

Studi Karakteristik Nilai Impedansi Riil dan Imajiner Impedansi Pentanahan Konfigurasi Vertikal dengan Variasi Diameter dan Diinjeksi Arus Bolak-Balik Berfrekuensi 50 Hz -2 MHz

SYLVIA OKTOBELLA P¹, BAMBANG ANGGORO², WALUYO¹

1. Institut Teknologi Nasional Bandung
 2. Institut Teknologi Bandung
- Email: sylvia.octobella@gmail.com

ABSTRAK

Sistem pentanahan yang baik sangat diperlukan, baik untuk proteksi terhadap petir maupun untuk pentanahan titik netral sistem tenaga listrik. Sistem pentanahan memiliki nilai yang baik adalah nilai impedansi yang sesuai kebutuhan sistem pentanahan. Pada penelitian ini pengujian sistem pentanahan dibuat secara modifikasi yaitu menggunakan injeksi arus AC dengan modifikasi batang pentanahan yang bervariasi ukuran diameternya dan diberi injeksi frekuensi dari 50 Hz – 2MHz serta menggunakan treatment pasir. Metoda pengukuran yang digunakan adalah metoda 3 titik vertikal (driven rod). Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh nilai impedansi riil dan imajiner dari impedansi elektroda pentanahan yang dipengaruhi oleh variasi diameter tabung berisi pasir yang menggunakan metoda 3 titik serta mengetahui pengaruh injeksi arus AC pada karakteristik impedansi pentanahan. Dari hasil pengujian dan perhitungan didapat nilai impedansi riil, sehingga diperoleh hasil pada ketiga diameter yang memiliki nilai impedansi sesuai standard sistem pentanahan yaitu 5 Ω . Nilai standard tersebut mengacu pada Persyaratan Umum Instalasi atau PUIL 2000. Pada impedansi imajiner terdapat sifat tanah lebih banyak bersifat induktif dibandingkan kapasitif.

Kata kunci: Impedansi, Arus AC, Frekuensi, Induktif, Kapasitif.

ABSTRACT

Good grounding system is indispensable, both for protection against lightning or to neutral point of power system grounding. In the grounding system, it has a good grounding value if the value of the corresponding to the impedance grounding system. In this study testing, the grounding system modification was made by using AC current injection with varying modifications grounding rod diameter size, the injection frequency of 50 Hz – 2 MHz and using sand treatment. The method of measurement was used vertical 3-point method (driven rod). This study aimed to obtain the real and imaginary impedance values of the grounding electrode impedance that affected by variations in the diameter of the tube filled with sand that use 3-point method and determine the influence of AC current injection on earth impedance characteristics. From the results of tests and calculations, it was obtained real impedance values, in order to obtain results in the third diameter that having values correspond to the impedance grounding system, that was 5 Ω standard. The standard value referred to the General Requirements Installing or PUIL 2000, as well as the imaginary impedance properties of soil were more inductive than capacitive.

Keywords: Impedance , AC currents , frequency , inductive , capacitive .

1. PENDAHULUAN

Sambaran petir merupakan salah satu penyebab gangguan yang cukup banyak terjadi dalam sistem tenaga listrik dan paling sering mengenai saluran transmisi. Sambaran petir ini merupakan sumber arus impuls berfrekuensi tinggi yang dampaknya akan sangat fatal apabila mengenai peralatan listrik. Oleh karena itu diperlukan suatu sistem perlindungan yang baik sehingga dampak buruk yang diakibatkan oleh sambaran petir tersebut dapat dikurangi dan dihilangkan. Sistem perlindungan pada saluran transmisi dan gedung bertingkat dilakukan dengan pembuangan arus petir ke tanah melalui sistem pentanahan. Sistem pengentanan yang baik sangat diperlukan, baik untuk proteksi terhadap petir maupun untuk pengentanan titik netral sistem tenaga listrik. Sistem pengentanan tersebut sering mendapat injeksi arus impuls dengan frekuensi tinggi (petir) atau bentuk arusnya berubah terhadap waktu.

Permasalahan yang penting dalam suatu pentanahan baik untuk penangkal petir atau pentanahan netral sistem tenaga adalah seberapa besar impedansi sistem pentanahan tersebut. Besar impedansi pentanahan tersebut sangat dipengaruhi oleh banyak faktor, baik faktor internal maupun eksternal. Yang dimaksud dengan faktor internal meliputi (diameter dan panjangnya), resistivitas relatif tanah, dan konfigurasi sistem pentanahan. Sedangkan yang dimaksud dengan faktor eksternal meliputi bentuk arus (pulsa, sinusoidal, searah) dan frekuensi arus yang mengalir. Hambatan jenis tanah yang akan menentukan impedansi pentanahan dipengaruhi oleh beberapa faktor, yang meliputi temperatur, besar arus, dan kandungan air, kelembaban serta cuaca (**Hutauruk, 1991**). Dengan kondisi lingkungan terbatas (seperti impedansi tanah tinggi, lahan sempit, adanya peralatan berfrekuensi tinggi) merupakan salah satu faktor untuk penentuan sistem pentanahan yang akan digunakan. Untuk mengatasi hal tersebut, dapat dilakukan dengan cara memodifikasi sistem pentanahan yang akan digunakan (**Sylvia, 2015**).

2. TINJAUAN PUSTAKA SISTEM PENTANAHAN

2.1 Sistem Pentanahan

Perkembangan beban listrik terus meningkat setiap saat mengakibatkan sistem tenaga listrik berkembang menyesuaikan kebutuhan baik kapasitas, panjang jaringan maupun tegangannya, sehingga arus gangguan yang mengalir ke tanah juga lebih besar dan busur listrik yang ditimbulkan tidak dapat padam dengan sendirinya. Hal ini dapat menimbulkan tegangan lebih transien yang sangat tinggi dan dapat membahayakan sistem, untuk itu diperlukan rancangan suatu sistem yang dapat mengatasi gangguan tersebut yaitu grounding sistem atau sistem pentanahan (**Hutauruk, 1991**). Sampai dengan saat ini orang mengukur hambatan pentanahan hanya dengan menggunakan earth tester yang prinsipnya mengalirkan arus searah ke dalam sistem pentanahan, sedangkan kenyataan yang terjadi suatu sistem pentanahan tersebut tidak pernah dialiri arus searah, karena biasanya berupa sinusoidal (AC).

Perilaku tahanan sistem pentanahan sangat tergantung pada frekuensi (dasar dan harmonisanya) dari arus yang mengalir ke sistem pentanahan tersebut. Dalam suatu pentanahan baik penangkal petir atau pentanahan netral sistem tenaga adalah berapa besar impedansi sistem pentanahan tersebut. Besar impedansi pentanahan tersebut sangat dipengaruhi oleh banyak faktor (**Anggoro, 2002**).

1. Faktor Internal meliputi :

- a. Dimensi konduktor pentanahan (diameter dan panjangnya).
- b. Resistivitas (nilai tahanan) relatif tanah.
- c. Konfigurasi sistem pentanahan.

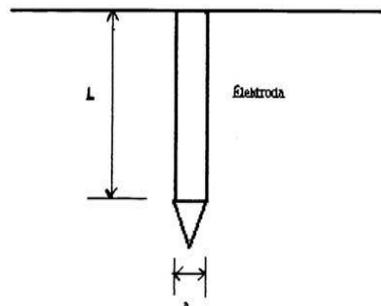
2. Faktor Eksternal meliputi :

- a. Bentuk arusnya (pulsa, sinusoidal, searah).
- b. Frekuensi yang mengalir ke dalam sistem pentanahan.

