

**PENGARUH KONFIGURASI MODEL PENGETANAHAN
MESH TERHADAP NILAI TAHANAN PENGETANAHAN**

SKRIPSI

*Diajukan Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik*



Disusun Oleh:

Andhik Wahyu Widodo

NIM. 0210630017

DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

JURUSAN ELEKTRO

2007

**PENGARUH KONFIGURASI MODEL PENGETANAHAN
MESH TERHADAP NILAI TAHANAN PENGETANAHAN**

SKRIPSI

*Diajukan Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik*



**Disusun Oleh:
Andhik Wahyu Widodo
NIM. 0210630017**

**Mengetahui dan menyetujui,
Dosen Pembimbing**

Ir. Drs. Moch. Dhofir, MT.
NIP. 131 879 031

Ir. H. Choiri.
NIP. 130 703 042

**PENGARUH KONFIGURASI MODEL PENGETANAHAN
MESH TERHADAP NILAI TAHANAN PENGETANAHAN**

Disusun Oleh:

Andhik Wahyu Widodo

NIM. 0210630017

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada

Tanggal 14 Juni 2007

DOSEN PENGUJI

Ir. H. Soemarwanto

NIP. 130 873 485

Ir. Mahfudz Shidiq, MT

NIP 131 699 002

Rini Nur Hasanah, ST., MSc., PhD.

NIP. 132 143 040

Ir. Hery Purnomo

NIP. 131 131 027

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ir. Heru Nurwarsito, MKom.

NIP. 131 879 033

Dia membuat segala sesuatu indah pada waktunya..."
(Pengkhotbah 3:11a)

Sebab ada tertulis dalam Kitab Suci: "Sesungguhnya, Aku meletakkan di Sion sebuah batu yang terpilih, sebuah batu penjuru yang mahal, dan yang percaya kepada-Nya, tidak akan dipermalukan."
(1 Petrus 2:6)

Sekarang aku tahu, bahwa Tuhan memberi kemenangan kepada orang yang diurapi-Nya dan menjawabnya dari sorga-Nya yang kudus dengan kemenangan yang gilang-gemilang oleh tangan kanan-Nya.
(Mazmur 20:7)

Segala perkara dapat kutanggung di dalam Dia yang memberi kekuatan kepadaku.
(Filipi 4:13)



***Sebuah karya yang kupersembahkan
buat mama dan keluargaku tercinta,
buat teman-teman yang mengasihiku
dan juga sangat kukasihi.
Terimakasih buat semuanya...
'Tuhan Yesus memberkati !!!***

KATA PENGANTAR

Salam Sejahtera dalam kasih Kristus,

Puji Syukur dipanjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus, karena hanya dengan berkat hikmat, dan anugerah – Nya, skripsi dengan judul **”Pengaruh Konfigurasi Model Pengetanahan Mesh Terhadap Nilai Tahanan Pengetanahan”** dapat diselesaikan.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

Disadari bahwa skripsi ini tidak akan terwujud tanpa bantuan dan dorongan dari banyak pihak, karena itu dalam kesempatan ini disampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Ir. Heru Nurwarsito, MKom. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro dan Bapak Rudy Yuwono, ST., MSc. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan bantuan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
2. Bapak Ir. Drs. Moch. Dhofir, MT. dan Bapak Ir. H. Choiri selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bantuan, bimbingan, perhatian, waktu, masukan, serta nasehatnya.
3. Bapak/Ibu Dosen Teknik Elektro yang telah memberikan bimbingan selama masa perkuliahan.
4. Seluruh karyawan Jurusan Teknik Elektro yang telah membantu dalam pengurusan administrasi dan bantuan lainnya, serta semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini.

Semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan berguna bagi pembaca terutama mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang. Kritik dan saran sangat diperlukan untuk penyempurnaan skripsi ini.

Malang, 14 Juni 2007

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
ABSTRAK	vii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Ruang Lingkup	3
1.5 Tujuan	3
1.6 Sistematika Pembahasan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sistem Pengetanahan	5
2.1.1 Tujuan Pengetanahan Peralatan	6
2.1.2 Syarat Sistem Pengetanahan	6
2.2 Sistem Pengetanahan Sebagai Konduktor	7
2.3 Tahanan Pengetanahan	7
2.3.1 Tahanan Jenis Tanah.....	7
2.3.2 Pengukuran Tahanan Pengetanahan	11
2.4 Jenis-jenis Elektroda Pengetanahan	12
2.4.1 Elektroda Batang.....	12
2.4.2 Elektroda Plat.....	13
2.4.3 Elektroda Pita.....	13
2.4.4 Jenis-jenis Elektroda Lain.....	13
2.5 Bahan dan Ukuran Elektroda Pengetanahan.....	14
2.5.1 Bahan Elektroda Pengetanahan	14
2.5.2 Ukuran Elektroda Pengetanahan.....	14
2.6 Pengetanahan Grid.....	15
2.6.1 Penanaman Batang Elektroda Tunggal Sejajar Permukaan Tanah.....	16



2.6.2	Penanaman Beberapa Batang Elektroda Sejajar Permukaan Tanah (Mesh).....	17
2.7	Tegangan Mesh.....	17
BAB III METODOLOGI.....		20
3.1	Studi Literatur.....	20
3.2	Data.....	20
3.3	Pengujian Laboratorium.....	21
3.3.1	Obyek Uji.....	21
3.3.2	Alat Yang Digunakan.....	22
3.3.3	Rangkaian Pengukuran.....	22
3.4	Konfigurasi Pengetanahan Mesh.....	23
3.5	Kesimpulan.....	25
BAB IV DATA DAN ANALISIS.....		26
4.1	Pengukuran tahanan jenis larutan.....	26
4.2	Pengaruh bentuk model konfigurasi sel mesh terhadap nilai tahanan pengetanahan pada panjang konduktor yang sama.....	27
4.2.1	Model-1a (M-1a) dengan Model-1b (M-1b).....	27
4.2.2	Model-3b (M-3b) dengan Model-4 (M-4).....	29
4.2.3	Model-6b (M-6b), Model-7b (M-7b) dengan Model-8 (M-8).....	30
4.3	Pengaruh penambahan panjang konduktor atau sel mesh terhadap nilai tahanan pengetanahan.....	32
4.4	Pengaruh bentuk model konfigurasi terhadap nilai tegangan mesh.....	36
4.4.1	Model M-1a.....	39
4.4.2	Model M-1b.....	41
4.4.3	Model M-2.....	43
4.4.4	Model M-3a. (Perhitungan dengan interpolasi).....	44
4.4.5	Model M-3b.....	47
4.4.6	Model M-4.....	49
4.4.7	Model M-5. (Perhitungan dengan interpolasi).....	50
4.4.8	Model M-6a. (Perhitungan dengan interpolasi).....	53
4.4.9	Model M-6b.....	56
4.4.10	Model M-7a. (Perhitungan dengan interpolasi).....	58

4.4.11	Model M-7b. (Perhitungan dengan interpolasi).....	63
4.4.12	Model M-8.	66
4.5	Pengaruh bentuk model konfigurasi terhadap nilai gradien tegangan antara titik di tengah-tengah sel dengan konduktor pada sebuah mesh.....	70
4.5.1	Model M-1a.	72
4.5.2	Model M-1b.	73
4.5.3	Model M-2.	73
4.5.4	Model M-3a.	73
4.5.5	Model M-3b.	74
4.5.6	Model M-4.	75
4.5.7	Model M-5.	75
4.5.8	Model M-6a.	75
4.5.9	Model M-6b.	76
4.5.10	Model M-7a.	76
4.5.11	Model M-7b.	77
4.5.12	Model M-8.	78
4.6	Pengaruh bentuk model konfigurasi terhadap nilai gradien tegangan rata-rata di dalam model mesh.	78
4.6.1	Model M-2.	79
4.6.2	Model M-3a.	79
4.6.3	Model M-3b.	79
4.6.4	Model M-4.	80
4.6.5	Model M-5.	80
4.6.6	Model M-6a.	81
4.6.7	Model M-6b.	82
4.6.8	Model M-7a.	83
4.6.9	Model M-7b.	84
4.6.10	Model M-8.	86

BAB V PENUTUP 90

5.1	Kesimpulan.	90
5.2	Saran.	91

DAFTAR PUSTAKA..... 92

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Tahanan jenis berbagai macam tanah dan tahanan pengetanahannya	9
Tabel 2.2. Harga koefisien K antara musim hujan dan kemarau	10
Tabel 2.3. Beberapa sifat logam murni	14
Tabel 2.4. Ukuran-ukuran minimum elektroda pengetanahan	15
Tabel 3.1. Berbagai Konfigurasi Model Pengetanahan Mesh	23
Tabel 4.1. Model Mesh Dengan Panjang Total Konduktor 10 cm	28
Tabel 4.2. Model Mesh Dengan Panjang Total Konduktor 15 cm	29
Tabel 4.3. Model Mesh Dengan Panjang Total Konduktor 27,5 cm	31
Tabel 4.4. Pengaruh Penambahan Panjang Konduktor atau Sel Mesh terhadap Nilai Tahanan Pengetanahan	32
Tabel 4.5. Perbandingan antara nilai tahanan pengetanahan dengan panjang total konduktor pada kedalaman 4 cm.	34
Tabel 4.6. Perbandingan antara nilai tahanan pengetanahan dengan panjang total konduktor pada kedalaman 8 cm.	35
Tabel 4.7. Tegangan mesh (E_m) pada model mesh dengan penanaman kedalaman 8 cm.	37
Tabel 4.8. Tegangan mesh rata-rata ($\overline{E_m}$) pada model mesh dengan penanaman kedalaman 8 cm.	39
Tabel 4.9. Perbandingan tegangan mesh hasil pengukuran dan hasil teori perhitungan pada model mesh dengan penanaman kedalaman 8 cm.	68
Tabel 4.10. Gradien tegangan yang ditinjau secara horizontal $\left(\frac{\overline{E_m}}{x_1}\right)$ pada model mesh untuk kedalaman penanaman 8 cm.	71
Tabel 4.11. Gradien tegangan yang ditinjau secara vertikal $\left(\frac{\overline{E_m}}{x_2}\right)$ pada model mesh untuk kedalaman penanaman 8 cm.	72
Tabel 4.12. Gradien tegangan rata-rata $\left(\frac{\Delta \overline{E_m}}{\Delta x}\right)$ pada model mesh dengan penanaman kedalaman 8 cm.	88

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Variasi tahanan pengetanahan: (a) terhadap kedalaman; (b) terhadap garis tengah pasak; (c) terhadap iklim.	10
Gambar 2.2. Pengukuran Tahanan Pengetanahan Dengan Metode Tiga Titik.....	11
Gambar 2.3. Distribusi tegangan dan arus di sekitar pengetanahan grid.....	16
Gambar 2.4. Penanaman Elektroda Tunggal Sejajar Permukaan Tanah.....	16
Gambar 2.5. Sistem pengetanahan grid dengan mesh.	17
Gambar 3.1. Salah Satu Model Mesh Yang Digunakan.....	21
Gambar 3.2 (a) Obyek uji dan media tanam; (b) Alat ukur (sumber arus AC dan voltmeter).....	22
Gambar 3.3 (a) Tabung uji; (b) Rangkaian pengukuran tahanan jenis larutan.....	23
Gambar 4.1. Grafik pengaruh perubahan bentuk model mesh (M-1a dan M-1b) terhadap nilai tahanan pengetanahan pada kedalaman yang berbeda untuk panjang total konduktor 10 cm.	28
Gambar 4.2. Grafik pengaruh perubahan bentuk model mesh (M-3b dan M-4) terhadap nilai tahanan pengetanahan pada kedalaman yang berbeda untuk panjang konduktor 15 cm.	30
Gambar 4.3. Grafik pengaruh perubahan bentuk model mesh (M-6b, M-7b dan M-8) terhadap nilai tahanan pengetanahan pada kedalaman yang berbeda untuk panjang total konduktor 27,5 cm.	31
Gambar 4.4. Grafik pengaruh perubahan panjang total konduktor terhadap nilai tahanan pengetanahan pada kedalaman yang berbeda.....	33
Gambar 4.5. Grafik pengaruh perubahan panjang total konduktor terhadap nilai perbandingan tahanan pengetanahan dengan panjang total konduktor yang dipakai pada kedalaman yang berbeda.....	35
Gambar 4.6. Grafik pengaruh perubahan panjang total konduktor terhadap nilai tegangan mesh baik dari hasil pengukuran maupun hasil teori perhitungan.	68
Gambar 4.7. Salah satu model mesh (M-2) dilengkapi dengan posisi panjang x	70
Gambar 4.8. Grafik pengaruh perubahan jumlah sel mesh terhadap nilai gradien tegangan pada kedalaman 8 cm.	88

ABSTRAK

Andhik Wahyu Widodo, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2007, **Pengaruh Konfigurasi Model Pengetanahan Mesh Terhadap Nilai Tahanan Pengetanahan**,

Dosen Pembimbing : **Ir. Drs. Moch. Dhofir, MT.** dan **Ir. H. Choiri.**

Pengetanahan merupakan hal yang sangat penting dalam sistem proteksi peralatan elektrik dan elektronik. Kebakaran dan kerusakan alat elektrik dan elektronik sering terjadi karena tidak memperhatikan aspek pengetanahan ini. Salah satu bentuk pengetanahan yang dipakai pada gardu induk adalah pengetanahan grid (mesh), selain untuk mendapatkan nilai tahanan pengetanahan yang kecil juga berfungsi untuk memperkecil gradien tegangan yang bisa terjadi di sekitar gardu induk.

Oleh karena itu perlu sekali menemukan sebuah konfigurasi pengetanahan mesh yang efektif dan efisien yang memenuhi syarat keamanan tersebut. Dalam skripsi ini akan diteliti 12 bentuk konfigurasi model pengetanahan mesh. Pengujian dilakukan di Laboratorium Dasar Elektrik dan Pengukuran Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dengan menggunakan media tanam berupa larutan air garam. Pengukuran dilakukan dengan metode 3 titik pada masing-masing model mesh untuk kedalaman yang berbeda yaitu 4 cm dan 8 cm.

Pada penelitian ini akan diukur besarnya tahanan pengetanahan dan tegangan mesh untuk masing-masing konfigurasi model pengetanahan mesh. Kemudian dihitung besarnya gradien tegangan untuk masing-masing model mesh dan dianalisis pengaruh perubahan konfigurasi terhadap nilai tahanan pengetanahan sehingga didapatkan konfigurasi model pengetanahan mesh dengan nilai tahanan pengetanahan terkecil. Dari 12 konfigurasi didapatkan nilai tahanan pengetanahan terkecil pada model mesh yang terdiri dari 6 buah sel mesh berbentuk persegi panjang (M-6b) yaitu sebesar 1,263 Ω (pada kedalaman 4 cm) dan 0,964 Ω (pada kedalaman 8 cm). Sedangkan gradien tegangan paling kecil adalah pada model mesh yang terdiri dari 8 buah sel mesh berbentuk persegi (M-8) yaitu sebesar 0,058 V/cm.

Kata kunci: *tahanan pengetanahan, gradien tegangan, tegangan mesh, model mesh.*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan teknologi kelistrikan yang begitu cepat, yang dapat kita lihat dengan pembangunan sistem tenaga listrik dan penggunaan peralatan listrik yang mempunyai keandalan lebih tinggi dan kapasitas yang lebih besar, maka faktor keamanan manusia terhadap kecelakaan listrik juga harus diperhatikan. Kecelakaan ini dalam arti terjadi kontak langsung atau dalam hal manusia berada di dalam suatu daerah yang mempunyai gradien tegangan yang tinggi. Kecelakaan atau bahaya ini sebenarnya disebabkan oleh besarnya arus yang mengalir dalam tubuh manusia. Dengan demikian sistem pengetanahan sebagai salah satu sistem proteksi mempunyai peran yang sangat penting. Sistem pengetanahan inilah yang akan turut menentukan keamanan peralatan dan orang yang berada disekitar suatu bangunan atau peralatan pada saat terjadi gangguan yang dapat menyebabkan arus mengalir ke tanah.

Dalam suatu sistem pengetanahan semakin kecil nilai dari tahanan pengetanahan maka semakin baik sistem tersebut.. Nilai tahanan pengetanahan ditentukan oleh beberapa faktor yaitu: jenis tanah, kelembaban atau kebasaaan tanah, temperatur tanah, konfigurasi dan dimensi struktur elektroda yang ditanam.

Di antara beberapa faktor tersebut terdapat faktor konfigurasi elektroda pengetanahan yang dipakai yang mempengaruhi besarnya nilai tahanan pengetanahan. Salah satu konfigurasi elektroda pengetanahan yang sering dipakai karena memiliki nilai tahanan pengetanahan yang rendah dan gradien tegangan yang merata adalah sistem pengetanahan grid yaitu penanaman batang elektroda sejajar dengan permukaan tanah. Untuk memperoleh nilai tahanan pengetanahan yang lebih rendah dan gradien tegangan yang lebih merata maka tidak cukup hanya dipasang sebuah batang elektroda saja, melainkan harus dipasang beberapa batang elektroda dalam bentuk mesh.

Dengan demikian dalam skripsi ini akan dibahas mengenai pemodelan sistem pengetanahan mesh dengan bentuk konfigurasi yang berbeda-beda. Pengetanahan mesh dipilih dalam model supaya dimungkinkan diperoleh banyak sampel pengetanahan mesh dalam berbagai bentuk konfigurasi. Media pengetanahan model mesh ini tidak menggunakan tanah melainkan menggunakan larutan air garam yang ditampung dalam sebuah bejana dengan ukuran tertentu supaya diperoleh tahanan jenis yang homogen.

Pada akhirnya dari berbagai konfigurasi model pengetanahan mesh ini diharapkan akan diperoleh nilai tahanan pengetanahan yang paling kecil sehingga dapat dijadikan sebagai referensi untuk mendapatkan suatu sistem pengetanahan mesh yang paling efektif dalam fungsinya baik sebagai pengaman peralatan maupun manusia yang berada di sekitar peralatan yang mengalami gangguan hubung singkat.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas dalam skripsi ini adalah:

- a. Berapa besarnya nilai tahanan pengetanahan untuk masing-masing model mesh dan bagaimana pengaruhnya terhadap perubahan konfigurasi.
- b. Berapa besarnya nilai tegangan mesh dan gradien tegangan untuk masing-masing model mesh dan bagaimana pengaruhnya terhadap perubahan konfigurasi.
- c. Bagaimana konfigurasi model pengetanahan mesh yang memiliki nilai tahanan pengetanahan dan gradien tegangan terkecil dari beberapa sampel model yang diambil.

1.3 Batasan Masalah

Pembahasan skripsi ini dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut:

- a. Jenis pengetanahan yang dipakai dalam model adalah sistem pengetanahan grid (mesh).
- b. Model pengetanahan dibuat dengan menyambungkan batang tembaga BC 6 mm² dengan panjang 15 cm pada salah satu sudut sel mesh.
- c. Media penanaman yang dipakai dalam pengujian model mesh adalah larutan yang berupa campuran air dan garam.
- d. Tidak membahas konsentrasi larutan dalam hal ikatan kimia.
- e. Model mesh yang dipakai terbuat dari besi dengan panjang diameter penampang 1 mm.
- f. Penambahan konduktor pada sebuah model mesh hanya dipasang dengan posisi horizontal.
- g. Pengujian laboratorium dilakukan di Laboratorium Dasar Elektrik dan Pengukuran Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup permasalahan yang dibahas dalam skripsi ini adalah:

- a. Menguji pengaruh kedalaman penanaman mesh terhadap nilai tahanan pengetanahan. Dengan pengujian ini diperoleh karakteristik nilai tahanan pengetanahan terhadap perubahan kedalaman penanaman.
- b. Menguji pengaruh penambahan panjang total konduktor pada model mesh terhadap nilai tahanan pengetanahan. Dengan pengujian ini diperoleh karakteristik nilai tahanan pengetanahan terhadap perubahan panjang total konduktor pada model mesh.
- c. Menguji pengaruh perubahan konfigurasi model mesh pada panjang total konduktor yang sama terhadap nilai tahanan pengetanahan. Dengan pengujian ini diperoleh karakteristik nilai tahanan pengetanahan terhadap perubahan konfigurasi model mesh pada panjang total konduktor yang sama.
- d. Menguji besarnya nilai tegangan mesh di setiap titik tengah masing-masing sel mesh terhadap titik referensi. Dengan pengujian ini diperoleh perbandingan besarnya nilai tegangan mesh di dalam model mesh.
- e. Menguji besarnya nilai gradien tegangan pada tiap titik tertentu di dalam model mesh. Dengan pengujian ini diperoleh perbandingan besarnya nilai gradien tegangan di dalam model mesh.

1.5 Tujuan

Tujuan pembahasan dari skripsi ini adalah:

Menganalisis besarnya tahanan pengetanahan dan gradien tegangan untuk masing-masing konfigurasi model pengetanahan mesh dan mendapatkan konfigurasi model pengetanahan mesh dengan nilai tahanan pengetanahan terkecil sehingga dapat dijadikan sebagai referensi untuk aplikasi sistem pengetanahan yang sesungguhnya.

1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Memuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, ruang lingkup, tujuan, dan sistematika penulisan.

BAB II Tinjauan Pustaka

Membahas tentang sistem pengetanahan secara umum, karakteristik tanah, metode pengukuran tahanan pengetanahan, jenis-jenis elektroda pengetanahan, sistem pengetanahan grid (mesh) beserta parameter-parameter di dalamnya, dan perhitungan tegangan mesh.

BAB III Metodologi

Berisi tentang prosedur percobaan, metode pengambilan data, dan tahap-tahap metode analisis data.

BAB IV Data dan Analisis

Berisi tentang analisis pengaruh bentuk model mesh terhadap nilai tahanan pengetanahan baik pada panjang konduktor yang sama maupun berbeda, pengaruh penambahan panjang konduktor atau sel pembentuk mesh terhadap nilai tahanan pengetanahan, pengaruh kedalaman penanaman terhadap nilai tahanan pengetanahan, pengaruh bentuk model mesh terhadap nilai tegangan mesh, dan pengaruh bentuk model mesh terhadap nilai gradien tegangan.

BAB V Penutup

Berisi tentang kesimpulan dan saran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Pengetanahan

Sistem pengetanahan adalah salah satu cara pengamanan manusia dan makhluk hidup lainnya terhadap arus gangguan yang terjadi baik pada sistem tegangan tinggi maupun peralatan tegangan tinggi, dimana biasanya bahaya ini terjadi pada daerah yang memiliki gradien tegangan yang tinggi. Sistem pengetanahan ini dapat dibedakan menjadi dua yaitu pengetanahan terhadap gangguan petir (dengan menggunakan elektroda petir, arrester maupun kawat tanah) dan pengetanahan peralatan terhadap pengaruh hubung singkat, kegagalan isolasi maupun pengaruh lainnya.

Dalam instalasi listrik ada 4 bagian yang harus diketanahkan atau sering juga disebut dibumikan yaitu: (Djiteng Marsudi, 2003: 67)

- a. Semua bagian instalasi yang terbuat dari logam (menghantar listrik) dan dengan mudah bisa disentuh manusia. Hal ini perlu agar potensial dari logam yang mudah disentuh manusia selalu sama dengan potensial tanah/bumi tempat manusia berpijak sehingga tidak berbahaya lagi bagi manusia yang menyentuhnya.
- b. Bagian pembuangan muatan listrik (bagian bawah) dari *Lightning Arrester*. Hal ini diperlukan agar *Lightning Arrester* dapat berfungsi dengan baik, yaitu membuang muatan listrik yang diterimanya dari petir ke tanah/bumi dengan lancar.
- c. Kawat petir yang ada pada bagian atas saluran transmisi. Kawat petir ini sesungguhnya juga berfungsi sebagai *Lightning Arrester*. Karena letaknya yang ada di sepanjang saluran transmisi, maka semua kaki tiang transmisi harus ditanahkan agar petir yang menyambar kawat petir dapat disalurkan ke tanah dengan lancar melalui kaki tiang saluran transmisi.
- d. Titik netral dari transformator atau titik netral dari generator. Hal ini diperlukan dalam kaitan dengan keperluan proteksi khususnya yang menyangkut gangguan hubung tanah.

Dalam kondisi statik, potensial permukaan bumi adalah sama. Oleh karena itu, pada kondisi statik, bumi merupakan bidang ekuipotensial dan dapat dijadikan potensial acuan nol yang ideal. Sedang pada kondisi tidak statik permukaan bumi tidak dapat

dipandang sebagai permukaan potensial sebab setiap titik pada permukaan bumi mempunyai potensial yang berbeda dan distribusi potensialnya tergantung pada aliran arus yang mengalir pada permukaan bumi. Bumi sendiri mengandung berbagai lapisan tanah yang mempunyai resistivitas berbeda-beda.

2.1.1 Tujuan Pengetanahan Peralatan

Salah satu faktor penting dalam setiap usaha pengamanan (perlindungan) rangkaian listrik adalah pengetanahan. Apabila tindakan pengamanan yang baik akan dilaksanakan, maka harus ada sistem pengetanahan yang dirancang dengan benar.

