

Makalah Seminar Tugas Akhir

OPTIMASI PENEMPATAN KAPASITOR MENGGUNAKAN ALGORITMA GENETIKA PADA SISTEM DISTRIBUSI UNTUK MEMPERBAIKI FAKTOR DAYA DAN TEGANGAN

Hadha Alamajibuwono¹, Tedjo Sukmadi², Susatyo Handoko²
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

Abstract

Load growth in distribution system increase steadily. This load growth is followed by increased demand for reactive power supply due to increasing load is inductive. If a network does not have a reactive power source in around load area then all the needs of reactive load borne by the generator so that reactive current will flow to the network resulting in decreased power factor, voltage drop, and power losses. One way to improve power factor and voltage is placing the optimal capacitor value in the right location and strategic.

In this final project, the optimal capacitor placement is using genetic algorithm. Genetic algorithm is one of the computational techniques that match with very large solution space. Parameters used for the objective function in genetic algorithms is the cost of capacitor installation, the purchase cost of the capacitor, the cost of capacitor operation and maintenance, and the cost of power losses in the distribution system. By minimizing this parameters, it will get the minimum cost in the optimal capacitor values placement and meet the limits of the voltage magnitude and power factor that are determined.

Test results showed that the capacitor placement optimization using genetic algorithm can find the optimal size of capacitor banks so that the power factor and voltage on each bus has met limits that have been determined after the placement of the capacitor ($V_{min} = 0.95$, $V_{max} = 1.05$, and $PF_{min} = 0.85$). In testing the voltage improvement, the location of optimal capacitor placement is bus 18 and bus 30 with the number of capacitors that are installed 1200 kVar (4 banks) and saving 47.296,970 \$. In testing the power factor improvement, the location of optimal capacitor placement is bus 4, bus 11, bus 13, bus 17, bus 30 and bus 33 with the number of capacitors that are installed 2100 kVar (7 banks) and saving 19.859,439 \$. In testing the power factor and voltage improvement, the location of optimal capacitor placement is bus 4, bus 11, bus 13, bus 17, bus 30 and bus 33 with the number of capacitors that are installed 2100 kVar (7 banks) and saving 19.859,444 \$.

Keyword : capacitor, genetic algorithm, power factor, and voltage

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan beban pada sistem distribusi semakin meningkat terus - menerus. Pertumbuhan beban ini diikuti dengan peningkatan permintaan suplai daya reaktif akibat beban yang bersifat induktif meningkat. Jika suatu jaringan tidak memiliki sumber daya reaktif di daerah sekitar beban maka semua kebutuhan beban reaktifnya dipikul oleh generator sehingga akan mengalir arus reaktif pada jaringan yang mengakibatkan faktor daya menurun, drop tegangan, dan rugi – rugi daya besar. Salah satu cara untuk memperbaiki faktor daya dan tegangan adalah dengan menempatkan nilai kapasitor yang optimal di lokasi yang tepat pada sistem distribusi. Kapasitor dipasang di lokasi strategis dan tepat untuk memperbaiki faktor daya dan untuk mempertahankan tegangan dalam batas diijinkan sehingga rugi – rugi daya dapat dikurangi.

Pada penelitian terdahulu, banyak metode yang telah dikembangkan untuk menyelesaikan masalah optimasi penempatan kapasitor antara lain menggunakan logika fuzzy, algoritma genetika [1,3,10,18], dan kombinasi logika fuzzy – algoritma genetika [6,7,17]. Masing – masing metode memiliki keuntungan dan kelebihan masing – masing sehingga belum tentu metode satu lebih baik dari metode yang lainnya. Bahkan dalam satu metode terdapat berbagai macam cara penyelesaian yang berbeda pula

tergantung parameter – parameter yang digunakan untuk menyelesaikan.

Pada Tugas Akhir ini, optimasi penempatan kapasitor dilakukan dengan menggunakan algoritma genetika. Algoritma genetika merupakan salah satu teknik komputasi yang sesuai dengan ruang solusi yang sangat besar. Parameter- parameter yang digunakan untuk fungsi objektif pada algoritma genetika adalah biaya pemasangan kapasitor, biaya pembelian kapasitor, biaya operasi dan pemeliharaan kapasitor serta biaya rugi – rugi daya pada sistem distribusi. Dengan meminimumkan parameter – parameter tersebut maka akan didapatkan biaya minimum dalam penempatan nilai kapasitor yang optimal dan memenuhi batas – batas tegangan dan faktor daya yang ditentukan. Untuk memudahkan analisa maka dibuat program hitung menggunakan *software* Matlab karena Matlab menyediakan banyak fungsi dasar untuk operasi matriks agar dapat mengimplementasikan komponen – komponen algoritma genetika yang menggunakan banyak operasi matriks.

1.2 Tujuan

Tujuan pembuatan tugas akhir ini adalah untuk:

1. Menentukan letak dan nilai optimal kapasitor untuk memperbaiki faktor daya dan tegangan pada sistem jaringan distribusi sesuai dengan batas yang diijinkan

¹ Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro UNDIP Semarang

² Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro UNDIP Semarang

- Membandingkan pengaruh yang terjadi dalam sistem jaringan distribusi sebelum dan sesudah penempatan kapasitor

1.3 Pembatasan Masalah

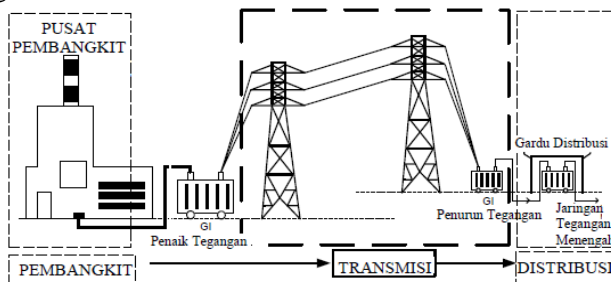
Untuk menyederhanakan permasalahan dalam Tugas Akhir ini maka diberikan batasan - batasan sebagai berikut :

- Tugas akhir tidak aplikasi secara langsung tetapi hanya dalam bentuk simulasi.
- Software yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah Matlab 2008a.
- Metode yang digunakan untuk optimasi penempatan kapasitor adalah Algoritma Genetika.
- Fungsi objektif yang dicari dalam algoritma genetika adalah nilai minimum biaya pemasangan kapasitor, biaya pembelian kapasitor, biaya operasi dan pemeliharaan kapasitor serta biaya rugi - rugi daya untuk mencari besar nilai kapasitor yang optimal.
- Kondisi sistem dianggap seimbang (*balance system*)

II. DASAR TEORI

2.1 Sistem Jaringan Distribusi^[11,12]

Ada tiga bagian penting dalam proses penyaluran tenaga listrik, yaitu: Pembangkitan, Penyaluran (transmisi) dan distribusi seperti pada gambar berikut :



Gambar 2.1 Tiga komponen utama dalam penyaluran tenaga listrik

2.1.1 Jaringan Pada Sistem Distribusi Primer

Jaringan Pada Sistem Distribusi tegangan menengah (Primer, 20KV) dapat dikelompokkan menjadi lima model, yaitu Jaringan Radial, Jaringan hantaran penghubung (*Tie Line*), Jaringan Lingkaran (*Loop*), Jaringan Spindel dan Sistem Gugus atau Kluster.

