



---

## STUDI MENGENAI IMPEDANSI SISTEM PENGETANAHAN SATU ELEKTRODA VERTIKAL DENGAN MEMPERHATIKAN FAKTOR FREKUENSI

---

*Hari Wahyudi  
Decy Nataliana*

*Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Nasional (Itenas) Bandung*

### ABSTRAK

*Keselamatan operasi dan kelancaran fungsi sistem tenaga listrik sangat dipengaruhi oleh ketepatan sistem pengetanahan yang digunakan. Sistem pengetanahan menjadi begitu penting ketika sistem mengalami gangguan. Ketika terjadi gangguan, sistem pengetanahan harus mampu melewati arus gangguan ke tanah tanpa menyebabkan kerusakan pada peralatan maupun membahayakan orang-orang di sekitarnya. Penelitian ini dilakukan dengan cara simulasi untuk mengetahui perilaku impedansi dalam tanah. Metode yang digunakan adalah metode fall of potential, di mana arus dan tegangan dapat diukur. Dari hasil simulasi pengukuran, dilakukan pengolahan data pengukuran, dan dengan menggunakan program Golden Software Surfer 7 diperoleh hasil berupa kurva jala, kontur vektor kuat medan, serta kontur tegangan pada frekuensi yang berbeda, sehingga bisa dilihat impedansi dan perilakunya dalam tanah tersebut serta kontur tegangannya, dan dari hal tersebut bisa dilihat pengaruh frekuensi terhadap impedansi.*

*Kata kunci: simulasi pengukuran, metode fall of potential, kurva jala, kontur vektor, kontur tegangan*

### ABSTRACT

*Safe operation and a stable function of electrical power system require an accurate grounding system, especially when certain disturbances occurred. When disturbed, the grounding system has to safely flow the current to the ground without creating damage to the equipment, nor to the people near the area. This research simulate the impedance of electricity in the earth, recording the current and voltage using the method of fall of potential. The result of simulation was then calculated with the Golden Software Surfer 7 to obtain net-curve, voltage contour, and vector contour for several different frequencies, to observe the impedance and its behaviour, and how frequencies affect the impedance.*

*Keywords: measurement simulation, fall of potential method, net-curve, vector contour, voltage contour*

## PENDAHULUAN

Sistem pengetanahan dibutuhkan untuk memperoleh potensial yang merata (uniform) dalam semua bagian struktur dan peralatan, dan juga untuk menjaga agar orang yang berada di daerah instalasi itu berada pada potensial yang sama dan tidak berbahaya pada setiap waktu. Dengan dicapainya potensial yang hampir merata pada semua titik dalam daerah sistem pengetanahan ini, kemungkinan timbulnya beda potensial yang besar pada jarak yang dapat dicapai oleh manusia sewaktu terjadi hubung singkat kawat ke tanah menjadi sangat diperkecil.

Kecelakaan pada manusia timbul pada saat hubung singkat ke tanah terjadi. Jadi bila arus hubung singkat ke tanah itu dipaksakan mengalir melalui impedansi tanah yang tinggi, akan timbul perbedaan potensial yang besar dan berbahaya. Juga impedansi yang besar pada sambungan-sambungan pada rangkaian pengetanahan dapat menimbulkan busur listrik dan pemanasan yang besarnya cukup menyalakan material yang mudah terbakar (Papalexopoulos & Meliopoulos, 1987).

Penelitian ini bertujuan untuk mengukur besar arus dalam tanah serta memetakan besaran arus tersebut untuk mendapatkan kontur perambatan arus dalam tanah, di dalam suatu pengukuran simulasi sistem pengetanahan.

Penelitian ini mempelajari dan menganalisis proses merambatnya arus dalam tanah sebagai akibat suatu sistem pengetanahan. Penelitian menggunakan suatu pengukuran simulasi sistem pengetanahan pada sebuah tempat berbentuk kotak ukuran 1,5 m x 1,5 m x 0,8 m, yang di dalamnya diisi penuh dengan tanah, untuk selanjutnya dilakukan penelitian untuk bentuk elektroda batang dan jarak pengukuran tegangan dan arus, dengan menggunakan metode *fall of potential*.