Pengetanahan peralatan sendiri sebagai salah satu usaha pengamanan memiliki tujuan sebagai berikut: (Hutauruk, 1999: 125)

- a. Untuk memperoleh potensial yang merata (uniform) dalam semua bagian struktur dan peralatan, dan juga untuk menjaga operator atau orang yang berada pada 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 perbedaan potensial yang besar pada jarak yang dapat dicapai oleh manusia sewaktu hubung singkat kawat ketanah menjadi sangat kecil.
- b. Untuk memperoleh impedansi yang kecil atau rendah dari jalan balik arus hubung singkat ke tanah. 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, ini akan menimbulkan perbedaan 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.

2.1.2 Syarat Sistem Pengetanahan

Dalam fungsinya sebagai salah satu usaha pengamanan, maka sistem pengetanahan harus mampu bekerja dengan efektif yakni dengan memenuhi syarat-syarat sebagai berikut: (Abdul Hadi, 1994: 154)

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

- c. Menggunakan elektroda yang terbuat dari bahan-bahan yang tahan korosi terhadap berbagai kondisi kimiawi tanah, untuk meyakinkan kontinuitas penampilannya sepanjang umur peralatan yang dilindungi.
- d. Menggunakan sistem mekanik yang kuat namun mudah dalam pelayanan.

2.2 Sistem Pengetanahan Sebagai Konduktor

Tahanan dalam sistem pengetanahan merupakan komposisi dari: (Abdul Hadi, 1994: 158)

- a. Tahanan pasak (elektroda pengetanahan) yang terbuat dari logam dan sambungan-sambungannya.
- b. Tahanan kontak antara elektroda pengetanahan dengan tanah sekitar.
- c. Tahanan jenis tanah di sekitar elektroda pengetanahan.

Pasak-pasak tanah, batang-batang logam, struktur dan peralatan lain biasa digunakan untuk elektroda pengetanahan. Elektroda-elektroda ini umumnya luas penampangnya besar, sehingga tahanannya dapat diabaikan terhadap tahanan keseluruhan sistem pengetanahan.

Tahanan antara elektroda dan tanah jauh lebih kecil dari yang biasanya diduga. Apabila elektroda bersih dari cat atau minyak, dan tanah dapat dipasak dengan kuat, maka Biro Standarisasi Nasional Amerika Serikat menyatakan bahwa tahanan kontak dapat diabaikan.

2.3 Tahanan Pengetanahan

Secara teoritis, tahanan dari tanah/bumi adalah nol karena besar luas penampangnya tak terhingga. Tetapi kenyataannya tidak demikian, artinya tahanan pengetanahan nilainya tidak nol. Tahanan pengetanahan ditentukan oleh beberapa faktor yaitu:

- a. Tahanan jenis tanah.
- b. Elektroda pengetanahan (panjang, diameter, tahanan pasak dan sambungannya).
- c. Tahanan kontak elektroda pengetanahan.

2.3.1 Tahanan Jenis Tanah

Karakteristik tanah merupakan salah satu faktor yang penting untuk diketahui dalam perancangan suatu sistem pengetanahan. Adanya arus gangguan ke tanah harus

dengan cepat terdistribusi ke dalam tanah, karena karakteristik tanah sangat mempengaruhi tahanan jenis tanah.

Faktor keseimbangan antara tahanan pengetanahan dan kapasitansi di sekelilingnya adalah tahanan jenis tanah yang direpresentasikan dengan ρ . Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tergantung dari beberapa faktor yaitu: (Hutauruk,1999: 141)

- a. Jenis tanah: tanah liat, berpasir, berbatu, dan lain-lain.
- b. Lapisan tanah: berlapis-lapis dengan tahanan jenis berlainan.
- c. Kelembaban tanah.
- d. Temperatur.

Sering dicoba untuk mengubah komposisi kimia tanah dengan memberikan garam pada tanah dekat elektroda pengetanahan dengan maksud mendapatkan tahanan jenis yang rendah. Cara ini hanya baik untuk sementara sebab proses penggaraman harus dilakukan secara periodik, sedikitnya enam bulan sekali. Dengan memberi air atau membasahi tanah juga mengubah tahanan jenis tanah. Harga tahanan jenis tanah pada kedalaman yang terbatas sangat bergantung dengan keadaan cuaca. Untuk mendapatkan tahanan jenis tanah rata-rata untuk keperluan perencanaan maka diperlukan penyelidikan atau pengukuran dalam jangka waktu tertentu misalnya selama satu tahun. Biasanya tahanan jenis tanah juga tergantung dari tingginya permukaan air yang konstan.

Untuk mengurangi variasi tahanan jenis tanah akibat pengaruh musim, pengetanahan dapat dilakukan dengan menanamkan elektroda pengetanahan sampai mencapai kedalaman di mana terdapat air tanah yang konstan. Pada sistem pengetanahan yang tidak mungkin atau tidak perlu untuk ditanam lebih dalam sehingga mencapai air tanah yang konstan, variasi tahanan jenis tanah sangat besar.

Oleh karena keanekaragaman tersebut, harga tahanan jenis tanah tidak dapat diberikan dengan suatu nilai yang tetap. Berdasar hal tersebut di atas, maka pada Tabel 2.1 berikut ini digambarkan tahanan jenis tanah serta tahanan pengetanahan dengan berbagai kedalaman dan apabila digunakan Pita Pengetanahan (*Grounding Strip*) dengan berbagai ukuran panjang.

Tabel 2.1. Tahanan jenis berbagai macam tanah dan tahanan pengetanannya

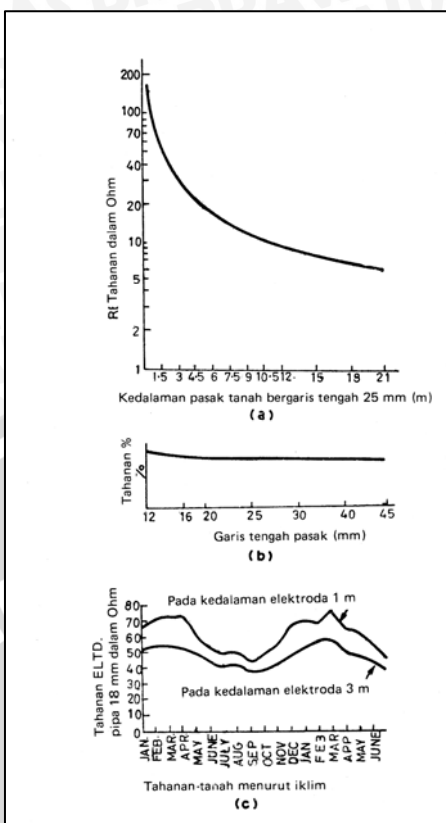
No.	Macam Tanah	Tahanan Jenis (Ohm-m)	Tahanan Pengetanahan					
			Kedalaman Batang Pengetanahan (m)			Panjang Pita Pengetanahan (m)		
			3	6	10	5	10	20
1.	Humus lembab	30	10	5	3	12	6	3
2.	Tanah pertanian, tanah liat	100	33	17	10	40	20	10
3.	Tanah liat berpasir	150	50	25	15	60	30	15
4.	Pasir lembab	300	66	33	20	80	40	20
5.	Pasir kering	1000	330	165	100	400	200	100
6.	Beton 1 : 5	400	-	-	-	160	80	40
7.	Kerikil lembab	500	160	80	48	200	100	50
8.	Kerikil kering	1000	330	165	100	400	200	100
9.	Tanah berbatu	30000	1000	500	300	1200	600	300
10.	Batu karang	10	-	-	-	-	-	-

Sumber: Djiteng Marsudi, 2003: 69

Kesulitan dalam penggunaan tabel tersebut adalah biasanya lapisan tanah terdiri atas dua atau lebih lapisan bermacam-macam tanah. Untuk memudahkan permasalahan didalam perhitungan nilai tahanan pengetanahan atau dalam penentuan tahanan jenis tanah diasumsikan tanah terdiri dari lapisan yang sama dan dalam pelaksanaan perhitungan tahanan tanah diambil kondisi tanah yang sejelek mungkin. Setelah diperoleh harga tahanan jenis tanah, dan biasanya diambil harga yang tertinggi, maka berdasarkan harga tahanan jenis tanah tersebut dibuat perencanaan pengetanahan.

Dengan demikian dalam skripsi ini tanah sebagai media penanaman batang elektroda digantikan dengan larutan berupa campuran air dan garam, sehingga memungkinkan diperoleh media penanaman yang tahanan jenis yang homogen di semua titik.

Tahanan jenis tanah merupakan faktor kunci yang menentukan tahanan elektroda dan pada kedalaman berapa pasak harus ditanam agar memiliki tahanan yang rendah. Karena tahanan jenis tanah berkaitan langsung dengan kandungan air dan suhu, maka dapat diasumsikan bahwa tahanan pengetanahan berubah sesuai dengan perubahan iklim setiap tahunnya. Variasi-variasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Variasi tahanan pengetanahan: (a) terhadap kedalaman; (b) terhadap garis pasak; (c) terhadap iklim.

Sumber : Abdul Hadi, 1994: 160

Nilai tahanan jenis tanah bisa berubah sama sekali antara pengukuran yang dilakukan pada musim hujan dan musim kemarau. Pada musim kemarau diperoleh tahanan jenis tanah yang besar jika dibandingkan dengan musim hujan. Oleh sebab itu ada faktor pengali (koefisien) antara keduanya. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2, menunjukkan faktor koefisien K dengan penanaman elektroda tegak lurus dan sejajar.

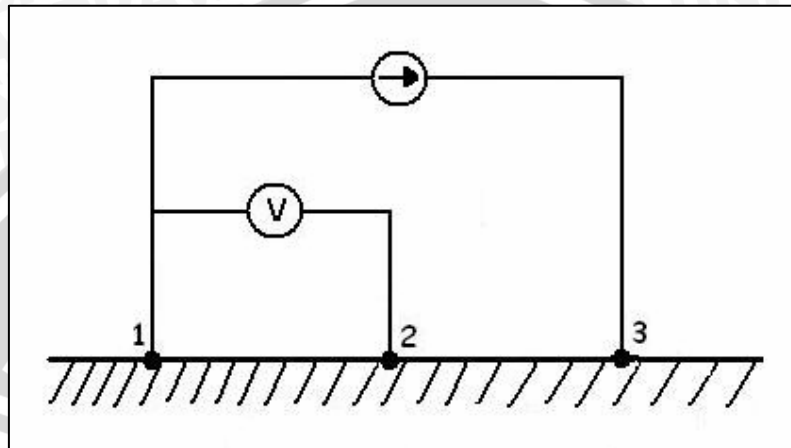
Tabel 2.2. Harga koefisien K antara musim hujan dan kemarau

Tipe Pengetanahan	Penanaman	Kedalaman (m)	Harga K
Kerja & Proteksi Pengetanahan	Sejajar	0,5	4,5 – 6,5
		0,8	1,6 – 3
	Tegak Lurus	0,8	1,4 - 2
Pengetanahan Perlindungan Petir	Sejajar	0,5	1,4 – 1,8
	Tegak Lurus	0,8	1,2 – 1,4

Sumber: Abdul Hadi, 1994

2.3.2 Pengukuran Tahanan Pengetanahan

Pengukuran nilai tahanan pengetanahan (resistansi pembumian) menggunakan metode tiga titik (*Three-Point Method*). Misalkan tiga buah batang pengetanahan di mana batang 1 yang tahanannya hendak diukur dan batang-batang 2 dan 3 sebagai batang pengetanahan pembantu yang juga belum diketahui tahanannya. Gambar rangkaian metode tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Pengukuran Tahanan Pengetanahan Dengan Metode Tiga Titik

Sumber: Hutauruk, 1999: 144

Bentuk umum perhitungan tahanan jenis (ρ) jika diketahui nilai tahanan tanah (R), luas penampang (A), dan panjang media yang diukur (L) dapat dilihat pada Persamaan (2-1) berikut:

$$\rho = R \frac{A}{L} \dots \dots \dots (2-1)$$

Bila tahanan di antara tiap-tiap batang pengetanahan diukur dengan arus konstan, tiap pengukuran dapat ditulis sebagai berikut:

$$R_{1-2} = \frac{V_{1-2}}{I} = R_{11} + R_{22} - 2R_{12} \dots \dots \dots (2-2)$$

$$R_{1-3} = \frac{V_{1-3}}{I} = R_{11} + R_{33} - 2R_{13} \dots \dots \dots (2-3)$$

$$R_{2-3} = \frac{V_{2-3}}{I} = R_{22} + R_{33} - 2R_{23} \dots \dots \dots (2-4)$$

$$\frac{V_{1-2} + V_{1-3} - V_{2-3}}{I} = 2R_{11} - 2R_{12} - 2R_{13} + 2R_{23} \dots \dots \dots (2-5)$$

Tetapi,

$$V_{1-3} = V_{1-2} + V_{2-3} \dots \dots \dots (2-6)$$

Jadi:

$$R = \frac{V_{1-2}}{I} = R_{11} - R_{12} - R_{13} + R_{23} \dots\dots\dots(2-7)$$

Akhirnya:

$$R_{11} = R + R_{12} + R_{13} - R_{23} \dots\dots\dots(2-8)$$

Tahanan batang pengetanahan dari elektroda 1 diberikan pada Persamaan (2-8) jika kita dapat membuat:

$$R_{12} + R_{13} - R_{23} = 0 \dots\dots\dots(2-9)$$

Keadaan ini dapat diperoleh dengan mengatur posisi elektroda 2 sehingga Persamaan (2-9) dipenuhi.

2.4 Jenis-jenis Elektroda Pengetanahan

Yang dimaksud dengan elektroda (konduktor) pengetanahan adalah elektroda dari bahan metal (biasanya dari bahan tembaga) yang ditanam dalam tanah yang digunakan untuk pengetanahan.

Dalam PUIL 2000, elektroda-elektroda pengetanahan dapat dibagi menjadi beberapa jenis, yaitu: elektroda batang, elektroda plat, elektroda pita, dan juga elektroda dari bahan-bahan yang lain.

2.4.1 Elektroda Batang

Elektroda batang dibuat dari pipa atau besi baja profil yang dipancangkan tegak lurus ke dalam tanah. Panjang elektroda yang harus digunakan, disesuaikan dengan tahanan pengetanahan yang diperlukan.

Untuk memancangkan elektroda-elektroda ini sering digunakan *palu lantak*. Elektroda-elektroda tersebut dapat juga dimasukkan ke dalam tanah dengan getaran, dengan menggunakan *palu kango*.

Kalau tanahnya kering, kadang-kadang sangat sulit untuk mencapai tahanan penyebaran yang cukup rendah. Dalam hal ini, ada kalanya sifat-sifat tanah itu dapat diperbaiki dengan mengolahnya dengan bahan-bahan kimia.

Kalau digunakan beberapa elektroda batang yang dihubungkan paralel, jarak antara elektroda-elektroda ini harus sekurang-kurangnya sama dengan 2 panjang efektif dari satu elektroda, atau sekurang-kurangnya 4 meter. Elektroda-elektroda itu tidak boleh berada dalam corong tegangan dari elektroda di sampingnya.

Pengetanahan dengan menggunakan elektroda batang juga disebut pengetanahan dalam.

2.4.2 Elektroda Plat

Elektroda plat dibuat dari plat logam, plat logam berlubang atau dari kawat kasa. Plat ini ditanam tegak lurus di dalam tanah, dengan tepi atasnya sekurang-kurangnya satu meter di bawah permukaan tanah.

Luas plat yang harus digunakan tergantung pada tahanan pengetanahan yang diperlukan. Pada umumnya selebar plat ukuran 1 m x 0,5 m sudah cukup.

Kalau digunakan beberapa plat yang dihubungkan paralel untuk memperoleh tahanan pengetanahan yang lebih rendah, jarak antara plat-plat ini harus sekurang-kurangnya 3 meter.

2.4.3 Elektroda Pita

Elektroda pita dibuat dari hantaran berbentuk pita atau batang bulat, atau dari hantaran yang dipilin. Elektroda pengetanahan ini berbentuk radial, lingkaran atau suatu kombinasi dari bentuk-bentuk tersebut.

Elektroda pita berbentuk radial harus disusun simetris. Jumlah jari-jari yang digunakan tidak perlu lebih dari enam. Penambahan jari-jari melebihi jumlah ini tidak akan banyak mengurangi tahanan pengetanahannya.

2.4.4 Jenis-jenis Elektroda Lain

a. Jaringan pipa air

Jaringan pipa air dari logam dapat juga dipakai sebagai elektroda pengetanahan. Jika saluran air minum di dalam rumah atau gedung dipakai untuk pengetanahan, ujung-ujung pipa di kedua sisi dari meter air harus saling dihubungkan dengan baik.

b. Selubung logam dari kabel tanah

Selubung logam dari kabel tanah ini yang tidak dibungkus dengan bahan lasi sintetis dan ditanam langsung dalam tanah, dapat dipakai sebagai elektroda pengetanahan. Di kedua sisi dari kotak sambung, selubung logam ini harus saling dihubungkan dengan hantaran. Konduktivitas hantaran penghubung ini harus sekurang-kurangnya sama dengan konduktivitas selubung logam tersebut.

Menurut peraturan Belanda, besi beton dari bangunan-bangunan beton bertulang juga boleh digunakan sebagai elektroda pengetanahan. (Van Harten 3, 1985: 240).

2.5 Bahan dan Ukuran Elektroda Pengetanahan

2.5.1 Bahan Elektroda Pengetanahan

Bahan yang digunakan untuk elektroda pengetanahan adalah tembaga, baja berlapis seng atau baja berlapis tembaga. Bahan ini harus kuat, tahan pengaruh kimia, tahan pengaruh perubahan iklim dan tahan lama. Beberapa sifat logam murni ditunjukkan dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Beberapa sifat logam murni

Logam	Tahanan ($\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ (at 20 ⁰ C))	Daya Hantar (S.m/mm ²)	Koefisien Temperatur [$\Omega / (\Omega \cdot \text{C}^0)$]
Aluminium	0,33	30,3	0,004
Besi Murni	0,11	9,1	0,0047
Besi Tuang	0,92	1,09	0,0045
Tembaga	0,0175	57	0,004
Timah Hitam	0,21	4,76	0,0038
Nikel	0,12	8,33	0,0039
Platina	0,115	8,7	0,0025...0,0037

Sumber: TEDC Bandung

2.5.2 Ukuran Elektroda Pengetanahan

Ukuran-ukuran minimum yang harus digunakan untuk elektroda pengetanahan diberikan dalam Tabel 2.4.

Kalau tanahnya sangat korosif, atau digunakan elektroda baja tanpa lapisan seng atau lapisan tembaga, sebaiknya digunakan ukuran-ukuran minimum 1,5 x ukuran-ukuran yang diberikan pada Tabel 2.4. Kalau elektroda yang dimaksudkan untuk mengatur gradient tegangan, luas penampang minimum yang boleh digunakan adalah sebagai berikut:

- Untuk baja berlapis seng : minimum 16 mm²
- Untuk baja berlapis tembaga : minimum 16 mm²
- Untuk tembaga : minimum 10 mm²

Tabel 2.4. Ukuran-ukuran minimum elektroda pengetanahan

Jenis Elektroda	Bahan		
	Baja berlapis seng (proses panas)	Baja berlapis tembaga	Tembaga
Elektroda Pita	<i>Pita baja:</i> Luas penampang : 100 mm ² Tebal : 3 mm <i>Hantaran pilin:</i> (bukan kawat halus) Luas penampang : 95 mm ²	Luas penampang : 50 mm ²	<i>Pita tembaga :</i> Luas penampang : 50 mm ² Tebal : 2 mm <i>Hantaran pilin:</i> (bukan kawat halus) Luas penampang : 35 mm ²
Elektroda Batang	<i>Pipa baja :</i> Diameter : 1" <i>Baja profil:</i> 65 x 65 x 7 mm (atau batang profil lain yang setaraf)	<i>Baja bulat :</i> Diameter : 15 mm Tebal lapisan tembaga : 2,5 mm	<i>Pipa tembaga :</i> Luas penampang : 50 mm ² Tebal : 2 mm <i>Hantaran pilin:</i> (bukan kawat halus) Luas penampang : 35 mm ²
Elektroda Plat	<i>Plat baja :</i> Luas : 0,5 – 1 m ² Tebal : 3 mm		<i>Plat tembaga :</i> Luas : 0,5 – 1 m ² Tebal : 2 mm

Sumber: PUIL 2000

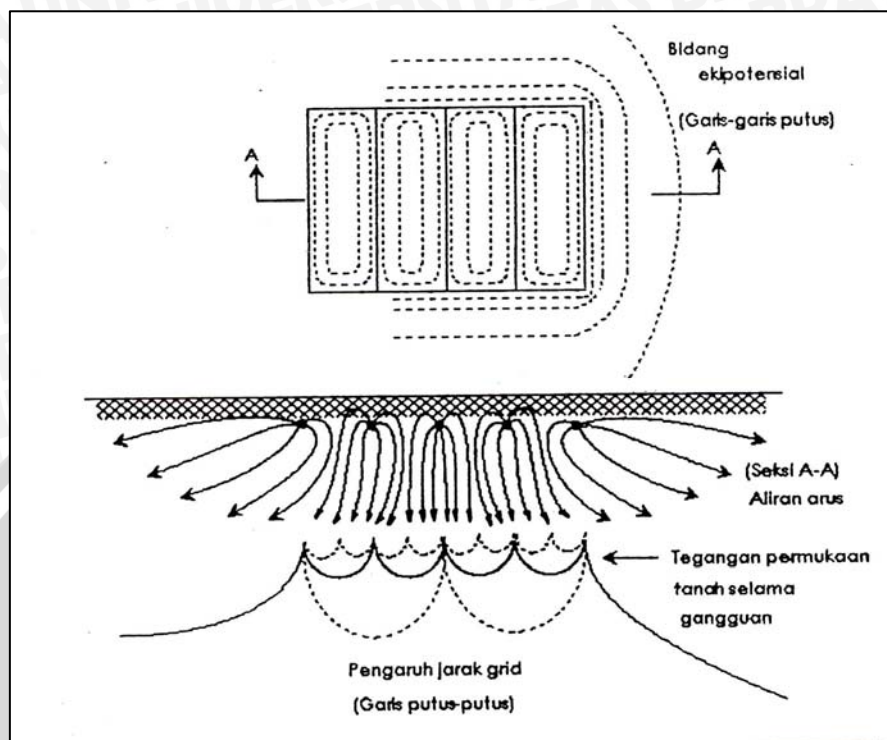
2.6 Pengetanahan Grid

Pengetanahan grid (kisi-kisi) adalah suatu sistem pengetanahan yang dilakukan dengan cara menanamkan batang elektroda pengetanahan sejajar dengan permukaan tanah, dan elektroda-elektroda tersebut dihubungkan satu sama lain sehingga membentuk kelompok mesh.

Pengetanahan grid tidak sama dengan pengetanahan batang vertikal, walaupun demikian di dalam mencari besarnya tahanan pengetanahan antara pengetanahan grid dan pengetanahan batang vertikal saling berhubungan. Pengetanahan grid dilakukan untuk mengatasi timbulnya gradien tegangan yang tidak rata pada permukaan tanah. Apabila jumlah konduktor yang ditanam banyak maka hal ini akan mendekati pengetanahan yang paling ideal yaitu pengetanahan plat. Walaupun dengan sistem pengetanahan plat distribusi tegangan paling baik selama kondisi gangguan namun masih perlu dipertimbangkan masalah biaya.

Distribusi tegangan untuk pengetanahan grid yang paling sederhana pada gardu induk tampak seperti Gambar 2.3. Pada gambar tampak bahwa makin banyak elektroda

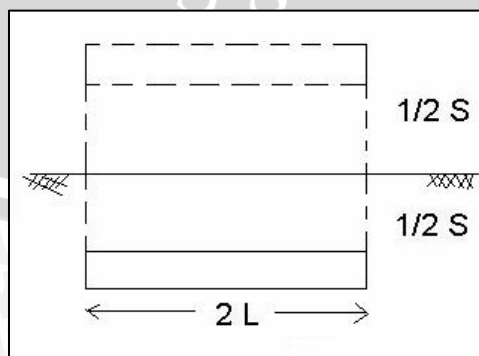
pengetanannya maka distribusi tegangan semakin merata dan sebaliknya makin sedikit elektroda pengetanahan maka distribusi tegangan semakin tidak merata.



Gambar 2.3. Distribusi tegangan dan arus di sekitar pengetanahan grid
Sumber: IEEE std 80 -1986

2.6.1 Penanaman Batang Elektroda Tunggal Sejajar Permukaan Tanah

Untuk menghitung nilai tahanan pengetanahan satu batang elektroda yang ditanam sejajar permukaan tanah prinsipnya sama dengan perhitungan untuk penanaman dua batang elektroda yang tegak lurus permukaan tanah. Dalam hal ini efek bayangan masih tetap diperhitungkan. Untuk lebih jelasnya penanaman elektroda tunggal sejajar permukaan tanah dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Penanaman Elektroda Tunggal Sejajar Permukaan Tanah
Sumber: Tagg, 1964: 143

Dengan asumsi bahwa panjang elektroda yang ditanam sejajar permukaan tanah adalah $2L$ dengan kedalaman penanaman $S/2$.