2.1.2 Rugi - Rugi Jaringan^[18]

Jatuh tegangan merupakan penurunan tegangan dimulai dari penyulang sampai sepanjang saluran jaringan tegangan menengah. Fenomena tersebut disebabkan kawat saluran yang mempunyai nilai resistansi, induktansi dan kapasitansi sepanjang saluran, maka akan terjadi penurunan tegangan. Sedangkan rugi daya adalah selisih antara daya yang dibangkitkan atau dialirkan dari Gardu Induk dengan daya yang terjual ke pelanggan listrik. Rugi-rugi daya merupakan sifat yang tidak dapat dihindari, tetapi hanya dapat diminimalkan.

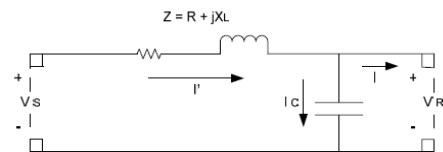
2.1.3 Dasar Pengaturan Tegangan^[4]

Meskipun telah ditetapkan di dalam PUIL 1987 bahwa drop tegangan yang dapat ditoleransi adalah sebesar 5%. Pada kenyataannya nilai tersebut amat sulit diwujudkan karena drop tegangan terjadi di semua bagian sistem dan akan berubah dengan adanya perubahan beban.

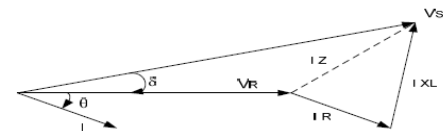
2.2 Kapasitor^[2,4,12,16,18]

2.2.1 Kapasitor Shunt (Paralel)

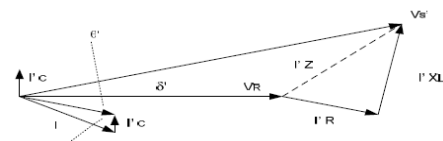
Kapasitor ini terhubung paralel pada jaringan maupun langsung pada beban, dengan tujuan untuk perbaikan faktor daya, sebagai pengatur tegangan maupun untuk mengurangi kerugian daya dan drop tegangan pada jaringan.



Gambar 2.2 Rangkaian ekivalen saluran



Gambar 2.3 Diagram vektor pada rangkaian pada faktor daya lagging tanpa kapasitor shunt



Gambar 2.4 Diagram vektor pada rangkaian pada faktor daya lagging dengan kapasitor shunt

Kapasitor shunt mensuplai daya reaktif atau arus untuk menetralkan komponen keluaran antar fasa dari arus yang diperlukan oleh beban induktif. Penurunan tegangan pada penyulang, atau pada saluran transmisi yang pendek dengan faktor daya yang ketinggalan dapat dihitung sebagai berikut :

$$VD = I_R R + I_X X_L \quad (2.1)$$

dengan VD = Penurunan tegangan (V)

R = Resistansi total pada penyulang (ohm)

X_L = Reaktansi induktif total pada penyulang (ohm)

I_R = Komponen daya nyata dari arus (A)

I_X = Komponen reaktif arus tertinggal (A)

Ketika kapasitor ditempatkan pada akhir saluran, resultan drop tegangannya dapat dihitung :

$$VD = I_R R + I_X X_L - I_C X_L \quad (2.2)$$

dimana I_C = komponen reaktif dari arus yang mendahului.

Perbedaan antara penurunan tegangan yang dihitung berdasarkan persamaan (2.1) dan (2.2) adalah kenaikan tegangan pada pemasangan kapasitor yang dapat ditunjukkan sebagai berikut :

$$VR = I_C X_L \quad (2.3)$$

2.2.2 Koreksi Faktor Daya

Pembangkitan daya reaktif pada perencanaan daya dan pensuplaiannya ke beban-beban yang berlokasi pada jarak yang jauh adalah tidak ekonomis, tetapi dapat dengan mudah disediakan oleh kapasitor yang ditempatkan pada pusat beban.

Dengan mengasumsikan beban disuplai dengan daya nyata (aktif) P , daya reaktif tertinggal Q_1 , dan daya semu S_1 , pada faktor daya tertinggal bahwa :

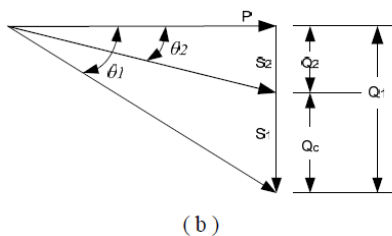
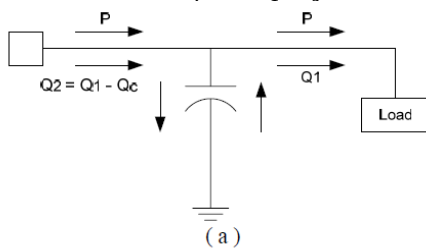
$$\cos \theta_1 = \frac{P}{S_1} \quad (2.4)$$

atau

$$\cos \theta_1 = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_1^2}} \quad (2.5)$$

ketika kapasitor shunt Q_C kVA dipasang pada beban, faktor daya dapat ditingkatkan dari $\cos \theta_1$ ke $\cos \theta_2$, dimana :

$$\begin{aligned} \cos \theta_2 &= \frac{P}{S_2} \\ &= \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_2^2}} \\ &= \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q_1 - Q_C)^2}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

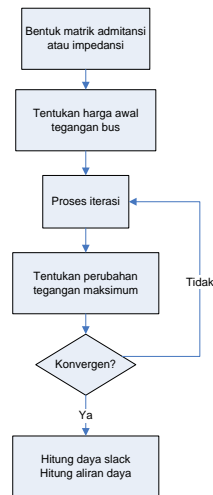


Gambar 2.5 Ilustrasi dari koreksi faktor daya

Keuntungan lain dari pemasangan kapasitor adalah perbaikan faktor daya dan pengurangan kVA yang mengalir pada jaringan. Dengan pemasangan kapasitor akan mengurangi daya reaktif yang mengalir pada jaringan, sehingga dengan daya nyata yang sama, maka faktor daya akan lebih besar dan kVA akan berkurang.