Dalam sistem pentanahan memiliki nilai pentanahan yang baik adalah nilai impedansi yang sesuai kebutuhan sistem pentanahan. Semakin kecil nilai tahanan maka semakin baik terutama untuk pengamanan personal dan peralatan, beberapa standart yang telah disepakati adalah bahwa saluran tranmisi substasion harus direncanakan sedemikian rupa sehingga nilai tahanan pentanahan tidak melebihi 1Ω untuk tahanan pentanahan pada komunikasi sistem/ data dan maksimum harga tahanan yang diijinkan 5Ω pada gedung / bangunan serta NEC menyatakan bahwa impedansi sistem ke tanah besarnya kurang dari 25Ω , hal ini tercantum dalam NEC 250,56. Banyak organisasi mengeluarkan rekomendasi dan standart untuk sistem pentanahan sebagai proteksi seperti *NEC (National Electric Code)*, *ANSI (American National Standart Institute)*, *TIS (Telecommunications Industry Standard)* dan *IEEE*. Nilai resistansi pengentanahan ini tergantung dari fungsinya, untuk pentanahan sistem tenaga biasanya dipisah antara netral dan body sedangkan untuk mengamankan peralatan biasanya menggunakan pentanahan dengan nilai impedansi yang besar dan untuk mengamankan manusia digunakan impedansi kecil.

2.2 Sistem Pentanahan Konfigurasi Vertikal

Susunan sebenarnya elektroda pentanahan dapat dibedakan menjadi dua, yaitu pentanahan elektroda yang ditanam secara vertikal dan pentanahan elektroda yang ditanam secara horizontal. Untuk daerah – daerah yang tanahnya keras dan berbatu lebih praktis kalau menggunakan pentanahan secara horizontal karena tidak memerlukan penanaman yang dalam, tetapi memerlukan lebih banyak batang pentanahan sehingga biayanya akan lebih besar. Sedangkan untuk daerah yang struktur tanahnya tidak terlalu keras, pentanahan secara vertikal dapat dipakai karena memungkinkan untuk menanam elektroda lebih dalam ke dalam tanah sehingga tahanan pentanahan dapat diperkecil (**Janardana, 2005; Hutaauruk, 1991**).



Gambar 1. Pentanahan satu batang elektroda ditanam secara vertikal

Gambar 1 memperlihatkan teori sistem pentanahan konfigurasi vertikal grounding rod, resistansi (R) pada elektroda yang ditanam dalam tanah dapat dihitung dengan menggunakan rumus.

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

Dimana :

ρ = resistansi jenis tanah (ohm-m)

a = jari-jari elektroda batang (cm)

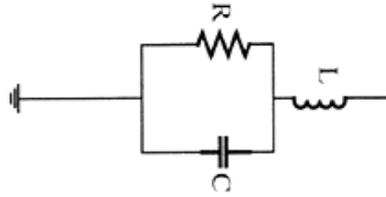
π = 3,14 atau (22/7)

l = panjang elektroda batang (m)

$R_{\text{Pentanahan}}$ = resistansi pentanahan (ohm)

2.3 Pemodelan Rangkaian Ekuivalen Sistem Pentanahan Batang Elektroda

Rangkaian ekuivalen pentanahan dinyatakan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian ekuivalen dari sistem pentanahan batang elektroda

Gambar 2 menunjukkan ketika batang tanah diinjeksikan arus frekuensi tinggi, pemodelan rangkaian ekuivalen terdiri dari induktor (L) yang diserikan dengan resistor (R) dan kapasitor (C) yang diparalel. Model tersebut didasarkan kenyataan bahwa impedansi pentanahan tidak bersifat sebagai tahanan murni tetapi juga berperilaku sebagai induktansi (L) dan kapasitansi (C). Tahanan murni (R) lebih banyak disebabkan karena adanya sifat resistivitas tanah yang dimana sistem pentanahan tersebut ditanam. Induktansi (L) lebih dipengaruhi oleh panjang konduktor yang ditanam dan sifat permeabilitas tanah (**Supardi, 2004**).

Seperti halnya sifat induktansi yang lain, maka semakin panjang konduktor yang ditanam maka semakin besar induktansi sistem pentanahannya. Impedansi akan bernilai rasional bila $Z \cos \varphi$ bernilai positif. Impedansi bersifat resistif bila terjadi pada frekuensi resonansi yang dimana nilai imajiner bernilai nol. Impedansi bersifat induktif apabila $Z \sin \varphi$ bernilai positif, dan apabila $Z \sin \varphi$ bernilai negatif maka bersifat kapasitif. Resonansi terjadi bila tegangan V dan I berada pada fasa yang sama. Secara perhitungan, nilai impedansi pentanahan dapat dihitung dengan rangkaian ekuivalen tanah seperti pada Gambar 2, maka persamaan didapat (**Supardi, 2004; Anggoro, 2007**).

$$Z = R_{\text{real}} + j\text{Imajiner} = Z \cos \varphi + j \cdot Z \sin \varphi \quad (2)$$

$$Z = j\omega L + \left(\frac{\frac{R}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \right) \quad (3)$$

$$Z = j\omega L + \frac{R}{j\omega RC + 1} \quad (4)$$

$$Z = \frac{-\omega^2 RLC + j\omega L + R}{j\omega RC + 1} \quad (5)$$

$$Z = \frac{R + j(\omega L + \omega^3 R^2 C^2 L - \omega C R^2)}{(\omega RC)^2 + 1} \quad (6)$$

$$Z = \frac{R + j\omega(L - R^2 C + (\omega RC)^2 L)}{1 + (\omega RC)^2} \quad (7)$$

$$Z = \frac{R}{1 + (\omega RC)^2} + j\left(\omega L - \frac{\omega R^2 C}{1 + (\omega RC)^2}\right) \quad (8)$$

$$Z \cos \varphi = \frac{R}{1 + (\omega RC)^2} \quad (9)$$

$$Z \sin \varphi = \omega L - \frac{\omega R^2 C}{1 + (\omega RC)^2} \quad (10)$$

2.4 Metode 3 Titik (*Driven Rod*)

Metode 3 titik atau *driven rod* merupakan metode yang digunakan untuk mengukur pentanahan. Pengukuran tersebut menggunakan elektroda batang yang akan diukur (*ground*), dan tambahan 2 batang elektroda sebagai elektroda bantu (potensial dan *current*) untuk pengukuran. Pada 3 titik tersebut terdapat titik elektroda pentanahan, titik arus balik, dan titik potensial. Dua elektroda bantu (potensial dan *current*) ditanam ke dalam bumi

segaris dan sejajar dengan elektroda (*ground*). Untuk mendapatkan nilai R, maka arus akan diinjeksikan dan tegangan diukur seperti pada Gambar 8. Injeksi arus tersebut didapatkan melalui generator frekuensi/sinyal. Jarak elektroda (*ground*) yang terukur dan elektroda bantu (*potential*) adalah 0,62% dari jarak antara elektroda terukur dengan elektroda terluar. Tegangan yang diukur antara a dengan b maka didapatkan tahanan pentanahan yaitu V/I (Hakim, 2014).