### Sistem Pengetanahan

Sistem pengetanahan menara, peralatan, ataupun bangunan merupakan bagian yang sangat menentukan dalam penyaluran

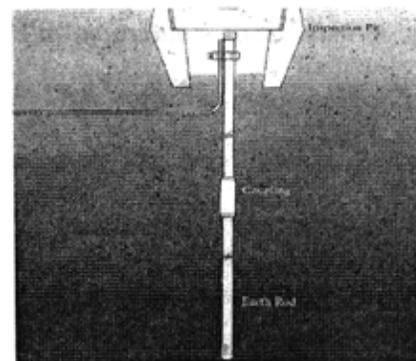
arus surya petir apabila terjadi sambaran ke tanah/bumi, di mana tanah/bumi adalah tempat energi dari surya petir dapat didisipasikan. Kemampuan tanah/bumi untuk menerima energi surya bergantung pada impedansi sistem pengetanahannya. Impedansi didefinisikan sebagai besarnya tegangan impuls petir dibagi dengan arus impuls petir:

$$Z_t = \frac{u(t)}{i(t)}$$

Jaringan terminal dalam sistem pengetanahan dapat berupa batang konduktor yang ditanam tegak lurus ke dalam tanah (*driven rod*) atau, apabila kondisi tanahnya tidak memungkinkan, dapat berupa konduktor yang ditanam beberapa sentimeter ke dalam tanah. Metode pengetanahan seperti ini disebut metode *counterpoise* (Meliopoulos & Joy, 1981).

### Pengetanahan *Driven Rod*

Pengetanahan dengan menanam batang konduktor tegak lurus ke dalam tanah disebut *driven rod* (Gambar 1). *Driven rod* dapat terdiri atas satu atau beberapa buah batang konduktor. Spesifikasi material yang digunakan umumnya tembaga dan aluminium yang diproses dengan metode tertentu sehingga bisa digunakan sebagai jaringan terminal pengetanahan. Pemilihan yang tepat untuk material dan instalasinya akan memungkinkan penggunaan minimal 30 tahun dan tahan terhadap gangguan korosi mekanik untuk pemakaian di beberapa kondisi lingkungan.



Gambar 1 Pengetanahan *driven rod*



**Rangkaian Pengganti Driven Rod**

Untuk satu batang konduktor pengetanahan yang mempunyai panjang  $l$  dan radius  $r$  ditanam tegak lurus pada tanah yang mempunyai resistivitas tanah  $\rho$  homogen, maka konduktor bersama tanah akan mempunyai tahanan yang besarnya sebagai berikut: (Hutauruk, 1986; Gonos, 1999)

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \left( \ln \frac{4 \cdot l}{r} - 1 \right) \quad (1)$$

dengan:

- $R$  = tahanan pengetanahan (ohm)
- $\rho$  = resistivitas tanah (ohm-m)
- $l$  = panjang batang (m)
- $r$  = radius batang (m)

sementara besar harga induktansi dan kapasitansi batang konduktor pengetanahan adalah:

$$L = 2 \cdot l \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot l}{r} \right) 10^{-7} \quad (2)$$

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot l}{18 \cdot \ln \frac{4 \cdot l}{r}} 10^{-9} \quad (3)$$

Untuk mengetahui rangkaian pengganti dari suatu batang konduktor pengetanahan terlebih dahulu dengan mengabaikan induktansi dari batang konduktor pengetanahan tersebut dan menganalisisnya dengan persamaan Maxwell dengan arus masukan sinusoidal dan eksponensial. Pengetanahan konduktor dengan tanah dapat dianggap suatu setengah bola berjari-jari  $r$  ada di dalam bumi yang mempunyai konduktivitas  $\sigma$  dan konstanta dielektrik  $k$  serta arus pengosongan  $I_0$  menuju tanah. Pada suatu titik dalam medium, rapat arus  $J$  dan kuat medan listrik  $E$  pada suatu medan yang berubah terhadap waktu dihubungkan oleh Persamaan (William & Hayt, 1989)

$$J = \sigma \cdot E + k \cdot j \cdot \omega \cdot \dot{E} = E \cdot (\sigma + k \cdot j \cdot \omega) \quad (4)$$

dengan:  $\dot{E} = \frac{dE}{dt}$

**Masukan Sinusoidal**

Jika arus masukan berbentuk  $e^{j\omega t}$  maka kuat medan listrik juga berbentuk  $e^{j\omega t}$

Rapat arus:

$$J = \sigma \cdot E + k \cdot j \cdot \omega \cdot \dot{E} = E \cdot (\sigma + k \cdot j \cdot \omega)$$