2.3 Studi Aliran Daya Listrik^[8,9,13,14]

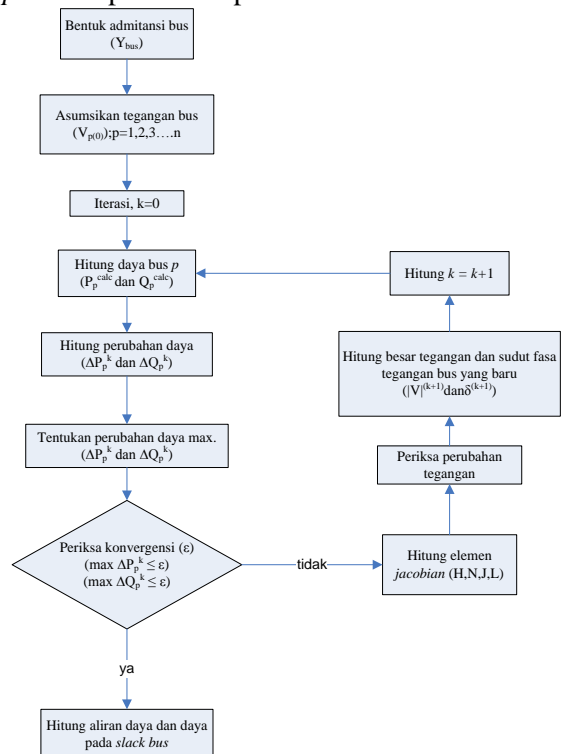
Untuk menyelesaikan studi aliran daya, metode yang sering digunakan adalah metode *Gauss-Seidel* dan metode *Newton Raphson*. Metode *Newton Raphson* lebih cepat mencapai nilai konvergen sehingga proses iterasi yang berlangsung lebih sedikit tetapi setiap iterasinya memerlukan waktu yang relatif lebih lama, karena jumlah iterasinya sedikit, secara keseluruhan memerlukan waktu yang lebih singkat dalam penyelesaian aliran daya. Secara umum prosedur penyelesaian aliran daya dapat dilihat pada diagram alir dalam Gambar 2.6



Gambar 2.6 Diagram alir perhitungan aliran daya

Dasar dari metode *Newton Raphson* dalam penyelesaian aliran daya adalah deret Taylor untuk suatu fungsi dengan dua variable lebih. Metode *Newton Rhapsion* menyelesaikan masalah aliran daya dengan menggunakan suatu set persamaan non linier untuk menghitung besarnya tegangan dan sudut fasa tegangan tiap bus.

Adapun bentuk diagram alir dari proses perhitungan aliran daya dengan metode *Newton Raphson* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Diagram Alir Proses Perhitungan Aliran Daya Dengan Metode *Newton Raphson*

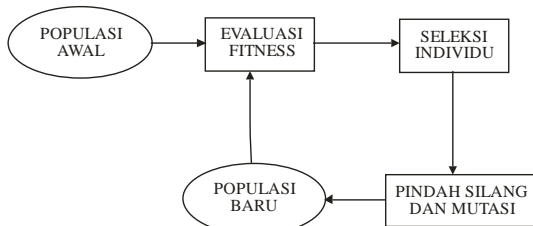
2.4 Algoritma Genetika^[1,3,15,18]

2.4.1 Dasar Algoritma Genetika

Peletak prinsip dasar sekaligus pencipta algoritma genetika adalah John Holland. Algoritma genetika menggunakan analogi secara langsung dari kebiasaan yang alami yaitu seleksi alam. Algoritma ini bekerja dengan sebuah populasi yang terdiri dari

individu – individu, yang masing – masing individu mempresentasikan sebuah solusi yang mungkin bagi persoalan yang ada. Dalam kaitan ini, individu dilambangkan dengan sebuah nilai fitness yang akan digunakan untuk mencari solusi terbaik dari persoalan yang ada.

Untuk memeriksa hasil optimasi, kita membutuhkan fungsi fitness, yang menandakan gambaran hasil (solusi) yang sudah dikodekan. Selama berjalan, induk harus digunakan untuk reproduksi, pindah silang dan mutasi untuk menciptakan keturunan. Jika algoritma genetika didesain secara baik, populasi akan mengalami konvergensi dan akan didapatkan sebuah solusi yang optimum.



Gambar 2.8 Siklus Algoritma Genetika

2.4.2 Parameter-parameter Algoritma Genetika

Dalam penerapan algoritma genetika, ada beberapa parameter yang dilibatkan, di mana parameter ini menentukan kesuksesan suatu proses optimasi. Jenis parameter yang digunakan bergantung pada permasalahan yang diselesaikan, namun ada beberapa parameter yang menjadi standar, yaitu:

- a. Ukuran populasi (pop_size)
- b. Probabilitas *crossover* (p_c)
- c. Probabilitas mutasi (p_m)

2.4.3 Komponen – Komponen Algoritma Genetika

2.4.3.1 Skema Pengkodean

Terdapat tiga skema yang paling umum digunakan dalam pengkodean, yaitu :

- a) *Real-number encoding*. Pada skema ini, nilai gen berada dalam interval $[0,R]$, dimana R adalah bilangan real positif dan biasanya $R = 1$
- b) *Discrete decimal encoding*. Setiap gen bisa bernilai salah satu bilangan bulat dalam interval $[0,9]$
- c) *Binary encoding*. Setiap gen hanya bisa bernilai 0 atau 1

2.4.3.2 Nilai Fitness

Suatu individu dievaluasi berdasarkan suatu fungsi tertentu sebagai ukuran performansinya. Di dalam evolusi alam, individu yang bernilai fitness tinggi yang akan bertahan hidup. Sedangkan individu yang bernilai fitness rendah akan mati.

Agar tidak ada hal buruk pada proses seleksi yang memilih orang tua secara proporsional sesuai dengan nilai fitness-nya maka diperlukan suatu mekanisme yang disebut *linear fitness ranking*.