Pengukuran metode tiga titik ini dilakukan beberapa kali dengan penanaman elektroda tengah di lokasi yang berbeda antara *Ground* dan *Potensial*. Titik *current* adalah nilai resistansi yang terukur, serta titik *ground* ke *potential* adalah nilai potensial terukur. Agar mendapatkan hasil pengukuran yang akurat, elektroda harus berada pada jarak yang cukup jauh satu sama lain sehingga dapat meminimalkan tahanan timbal balik. Jarak penempatan titik yang tidak tepat akan terjadi *overlapping* dan hasil pengukuran tidak akurat. Jarak yang direkomendasikan pengukuran antara *ground* dan *potential* adalah 62% dari *ground* ke *current*.

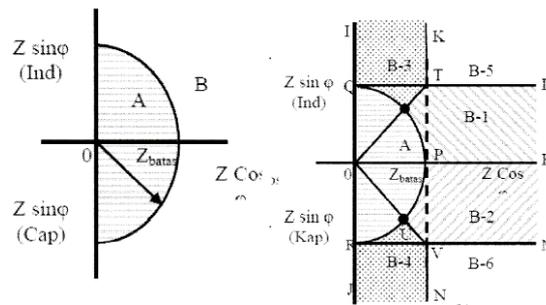
2.5 Metode Diagnosis Pada Impedansi Pentanahan.

Pada metode diagnosis impedansi pentanahan dijelaskan bahwa sistem pentanahan memiliki fungsi untuk mengamankan sistem tenaga listrik, peralatan dari arus petir. Metode diagnosis impedansi digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik impedansi dari sistem yang digunakan (Hanifah, 2014). Pada Tabel 1 dapat dijelaskan fungsi pentanahan dan arus yang harus diamankan serta frekuensi kerja pada sistem masing-masing dan Z_{batas} .

**Tabel 1. Rentang arus, frekuensi kerja , dan Z_{batas}
(Sumber: Anggoro,2012)**

| Fungsi Pentanahan | Arus (A) | Frekuensi (Hz) | Z_{batas} (Ω) |
|---|-----------------|-----------------------|---|
| Sistem Tenaga Listrik | ≤ 15 | 50 | ≤ 3 |
| Equipment Body | ≤ 100 | 50 | $\leq 0,5$ |
| Sistem Netral | 0 – 50K | 50 | Low – High |
| Peralatan medis, elektronik, dan telekomunikasi | < 4 | $< 10\text{MHz}$ | ≤ 50 |
| Proteksi Petir | 0 – 100K | $< 1\text{MHz}$ | ≤ 1 |

Persamaan (2) menunjukkan bahwa perhitungan impedansi pentanahan terdiri dari komponen riil dan imajiner. Hasil penelitian di laboratorium dan lapangan untuk semua jenis konfigurasi sistem pentanahan seperti : vertikal, horizontal, grid, mesh, dan kombinasi, didapatkan parameter impedansi dan sudut fasa. Untuk mengidentifikasi karakteristik impedansi maka dibuat diagram diagnosis seperti Gambar 3.

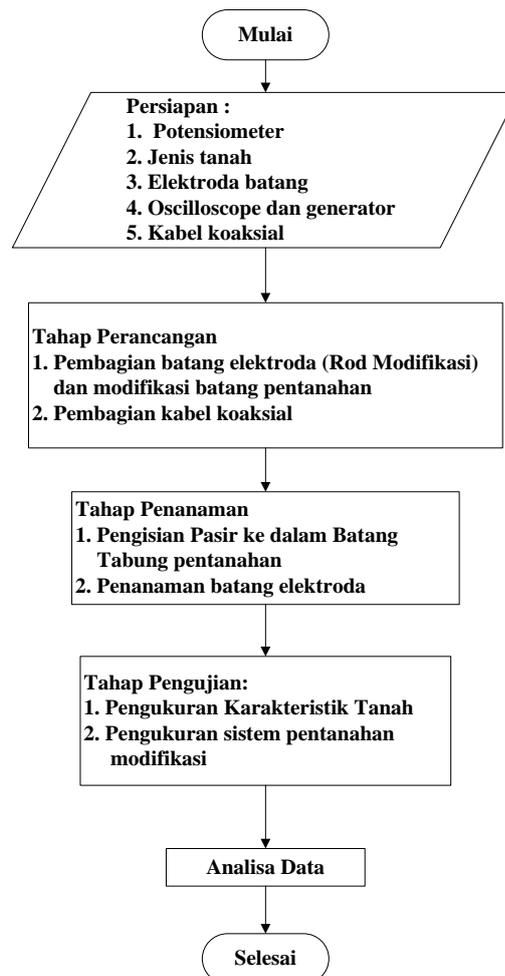


Gambar 3. Diagram diagnosis impedansi pentanahan

Gambar 3 merupakan diagram diagnosis yang menjelaskan bahwa Z_{batas} ditentukan berdasarkan fungsi dari pentanahan seperti pengamanan peti, pentanahan sistem serta alat telekomunikasi. Vektor impedansi merupakan resultan dari $Z \cos \varphi$ dan $Z \sin \varphi$. Impedansi (Z) yang baik berada pada area Z_{batas} . Bila tidak berada pada area Z_{batas} maka dibutuhkan perlakuan khusus pada tanah agar memenuhi kriteria pentanahan yang baik (**IEEE Std 142TM, 2007**).

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 *Flowchart* Tahapan Penelitian Sistem Pentanahan Modifikasi



Gambar 4. *Flowchart* tahapan penelitian sistem pentanahan modifikasi

3.2 Tahap Persiapan

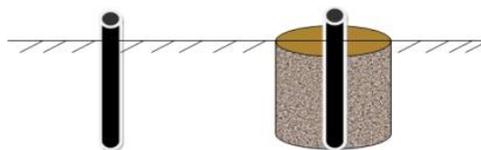
Tahapan pertama adalah tahapan persiapan yang dimana mempersiapkan alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian. Berikut spesifikasi serta fungsi alat untuk pengujian:

1. Potensiometer yang berfungsi untuk sebagai pengatur resistansi pengukuran dan membuat tegangan jatuh dari arus yang akan diukur. Potensio yang digunakan adalah 50 k Ω serta berbentuk rotary.
2. Jenis Tanah yang digunakan adalah pasir dari gunung di Garut, sedangkan tanah yang berada di luar silinder/tabung berjenis pasir. Akan tetapi untuk treatment penelitian sebenarnya tidak harus menggunakan pasir tetapi dapat menggunakan media treatment yang lainnya.
3. Elektroda batang adalah elektroda dari pipa atau besi baja profil yang dipancarkan ke dalam tanah. Pada penelitian ini elektroda batang yang digunakan adalah berjenis tembaga. Elektroda batang tersebut digunakan sebagai pengukuran. Elektroda batang ini memiliki ketebalan 0,8 mm dengan panjang tetap 50 cm. Fungsi elektroda batang ini sebagai penghantar.
4. Osiloskop digital adalah untuk mengukur besarnya tegangan jatuh dan mengukur beda fasa antara sinyal tegangan dan sinyal arus.
5. Generator sinyal/frekuensi adalah untuk memberikan arus injeksi ke sistem pentanahan dalam rentang frekuensi yang ditentukan.
6. Kabel Koaksial untuk alat uji sebagai penghubung antar batang elektroda ke oscilloscope, tahanan, serta generator sinyal. Keunggulan pemakaian kabel koaksial ini adalah dapat ditanam di dalam tanah sehingga biaya perawatan lebih rendah, dan karena menggunakan penutup isolasi maka kecil kemungkinan terjadi interferensi dengan sistem lain, serta menghindari pengaruh medan elektromagnetik dari luar.