Atau  $E = \frac{J}{\sigma + k \cdot j \cdot \omega}$

dengan  $J = \frac{I_0}{2 \cdot \pi \cdot x^2}$  pada jarak  $x$

Sehingga kuat medan listrik  $E_x$  pada jarak  $x$  dan tegangan  $V$  dari konduktor terhadap bumi yang jauh sebagai berikut: (Istanto, 2002)

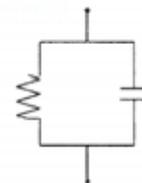
$$E_x = \frac{I_0}{2 \cdot \pi \cdot x^2 (\sigma + k \cdot j \cdot \omega)}$$

$$V = \int_r^x E_x dx = \frac{I_0}{2 \cdot \pi \cdot r^2 (\sigma + k \cdot j \cdot \omega)} \quad (5)$$

Jadi admitansi:

$$Y = \frac{I_0}{V} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma + j \cdot \omega \cdot k \cdot r \quad (6)$$

maka rangkaian penggantinya menjadi sebagaimana Gambar 2 (Ketaren, 2001).



Gambar2 Rangkaian pengganti 1 konduktor tanpa induksi

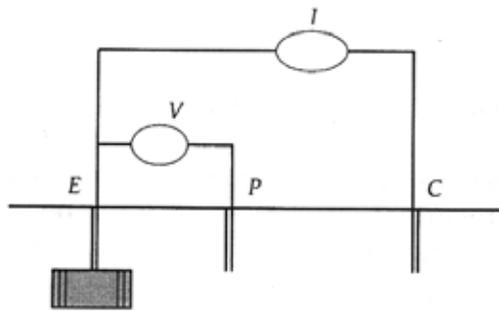
**METODE PENELITIAN**

**Metode Pengukuran**

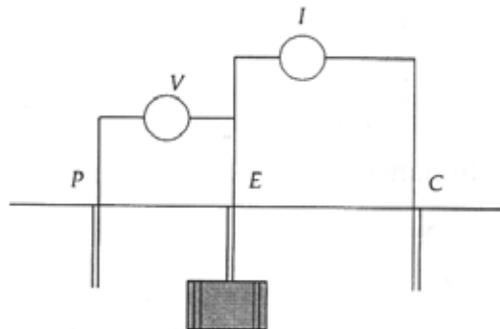
Terdapat dua metode yang dapat digunakan untuk mengukur tahanan pengetanahan, yaitu metode empat tegangan, perpotongan, kemiringan, dan *fall of potential*. Dalam penelitian ini digunakan metode *fall of potential*.

Metode *fall of potential* adalah metode pengukuran yang secara umum digunakan untuk mengukur tahanan pengetanahan. Metode ini terdiri dari satu konduktor pengetanahan  $E$  dan konduktor-konduktor pembantu. Konduktor-konduktor pembantu ini terdiri atas satu konduktor arus  $C$  dan satu konduktor tegangan  $P$ . Posisi konduktor  $C$  ditempatkan pada jarak yang cukup jauh dari

E. Gambar dari metode ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Metode *Classical Fall of Potential*



Gambar 4 Metode *Alternative Fall of potential*

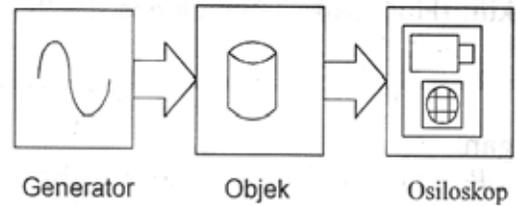
Metode ini dilakukan dengan menginjeksikan arus  $I$  pada  $E$  dan balik melalui konduktor  $C$ . Lewatnya arus ini menghasilkan suatu jatuh tegangan  $V$  di dalam tanah antara  $E$  dan  $P$ . Dan hasil bagi antara  $V$  dan  $I$  memberikan suatu tahanan konduktor pengetanahan  $E$ .

Konduktor  $E$  merupakan konduktor telanjang tanpa isolasi, sedangkan konduktor  $P$  berfungsi sebagai probe yang dilapisi dengan bahan isolasi, sedangkan konduktor  $C$  ditempatkan pada keempat sisi, pengukuran dilakukan dengan mengubah frekuensi serta posisi konduktor  $P$ , dengan besar arus diusahakan konstan. Pengukuran dilakukan pada titik tertentu di sekitar elektroda  $E$  dan beberapa titik secara acak di dalam koordinat untuk mendapatkan data-data tersebut, sehingga bisa dilakukan pemetaan pada perjalanan arus dari konduktor  $E$  sampai kembali lagi ke konduktor  $C$ , untuk frekuensi tetap maupun berubah-ubah.

