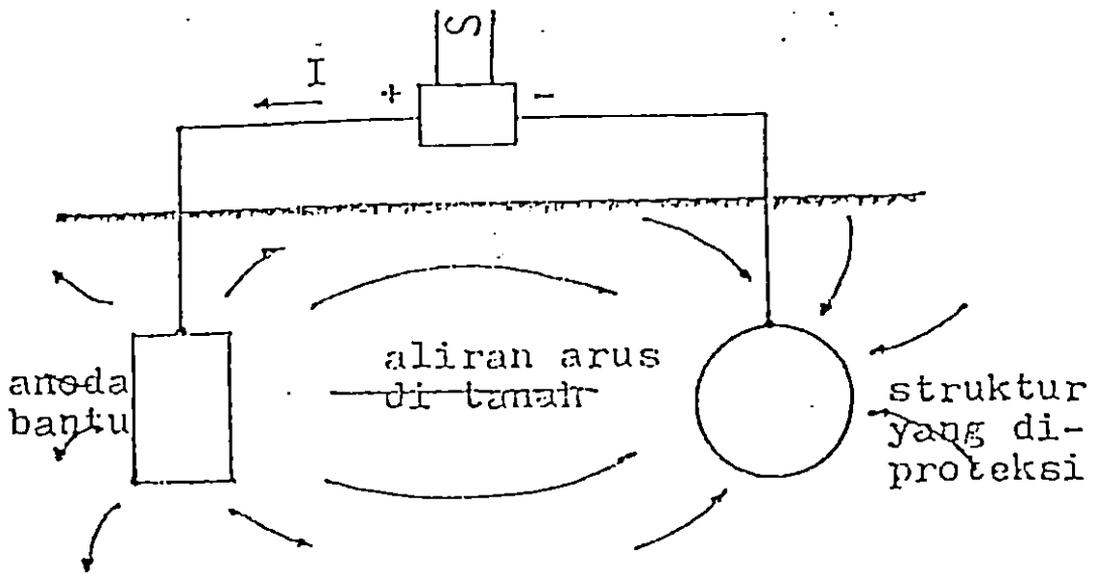
Pelapisan baja dengan logam lain dimaksudkan untuk menghindari kontak langsung baja dengan tanah, sehingga logam pelapisnya yang terkorosi lebih dulu. Cara lain untuk meningkatkan keandalan pentanahan dilakukan dengan memperbesar penampang elektroda, untuk itu perlu memperkirakakan kedalaman korosi yang timbul.

## B. Proteksi Katodik

Proteksi katodik ada 2 macam, yaitu : Proteksi katodik menggunakan arus tandingan (Impressie Current Protection) dan proteksi katodik menggunakan anoda korban (Sacrificial Anodes Protection)

### 1. Proteksi Katodik Dengan Arus Tandingan

Yang dimaksud dengan proteksi katodik menggunakan arus tandingan adalah proteksi katodik dimana untuk mencegah atau menekan laju korosi logam dilakukan dengan mensuplai logam dengan arus yang berasal dari sumber luar. Logam yang diproteksi dihubungkan dengan kutub negatif sumber sedang kutub positifnya dihubungkan dengan anoda batu, arus proteksi mengalir dari anoda bantu ke struktur yang diproteksi, perhatikan gambar 14.



Gambar 14. Skema proteksi katodik menggunakan arus tandingan

Untuk menjelaskan mekanisme proteksi katodik menggunakan arus tandingan, perhatikan dua reaksi berikut,



reaksi 4.1 adalah reaksi oksidasi logam M menjadi ion  $M^{+}$ , dan reaksi 4.2 adalah reduksi ion  $Z^{+2}$  membentuk ion  $Z^{+}$ , kedua reaksi ini berlangsung serempak di permukaan logam M.

Bila potensial logam M dibuat menjadi lebih negatif misalnya dengan menghubungkan dengan kutub negatif suatu sumber, ini berarti kita memberikan sejumlah

elektron ke logam M, akibatnya ion  $M^+$  yang sedianya akan keluar dari permukaan logam akan direduksi kembali menjadi atom M, sehingga laju reaksi oksidasi (reaksi 4.1) berkurang. Jadi laju korosi logam M akan berkurang, sedangkan laju reaksi 4.2 akan semakin besar. Bila penurunan potensial logam M cukup besar, laju korosi dapat dibuat nol, logam tidak terkorosi.