2.6.2 Penanaman Beberapa Batang Elektroda Sejajar Permukaan Tanah (Mesh)

Sebagaimana yang telah diuraikan di depan bahwa untuk mendapatkan tahanan pengetanahan yang rendah serta gradien tegangan yang rata maka dilakukan penanaman beberapa batang elektroda yang membentuk mesh (kisi-kisi atau jaring-jaring). Bentuk mesh yang umum dipakai adalah bujur sangkar atau persegi panjang yang mana dalam satu grid dapat terbentuk beberapa mesh. Contoh pengetanahan grid dengan mesh seperti tampak pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Sistem pengetanahan grid dengan mesh.

Sumber : IEEE std 80, 1986

2.7 Tegangan Mesh

Tegangan mesh merupakan salah satu bentuk tegangan sentuh. Tegangan mesh ini didefinisikan sebagai tegangan sentuh maksimum yang diukur diantara salah satu konduktor pembentuk mesh dan suatu titik di tengah-tengah sel mesh. Tegangan mesh ini menyatakan tegangan tertinggi yang mungkin timbul sebagai tegangan sentuh yang dapat dijumpai dalam sistem pengetanahan gardu induk, dan inilah yang diambil sebagai tegangan untuk desain yang aman. (Hutauruk, 1999: 152).

Nilai tegangan mesh diperoleh sebagai hasil dari faktor jarak pisah K_m , faktor koreksi K_i dimana nilai dari beberapa kesalahan dimasukkan oleh asumsi dalam penentuan K_m , tahanan jenis tanah (ρ), dan arus rata-rata per unit dari panjang efektif konduktor sistem pengetanahan yang ditanam (I_G/L_M), seperti ditunjukkan pada Persamaan 2.10. (Design Guide for Rural Substation, 2001: 551).

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \dots\dots\dots (2-10)$$

Dimana:

ρ = Tahanan jenis tanah ($\Omega - m$)

K_m = Faktor jarak pisah untuk tegangan mesh

K_i = Faktor koreksi untuk geometri grid

I_G = Arus grid maksimum yang mengalir diantara pengetanahan grid dan tanah sekelilingnya (A)

L_M = Panjang efektif $L_c + L_R$ untuk tegangan mesh (m)

L_c = Panjang total konduktor grid (m)

L_R = Panjang total elektroda batang/rod (m)

Faktor geometri K_m ditunjukkan pada Persamaan 2.11.

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right] \dots\dots\dots (2-11)$$

Dimana:

D = Jarak pisah antara konduktor-konduktor paralel (m)

d = Diameter konduktor (m)

h = Kedalaman penanaman konduktor pengetanahan (m)

n = Faktor geometri terdiri dari $n_a, n_b, n_c,$ dan n_d

K_h = Faktor koreksi bobot yang menekankan pada pengaruh kedalaman grid

K_{ii} = Faktor koreksi bobot yang menyesuaikan pengaruh konduktor dalam pada sudut mesh

Untuk grid dengan elektroda batang (rod) di sepanjang tepi grid atau seluruh area grid, maka

$$K_{ii} = 1$$

Untuk grid tanpa elektroda batang (rod) atau hanya dengan beberapa konduktor rod, maka

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^2} \dots\dots\dots (2-12)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \dots\dots\dots (2-13)$$

$h_0 = 1$ m (kedalaman referensi untuk grid)

Jumlah efektif konduktor paralel pada grid (n) ditunjukkan pada Persamaan 2-14.

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \dots\dots\dots (2-14)$$

Dimana:

$$n_a = \frac{2 \cdot L_C}{L_p} \dots\dots\dots (2-15)$$

$n_b = 1$ untuk grid bentuk persegi

$n_c = 1$ untuk grid bentuk persegi dan persegi panjang

$n_d = 1$ untuk grid bentuk persegi, persegi panjang, dan grid bentuk-L

Selain itu:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \dots\dots\dots (2-16)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{0,7 \cdot A} \dots\dots\dots (2-17)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \dots\dots\dots (2-18)$$

Dimana:

L_C = Panjang total konduktor grid horizontal/kisi utama (m)

L_p = Panjang keliling grid (m)

A = Luas area grid (m²)

L_x = Panjang maksimum grid dalam arah sumbu-x (m)

L_y = Panjang maksimum grid dalam arah sumbu-y (m)

D_m = Jarak maksimum antara dua titik pada grid (m)

D = Jarak pisah antara konduktor-konduktor paralel (m)

d = Diameter konduktor (m)

h = Kedalaman penanaman konduktor pengetanahan (m)

Faktor ketidakteraturan/koreksi (K_i), ditunjukkan pada Persamaan 2-19.

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \dots\dots\dots (2-19)$$

BAB III METODOLOGI

Metodologi adalah suatu cara atau prosedur bagaimana penelitian atau skripsi tersebut dikerjakan. Metodologi yang dipakai dalam penyusunan skripsi ini adalah dengan percobaan atau pengujian di laboratorium dimana data-data yang diperoleh akan dihitung kemudian dianalisa dengan rujukan literatur. Adapun metode pembahasan dalam penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut:

3.1 Studi Literatur

Dalam pembahasan dan penyusunan skripsi ini, memanfaatkan beberapa literatur yang bisa digunakan sebagai rujukan, baik dari buku referensi, materi perkuliahan, internet maupun dari hasil penelitian sebelumnya. Dalam studi literatur ini mempelajari beberapa hal, antara lain:

- a. Definisi sistem pengetanahan dan macam-macamnya.
- b. Pengetanahan model grid (mesh).
- c. Faktor-faktor yang mempengaruhi tahanan pengetanahan, seperti: tahanan jenis tanah, ukuran elektroda pengetanahan dan tahanan kontak elektroda pengetanahan.
- d. Metode pengukuran tahanan pengetanahan.
- e. Pengaruh konfigurasi pengetanahan mesh dengan kedalaman penanaman yang berbeda-beda terhadap nilai tahanan pengetanahan secara matematis.
- f. Pengaruh konfigurasi pengetanahan mesh terhadap nilai tegangan mesh secara matematis.

3.2 Data

Data yang digunakan sebagai bahan analisis adalah data yang diperoleh dari hasil pengujian konfigurasi model pengetanahan mesh di laboratorium. Adapun data-data yang dimaksud adalah:

- a. Konfigurasi model pengetanahan mesh.
- b. Panjang total konduktor yang digunakan dalam sebuah model mesh.
- c. Jumlah sel mesh yang digunakan.
- d. Kedalaman penanaman model pengetanahan mesh.

- e. Nilai tahanan pengetanahan setiap model konfigurasi.
- f. Nilai tegangan mesh di setiap titik tengah pada model pengetanahan mesh.

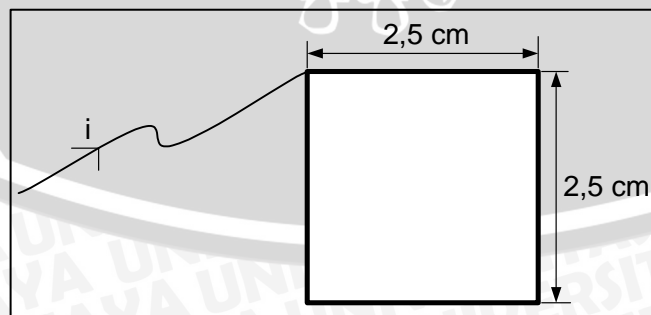
3.3 Pengujian Laboratorium

Untuk memperoleh data-data di laboratorium dilakukan hal-hal sebagai berikut:

- a. Pengujian dilakukan di Laboratorium Dasar Elektrik dan Pengukuran Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.
- b. Pengukuran tahanan pengetanahan dilakukan dengan metode 3 (tiga) titik yaitu dengan sebuah model pengetanahan mesh yang akan diuji dan dua buah elektroda bantu yang berupa elektroda batang (rod).
- c. Media pengetanahan menggunakan larutan yang berupa campuran air dan garam yang berada di dalam sebuah bejana dengan volume tertentu agar diperoleh data yang lebih akurat karena memungkinkan diperolehnya tahanan jenis yang homogen di semua titik.
- d. Pengujian berupa pengaruh kedalaman penanaman sel mesh, penambahan panjang konduktor yang dipakai pada sebuah sel mesh, perubahan konfigurasi pada panjang konduktor yang sama, dan besarnya nilai tegangan mesh di setiap titik tengah masing-masing sel mesh terhadap titik referensi.
- e. Pengujian dilakukan dengan menanam model mesh ke dalam larutan dengan kedalaman tertentu.

3.3.1 Obyek Uji

Dalam pengujian laboratorium ini menggunakan obyek uji berupa model pengetanahan mesh yang terbuat dari besi dengan ukuran seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Salah Satu Model Mesh Yang Digunakan
Sumber: Penulis

Spesifikasi :

- Bahan : Batang besi
- Panjang Total : 10 cm
- Diameter : 1 mm

3.3.2 Alat Yang Digunakan

- a. Sumber Arus AC, digunakan untuk menghasilkan arus yang nilainya dapat diatur.
- b. Voltmeter, digunakan untuk mengukur besarnya nilai tegangan antara dua titik.
- c. Elektroda bantu sebanyak dua (2) buah berupa elektroda batang (rod) yang terbuat dari batang tembaga BC 6 mm² dengan panjang 15 cm.
- d. Beberapa kabel konektor, digunakan untuk menghubungkan antara sumber arus, obyek uji, elektroda bantu, dan alat ukur.

3.3.3 Rangkaian Pengukuran

Pengukuran tahanan pengetanahan menggunakan metode tiga titik seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3 dengan menginjeksikan arus AC konstan sebesar I di antara obyek uji (1) dan elektroda bantu (3) yang menimbulkan beda potensial sebesar V di antara obyek uji (1) dan elektroda bantu (2). Sehingga didapatkan nilai tahanan pengetanahan sebesar R , di mana $R = V / I$.

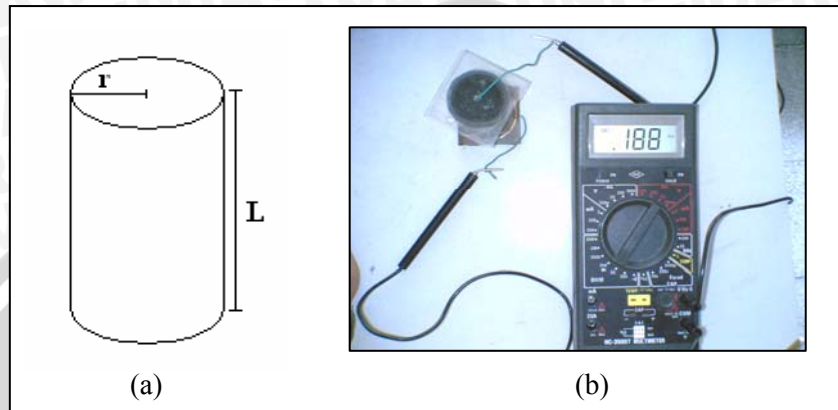
Gambar rangkaian percobaan pengukuran tahanan pengetanahan dan tegangan mesh pada sebuah model mesh yang dilakukan di laboratorium ditunjukkan pada Gambar 3.2 (a) dan (b).



Gambar 3.2 (a) Obyek uji dan media tanam; (b) Alat ukur (sumber arus AC dan voltmeter)

Sumber: Penulis

Pengukuran tahanan jenis larutan dilakukan dengan mengambil larutan dengan volume tertentu kemudian ditempatkan dalam sebuah tabung dimana kedua sisi lingkarannya dihubungkan dengan sebuah ohmmeter. Gambar tabung uji yang digunakan untuk pengukuran tahanan jenis larutan dan rangkaian pengukurannya ditunjukkan pada Gambar 3.3 (a) dan (b).

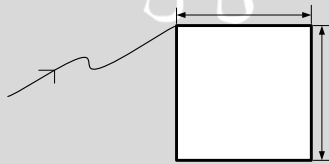
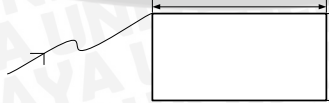


Gambar 3.3 (a) Tabung uji; (b) Rangkaian pengukuran tahanan jenis larutan
Sumber: Penulis

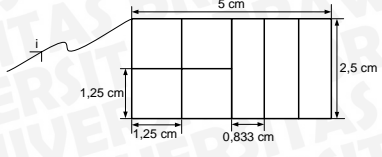
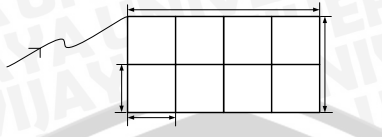
3.4 Konfigurasi Pengetanahan Mesh

Beberapa konfigurasi pengetanahan mesh yang akan diteliti tahanan pengetanahannya, beserta dengan parameter-parameter yang akan diukur ditunjukkan pada Tabel 3.1 di bawah ini :

Tabel 3.1. Berbagai Konfigurasi Model Pengetanahan Mesh

No.	Jumlah Sel Mesh	Panjang Total (cm)	Bentuk Konfigurasi	Tahanan Pengetanahan (Ω)	
				Kedalaman (cm)	
				4	8
1.	Satu (1)	10	 M-1a		
2.	Satu (1)	10	 M-1b		

3.	Dua (2)	12,5	<p>M-2</p>		
4.	Tiga (3)	13,75	<p>M-3a</p>		
5.	Tiga (3)	15	<p>M-3b</p>		
6.	Empat (4)	15	<p>M-4</p>		i
7.	Lima (5)	22,5	<p>M-5</p>		
8.	Enam (6)	25	<p>M-6a</p>		
9.	Enam (6)	27,5	<p>M-6b</p>		
10.	Tujuh (7)	26,25	<p>M-7a</p>		

11.	Tujuh (7)	27,5	 <p>M-7b</p>		
12.	Delapan (8)	27,5	 <p>M-8</p>		

Sumber: Penulis

3.5 Kesimpulan

Dari beberapa analisis yang dilakukan, akan diperoleh kesimpulan yang mengacu pada rumusan masalah dan tujuan dari penelitian ini, yaitu bagaimana pengaruh bentuk konfigurasi, penambahan panjang total, penambahan sel mesh dan kedalaman penanaman model pengetanahan mesh terhadap nilai tahanan pengetanahan, serta pengaruh konfigurasi pengetanahan mesh terhadap nilai tegangan mesh dan gradien tegangan di setiap titik tertentu di sekitar pengetanahan mesh. Dengan demikian dapat dijadikan referensi pada sistem pengetanahan mesh yang sesungguhnya.

BAB IV

DATA DAN ANALISIS

Dalam bab ini akan dipaparkan data-data nilai tahanan pengetanahan dari masing-masing model mesh dalam berbagai bentuk dan kedalaman serta nilai tegangan terdistribusi di setiap titik tertentu pada suatu kedalaman.

Dari hasil penelitian data-data tersebut selanjutnya akan dianalisis hal-hal sebagai berikut:

- Pengaruh bentuk model mesh terhadap nilai tahanan pengetanahan baik pada panjang konduktor yang sama maupun berbeda.
- Pengaruh penambahan panjang konduktor atau sel pembentuk mesh terhadap nilai tahanan pengetanahan.
- Pengaruh kedalaman penanaman terhadap nilai tahanan pengetanahan.
- Pengaruh bentuk model mesh terhadap nilai tegangan mesh.
- Pengaruh bentuk model mesh terhadap nilai gradien tegangan.

Seperti yang telah diuraikan pada Bab III, pada skripsi ini akan diteliti 12 bentuk model mesh yang berbeda Model-1 (M-1) sampai dengan Model-8 (M-8) baik pada panjang konduktor yang sama maupun berbeda.

Pengukuran nilai tahanan pengetanahan untuk masing-masing model mesh ditunjukkan pada Bab III Gambar 3.2 menggunakan metode pengukuran tiga titik yaitu dengan mengukur nilai tegangan antara titik mesh yang diukur dengan titik konduktor bantu, kemudian hasilnya dibagi dengan nilai arus yang mengalir dan telah ditetapkan sebelumnya. Pada pengukuran ini arus AC konstan ditetapkan sebesar 0,8 A yang dialirkan dari sumber arus AC mengalir melalui model mesh dan konduktor bantu.

4.1 Pengukuran tahanan jenis larutan.

Media pengetanahan pada penelitian ini menggunakan larutan yang berupa campuran air dan garam dalam sebuah bejana dengan volume tertentu dengan tujuan agar diperoleh tahanan jenis yang lebih homogen. Pengukuran tahanan jenis larutan ditunjukkan pada Bab III Gambar 3.3, dari pengukuran ini maka akan diperoleh nilai tahanan yang selanjutnya akan diperoleh nilai tahanan jenisnya.

Dari hasil pengukuran diperoleh nilai tahanan terukur sebesar $101,996 \Omega$ sedangkan tabung uji yang digunakan memiliki ukuran panjang (L) 5,5 cm dan jari-jari (r) 1,85 cm, maka dengan menggunakan Persamaan 2-1 akan diperoleh:

$$r = 1,85 \text{ cm, maka}$$

$$A = \pi \times r^2$$

$$= 10,747 \text{ cm}^2 = 10,747 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$L = 5,5 \text{ cm} = 5,5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\rho = R \frac{A}{L} = 1,993 \Omega.m$$

Jadi nilai tahanan jenis larutan adalah sebesar $1,993 \Omega.m$

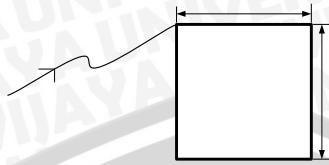
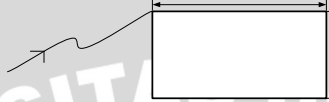
4.2 Pengaruh bentuk model konfigurasi sel mesh terhadap nilai tahanan pengetanahan pada panjang konduktor yang sama.

Pengukuran nilai tahanan pengetanahan dengan panjang konduktor yang sama dilakukan pada tiga pasang model konfigurasi yaitu M-1a dengan M-1b, M-3b dengan M-4, dan M-6b, M-7b dengan M-8.

4.2.1 Model-1a (M-1a) dengan Model-1b (M-1b)

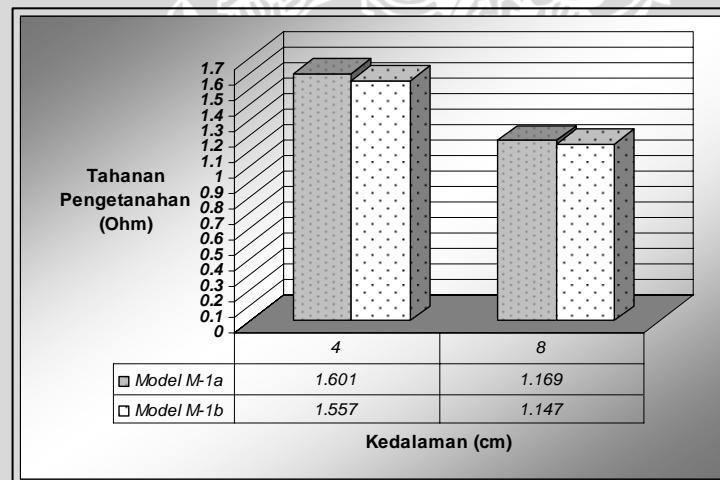
M-1a dan M-1b adalah model mesh dengan panjang total konduktor 10 cm, tetapi dengan bentuk konfigurasi yang berbeda dimana M-1a berbentuk persegi dengan panjang sisi 2,5 cm sedangkan M-1b berbentuk persegi panjang dengan panjang 3,5 cm dan lebar 1,5 cm. Hasil pengukuran tahanan pengetanahan dari model mesh untuk kedalaman yang berbeda ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Model Mesh Dengan Panjang Total Konduktor 10 cm

No.	Jumlah Sel Pembentuk Mesh	Panjang Total (cm)	Bentuk Konfigurasi	Tahanan Pengetanahan (Ω)	
				Kedalaman (cm)	
				4	8
1.	Satu (1)	10	 M-1a	1,601	1,169
2.	Satu (1)	10	 M-1b	1,557	1,147

Sumber: Hasil pengukuran

Dari Tabel 4.1 dapat dibuat grafik hubungan antara perubahan bentuk model mesh dan nilai tahanan pengetanahan pada kedalaman 4 cm dan 8 cm untuk panjang total konduktor 10 cm seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Grafik pengaruh perubahan bentuk model mesh (M-1a dan M-1b) terhadap nilai tahanan pengetanahan pada kedalaman yang berbeda untuk panjang total konduktor 10 cm.

Sumber: Hasil pengukuran

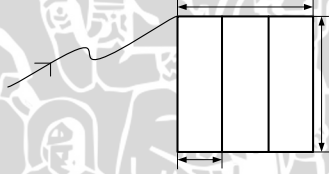
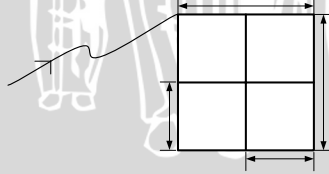
Dari Gambar 4.1 dapat diamati bahwa perubahan bentuk model mesh dan kedalaman penanaman mempengaruhi besarnya nilai tahanan pengetanahan. M-1b memiliki nilai tahanan pengetanahan yang lebih kecil dibandingkan dengan M-1a, meskipun perbedaannya sangat kecil yaitu sebesar 2,748 % (pada kedalaman 4 cm) dan 1,882 % (pada kedalaman 8 cm). Semakin dalam model mesh ditanam maka nilai

tahanan pengetanahan akan semakin kecil, yaitu untuk perubahan kedalaman penanaman dari 4 cm menjadi 8 cm, M-1a mengalami penurunan nilai tahanan pengetanahan sebesar 26,983 % sedangkan M-1b sebesar 26,333 %.

4.2.2 Model-3b (M-3b) dengan Model-4 (M-4)

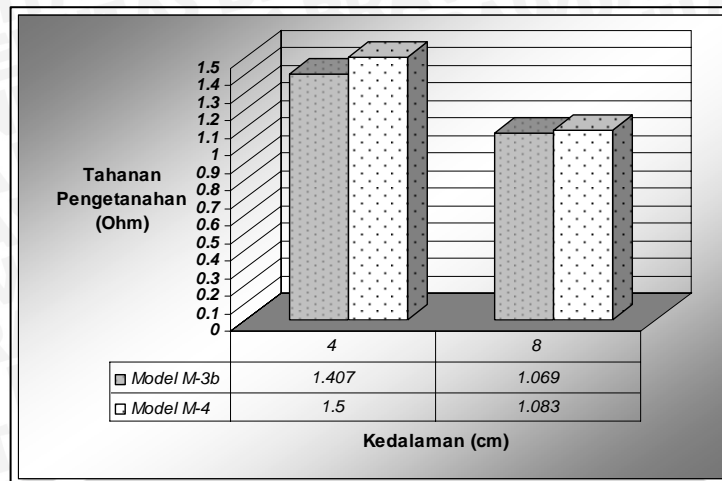
M-3b dan M-4 adalah model mesh dengan panjang total konduktor 15 cm, tetapi dengan bentuk konfigurasi yang berbeda dimana M-3b berbentuk persegi yang terbagi menjadi tiga bagian persegi panjang dengan ukuran masing-masing panjang 2,5 cm dan lebar 0,833 cm sedangkan M-4 berbentuk persegi yang terbagi menjadi empat bagian persegi dengan panjang sisi masing-masing 1,25 cm. Hasil pengukuran tahanan pengetanahan dari model mesh untuk kedalaman yang berbeda ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Model Mesh Dengan Panjang Total Konduktor 15 cm

No.	Jumlah Sel Pembentuk Mesh	Panjang Total (cm)	Bentuk Konfigurasi	Tahanan Pengetanahan (Ω)	
				Kedalaman (cm)	
				4	8
1.	Tiga (3)	15	 M-3b	1,407	1,069
2.	Empat (4)	15	 M-4	1,500	1,083

Sumber: Hasil pengukuran

Dari Tabel 4.2 dapat dibuat grafik hubungan antara perubahan bentuk model mesh dan nilai tahanan pengetanahan pada kedalaman 4 cm dan 8 cm untuk panjang total konduktor 15 cm seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Grafik pengaruh perubahan bentuk model mesh (M-3b dan M-4) terhadap nilai tahanan pengetanahan pada kedalaman yang berbeda untuk panjang konduktor 15 cm.

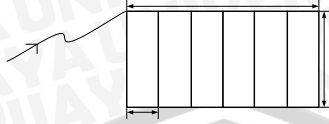
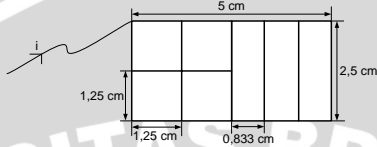
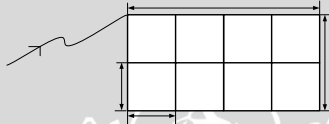
Sumber: Hasil pengukuran

Dari Gambar 4.2 dapat diamati bahwa perubahan bentuk model mesh dan kedalaman penanaman mempengaruhi besarnya nilai tahanan pengetanahan. M-3b memiliki nilai tahanan pengetanahan yang lebih kecil dibandingkan dengan M-4, meskipun perbedaannya sangat kecil yaitu sebesar 6,2 % (pada kedalaman 4 cm) dan 1,293 % (pada kedalaman 8 cm). Semakin dalam model mesh ditanam maka nilai tahanan pengetanahan akan semakin kecil, yaitu untuk perubahan kedalaman penanaman dari 4 cm menjadi 8 cm, M-3b mengalami penurunan nilai tahanan pengetanahan sebesar 24,023 % sedangkan M-4 sebesar 27,8 %.