### Rangkaian Eksperimen

Generator function yang digunakan untuk

menginjeksi objek uji, yaitu tanah yang ada dalam kotak berukuran  $1,5 \times 1,5 \times 0,8$  meter, adalah generator AC dengan frekuensi yang bisa berubah, dimulai dari frekuensi 50 Hz sampai dengan 200 kHz, dan kedalaman probe tegangan ( $P$ ) ada pada kedalaman 2, 3, 4, 5 cm dari permukaan tanah.



Gambar 5 Peralatan utama eksperimen



Gambar 6 Simulasi Rangkaian Pengujian

Tanah yang ada ditempatkan pada kotak, dan elektroda pentanahan diletakkan di tengah kotak tersebut. Dari kotak yang berisi tanah tersebut diharapkan medan listrik menyebar dari elektroda ( $E$ ) mengalir secara radial ke tepi kotak simulasi.

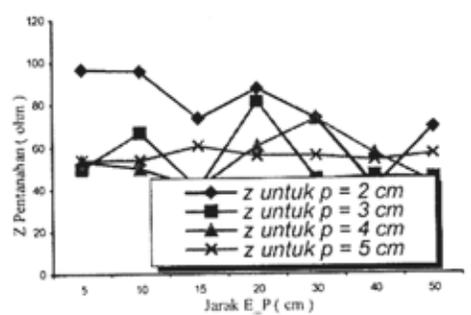
Dalam penelitian ini dibuat beberapa macam besar frekuensi dan kedalaman elektroda potensial ( $P$ ), dan kondisi tanah dianggap tidak berubah. Dengan demikian akan diperoleh beberapa hasil karakteristik pengukuran. Bentuk tegangan dan arus diukur serta beda fasa diukur dengan menggunakan osiloskop Tectronik TDS 220.

Hasil pengukuran tersebut merepresentasikan besar tegangan dan arus yang mengalir dalam tanah karena injeksi pada elektroda pentanahan ( $E$ ), dan hasil tersebut didapat dari pengukuran menggunakan osiloskop, termasuk beda fasa dari tegangan dan arus (dalam derajat).

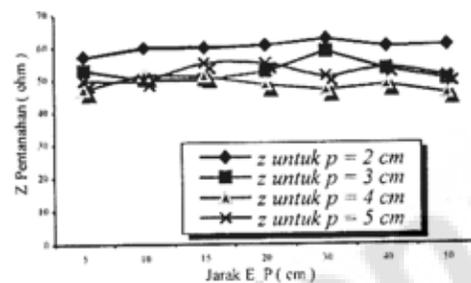
**HASIL DAN DISKUSI**

**Pengaruh Impedansi terhadap Frekuensi dan Kedalaman Elektroda Pengetanahan**

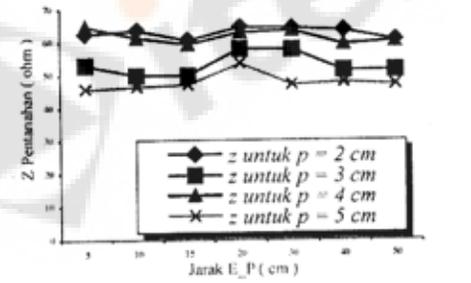
Gambar 7a sampai dengan 7g menunjukkan kurva impedansi terhadap jarak untuk frekuensi yang berbeda dan untuk beberapa kedalaman elektroda pengetanahan (E).