3.3 Tahap Perancangan Sistem Pentanahan Modifikasi

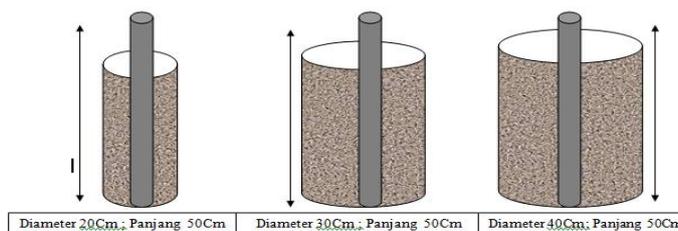
1. Pembagian Batang Elektroda (Rod Modifikasi) dan Modifikasi Batang Pentanahan

Pada perancangan batang pentanahan ini menggunakan modifikasi batang pentanahan konfigurasi vertikal yang pada umumnya memiliki panjang sekitar 1,34 m dengan diameter 10 mm. Modifikasi batang tabung pentanahan terbuat dari plat besi yang dibentuk menjadi tabung. Batang tabung pentanahan diberi isian berupa pasir sesuai pemilihan jenis tanah yang ditentukan. Menggunakan batang pentanahan yang berbentuk silinder adalah untuk mengetahui karakteristik impedansi yang bervariasi diameternya dan pasir di dalam tabung tidak tercampur oleh tanah serta pasir yang didalam tabung menempati ruang sesuai bentuk tabung dan panjangnya. Modifikasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Perbedaan batang pentanahan (a) Umum (b) Modifikasi

Gambar tersebut menjelaskan adanya perbedaan pada batang pentanahan yang secara umum dan yang di modifikasi. Pada batang pentanahan terdapat 3 variasi diameter yang berbeda yaitu 20 cm, 30 cm, dan 40 cm.



Gambar 6. Variasi diameter batang pentanahan yang dimodifikasi

2. Pembagian Kabel koaksial

Kabel koaksial yang digunakan adalah memiliki panjang 50 m akan tetapi kabel tersebut di bagi menjadi 3 ukuran yaitu 25 cm, 15 cm, dan 10 cm. Kabel tersebut digunakan sebagai penghubung antar peralatan uji yang digunakan. Pada ujung kiri kabel dipasang pencapit yang digunakan untuk mencapit batang elektroda pada pentanahan serta pada ujung kanan dipasang probe female yang akan dihubungkan ke male pada box potensiometer.

3.4 Tahap Penanaman

1. Pengisian Pasir ke Dalam Batang Tabung Pentanahan

Pengisian pasir ke dalam batang tabung pentanahan ke dalam 3 variasi tabung modifikasi berbahan plat besi yang berukuran berbeda yaitu berdiameter 20 cm, 30 cm, dan 40 cm. Pengisian pasir tersebut harus sesuai diameter tabung dan harus penuh, kemudian diberi air serta di diamkan selama 2 hari agar pasir yang ada di dalam tabung tersebut bersifat homogen. Terdapat dua sampel tanah yaitu pasir sebagai treatment dan tanah. Pasir tersebut diambil dari gunung di Garut yang akan digunakan sebagai isian tanah ke dalam silinder/tabung dan tanah di lingkungan kampus ITB sebagai tanah luar silinder.



Gambar 7. (a). Titik 5 diameter 20 cm ; (b) Titik 7 diameter 30 cm ; (c) Titik 9 diameter 40 cm.

2. Penanaman Batang Elektroda

Penanaman batang elektroda dilakukan di sebelah utara Gedung Kerma PLN-ITB dan modifikasi tabung batang pentanahan juga di lokasi yang sama. Jenis batang elektroda tersebut adalah besi baja profil dengan ketebalan 0,8 mm.

3.5 Tahap Pengujian

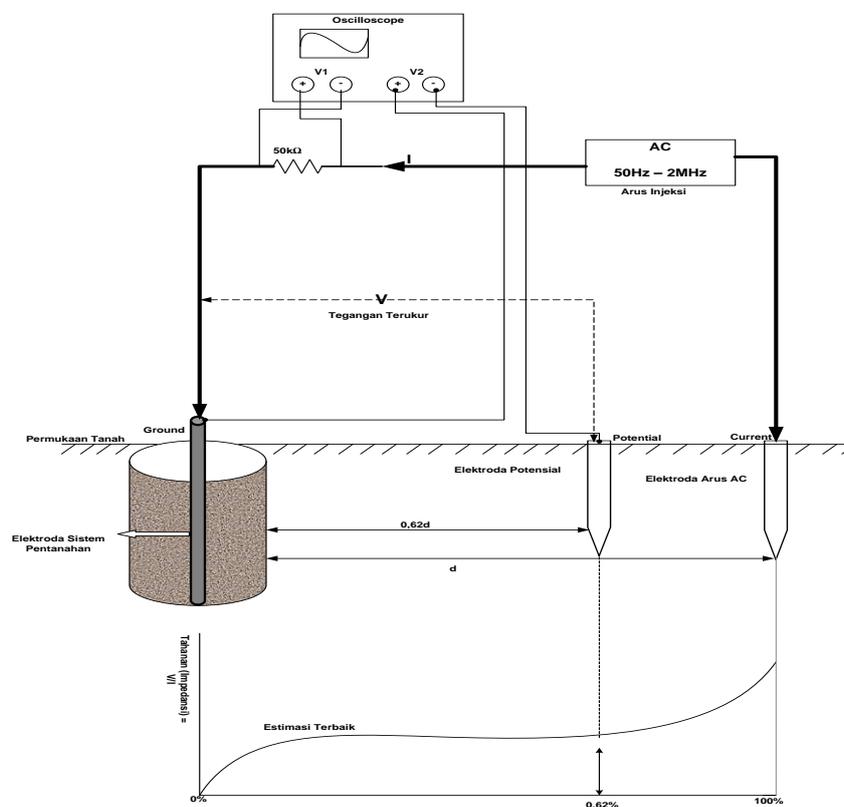
1. Pengukuran Karakteristik Tanah

Pengujian karakteristik tanah bertujuan untuk mengetahui karakteristik fisik tanah. Pengujian dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah ITENAS. Pengukuran karakteristik tanah dilakukan pengujian *index properties*, dan ukuran partikel tanah. Pengujian ukuran partikel dilakukan dengan analisa saringan dan analisa hidrometer yang bertujuan untuk mengetahui komposisi serta kadar air yang bertujuan untuk melihat berapa persen kadar air dengan perbandingan antara berat basah dan berat kering yang terkandung dalam tanah. Pengujian *index properties* bertujuan untuk mengetahui kandungan zat tanah, berat jenis, dan berat

volume. Setelah mendapat hasil pengujian maka dapat dilihat dalam diagram diagnosis susunan tanah/segitiga tekstur tanah.