4.2.3 Model-6b (M-6b), Model-7b (M-7b) dengan Model-8 (M-8)

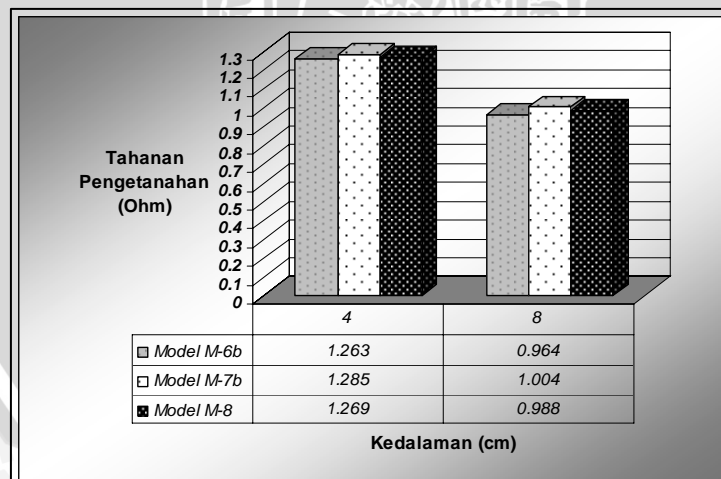
M-6b, M-7b dan M-8 adalah model mesh dengan panjang total konduktor 27,5 cm, tetapi dengan bentuk konfigurasi yang berbeda dimana M-6b berbentuk persegi panjang yang terbagi menjadi enam bagian persegi panjang dengan ukuran masing-masing panjang 2,5 cm dan lebar 0,833 cm. M-7b berbentuk persegi panjang yang terbagi menjadi empat bagian persegi dengan panjang sisi masing-masing 1,25 cm dan tiga bagian persegi panjang dengan ukuran masing-masing panjang 2,5 cm lebar 0,833 cm. M-8 berbentuk persegi panjang yang terbagi menjadi 8 bagian persegi dengan panjang sisi masing-masing 1,25 cm. Hasil pengukuran tahanan pengetanahan dari model mesh untuk kedalaman yang berbeda ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Model Mesh Dengan Panjang Total Konduktor 27,5 cm

No.	Jumlah Sel Pembentuk Mesh	Panjang Total (cm)	Bentuk Konfigurasi	Tahanan Pengetanahan (Ω)	
				Kedalaman (cm)	
				4	8
1.	Enam (6)	27,5	 M-6b	1,263	0,964
2.	Tujuh (7)	27,5	 M-7b	1,285	1,004
3.	Delapan (8)	27,5	 M-8	1,269	0,988

Sumber: Hasil pengukuran

Dari Tabel 4.3 dapat dibuat grafik hubungan antara perubahan bentuk model mesh dan nilai tahanan pengetanahan pada kedalaman 4 cm dan 8 cm untuk panjang total konduktor 27,5 cm seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Grafik pengaruh perubahan bentuk model mesh (M-6b, M-7b dan M-8) terhadap nilai tahanan pengetanahan pada kedalaman yang berbeda untuk panjang total konduktor 27,5 cm.

Sumber: Hasil pengukuran

Dari Gambar 4.3 dapat diamati bahwa perubahan bentuk model mesh dan kedalaman penanaman mempengaruhi besarnya nilai tahanan pengetanahan. M-6b

memiliki nilai tahanan pengetanahan paling kecil dibandingkan dengan M-7b, M-8, apabila M-7b dijadikan sebagai acuan maka M-6b dan M-8 mengalami penurunan nilai tahanan pengetanahan berturut-turut sebesar 1,712 % dan 1,245 % (pada kedalaman 4 cm) dan 3,984 % dan 1,594 % (pada kedalaman 8 cm). Semakin dalam model mesh ditanam maka nilai tahanan pengetanahan akan semakin kecil, yaitu untuk perubahan kedalaman penanaman dari 4 cm menjadi 8 cm, M-6b mengalami penurunan nilai tahanan pengetanahan sebesar 23,674 %; M-7b sebesar 21,868 %; dan M-8 sebesar 22,143 %.

4.3 Pengaruh penambahan panjang konduktor atau sel mesh terhadap nilai tahanan pengetanahan.

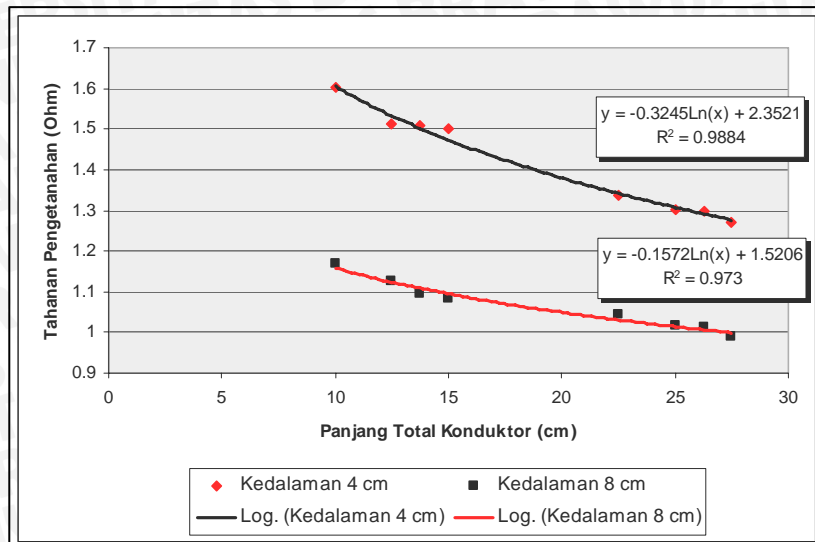
Pengukuran nilai tahanan pengetanahan dengan penambahan panjang konduktor atau sel mesh dilakukan pada model konfigurasi M-1a, M-2, M-3a, M-4, M-5, M-6a, M-7a, dan M-8. Hasil pengukuran tahanan pengetanahan dari model mesh untuk kedalaman yang berbeda ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Pengaruh Penambahan Panjang Konduktor atau Sel Mesh terhadap Nilai Tahanan Pengetanahan

No.	Jumlah Sel Pembentuk Mesh	Panjang Total (cm)	Bentuk Konfigurasi	Tahanan Pengetanahan (Ω)	
				Kedalaman (cm)	
				4	8
1.	Satu (1)	10	M-1a	1,601	1,169
2.	Dua (2)	12,5	M-2	1,513	1,125
3.	Tiga (3)	13,75	M-3a	1,507	1,097
4.	Empat (4)	15	M-4	1,500	1,083
5.	Lima (5)	22,5	M-5	1,338	1,044
6.	Enam (6)	25	M-6a	1,301	1,019
7.	Tujuh (7)	26,25	M-7a	1,300	1,012
8.	Delapan (8)	27,5	M-8	1,269	0,988

Sumber: Hasil pengukuran

Dari Tabel 4.4 dapat dibuat grafik hubungan antara perubahan panjang total konduktor dan nilai tahanan pengetanahan pada kedalaman 4 cm dan 8 cm untuk berbagai bentuk model mesh seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Grafik pengaruh perubahan panjang total konduktor terhadap nilai tahanan pengetanahan pada kedalaman yang berbeda.

Sumber: Hasil pengukuran

Dari Gambar 4.4 dapat diamati bahwa perubahan panjang total konduktor mempengaruhi besarnya nilai tahanan pengetanahan. Semakin panjang konduktor yang dipakai maka nilai tahanan pengetanahan akan semakin kecil dan semakin dalam penanaman model mesh maka nilai tahanan pengetanahan akan semakin kecil juga. Hal ini seperti terlihat pada grafik hubungan antara panjang total konduktor dengan nilai tahanan pengetanahan dengan karakteristik berbentuk kurva parabola dengan pendekatan logaritma dimana untuk kedalaman 4 cm menghasilkan nilai tahanan pengetanahan terbesar dan terkecil berturut-turut sebesar 1,601 Ω dan 1,269 Ω . Sedangkan untuk kedalaman 8 cm menghasilkan nilai tahanan pengetanahan terbesar dan terkecil berturut-turut sebesar 1,169 Ω dan 0,988 Ω .

Jika hasil pengukuran pada kedalaman 4 cm dijadikan sebagai acuan maka akan diperoleh bahwa untuk kedalaman penanaman yang berbeda 4 cm dan 8 cm penurunan nilai tahanan pengetanahan paling besar adalah pada panjang konduktor 15 cm yaitu sebesar 27,8 %.

Dari grafik dapat dilihat bahwa untuk kedalaman 4 cm dengan pendekatan logaritma diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$R = -0,3245\ln(L) + 2,3521$$

dimana; R = tahanan pengetanahan (Ω)

L = panjang total konduktor (cm)

Jadi untuk memperoleh nilai tahanan pengetanahan sebesar 1 Ω , maka akan dibutuhkan panjang total konduktor sebesar 64,503 cm dalam bentuk model.

Dari grafik juga dapat dilihat bahwa untuk kedalaman 8 cm dengan pendekatan logaritma diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$R = -0,1572\text{Ln}(L) + 1,5206$$

dimana; R = tahanan pengetanahan (Ω)

L = panjang total konduktor (cm)

Jadi untuk memperoleh nilai tahanan pengetanahan sebesar 1 Ω , maka akan dibutuhkan panjang total konduktor sebesar 27,432 cm dalam bentuk model.

Dari Tabel 4.4. dapat juga diperoleh perbandingan antara nilai tahanan pengetanahan dengan panjang total konduktor yang dipakai untuk kedalaman 4 cm dan 8 cm seperti ditunjukkan pada Tabel 4.5 dan 4.6.

Tabel 4.5. Perbandingan antara nilai tahanan pengetanahan dengan panjang total konduktor pada kedalaman 4 cm.

No.	Jumlah Sel Pembentuk Mesh	Bentuk Konfigurasi	Panjang Total (cm)	Tahanan Pengetanahan (Ω)	$\frac{\text{Tahanan Pengetanahan}}{\text{Panjang Total}}$ ($\frac{\Omega}{\text{cm}}$)
1.	Satu (1)	M-1a	10	1,601	0,160
2.	Dua (2)	M-2	12,5	1,513	0,121
3.	Tiga (3)	M-3a	13,75	1,507	0,110
4.	Empat (4)	M-4	15	1,500	0,100
5.	Lima (5)	M-5	22,5	1,338	0,060
6.	Enam (6)	M-6a	25	1,301	0,052
7.	Tujuh (7)	M-7a	26,25	1,300	0,050
8.	Delapan (8)	M-8	27,5	1,269	0,046

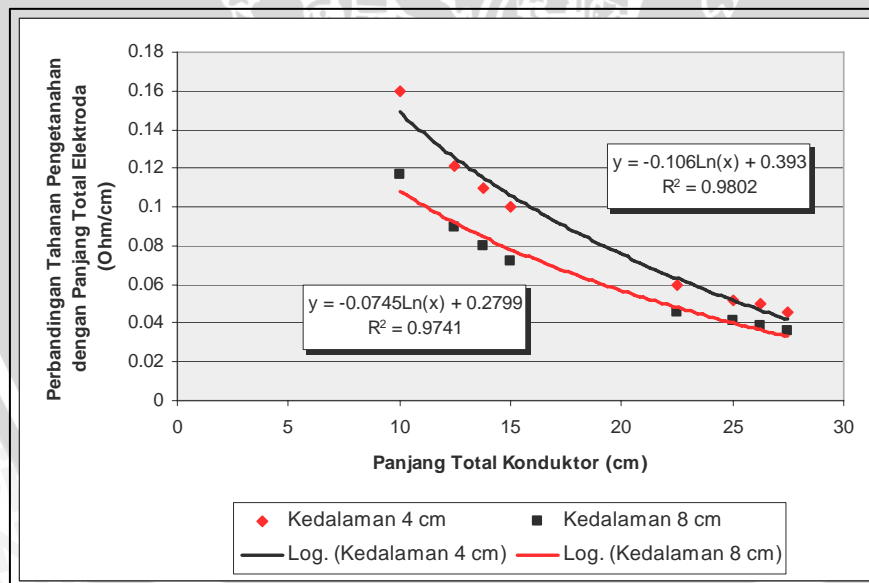
Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.6. Perbandingan antara nilai tahanan pengetanahan dengan panjang total konduktor pada kedalaman 8 cm.

No.	Jumlah Sel Pembentuk Mesh	Bentuk Konfigurasi	Panjang Total (cm)	Tahanan Pengetanahan (Ω)	$\frac{\text{Tahanan Pengetanahan}}{\text{Panjang Total}}$ $\left(\frac{\Omega}{\text{cm}}\right)$
1.	Satu (1)	M-1	10	1,169	0,117
2.	Dua (2)	M-2	12,5	1,125	0,090
3.	Tiga (3)	M-3a	13,75	1,097	0,080
4.	Empat (4)	M-4	15	1,083	0,072
5.	Lima (5)	M-5	22,5	1,044	0,046
6.	Enam (6)	M-6a	25	1,019	0,041
7.	Tujuh (7)	M-7a	26,25	1,012	0,039
8.	Delapan (8)	M-8	27,5	0,988	0,036

Sumber: Hasil perhitungan

Dari Tabel 4.5 dan 4.6 dapat dibuat grafik hubungan antara perubahan panjang total konduktor dan nilai perbandingan tahanan pengetanahan dengan panjang total konduktor yang dipakai pada kedalaman 4 cm dan 8 cm untuk berbagai bentuk model mesh seperti ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Grafik pengaruh perubahan panjang total konduktor terhadap nilai perbandingan tahanan pengetanahan dengan panjang total konduktor yang dipakai pada kedalaman yang berbeda.

Sumber: Hasil pengukuran

Dari Gambar 4.5 dapat diamati bahwa perubahan panjang total konduktor mempengaruhi besarnya nilai perbandingan tahanan pengetanahan dengan panjang total

konduktornya. Semakin panjang konduktor yang dipakai maka nilai perbandingan tahanan pengetanahan dengan panjang total konduktornya akan semakin kecil dan semakin dalam penanaman model mesh maka nilai perbandingan tahanan pengetanahan dengan panjang total konduktornya akan semakin kecil juga. Hal ini seperti terlihat pada grafik hubungan antara panjang total konduktor dengan nilai perbandingan tahanan pengetanahan dengan panjang total konduktornya yang menghasilkan kurva karakteristik berbentuk parabola dengan pendekatan logaritma dimana untuk kedalaman 4 cm menghasilkan nilai perbandingan terbesar dan terkecil berturut-turut sebesar $0,160 \frac{\Omega}{cm}$ dan $0,046 \frac{\Omega}{cm}$. Sedangkan untuk kedalaman 8 cm menghasilkan nilai perbandingan terbesar dan terkecil berturut-turut sebesar $0,117 \frac{\Omega}{cm}$ dan $0,036 \frac{\Omega}{cm}$.

Jika hasil pengukuran pada kedalaman 4 cm dijadikan sebagai acuan maka akan diperoleh bahwa untuk kedalaman penanaman yang berbeda 4 cm dan 8 cm nilai perbandingan tahanan pengetanahan dengan panjang konduktornya yang menghasilkan penurunan paling besar adalah pada panjang konduktor 15 cm yaitu sebesar 28 %.

Dari grafik dapat dilihat bahwa untuk kedalaman 4 cm dan 8 cm dengan pendekatan logaritma diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$R = -0,106 \ln(L) + 0,393 \text{ (pada kedalaman 4 cm)}$$

$$R = -0,0745 \ln(L) + 0,2799 \text{ (pada kedalaman 8 cm)}$$

dimana; R = perbandingan tahanan pengetanahan dengan konduktornya ($\frac{\Omega}{cm}$)

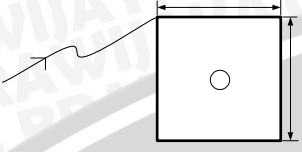
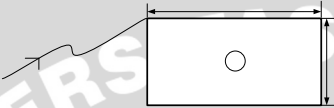
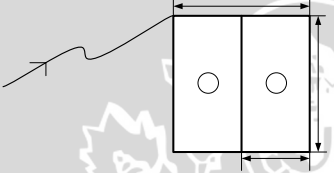
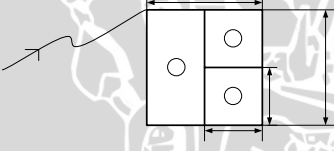
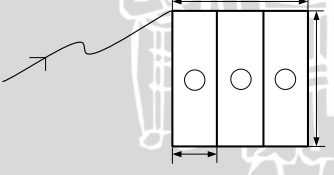
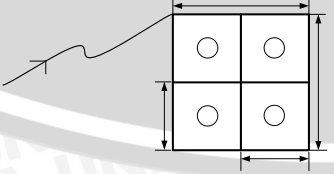
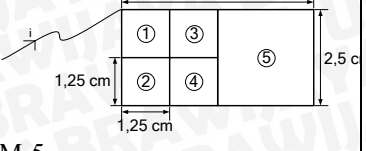
L = panjang total konduktor (cm)

4.4 Pengaruh bentuk model konfigurasi terhadap nilai tegangan mesh.

Seperti yang telah didefinisikan pada Bab II bahwa tegangan mesh adalah tegangan sentuh maksimum yang diukur diantara salah satu konduktor pembentuk mesh dan suatu titik di tengah-tengah sel mesh. Pada pengujian ini pengukuran tegangan mesh pada model mesh ini hanya dilakukan di dalam sel mesh dengan cara mengukur besarnya nilai tegangan antara titik injeksi arus (sebagai referensi) dan titik-titik di tengah sel mesh untuk masing-masing model mesh.

Pengukuran besarnya nilai tegangan mesh untuk masing-masing model mesh ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7. Tegangan mesh (E_m) pada model mesh dengan penanaman kedalaman 8 cm.

No.	Jumlah Sel Pembentuk Mesh	Panjang Total (cm)	Bentuk Konfigurasi	Tegangan Mesh Pada Kedalaman Penanaman 8 cm (volt)									
				Titik uji									
				1	2	3	4	5	6	7	8		
1.	Satu (1)	10	 M-1a	8,655									
2.	Satu (1)	10	 M-1b	10,896									
3.	Dua (2)	12,5	 M-2	7,961	7,72								2,5 cm
4.	Tiga (3)	13,75	 M-3a	7,532	7,345	7,665							1
5.	Tiga (3)	15	 M-3b	6,21	6,282	6,412							3,5 cm
6.	Empat (4)	15	 M-4	7,341	7,476	7,445	7,661						2,5
7.	Lima (5)	22,5	 M-5	5,019	4,86	4,712	4,915	4,69					1

8.	Enam (6)	25		4,17	4,408	4,348	4,448	4,549	4,591						
			M-6a												
9.	Enam (6)	27,5		2,791	2,762	2,781	2,905	3,015	3,127	1	3	5 cm			
			M-6b					1,25 cm		2	4	5			
10.	Tujuh (7)	26,25		4,072	4,108	4,18	4,389	4,399	4,461	1,25 cm	4,431				
			M-7a												
11.	Tujuh (7)	27,5		3,248	3,337	3,291	3,312	3,592	3,64	3,69	1	2	3	4	5 cm
			M-7b												
12.	Delapan (8)	27,5		3,315	3,32	3,495	3,504	3,59	3,604	3,641	3,649				
			M-8						0,833 cm						

Sumber: Hasil pengukuran

Dari Tabel 4.7 maka dapat diperoleh besarnya tegangan mesh rata-rata untuk masing-masing model mesh seperti ditunjukkan pada Tabel 4.8.

1 3
1,25 cm 2 4
1,25 cm

5 cm

1 3

5

1,25 cm 2 4

1,25 cm

5 cm

1 3

5

1,25 cm 2 4

5 cm

1 3

5

1,25 cm

Tabel 4.8. Tegangan mesh rata-rata ($\overline{E_m}$) pada model mesh dengan penanaman kedalaman 8 cm.

No.	Jumlah Sel Pembentuk Mesh	Panjang Total (cm)	Bentuk Konfigurasi	Tegangan Mesh Rata-rata (volt)
1.	Satu (1)	10	M-1a	8,655
2.	Satu (1)	10	M-1b	10,896
3.	Dua (2)	12,5	M-2	7,841
4.	Tiga (3)	13,75	M-3a	7,514
5.	Tiga (3)	15	M-3b	6,301
6.	Empat (4)	15	M-4	7,481
7.	Lima (5)	22,5	M-5	4,839
8.	Enam (6)	25	M-6a	4,419
9.	Enam (6)	27,5	M-6b	2,897
10.	Tujuh (7)	26,25	M-7a	4,291
11.	Tujuh (7)	27,5	M-7b	3,444
12.	Delapan (8)	27,5	M-8	3,515

Sumber: Hasil perhitungan

Untuk membandingkan hasil pengukuran tegangan mesh yang telah diperoleh, maka dilakukan juga analisis perhitungan dengan menggunakan Persamaan 2-10 untuk masing-masing model mesh. Nilai-nilai yang telah diketahui untuk semua model mesh adalah sebagai berikut:

$$\rho = 1,993 \Omega\text{-m}$$

$$I_G = 0,8 \text{ Ampere}$$

$$d = 1.10^{-3} \text{ m}$$

$$h = 8.10^{-2} \text{ m, sehingga}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

$$= \sqrt{1 + \frac{8.10^{-2}}{1}} = 1,039$$

(Persamaan 2-13)

4.4.1 Model M-1a.

- a. Perhitungan nilai faktor geometri (n) sesuai dengan Persamaan 2-14

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

Dengan:

$$n_a = \frac{2 \cdot L_C}{L_p} \quad (\text{Persamaan 2-15})$$

$$= \frac{2 \cdot 0,05}{0,1} = 1$$

$n_b = 1$; $n_c = 1$ dan $n_d = 1$

Maka:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

$$= 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1$$

b. Perhitungan nilai faktor jarak pisah untuk tegangan mesh (K_m) sesuai dengan

Persamaan 2-11

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{\frac{2}{n}}} \quad (\text{Persamaan 2-12})$$

$$= \frac{1}{(2 \cdot 1)^{\frac{2}{1}}} = 0,25$$

Maka:

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \left[\ln \left[\frac{(2,5 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(2,5 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] \right. \\ \left. + \frac{0,25}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 1 - 1)} \right] \right]$$

$$= 0,835$$

c. Perhitungan nilai faktor koreksi untuk geometri grid (K_i) sesuai dengan

Persamaan 2-19

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n$$

$$= 0,644 + 0,148 \cdot 1 = 0,792$$

d. Perhitungan nilai tegangan mesh (E_m) sesuai dengan Persamaan 2-10

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$$

Dengan:

$$\begin{aligned} L_M &= L_c + L_R \\ &= 10 \cdot 10^{-2} + 0 = 10 \cdot 10^{-2} \text{ m} \end{aligned}$$

($L_R = 0$ karena grid tanpa elektroda batang/rod)

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \\ &= \frac{1,993 \cdot 0,835 \cdot 0,792 \cdot 0,8}{10 \cdot 10^{-2}} \\ &= 10,549 \text{ volt} \end{aligned}$$

4.4.2 Model M-1b.

- a. Perhitungan nilai faktor geometri (n) sesuai dengan Persamaan 2-14

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

Dengan:

$$\begin{aligned} n_a &= \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \\ &= \frac{2 \cdot 0,07}{0,1} = 1,4 \end{aligned} \quad \text{(Persamaan 2-15)}$$

$$\begin{aligned} n_b &= \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \\ &= \sqrt{\frac{0,1}{4 \cdot \sqrt{5,25 \cdot 10^{-4}}}} = 1,045 \end{aligned} \quad \text{(Persamaan 2-16)}$$

$$n_c = 1 \text{ dan } n_d = 1$$

Maka:

$$\begin{aligned} n &= n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \\ &= 1,4 \cdot 1,045 \cdot 1 \cdot 1 = 1,462 \end{aligned}$$

- b. Perhitungan nilai faktor jarak pisah untuk tegangan mesh (K_m) sesuai dengan Persamaan 2-11

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{\frac{2}{n}}}$$

(Persamaan 2-12)

$$= \frac{1}{(2 \cdot 1,462)^{\frac{2}{1,462}}} = 0,23$$

Maka:

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \left[\ln \left[\frac{(1,5 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(1,5 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] + \frac{0,23}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 1,462 - 1)} \right] \right]$$

$$= 0,88$$

- c. Perhitungan nilai faktor koreksi untuk geometri grid (K_i) sesuai dengan Persamaan 2-19