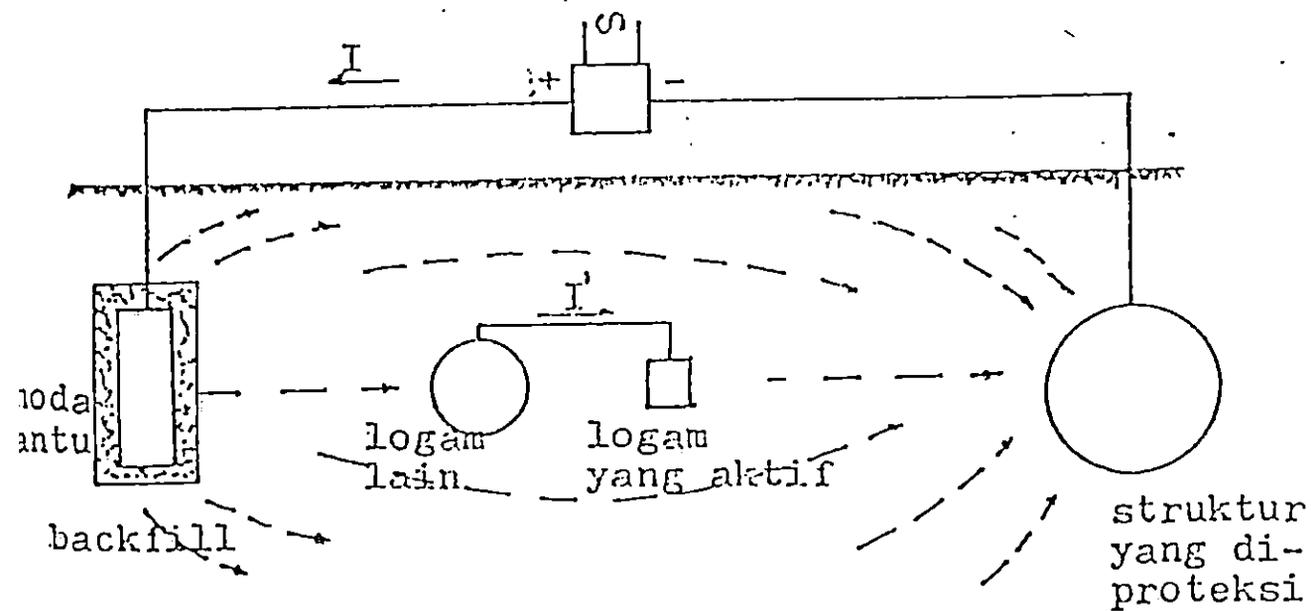
Dalam proteksi katodik diperlukan suatu anoda bantu untuk menyebarkan arus proteksi ke struktur. Anoda ini akan terkorosi dan ionnya larut ke tanah. Anoda bantu yang dapat digunakan bermacam-macam, seperti logam langka (tantalum, niobium, perak yang semuanya berlapis platina); bahan ferro (besi, besi silikon, baja, stainless steel); bahan mengandung karbon (grafit, karbon); timbal; seng; aluminium. Pemilihan bahan anoda bantu ini tergantung dari umur anoda yang diinginkan, luas struktur yang diproteksi dan faktor ekonomisnya. Untuk memproteksi struktur baja di tanah anoda bantu yang umum dipakai adalah besi sekrap (scrap iron) oleh karena harganya yang relatif murah dan mudah diperoleh. Setiap amper tahun arus proteksi dibutuhkan kira-kira 7 hingga 9,15 kg besi sekrap. Selain besi sekrap sering juga digunakan orang anoda bantu grafit.

Anoda bantu ditanam di tanah dalam sampul (backfill) terbuat dari bahan karbon (carbonaceous backfills) seperti batubara atau grafit yang

