

DISAIN OPTIMALISASI JARAK GRID DAN GROUND ROD PADA SISTEM PEMBUMIAN

Haris Isyanto¹, Nurchosid²

¹⁾²⁾Fakultas Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Jakarta
Jl. Cempaka Putih Tengah 27 Jakarta Pusat 10510
E-mail: haris.isyanto@ftumj.ac.id

ABSTRAK

Salah satu faktor utama dalam mengamankan sistem tenaga listrik adalah sistem pembumian. Sistem pembumian dalam unit pembangkit berkaitan erat dengan switchyard. Disain sistem pembumian switchyard dilakukan dengan mengatur jarak grid dan panjang ground rod untuk mendapatkan kombinasi mutu dan biaya paling optimal. Definisi keadaan optimal dalam hal ini dibatasi pada keadaan dimana terjadi kombinasi antara mutu yang tidak melewati titik batas toleransi teknis dan mempunyai efisiensi biaya. Disain sistem pembumian switchyard diambil sebagai sebuah studi kasus. Standard teknis dilakukan berdasarkan IEEE Std 80 – 2000. Perhitungan untuk mendapatkan parameter-parameter teknis dan biaya dilakukan satu-per-satu dalam rentang jarak grid dan panjang ground rod tertentu untuk menentukan titik optimum menggunakan MATLAB-GUI sebagai alat pemrograman dan MATLAB R2011a sebagai alat komputasi matematika. Hasil Perhitungan dan analisis menyimpulkan bahwa jarak grid 23 m dan panjang ground rod 6 m adalah pilihan terbaik dalam disain optimalisasi sistem pembumian ini dengan memenuhi kriteria mutu keamanan untuk resistans pembumian adalah $R_g = 0,13806 \Omega$ kurang dari $0,5 \Omega$ dengan biaya minimal sebesar Rp. 1.220.104.730,-.

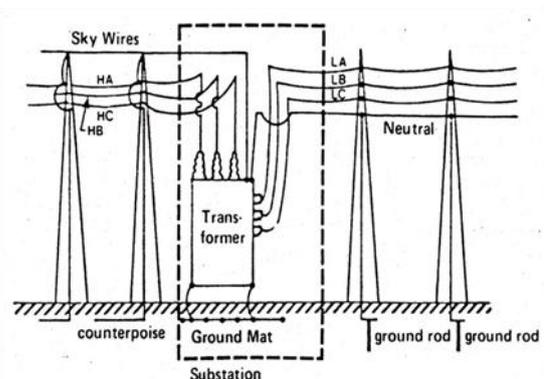
Kata kunci: sistem pembumian switchyard, grid, ground rod, mutu, dan biaya.

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Sistem pembumian menjadi salah satu faktor utama dalam mengamankan sistem tenaga listrik. Disain sistem pembumian switchyard merupakan suatu hal yang cukup kompleks Ada tiga hal pokok yang perlu dipertimbangkan, yaitu mutu, biaya, dan pengadaan.. Permasalahannya adalah meningkatnya mutu keamanan umumnya diikuti dengan kenaikan biaya yang harus dikeluarkan. Hal inilah yang mendasari adanya langkah optimalisasi untuk mendapatkan kombinasi mutu keamanan dan biaya yang paling efektif dan efisien. Selain itu, harus dipertimbangkan pula mengenai ketersediaan dan harga barang yang direkomendasikan dalam disain teknis tersebut. Studi ini menitik beratkan pada disain optimalisasi sistem pembumian switchyard ditinjau dari jarak konduktor grid dan panjang ground rod-nya. Kasus di lapangan, jarak grid dan panjang ground rod ditentukan secara langsung padahal bisa dilakukan optimalisasi dengan mengatur jarak grid dan panjang ground rod dengan mengikuti aturan bahwa resistans pembumian dikali arus grid maksimum lebih kecil dari tegangan sentuh toleransi

($R_g \cdot I_G < E_{(s_tol)}$), tegangan mesh lebih kecil atau sama dengan tegangan sentuh toleransi ($E_m \leq E_{(s_tol)}$) dan tegangan langkah sebenarnya lebih kecil atau sama dengan tegangan langkah toleransi ($E_l \leq E_{(l_tol)}$). Apabila tiga kondisi ini terpenuhi maka tujuan untuk mendapatkan disain optimalisasi jarak grid dan panjang ground rod pada sistem pembumian tercapai baik dari segi mutu maupun biaya.



Gbr 1.1 Ilustrasi Struktur Sistem Pembumian Tenaga Listrik

1.2 Pokok Permasalahan

Adapun pokok permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

- Berapa jarak *grid* dan panjang *ground rod* yang optimal pada sistem pembumian ?
- Berapa biaya kombinasi jarak *grid* dan panjang *ground rod* yang diperoleh dari hasil disain yang paling optimal ?

1.3 Batasan Masalah

Dalam penulisan tugas akhir ini penulis memberikan batasan masalah pada disain optimalisasi jarak *grid* dan panjang *ground rod* pada sistem pembumian *switchyard* studi kasus PLTU Adipala Cilacap 1 x 660 MW.

1.4 Metodologi Penelitian

Metode yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah dengan melakukan:

- Studi literatur dengan mempelajari buku referensi yang berkaitan dengan pembahasan tugas akhir;
- Studi lapangan (observasi), yaitu secara langsung mengamati sistem pembumian *switchyard* pembangkit;
- Studi wawancara (*interview*) terhadap pegawai lapangan dan operator pelaksana disekitar lokasi tersebut.

Macam-macam Elektroda Pembumian :

- Elektroda Pita,
- Elektroda Batang
- Elektroda pelat

Metode / Cara Pembumian

- Pembumian dengan *Driven Ground*.
- Pembumian dengan *Counterpoise*
- Pembumian dengan *Mesh* atau Jala

Tabel 1.1 Karakteristik Tanah

Jenis Tanah	Rata-rata Resistans Jenis Tanah ($\Omega \cdot m$)
Tanah Organik Basah	10^1
Tanah Lembab	10^2
Tanah Kering	10^3
Lapisan Tanah Keras	10^4

2 PEMBAHASAN SISTEM PEMBUMIAN

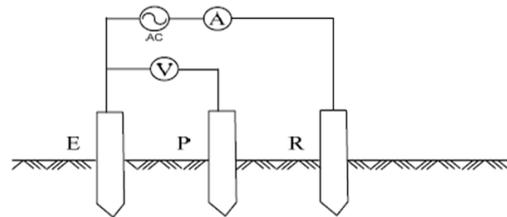
2.1 Sistem Pembumian Tenaga Listrik

2.1.1 Pengertian Sistem Pembumian

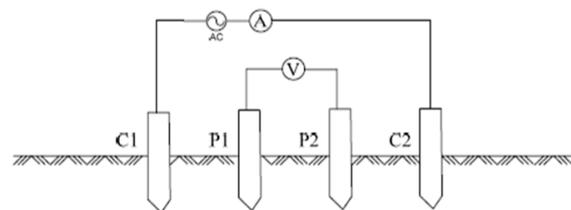
Sistem pembumian atau biasa disebut sebagai *grounding system* adalah sistem pengamanan terhadap perangkat-perangkat yang Berkaitan dengan resistans jenis tanah, resistans pembumian juga berpengaruh besar terhadap besar kecilnya resistans jenis tanah, semakin tinggi nilai resistans pembumian semakin tinggi pula resistans jenis tanah. Pengukuran resistans jenis tanah biasanya dilakukan dengan cara :