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n$$

$$= 0,644 + 0,148 \cdot 1,462 = 0,86$$

- d. Perhitungan nilai tegangan mesh (E_m) sesuai dengan Persamaan 2-10

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$$

Dengan:

$$L_M = L_c + L_R$$

$$= 10 \cdot 10^{-2} + 0 = 10 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

($L_R = 0$ karena grid tanpa elektroda batang/rod)

Maka:

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$$

$$= \frac{1,993 \cdot 0,880 \cdot 0,860 \cdot 0,8}{10 \cdot 10^{-2}}$$

$$= 12,066 \text{ volt}$$

4.4.3 Model M-2.

- a. Perhitungan nilai faktor geometri (n) sesuai dengan Persamaan 2-14

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

Dengan:

$$\begin{aligned} n_a &= \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \\ &= \frac{2 \cdot 0,05}{0,1} = 1 \end{aligned} \quad \text{(Persamaan 2-15)}$$

$$n_b = 1; n_c = 1 \text{ dan } n_d = 1$$

Maka:

$$\begin{aligned} n &= n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \\ &= 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1 \end{aligned}$$

- b. Perhitungan nilai faktor jarak pisah untuk tegangan mesh (K_m) sesuai dengan Persamaan 2-11

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$\begin{aligned} K_{ii} &= \frac{1}{(2 \cdot n)^2} \\ &= \frac{1}{(2 \cdot 1)^2} = 0,25 \end{aligned} \quad \text{(Persamaan 2-12)}$$

Maka:

$$\begin{aligned} K_m &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right] \\ &= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \left[\ln \left[\frac{(2,5 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(2,5 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{0,25}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 1 - 1)} \right] \right] \\ &= 0,835 \end{aligned}$$

- c. Perhitungan nilai faktor koreksi untuk geometri grid (K_i) sesuai dengan Persamaan 2-19

$$\begin{aligned} K_i &= 0,644 + 0,148 \cdot n \\ &= 0,644 + 0,148 \cdot 1 = 0,792 \end{aligned}$$

- d. Perhitungan nilai tegangan mesh (E_m) sesuai dengan Persamaan 2-10

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$$

Dengan:

$$\begin{aligned} L_M &= L_c + L_R \\ &= 12,5 \cdot 10^{-2} + 0 = 12,5 \cdot 10^{-2} \text{ m} \end{aligned}$$

($L_R = 0$ karena grid tanpa elektroda batang/rod)

Maka:

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \\ &= \frac{1,993 \cdot 0,835 \cdot 0,792 \cdot 0,8}{12,5 \cdot 10^{-2}} \\ &= 8,439 \text{ volt} \end{aligned}$$

4.4.4 Model M-3a. (Perhitungan dengan interpolasi)

- a. Perhitungan nilai faktor geometri (n) sesuai dengan Persamaan 2-14

$$\text{Untuk: } n_1 = n_{a1} \cdot n_{b1} \cdot n_{c1} \cdot n_{d1}$$

Dengan:

$$\begin{aligned} n_{a1} &= \frac{2 \cdot L_C}{L_p} \\ &= \frac{2 \cdot 0,05}{0,1} = 1 \end{aligned} \quad (\text{Persamaan 2-15})$$

$$n_{b1} = 1; n_{c1} = 1 \text{ dan } n_{d1} = 1$$

Maka:

$$\begin{aligned} n_1 &= n_{a1} \cdot n_{b1} \cdot n_{c1} \cdot n_{d1} \\ &= 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1 \end{aligned}$$

$$\text{Untuk: } n_2 = n_{a2} \cdot n_{b2} \cdot n_{c2} \cdot n_{d2}$$

Dengan:

$$\begin{aligned} n_{a2} &= \frac{2 \cdot L_C}{L_p} \\ &= \frac{2 \cdot 0,075}{0,1} = 1,5 \end{aligned} \quad (\text{Persamaan 2-15})$$

$$n_{b2} = 1; n_{c2} = 1 \text{ dan } n_{d2} = 1$$

Maka:

$$\begin{aligned} n_2 &= n_{a2} \cdot n_{b2} \cdot n_{c2} \cdot n_{d2} \\ &= 1,5 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1,5 \end{aligned}$$

- b. Perhitungan nilai faktor jarak pisah untuk tegangan mesh (K_m) sesuai dengan Persamaan 2-11

Untuk:

$$K_{m1} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_1^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_1 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_1 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii1}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_1 - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$\begin{aligned} K_{ii1} &= \frac{1}{(2 \cdot n_1)^{\frac{2}{n_1}}} \\ &= \frac{1}{(2 \cdot 1)^{\frac{2}{1}}} = 0,25 \end{aligned} \quad \text{(Persamaan 2-12)}$$

Maka:

$$\begin{aligned} K_{m1} &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_1^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_1 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_1 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii1}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_1 - 1)} \right] \right] \\ &= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \left[\ln \left[\frac{(2,5 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(2,5 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{0,25}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 1 - 1)} \right] \right] \\ &= 0,835 \end{aligned}$$

Untuk:

$$K_{m2} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_2^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_2 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_2 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii2}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_2 - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$\begin{aligned} K_{ii2} &= \frac{1}{(2 \cdot n_2)^{\frac{2}{n_2}}} \\ &= \frac{1}{(2 \cdot 1,5)^{\frac{2}{1,5}}} = 0,231 \end{aligned} \quad \text{(Persamaan 2-12)}$$

Maka:

$$\begin{aligned}
 K_{m2} &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_2^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_2 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_2 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{i2}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_2 - 1)} \right] \right] \\
 &= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \left[\ln \left[\frac{(1,25 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(1,25 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{0,231}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 1,5 - 1)} \right] \right] \\
 &= 0,905
 \end{aligned}$$

- c. Perhitungan nilai faktor koreksi untuk geometri grid (K_i) sesuai dengan Persamaan 2-19

Untuk:

$$\begin{aligned}
 K_{i1} &= 0,644 + 0,148 \cdot n_1 \\
 &= 0,644 + 0,148 \cdot 1 = 0,792
 \end{aligned}$$

Untuk:

$$\begin{aligned}
 K_{i2} &= 0,644 + 0,148 \cdot n_2 \\
 &= 0,644 + 0,148 \cdot 1,5 = 0,866
 \end{aligned}$$

- d. Perhitungan nilai tegangan mesh (E_m) sesuai dengan Persamaan 2-10

Untuk:

$$E_{m1} = \frac{\rho \cdot K_{m1} \cdot K_{i1} \cdot I_G}{L_{M1}}$$

Dengan:

$$\begin{aligned}
 L_{M1} &= L_{c1} + L_{R1} \\
 &= 13,75 \cdot 10^{-2} + 0 = 13,75 \cdot 10^{-2} \text{ m}
 \end{aligned}$$

($L_{R1} = 0$ karena grid tanpa elektroda batang/rod)

Maka:

$$\begin{aligned}
 E_{m1} &= \frac{\rho \cdot K_{m1} \cdot K_{i1} \cdot I_G}{L_{M1}} \\
 &= \frac{1,993 \cdot 0,835 \cdot 0,792 \cdot 0,8}{13,75 \cdot 10^{-2}} \\
 &= 7,672 \text{ volt}
 \end{aligned}$$

Untuk:

$$E_{m2} = \frac{\rho \cdot K_{m2} \cdot K_{i2} \cdot I_G}{L_{M2}}$$

Dengan:

$$L_{M2} = L_{M1} = 13,75 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Maka:

$$\begin{aligned} E_{m2} &= \frac{\rho \cdot K_{m2} \cdot K_{i2} \cdot I_G}{L_{M2}} \\ &= \frac{1,993 \cdot 0,905 \cdot 0,866 \cdot 0,8}{13,75 \cdot 10^{-2}} \\ &= 9,083 \text{ volt} \end{aligned}$$

Dengan demikian:

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{E_{m1} + E_{m2}}{2} \\ &= \frac{7,672 + 9,083}{2} \\ &= 8,378 \text{ volt} \end{aligned}$$

4.4.5 Model M-3b.

- a. Perhitungan nilai faktor geometri (n) sesuai dengan Persamaan 2-14

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

Dengan:

$$\begin{aligned} n_a &= \frac{2 \cdot L_C}{L_p} \\ &= \frac{2 \cdot 0,05}{0,1} = 1 \end{aligned}$$

$$n_b = 1; n_c = 1 \text{ dan } n_d = 1$$

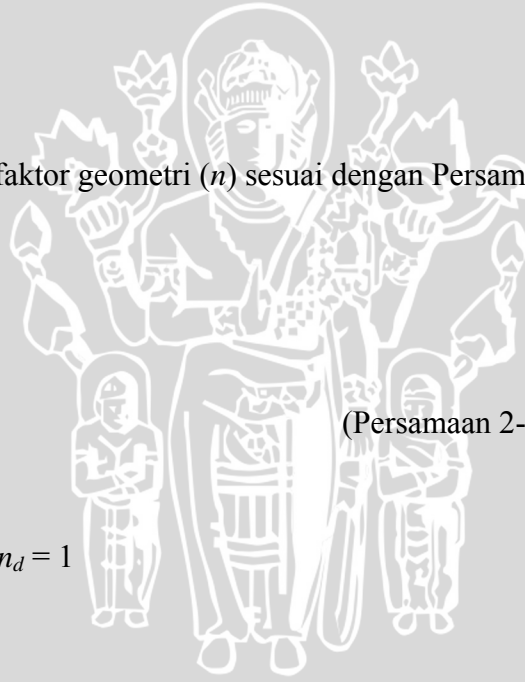
Maka:

$$\begin{aligned} n &= n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \\ &= 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1 \end{aligned}$$

- b. Perhitungan nilai faktor jarak pisah untuk tegangan mesh (K_m) sesuai dengan

Persamaan 2-11

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$$



Dengan:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^2}$$

$$= \frac{1}{(2 \cdot 1)^2} = 0,25 \quad (\text{Persamaan 2-12})$$

Maka:

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \left[\ln \left[\frac{(2,5 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(2,5 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] + \frac{0,25}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 1 - 1)} \right] \right]$$

$$= 0,835$$

- c. Perhitungan nilai faktor koreksi untuk geometri grid (K_i) sesuai dengan Persamaan 2-19

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n$$

$$= 0,644 + 0,148 \cdot 1 = 0,792$$

- d. Perhitungan nilai tegangan mesh (E_m) sesuai dengan Persamaan 2-10

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$$

Dengan:

$$L_M = L_c + L_R$$

$$= 15 \cdot 10^{-2} + 0 = 15 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

($L_R = 0$ karena grid tanpa elektroda batang/rod)

Maka:

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$$

$$= \frac{1,993 \cdot 0,835 \cdot 0,792 \cdot 0,8}{15 \cdot 10^{-2}}$$

$$= 7,033 \text{ volt}$$

4.4.6 Model M-4.

- a. Perhitungan nilai faktor geometri (n) sesuai dengan Persamaan 2-14

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

Dengan:

$$\begin{aligned} n_a &= \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \\ &= \frac{2 \cdot 0,075}{0,1} = 1,5 \end{aligned} \quad \text{(Persamaan 2-15)}$$

$$n_b = 1; n_c = 1 \text{ dan } n_d = 1$$

Maka:

$$\begin{aligned} n &= n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \\ &= 1,5 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1,5 \end{aligned}$$

- b. Perhitungan nilai faktor jarak pisah untuk tegangan mesh (K_m) sesuai dengan Persamaan 2-11

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$\begin{aligned} K_{ii} &= \frac{1}{(2 \cdot n)^2} \\ &= \frac{1}{(2 \cdot 1,5)^2} = 0,231 \end{aligned} \quad \text{(Persamaan 2-12)}$$

Maka:

$$\begin{aligned} K_m &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right] \\ &= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \left[\ln \left[\frac{(1,25 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(1,25 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{0,231}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 1,5 - 1)} \right] \right] \\ &= 0,905 \end{aligned}$$

- c. Perhitungan nilai faktor koreksi untuk geometri grid (K_i) sesuai dengan Persamaan 2-19

$$\begin{aligned} K_i &= 0,644 + 0,148 \cdot n \\ &= 0,644 + 0,148 \cdot 1,5 = 0,866 \end{aligned}$$

- d. Perhitungan nilai tegangan mesh (E_m) sesuai dengan Persamaan 2-10

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$$

Dengan:

$$\begin{aligned} L_M &= L_c + L_R \\ &= 15 \cdot 10^{-2} + 0 = 15 \cdot 10^{-2} \text{ m} \end{aligned}$$

($L_R = 0$ karena grid tanpa elektroda batang/rod)

Maka:

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \\ &= \frac{1,993 \cdot 0,905 \cdot 0,866 \cdot 0,8}{15 \cdot 10^{-2}} \\ &= 8,326 \text{ volt} \end{aligned}$$

4.4.7 Model M-5. (Perhitungan dengan interpolasi)

- a. Perhitungan nilai faktor geometri (n) sesuai dengan Persamaan 2-14

$$\text{Untuk: } n_1 = n_{a1} \cdot n_{b1} \cdot n_{c1} \cdot n_{d1}$$

Dengan:

$$\begin{aligned} n_{a1} &= \frac{2 \cdot L_C}{L_p} \\ &= \frac{2 \cdot 0,15}{0,15} = 2 \end{aligned} \quad (\text{Persamaan 2-15})$$

$$\begin{aligned} n_{b1} &= \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \\ &= \sqrt{\frac{0,15}{4 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 10^{-3}}}} = 1,03 \end{aligned} \quad (\text{Persamaan 2-16})$$

$$n_{c1} = 1 \text{ dan } n_{d1} = 1$$

Maka:

$$\begin{aligned} n_1 &= n_{a1} \cdot n_{b1} \cdot n_{c1} \cdot n_{d1} \\ &= 2 \cdot 1,03 \cdot 1 \cdot 1 = 2,06 \end{aligned}$$

$$\text{Untuk: } n_2 = n_{a2} \cdot n_{b2} \cdot n_{c2} \cdot n_{d2}$$

Dengan:

$$n_{a2} = \frac{2 \cdot L_c}{L_p}$$

(Persamaan 2-15)

$$= \frac{2 \cdot 0,1}{0,15} = 1,333$$

$$n_{b2} = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}}$$

(Persamaan 2-16)

$$= \sqrt{\frac{0,15}{4 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 10^{-3}}}} = 1,03$$

$$n_{c2} = 1 \text{ dan } n_{d2} = 1$$

Maka:

$$n_2 = n_{a2} \cdot n_{b2} \cdot n_{c2} \cdot n_{d2}$$

$$= 1,333 \cdot 1,03 \cdot 1 \cdot 1 = 1,373$$

- b. Perhitungan nilai faktor jarak pisah untuk tegangan mesh (K_m) sesuai dengan Persamaan 2-11

Untuk:

$$K_{m1} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_1^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_1 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_1 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii1}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_1 - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$K_{ii1} = \frac{1}{(2 \cdot n_1)^{\frac{2}{n_1}}}$$

(Persamaan 2-12)

$$= \frac{1}{(2 \cdot 2,06)^{\frac{2}{2,06}}} = 0,253$$

Maka:

$$K_{m1} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_1^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_1 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_1 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii1}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_1 - 1)} \right] \right]$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \left[\ln \left[\frac{(1,25 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(1,25 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] \right]$$

$$+ \frac{0,253}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 2,06 - 1)} \right]$$

$$= 0,888$$

Untuk:

$$K_{m2} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_2^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_2 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_2 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{i2}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_2 - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$\begin{aligned} K_{i2} &= \frac{1}{(2 \cdot n_2)^{\frac{2}{n_2}}} \\ &= \frac{1}{(2 \cdot 1,373)^{\frac{2}{1,373}}} = 0,23 \end{aligned} \quad (\text{Persamaan 2-12})$$

Maka:

$$\begin{aligned} K_{m2} &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_2^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_2 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_2 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{i2}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_2 - 1)} \right] \right] \\ &= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \left[\ln \left[\frac{(2,5 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(2,5 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{0,23}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 1,373 - 1)} \right] \right] \\ &= 0,813 \end{aligned}$$

- c. Perhitungan nilai faktor koreksi untuk geometri grid (K_i) sesuai dengan Persamaan 2-19

Untuk:

$$\begin{aligned} K_{i1} &= 0,644 + 0,148 \cdot n_1 \\ &= 0,644 + 0,148 \cdot 2,06 = 0,949 \end{aligned}$$

Untuk:

$$\begin{aligned} K_{i2} &= 0,644 + 0,148 \cdot n_2 \\ &= 0,644 + 0,148 \cdot 1,373 = 0,847 \end{aligned}$$

- d. Perhitungan nilai tegangan mesh (E_m) sesuai dengan Persamaan 2-10

Untuk:

$$E_{m1} = \frac{\rho \cdot K_{m1} \cdot K_{i1} \cdot I_G}{L_{M1}}$$

Dengan:

$$\begin{aligned} L_{M1} &= L_{c1} + L_{R1} \\ &= 22,5 \cdot 10^{-2} + 0 = 22,5 \cdot 10^{-2} \text{ m} \end{aligned}$$

($L_{R1} = 0$ karena grid tanpa elektroda batang/rod)

Maka:

$$\begin{aligned} E_{m1} &= \frac{\rho \cdot K_{m1} \cdot K_{i1} \cdot I_G}{L_{M1}} \\ &= \frac{1,993 \cdot 0,888 \cdot 0,949 \cdot 0,8}{22,5 \cdot 10^{-2}} \\ &= 5,971 \text{ volt} \end{aligned}$$

Untuk:

$$E_{m2} = \frac{\rho \cdot K_{m2} \cdot K_{i2} \cdot I_G}{L_{M2}}$$

Dengan:

$$L_{M2} = L_{M1} = 22,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Maka:

$$\begin{aligned} E_{m2} &= \frac{\rho \cdot K_{m2} \cdot K_{i2} \cdot I_G}{L_{M2}} \\ &= \frac{1,993 \cdot 0,813 \cdot 0,847 \cdot 0,8}{22,5 \cdot 10^{-2}} \\ &= 4,88 \text{ volt} \end{aligned}$$

Dengan demikian:

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{E_{m1} + E_{m2}}{2} \\ &= \frac{5,971 + 4,880}{2} \\ &= 5,426 \text{ volt} \end{aligned}$$

4.4.8 Model M-6a. (Perhitungan dengan interpolasi)

- a. Perhitungan nilai faktor geometri (n) sesuai dengan Persamaan 2-14

$$\text{Untuk: } n_1 = n_{a1} \cdot n_{b1} \cdot n_{c1} \cdot n_{d1}$$

Dengan:

$$n_{a1} = \frac{2 \cdot L_C}{L_p}$$

$$= \frac{2 \cdot 0,15}{0,15} = 2$$

(Persamaan 2-15)

$$n_{b1} = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (\text{Persamaan 2-16})$$

$$= \sqrt{\frac{0,15}{4 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 10^{-3}}}} = 1,03$$

$$n_{c1} = 1 \text{ dan } n_{d1} = 1$$

Maka:

$$n_1 = n_{a1} \cdot n_{b1} \cdot n_{c1} \cdot n_{d1}$$

$$= 2 \cdot 1,03 \cdot 1 \cdot 1 = 2,06$$

$$\text{Untuk: } n_2 = n_{a2} \cdot n_{b2} \cdot n_{c2} \cdot n_{d2}$$

Dengan:

$$n_{a2} = \frac{2 \cdot L_C}{L_p} \quad (\text{Persamaan 2-15})$$

$$= \frac{2 \cdot 0,1}{0,15} = 1,333$$

$$n_{b2} = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (\text{Persamaan 2-16})$$

$$= \sqrt{\frac{0,15}{4 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 10^{-3}}}} = 1,03$$

$$n_{c2} = 1 \text{ dan } n_{d2} = 1$$

Maka:

$$n_2 = n_{a2} \cdot n_{b2} \cdot n_{c2} \cdot n_{d2}$$

$$= 1,333 \cdot 1,03 \cdot 1 \cdot 1 = 1,373$$

- b. Perhitungan nilai faktor jarak pisah untuk tegangan mesh (K_m) sesuai dengan Persamaan 2-11

Untuk:

$$K_{m1} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_1^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_1 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_1 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{i1}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_1 - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$K_{i1} = \frac{1}{(2 \cdot n_1)^{\frac{2}{n_1}}} \quad (\text{Persamaan 2-12})$$

$$= \frac{1}{(2 \cdot 2,06)^{\frac{2}{2,06}}} = 0,253$$

Maka:

$$\begin{aligned}
 K_{m1} &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_1^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_1 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_1 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii1}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_1 - 1)} \right] \right] \\
 &= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \left[\ln \left[\frac{(1,25 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(1,25 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{0,253}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 2,06 - 1)} \right] \right] \\
 &= 0,888
 \end{aligned}$$

Untuk:

$$K_{m2} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_2^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_2 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_2 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii2}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_2 - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$\begin{aligned}
 K_{ii2} &= \frac{1}{(2 \cdot n_2)^{\frac{2}{n_2}}} \\
 &= \frac{1}{(2 \cdot 1,373)^{\frac{2}{1,373}}} = 0,23 \quad (\text{Persamaan 2-12})
 \end{aligned}$$

Maka:

$$\begin{aligned}
 K_{m2} &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_2^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_2 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_2 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii2}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_2 - 1)} \right] \right] \\
 &= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \left[\ln \left[\frac{(2,5 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(2,5 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{0,23}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 1,373 - 1)} \right] \right] \\
 &= 0,813
 \end{aligned}$$

- c. Perhitungan nilai faktor koreksi untuk geometri grid (K_i) sesuai dengan Persamaan 2-19

Untuk:

$$\begin{aligned}
 K_{i1} &= 0,644 + 0,148 \cdot n_1 \\
 &= 0,644 + 0,148 \cdot 2,06 = 0,949
 \end{aligned}$$

Untuk:

$$\begin{aligned}
 K_{i2} &= 0,644 + 0,148 \cdot n_2 \\
 &= 0,644 + 0,148 \cdot 1,373 = 0,847
 \end{aligned}$$

- d. Perhitungan nilai tegangan mesh (E_m) sesuai dengan Persamaan 2-10

Untuk:

$$E_{m1} = \frac{\rho \cdot K_{m1} \cdot K_{i1} \cdot I_G}{L_{M1}}$$

Dengan:

$$\begin{aligned} L_{M1} &= L_{c1} + L_{R1} \\ &= 25 \cdot 10^{-2} + 0 = 25 \cdot 10^{-2} \text{ m} \end{aligned}$$

($L_{R1} = 0$ karena grid tanpa elektroda batang/rod)

Maka:

$$\begin{aligned} E_{m1} &= \frac{\rho \cdot K_{m1} \cdot K_{i1} \cdot I_G}{L_{M1}} \\ &= \frac{1,993 \cdot 0,888 \cdot 0,949 \cdot 0,8}{25 \cdot 10^{-2}} \\ &= 5,374 \text{ volt} \end{aligned}$$

Untuk:

$$E_{m2} = \frac{\rho \cdot K_{m2} \cdot K_{i2} \cdot I_G}{L_{M2}}$$

Dengan:

$$L_{M2} = L_{M1} = 25 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Maka:

$$\begin{aligned} E_{m2} &= \frac{\rho \cdot K_{m2} \cdot K_{i2} \cdot I_G}{L_{M2}} \\ &= \frac{1,993 \cdot 0,813 \cdot 0,847 \cdot 0,8}{25 \cdot 10^{-2}} \\ &= 4,392 \text{ volt} \end{aligned}$$

Dengan demikian:

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{E_{m1} + E_{m2}}{2} \\ &= \frac{5,374 + 4,392}{2} \\ &= 4,883 \text{ volt} \end{aligned}$$

4.4.9 Model M-6b.

- a. Perhitungan nilai faktor geometri (n) sesuai dengan Persamaan 2-14

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

Dengan:

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad (\text{Persamaan 2-15})$$

$$= \frac{2 \cdot 0,1}{0,15} = 1,333$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (\text{Persamaan 2-16})$$

$$= \sqrt{\frac{0,15}{4 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 10^{-3}}}} = 1,03$$

$$n_c = 1 \text{ dan } n_d = 1$$

Maka:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

$$= 1,333 \cdot 1,03 \cdot 1 \cdot 1 = 1,373$$

- b. Perhitungan nilai faktor jarak pisah untuk tegangan mesh (K_m) sesuai dengan Persamaan 2-11

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n_2)^{\frac{2}{n_2}}} \quad (\text{Persamaan 2-12})$$

$$= \frac{1}{(2 \cdot 1,373)^{\frac{2}{1,373}}} = 0,23$$

Maka:

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \left[\ln \left[\frac{(2,5 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(2,5 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] + \frac{0,23}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 1,373 - 1)} \right] \right]$$

$$= 0,813$$

- c. Perhitungan nilai faktor koreksi untuk geometri grid (K_i) sesuai dengan

Persamaan 2-19

$$\begin{aligned} K_i &= 0,644 + 0,148 \cdot n \\ &= 0,644 + 0,148 \cdot 1,373 = 0,847 \end{aligned}$$