2.4.3.3 Seleksi Orang Tua

Pemilihan dua buah kromosom sebagai orang tua, yang akan dipindahkansilangkan, biasanya dilakukan secara proporsional sesuai dengan nilai fitnessnya. Suatu metode seleksi umum yang digunakan adalah *roulette-wheel* (roda roulette). Sesuai dengan namanya, metode ini menirukan permainan roulette-wheel dimana masing – masing kromosom menempati potongan lingkaran pada roda roulette secara proporsional sesuai dengan nilai fitnessnya. Kromosom yang memiliki nilai fitness lebih besar menempati potongan lingkaran yang lebih besar dibandingkan dengan kromosom bernilai fitness rendah.

2.4.3.4 Pindah Silang

Salah satu komponen yang penting dalam algoritma genetika adalah *crossover* atau pindah silang. Sebuah kromosom yang mengarah pada solusi yang bagus bisa diperoleh dari proses memindah-silangkan dua buah kromosom.

Pindah silang bisa dilakukan dalam beberapa cara berbeda. Yang paling sederhana adalah pindah silang satu titik potong (*one-point crossover*). Suatu titik potong dipilih secara random, kemudian bagian pertama dari orang tua 1 digabungkan dengan bagian kedua dari orang tua 2.

2.4.3.5 Mutasi

Prosedur mutasi sangatlah sederhana. Untuk semua gen yang ada, jika bilangan random yang dibangkitkan kurang dari probabilitas mutasi P_{mut} yang ditentukan maka ubah gen tersebut menjadi nilai kebalikannya (dalam binary encoding, 0 diubah 1, dan 1 diubah 0). Pada algoritma genetika sederhana, nilai P_{mut} adalah tetap selama evolusi.

2.4.3.6 Elitisme

Karena seleksi dilakukan secara random, maka tidak ada jaminan bahwa suatu individu bernilai fitness tertinggi akan selalu terpilih. Untuk menjaga agar individu bernilai fitness tertinggi tidak hilang selama evolusi, maka perlu dibuat satu atau beberapa kopinya. Prosedur ini dikenal *elitisme*.

2.4.3.7 Penggantian Populasi

Dalam algoritma genetika dikenal skema penggantian populasi yang disebut *generational replacement*, yang berarti semua individu (misal N individu dalam suatu populasi) dari suatu generasi digantikan sekaligus oleh N individu baru hasil pindah silang dan mutasi.

III. PERANCANGAN SISTEM

3.1 Pemilihan Kandidat Bus

Dalam pemilihan kandidat bus sebagai lokasi penempatan kapasitor, banyak parameter – parameter yang dapat digunakan sebagai pertimbangan, misalnya *power loss indices* (PLI) atau indeks rugi – rugi daya ^[6,7,10]. Pada program simulasi ini kandidat bus dapat ditentukan sendiri tetapi sebaiknya

mengacu pada indeks rugi – rugi daya. Pemilihan kandidat bus tergantung dari tujuan yang akan dicapai. Nilai indeks rugi – rugi daya (PLI) dapat dirumuskan dalam persamaan matematis sebagai berikut :

$$PLI(n) = \frac{(X(n)-Y)}{(Z-Y)} \quad (3.1)$$

dimana PLI = indeks rugi – rugi daya
 X = pengurangan rugi – rugi daya aktif
 Y = pengurangan rugi – rugi daya aktif minimum
 Z = pengurangan rugi – rugi daya aktif maksimum
 n = nomor bus

Sebelum menentukan nilai indeks rugi – rugi daya maka harus terlebih dahulu menghitung pengurangan rugi – rugi daya aktif. Pengurangan rugi – rugi daya aktif diperoleh dari selisih antara jumlah rugi – rugi daya aktif pada kondisi awal dan jumlah rugi – rugi daya aktif setelah dilakukan kompensasi daya reaktif

3.2 Pembuatan Program Simulasi

Perancangan program simulasi optimasi ini menggunakan program Matlab 2008 dengan metode optimasi algoritma genetika. Program simulasi ini dibuat dalam 9 tahap, tahap pertama adalah inialisasi populasi awal, tahap kedua adalah dekodekan kromosom, tahap ketiga adalah proses aliran daya, tahap keempat adalah hitung nilai *fitness*, tahap kelima adalah pemilihan individu terbaik, tahap keenam adalah *linear fitness ranking*, tahap ketujuh adalah roulette wheel, tahap kedelapan adalah pindah silang, dan tahap kesembilan adalah mutasi. Pada program simulasi ini, fungsi objektif yang digunakan pada algoritma genetika dalam menghitung nilai *fitness* diukur dari beberapa parameter, antara lain :

- Biaya pemasangan kapasitor
- Biaya pembelian kapasitor
- Biaya operasi dan pemeliharaan kapasitor bank
- Biaya rugi – rugi daya aktif

Fungsi objektif untuk proses optimasi dapat dirumuskan dalam bentuk matematis berikut :

$$Min. F = \sum_{ii=1}^{N_{bus}} (I_{(ii)} \cdot KI + KB \cdot C_{(ii)}) + KO \cdot BiiT + KEI = 1NloadTIPLI \quad (3.2)$$

dimana

- N_{bus} = Jumlah kandidat bus
- I = 0 atau 1, 0 artinya tidak ada kapasitor yang terpasang pada bus
- KI = Biaya pemasangan kapasitor tiap bus
- KB = Biaya pembelian bank kapasitor per kVar
- C = Ukuran bank kapasitor dalam kVar
- KO = Biaya operasi dan pemeliharaan per bank, per tahun
- B = Jumlah bank kapasitor
- T = waktu perencanaan (tahun)
- KE = Biaya rugi – rugi energi per kWh

l = Level beban (maksimum, rata-rata, dan minimum)

T_l = Durasi waktu pada tiap level beban (jam)

P_L^l = Jumlah rugi – rugi daya aktif sistem pada tiap level beban

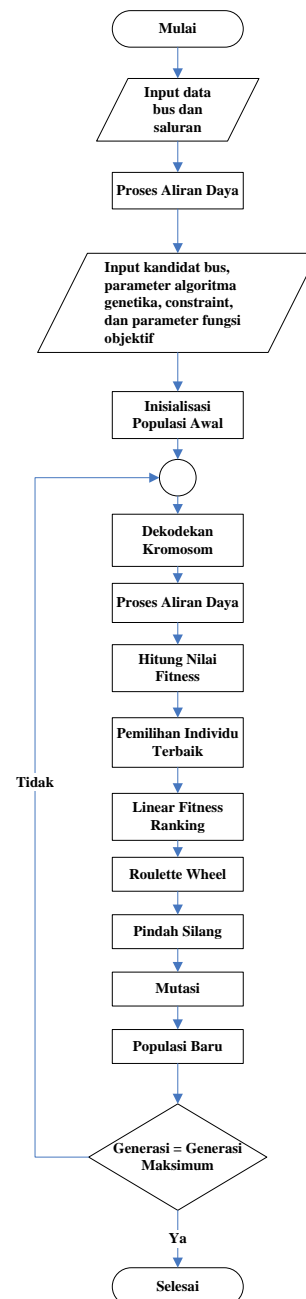
Dengan meminimumkan fungsi objektif seperti persamaan (3.2) maka akan didapatkan biaya minimum dalam penempatan kapasitor dengan nilai yang optimal sesuai waktu yang direncanakan. Syarat dalam penempatan nilai kapasitor yang optimal adalah memenuhi batas – batas tegangan dan faktor daya yang telah ditentukan pada tiap bus, yaitu :