A. Pengukuran Resistansi Tanah

1. Metode Tiga Titik



2. Metode Empat Titik



B. Tingkat Keamanan pada Sistem Pembumian

Secara khusus, fungsi keamanan pada sistem pembumian dapat dikaitkan dengan tiga aspek yang saling terkait yaitu:

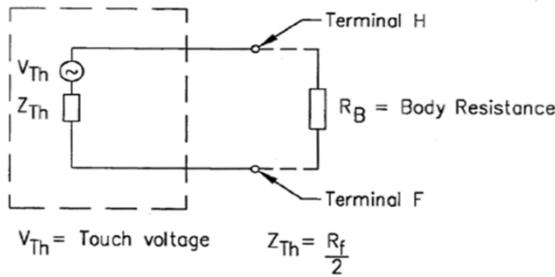
- Membatasi tegangan karena petir, garis gelombang, atau hubung pendek dengan jalur tegangan tinggi
- Menstabilkan tegangan
- Memberikan jalan untuk memfasilitasi pengoperasian perangkat arus lebih

Besar arus minimum agar tidak terjadi fibrilasi jantung adalah:

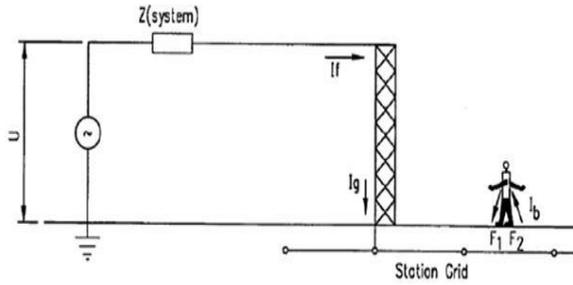
$$I_B = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (2.2)$$

dengan:

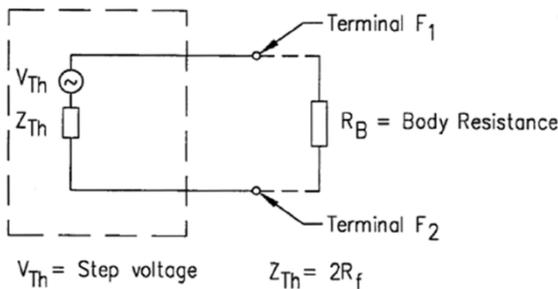
- I_b : arus ambang bahaya yg melalui tubuh (A)
 t : lama arus mengalir dalam tubuh (s)



Gbr 2.1 Rangkaian Tegangan Sentuh



Gambar 2.2 berfungsi sebagai bantuan visual dalam menampilkan rangkaian dari kaki ke kaki melalui seseorang

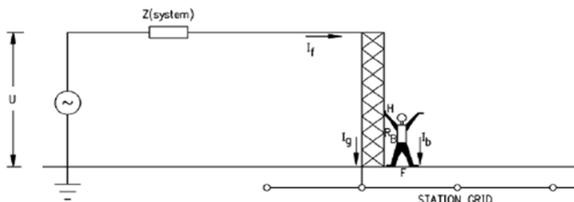


Gbr.2.3 Rangkaian Tegangan Langkah

rangkaian ekuivalen *Thevenin* untuk arus yang melalui tubuh, I_B , seseorang adalah:

$$I_B = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B}$$

Dan untuk rangkaian tegangan langkah:



Gbr.2.4 Paparan Tegangan Sentuh

dengan:
 V_{Th} :tegangan thevenin antara terminal H & F (V)
 Z_{Th} :impedansi thevenin dari titik H&F (Ω)
 R_B :Resistans tubuh
 Impedansi ekuivalen *Thevenin* untuk rangkaian tegangan sentuh adalah sebagai berikut:

$$Z_{Th} = \frac{R_f}{2}$$

Impedansi ekuivalen *Thevenin* untuk rangkaian tegangan langkah adalah sebagai berikut:

$$Z_{Th} = 2R_f$$

dengan:
 R_f : resistans tanah dari satu kaki (Ω)
 Dalam analisis rangkaian, kaki orang direpresentasikan sebagai *disklogam* dengan ke-resistans sepatu dan kaos kaki diabaikan.

Persamaan untuk menghitung R_f resistans tanah adalah:

$$R_f = \frac{\rho}{4b}$$

dengan:
 ρ : resistans jenis tanah ($\Omega.m$)
 B : Radius kaki sebagai disklogam (=0.08m)

Dengan demikian, persamaan untuk menghitung Z_{Th} menjadi berikut ini:

Untuk rangkaian tegangan sentuh:

$$Z_{Th} = 1,5\rho$$

$$Z_{Th} = 6\rho$$

Hubungan persamaan dengan tegangan sentuh dan tegangan langkah toleransi dirumuskan dengan persamaan di bawah ini:

Persamaan untuk menghitung tegangan sentuh toleransi adalah sebagai berikut:

$$E_{S_tol} = I_B(1000 + 1,5\rho_s \cdot C_s)$$

dengan:
 E_{S_tol} : tegangan sentuh toleransi (V)

I_B : arus fibrilasi (A)

C_s : faktor reduksi resistans jenis tanah

ρ_s : resistans jenis permukaan tanah ($\Omega.m$)

Sedangkan persamaan untuk menghitung tegangan langkah toleransi adalah sebagai berikut :

$$E_{l_{tol}} = I_B(1000 + 6\rho_s \cdot C_s)$$

dengan:

- $E_{l_{tol}}$: tegangan langkah toleransi (V)
- I_B : arus fibrilasi (A)
- C_s : faktor reduksi resistans jenis tanah
- ρ_s : resistans jenis permukaan tanah ($\Omega.m$)

3 OPTIMALISASI DISAIN PEMBUMIHAN

3.1 Pengertian

“Optimalisasi adalah hasil yang dicapai sesuai dengan keinginan, jadi optimalisasi merupakan pencapaian hasil sesuai harapan secara efektif dan efisien”.

Optimalisasi banyak juga diartikan sebagai ukuran dimana semua kebutuhan dapat dipenuhi dari kegiatan-kegiatan yang dilaksanakan.

3.2 Metode Optimalisasi

Sebuah metode optimalisasi adalah metode yang dilakukan secara analisis dengan membandingkan nilai dari lebih dari satu parameter pengukuran dengan biaya pemakaian untuk menentukan titik optimum. metode optimalisasi menggunakan MATLAB - GUI sebagai alat pemrograman dan MATLAB R2011a sebagai alat komputasi matematika berdasarkan ANSI / IEEE Std 80 – 2000.

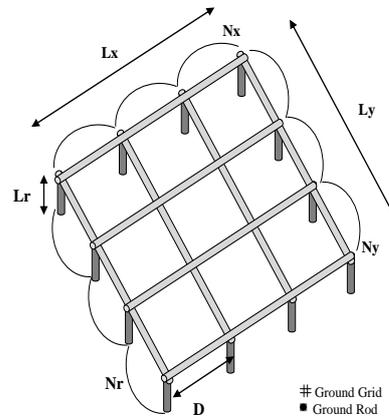
3.3 Metode Analisis

Dalam analisis kinerja program ini, setiap sistem pembumihan mengikuti dua cara:

- Analisis kinerja pembumihan dengan mengambil data panjang konduktor, parameter data sistem secara umum dan karakteristik tanah.
- Disain yang optimal dari beberapa sistem pembumihan *switchyard*.

Dalam kasus analisis kinerja sederhana, program meminta data yang terkait dengan panjang konduktor *grid*, jumlah *ground rod*, data mengenai *switchyard*, data yang umum terkait dengan sistem daya untuk kriteria keselamatan, ukuran konduktor dan bahan dan lain-lain.