- d. Perhitungan nilai tegangan mesh (E_m) sesuai dengan Persamaan 2-10

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$$

Dengan:

$$\begin{aligned} L_M &= L_c + L_R \\ &= 27,5 \cdot 10^{-2} + 0 = 27,5 \cdot 10^{-2} \text{ m} \end{aligned}$$

($L_R = 0$ karena grid tanpa elektroda batang/rod)

Maka:

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \\ &= \frac{1,993 \cdot 0,813 \cdot 0,847 \cdot 0,8}{27,5 \cdot 10^{-2}} \\ &= 3,993 \text{ volt} \end{aligned}$$

4.4.10 Model M-7a. (Perhitungan dengan interpolasi)

- a. Perhitungan nilai faktor geometri (n) sesuai dengan Persamaan 2-14

Untuk: $n_1 = n_{a1} \cdot n_{b1} \cdot n_{c1} \cdot n_{d1}$

Dengan:

$$\begin{aligned} n_{a1} &= \frac{2 \cdot L_C}{L_p} \\ &= \frac{2 \cdot 0,15}{0,15} = 2 \end{aligned}$$

(Persamaan 2-15)

$$\begin{aligned} n_{b1} &= \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \\ &= \sqrt{\frac{0,15}{4 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 10^{-3}}}} = 1,03 \end{aligned}$$

(Persamaan 2-16)

$n_{c1} = 1$ dan $n_{d1} = 1$

Maka:

$$\begin{aligned} n_1 &= n_{a1} \cdot n_{b1} \cdot n_{c1} \cdot n_{d1} \\ &= 2 \cdot 1,03 \cdot 1 \cdot 1 = 2,06 \end{aligned}$$

Untuk: $n_2 = n_{a2} \cdot n_{b2} \cdot n_{c2} \cdot n_{d2}$

Dengan:

$$n_{a2} = \frac{2 \cdot L_C}{L_p} \quad (\text{Persamaan 2-15})$$

$$= \frac{2 \cdot 0,1}{0,15} = 1,333$$

$$n_{b2} = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (\text{Persamaan 2-16})$$

$$= \sqrt{\frac{0,15}{4 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 10^{-3}}}} = 1,03$$

$n_{c2} = 1$ dan $n_{d2} = 1$

Maka:

$$n_2 = n_{a2} \cdot n_{b2} \cdot n_{c2} \cdot n_{d2}$$

$$= 1,333 \cdot 1,03 \cdot 1 \cdot 1 = 1,373$$

Untuk: $n_3 = n_{a3} \cdot n_{b3} \cdot n_{c3} \cdot n_{d3}$

Dengan:

$$n_{a3} = \frac{2 \cdot L_C}{L_p} \quad (\text{Persamaan 2-15})$$

$$= \frac{2 \cdot 0,15}{0,15} = 2$$

$$n_{b3} = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (\text{Persamaan 2-16})$$

$$= \sqrt{\frac{0,15}{4 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 10^{-3}}}} = 1,03$$

$n_{c3} = 1$ dan $n_{d3} = 1$

Maka:

$$n_3 = n_{a3} \cdot n_{b3} \cdot n_{c3} \cdot n_{d3}$$

$$= 2 \cdot 1,03 \cdot 1 \cdot 1 = 2,06$$

- b. Perhitungan nilai faktor jarak pisah untuk tegangan mesh (K_m) sesuai dengan Persamaan 2-11

Untuk:

$$K_{m1} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_1^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_1 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_1 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{i1}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_1 - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$K_{ii1} = \frac{1}{(2 \cdot n_1)^{\frac{2}{n_1}}} \quad (\text{Persamaan 2-12})$$

$$= \frac{1}{(2 \cdot 2,06)^{\frac{2}{2,06}}} = 0,253$$

Maka:

$$K_{m1} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_1^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_1 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_1 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii1}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_1 - 1)} \right] \right]$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \left[\ln \left[\frac{(1,25 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(1,25 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] + \frac{0,253}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 2,06 - 1)} \right] \right]$$

$$= 0,888$$

Untuk:

$$K_{m2} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_2^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_2 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_2 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii2}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_2 - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$K_{ii2} = \frac{1}{(2 \cdot n_2)^{\frac{2}{n_2}}} \quad (\text{Persamaan 2-12})$$

$$= \frac{1}{(2 \cdot 1,373)^{\frac{2}{1,373}}} = 0,23$$

Maka:

$$K_{m2} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_2^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_2 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_2 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii2}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_2 - 1)} \right] \right]$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \left[\ln \left[\frac{(2,5 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(2,5 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] + \frac{0,23}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 1,373 - 1)} \right] \right]$$

$$= 0,813$$

Untuk:

$$K_{m3} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_3^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_3 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_3 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii3}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_3 - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$K_{i3} = \frac{1}{(2 \cdot n_3)^{\frac{2}{n_3}}} \quad (\text{Persamaan 2-12})$$

$$= \frac{1}{(2 \cdot 2,06)^{\frac{2}{2,06}}} = 0,253$$

Maka:

$$K_{m3} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_3^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_3 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_3 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{i3}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_3 - 1)} \right] \right]$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \left[\ln \left[\frac{(1,25 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(1,25 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] \right. \\ \left. + \frac{0,253}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 2,06 - 1)} \right] \right]$$

$$= 0,888$$

- c. Perhitungan nilai faktor koreksi untuk geometri grid (K_i) sesuai dengan Persamaan 2-19

Untuk:

$$K_{i1} = 0,644 + 0,148 \cdot n_1$$

$$= 0,644 + 0,148 \cdot 2,06 = 0,949$$

Untuk:

$$K_{i2} = 0,644 + 0,148 \cdot n_2$$

$$= 0,644 + 0,148 \cdot 1,373 = 0,847$$

Untuk:

$$K_{i3} = 0,644 + 0,148 \cdot n_3$$

$$= 0,644 + 0,148 \cdot 2,06 = 0,949$$

- d. Perhitungan nilai tegangan mesh (E_m) sesuai dengan Persamaan 2-10

Untuk:

$$E_{m1} = \frac{\rho \cdot K_{m1} \cdot K_{i1} \cdot I_G}{L_{M1}}$$

Dengan:

$$L_{M1} = L_{c1} + L_{R1}$$

$$= 26,25 \cdot 10^{-2} + 0 = 26,25 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

($L_{R1} = 0$ karena grid tanpa elektroda batang/rod)

Maka:

$$\begin{aligned} E_{m1} &= \frac{\rho \cdot K_{m1} \cdot K_{i1} \cdot I_G}{L_{M1}} \\ &= \frac{1,993 \cdot 0,888 \cdot 0,949 \cdot 0,8}{26,25 \cdot 10^{-2}} \\ &= 5,118 \text{ volt} \end{aligned}$$

Untuk:

$$E_{m2} = \frac{\rho \cdot K_{m2} \cdot K_{i2} \cdot I_G}{L_{M2}}$$

Dengan:

$$L_{M2} = L_{M1} = 26,25 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Maka:

$$\begin{aligned} E_{m2} &= \frac{\rho \cdot K_{m2} \cdot K_{i2} \cdot I_G}{L_{M2}} \\ &= \frac{1,993 \cdot 0,813 \cdot 0,847 \cdot 0,8}{26,25 \cdot 10^{-2}} \\ &= 4,183 \text{ volt} \end{aligned}$$

Untuk:

$$E_{m3} = \frac{\rho \cdot K_{m3} \cdot K_{i3} \cdot I_G}{L_{M3}}$$

Dengan:

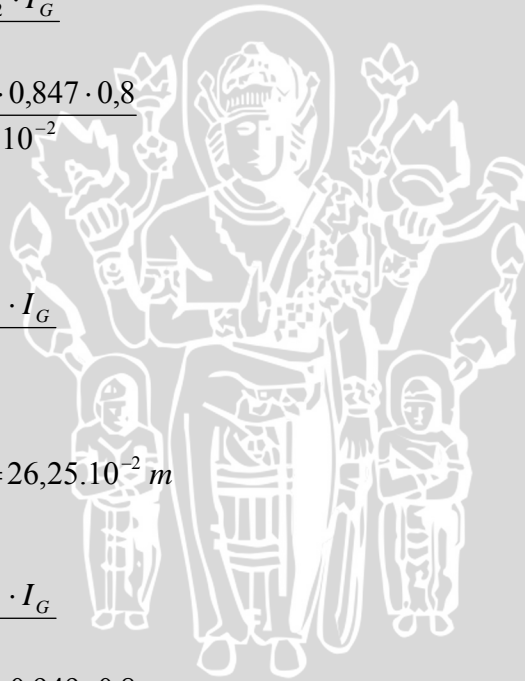
$$L_{M3} = L_{M2} = L_{M1} = 26,25 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Maka:

$$\begin{aligned} E_{m3} &= \frac{\rho \cdot K_{m3} \cdot K_{i3} \cdot I_G}{L_{M3}} \\ &= \frac{1,993 \cdot 0,888 \cdot 0,949 \cdot 0,8}{26,25 \cdot 10^{-2}} \\ &= 5,118 \text{ volt} \end{aligned}$$

Dengan demikian:

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{E_{m1} + E_{m2} + E_{m3}}{3} \\ &= \frac{5,118 + 4,183 + 5,118}{3} \\ &= 4,807 \text{ volt} \end{aligned}$$



4.4.11 Model M-7b. (Perhitungan dengan interpolasi)

- a. Perhitungan nilai faktor geometri (n) sesuai dengan Persamaan 2-14

$$\text{Untuk: } n_1 = n_{a1} \cdot n_{b1} \cdot n_{c1} \cdot n_{d1}$$

Dengan:

$$\begin{aligned} n_{a1} &= \frac{2 \cdot L_C}{L_p} \\ &= \frac{2 \cdot 0,15}{0,15} = 2 \end{aligned} \quad (\text{Persamaan 2-15})$$

$$\begin{aligned} n_{b1} &= \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \\ &= \sqrt{\frac{0,15}{4 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 10^{-3}}}} = 1,03 \end{aligned} \quad (\text{Persamaan 2-16})$$

$$n_{c1} = 1 \text{ dan } n_{d1} = 1$$

Maka:

$$\begin{aligned} n_1 &= n_{a1} \cdot n_{b1} \cdot n_{c1} \cdot n_{d1} \\ &= 2 \cdot 1,03 \cdot 1 \cdot 1 = 2,06 \end{aligned}$$

$$\text{Untuk: } n_2 = n_{a2} \cdot n_{b2} \cdot n_{c2} \cdot n_{d2}$$

Dengan:

$$\begin{aligned} n_{a2} &= \frac{2 \cdot L_C}{L_p} \\ &= \frac{2 \cdot 0,1}{0,15} = 1,333 \end{aligned} \quad (\text{Persamaan 2-15})$$

$$\begin{aligned} n_{b2} &= \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \\ &= \sqrt{\frac{0,15}{4 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 10^{-3}}}} = 1,03 \end{aligned} \quad (\text{Persamaan 2-16})$$

$$n_{c2} = 1 \text{ dan } n_{d2} = 1$$

Maka:

$$\begin{aligned} n_2 &= n_{a2} \cdot n_{b2} \cdot n_{c2} \cdot n_{d2} \\ &= 1,333 \cdot 1,03 \cdot 1 \cdot 1 = 1,373 \end{aligned}$$

- b. Perhitungan nilai faktor jarak pisah untuk tegangan mesh (K_m) sesuai dengan Persamaan 2-11

Untuk:

$$K_{m1} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_1^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_1 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_1 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii1}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_1 - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$\begin{aligned} K_{ii1} &= \frac{1}{(2 \cdot n_1)^{\frac{2}{n_1}}} \\ &= \frac{1}{(2 \cdot 2,06)^{\frac{2}{2,06}}} = 0,253 \end{aligned} \quad (\text{Persamaan 2-12})$$

Maka:

$$\begin{aligned} K_{m1} &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_1^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_1 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_1 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii1}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_1 - 1)} \right] \right] \\ &= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \left[\ln \left[\frac{(1,25 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(1,25 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{0,253}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 2,06 - 1)} \right] \right] \\ &= 0,888 \end{aligned}$$

Untuk:

$$K_{m2} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_2^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_2 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_2 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii2}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_2 - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$\begin{aligned} K_{ii2} &= \frac{1}{(2 \cdot n_2)^{\frac{2}{n_2}}} \\ &= \frac{1}{(2 \cdot 1,373)^{\frac{2}{1,373}}} = 0,23 \end{aligned} \quad (\text{Persamaan 2-12})$$

Maka:

$$\begin{aligned} K_{m2} &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D_2^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D_2 + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D_2 \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii2}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n_2 - 1)} \right] \right] \\ &= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \left[\ln \left[\frac{(2,5 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(2,5 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{0,23}{1,039} \cdot \ln \left[\frac{8}{3,14(2 \cdot 1,373 - 1)} \right] \right] \\ &= 0,813 \end{aligned}$$

- c. Perhitungan nilai faktor koreksi untuk geometri grid (K_i) sesuai dengan Persamaan 2-19

Untuk:

$$\begin{aligned} K_{i1} &= 0,644 + 0,148 \cdot n_1 \\ &= 0,644 + 0,148 \cdot 2,06 = 0,949 \end{aligned}$$

Untuk:

$$\begin{aligned} K_{i2} &= 0,644 + 0,148 \cdot n_2 \\ &= 0,644 + 0,148 \cdot 1,373 = 0,847 \end{aligned}$$

- d. Perhitungan nilai tegangan mesh (E_m) sesuai dengan Persamaan 2-10

Untuk:

$$E_{m1} = \frac{\rho \cdot K_{m1} \cdot K_{i1} \cdot I_G}{L_{M1}}$$

Dengan:

$$\begin{aligned} L_{M1} &= L_{c1} + L_{R1} \\ &= 27,5 \cdot 10^{-2} + 0 = 27,5 \cdot 10^{-2} \text{ m} \end{aligned}$$

($L_{R1} = 0$ karena grid tanpa elektroda batang/rod)

Maka:

$$\begin{aligned} E_{m1} &= \frac{\rho \cdot K_{m1} \cdot K_{i1} \cdot I_G}{L_{M1}} \\ &= \frac{1,993 \cdot 0,888 \cdot 0,949 \cdot 0,8}{27,5 \cdot 10^{-2}} \\ &= 4,886 \text{ volt} \end{aligned}$$

Untuk:

$$E_{m2} = \frac{\rho \cdot K_{m2} \cdot K_{i2} \cdot I_G}{L_{M2}}$$

Dengan:

$$L_{M2} = L_{M1} = 27,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Maka:

$$\begin{aligned} E_{m2} &= \frac{\rho \cdot K_{m2} \cdot K_{i2} \cdot I_G}{L_{M2}} \\ &= \frac{1,993 \cdot 0,813 \cdot 0,847 \cdot 0,8}{27,5 \cdot 10^{-2}} \\ &= 3,993 \text{ volt} \end{aligned}$$

Dengan demikian:

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{E_{m1} + E_{m2}}{2} \\ &= \frac{4,886 + 3,993}{2} \\ &= 4,439 \text{ volt} \end{aligned}$$

4.4.12 Model M-8.

- a. Perhitungan nilai faktor geometri (n) sesuai dengan Persamaan 2-14

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

Dengan:

$$\begin{aligned} n_a &= \frac{2 \cdot L_c}{L_p} && \text{(Persamaan 2-15)} \\ &= \frac{2 \cdot 0,1}{0,15} = 1,333 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_b &= \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} && \text{(Persamaan 2-16)} \\ &= \sqrt{\frac{0,15}{4 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 10^{-3}}}} = 1,03 \end{aligned}$$

$$n_c = 1 \text{ dan } n_d = 1$$

Maka:

$$\begin{aligned} n &= n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \\ &= 1,333 \cdot 1,03 \cdot 1 \cdot 1 = 1,373 \end{aligned}$$

- b. Perhitungan nilai faktor jarak pisah untuk tegangan mesh (K_m) sesuai dengan Persamaan 2-11

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$$

Dengan:

$$\begin{aligned} K_{ii} &= \frac{1}{(2 \cdot n_2)_{n_2}^2} && \text{(Persamaan 2-12)} \\ &= \frac{1}{(2 \cdot 1,373)_{1,373}^2} = 0,23 \end{aligned}$$

Maka:

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14} \left[\ln \left[\frac{(1,25 \cdot 10^{-2})^2}{16 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} + \frac{(1,25 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-2})^2}{8 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \right] \right]$$

$$= 0,909$$

- c. Perhitungan nilai faktor koreksi untuk geometri grid (K_i) sesuai dengan Persamaan 2-19

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n$$

$$= 0,644 + 0,148 \cdot 1,373 = 0,847$$

- d. Perhitungan nilai tegangan mesh (E_m) sesuai dengan Persamaan 2-10

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$$

Dengan:

$$L_M = L_c + L_R$$

$$= 27,5 \cdot 10^{-2} + 0 = 27,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

($L_R = 0$ karena grid tanpa elektroda batang/rod)

Maka:

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$$

$$= \frac{1,993 \cdot 0,909 \cdot 0,847 \cdot 0,8}{27,5 \cdot 10^{-2}}$$

$$= 4,466 \text{ volt}$$

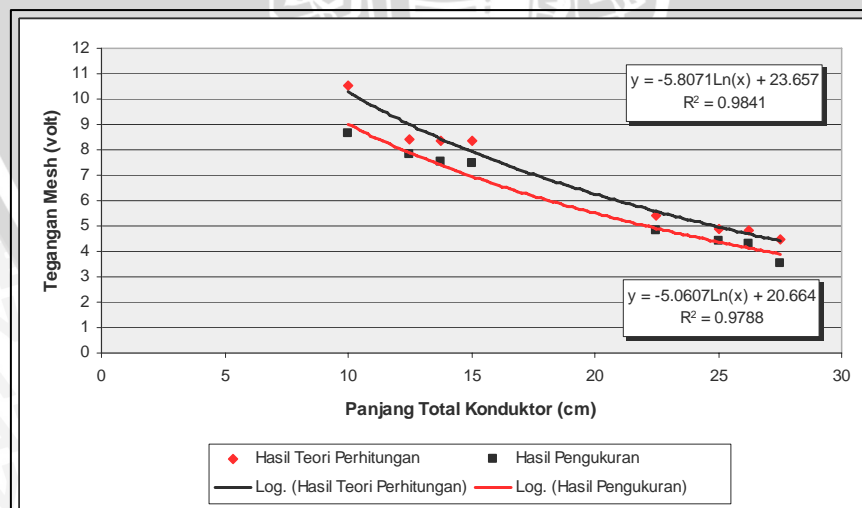
Dengan demikian dapat dibandingkan besarnya nilai tegangan mesh untuk masing-masing model mesh yang diperoleh dari hasil pengukuran dan hasil teori perhitungan seperti ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9. Perbandingan tegangan mesh hasil pengukuran dan hasil teori perhitungan pada model mesh dengan penanaman kedalaman 8 cm.

No.	Jumlah Sel Pembentuk Mesh	Panjang Total (cm)	Bentuk Konfigurasi	Tegangan Mesh Rata-rata (volt)	
				Teori	Praktek
1.	Satu (1)	10	M-1a	10,549	8,655
2.	Satu (1)	10	M-1b	12,066	10,896
3.	Dua (2)	12,5	M-2	8,439	7,841
4.	Tiga (3)	13,75	M-3a	8,378	7,514
5.	Tiga (3)	15	M-3b	7,033	6,301
6.	Empat (4)	15	M-4	8,326	7,481
7.	Lima (5)	22,5	M-5	5,426	4,839
8.	Enam (6)	25	M-6a	4,883	4,419
9.	Enam (6)	27,5	M-6b	3,993	2,897
10.	Tujuh (7)	26,25	M-7a	4,807	4,291
11.	Tujuh (7)	27,5	M-7b	4,439	3,444
12.	Delapan (8)	27,5	M-8	4,466	3,515

Sumber: Hasil perhitungan

Dari Tabel 4.9 dapat dibuat grafik hubungan antara perubahan panjang total konduktor model mesh dan nilai tegangan mesh pada kedalaman 8 cm untuk hasil pengukuran dan hasil teori perhitungan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Grafik pengaruh perubahan panjang total konduktor terhadap nilai tegangan mesh baik dari hasil pengukuran maupun hasil teori perhitungan.

Sumber: Penulis

Dari Gambar 4.6 dapat diamati bahwa perubahan panjang total konduktor mempengaruhi besarnya nilai tegangan mesh baik dari hasil pengukuran maupun hasil teori perhitungan. Semakin panjang konduktor yang dipakai maka nilai tegangan mesh akan semakin kecil. Hal ini seperti terlihat pada grafik hubungan antara panjang total konduktor dengan nilai tegangan mesh yang menghasilkan kurva karakteristik berbentuk parabola dengan pendekatan logaritma dimana untuk hasil teori perhitungan menghasilkan nilai tegangan mesh terbesar dan terkecil berturut-turut sebesar 10,549 volt dan 4,466 volt. Sedangkan untuk hasil pengukuran menghasilkan nilai tegangan mesh terbesar dan terkecil berturut-turut sebesar 8,655 volt dan 3,515 volt.

Dari grafik dapat dilihat bahwa untuk hasil teori perhitungan dan hasil pengukuran dengan pendekatan logaritma diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$E_m = -5,8071 \ln(L) + 23,657 \text{ (hasil teori perhitungan)}$$

$$E_m = -5,0607 \ln(L) + 20,664 \text{ (hasil pengukuran)}$$

dimana; E_m = nilai tegangan mesh (volt)

L = panjang total konduktor (cm)

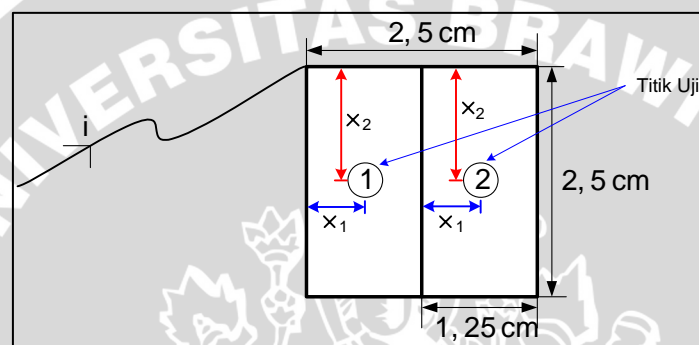
Jadi misalnya untuk memperoleh tegangan mesh sebesar 1 volt, maka berdasarkan persamaan hasil teori perhitungan akan dibutuhkan panjang total konduktor sebesar 49,482 cm dalam bentuk model. Sedangkan berdasarkan persamaan hasil pengukuran akan dibutuhkan panjang total konduktor sebesar 48,698 cm dalam bentuk model.

Dengan demikian dapat diamati bahwa untuk memperoleh tegangan mesh sebesar 1 volt, perbedaan panjang total konduktor yang diperoleh dari hasil teori perhitungan dan hasil pengukuran bisa dibilang sangat kecil yaitu sebesar 0,784 cm. Sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil pengukuran yang diperoleh sudah sesuai dengan teori.

Dari Tabel 4.9 dapat juga diamati bahwa pada panjang total konduktor 10 cm, tegangan mesh pada Model M-1a lebih kecil daripada Model M-1b. Pada panjang total konduktor 15 cm, tegangan mesh pada Model M-3b lebih kecil daripada Model M-4. Demikian pula pada panjang total konduktor 27,5 cm, tegangan mesh pada Model M-6b lebih kecil apabila dibandingkan dengan Model M-7b maupun M-8. Hal ini disebabkan karena pada Model M-3b dan M-6b memiliki luas tiap sel pembentuk mesh yang lebih besar apabila dibandingkan dengan Model M-4, M-7b dan M-8.

4.5 Pengaruh bentuk model konfigurasi terhadap nilai gradien tegangan antara titik di tengah-tengah sel dengan konduktor pada sebuah mesh.

Analisis distribusi tegangan dilakukan dengan menghitung besarnya nilai gradien tegangan untuk masing-masing model mesh yaitu perbandingan besarnya nilai tegangan mesh rata-rata ($\overline{E_m}$) dengan jarak antara titik uji dan konduktor (x) dalam hal ini adalah jarak horizontal (x_1) dan vertikal (x_2). Pada skripsi ini ada dua bentuk sel pembentuk mesh yang diuji yaitu persegi dan persegi panjang dengan ukuran yang berbeda. Contoh panjang x_1 dan x_2 untuk sebuah model mesh ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Salah satu model mesh (M-2) dilengkapi dengan posisi panjang x

Sumber: Penulis

Dari Tabel 4.8 dan pengukuran panjang x_1 dan x_2 untuk masing-masing model mesh, maka akan diperoleh nilai gradien tegangan $\left(\frac{\overline{E_m}}{x}\right)$ baik untuk x_1 maupun x_2 seperti ditunjukkan pada Tabel 4.10 dan Tabel 4.11.

Tabel 4.10. Gradien tegangan yang ditinjau secara horizontal $\left(\frac{\overline{E}_m}{x_1}\right)$ pada model mesh untuk kedalaman penanaman 8 cm.