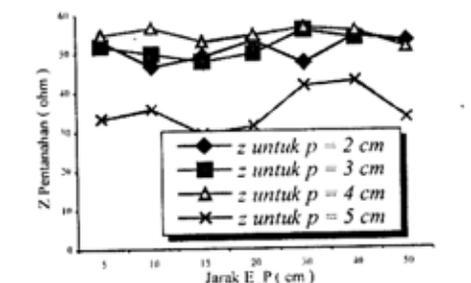
(a) f = 50 Hz



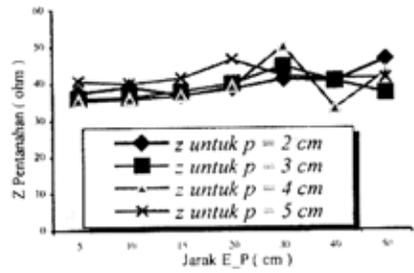
(b) f = 1 kHz



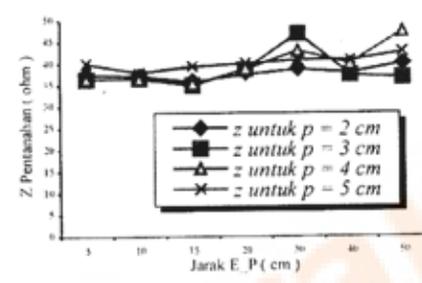
(c) f = 5 kHz



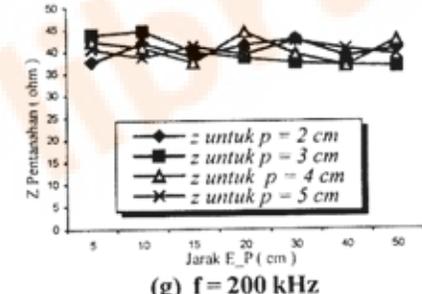
(d) f = 10 kHz



(e) f = 50 kHz



(f) f = 100 kHz



(g) f = 200 kHz

**Gambar 7 Kurva Impedansi terhadap Jarak**

Untuk frekuensi rendah (Gambar 7a sampai Gambar 7d), kedalaman berpengaruh sangat besar dalam perbedaan harga impedansinya, sedangkan mulai frekuensi 50 kHz harga impedansi pengetanahan tidak berbeda jauh. Dengan kata lain, untuk frekuensi tinggi, kedalaman elektroda pengetanahan (E) tidak begitu berpengaruh (lihat Gambar 7e sampai dengan Gambar 7g). Harga impedansi pengetanahan cenderung makin rendah untuk frekuensi makin tinggi (lihat dan bandingkan Gambar 7a sampai dengan 7g).

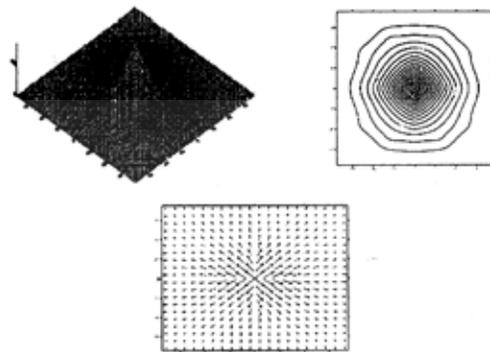
Untuk frekuensi rendah yaitu frekuensi 50 Hz sampai 10 kHz, makin dekat permukaan tanah, harga impedansinya makin tinggi (Gambar 7a sampai Gambar 7c). Hal tersebut dapat disebabkan oleh kelembaban tanah yang semakin tinggi



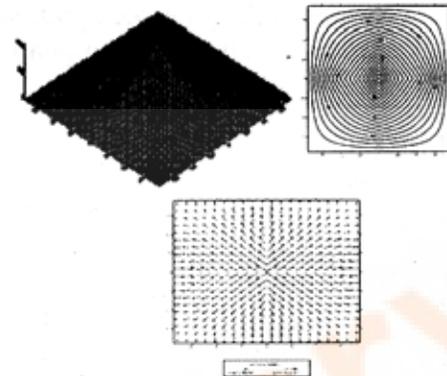
sehingga kandungan air sendiri menjadi berpengaruh terhadap harga impedansi pentanahan. Untuk frekuensi 50 kHz sampai 200 kHz harga impedansi pentanahan tidak berbeda jauh dibandingkan dengan frekuensi yang lebih rendah.

### Tegangan Sistem sebagai Fungsi Frekuensi

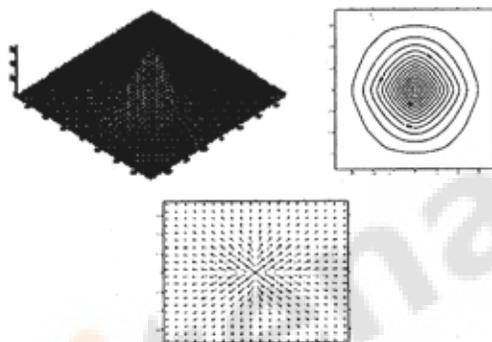
Pada Gambar 8a sampai dengan Gambar 8f, kurva jalanya dapat dilihat untuk beberapa frekuensi, di mana harga tegangannya makin