2. Pengukuran Sistem Pentanahan

Pada penelitian ini pengukuran sistem pentanahan yang telah di modifikasi menggunakan metode 3 titik (driven rod). Metode 3 titik tersebut berfungsi untuk mengukur pentanahan yang dimana terdapat 3 titik. Prinsip kerja pada Gambar 8. dapat dijelaskan, sistem pengujian pentanahan ini menggunakan metoda 3 titik yang berkonfigurasi vertikal yang disusun secara seri. Metode ini juga menggunakan variasi diameter yang berbeda ukuran dengan treatment pasir. Pada sistem pengujian ini pentanahan tersebut diinjeksi oleh frekuensi AC dari range 50 Hz hingga 2 MHz. Dari sumber AC mensupply ke generator sinyal yang dimana generator sinyal tersebut berfungsi sebagai memberi injeksi arus AC dengan rentang frekuensi yang ditentukan jadi dengan kata lain menginjeksi arus berupa frekuensi. Arus yang telah diinjeksikan mengalirkan arus ke tahanan murni yang dimana pada tahanan murni tersebut membuat tegangan jatuh dari arus yang akan diukur kemudian mengalir ke elektroda pentanahan ground kemudian arus sebaran akan mengalirkan ke titik potential dan titik current yang mengalir melalui tahanan injeksi. Dan hasil pengukuran pentanahan tersebut ditampilkan di osiloskop berupa sinyal AC. Sinyal CH₁ pada osiloskop menampilkan hasil pengukuran sinyal tegangan pada tahanan 50 k Ω , dimana tegangan pada tahanan ini digunakan untuk mengukur arus maka disebut sinyal arus pada (V_1), hasil sinyal tersebut adalah arus yang mengalir antara ground dengan *current* sedangkan pada sinyal CH₂ membaca tegangan sistem pentanahan atau beda potensial antara ground dan titik *potential* (V_2). Penelitian ini dilakukan dengan mengubah frekuensi dari 50 Hz sampai dengan 2MHz. Data yang diambil dalam penelitian ini adalah nilai tegangan pada sistem pentanahan (V_2) dan perbedaan sudut fasa yang dapat dilihat dari perbedaan fasa antara tegangan pada tahanan 50 k Ω (V_1) dengan tegangan pada sistem pentanahan (V_2).



Gambar 8. Rangkaian pengukuran pentanahan metode 3 titik modifikasi

3.6 Hasil Pengujian Dan Analisis

Pengujian dan analisis dari tentang sistem pentanahan modifikasi variasi diameter tabung dengan konfigurasi vertikal terdiri dari :

1. Pengujian dan analisis karakteristik tanah.
2. Pengujian dan analisis sistem pentanahan modifikasi.

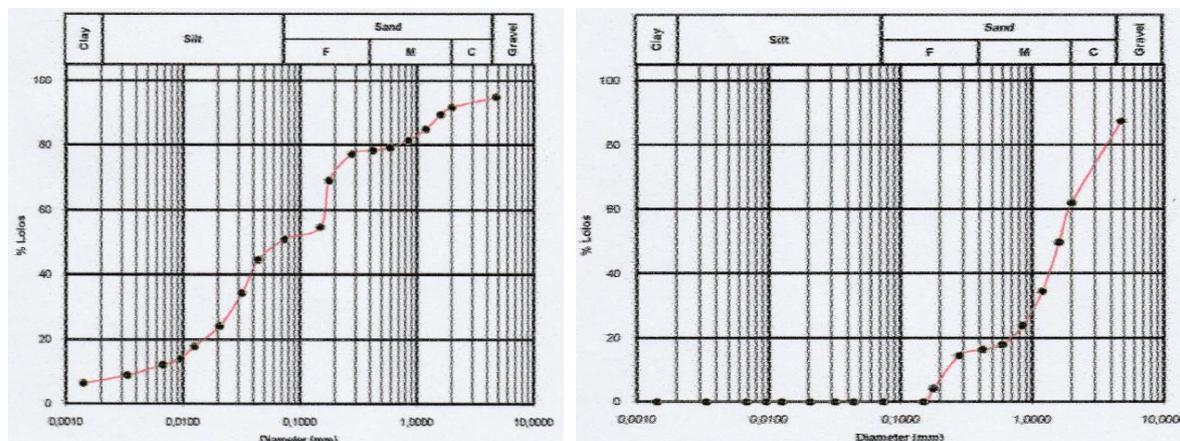
3.7 Pengujian dan Analisis Karakteristik Tanah

Dalam mendapatkan hasil pengujian tersebut dilakukan tiga pengujian , yaitu *index properties*, kadar air, dan *grain size* (ukuran butir). *Index properties* yang bertujuan untuk mengetahui volume zat tanah, *specific gravity*, *rasio void*, porositas, derajat saturasi, berat jenis basah, dan berat jenis kering. Hasil pengujian *index properties* tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik fisik tanah yang berdasarkan pengujian di Laboratorium Mekanika ITENAS Bandung

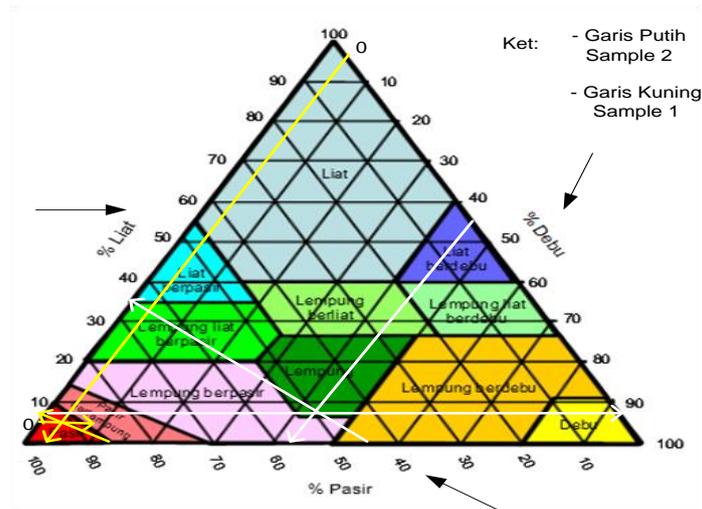
| NO. | Index Properties | Sample 1(Pasir) | Sample 2 (Tanah) |
|-----|---|--|---|
| 1. | Komposisi | 1. Gravel (Batu) : 12,487% 2. Sand (Pasir) : 87,51% 3. Silt (Lanau) : 0,00% 4. Clay (Lempung) : 0,00% | 1. Gravel (Batu) : 5,073% 2. Sand (Pasir) : 49,97% 3. Silt (Lanau) : 43,3% 4. Clay (Lempung) : 7,64% |
| 2. | Kadar Air | 14,02% | 43,83% |
| 3. | <i>Dry Density</i> | 1,295 gr/cm ³ | 1,047 gr/cm ³ |
| 4. | <i>Specific Gravity (Gs)</i> | 2,64 | 1,71 |
| 5. | <i>Void Ratio (e)</i> | 0,79 | 0,14 |
| 6. | Porosity (n) | 0,44 | 0,12 |
| 7. | Derajat Saturasi (<i>Degree of Saturation</i>) | 0,03% | 0,12% |

Pada Tabel 2 terdapat 2 sampel yang dimana sampel 1 adalah pasir yang berasal dari gunung di Garut sedangkan sample 2 adalah tanah yang terdapat di perkarangan Gedung Kerma – ITB. Kadar air yang dihasilkan cukup tinggi dikarenakan pada saat pengujian dilakukan saat musim hujan, dan curah hujan yang terjadi di Bandung cukup tinggi sehingga hasil kadar air memungkinkan cukup tinggi. Untuk pengujian *grain size* dilakukan dengan *hydrometer* digunakan untuk mengukur partikel dengan ukuran diameter <0,075 mm. Yang menggunakan pengujian hidrometer yaitu *silt* dan *clay*. Sedangkan gravel dan sand menggunakan analisa saringan. Hasil analisa komposisi tanah 2 sampel yang telah diuji menggunakan *hydrometer* dapat dilihat dalam Gambar 9.