3.4 Perumusan Masalah Optimalisasi



Gbr 3.1 Disain Lay Out Sistem Pembumihan

Dengan berpedoman pada Gambar (3.1) di atas, untuk mendapatkan disain yang optimal, dapat dilakukan dengan memenuhi fungsi biaya minimal berikut ini :

$$B(N_x, N_y, N_r, L_r) = (N_r \cdot L_r \cdot C_{ri}) + (N_r \cdot C_r) + (C_{ci} + C_c) \cdot ((N_x + 1) \cdot L_y + L_x \cdot (N_y + 1))$$

Dari fungsi biaya di atas, untuk mendapatkan fungsi biaya yang minimal dengan dipengaruhi oleh jarak *grid* maka persamaan (3.1) N_x , N_y dan N_r dirubah menjadi $N_x = \frac{L_x}{D}$, $N_y = \frac{L_y}{D}$ dan $N_r = 2 \left(\frac{L_y}{D} + \frac{L_x}{D} \right)$ dengan syarat jumlah *ground rod* yang terpasang penuh dipinggir *grid*. sehingga fungsi biaya tersebut dapat dituliskan menjadi:

$$B(D, D, D, L_r) = \left(2 \left(\frac{L_y}{D} + \frac{L_x}{D} \right) \cdot L_r \cdot C_{ri} \right) + \left(2 \left(\frac{L_y}{D} + \frac{L_x}{D} \right) \cdot C_r \right) + (C_{ci} + C_c) \cdot \left(\left(\frac{L_x}{D} + 1 \right) \cdot L_y + L_x \cdot \left(\frac{L_y}{D} + 1 \right) \right)$$

Persamaan (3.2) di atas dapat juga disederhanakan menjadi persamaan berikut:

$$B(D, L_r) = \left(2 \left(\frac{L_y + L_x}{D} \right) \cdot L_r \cdot C_{ri} \right) + \left(2 \left(\frac{L_y + L_x}{D} \right) \cdot C_r \right) + (C_{ci} + C_c) \cdot \left(\left(\frac{L_x \cdot L_y}{D} + L_y \right) + \left(\frac{L_y \cdot L_x}{D} + L_x \right) \right)$$

Dengan :

- N_r : jumlah *ground rod*
- N_x : jumlah konduktor *grid* arah X
- N_y : jumlah konduktor *grid* arah Y
- L_r : panjang tiap *ground rod* (m)
- C_{ri} : biaya instalasi *ground rod* (Rp/m)
- C_r : biaya material konduktor rod (Rp/rod)
- L_c : panjang konduktor *grid* (m)
- C_{ci} : biaya instalasi konduktor *grid* (Rp/m)
- C_c : biaya material konduktor *grid* (Rp/m)
- L_x : panjang konduktor arah X (m)
- L_y : panjang konduktor arah Y (m)
- D : jarak konduktor *grid* (m)

Dengan demikian, banyaknya jumlah konduktor, jumlah rod maupun jumlah biaya dipengaruhi oleh jarak *grid* dan panjang *ground rod*.

Adapun rencana anggaran biaya instalasi untuk membuat disain sistem pembumian (*mesh*), dijabarkan dalam berikut :

Tabel 3.1 Rencana Anggaran Biaya Instalasi Disain Sistem Pembumian (*Mesh*)

No	Jenis Pekerjaan	Satuan	Jumlah (Rp)
Biaya Instalasi Konduktor Grid			
1	Pengukuran dan Pemasangan Bouwplank	m'	Rp111.915
2	Galian Tanah Lumpur (dalam 1 m)	m3	Rp56.475,-
3	Pemasangan Kawat Mesh	OH	Rp19.420,-
4	Urugan Pasir (lapisan atas mesh)	m3	Rp132.550,-
5	Pembersihan Lapangan dan Perataan	m2	Rp7.250,-

Total Biaya Instalasi Konduktor Grid			Rp327.610,-
Biaya Instalasi Ground Rod			
1	Galian Tanah Biasa (dalam 3 m)	m3	Rp50.935,-
2	Pemasangan Rod (disamakan dengan pemasangan besi profil)	OH	Rp6.855,-
3	Urugan Kembali (1/3 galian tanah)	m3	Rp18.825,-
Total Biaya Instalasi Ground Rod			Rp76.615,-

Pembatas kriteria mutu keamanan sistem pembumian yang diberikan sesuai dengan IEEE Std 80-2000 sebagai berikut:

$$E_m \leq E_{s_tol}$$

$$E_l \leq E_{l_tol}$$

Pembatas keamanan yang lainnya seperti ditunjukkan pada persamaan (3.6) dan (3.7) di bawah ini diperoleh dari bentuk dan panjang konduktor *grid*.

$$0 \leq D \leq L_x$$

$$0 \leq D \leq L_y$$

3.5 Penentuan Ukuran Konduktor

Hubungan arus gangguan dengan luas penampang konduktor sebagai berikut in:

$$A_c = I \sqrt{\frac{\left[\frac{t_c \alpha_r \rho_r 10^4}{TCAP} \right]}{\ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_o + T_a} \right) \right]}}$$

dengan:

A_c : luas penampang konduktor (mm²)

I : arus gangguan (kA)

t_c : lama arus gangguan mengalir (s)

α_r : koefisien panas dari resistans jenis pada temperatur referensi (20⁰C)

ρ_r : resistans jenis dari konduktor pembumian pada temperatur referensi (20⁰C)

TC : kapasitas panas (J/(cm³.°C))

AP

T_m : temperatur maksimum yang diizinkan (°C)

- T_a : temperatur sekitar ($^{\circ}\text{C}$)
- K_o : sama dengan $1/\alpha_o$ pada 0°C

Besar waktu t_c ditentukan berdasarkan waktu kerja pemutus gangguan. Nilai-nilai umum dari α_r , K_o , T_m , ρ_r , dan nilai $TCAP$

3.6 Perhitungan Tegangan Langkah dan Tegangan Sentuh Toleransi

Untuk menghitung Tegangan Langkah dan Tegangan Sentuh Toleransi dapat menggunakan persamaan :

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09}$$

dengan:

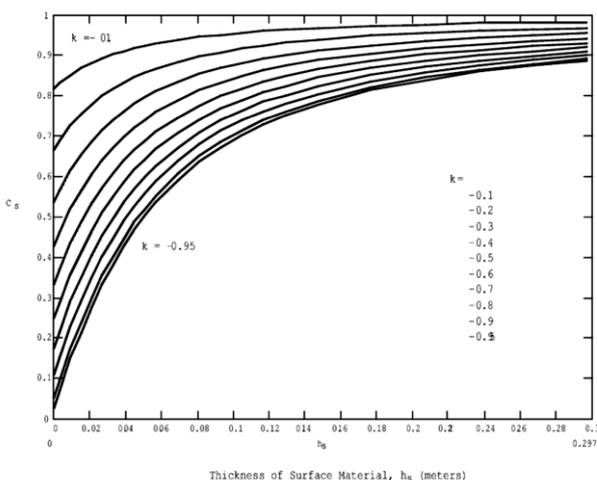
- h_s : kedalaman lapisan permukaan tanah (m)
- ρ : resistans jenis tanah ($\Omega \cdot \text{m}$)

Faktor refleksi dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$

dengan:

- K : faktor refleksi
- ρ_s : resistans jenis permukaan tanah ($\Omega \cdot \text{m}$)
- ρ : resistans jenis tanah ($\Omega \cdot \text{m}$)