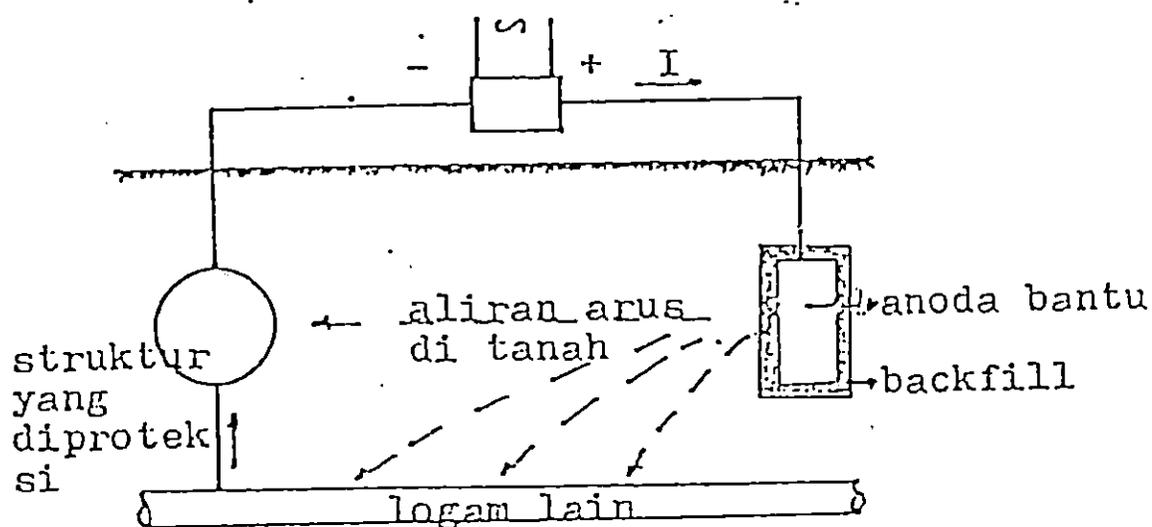
dihancurkan. Fungsi backfill ini adalah untuk memperkecil tahanan kontak anoda ke tanah dan untuk mengurangi korosi lokal pada anoda bantu.

Proteksi katodik menggunakan arus tandingan terutama digunakan pada tanah yang bertahanan jenis tinggi dan struktur yang akan diproteksi luas. Sistem proteksi ini mempunyai kelemahan yaitu menyebabkan timbulnya korosi arus bocor (stray current corrosion) pada logam lain yang berada disekitar anoda bantu atau logam yang terletak antara anoda bantu dengan struktur yang diproteksi. Ada beberapa cara yang dapat dilakukan untuk menghindari atau mengurangi korosi arus bocor, yaitu :

- a. Menggunakan sejauh mungkin letak anoda bantu dari logam yang tidak diproteksi, jika hal ini memungkinkan.
- b. Memberikan lapisan pelindung pada logam yang tidak diproteksi, misalnya dengan aspal, cat atau bahan isolasi ~~dan~~ lain.
- c. Menghubungkan logam yang tidak diproteksi dengan logam yang lebih aktif, lihat gambar 15.
- d. Menghubungkan logam yang tidak diproteksi dengan struktur yang diproteksi, lihat gambar 15.



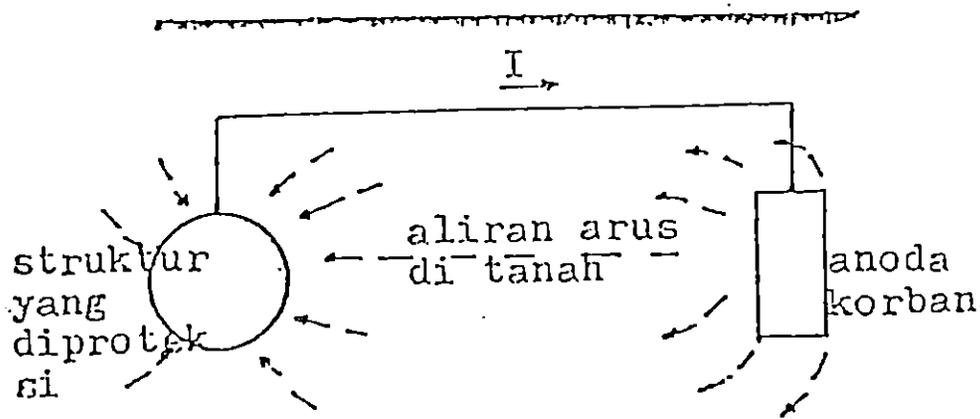
Gambar 15. Memproteksi logam lain dari korosi arus bocor dengan menghubungkannya dengan logam yang lebih aktif.



Gambar 16. Memproteksi logam lain dari korosi arus bocor dengan menghubungkannya dengan struktur yang diproteksi

## 2. Proteksi Katodik Menggunakan Anoda Korban

Yang dimaksud dengan proteksi katodik menggunakan anoda korban adalah proteksi katodik yang dilakukan dengan menghubungkan logam yang akan diproteksi dengan logam lain yang lebih aktif, sehingga antara kedua logam tersebut terbentuk sel galvanis dimana logam yang akan diproteksi berfungsi sebagai katoda (tidak terkorosi) dan logam lain disebut juga anoda korban berfungsi sebagai anoda (terkorosi). Skema rangkaian proteksinya dapat dilihat pada gambar 16.