- Tegangan (V_m)

$$V_{min} \leq V_m \leq V_{max}$$

- Faktor Daya (PF)

$$PF \geq PF_{min}$$

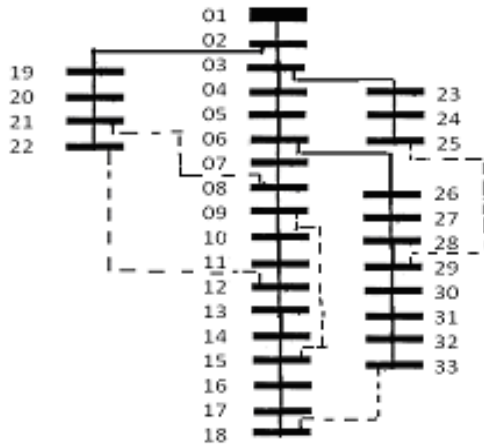


Gambar 3.1 Diagram Alir Pembuatan Program

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

4.1 Data Sistem

Data yang digunakan pada pengujian ini adalah data IEEE 33 bus *distribution test system* [5]. Data yang diambil berupa data bentuk jaringan distribusi, data beban, dan data saluran.



Gambar 4.1 Bentuk jaringan IEEE 33 bus *distribution test system*

MVAbase = 100 MVA

kVbase = 12,66 kV

4.2 Hasil Pengujian Perbaikan Tegangan

Pengujian ini dimaksudkan mendapatkan nilai kapasitor yang optimal untuk memperbaiki tegangan sesuai dengan batas – batas yang telah ditentukan. Dalam pengujian ini batas – batas tegangan disesuaikan dengan standar PUIL 1987, yaitu batas tegangan yang dapat ditoleransi pada sistem distribusi adalah 5% sehingga $V_{\min} = 0,95$ pu dan $V_{\max} = 1,05$ pu.

Pemilihan kandidat bus sebagai lokasi penempatan kapasitor mengacu pada indeks rugi – rugi daya (PLI) kondisi awal sistem. Pengujian dilakukan sebanyak 11 variasi dengan batas toleransi PLI yang berbeda dari 0 – 1 dengan urutan turun dari besar ke kecil. Batas toleransi terbaik untuk PLI dipilih berdasarkan beberapa pengujian dengan nilai toleransi yang berbeda [10]. Pengujian ini dilakukan dengan jumlah generasi (MaxG) 2000, jumlah populasi (UkPop) 50, peluang pindah silang (Psilang) sebesar 0,95, dan peluang mutasi (Pmutasi) sebesar 0,007. Penentuan parameter algoritma genetika menggunakan teknik *trial-end-error* dengan melakukan percobaan untuk beberapa kombinasi dari keempat parameter di atas dan melihat dari beberapa referensi [1,3,15,18]. Tabel 4.1 menunjukkan hasil semua pengujian perbaikan tegangan dengan batas toleransi berbeda

Tabel 4.1 Hasil semua pengujian perbaikan tegangan

Batas Toleransi PLI	Lokasi Penempatan Kapasitor	Penghematan (\$)
1	bus 31 (900 kVar)	39.967,606
0,9	bus 18 (300 kVar) dan bus 30 (900 kVar)	47.296,280

Batas Toleransi PLI	Lokasi Penempatan Kapasitor	Penghematan (\$)
0,8	bus 18 (300 kVar) dan bus 30 (900 kVar)	47.296,970
0,7	bus 18 (300 kVar) dan bus 30 (900 kVar)	47.296,102
0,6	bus 29 (300 kVar), bus 30 (600 kVar) dan bus 33 (300 kVar)	46.594,272
0,5	bus 18 (300 kVar), bus 29 (300 kVar) dan bus 30 (600 kVar)	46.577,757
0,4	bus 16 (300 kVar), bus 30 (600 kVar) dan bus 31 (300 kVar)	46.117,806
0,3	bus 13 (300 kVar), bus 30 (600 kVar) dan bus 31 (300 kVar)	46.000,758
0,2	bus 29 (300 kVar), bus 30 (600 kVar) dan bus 31 (300 kVar)	45.004,066
0,1	bus 29 (300 kVar), bus 30 (600 kVar) dan bus 31 (300 kVar)	45.004,066
0	bus 9 (300 kVar), bus 29 (300 kVar) dan bus 30 (600 kVar)	44.377,294

Dari semua hasil pengujian perbaikan tegangan dengan batas toleransi PLI yang berbeda dari 0 – 1 dapat disimpulkan bahwa batas toleransi PLI yang terbaik, yaitu 0,9; 0,8; dan 0,7 dengan lokasi penempatan kapasitor yang paling optimal adalah bus 18 (300 kVar) dan bus 30 (900 kVar) karena memiliki nilai penghematan paling terbesar. Hasil pengujian dengan batas toleransi PLI 0,9; 0,8; 0,7 mempunyai lokasi penempatan kapasitor yang sama tetapi nilai penghematannya sedikit berbeda. Hal ini disebabkan oleh kepresisian saat perhitungan rugi – rugi daya aktif.

4.2.1 Perbandingan Sebelum dan Sesudah Penempatan Kapasitor

Dari semua hasil pengujian perbaikan tegangan dapat disimpulkan bahwa kandidat bus sebagai lokasi penempatan kapasitor yang paling optimal adalah 2 lokasi yaitu bus 18 sebesar 300 kVar (1 bank) dan bus 30 sebesar 900 kVar (3 bank) karena memiliki nilai penghematan yang paling terbesar tetapi tegangan tiap bus telah memenuhi standar PUIL 1987 dengan batas toleransi 5%. Dengan hasil tersebut, PLI dapat digunakan sebagai dasar pertimbangan untuk pemilihan kandidat bus secara efektif karena bus – bus yang memiliki pengurangan rugi – rugi daya aktif terbesar dapat diketahui dengan PLI sehingga didapatkan lokasi yang optimal untuk penempatan kapasitor. Gambar 4.2 dan tabel 4.2 menunjukkan perbandingan kondisi sistem sebelum dan sesudah penempatan kapasitor untuk memperbaiki tegangan.