Gbr.3.2 Faktor reduksi C_s sebagai fungsi faktor refleksi K & kedalaman h_s

Sebagai pendekatan pertama, nilai minimum dari resistans sistem gardu induk dalam tanah seragam dengan menggunakan pelat logam melingkar di kedalaman nol dapat diperkirakan dengan persamaan berikut ini :

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}}$$

Panjang total konduktor *grid* dapat juga dihitung dengan dengan:

R_g : resistans pembumian (Ω)

ρ : resistans jenis tanah ($\Omega \cdot \text{m}$)

A : luas area yang digunakan oleh pembumian *grid* (m^2)

Persamaan ini memberikan batas atas dari resistans pembumian sehingga menjadi berikut ini:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T}$$

dengan:

L_T : panjang total penanaman konduktor (m)

untuk memperhitungkan efek kedalaman *grid* menjadi persamaan berikut:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

Panjang total penanaman konduktor adalah penjumlahan dari konduktor horizontal (*grid*) dan konduktor vertical (*rod*) dengan persamaan sebagai berikut:

$$L_T = L_C + L_R$$

dengan:

L_C : panjang total konduktor *grid* (m)

L_R : panjang total konduktor *rod* (m)

mengatahui jumlah konduktor *grid* dan panjang konduktor *grid* arah penanaman *grid*, sesuai persamaan berikut:

$$L_C = (N_y + 1) \cdot L_x + (N_x + 1) \cdot L_y$$

Dari persamaan (3.15) di atas, untuk memperoleh panjang konduktor yang dipengaruhi oleh jarak *grid* maka jumlah konduktor N_x dan N_y menjadi $N_x = \frac{L_x}{D}$ dan $N_y = \frac{L_y}{D}$ sehingga persamaan di atas menjadi persamaan berikut:

$$L_C = \left(\left(\frac{L_y}{D} + 1 \right) L_x \right) + \left(\left(\frac{L_x}{D} + 1 \right) L_y \right)$$

dengan:

- N_y : jumlah konduktor *grid* arah Y
- N_x : jumlah konduktor *grid* arah X
- L_y : panjang konduktor *grid* arah Y (m)
- L_x : panjang konduktor *grid* arah X (m)
- D : jarak konduktor *grid* (m)

Untuk panjang total konduktor rod

$$L_R = N_r \cdot L_r$$

Sedangkan untuk persamaan (3.17) di atas, untuk memperoleh panjang *ground rod* yang dipengaruhi oleh jarak *grid* maka jumlah konduktor N_r menjadi $N_r = 2 \left(\frac{L_y}{D} + \frac{L_x}{D} \right)$ dengan syarat jumlah rod penuh dipinggir *grid*, sehingga dapat dituliskan persamaan berikut:

$$L_R = 2 \left(\frac{L_y}{D} + \frac{L_x}{D} \right) \cdot L_r$$

dengan:

- N_r : jumlah konduktor *rod*
- L_r : panjang konduktor *rod* (m)
- D : jarak konduktor *grid* (m)

Diameter dari konduktor *grid*, d dihitung dengan persamaan berikut:

3.7 Penentuan Tegangan Langkah dan Tegangan Sentuh Sebenarnya

Tegangan *mesh* adalah sebuah bentuk dari tegangan sentuh. Tegangan *mesh* mewakili tegangan sentuh tertinggi yang mungkin ditemui dalam sistem pembumian *switchyard*. Tegangan *mesh* adalah dasar untuk mendisain sebuah sistem pembumian yang aman, baik di dalam *switchyard* maupun diluar.

Tegangan *mesh* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

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

dengan:

- ρ : resistans jenis tanah ($\Omega \cdot m$)

K_m : faktor ruang untuk menghitung tegangan *mesh*

K_i : faktor koreksi geometri *grid*

L_M : panjang penanaman efektif (m)

Faktor ruang untuk menghitung tegangan *mesh* (K_m) menggunakan persamaan berikut:

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

dengan:

D : jarak antara konduktor paralel (m)

D : diameter dari konduktor *grid* (m)

h : kedalaman dari konduktor *grid* yang ditanam (m)

K_{ii} : faktor bobot korektif menyesuaikan dengan dampak dari konduktor bagian dalam di sudut *mesh*

K_h : faktor bobot korektif menyesuaikan dengan dampak dari kedalaman *grid*

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_C}{\pi}}$$

sedangkan Faktor bobot korektif, K_h dihitung dengan persamaan berikut :

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

dengan:

h_o : acuan kedalaman elektroda pembumian *grid* ($h_o = 1$)

Untuk *grid* dengan *ground rod* sepanjang *perimeter* dan seluruh *grid*, serta di sudut-sudut,

$$K_{ii} = 1$$

Untuk *grid* tanpa *ground rod* atau beberapa *ground rod*, tidak terletak di sudut atau di *perimeter*, faktor bobot korektif, K_{ii} dihitung dengan persamaan berikut:

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

Apabila persamaan (3.35), (3.36) dan (3.37) menggunakan bentuk *grid* selain bentuk *grid* persegi, persegi panjang, dan bentuk L maka faktor geometrik n_b , n_c , dan n_d dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}}$$

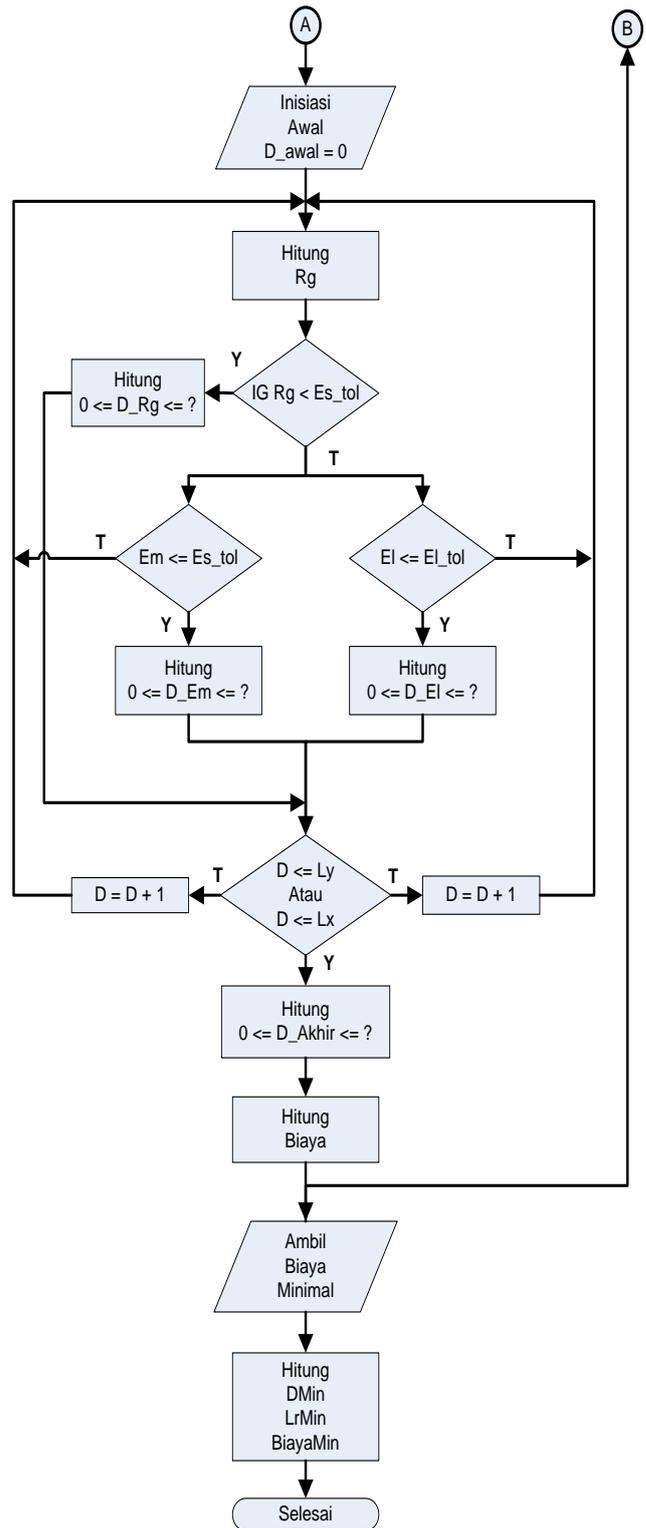
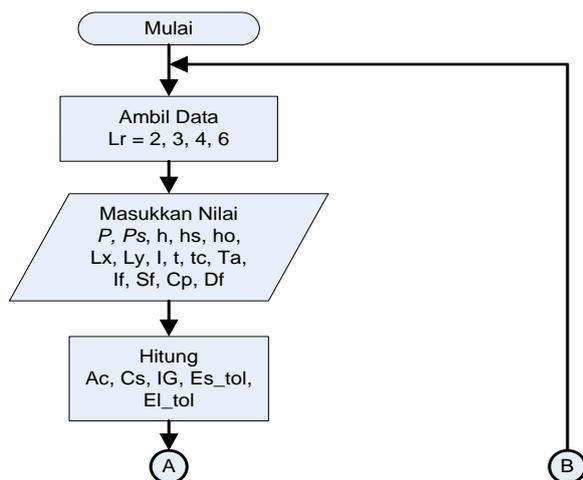
$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{0,7 \cdot A}_{L_x \cdot L_y}$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}$$