Gambar 9. Grafik hasil pengujian ukuran butir (*grain size analysis*) (a.) Tanah ITB (b.) Pasir

Dari hasil grafik *grain size analysis* yang diuji menggunakan analisa saringan dan *hydrometer* dapat diperoleh susunan komposisi tanah yang terdapat pada Tabel 2. Untuk mengetahui kategori jenis tanah yang digunakan dapat dilihat pada diagram diagnosis penyusun tanah pada Gambar 10.



Gambar 10. Diagram diagnosis penyusun tanah

Diagram diagnosis tanah (segitiga tekstur tanah) adalah keadaan tingkat kehalusan tanah terjadi karena terdapatnya perbedaan komposisi kandungan fraksi. Untuk mengetahui cara penentuan tekstur tanah melalui diagram diagnosis tersebut adalah pada sampel 1 yaitu memiliki komposisi partikel pasir 87,51%, *silt* 0,00%, dan *clay* 0,00%. Dari segitiga tekstur dapat dilihat bahwa sudut kanan bawah segitiga menggambarkan 0% pasir dan sudut kirinya 100% pasir. Temukan titik 87,51% pasir pada sisi dasar segitiga dan dari titik ini tarik garis sejajar dengan sisi kanan segitiga (ke kiri atas). Kemudian temukan titik 0,00% *silt* pada sisi kanan segitiga. Dari titik ini tarik garis sejajar dengan sisi kiri segitiga, sehingga garis ini berpotongan dengan garis pertama. Kemudian temukan titik 0,00% *clay* dan tarik garis ke kanan sejajar dengan sisi dasar segitiga sehingga memotong dua garis sebelumnya. Dari perpotongan ketiga garis ini, ditemukan bahwa tanah ini mempunyai kelas tekstur "pasir" kemudian pada sampel 2 dapat dilihat hasil komposisi penyusun partikel pasir 43,97%, *silt* 43,3%, dan *clay* 7,64% maka ditemukan bahwa tanah sample 2 mempunyai kelas tekstur "lempung".

3.8 Pengujian dan Analisis Sistem Pentanahan Modifikasi

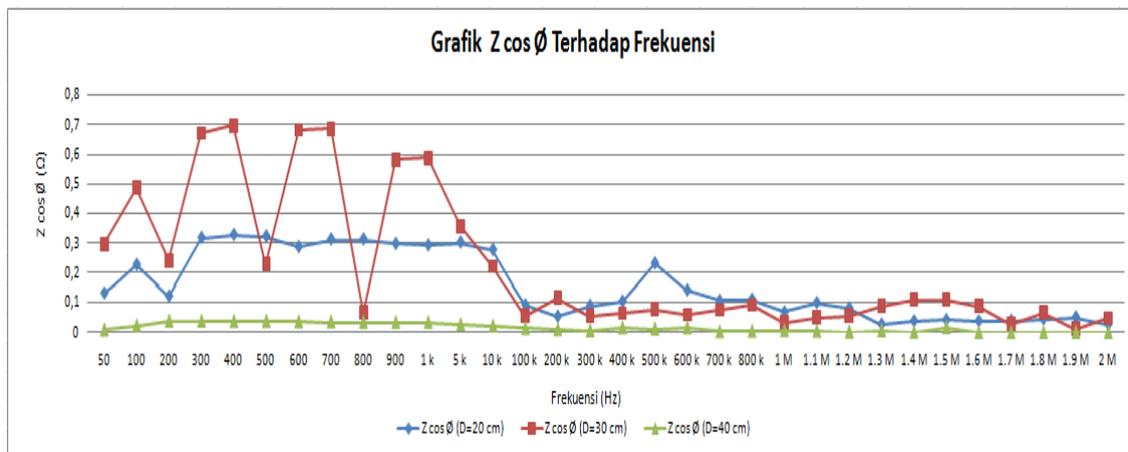
Pada hasil pengujian sistem pentanahan modifikasi menggunakan sistem pentanahan vertikal metode 3 titik. Modifikasi pentanahan menggunakan batang elektroda yang dimasukkan ke dalam sebuah tabung yang diberi isian pasir hingga penuh dan bersifat homogen. Sedangkan tanah yang diluaran tabung menggunakan tanah dari perkarangan ITB. Sistem pengukuran ini menggunakan injeksi arus AC yang diatur frekuensinya menggunakan generator sinyal serta menggunakan variasi diameter tabung yaitu 20 cm, 30 cm, 40 cm dan panjang tetap 50 cm. Hasil pengujian dicantumkan pada tabel dan dirubah ke dalam grafik.

Tabel 3. Hasil pengujian pentanahan modifikasi pada diameter (d) = 20 cm di titik 7 ; 30 cm di titik 5; 40 cm di titik 9