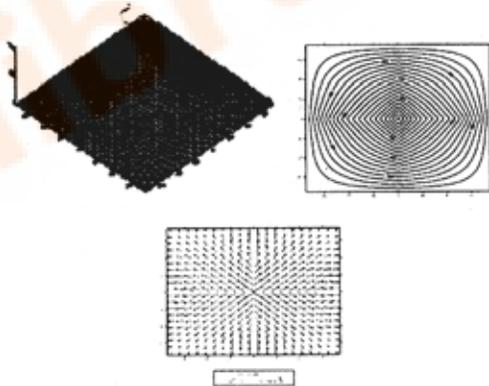
(a)  $f=50$  Hz,  $z=15$  cm



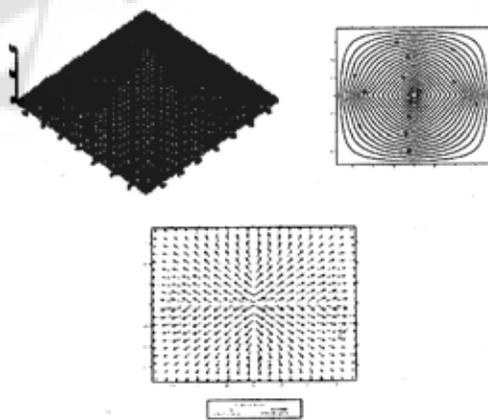
(d)  $f=1$  kHz,  $z=20$  cm



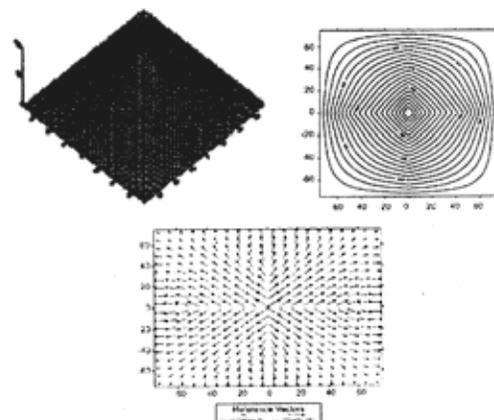
(b)  $f=50$  Hz,  $z=20$  cm



(e)  $f=100$  kHz,  $z=20$  cm



(c)  $f=1$  kHz,  $z=15$  cm



(f)  $f=200$  kHz,  $z=20$  cm

Gambar 8 Kontur 3D, Kurva Jala, Kontur V, dan Kontur Vektor

mendekati bidang batas harganya akan 0 mV, hal tersebut dapat dilihat pada kontur tegangannya di mana harga-harga garis equipotensialnya ditunjukkan, dan makin ke pinggir berarti makin mendekati bidang batas, sedangkan pada kontur vektor ditunjukkan pada titik pusat di mana ada tegangan maksimum disitu terjadi besar kuat medan yang maksimal, sedangkan makin mendekati bidang batas besar vektornya minimum.

### KESIMPULAN

Dari hasil eksperimen di laboratorium dan simulasi serta analisisnya dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengukuran impedansi pengetanahan dengan menggunakan arus sinusoidal menunjukkan bahwa frekuensi mempengaruhi harga impedansi suatu elektroda pengetanahan
2. Untuk kedalaman elektroda pengetanahan dekat permukaan tanah, harga impedansi pengetanahan cenderung makin rendah untuk frekuensi makin tinggi
3. Bila elektroda ditanam makin dalam, maka harga tegangan elektroda pengukuran makin rendah.

### DAFTAR PUSTAKA

- Papalexopoulos, A.D., Meliopoulos, A.P. 1987. Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. PWRD-2, No.4, October. hal. 1073 -1081
- Meliopoulos, A.P, Joy, E.B. 1981. Analysis of Grounding Systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol. PAS - 100, No. 3, March. hal. 1039 - 1048.
- Hutauruk, T.S. 1986. *Pengetanahan Netral Sistem Tenaga & Pengetanahan Peralatan*. Jakarta: Penerbit Erlangga
- Gonos, I.F., Topalis, F.V., Stahopoulos, I.A. 1999. *Transient Impedance of Grounding*. ISH
- William H., Hayt, J.R. 1989. *Elektromagnetika Teknologi*. Jakarta: Penerbit Erlangga
- Istanto, A. 2002. *Karakteristik Impedansi Pengetanahan Elektroda Tunggal dengan Injeksi Arus Bolak Balik Frekuensi Tinggi*. Tugas Akhir Departemen Teknik Elektro ITB
- Ketaren, K. 2001. *Studi Perilaku Sistem Pengetanahan Menara Saluran Udara Tegangan Tinggi Terhadap Arus Impuls*. Tesis Magister Departemen Teknik Elektro ITB