4 PERHITUNGAN DAN ANALISIS

4.1 Implementasi Program Optimalisasi

Berdasarkan persamaan-persamaan yang telah dibahas pada persoalan optimalisasi sistem pembumian BAB III untuk mendapatkan penyelesaian permasalahan tersebut dapat menggunakan program optimalisasi dengan diagram alir. Program optimalisasi mengikuti pedoman standar IEEE Std 80-2000 untuk mendisain sistem pembumian dan juga mempertimbangkan kendala keamanan untuk membuat disain yang optimal. Program optimalisasi diterapkan mengikuti kebutuhan pengguna dan persyaratan khusus di lapangan, dengan cara memvariasikan jarak konduktor *grid* dan panjang *ground rod* untuk daerah *grid* tetap dan kedalaman penanaman *grid* tetap.



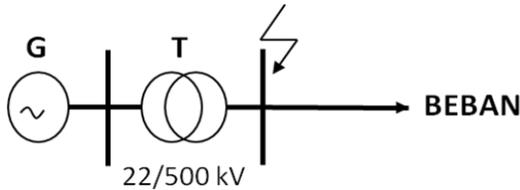
Gbr.4.1 Diagram Alir Program Optimalisasi Jarak *Grid* dan *Ground rod*

4.2 Data-data Parameter Awal

Disain optimalisasi sistem pembumian ini didasarkan pada pengaruh jarak *grid* dan panjang *ground rod* dalam mencari nilai optimal sistem pembumian dilihat dari segi keamanan dan total biaya yang harus dikeluarkan.

Data-data yang perlu dimasukan dalam menentukan disain optimalisasi sistem pembumian diperoleh dari IEEE Std 80-2000 dan Data PLTU Adipala Cilacap dengan Tegangan Sentuh Toleransi sebesar 240 V yang tertuang dalam dokumen kontrak

Pada studi kasus ini data yang digunakan adalah generator 777,8 MVA $X''_d = 21,4\%$, trafo 800 MVA tegangan 22/500 kV, $X_t = 16,19\%$, maka nilai I_f dari gangguan sisi tegangan 500 kV adalah sebagai berikut:



Gbr.4.2 Single Line Diagram Switchyard 500 kV

Untuk impedans hubung singkat dari trafo diperoleh :

$$Z_t = \frac{X_t \cdot U_N^2}{100\% \cdot S_N} = \frac{16,19\% \cdot 500^2}{100\% \cdot 800} = 50,59 \Omega/\text{fasa}$$

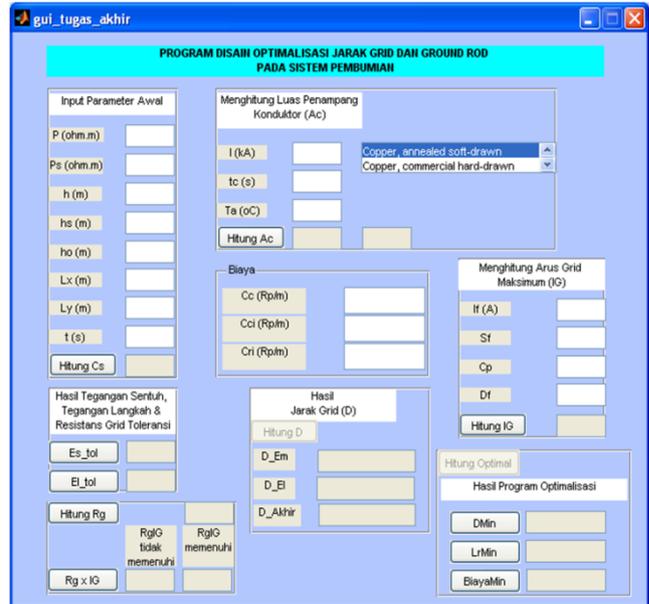
Dari hasil perhitungan di atas didapat $Z_s \leq 0,05 Z_t$, Maka arus gangguan hubung singkat simetris

$$I_f = \frac{U}{(Z_t)\sqrt{3}} = \frac{500}{(50,59)\sqrt{3}} = 5,7 \text{ KA}$$

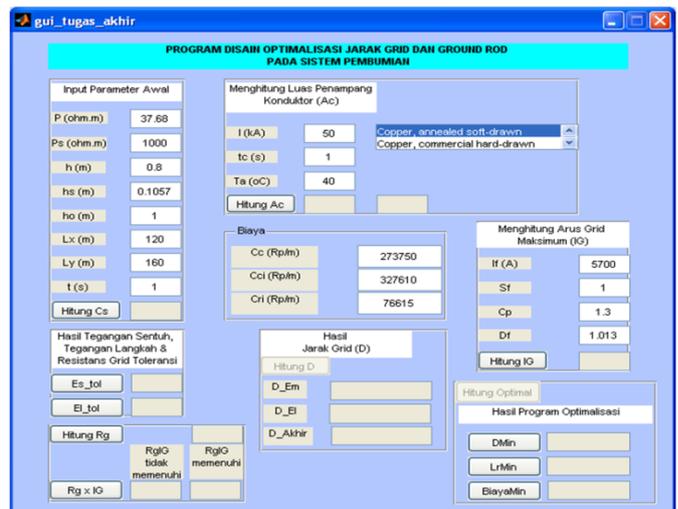
4.3 Menjalankan Program dan Analisis

Untuk menjalankan program, maka data parameter awal akan dijadikan sebagai masukan dalam analisis optimalisasi sistem pembumian pada program Matlab