Gambar 4.2 Grafik perbandingan tegangan bus sebelum dan sesudah penempatan kapasitor pada pengujian perbaikan tegangan saat level beban maksimum

Tabel 4.2 Perbandingan sebelum dan sesudah penempatan kapasitor pada pengujian perbaikan tegangan

Deskripsi	Sebelum	Sesudah
losses pada level beban maksimum (kW)	197,336	149,023
losses pada level beban rata - rata (kW)	123,750	90,512
losses pada level beban minimum (kW)	77,952	56,047
Tegangan minimum pada level beban maksimum (pu)	0,941	0,953
Tegangan minimum pada level beban rata-rata (pu)	0,953	0,965
Tegangan minimum pada level beban minimum (pu)	0,963	0,975
Penghematan (\$)	-	47.296,970

Dari tabel di atas dapat dilihat terjadi perbedaan rugi – rugi daya aktif pada tiap level beban dan tegangan minimum bus setelah penempatan kapasitor. Nilai rugi – rugi daya aktif pada tiap level beban mengalami pengurangan yaitu 197,336 kW menjadi 149,023 kW pada level beban maksimum, 123,750 kW menjadi 90,512 kW pada level beban rata - rata, dan 77,952 kW menjadi 56,047 kW pada level beban minimum. Nilai tegangan minimum pada masing – masing level beban mengalami perbaikan, yaitu untuk level beban maksimum terjadi perbaikan sebesar 0.012 pu dari 0,941 pu ke 0,953 pu, untuk level beban rata – rata terjadi perbaikan sebesar 0,012 pu dari 0,953 pu ke 0,965 pu, dan untuk level beban minimum terjadi perbaikan sebesar 0,012 pu dari 0,963 pu ke 0,975 pu.

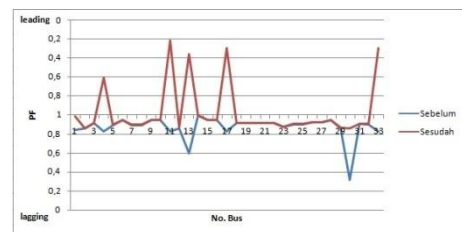
4.3 Hasil Pengujian Perbaikan Faktor Daya

Pengujian ini dimaksudkan mendapatkan nilai kapasitor yang optimal untuk memperbaiki faktor daya sesuai dengan batas yang telah ditentukan. Dalam pengujian ini batas faktor daya minimum disesuaikan dengan standar PLN untuk pelanggan industri yaitu 0,85 sehingga $PF_{min} = 0,85$.

Kandidat bus sebagai lokasi penempatan kapasitor adalah semua bus kecuali bus 1 karena bus 1 merupakan *slack* bus. Pengujian ini dilakukan dengan jumlah generasi (MaxG) 5000, jumlah populasi (UkPop) 50, peluang pindah silang (Psilang) sebesar 0,95, dan peluang mutasi (Pmutasi) sebesar

0,007. Penentuan parameter algoritma genetika menggunakan teknik *trial-end-error* dengan melakukan percobaan untuk beberapa kombinasi dari keempat parameter di atas dan melihat dari beberapa referensi^[1,3,15,18].

Dari hasil pengujian dapat diketahui bahwa faktor daya minimum sudah memenuhi batas yang telah ditentukan tetapi ada beberapa bus yang memiliki faktor daya leading. Hal ini disebabkan karena tipe dan besar kapasitor tiap bank berdasarkan tegangan sistem pada tabel ketersediaan kapasitor dan kapasitor bank bersifat tetap sehingga dapat memungkinkan terjadi *over compensated*. Kapasitor yang dipasang berjumlah 2100 kVar, yaitu bus 4 (300 kVar), bus 11 (300 kVar), bus 13 (300 kVar), bus 17 (300 kVar), bus 30 (600 kVar), dan bus 33 (300 kVar). Nilai penghematan pada sistem setelah penempatan kapasitor adalah 19.859,439 \$ untuk jangka waktu 5 tahun. Gambar 4.3 dan tabel 4.3 menunjukkan perbandingan sebelum dan sesudah penempatan kapasitor untuk memperbaiki faktor daya



Gambar 4.3 Grafik perbandingan faktor daya bus sebelum dan sesudah penempatan kapasitor pada pengujian perbaikan faktor daya saat level beban maksimum

Tabel 4.3 Perbandingan sebelum dan sesudah penempatan kapasitor pada pengujian perbaikan faktor daya

Deskripsi	Sebelum	Sesudah
losses pada level beban maksimum (kW)	197,336	140,220
losses pada level beban rata - rata (kW)	123,750	88,068
losses pada level beban minimum (kW)	77,952	58,432
Faktor daya minimum pada level beban maksimum	0,316 lag	0,857 lag
Faktor daya minimum pada level beban rata-rata	0,316 lag	0,857 lag
Faktor daya minimum pada level beban minimum	0,316 lag	0,857 lag
Penghematan (\$)	-	19.859,439

Dari tabel di atas dapat dilihat terjadi perbedaan rugi – rugi daya aktif pada tiap level beban, tegangan minimum, dan faktor daya minimum setelah penempatan kapasitor. Nilai rugi – rugi daya aktif pada tiap level beban mengalami pengurangan yaitu 197,336 kW menjadi 140,220 kW pada level beban maksimum, 123,750 kW menjadi 88,068 kW

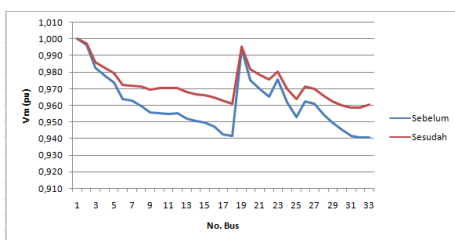
pada level beban rata - rata, dan 77,952 kW menjadi 58,432 kW pada level beban minimum. Nilai faktor daya minimum mengalami peningkatan yang sama pada tiap level beban sebesar 0,541 dari 0,316 lagging menjadi 0,857 lagging.