No.	Jumlah Sel Pembentuk Mesh	Panjang Total (cm)	Bentuk Konfigurasi	Gradien tegangan $\left(\frac{\overline{E}_m}{x_1}\right)$ Pada Kedalaman Penanaman 8 cm $\left(\frac{volt}{cm}\right)$				
				Bentuk Sel Mesh				
				Persegi		Persegi Panjang		
				6,25 cm ²	1,563 cm ²	5,25 cm ²	3,125 cm ²	2,083 cm ²
1.	Satu (1)	10	M-1a	6,924				
2.	Satu (1)	10	M-1b			6,226		
3.	Dua (2)	12,5	M-2				12,546	
4.	Tiga (3)	13,75	M-3a		12,022		12,022	
5.	Tiga (3)	15	M-3b					15,122
6.	Empat (4)	15	M-4		11,97			
7.	Lima (5)	22,5	M-5	3,871	7,742			
8.	Enam (6)	25	M-6a		7,07		7,07	
9.	Enam (6)	27,5	M-6b					6,953
10.	Tujuh (7)	26,25	M-7a		6,866		6,866	
11.	Tujuh (7)	27,5	M-7b		5,51			8,266
12.	Delapan (8)	27,5	M-8		5,624			

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.11. Gradien tegangan yang ditinjau secara vertikal $\left(\frac{\overline{E}_m}{x_2}\right)$ pada model mesh untuk kedalaman penanaman 8 cm.

No.	Jumlah Sel Pembentuk Mesh	Panjang Total (cm)	Bentuk Konfigurasi	Gradien tegangan $\left(\frac{\overline{E}_m}{x_2}\right)$ Pada Kedalaman Penanaman 8 cm $\left(\frac{volt}{cm}\right)$				
				Bentuk Sel Mesh				
				Persegi		Persegi Panjang		
				6,25 cm ²	1,563 cm ²	5,25 cm ²	3,125 cm ²	2,083 cm ²
1.	Satu (1)	10	M-1a	6,924				
2.	Satu (1)	10	M-1b			14,528		
3.	Dua (2)	12,5	M-2				6,273	
4.	Tiga (3)	13,75	M-3a		12,022		6,011	
5.	Tiga (3)	15	M-3b					5,041
6.	Empat (4)	15	M-4		11,97			
7.	Lima (5)	22,5	M-5	3,871	7,742			
8.	Enam (6)	25	M-6a		7,07		3,535	
9.	Enam (6)	27,5	M-6b					2,318
10.	Tujuh (7)	26,25	M-7a		6,866		3,433	
11.	Tujuh (7)	27,5	M-7b		5,51			2,755
12.	Delapan (8)	27,5	M-8		5,624			

Sumber: Hasil perhitungan

4.5.1 Model M-1a.

Dari Tabel 4.10 dan 4.11 untuk model M-1a yang berupa sebuah sel berbentuk persegi dengan luas 6,25 cm², terlihat bahwa besarnya gradien tegangan baik ditinjau secara horizontal maupun vertikal adalah sama yaitu sebesar 6,924 V/cm. Hal ini disebabkan karena besarnya jarak antara titik uji dan konduktor baik secara horizontal maupun vertikal adalah sama ($x_1 = x_2$) yaitu sebesar 1,25 cm tepat di tengah-tengah sel. Pada titik uji ini mendapat pengaruh gradien tegangan yang sama dari konduktor-konduktor mesh yang membentuknya.

4.5.2 Model M-1b.

Dari Tabel 4.10 dan 4.11 untuk model M-1b yang berupa sebuah sel mesh berbentuk persegi panjang dengan luas $5,25 \text{ cm}^2$, terlihat bahwa besarnya gradien tegangan yang ditinjau secara horizontal lebih kecil daripada secara vertikal. Hal ini disebabkan karena besarnya jarak horizontal antara titik uji dan konduktor lebih besar daripada jarak vertikalnya ($x_1 > x_2$).

Dengan demikian terjadi perbedaan gradien tegangan dari yang ditinjau secara horizontal dan vertikal yaitu sebesar $8,302 \text{ V/cm}$ dan diperoleh persamaan yaitu

$$\frac{\overline{E}_m}{x_1} = \frac{\overline{E}_m}{x_2} - \left(57,15\% \times \frac{\overline{E}_m}{x_2} \right).$$
 Gradien tegangan yang ditinjau secara horizontal mengalami penurunan sebesar $57,15 \%$ dari gradien tegangan yang ditinjau secara vertikal.

4.5.3 Model M-2.

Model M-2 berbentuk persegi dengan luas $6,25 \text{ cm}^2$, terdiri dari dua buah sel mesh (no.1 dan 2) berbentuk persegi panjang dengan luas masing-masing $3,125 \text{ cm}^2$.

Dari Tabel 4.10 dan 4.11 terlihat bahwa pada titik uji no.1 dan 2 besarnya gradien tegangan yang ditinjau secara horizontal lebih besar daripada secara vertikal. Hal ini disebabkan karena besarnya jarak horizontal antara titik uji dan konduktor lebih kecil daripada jarak vertikalnya ($x_1 < x_2$).

Pada titik uji no.1 dan 2 perbedaan gradien tegangan dari yang ditinjau secara horizontal dan vertikal adalah sama yaitu sebesar $6,273 \text{ V/cm}$ dan diperoleh persamaan

$$\text{yaitu } \frac{\overline{E}_m}{x_2} = \frac{\overline{E}_m}{x_1} - \left(50\% \times \frac{\overline{E}_m}{x_1} \right).$$

Dengan demikian gradien tegangan yang ditinjau secara vertikal pada titik uji no.1, dan 2 mengalami penurunan yang sama yaitu sebesar 50% terhadap gradien tegangan yang ditinjau secara horizontal. Artinya jarak vertikal antara titik uji dan konduktor adalah dua kali dari jarak horizontalnya ($x_2 = 2 x_1$).

4.5.4 Model M-3a.

Model M-3a berbentuk persegi dengan luas $6,25 \text{ cm}^2$, terdiri dari tiga buah sel mesh yaitu sebuah sel mesh (no.1) berbentuk persegi panjang dengan luas $3,125 \text{ cm}^2$

dan dua buah sel mesh (no.2 dan 3) berbentuk persegi dengan luas masing-masing 1,563 cm².

Dari Tabel 4.10 dan 4.11 terlihat bahwa pada titik uji no.1 besarnya gradien tegangan yang ditinjau secara horizontal lebih besar daripada secara vertikal. Hal ini disebabkan karena besarnya jarak horizontal antara titik uji dan konduktor lebih kecil daripada jarak vertikalnya ($x_1 < x_2$). Sedangkan pada titik uji no.2 dan 3 besarnya gradien tegangan baik ditinjau secara horizontal maupun vertikal adalah sama yaitu sebesar 12,022 V/cm. Hal ini disebabkan karena besarnya jarak antara titik uji dan konduktor baik secara horizontal maupun vertikal adalah sama ($x_1 = x_2$) yaitu sebesar 0,625 cm tepat di tengah-tengah sel mesh. Pada titik uji ini mendapat pengaruh gradien tegangan yang sama dari konduktor-konduktor mesh yang mengelilinginya.

Pada titik uji no.1 perbedaan gradien tegangan dari yang ditinjau secara horizontal dan vertikal adalah sebesar 6,011 V/cm dan diperoleh persamaan yaitu

$$\frac{\overline{E}_m}{x_2} = \frac{\overline{E}_m}{x_1} - \left(50\% \times \frac{\overline{E}_m}{x_1} \right).$$

Gradien tegangan yang ditinjau secara vertikal mengalami penurunan sebesar 50 % dari gradien tegangan yang ditinjau secara horizontal. Artinya jarak vertikal antara titik uji dan konduktor adalah dua kali dari jarak horizontalnya ($x_2 = 2x_1$).

4.5.5 Model M-3b.

Model M-3b berbentuk pesegi dengan luas 6,25 cm², terdiri dari tiga buah sel mesh (no.1, 2, dan 3) berbentuk persegi panjang dengan luas masing-masing 2,083 cm².

Dari Tabel 4.10 dan 4.11 terlihat bahwa pada titik uji no.1, 2, dan 3 besarnya gradien tegangan yang ditinjau secara horizontal lebih besar daripada secara vertikal. Hal ini disebabkan karena besarnya jarak horizontal antara titik uji dan konduktor lebih kecil daripada jarak vertikalnya ($x_1 < x_2$).

Pada titik uji no.1, 2, dan 3 perbedaan gradien tegangan dari yang ditinjau secara horizontal dan vertikal adalah sebesar 10,081 V/cm dan diperoleh persamaan yaitu

$$\frac{\overline{E}_m}{x_2} = \frac{\overline{E}_m}{x_1} - \left(66,67\% \times \frac{\overline{E}_m}{x_1} \right).$$

Dengan demikian gradien tegangan yang ditinjau secara vertikal pada titik uji no.1, 2, dan 3 mengalami penurunan yang sama yaitu sebesar 66,67 % terhadap gradien

tegangan yang ditinjau secara horizontal. Artinya jarak vertikal antara titik uji dan konduktor adalah dua kali dari jarak horizontalnya ($x_2 = 3 x_1$).

4.5.6 Model M-4.

Model M-4 berbentuk persegi dengan luas $6,25 \text{ cm}^2$, terdiri empat buah sel mesh (no.1, 2, 3, dan 4) berbentuk persegi dengan luas masing-masing $1,563 \text{ cm}^2$.

Dari Tabel 4.10 dan 4.11 pada titik uji no. 1, 2, 3, dan 4 terlihat bahwa besarnya gradien tegangan baik ditinjau secara horizontal maupun vertikal adalah sama yaitu sebesar $11,97 \text{ V/cm}$. Hal ini disebabkan karena besarnya jarak antara titik uji dan konduktor baik secara horizontal maupun vertikal adalah sama ($x_1 = x_2$) yaitu sebesar $0,625 \text{ cm}$ tepat di tengah-tengah sel mesh.

Apabila dibandingkan dengan model M-1a, pada model M-5 memiliki gradien tegangan yang lebih merata.

4.5.7 Model M-5.

Model M-5 berbentuk persegi panjang dengan luas $12,5 \text{ cm}^2$, terdiri dari lima buah sel mesh (no.1, 2, 3, 4, dan 5) berbentuk persegi yaitu mesh no.1, 2, 3, dan 4 dengan luas masing-masing $1,536 \text{ cm}^2$ dan mesh no.5 dengan luas $6,25 \text{ cm}^2$.

Dari Tabel 4.10 dan 4.11 terlihat bahwa besarnya gradien tegangan baik ditinjau secara horizontal maupun vertikal adalah sama yaitu untuk titik uji no.1, 2, 3, dan 4 sebesar $7,742 \text{ V/cm}$ dan titik uji no. 5 sebesar $3,871 \text{ V/cm}$. Hal ini disebabkan karena besarnya jarak antara titik uji dan konduktor baik secara horizontal maupun vertikal adalah sama ($x_1 = x_2$) untuk masing-masing mesh. Pada titik uji no.5 memiliki gradien tegangan yang paling kecil karena mesh no.5 memiliki ukuran yang lebih besar dibandingkan mesh yang lain (no.1, 2, 3, dan 4) artinya pada mesh no.5 memiliki jarak x yang lebih besar daripada mesh yang lain.

4.5.8 Model M-6a.

Model M-6a berbentuk persegi panjang dengan luas $12,5 \text{ cm}^2$, terdiri dari empat buah sel mesh (no.1, 2, 3, dan 4) berbentuk persegi dengan luas masing-masing $1,536 \text{ cm}^2$ dan dua buah sel mesh (no.5 dan 6) berbentuk persegi panjang dengan luas masing-masing $3,125 \text{ cm}^2$.

Dari Tabel 4.10 dan 4.11 terlihat bahwa pada titik uji no.1, 2, 3, dan 4 besarnya gradien tegangan baik ditinjau secara horizontal maupun vertikal adalah sama yaitu sebesar 7,07 V/cm. Hal ini disebabkan karena besarnya jarak antara titik uji dan konduktor baik secara horizontal maupun vertikal adalah sama ($x_1 = x_2$) yaitu sebesar 0,625 cm tepat di tengah-tengah sel mesh. Sedangkan pada titik uji no.5 dan 6 besarnya gradien tegangan yang ditinjau secara horizontal lebih besar daripada secara vertikal. Hal ini disebabkan karena besarnya jarak horizontal antara titik uji dan konduktor lebih kecil daripada jarak vertikalnya ($x_1 < x_2$).

Pada titik uji no.5 dan 6 perbedaan gradien tegangan dari yang ditinjau secara horizontal dan vertikal adalah sebesar 3,535 V/cm dan diperoleh persamaan yaitu

$$\frac{\overline{E}_m}{x_2} = \frac{\overline{E}_m}{x_1} - \left(50\% \times \frac{\overline{E}_m}{x_1} \right).$$

Dengan demikian gradien tegangan yang ditinjau secara vertikal pada titik uji no.5, dan 6 mengalami penurunan yang sama yaitu sebesar 50 % terhadap gradien tegangan yang ditinjau secara horizontal. Artinya jarak vertikal antara titik uji dan konduktor adalah dua kali dari jarak horizontalnya ($x_2 = 2 x_1$).

4.5.9 Model M-6b.

Model M-6b berbentuk persegi panjang dengan luas 12,5 cm², terdiri dari enam buah sel mesh (no.1, 2, 3, 4, 5, dan 6) berbentuk persegi panjang dengan luas masing-masing 2,083 cm².

Pada titik uji no.1, 2, 3, 4, 5 dan 6 perbedaan gradien tegangan dari yang ditinjau secara horizontal dan vertikal adalah sebesar 4,635 V/cm dan diperoleh persamaan yaitu

$$\frac{\overline{E}_m}{x_2} = \frac{\overline{E}_m}{x_1} - \left(66,67\% \times \frac{\overline{E}_m}{x_1} \right).$$

Dengan demikian gradien tegangan yang ditinjau secara vertikal pada titik uji no.1, 2, 3, 4, 5, dan 6 mengalami penurunan yang sama yaitu sebesar 66,67 % terhadap gradien tegangan yang ditinjau secara horizontal. Artinya jarak vertikal antara titik uji dan konduktor adalah dua kali dari jarak horizontalnya ($x_2 = 3 x_1$).

4.5.10 Model M-7a.

Model M-7a berbentuk persegi panjang dengan luas 12,5 cm², terdiri dari enam buah sel mesh (no.1, 2, 3, 4, 6 dan 7) berbentuk persegi dengan luas masing-masing

1,536 cm² dan sebuah sel mesh (no.5) berbentuk persegi panjang dengan luas 3,125 cm².

Dari Tabel 4.10 dan 4.11 terlihat bahwa pada titik uji no.1, 2, 3, 4, 6 dan 7 besarnya gradien tegangan baik ditinjau secara horizontal maupun vertikal adalah sama yaitu sebesar 6,866 V/cm. Hal ini disebabkan karena besarnya jarak antara titik uji dan konduktor baik secara horizontal maupun vertikal adalah sama ($x_1 = x_2$) yaitu sebesar 0,625 cm tepat di tengah-tengah sel mesh. Sedangkan pada titik uji no.5 besarnya gradien tegangan yang ditinjau secara horizontal lebih besar daripada secara vertikal. Hal ini disebabkan karena besarnya jarak horizontal antara titik uji dan konduktor lebih kecil daripada jarak vertikalnya ($x_1 < x_2$).

Pada titik uji no.5 perbedaan gradien tegangan dari yang ditinjau secara horizontal dan vertikal adalah sebesar 3,433 V/cm dan diperoleh persamaan yaitu
$$\frac{\overline{E}_m}{x_2} = \frac{\overline{E}_m}{x_1} - \left(50\% \times \frac{\overline{E}_m}{x_1} \right)$$
. Gradien tegangan yang ditinjau secara vertikal mengalami penurunan sebesar 50 % dari gradien tegangan yang ditinjau secara horizontal. Artinya jarak vertikal antara titik uji dan konduktor adalah dua kali dari jarak horizontalnya ($x_2 = 2x_1$).

4.5.11 Model M-7b.

Model M-7b berbentuk persegi panjang dengan luas 12,5 cm², terdiri dari empat buah sel mesh (no.1, 2, 3, dan 4) berbentuk persegi dengan luas masing-masing 1,536 cm² dan tiga buah sel mesh (no.5, 6, dan 7) berbentuk persegi panjang dengan luas masing-masing 2,083 cm².

Dari Tabel 4.10 dan 4.11 terlihat bahwa pada titik uji no.1, 2, 3, dan 4 besarnya gradien tegangan baik ditinjau secara horizontal maupun vertikal adalah sama yaitu sebesar 5,51 V/cm. Hal ini disebabkan karena besarnya jarak antara titik uji dan konduktor baik secara horizontal maupun vertikal adalah sama ($x_1 = x_2$) yaitu sebesar 0,625 cm tepat di tengah-tengah sel mesh. Sedangkan pada titik uji no.5, 6, dan 7 besarnya gradien tegangan yang ditinjau secara horizontal lebih besar daripada secara vertikal. Hal ini disebabkan karena besarnya jarak horizontal antara titik uji dan konduktor lebih kecil daripada jarak vertikalnya ($x_1 < x_2$).

Pada titik uji no.5, 6, dan 7 perbedaan gradien tegangan dari yang ditinjau secara horizontal dan vertikal adalah sebesar 5,511 V/cm dan diperoleh persamaan yaitu

$$\frac{\overline{E_m}}{x_2} = \frac{\overline{E_m}}{x_1} - \left(66,67\% \times \frac{\overline{E_m}}{x_1} \right).$$

Dengan demikian gradien tegangan yang ditinjau secara vertikal pada titik uji no.5, 6, dan 7 mengalami penurunan yang sama yaitu sebesar 66,67 % terhadap gradien tegangan yang ditinjau secara horizontal. Artinya jarak vertikal antara titik uji dan konduktor adalah dua kali dari jarak horizontalnya ($x_2 = 3 x_1$).

4.5.12 Model M-8.

Model M-8 berbentuk pesegi panjang dengan luas 12,5 cm², terdiri delapan buah sel mesh (no.1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, dan 8) berbentuk persegi dengan luas masing-masing 1,536 cm².

Dari Tabel 4.10 dan 4.11 terlihat bahwa besarnya gradien tegangan baik ditinjau secara horizontal maupun vertikal adalah sama yaitu untuk titik uji no.1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, dan 8 sebesar 5,624 V/cm. Hal ini disebabkan karena besarnya jarak antara titik uji dan konduktor baik secara horizontal maupun vertikal adalah sama ($x_1 = x_2$) yaitu sebesar 0,625 cm tepat di tengah-tengah sel mesh.

4.6 Pengaruh bentuk model konfigurasi terhadap nilai gradien tegangan rata-rata di dalam model mesh.

Analisis pengaruh model konfigurasi terhadap nilai gradien tegangan rata-rata di dalam model mesh dilakukan pada model mesh yang terbentuk dari dua sel mesh atau lebih yaitu pada model M-2, M-3a, M-3b, M-4, M-5, M-6a, M-6b, M-7a, M-7b, dan M-8. Analisis perhitungan dilakukan dengan cara menghitung besarnya gradien tegangan antar sel pembentuk mesh yang berdekatan di dalam sebuah model mesh, kemudian diambil nilai rata-ratanya. Dari Tabel 4.7 dapat dihitung besarnya gradien tegangan antar sel pembentuk mesh untuk masing-masing model mesh.

4.6.1 Model M-2.

Gradien tegangan yang dihitung adalah gradien tegangan antara titik uji no. 1 dan 2 yaitu:

$$\frac{\Delta E_{m(1-2)}}{\Delta x_{(1-2)}} = \frac{E_{m(1)} - E_{m(2)}}{\Delta x_{(1-2)}} = \frac{7,961 - 7,72}{1,25} = \frac{0,241}{1,25} = 0,193 \text{ V/cm.}$$

Dengan demikian diperoleh nilai gradien tegangan rata-rata sebesar: 0,193 V/cm

4.6.2 Model M-3a.

- Antara titik uji no.1 dan 2

$$\frac{\Delta E_{m(1-2)}}{\Delta x_{(1-2)}} = \frac{E_{m(1)} - E_{m(2)}}{\Delta x_{(1-2)}} = \frac{7,532 - 7,345}{2,795} = \frac{0,187}{2,795} = 0,067 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.3 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(3-1)}}{\Delta x_{(3-1)}} = \frac{E_{m(3)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(3-1)}} = \frac{7,665 - 7,532}{2,795} = \frac{0,133}{2,795} = 0,048 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.3 dan 2

$$\frac{\Delta E_{m(3-2)}}{\Delta x_{(3-2)}} = \frac{E_{m(3)} - E_{m(2)}}{\Delta x_{(3-2)}} = \frac{7,665 - 7,345}{1,25} = \frac{0,32}{1,25} = 0,256 \text{ V/cm.}$$

Dengan demikian diperoleh nilai gradien tegangan rata-rata sebesar:

$$\frac{\overline{\Delta E_m}}{\Delta x} = \frac{0,067 + 0,048 + 0,256}{3} = 0,124 \text{ V/cm.}$$

4.6.3 Model M-3b.

- Antara titik uji no.2 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(2-1)}}{\Delta x_{(2-1)}} = \frac{E_{m(2)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(2-1)}} = \frac{6,282 - 6,21}{0,833} = \frac{0,072}{0,833} = 0,086 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.3 dan 2

$$\frac{\Delta E_{m(3-2)}}{\Delta x_{(3-2)}} = \frac{E_{m(3)} - E_{m(2)}}{\Delta x_{(3-2)}} = \frac{6,412 - 6,282}{0,833} = \frac{0,13}{0,833} = 0,156 \text{ V/cm.}$$

Dengan demikian diperoleh nilai gradien tegangan rata-rata sebesar:

$$\frac{\overline{\Delta E_m}}{\Delta x} = \frac{0,086 + 0,156}{2} = 0,121 \text{ V/cm.}$$

4.6.4 Model M-4.

- Antara titik uji no.2 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(2-1)}}{\Delta x_{(2-1)}} = \frac{E_{m(2)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(2-1)}} = \frac{7,476 - 7,341}{1,25} = \frac{0,135}{1,25} = 0,108 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.3 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(3-1)}}{\Delta x_{(3-1)}} = \frac{E_{m(3)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(3-1)}} = \frac{7,445 - 7,341}{1,25} = \frac{0,104}{1,25} = 0,083 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(4-1)}}{\Delta x_{(4-1)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(4-1)}} = \frac{7,661 - 7,341}{1,768} = \frac{0,32}{1,768} = 0,181 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.2 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(2-3)}}{\Delta x_{(2-3)}} = \frac{E_{m(2)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(2-3)}} = \frac{7,476 - 7,445}{1,768} = \frac{0,031}{1,768} = 0,018 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 2

$$\frac{\Delta E_{m(4-2)}}{\Delta x_{(4-2)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(2)}}{\Delta x_{(4-2)}} = \frac{7,661 - 7,476}{1,25} = \frac{0,185}{1,25} = 0,148 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(4-3)}}{\Delta x_{(4-3)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(4-3)}} = \frac{7,661 - 7,445}{1,25} = \frac{0,216}{1,25} = 0,173 \text{ V/cm.}$$

Dengan demikian diperoleh nilai gradien tegangan rata-rata sebesar:

$$\frac{\overline{\Delta E_m}}{\Delta x} = \frac{0,108 + 0,083 + 0,181 + 0,018 + 0,148 + 0,173}{6} = 0,118 \text{ V/cm.}$$

4.6.5 Model M-5.

- Antara titik uji no.1 dan 2

$$\frac{\Delta E_{m(1-2)}}{\Delta x_{(1-2)}} = \frac{E_{m(1)} - E_{m(2)}}{\Delta x_{(1-2)}} = \frac{5,019 - 4,86}{1,25} = \frac{0,159}{1,25} = 0,127 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.1 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(1-3)}}{\Delta x_{(1-3)}} = \frac{E_{m(1)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(1-3)}} = \frac{5,019 - 4,712}{1,25} = \frac{0,307}{1,25} = 0,246 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.1 dan 4

$$\frac{\Delta E_{m(1-4)}}{\Delta x_{(1-4)}} = \frac{E_{m(1)} - E_{m(4)}}{\Delta x_{(1-4)}} = \frac{5,019 - 4,915}{1,768} = \frac{0,104}{1,768} = 0,059 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.2 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(2-3)}}{\Delta x_{(2-3)}} = \frac{E_{m(2)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(2-3)}} = \frac{4,86 - 4,712}{1,768} = \frac{0,148}{1,768} = 0,084 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 2

$$\frac{\Delta E_{m(4-2)}}{\Delta x_{(4-2)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(2)}}{\Delta x_{(4-2)}} = \frac{4,915 - 4,86}{1,25} = \frac{0,055}{1,25} = 0,044 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(4-3)}}{\Delta x_{(4-3)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(4-3)}} = \frac{4,915 - 4,712}{1,25} = \frac{0,203}{1,25} = 0,162 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.3 dan 5

$$\frac{\Delta E_{m(3-5)}}{\Delta x_{(3-5)}} = \frac{E_{m(3)} - E_{m(5)}}{\Delta x_{(3-5)}} = \frac{4,712 - 4,69}{1,976} = \frac{0,022}{1,976} = 0,011 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 5

$$\frac{\Delta E_{m(4-5)}}{\Delta x_{(4-5)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(5)}}{\Delta x_{(4-5)}} = \frac{4,915 - 4,69}{1,976} = \frac{0,225}{1,976} = 0,114 \text{ V/cm.}$$