Gambar 17. Skema rangkaian proteksi katodik menggunakan anoda korban

Untuk memproteksi struktur secara anoda korban, maka didekat struktur yang diproteksi ditanam logam yang lebih aktif sebagai anoda korban dan dihubungkan dengan struktur yang diproteksi. Jika struktur yang diproteksi adalah baja, anoda korban yang sering dipakai adalah seng Zn dan magnesium Mg. Kedalam seng atau magnesium ini juga dimasukkan logam lain seperti Cu, Al, Si, Fe, Pb, Cd, dan lainnya untuk memperoleh sipat yang lebih baik seperti; membuat potensial anodabantu lebih negatif, meningkatkan efisiensi dan mencegah anoda menjadi pasif.

Penggunaan proteksi katodik menggunakan anoda korban terbatas pada daerah yang bertahanan jenis

rendah,  $R < 6000$  ohm-cm karena terbatasnya potensial anoda korban.

### C. Melapisi Elektroda Baja Dengan Logam Lain

Cara lain untuk melindungi baja dari korosi dilakukan dengan melapis baja dengan logam lain. Berdasarkan logam yang digunakan, dikenal dengan pelapisan katodik (jika logam pelapis lebih katodik dari baja) dan pelapisan anodik (bila logam pelapis lebih anodik dari baja). Tembaga dan seng masing-masing merupakan logam pelapis katodik dan anodik yang sering digunakan untuk melapisi baja.

Lamanya seng dapat melindungi baja tergantung tebal lapisan seng. Pengalaman menunjukkan 3.1 oz/ft<sup>2</sup> seng dapat memproteksi baja selaman 2 - 20 tahun, tergantung keadaan tanah. Pada awal penempatan baja berlapis seng di tanah laju korosi seng rendah, tetapi bila seng rusak atau terkelupas, maka laju korosi seng akan meningkat dan akhirnya baja tidak berlapis sama sekali. Oleh karena itu pelapisan anodik juga tidak disarankan sebagai satu-satunya jalan untuk meningkatkan keandalan pentanahan baja.

### D. Memperluas Penampang Elektroda Baja

Sistim pentanahan baja yang andal dapat juga dicapai dengan memperluas penampang elektroda pentanahan, sehingga selama operasi luas penampang tidak akan lebih kecil dari luas penampang yang disarankan sesuai dengan



persamaan 3.1 karena itu perlu diperkirakan kedalaman korosi yang mungkin terjadi. Laju korosi bervariasi, tergantung keadaan tanah dimana logam ditanam. K<sup>2</sup>H Logan dari Badan Standart Nasional Amerika telah mengukur laju korosi pada berbagai tanah, hasilnya dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 3.

Laju Korosi Logam Baja Dan Tembaga di Tanah

Laju Korosi Dalam	Tembaga *	Baja **
mg/dm <sup>2</sup> /hari		
Laju korosi dalam		
mg/dm <sup>2</sup> /hari		
rata-rata	0,7	4,5
minimum	0,18	0,5
maksimum	10	30

\* Tembaga ditanam selama 8 tahun pada 29 buah lokasi.

\*\* Baja ditanam selama 12 tahun pada 44 buah lokasi.

Banyak usaha yang dilakukan untuk meningkatkan keandalan pentanahan baja dengan memperluas penampang elektroda baja. Pada tahap yang tingkat kekorosiannya rendah ( $R > 10000$  ohm-cm) umumnya penampang tidak diperluas, walaupun demikian disarankan memperbesar diameter elektroda sebesar dalam, korosi sumur minimum.

Adanya lapisan oksida besi  $Fe_2O_3$  dan  $FeO$  yang menempel dipermukaan logam akan berfungsi sebagai lapisan pelindung baja. Lapisan ini makin lama makin tebal dan kedap, sehingga laju korosi makin lama makin turun. Berdasarkan alasan tersebut Badan Pengairan dan Ketenagaan India dalam merencanakan elektroda pentanahan baja mengasumsikan laju korosi dalam 12 tahun pertama sesuai dengan laju korosi seperti pada tabel 4.5, 12 tahun keada laju korosi berkurang 50%, sedang tahun berikutnya laju korosi diabaikan. Untuk perencanaan elektroda baja, diameter konduktor yang disediakan adalah diameter konduktor yang dihitung dengan persamaan 3.1 kemudian ditambah  $2 \times 180$  mil atau 9,144 mm (dengan asumsi korosi sumur yang terjadi merata dipermukaan logam, yaitu sebagai keadaan terburuk).