4.4 Hasil Pengujian Perbaikan Faktor Daya dan Tegangan

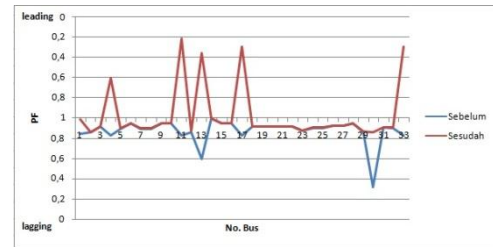
Pengujian ini dimaksudkan mendapatkan nilai kapasitor yang optimal untuk memperbaiki faktor daya dan tegangan sesuai dengan batas – batas yang telah ditentukan. Dalam pengujian ini batas – batas tegangan disesuaikan dengan standar PUIL 1987, yaitu batas tegangan yang dapat ditoleransi pada sistem distribusi adalah 5% sehingga $V_{min} = 0,95$ pu dan $V_{max} = 1,05$ pu. Untuk batas faktor daya minimum disesuaikan dengan standar PLN untuk pelanggan industri yaitu 0,85 sehingga $PF_{min} = 0,85$.

Kandidat bus sebagai lokasi penempatan kapasitor adalah semua bus kecuali bus 1 karena bus 1 merupakan *slack* bus. Pengujian ini dilakukan dengan jumlah generasi (MaxG) 5000, jumlah populasi (UkPop) 50, peluang pindah silang (Psilang) sebesar 0,95, dan peluang mutasi (Pmutasi) sebesar 0,007. Penentuan parameter algoritma genetika menggunakan teknik *trial-end-error* dengan melakukan percobaan untuk beberapa kombinasi dari keempat parameter di atas dan melihat dari beberapa referensi^[1,3,15,18].

Dari hasil pengujian dapat diketahui bahwa tegangan minimum dan faktor daya minimum sudah memenuhi batas – batas yang telah ditentukan tetapi ada beberapa bus yang memiliki faktor daya leading. Hal ini disebabkan karena tipe dan besar kapasitor tiap bank berdasarkan tegangan sistem pada tabel ketersediaan kapasitor dan kapasitor bank bersifat tetap sehingga dapat memungkinkan terjadi *over compensated*. Kapasitor yang dipasang berjumlah 2100 kVar, yaitu bus 4 (300 kVar), bus 11 (300 kVar), bus 13 (300 kVar), bus 17 (300 kVar), bus 30 (600 kVar), dan bus 33 (300 kVar). Nilai penghematan pada hasil pengujian di atas adalah 19.859,444 \$ untuk jangka waktu 5 tahun. Gambar 4.4, gambar 4.5, dan tabel 4.4 menunjukkan perbandingan sebelum dan sesudah penempatan kapasitor untuk memperbaiki faktor daya dan tegangan



Gambar 4.4 Grafik perbandingan tegangan bus sebelum dan sesudah penempatan kapasitor pada pengujian perbaikan faktor daya dan tegangan saat level beban maksimum



Gambar 4.5 Grafik perbandingan faktor daya bus sebelum dan sesudah penempatan kapasitor pada pengujian perbaikan faktor daya dan tegangan saat level beban maksimum

Tabel 4.4 Perbandingan sebelum dan sesudah penempatan kapasitor pada pengujian perbaikan faktor daya dan tegangan

Deskripsi	Sebelum	Sesudah
losses pada level beban maksimum (kW)	197,336	140,220
losses pada level beban rata - rata (kW)	123,750	88,068
losses pada level beban minimum (kW)	77,952	58,432
Tegangan minimum pada level beban maksimum (V)	0,941	0,958
Tegangan minimum pada level beban rata-rata (V)	0,953	0,970
Tegangan minimum pada level beban minimum (V)	0,963	0,980
Faktor daya minimum pada level beban maksimum	0,316 lag	0,857 lag
Faktor daya minimum pada level beban rata-rata	0,316 lag	0,857 lag
Faktor daya minimum pada level beban minimum	0,316 lag	0,857 lag
Penghematan (\$)	-	19.859,444

Dari tabel di atas dapat dilihat terjadi perbedaan rugi – rugi daya pada tiap level beban, tegangan minimum, dan faktor daya minimum setelah penempatan kapasitor. Nilai rugi – rugi daya aktif pada tiap level beban mengalami pengurangan yaitu 197,336 kW menjadi 140,220 kW pada level beban maksimum, 123,750 kW menjadi 88,068 kW pada level beban rata - rata, dan 77,952 kW menjadi 58,432 kW pada level beban minimum. Nilai tegangan minimum pada masing – masing level beban mengalami perbaikan, yaitu untuk level beban maksimum terjadi perbaikan sebesar 0,017 pu dari 0,941 pu ke 0,958 pu, untuk level beban rata – rata terjadi perbaikan sebesar 0,017 pu dari 0,953 pu ke 0,970 pu, dan untuk level beban minimum terjadi perbaikan sebesar 0,017 pu dari 0,963 pu ke 0,980 pu. Nilai faktor daya minimum mengalami peningkatan yang sama pada tiap level beban sebesar 0,541 dari 0,316 lagging menjadi 0,857 lagging.

Penggunaan kapasitor bank dengan kapasitas tetap mempunyai kelemahan yaitu berapapun jumlah beban yang terpasang maka daya reaktif yang disalurkan tetap. Sehingga mungkin saja suatu ketika