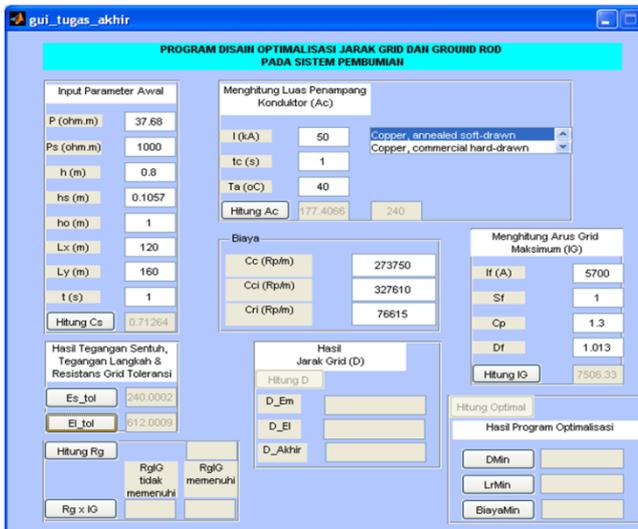
Penggunaan Matlab dilakukan dengan menekan dua kali gambar yang bertuliskan "gui_tugas_akhir.fig" pada folder Tugas Akhir, kemudian pilih GUIDE pada menu toolbars setelah itu pilih open existing GUI, pilih alamat penyimpanan program optimalisasi (misalnya: E:\FTUMJ\TUGAS_AKHIR\gui_tugas_akhir.fig) kemudian tekan OK. Sebelum program membaca data masukan, terlebih dahulu program membaca panjang ground rod yang sudah terlebih dahulu dimasukan dalam program Matlab.



Gbr.4.2 Tampilan Awal Program Disain Optimalisasi

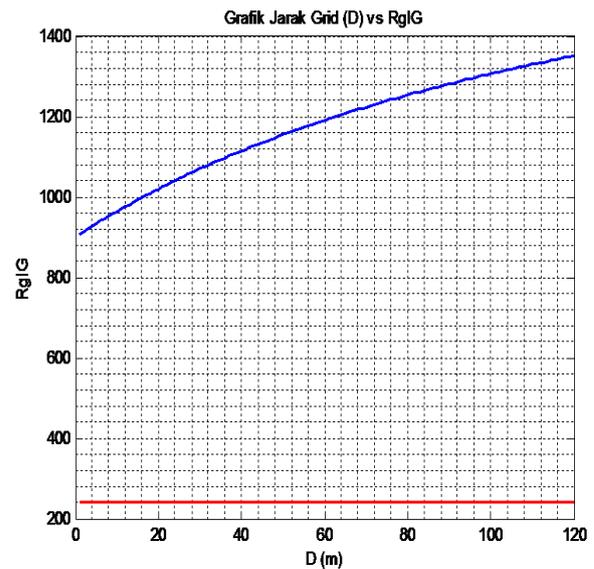


Gbr.4.3 Tampilan Program Masukan Parameter Awal

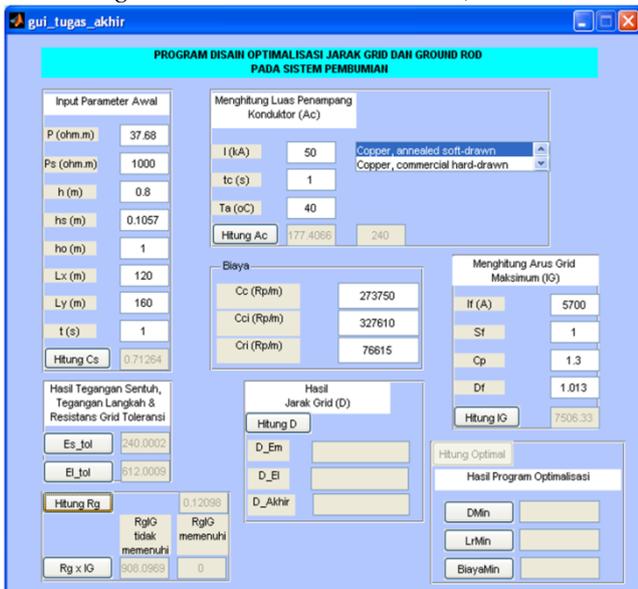


Gbr.4.4 Tampilan Program Hasil Perhitungan Parameter Awal

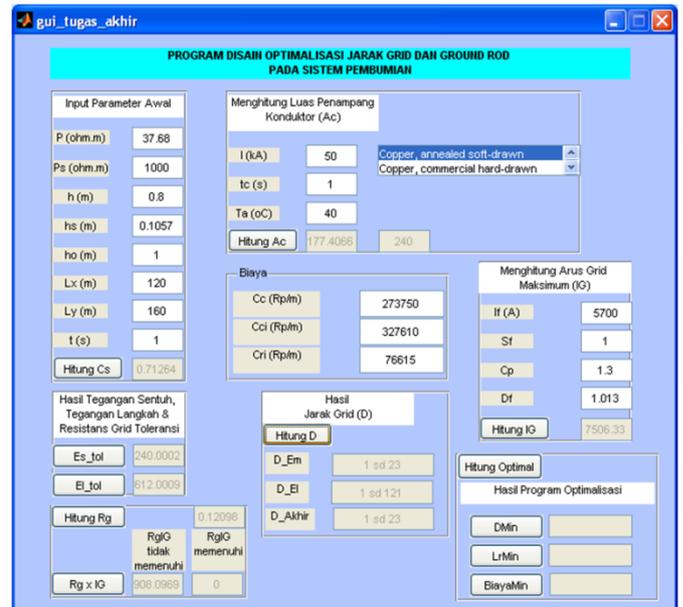
Pada di atas konduktor yang digunakan dalam disain sistem pembumihan ini adalah *Copper, annealed soft-drawn*, diperoleh hasil perhitungan ukuran konduktor *grid* 177,4066 mm², maka digunakan konduktor dengan luas penampang 240 mm². didapat nilai faktor reduksi (C_s) sama dengan 0,71264 yang digunakan untuk menghitung tegangan sentuh dan tegangan langkah toleransi. Nilai tegangan sentuh toleransi sebesar 240,0002 V dan tegangan langkah toleransi sebesar 612,0009 V. Sedangkan untuk arus *grid* maksimum dengan nilai rms arus gangguan sebesar 5,7 kA diperoleh nilai arus *grid* maksimum sebesar 7506,33 A.



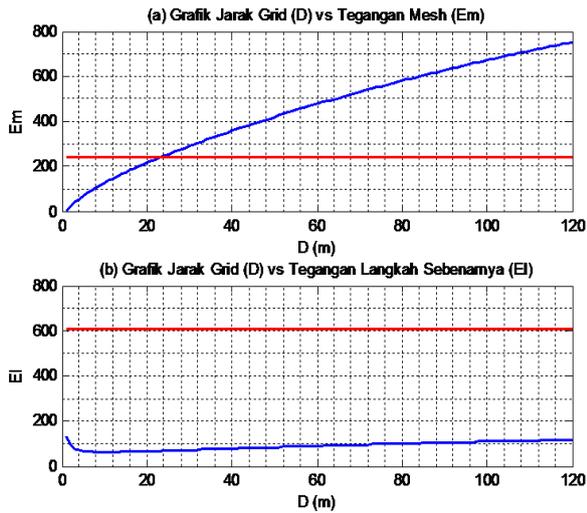
Gbr. 4.5 Grafik Jarak Grid (D) Terhadap RgIG