MILIK UPT PERPUSTAKAAN  
IKIP PADANG

Setelah data-data tersebut diketahui, kemudian diperhatikan letak peralatan yang perlu diketanahkan untuk selanjutnya ditentukan ukuran serta bentuk elektroda pentanahan yang sesuai dengan keadaan dilapangan.

- A. Luas daerah pentanahan.
- B. Besar tahanan jenis tanah.
- C. Besar arus hubung singkat ke tanah.
- D. Lamanya gangguan.
- E. Luas penampang konduktor pentanahan.
- F. Panjang minimal konduktor total pentanahan.

perencanaan adalah :

Data-data yang perlu untuk diketahui dalam perencanaan pemakatan baja untuk elektroda pentanahan pada dasarnya sama dengan perencanaan elektroda dari bahan lainnya. Dalam bab ini akan diraikan langkah-langkah perencanaan elektroda baja. Dengan mengetahui batas tegangan yang membahayakan maka dapat dirancang sistim pentanahan grid yang aman bisa terjadi gangguan hubung singkat ke tanah. Pada dasarnya perencanaan pentanahan grid untuk berbagai bahan konduktor adalah sama, hanya saja untuk bahan yang relatif mudah terkorosi maka faktor korosi harus dipertimbangkan dalam perencanaan. Dalam bab ini akan diraikan langkah-langkah perencanaan elektroda baja.

## PERENCANAAN PENGGUNAN BAJA UNTUK PENTANAHAN GRID

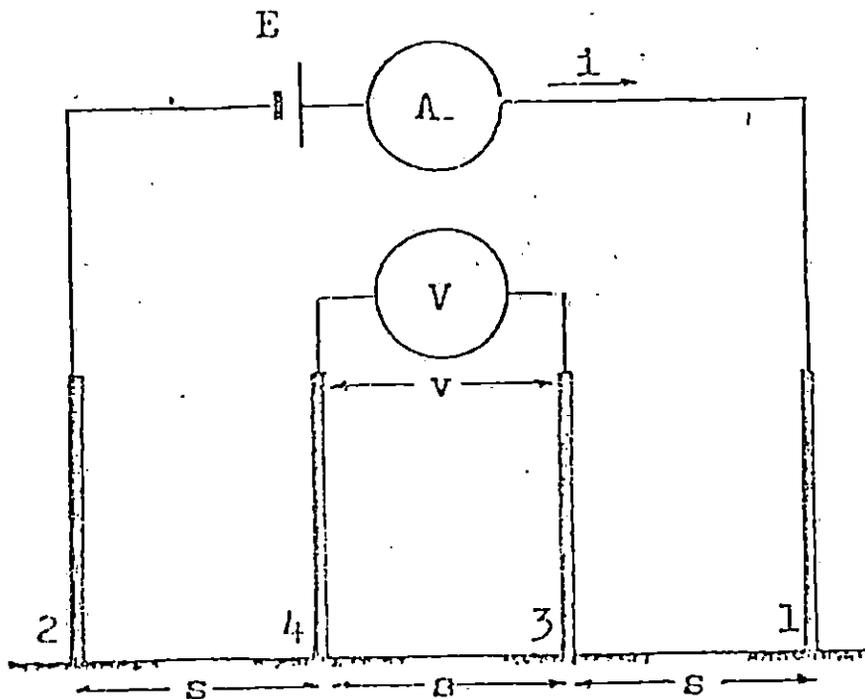
### BAB V

#### A. Luas daerah pentanahan

Luas daerah pentanahan tergantung dari susunan peralatan di lapangan yang perlu diketanahkan seperti trafo daya, tiang-tiang penyangga (menara). Semakin luas daerah yang dicakupnya semakin luas pula daerah yang perlu diamankan.

#### B. Tahanan jenis tanah.

Tahanan jenis tanah besar bervariasi, tergantung dari komposisi tanah, temperatur dan kadar air di tanah. Untuk mengetahui atau memperoleh harga yang teliti perlu dilakukan pengukuran dalam periode musim yang berbeda-beda. Salah satu cara pengukuran tahanan jenis tanah adalah dengan metoda empat buah elektroda. Pada metoda ini digunakan 2 buah elektroda arus dan 2 buah elektroda tegangan yang ditanam segaris di tanah, perhatikan gambar 18.



Gambar 13. Rangkaian Pengukuran tahanan jenis tanah dengan metode 4 elektroda.

Keterangan Gambar 13.

E : sumber daya (baterai).

A : Amper meter

V : Volt meter

s : Jarak antar elektroda, meter.

i : Besar arus yang mengalir di tanah, amper.

v : besar beda potensial elektroda tegangan, volt.