| F (Hz) | Z (Ω) | θ (°) | Z _{cos θ} | Z _{sin θ} | SIFAT | F (Hz) | Z (Ω) | θ (°) | Z _{cos θ} | Z _{sin θ} | SIFAT | F (Hz) | Z (Ω) | θ (°) | Z _{cos θ} | Z _{sin θ} | SIFAT |
|--------|--------|--------|--------------------|--------------------|-----------|--------|--------|---------|--------------------|--------------------|-----------|--------|---------|--------|--------------------|--------------------|-----------|
| 50 | 0,1735 | -38 | 0,135 | 0,1025 | Kapasitif | 50 | 0,3735 | -36,95 | 0,3 | -0,2275 | Kapasitif | 50 | 0,023 | -60 | 0,01125 | -0,0195 | Kapasitif |
| 100 | 0,2975 | -40,5 | 0,23 | 0,185 | Kapasitif | 100 | 0,5475 | -28,45 | 0,49 | -0,226 | Kapasitif | 100 | 0,0325 | -38 | 0,025 | -0,0195 | Kapasitif |
| 200 | 0,125 | 0 | 0,125 | 0 | Resistif | 200 | 0,771 | -15,325 | 0,245 | -0,195 | Kapasitif | 200 | 0,04 | 0 | 0,04 | 0 | Resistif |
| 300 | 0,32 | 0 | 0,32 | 0 | Resistif | 300 | 0,7165 | -21,92 | 0,675 | -0,148 | Kapasitif | 300 | 0,0395 | 0 | 0,0395 | 0 | Resistif |
| 400 | 0,33 | 0 | 0,33 | 0 | Resistif | 400 | 0,7 | 0 | 0,7 | 0 | Resistif | 400 | 0,0385 | 0 | 0,0385 | 0 | Resistif |
| 500 | 0,325 | 0 | 0,325 | 0 | Resistif | 500 | 0,2315 | 0 | 0,2315 | 0 | Resistif | 500 | 0,039 | 0 | 0,039 | 0 | Resistif |
| 600 | 0,29 | 0 | 0,29 | 0 | Resistif | 600 | 0,685 | 0 | 0,685 | 0 | Resistif | 600 | 0,0375 | 0 | 0,0375 | 0 | Resistif |
| 700 | 0,315 | 0 | 0,315 | 0 | Resistif | 700 | 0,6875 | 0 | 0,6875 | 0 | Resistif | 700 | 0,037 | 0 | 0,037 | 0 | Resistif |
| 800 | 0,315 | 0 | 0,315 | 0 | Resistif | 800 | 0,721 | -30 | 0,0695 | 0,19 | Kapasitif | 800 | 0,036 | 0 | 0,036 | 0 | Resistif |
| 900 | 0,3 | 0 | 0,3 | 0 | Resistif | 900 | 0,7225 | -36 | 0,585 | -0,42 | Kapasitif | 900 | 0,0355 | 0 | 0,0355 | 0 | Resistif |
| 1 k | 0,295 | 0 | 0,295 | 0 | Resistif | 1 k | 0,7085 | -27 | 0,59 | -0,3725 | Kapasitif | 1 k | 0,0355 | 0 | 0,0355 | 0 | Resistif |
| 5 k | 0,305 | 0 | 0,305 | 0 | Resistif | 5 k | 0,468 | -38 | 0,36 | -0,285 | Kapasitif | 5 k | 0,029 | 0 | 0,029 | 0 | Resistif |
| 10 k | 0,28 | 0 | 0,28 | 0 | Resistif | 10 k | 0,302 | -39,175 | 0,225 | -0,19 | Kapasitif | 10 k | 0,028 | -30,85 | 0,0235 | -0,0135 | Kapasitif |
| 100 k | 0,13 | -42,5 | 0,095 | -0,087 | Kapasitif | 100 k | 0,0605 | 20,085 | 0,0565 | 0,0205 | Induktif | 100 k | 0,0195 | -30 | 0,016 | -0,0094 | Kapasitif |
| 200 k | 0,07 | 22,5 | 0,0565 | 0,031 | Induktif | 200 k | 0,1305 | 21,16 | 0,118 | 0,0445 | Induktif | 200 k | 0,013 | 17,18 | 0,012 | 0,0038 | Resistif |
| 300 k | 0,093 | 0 | 0,093 | 0 | Resistif | 300 k | 0,074 | 38,95 | 0,0575 | 0,046 | Induktif | 300 k | 0,012 | -38,55 | 0,0087 | -0,00725 | Kapasitif |
| 400 k | 0,129 | 33 | 0,1075 | 0,07 | Induktif | 400 k | 0,067 | 0 | 0,067 | 0 | Resistif | 400 k | 0,0175 | 0 | 0,0175 | 0 | Resistif |
| 500 k | 0,235 | 0 | 0,235 | 0 | Resistif | 500 k | 0,0835 | 10 | 0,081 | 0,0135 | Induktif | 500 k | 0,0205 | 42,5 | 0,0145 | 0,0135 | Induktif |
| 600 k | 0,235 | 51,4 | 0,145 | 0,1815 | Induktif | 600 k | 0,068 | 25,7 | 0,061 | 0,029 | Induktif | 600 k | 0,021 | 30,85 | 0,0175 | 0,01045 | Induktif |
| 700 k | 0,185 | 51,4 | 0,11 | 0,14 | Induktif | 700 k | 0,089 | 30 | 0,0765 | 0,044 | Induktif | 700 k | 0,0205 | 75 | 0,005 | 0,019 | Induktif |
| 800 k | 0,16 | 42,545 | 0,114 | 0,1045 | Induktif | 800 k | 0,098 | 16,36 | 0,0935 | 0,027 | Induktif | 800 k | 0,018 | 65,45 | 0,0071 | 0,016 | Induktif |
| 1 M | 0,16 | 63,75 | 0,071 | 0,135 | Induktif | 1 M | 0,113 | 70 | 0,0365 | 0,105 | Induktif | 1 M | 0,0205 | 63,75 | 0,0091 | 0,018 | Induktif |
| 1.1 M | 0,165 | 51,4 | 0,1025 | 0,1275 | Induktif | 1.1 M | 0,105 | 58,57 | 0,0535 | 0,083 | Induktif | 1.1 M | 0,021 | 72,35 | 0,0064 | 0,0195 | Induktif |
| 1.2 M | 0,155 | 56,25 | 0,085 | 0,12 | Induktif | 1.2 M | 0,1365 | 64,29 | 0,0595 | 0,1155 | Induktif | 1.2 M | 0,0195 | 77,145 | 0,0043 | 0,0185 | Induktif |
| 1.3 M | 0,135 | 75 | 0,03 | 0,1265 | Induktif | 1.3 M | 0,1155 | 37,5 | 0,09 | 0,0695 | Induktif | 1.3 M | 0,0165 | 60 | 0,00825 | 0,014 | Induktif |
| 1.4 M | 0,12 | 69,75 | 0,041 | 0,1105 | Induktif | 1.4 M | 0,1215 | 13 | 0,114 | 0,027 | Induktif | 1.4 M | 0,014 | 75 | 0,00375 | 0 | Induktif |
| 1.5 M | 0,1095 | 66 | 0,045 | 0,099 | Induktif | 1.5 M | 0,1125 | 0 | 0,1125 | 0 | Induktif | 1.5 M | 0,06 | 72 | 0,0185 | 0,05475 | Induktif |
| 1.6 M | 0,104 | 66 | 0,041 | 0,094 | Induktif | 1.6 M | 0,1 | 18 | 0,0895 | 0,032 | Induktif | 1.6 M | 0,00875 | 72 | 0,00265 | 0,0083 | Induktif |
| 1.7 M | 0,081 | 58,5 | 0,042 | 0,066 | Induktif | 1.7 M | 0,105 | 72 | 0,032 | 0,0995 | Induktif | 1.7 M | 0,00695 | 72 | 0,00215 | 0,00655 | Induktif |
| 1.8 M | 0,087 | 54 | 0,047 | 0,0675 | Induktif | 1.8 M | 0,1 | 36 | 0,0695 | 0,0415 | Induktif | 1.8 M | 0,00515 | 54 | 0,00275 | 0,004 | Induktif |
| 1.9 M | 0,076 | 45 | 0,033 | 0,053 | Induktif | 1.9 M | 0,0855 | 81 | 0,013 | 0,083 | Induktif | 1.9 M | 0,00475 | 45 | 0,00335 | 0,00335 | Induktif |
| 2 M | 0,082 | 67,5 | 0,029 | 0,07 | Induktif | 2 M | 0,071 | 45 | 0,05 | 0,05 | Induktif | 2 M | 0,00395 | 45 | 0,00275 | 0,00275 | Induktif |

Tabel 3 menunjukkan perbandingan tiga nilai impedansi batang pentanahan modifikasi variasi diameter yang dibuat ke dalam grafik batang pentanahan yang dimana grafik Z_{riil} terhadap frekuensi, serta grafik $Z_{imajiner}$ terhadap frekuensi.

- Berikut grafik impedansi riil ($Z \cos \varphi$) pada hasil pengujian variasi diameter sistem pentanahan modifikasi.