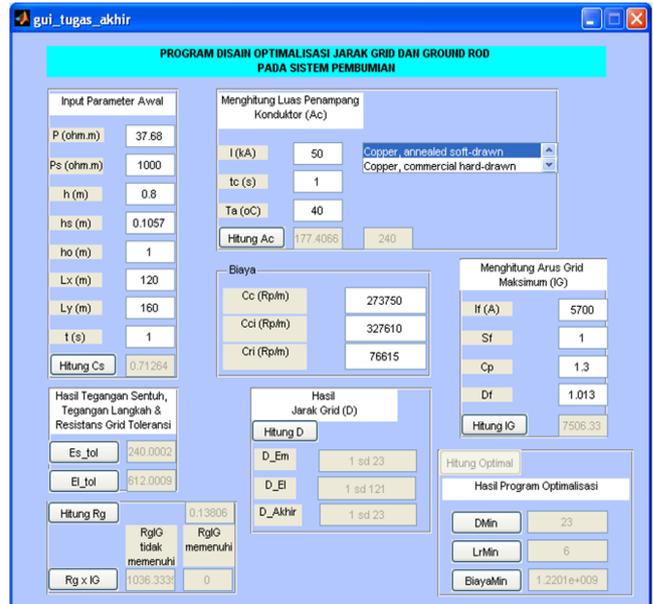
Gbr 4.4 Tampilan Program Perhitungan Optimalisasi Sistem Pembumihan



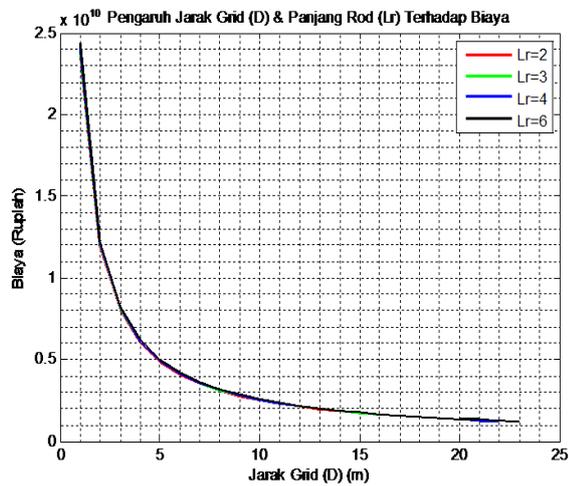
Gbr 4.6 Tampilan Program Hasil Rentang Jarak Grid



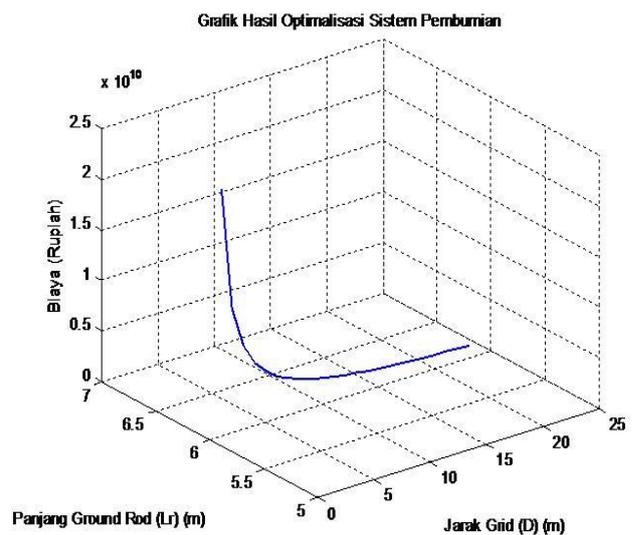
Gbr. 4.7 (a) Pengaruh Jarak Grid terhadap Em, (b) Pengaruh Jarak Grid terhadap EI



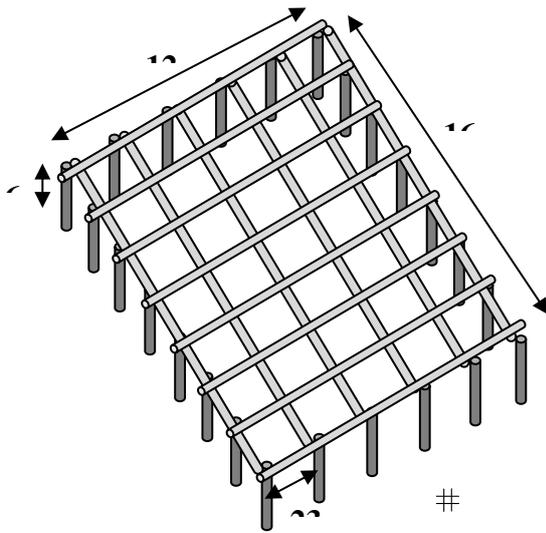
Gbr.4.9 Tampilan Program Hasil Optimalisasi



Gbr.4.8 Grafik Pengaruh Panjang Ground rod terhadap jarak grid dan biaya



Gbr 4.10 Grafik Hasil Program Optimalisasi Sistem Pembunian



Gambar 4.1 Lay Out Grid Hasil Optimalisasi

5 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil program optimalisasi menggunakan Matlab GUI dan Matlab R2011a studi kasus di Switchyard 500 kV PLTU Adipala (PLTU 2 Jawa Tengah) 1 x 660 MW Cilacap maka dapat diambil kesimpulan, sebagai berikut:

1. Jarak grid 23 m dan Panjang Ground rod 6 m memberikan hasil disain sistem pembumian paling optimal, dengan mutu keamanan untuk Resistans Pembumian (R_g) sebesar $0,13806\Omega$ lebih kecil dari batas maksimum Resistans Pembumian sebesar $0,5 \Omega$ (IEC 60694) dan nilai tegangan mesh lebih kecil dari tegangan sentuh toleransi ($E_m = 239,1854 V < E_{s_tol} = 240,0002 V$) serta tegangan langkah toleransi lebih **Rp.1.220.104.730,-**.
2. kecil dari tegangan langkah sebenarnya ($E_l = 67,6394 V < E_{l_tol} = 612,0009 V$).
3. Biaya kombinasi jarak konduktor grid dan panjang ground rod yang diperoleh dari hasil disain yang paling optimal : **Rp. 1.220.104.730,-**

DAFTAR PUSTAKA

- [1] PT PLN (Persero) dan CNTIC Consortium, “Contract Document: The Coal Fired Steam Power Plant Project 600-700 MW Class PLTU 2 Jawa Tengah (1 x 600-700 MW)”, Adipala, Cilacap.
- [2] International Electrotechnical Commission, IEC 60694: Common Specifications for High-Voltage Switchgear and Controlgear Standards, Amendment 2, Switzerland, 2001.
- [3] Institute of Electrical and Electronics Engineers, ANSI/IEEE Std. 80 – 2000: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Society, New York, 2000.
- [4] Feasibility Study of PLTU Adipala (PLTU 2 Jawa Tengah) 1 x (600-700 MW) Chapter 3: Electrical Power System Study”, Wiratman & Associates.
- [5] SPLN 8-5 Tahun 1991; Transformator Tenaga Bagian 5: Kemampuan Menahan Hubung Singkat; Departemen Pertambangan dan Energi Perusahaan Umum Listrik Negara; Tahun 1991.
- [6] Buku Ketenagalistrikan Indonesia (ZUHAL) Penerbit PT. GANECA PRIMA
- [7] Djiteng Marsudi, “Operasi Sistem Tenaga Listrik”, Penerbit PT. GRAHA ILMU
- [7] “Analisis Jaringan Listrik”, Edisi 3,

Tabel 4.5 Hasil Program Optimalisasi Jarak Grid dan Ground Rod pada Sistem Pembumian dengan Panjang Ground Rod (Lr) 6 m