Elektroda 1 dan 2 : elektroda arus.

Elektroda 3 dan 4 : elektroda tegangan.

Dari rangkaian diatas besarnya tahanan jenis tanah dapat dihitung dengan persamaan :

$$p = 2 \cdot \# \cdot s \cdot R \quad \dots\dots\dots(5.1)$$

dimana  $p$  : tahanan jenis tanah, ohmmeter.

$s$  : Jarak antar elektroda, meter.

$R$  : besaran (ohm) yang diperoleh dari,  $R = v/i$ .

### C. Arus hubung singkat.

Besarnya arus gangguan hubung singkat ke tanah tergantung dari besar sistem tenaga listrik kita. Untuk menghitung besar arus gangguan satu fasa ke tanah, kita harus menentukan besarnya impedansi urutan positif, negatif dan nol dari sistem, dan oleh karena itu merupakan suatu masalah tersendiri maka disini hanya diberikan persamaan untuk menghitung besar arus gangguan satu fasa ke tanah.

Arus hubung singkat ke tanah terdiri dari dua komponen, yaitu komponen AC (simetrik) dan komponen DC. Besar arus gangguan komponen AC dapat dihitung dengan persamaan :

$$I = \frac{3 E_{ph}}{3R + 3R_f + Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad \dots\dots\dots(5.2)$$

dimana :

$I$  = besar arus gangguan ke tanah komponen AC, A

$E_{ph}$  : Besar tegangan phasa ke netral, volt.

$R$  : Tahanan pentanahan, ohm.

$R_f$  : Tahanan gangguan, ohm.

$Z_1$  : Impedansi urutan positif, ohm

$Z_2$  : impedansi urutan negtif, ohm.

$Z_0$  : impedansi urutan nol, ohm.

Impedansi  $Z_1$ ,  $Z_2$  dan  $Z_0$  adalah impedansi sistem yang dilihat dari titik gangguan ke sisitem. Umumnya besar tahanan  $R$  dan  $R_f$  sangat kecil dibanding  $Z_1$ ,  $Z_2$ , dan  $Z_0$  dan dapat diabaikan sehingga persamaan 5.2 menjadi lebih sederhana yai'u :

$$I = \frac{3 E_{ph}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \dots\dots\dots(5.3)$$

Besa arus hubung singkat ke tanah komponen dc sukar untu dihitung, dan untuk mengikutsertakannya dalam menentukan besar arus hubung singkat maksimum total ke tanah maka besar arus komponen AC dikalikan dengan faktor 1,732. Sehingga bsar aus hubung singkat ke tanah maksimum adalah :

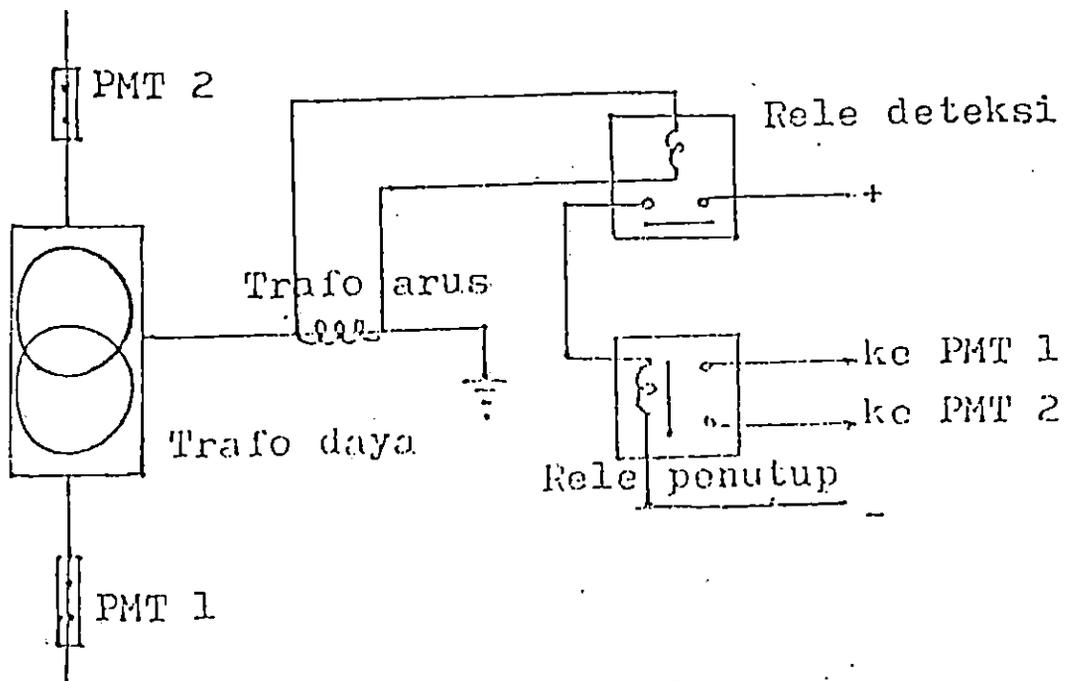
$$I_{tot} = 1,732 I \dots\dots\dots 5.4)$$

dimana  $I_{tot}$  adalah besar arus hubung singkat ke tanah maksimum.