Dengan demikian diperoleh nilai gradien tegangan rata-rata sebesar:

$$\frac{\overline{\Delta E_m}}{\Delta x} = \frac{0,127 + 0,246 + 0,059 + 0,084 + 0,044 + 0,162 + 0,011 + 0,114}{8} = 0,106 \text{ V/cm.}$$

4.6.6 Model M-6a.

- Antara titik uji no.2 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(2-1)}}{\Delta x_{(2-1)}} = \frac{E_{m(2)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(2-1)}} = \frac{4,408 - 4,17}{1,25} = \frac{0,238}{1,25} = 0,19 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.3 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(3-1)}}{\Delta x_{(3-1)}} = \frac{E_{m(3)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(3-1)}} = \frac{4,348 - 4,17}{1,25} = \frac{0,178}{1,25} = 0,142 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(4-1)}}{\Delta x_{(4-1)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(4-1)}} = \frac{4,448 - 4,17}{1,768} = \frac{0,278}{1,768} = 0,157 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.2 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(2-3)}}{\Delta x_{(2-3)}} = \frac{E_{m(2)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(2-3)}} = \frac{4,408 - 4,348}{1,768} = \frac{0,06}{1,768} = 0,034 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 2

$$\frac{\Delta E_{m(4-2)}}{\Delta x_{(4-2)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(2)}}{\Delta x_{(4-2)}} = \frac{4,448 - 4,408}{1,25} = \frac{0,04}{1,25} = 0,032 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(4-3)}}{\Delta x_{(4-3)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(4-3)}} = \frac{4,448 - 4,348}{1,25} = \frac{0,1}{1,25} = 0,08 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.5 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(5-3)}}{\Delta x_{(5-3)}} = \frac{E_{m(5)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(5-3)}} = \frac{4,549 - 4,348}{1,398} = \frac{0,201}{1,398} = 0,144 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.5 dan 4

$$\frac{\Delta E_{m(5-4)}}{\Delta x_{(5-4)}} = \frac{E_{m(5)} - E_{m(4)}}{\Delta x_{(5-4)}} = \frac{4,549 - 4,448}{1,398} = \frac{0,101}{1,398} = 0,072 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.6 dan 5

$$\frac{\Delta E_{m(6-5)}}{\Delta x_{(6-5)}} = \frac{E_{m(6)} - E_{m(5)}}{\Delta x_{(6-5)}} = \frac{4,591 - 4,549}{1,25} = \frac{0,042}{1,25} = 0,034 \text{ V/cm.}$$

Dengan demikian diperoleh nilai gradien tegangan rata-rata sebesar:

$$\frac{\overline{\Delta E_m}}{\Delta x} = \frac{0,19 + 0,142 + 0,157 + 0,034 + 0,032 + 0,08 + 0,144 + 0,072 + 0,034}{9} = 0,098 \text{ V / cm.}$$

4.6.7 Model M-6b.

- Antara titik uji no.1 dan 2

$$\frac{\Delta E_{m(1-2)}}{\Delta x_{(1-2)}} = \frac{E_{m(1)} - E_{m(2)}}{\Delta x_{(1-2)}} = \frac{2,791 - 2,762}{0,833} = \frac{0,029}{0,833} = 0,035 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.3 dan 2

$$\frac{\Delta E_{m(3-2)}}{\Delta x_{(3-2)}} = \frac{E_{m(3)} - E_{m(2)}}{\Delta x_{(3-2)}} = \frac{2,781 - 2,762}{0,833} = \frac{0,019}{0,833} = 0,023 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(4-3)}}{\Delta x_{(4-3)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(4-3)}} = \frac{2,905 - 2,781}{0,833} = \frac{0,124}{0,833} = 0,149 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.5 dan 4

$$\frac{\Delta E_{m(5-4)}}{\Delta x_{(5-4)}} = \frac{E_{m(5)} - E_{m(4)}}{\Delta x_{(5-4)}} = \frac{3,015 - 2,905}{0,833} = \frac{0,11}{0,833} = 0,132 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.6 dan 5

$$\frac{\Delta E_{m(6-5)}}{\Delta x_{(6-5)}} = \frac{E_{m(6)} - E_{m(5)}}{\Delta x_{(6-5)}} = \frac{3,127 - 3,015}{0,833} = \frac{0,112}{0,833} = 0,135 \text{ V/cm.}$$

Dengan demikian diperoleh nilai gradien tegangan rata-rata sebesar:

$$\frac{\overline{\Delta E_m}}{\Delta x} = \frac{0,035 + 0,023 + 0,149 + 0,132 + 0,135}{5} = 0,095 \text{ V/cm.}$$

4.6.8 Model M-7a.

- Antara titik uji no.2 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(2-1)}}{\Delta x_{(2-1)}} = \frac{E_{m(2)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(2-1)}} = \frac{4,108 - 4,072}{1,25} = \frac{0,036}{1,25} = 0,029 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.3 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(3-1)}}{\Delta x_{(3-1)}} = \frac{E_{m(3)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(3-1)}} = \frac{4,18 - 4,072}{1,25} = \frac{0,108}{1,25} = 0,086 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(4-1)}}{\Delta x_{(4-1)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(4-1)}} = \frac{4,389 - 4,072}{1,768} = \frac{0,317}{1,768} = 0,179 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.3 dan 2

$$\frac{\Delta E_{m(3-2)}}{\Delta x_{(3-2)}} = \frac{E_{m(3)} - E_{m(2)}}{\Delta x_{(3-2)}} = \frac{4,18 - 4,108}{1,768} = \frac{0,072}{1,768} = 0,041 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 2

$$\frac{\Delta E_{m(4-2)}}{\Delta x_{(4-2)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(2)}}{\Delta x_{(4-2)}} = \frac{4,389 - 4,108}{1,25} = \frac{0,281}{1,25} = 0,225 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(4-3)}}{\Delta x_{(4-3)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(4-3)}} = \frac{4,389 - 4,18}{1,25} = \frac{0,209}{1,25} = 0,167 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.5 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(5-3)}}{\Delta x_{(5-3)}} = \frac{E_{m(5)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(5-3)}} = \frac{4,399 - 4,18}{1,398} = \frac{0,219}{1,398} = 0,157 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.5 dan 4

$$\frac{\Delta E_{m(5-4)}}{\Delta x_{(5-4)}} = \frac{E_{m(5)} - E_{m(4)}}{\Delta x_{(5-4)}} = \frac{4,399 - 4,389}{1,398} = \frac{0,01}{1,398} = 0,007 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.6 dan 5

$$\frac{\Delta E_{m(6-5)}}{\Delta x_{(6-5)}} = \frac{E_{m(6)} - E_{m(5)}}{\Delta x_{(6-5)}} = \frac{4,461 - 4,399}{1,398} = \frac{0,062}{1,398} = 0,044 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.7 dan 5

$$\frac{\Delta E_{m(7-5)}}{\Delta x_{(7-5)}} = \frac{E_{m(7)} - E_{m(5)}}{\Delta x_{(7-5)}} = \frac{4,431 - 4,399}{1,398} = \frac{0,032}{1,398} = 0,023 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.6 dan 7

$$\frac{\Delta E_{m(6-7)}}{\Delta x_{(6-7)}} = \frac{E_{m(6)} - E_{m(7)}}{\Delta x_{(6-7)}} = \frac{4,461 - 4,431}{1,25} = \frac{0,03}{1,25} = 0,024 \text{ V/cm.}$$

Dengan demikian diperoleh nilai gradien tegangan rata-rata sebesar:

$$\frac{\overline{\Delta E_m}}{\Delta x} = \frac{0,029 + 0,086 + 0,179 + 0,041 + 0,225 + 0,167 + 0,157 + 0,007 + 0,044 + 0,023 + 0,024}{11} = 0,089 \text{ V/cm.}$$

4.6.9 Model M-7b.

- Antara titik uji no.2 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(2-1)}}{\Delta x_{(2-1)}} = \frac{E_{m(2)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(2-1)}} = \frac{3,337 - 3,248}{1,25} = \frac{0,089}{1,25} = 0,071 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.3 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(3-1)}}{\Delta x_{(3-1)}} = \frac{E_{m(3)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(3-1)}} = \frac{3,291 - 3,248}{1,25} = \frac{0,043}{1,25} = 0,034 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(4-1)}}{\Delta x_{(4-1)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(4-1)}} = \frac{3,312 - 3,248}{1,768} = \frac{0,064}{1,768} = 0,036 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.2 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(2-3)}}{\Delta x_{(2-3)}} = \frac{E_{m(2)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(2-3)}} = \frac{3,337 - 3,291}{1,768} = \frac{0,046}{1,768} = 0,026 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.2 dan 4

$$\frac{\Delta E_{m(2-4)}}{\Delta x_{(2-4)}} = \frac{E_{m(2)} - E_{m(4)}}{\Delta x_{(2-4)}} = \frac{3,337 - 3,312}{1,25} = \frac{0,025}{1,25} = 0,02 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(4-3)}}{\Delta x_{(4-3)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(4-3)}} = \frac{3,312 - 3,291}{1,25} = \frac{0,021}{1,25} = 0,017 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.5 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(5-3)}}{\Delta x_{(5-3)}} = \frac{E_{m(5)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(5-3)}} = \frac{3,592 - 3,291}{1,215} = \frac{0,301}{1,215} = 0,248 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.5 dan 4

$$\frac{\Delta E_{m(5-4)}}{\Delta x_{(5-4)}} = \frac{E_{m(5)} - E_{m(4)}}{\Delta x_{(5-4)}} = \frac{3,592 - 3,312}{1,215} = \frac{0,28}{1,215} = 0,231 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.6 dan 5

$$\frac{\Delta E_{m(6-5)}}{\Delta x_{(6-5)}} = \frac{E_{m(6)} - E_{m(5)}}{\Delta x_{(6-5)}} = \frac{3,64 - 3,592}{0,833} = \frac{0,048}{0,833} = 0,058 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.7 dan 6

$$\frac{\Delta E_{m(7-6)}}{\Delta x_{(7-6)}} = \frac{E_{m(7)} - E_{m(6)}}{\Delta x_{(7-6)}} = \frac{3,69 - 3,64}{0,833} = \frac{0,05}{0,833} = 0,06 \text{ V/cm.}$$

Dengan demikian diperoleh nilai gradien tegangan rata-rata sebesar:

$$\frac{\Delta E_m}{\Delta x} = \frac{0,071 + 0,034 + 0,036 + 0,026 + 0,02 + 0,017 + 0,248 + 0,231 + 0,058 + 0,06}{10} = 0,08 \text{ V/cm.}$$

4.6.10 Model M-8.

- Antara titik uji no.2 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(2-1)}}{\Delta x_{(2-1)}} = \frac{E_{m(2)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(2-1)}} = \frac{3,32 - 3,315}{1,25} = \frac{0,005}{1,25} = 0,004 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.3 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(3-1)}}{\Delta x_{(3-1)}} = \frac{E_{m(3)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(3-1)}} = \frac{3,495 - 3,315}{1,25} = \frac{0,18}{1,25} = 0,144 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 1

$$\frac{\Delta E_{m(4-1)}}{\Delta x_{(4-1)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(1)}}{\Delta x_{(4-1)}} = \frac{3,504 - 3,315}{1,768} = \frac{0,189}{1,768} = 0,107 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.3 dan 2

$$\frac{\Delta E_{m(3-2)}}{\Delta x_{(3-2)}} = \frac{E_{m(3)} - E_{m(2)}}{\Delta x_{(3-2)}} = \frac{3,495 - 3,32}{1,768} = \frac{0,175}{1,768} = 0,099 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 2

$$\frac{\Delta E_{m(4-2)}}{\Delta x_{(4-2)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(2)}}{\Delta x_{(4-2)}} = \frac{3,504 - 3,32}{1,25} = \frac{0,184}{1,25} = 0,147 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.4 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(4-3)}}{\Delta x_{(4-3)}} = \frac{E_{m(4)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(4-3)}} = \frac{3,504 - 3,495}{1,25} = \frac{0,009}{1,25} = 0,007 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.5 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(5-3)}}{\Delta x_{(5-3)}} = \frac{E_{m(5)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(5-3)}} = \frac{3,59 - 3,495}{1,25} = \frac{0,095}{1,25} = 0,076 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.6 dan 3

$$\frac{\Delta E_{m(6-3)}}{\Delta x_{(6-3)}} = \frac{E_{m(6)} - E_{m(3)}}{\Delta x_{(6-3)}} = \frac{3,604 - 3,495}{1,768} = \frac{0,1}{1,768} = 0,062 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.5 dan 4

$$\frac{\Delta E_{m(5-4)}}{\Delta x_{(5-4)}} = \frac{E_{m(5)} - E_{m(4)}}{\Delta x_{(5-4)}} = \frac{3,59 - 3,504}{1,768} = \frac{0,086}{1,768} = 0,049 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.6 dan 4

$$\frac{\Delta E_{m(6-4)}}{\Delta x_{(6-4)}} = \frac{E_{m(6)} - E_{m(4)}}{\Delta x_{(6-4)}} = \frac{3,604 - 3,504}{1,25} = \frac{0,1}{1,25} = 0,08 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.6 dan 5

$$\frac{\Delta E_{m(6-5)}}{\Delta x_{(6-5)}} = \frac{E_{m(6)} - E_{m(5)}}{\Delta x_{(6-5)}} = \frac{3,604 - 3,59}{1,25} = \frac{0,014}{1,25} = 0,011 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.7 dan 5

$$\frac{\Delta E_{m(7-5)}}{\Delta x_{(7-5)}} = \frac{E_{m(7)} - E_{m(5)}}{\Delta x_{(7-5)}} = \frac{3,641 - 3,59}{1,25} = \frac{0,051}{1,25} = 0,041 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.8 dan 5

$$\frac{\Delta E_{m(8-5)}}{\Delta x_{(8-5)}} = \frac{E_{m(8)} - E_{m(5)}}{\Delta x_{(8-5)}} = \frac{3,649 - 3,59}{1,768} = \frac{0,059}{1,768} = 0,033 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.7 dan 6

$$\frac{\Delta E_{m(7-6)}}{\Delta x_{(7-6)}} = \frac{E_{m(7)} - E_{m(6)}}{\Delta x_{(7-6)}} = \frac{3,641 - 3,604}{1,768} = \frac{0,037}{1,768} = 0,021 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.8 dan 6

$$\frac{\Delta E_{m(8-6)}}{\Delta x_{(8-6)}} = \frac{E_{m(8)} - E_{m(6)}}{\Delta x_{(8-6)}} = \frac{3,649 - 3,604}{1,25} = \frac{0,045}{1,25} = 0,036 \text{ V/cm.}$$

- Antara titik uji no.8 dan 7

$$\frac{\Delta E_{m(8-7)}}{\Delta x_{(8-7)}} = \frac{E_{m(8)} - E_{m(7)}}{\Delta x_{(8-7)}} = \frac{3,649 - 3,641}{1,25} = \frac{0,008}{1,25} = 0,006 \text{ V/cm.}$$

Dengan demikian diperoleh nilai gradien tegangan rata-rata sebesar:

$$\frac{\Delta E_m}{\Delta x} = \frac{0,004 + 0,144 + 0,107 + 0,099 + 0,147 + 0,007 + 0,076 + 0,062 + 0,049 + 0,08 + 0,011 + 0,041 + 0,033 + 0,021 + 0,036 + 0,006}{16} = 0,058 \text{ V/cm.}$$

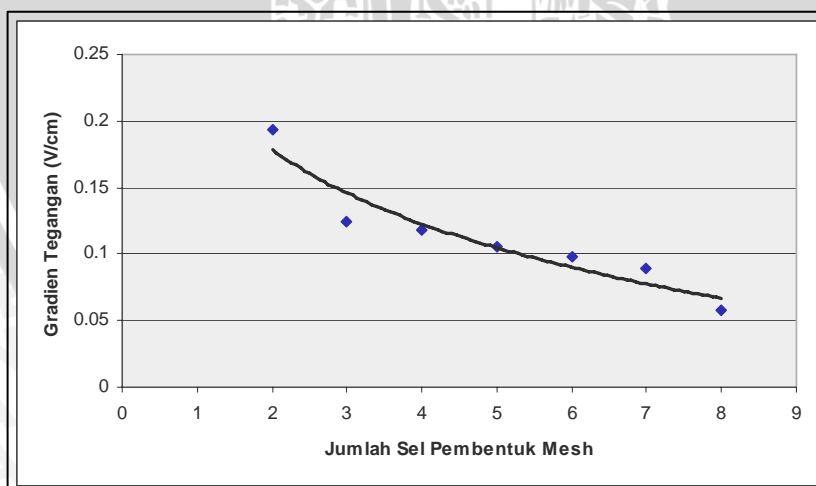
Dari hasil perhitungan maka dapat diperoleh besarnya nilai gradien tegangan rata-rata untuk masing-masing model mesh seperti ditunjukkan pada Tabel 4.12

Tabel 4.12. Gradien tegangan rata-rata ($\frac{\Delta E_m}{\Delta x}$) pada model mesh dengan penanaman kedalaman 8 cm.

No.	Jumlah Sel Pembentuk Mesh	Panjang Total (cm)	Bentuk Konfigurasi	Gradien Tegangan Rata-rata (V/cm)
1.	Dua (2)	12,5	M-2	0,193
2.	Tiga (3)	13,75	M-3a	0,124
3.	Tiga (3)	15	M-3b	0,121
4.	Empat (4)	15	M-4	0,118
5.	Lima (5)	22,5	M-5	0,106
6.	Enam (6)	25	M-6a	0,098
7.	Enam (6)	27,5	M-6b	0,095
8.	Tujuh (7)	26,25	M-7a	0,089
9.	Tujuh (7)	27,5	M-7b	0,08
10.	Delapan (8)	27,5	M-8	0,058

Sumber: Hasil perhitungan

Dari Tabel 4.12 dapat dibuat grafik hubungan antara perubahan jumlah sel mesh dan nilai gradien tegangan pada kedalaman 8 cm seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8. Grafik pengaruh perubahan jumlah sel mesh terhadap nilai gradien tegangan pada kedalaman 8 cm.

Sumber: Penulis

Dari Gambar 4.8 dapat diamati bahwa perubahan jumlah sel mesh mempengaruhi besarnya nilai gradien tegangan. Semakin banyak jumlah sel pembentuk mesh maka nilai gradien tegangan akan semakin kecil. Dari Tabel 4.12 juga dapat diamati bahwa semakin panjang konduktor yang dipakai maka nilai gradien tegangan semakin kecil. Dengan demikian semakin banyak jumlah sel mesh dan semakin panjang konduktor yang dipakai maka distribusi tegangan akan semakin merata.

Dalam penelitian ini gradien tegangan antar sel di dalam model mesh yang terbesar adalah pada Model M-2 yaitu sebesar 0,193 V/cm, sehingga dapat dikatakan pada setiap jarak 1 cm akan terdapat beda potensial sebesar 0,193 volt. Sedangkan gradien tegangan terkecil adalah pada Model M-8 yaitu sebesar 0,058 V/cm, sehingga dapat dikatakan pada setiap jarak 1 cm akan terdapat beda potensial sebesar 0,058 volt.

Pada pengukuran tegangan mesh untuk panjang total konduktor yang sama yaitu sebesar 15 cm, tegangan mesh pada Model M-3b lebih kecil daripada Model M-4. Namun gradien tegangan pada Model M-3b lebih besar daripada Model M-4. Demikian pula pada panjang total konduktor 27,5 cm, tegangan mesh pada Model M-6b lebih kecil apabila dibandingkan dengan Model M-7b maupun M-8. Sedangkan gradien tegangan pada Model M-6b lebih besar apabila dibandingkan dengan Model M-7b maupun M-8.

Jadi untuk model mesh dengan distribusi tegangan yang merata artinya memiliki gradien tegangan yang lebih kecil belum tentu akan memiliki tegangan mesh yang lebih kecil pula. Hal ini tergantung dari jumlah sel pembentuk mesh dan panjang total konduktor yang dipakai.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan.

Dari hasil perhitungan dan analisis pada Bab IV mengenai model sistem pengetanahan mesh maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Perubahan konfigurasi model pengetanahan mesh mempengaruhi besarnya nilai tahanan pengetanahan. Semakin panjang total konduktor yang dipakai maka nilai tahanan pengetanahan akan semakin kecil dan semakin dalam penanaman model mesh maka nilai tahanan pengetanahan akan semakin kecil juga. Hal ini seperti terlihat pada grafik hubungan antara panjang total konduktor dengan nilai tahanan pengetanahan dengan karakteristik berbentuk kurva parabola dengan pendekatan logaritma menurun.
2. Perubahan konfigurasi model pengetanahan mesh mempengaruhi besarnya nilai tegangan mesh dan gradien tegangan.
 - a. Semakin panjang total konduktor yang dipakai maka nilai tegangan mesh akan semakin kecil.
 - b. Untuk panjang total konduktor yang sama perubahan konfigurasi model mesh mempengaruhi besarnya nilai tegangan mesh. Pada panjang total konduktor 10 cm model mesh berbentuk persegi (M-1a) memiliki nilai tegangan mesh yang lebih kecil daripada model mesh berbentuk persegi panjang (M-1b). Pada panjang total konduktor 15 cm model mesh yang terdiri dari 3 sel mesh berbentuk persegi panjang (M-3b) memiliki nilai tegangan mesh yang lebih kecil daripada model mesh yang terdiri dari 4 sel mesh berbentuk persegi (M-4). Pada panjang total konduktor 27,5 cm model mesh yang terdiri dari 6 buah sel mesh berbentuk persegi panjang (M-6b) memiliki nilai tegangan mesh terkecil apabila dibandingkan dengan model mesh yang terdiri 4 buah sel mesh berbentuk persegi dan 3 buah sel mesh berbentuk persegi panjang (M-7b) maupun model mesh yang terdiri dari 8 buah sel mesh berbentuk persegi (M-8).
 - c. Semakin panjang total konduktor yang dipakai maka nilai gradien tegangan akan semakin kecil.

- d. Semakin banyak jumlah sel pembentuk mesh maka nilai gradien tegangan akan semakin kecil.
 - e. Untuk panjang total konduktor yang sama perubahan konfigurasi model mesh mempengaruhi besarnya nilai gradien tegangan. Pada panjang total konduktor 15 cm Model M-4 memiliki nilai gradien tegangan yang lebih kecil daripada Model M-3b. Pada panjang total konduktor 27,5 cm Model M-8 memiliki nilai gradien tegangan terkecil apabila dibandingkan dengan Model M-6b dan M-7b.
3. Pada panjang total konduktor 10 cm Model M-1b memiliki nilai tahanan pengetanahan yang lebih kecil daripada Model M-1a. Pada panjang total konduktor 15 cm Model M-3b memiliki nilai tahanan pengetanahan yang lebih kecil daripada Model M-4. Pada panjang total konduktor 27,5 cm Model M-6b memiliki nilai tahanan pengetanahan terkecil apabila dibandingkan dengan Model M-7b dan M-8. Jadi untuk 12 model mesh yang diteliti Model M-6b memiliki nilai tahanan pengetanahan yang paling kecil yaitu sebesar $1,263 \Omega$ (pada kedalaman 4 cm) dan $0,964 \Omega$ (pada kedalaman 8 cm). Sedangkan gradien tegangan paling kecil adalah pada Model M-8 yaitu sebesar $0,058 \text{ V/cm}$.

5.2 Saran.

1. Diharapkan adanya pembahasan lebih lanjut mengenai pengaruh model pengetanahan mesh dengan posisi injeksi arus yang diubah-ubah.
2. Diharapkan adanya pembahasan lebih lanjut untuk menghindari adanya pengaruh elektrolisis larutan air garam sebagai media tanam karena dapat mempengaruhi konsistensi hasil pengukuran.

DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, A, Kuwahara, S. 1997. *Teknik Tenaga Listrik*. Jilid Ketiga. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Hadi, Abdul. 1994. *Sistem Distribusi Daya Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- Harten, Van, Setiawan, E. 1985. *Instalasi Listrik Arus Kuat*. Jilid Ketiga. Bandung: Binacipta.
- Hutauruk, T.S. 1999. *Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan*. Jakarta: Erlangga.
- IEEE Guide for Safety in Substation Grounding*. IEEE Std 80-1986.
- IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power System*. IEEE Std 142-1991.
- Marsudi, Djiteng. 2003. *Pembangkitan Energi Listrik*. Jakarta: PT. Jalamas Berkatama.
- Persyaratan Umum Instalasi Listrik. 2000. Jakarta: Yayasan PUIL.
- RUS Bulletin 1724E-300. 2001. *Design Guide For Rural Substation*. United States Department of Agriculture.
<http://www.usda.gov/rus/electric/pubs/1724e300/1724e300.pdf>
- Tagg, G.F. 1964. *Earth Resistances*. London: George Newnes Limited.