Jarak Grid (D)	Panjang Ground Rod (Lr)	Ex_tol	El_tol	Rg	ICRg	ICRg-Ex_tol	Em	Em-Ex_tol	EI	El-EI_tol	Biaya
1	6	240,0002	612,0009	0,13806251	988,0960116	Tidak Memenuhi	3,1809760	Memenuhi	130,6405340	Memenuhi	Rp. 24.338.031.200
2	6	240,0002	612,0009	0,121861912	914,3357282	Tidak Memenuhi	23,06284564	Memenuhi	91,51578579	Memenuhi	Rp. 12.203.206.000
3	6	240,0002	612,0009	0,122734715	921,287274	Tidak Memenuhi	40,73408417	Memenuhi	77,6327869	Memenuhi	Rp. 8.231.597.600
4	6	240,0002	612,0009	0,123596119	927,5333855	Tidak Memenuhi	56,8882949	Memenuhi	70,78770165	Memenuhi	Rp. 6.215.975.400
5	6	240,0002	612,0009	0,12446347	934,1333477	Tidak Memenuhi	70,82931347	Memenuhi	66,9275165	Memenuhi	Rp. 5.006.310.880
6	6	240,0002	612,0009	0,125285814	940,451619	Tidak Memenuhi	83,8218278	Memenuhi	64,62859565	Memenuhi	Rp. 4.199.989.200
7	6	240,0002	612,0009	0,126108158	946,769891	Tidak Memenuhi	94,6523575	Memenuhi	62,4004321	Memenuhi	Rp. 3.615.355.200
8	6	240,0002	612,0009	0,12693103	952,9942532	Tidak Memenuhi	107,1580718	Memenuhi	62,41004321	Memenuhi	Rp. 3.102.085.100
9	6	240,0002	612,0009	0,127753731	958,856517	Tidak Memenuhi	117,8687506	Memenuhi	61,97314512	Memenuhi	Rp. 2.856.119.733
10	6	240,0002	612,0009	0,12857708	964,427031	Tidak Memenuhi	128,1042032	Memenuhi	61,80579437	Memenuhi	Rp. 2.387.343.840
11	6	240,0002	612,0009	0,129324727	970,7540745	Tidak Memenuhi	137,9174946	Memenuhi	61,83312876	Memenuhi	Rp. 2.387.439.927
12	6	240,0002	612,0009	0,130102471	976,9290779	Tidak Memenuhi	147,4614673	Memenuhi	62,00456247	Memenuhi	Rp. 2.184.185.000
13	6	240,0002	612,0009	0,130876541	982,5887979	Tidak Memenuhi	156,69303	Memenuhi	62,28468603	Memenuhi	Rp. 2.029.171.38
14	6	240,0002	612,0009	0,131650611	988,2485179	Tidak Memenuhi	165,624565	Memenuhi	62,5648096	Memenuhi	Rp. 1.881.024.160
15	6	240,0002	612,0009	0,132424681	993,9292889	Tidak Memenuhi	174,4616269	Memenuhi	63,07567581	Memenuhi	Rp. 1.680.233.950
16	6	240,0002	612,0009	0,133198751	999,3276068	Tidak Memenuhi	183,050076	Memenuhi	63,55395238	Memenuhi	Rp. 1.680.233.950
17	6	240,0002	612,0009	0,133870755	1004,727941	Tidak Memenuhi	191,4694291	Memenuhi	64,07094142	Memenuhi	Rp. 1.391.301.412
18	6	240,0002	612,0009	0,134542759	1010,153113	Tidak Memenuhi	199,781546	Memenuhi	64,61935141	Memenuhi	Rp. 1.312.250.267
19	6	240,0002	612,0009	0,135214763	1020,811059	Tidak Memenuhi	207,8637166	Memenuhi	65,19226444	Memenuhi	Rp. 1.441.520.295
20	6	240,0002	612,0009	0,135886767	1031,818005	Tidak Memenuhi	215,3834781	Memenuhi	65,7848578	Memenuhi	Rp. 1.377.863.320
21	6	240,0002	612,0009	0,136558771	1042,825051	Tidak Memenuhi	222,8032396	Memenuhi	66,3764012	Memenuhi	Rp. 1.312.250.267
22	6	240,0002	612,0009	0,137230775	1053,832097	Tidak Memenuhi	230,3230011	Memenuhi	67,0110742	Memenuhi	Rp. 1.267.910.364
23	6	240,0002	612,0009	0,137902779	1064,839143	Tidak Memenuhi	239,1854077	Memenuhi	67,6393334	Memenuhi	Rp. 1.220.104.730
24	6	240,0002	612,0009	0,138574783	1075,846189	Tidak Memenuhi	246,757345	Tidak Memenuhi	68,27460747	Memenuhi	Rp. -
25	6	240,0002	612,0009	0,139246787	1086,853235	Tidak Memenuhi	254,2787865	Tidak Memenuhi	68,91190261	Memenuhi	Rp. -
26	6	240,0002	612,0009	0,140008355	1097,860281	Tidak Memenuhi	261,6315246	Tidak Memenuhi	69,5387781	Memenuhi	Rp. -
27	6	240,0002	612,0009	0,140769923	1108,867327	Tidak Memenuhi	269,0842627	Tidak Memenuhi	70,1656597	Memenuhi	Rp. -
28	6	240,0002	612,0009	0,141531491	1119,874373	Tidak Memenuhi	276,5370048	Tidak Memenuhi	70,7925413	Memenuhi	Rp. -
29	6	240,0002	612,0009	0,142293059	1130,881419	Tidak Memenuhi	283,9897469	Tidak Memenuhi	71,4194229	Memenuhi	Rp. -
30	6	240,0002	612,0009	0,143054627	1141,888465	Tidak Memenuhi	291,442489	Tidak Memenuhi	72,0463045	Memenuhi	Rp. -
31	6	240,0002	612,0009	0,143816195	1152,895511	Tidak Memenuhi	297,4275706	Tidak Memenuhi	72,6731861	Memenuhi	Rp. -
32	6	240,0002	612,0009	0,144577763	1163,902557	Tidak Memenuhi	304,3730021	Tidak Memenuhi	73,3000677	Memenuhi	Rp. -
33	6	240,0002	612,0009	0,145339331	1174,909603	Tidak Memenuhi	311,3179751	Tidak Memenuhi	73,9269493	Memenuhi	Rp. -
34	6	240,0002	612,0009	0,146100899	1185,916649	Tidak Memenuhi	318,2629081	Tidak Memenuhi	74,5538309	Memenuhi	Rp. -
35	6	240,0002	612,0009	0,146862467	1196,923695	Tidak Memenuhi	325,2078311	Tidak Memenuhi	75,1807125	Memenuhi	Rp. -
36	6	240,0002	612,0009	0,147624035	1207,930741	Tidak Memenuhi	332,1527541	Tidak Memenuhi	75,8075941	Memenuhi	Rp. -
37	6	240,0002	612,0009	0,148385603	1218,937787	Tidak Memenuhi	339,0976771	Tidak Memenuhi	76,4344757	Memenuhi	Rp. -
38	6	240,0002	612,0009	0,149147171	1229,944833	Tidak Memenuhi	346,0426001	Tidak Memenuhi	77,0613573	Memenuhi	Rp. -

- [8] SPLN 8-5 Tahun 1991; Transformator Tenaga Bagian 5: Kemampuan Menahan Hubung Singkat; Departemen Pertambangan dan Energi Perusahaan Umum Listrik Negara; Tahun 1991