#### D. Lama Gangguan

Lama Gangguan hubung singkat ke tanah ditentukan oleh waktu pembukaan alat atau rele proteksi yang ada di gardu induk. Proteksi terhadap gangguan hubung singkat ke tanah di gardu induk umumnya terdiri dari : Proteksi trafo daya dan proteksi rel daya (busbar).

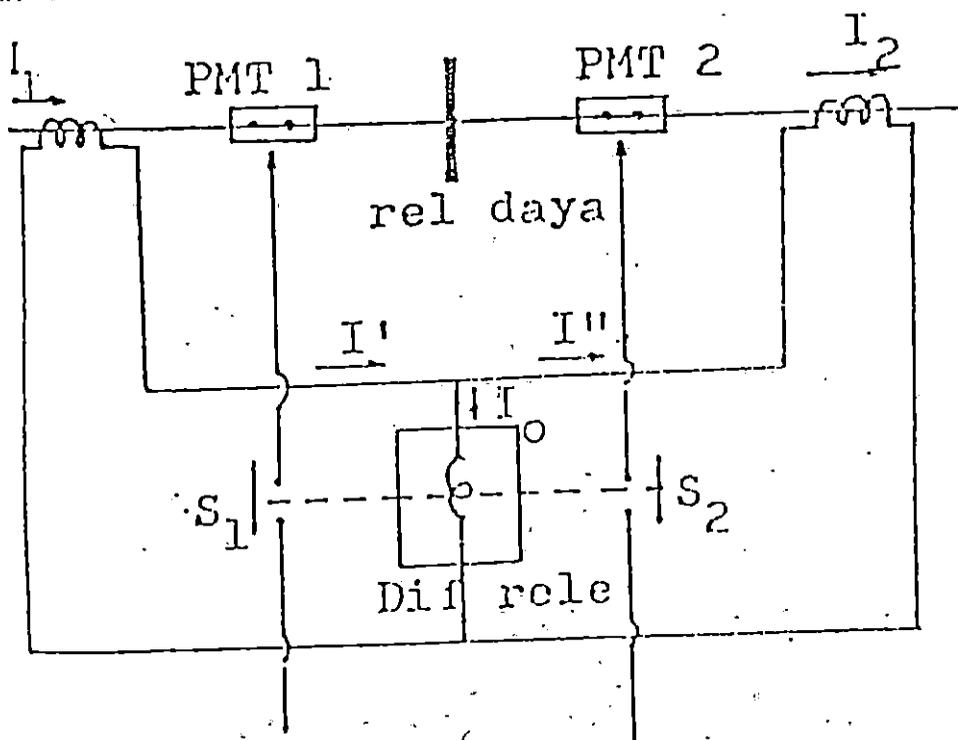
Proteksi trafo daya dilakukan dengan mentanahkan badan trafo melalui trafo arus untuk memberikan sinyal (signal) ke rele deteksi (detecting relay). Bila terjadi hubung singkat ke tanah maka rele deteksi akan bekerja sehingga kumparan rele penutup (Closing relay) tereksitasi, akibatnya kumparan pemutus daya PMT (Circuit Breaker) akan tereksitasi pula dan PMT akan terbuka.



Gambar 19. Sistem Proteksi trafo daya.

Waktu yang diperlukan untuk memutuskan daya terhitung untuk memutuskan daya terhitung dari saat terjadinya gangguan umumnya adalah 0,2 hingga 0,4 detik<sup>4</sup>

Untuk memproteksi rel daya biasanya digunakan rele diferensial (differential relay), dan prinsipnya dalam memproteksi rel daya adalah sebagai berikut, perhatikan gambar 20. Pada keadaan normal arah arus  $I'$  dan  $I''$  dibuat seperti pada gambar 20.  $I_0 = I'' - I'$  dibuat sama dengan  $I''$  maka dalam keadaan normal  $I_0 = 0$  sehingga rele diferensial tidak bekerja. Bila terjadi gangguan di rel daya maka arah arus  $I''$  akan berbalik sehingga arus  $I_0 = I' - I''$  dan relepun bekerja menutup kontak  $S_1$  dan  $S_2$ ,\* akibatnya kumparan PMT tereksitasi dan PMT 1 dan PMT 2 akan terbuka.