terjadi perubahan beban secara drastis dan akan menyebabkan *over compensated* sehingga faktor daya leading.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Optimasi penempatan kapasitor menggunakan algoritma genetika dapat menemukan ukuran kapasitor bank yang optimal sehingga dapat memperbaiki faktor daya dan tegangan sesuai batas – batas yang telah ditentukan.
2. PLI dapat digunakan sebagai dasar pertimbangan untuk pemilihan kandidat bus secara efektif karena bus – bus yang memiliki pengurangan rugi – rugi daya aktif terbesar dapat diketahui dengan PLI sehingga didapatkan lokasi yang optimal untuk penempatan kapasitor.
3. Pada pengujian perbaikan tegangan, lokasi penempatan kapasitor yang optimal adalah bus 18 sebesar 300 kVar (1 bank) dan bus 30 sebesar 900 kVar (3 bank) dengan nilai penghematan pada sistem selama 5 tahun sebesar 47.296,970 \$ sehingga nilai tegangan bus pada tiap level beban telah memenuhi batas yang telah ditentukan.
4. Pada pengujian perbaikan faktor daya, lokasi penempatan kapasitor yang optimal adalah bus 4 sebesar 300 kVar (1 bank), bus 11 sebesar 300 kVar (1 bank), bus 13 sebesar 300 kVar (1 bank), bus 17 sebesar 300 kVar (1 bank), bus 30 sebesar 600 kVar (2 bank), dan bus 33 sebesar 300 kVar (1 bank) dengan nilai penghematan pada sistem selama 5 tahun sebesar 19.859,439 \$ sehingga nilai faktor daya bus pada tiap level beban telah memenuhi batas yang telah ditentukan.
5. Pada pengujian perbaikan faktor daya dan tegangan, lokasi penempatan kapasitor yang optimal adalah bus 4 sebesar 300 kVar (1 bank), bus 11 sebesar 300 kVar (1 bank), bus 13 sebesar 300 kVar (1 bank), bus 17 sebesar 300 kVar (1 bank), bus 30 sebesar 600 kVar (2 bank), dan bus 33 sebesar 300 kVar (1 bank) dengan nilai penghematan pada sistem selama 5 tahun sebesar 19.859,444 \$ sehingga nilai tegangan dan faktor daya bus pada tiap level beban telah memenuhi batas – batas yang telah ditentukan.
6. Dari hasil pengujian dapat dilihat bahwa tegangan minimum dan faktor daya minimum sudah memenuhi batas – batas yang telah ditentukan tetapi pada pengujian perbaikan

faktor daya ada beberapa bus yang memiliki faktor daya leading. Hal ini disebabkan karena tipe dan besar kapasitor tiap bank berdasarkan tegangan sistem pada tabel ketersediaan kapasitor dan kapasitor bank bersifat tetap sehingga dapat memungkinkan terjadi *over compensated*.

5.2 Saran

1. Perlu dikembangkan lebih lanjut untuk optimasi penempatan kapasitor menggunakan metode yang lain misalnya metode logika fuzzy, *particle swarm optimization*, kombinasi beberapa metode, dan lain – lain.
2. Dapat dikembangkan sistem optimasi penempatan kapasitor dengan mempertimbangkan faktor – faktor yang lain misalnya pertumbuhan beban di masa mendatang, fluktuasi beban yang berubah – ubah, penggunaan switch kapasitor, dan lain – lain
3. Perlu dikembangkan untuk optimasi penempatan kapasitor untuk sistem jaringan distribusi yang tidak seimbang

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ellithy, K., A. Al-Hinai, dan A. Moosa. 2008. “*Optimal Shunt Capacitors Allocation In Distribution Networks Using Genetic Algorithm- Practical Case Study*”. International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, Vol. 3, no. 1 (April 2008).
- [2] Gonen, Turan. 1986. *Electric Power Distribution System Engineering*. New York : McGraw-Hill.
- [3] Hooshmand, Rahmat-Allah dan Mohammad Ataei. 2007. “*Optimal Capacitor Placement In Actual Configuration And Operational Conditions Of Distribution Systems Using RCGA*”. Journal Of Electrical Engineering, Vol. 58, No. 4, 2007, 189–199.
- [4] Hosea, Emmy dan Adi Nugraha. 2002. “*Optimasi Penentuan Lokasi Switched 20 kV Power Capacitors pada Jaringan Distribusi 20 kV Jawa Timur*”. Surabaya : Universitas Kristen Petra.
- [5] Keng, NG Kai. 2010. “*Voltage Stability Index of Voltage Stability Enhancement of Radial Distribution System*”. Faculty of Electrical Engineering Universiti Teknologi Malaysia.
- [6] Prasad, P.V., S. Sivanagaraju and N.Sreenivasulu. 2007. “*A Fuzzy-Genetic Algorithm For Optimal Capacitor Placement In Radial Distribution Systems*”.

ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 2, No. 3, June.

- [7] Reddy, M. Damodar and Prof. V.C. Veera Reddy. “*Optimal Capacitor Placement Using Fuzzy And Real Coded Genetic Algorithm For Maximum Savings*”. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2005 – 2008.
- [8] Robandi, Imam. 2006. *Desain Sistem Tenaga Modern*. Yogyakarta : Penerbit ANDI.
- [9] Saadat, Hadi. 1999. *Power System Analysis*. Singapura : McGraw-Hill.
- [10] Subrahmanyam, J.B.V. “*Optimal Capacitor Placement in Unbalanced Radial Distribution Networks*”. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2005 – 2008, Vol. 6 No.1.
- [11] Sukmawidjaja, Maula. 2008. “*Perhitungan Profil Tegangan Pada Sistem Distribusi Menggunakan Matrix Admitansi Dan Matrix Impedansi Bus*”. JETri, Volume 7, Nomor 2, Februari 2008, Halaman 21 - 40, ISSN 1412-0372.
- [12] Sulasno. 2001. *Teknik dan Sistem Distribusi Tenaga Listrik Edisi 1*. Semarang : Badan Penerbit Universitas Diponegoro.
- [13] _____. 2001. *Analisis Sistem Tenaga Listrik Edisi 2*. Semarang : Badan Penerbit Universitas Diponegoro.
- [14] Stevenson, William D. 1996. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Jakarta : Erlangga
- [15] Suyanto. 2005. *Algoritma Genetika dalam MATLAB*. Yogyakarta : Penerbit ANDI.
- [16] Utama, Ngakan Putu Satriya. 2008. “*Memperbaiki Profil Tegangan Di Sistem Distribusi Primer Dengan Kapasitor Shunt*”. Bali : Universitas Udayana.
- [17] Wartana, I Made dan Mimien Mustikawati. 2006. “*Optimasi Penempatan Kapasitor Pada Saluran Distribusi 20 Kv Dengan Menggunakan Metode Kombinasi Fuzzy Dan Algoritma Genetika*”. Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi 2006 (SNATI 2006). Yogyakarta, 17 Juni.
- [18] Wijanarko, Eko. 2011. “*Optimasi Penempatan Kapasitor Shunt Untuk Perbaikan Daya Reaktif Pada Penyulang Distribusi Primer Radial Dengan Algoritma Genetik*”. Semarang : Universitas Diponegoro.

BIODATA PENULIS



Hadha Alamajibuwono lahir di Semarang pada 3 Desember 1989. Saat ini sedang menempuh pendidikan tinggi di Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro. Konsentrasi Energi Listrik.

Semarang, Oktober 2011
Menyetujui,
Dosen Pembimbing I

Ir. Tedjo Sukmadi, MT.
NIP. 19611117 198803 1 001

Dosen Pembimbing II

Susatyo Handoko, ST., MT.
NIP. 19730526 200012 1 001