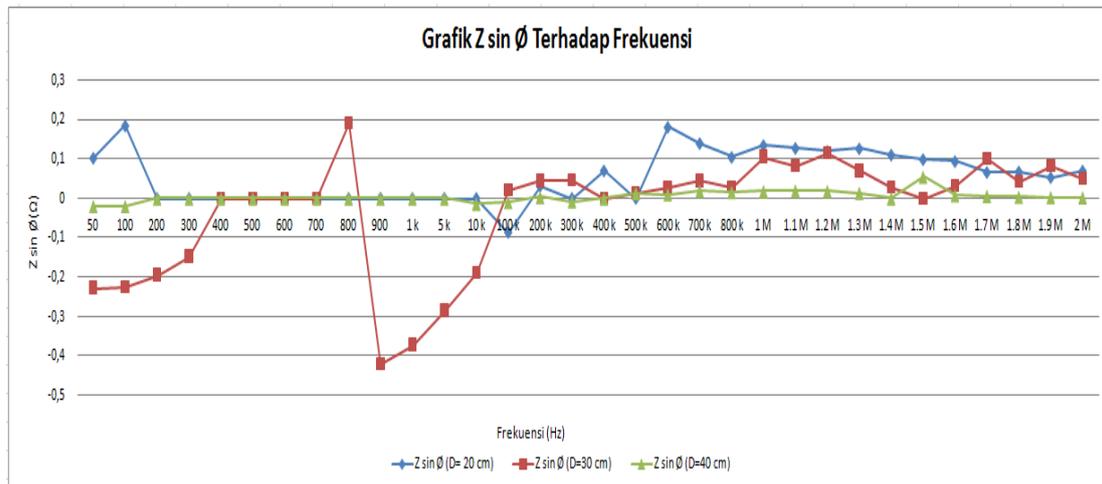


Gambar 11. Grafik $Z \cos \varphi$ terhadap frekuensi

Dalam sistem pentanahan memiliki nilai pentanahan yang baik adalah nilai impedansi yang sesuai kebutuhan sistem pentanahan. Semakin kecil nilai tahanan maka semakin baik terutama untuk pengamanan personal dan peralatan. Dari hasil pengujian dan perhitungan didapat nilai impedansi riil, sehingga diperoleh hasil pada ketiga diameter yang memiliki nilai impedansi sesuai standard sistem pentanahan yaitu 5 Ω, nilai standard tersebut mengacu

pada Persyaratan Umum Instalasi atau PUIL 2000. Hal ini menunjukkan bahwa resistivitas pasir dengan penambahan diameter dan arus yang menyebar semakin cepat maka akan menghasilkan nilai tahanan yang kecil.

- Berikut grafik impedansi imajiner ($Z \sin \varphi$) pada hasil pengujian variasi diameter sistem pentanahan modifikasi.



Gambar 12. Grafik $Z \sin \varphi$ Terhadap Frekuensi

Nilai minus dan positif pada impedansi imajiner dapat dilihat pada metode diagnosis impedansi pentanahan yang menunjukkan jika hasil $Z \sin \varphi$ negatif maka bersifat kapasitif, sedangkan jika hasil $Z \sin \varphi$ positif maka bersifat induktif.

Gambar 12 menunjukkan adanya sifat resistif, induktif dan kapasitif. Pada frekuensi tinggi menunjukkan bahwa lebih banyak bersifat induktif, sedangkan pada di frekuensi rendah lebih bersifat resistif dan kapasitif. Hal ini menunjukkan bahwa sifat pasir tidak hanya tahanan murni akan tetapi adanya permitivitas dan permeabilitas. Secara teori permitivitas tidak bersifat konstan, tetapi tergantung adanya dari komposisi tanah, kelembaban, dan tentu saja frekuensi arus yang diinjeksikan ke tanah. Permitivitas tanah akan menurun seiring dengan penambahan frekuensi. Induktansi (L) lebih dipengaruhi oleh panjang konduktor yang ditanam dan sifat permeabilitas tanah, seperti halnya sifat induktansi yang lain bahwa makin panjang konduktor yang ditanam, maka makin besar nilai induktansi sistem pentanahannya.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data pengukuran yaitu pengujian karakteristik tanah dan pengujian sistem pentanahan modifikasi variasi diameter tabung konfigurasi vertikal yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil pengujian dan perhitungan didapat nilai impedansi riil, sehingga diperoleh hasil pada ketiga diameter yang memiliki nilai impedansi sesuai standard sistem pentanahan yaitu 5Ω , nilai standard tersebut mengacu pada Persyaratan Umum Instalasi atau PUIL 2000. Hal ini menunjukkan bahwa resistivitas pasir dengan penambahan diameter pentanahan dan arus yang menyebar semakin cepat maka akan menghasilkan nilai tahanan yang kecil.
2. Dari hasil impedansi imajiner pada frekuensi tinggi menunjukkan bahwa lebih banyak bersifat induktif sedangkan pada di frekuensi rendah lebih bersifat resistif dan kapasitif.

Hal ini menunjukkan bahwa sifat pasir tidak hanya tahanan murni akan tetapi adanya permitivitas dan permeabilitas. Secara teori permitivitas tidak bersifat konstan, tetapi tergantung adanya dari komposisi tanah, kelembaban, dan tentu saja frekuensi arus yang diinjeksikan ke tanah. Permitivitas tanah akan menurun seiring dengan penambahan frekuensi. Induktansi (L) lebih dipengaruhi oleh panjang konduktor yang ditanam dan sifat permeabilitas tanah, seperti halnya sifat induktansi yang lain bahwa makin panjang konduktor yang ditanam, maka makin besar nilai induktansi sistem pentanahannya.

3. Pengaruh injeksi frekuensi AC pada sistem pentanahan modifikasi variasi diameter dapat di analisis dari hasil pengujian bahwa nilai impedansi yang didapat tidak selalu tetap akan tetapi selalu berubah-ubah terhadap frekuensi tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa pengukuran sistem tersebut dipengaruhi oleh berbagai macam fisik dan alam seperti cuaca, kondisi pasir, dan pengukuran yang dekat di bangunan.

DAFTAR RUJUKAN

- Anggoro.B., Kudrat,S., Ngapuli,I., Parouli.P., dan Dicky,I, (2007). *The Physical Treatment Soil Characteristic For Groundings System On Madiun And Surabaya Region*. Majalah IPTEK Vol. 18, No. 1:Anggoro,dkk Publisher.
- Supardi, Agus, (2012).*Karakteristik Impedansi Pentanahan pada Gedung Psikologi UMS*. Laporan Tugas Akhir Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah. Surakarta:Agus Publisher.
- Janardana IGN,(2005).*Perbedaan Penambahan Garam Dengan Penambahan Bentonit Terhadap Nilai Tahanan Pentanahan Pada Sistem Pentanahan*. Jurnal Teknologi Elektro Vol.4 No.1:IGN Janardana Publisher.
- Hakim, Rio, (2014).*Characteristic study of vertical configuration grounding system with two layer modified using type of different soil for variation of diameter and frequency injection* .Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE) International Conference On,Bali:Rio Publisher.
- Hutauruk,T.S, (1991). *Pengentanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengentanahan Peralatan*. Jakarta: Erlangga.
- Hanifah Nur Kumala., N, (2014).*Characteristic Study Of Two-Layer Vertical Grounding System For Variation Of Length Rod And High Frequency Injection Current (100khz-14mhz)*. Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE) International Conference On,Bali:Hanifah Publisher.
- Sylvia.O.P., Anggoro,B., Waluyo, (2015).*Studi Karakteristik Impedansi Pentanahan Dengan Modifikasi Variasi Diameter Tabung Yang Berkonfigurasi Vertikal Dan Di injeksi Arus Bolak-Balik Yang Berfrekuensi 50 Hz -2 MHz*. Seminar Nasional Ketenagalistrikan dan Aplikasinya (SENKA), Bandung.