Gambar 20. Sistem proteksi rel daya.

### E. Luas Penampang Konduktor Pentanahan.

Penampang konduktor elektroda pentanahan harus cukup besar sehingga mampu menahan arus gangguan ataupun gaya mekanik di luar. Luas penampang yang diperlukan untuk menahan arus gangguan ditentukan oleh besarnya arus gangguan, jenis sambungan elektroda, bahan konduktor yang digunakan dan lamanya gangguan terjadi. Dengan menggunakan persamaan 3.1 dapat ditentukan luas penampang konduktor pentanahan yang dapat menahan arus gangguan<sup>4</sup> yaitu :

$$A = I \sqrt{\frac{0,00104 \cdot R_m \cdot T_c \cdot t}{s.d \log \frac{1 + T_m \cdot T_c}{1 + T_0 \cdot T_c}}}$$

Harga-harga konstanta persamaan diatas untuk logam tembaga, besi dan aluminium dapat dilihat pada tabel 5.1

Temperatur  $T_0$  besarnya tergantung dari temperatur tanah di mana elektroda ditanam, dan oleh IEEE besarnya diasumsikan  $40^\circ \text{C}$ , sedangkan lama arus mengalir  $t$  di elektroda disarankan menggunakan  $t = 3$  detik (harga sebenarnya umumnya kurang dari  $0,5$  detik). Adapun alasannya adalah :

1. Secara mekanis konduktor harus cukup kuat karena konduktor akan cukup lama ditanam di tanah dan pada

suatu saat mungkin mengalami gaya mekanik luar yang besar.

2. Sukar untuk mengadakan pemeriksaan atau pengecekan sehingga keamanan dibuat sebesar mungkin.

Tabel 4. Harga konstanta  $T_m$ ,  $R_m$ ,  $T_c$ ,  $d$ ,  $s$   
Logam Cu, Fe (Baja) dan Al.

No.	Konstanta	Cu	Fe	Al
1.	Temperatur maksimum yang diizinkan, $T_m$ ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	-sambungan dengan las	450	900	270
	-sambungan dengan baut	250	500	150
2.	Tahanan jenis, $R_m$ ( $\mu - \text{cm}$ )	1,589	15	2,607
3.	Koefisien temperatur, $T_c$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	0,00427	0,00423	0,0037
4.	Massa jenis, $d$ ( $\text{gram}/\text{cm}^3$ )	8,89	7,86	2,7
5.	Panas jenis, $s$ ( $\text{cal}/\text{gram} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )	0,92	0,114	0,223

3. Bila perkembangan sistem tenaga listrik begitu cepat diluar perkiraan kita, maka besar arus gangguan pun akan meningkat pada hal sulit untuk mengganti sistem pentanahan yang sudah ada.

#### F. Panjang minimal konduktor total pentanahan.

Seperti telah diterangkan pada sub bab bagian D bahwa dalam merencanakan pentanahan grid yang aman panjang konduktor total elektroda pentanahan harus tidak kurang

konduktor total elektroda pentanahan harus tidak kurang dari batas yang disarankan sesuai dengan persamaan 2.14 agar tegangan mesh yang timbul berada dalam batas yang aman.

Panjang minimum konduktor total pentanahan  $L$  adalah :

$$L = \frac{K_m \cdot K_1 \cdot p \cdot I \cdot V_t}{116 + 0,17 p_a}$$

## DAFTAR KEPUSTAKAAN

- Dalziel C.F. Electric Shock Hazard, IEE, Spectrum, 1974.
- Elan S. Studi Untuk Standarisasi Pengukuran Tahanan Pentanahan. ITB. Bandung 1982.
- Gatot Subandiono. Menentukan Pentanahan Gardu Induk. ITB. Bandung. 1974.
- Indra Prayatna. Studi Pentanahan Gardu Induk. ITB. Bandung 1985.
- Panitia Revisi PUIL. Peraturan Umum Instalasi Listrik Indonesia: LIPI. Jakarta. 1977.
- TS. Hutauruk. Pengetahuan Sistem Tenaga dan Pengetanahan Sistem Peralatan. Erlangga. Jakarta. 1987

MILIK UPT PERPUSTAKAAN  
IKIP PADANG