

LOGIC

JURNAL RANCANG BANGUN DAN TEKNOLOGI

Studi Kasus Penyebab Longsornya Lereng di Hotel Four Season di Sayan Ubud <i>I Wayan Wiraga, I G A G Surya Negera, I Wayan Arya dan I Gede Sastra Wibawa</i>	140
Optimasi Desain Bank Kapasitor untuk Perbaikan Faktor Daya Berbasis Assesmen Stokastik Menggunakan Genetic Algorithm..... <i>I Ketut Suryawan, Anak Agung Ngurah Made Narottama dan Kadek Amerta Yasa</i>	146 ✓
Pendepositan pada Pelat Strip dengan Las Listrik untuk Meningkatkan Kekuatan Tarik <i>I Nyoman Sutarna</i>	153
Fabrikasi Lapisan Tipis Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H) Tipe-N dengan Sistem PECVD dan Analisis Sifat Kelistrikannya..... <i>Evin Yudhi Setyono</i>	157
Analisis Aliran Daya Sistem Distribusi pada Penyulang Serangan dengan Beroperasinya Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Biomasa 2 MW TPA Suwung Denpasar Selatan <i>I Made Purbhawa dan I Gusti Agung Made Sunaya</i>	161
Analisis Biaya Konsumsi Energi Listrik pada Ac Split dengan Menggunakan Refrigeran HCFC-22 dan HC-22 dalam Upaya Penghematan Energi..... <i>I Dewa Made Susila</i>	168
Pengaruh Penggunaan <i>Evaporative Cooling</i> dengan Bahan Sumbu Kompor pada Kondensor Terhadap Kinerja Ac Split 1/2 Pk..... <i>I Nengah Ardita dan I Made Rasta</i>	174
Analisis Klasifikasi Kerusakan <i>Switch Mode Power Supply (Smpps)</i> Berbasis IC STR-F6654 pada Televisi Warna..... <i>I Made Sumerta Yasa dan I Gde Ketut Sri Budarsa</i>	178
Pengaruh Penambahan 10% Etanol Basah pada Premium Terhadap Emisi Gas HC <i>I Made Suarta dan Ketut Bangse</i>	184
Studi Eksperimental Perbandingan Konsumsi Energi <i>Air Conditioning System</i> Menggunakan <i>Ejector</i> Terhadap <i>Air Conditioning System</i> Konvensional..... <i>I Nyoman Gede Baliarta dan Sudirman</i>	191
Otomatisasi Daftar Hadir Kuliah di Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Bali dengan Teknik Pengenalan Wajah..... <i>Sri Andriati Asri dan I Gusti Ngurah Bagus Catur B.</i>	200
Rancang Bangun Mesin Pembelah Bambu untuk Meningkatkan Produktivitas Pengrajin Anyaman Bambu di Desa Sulahan Kabupaten Bangli..... <i>I Made Sudana dan I Made Rajendra</i>	207

LOGIC

Jurnal Rancang Bangun dan Teknologi

Vol. 12 No. 3 Nopember 2012

Ketua Penyunting:

I Nyoman Sugiarta

Sekretaris Penyunting

I Ketut Suparta

Penyunting Ahli:

Conny K Wachjoe (*ITB – Bandung*)

Adhi Susanto (*UGM – Yogyakarta*)

Mochamad Ashari (*ITS – Surabaya*)

I N G Wardana (*Univ. Brawijaya – Malang*)

Era Purwanto (*PENS – ITS*)

Suyitno H P (*Univ. Negeri Yogyakarta*)

Hidjan A G (*Poltek Negeri Jakarta*)

I Wayan Arya (*Poltek Negeri Bali*)

I Gede Santosa (*Poltek Negeri Bali*)

A.A.Ngr.Md.Narottama (*Poltek Negeri Bali*)

Penyunting Bahasa:

I Made Rai Jaya Widanta

I Nyoman Mandia

Tata Usaha:

Ni Putu Werdiani Utami

Penanggungjawab: I Made Mudhina (Direktur PNB)

Pengarah: I Putu Mertha Astawa (Pudir I PNB)

: I Gusti Lanang Suta A. (Ka.P3M)

Jurnal Logic terbit tiga kali per tahun, pada bulan Maret, Juli dan Nopember. Redaksi menerima naskah dalam bidang rancang bangun dan teknologi, baik dari dalam maupun dari luar Politeknik Negeri Bali. Untuk berlangganan per tahun dikenai biaya Rp 150.000,- yang dapat dibayarkan langsung atau melalui Pos ke Redaksi:

Alamat Redaksi:



Redaksi Jurnal Logic, Politeknik Negeri Bali

Bukit Jimbaran, P.O.Box 1064 Tuban Badung - BALI

Phone: +62-361-701981, Fax: +62-361-701128 E-mail: jurnal_logic@pnb.ac.id

DAFTAR ISI

	Halaman
Studi Kasus Penyebab Longsornya Lereng di Hotel Four Season di Sayan Ubud ... <i>I Wayan Wiraga, I G A G Surya Negera, I Wayan Arya dan I Gede Sastra Wibawa</i>	140-145
Optimasi Desain Bank Kapasitor untuk Perbaikan Faktor Daya Berbasis Assesmen Stokastik Menggunakan Genetic Algorithm <i>I Ketut Suryawan, Anak Agung Ngurah Made Narottama dan Kadek Amerta Yasa</i>	146-152 ✓
Pendepositan pada Pelat Strip dengan Las Listrik untuk Meningkatkan Kekuatan Tarik <i>I Nyoman Sutarna</i>	153-156
Fabrikasi Lapisan Tipis Silikon Amorf Terhidrogenasi (a-Si:H) Tipe-N dengan Sistem PECVD dan Analisis Sifat Kelistrikkannya <i>Evin Yudhi Setyono</i>	157-160
Analisis Aliran Daya Sistem Distribusi pada Penyulang Serangan dengan Beroperasinya Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Biomasa 2 MW TPA Suwung Denpasar Selatan <i>I Made Purbhawa dan I Gusti Agung Made Sunaya</i>	161-167
Analisis Biaya Konsumsi Energi Listrik pada Ac Split dengan Menggunakan Refrigeran HCFC-22 dan HC-22 dalam Upaya Penghematan Energi..... <i>I Dewa Made Susila</i>	168-173
Pengaruh Penggunaan <i>Evaporative Cooling</i> dengan Bahan Sumbu Kompur pada Kondensor Terhadap Kinerja Ac Split 1/2 Pk..... <i>I Nengah Ardita dan I Made Rasta</i>	174-177
Analisis Klasifikasi Kerusakan <i>Switch Mode Power Supply (Smpps)</i> Berbasis IC STR- F6654 pada Televisi Warna..... <i>I Made Sumerta Yasa dan I Gde Ketut Sri Budarsa</i>	178-183
Pengaruh Penambahan 10% Etanol Basah pada Premium Terhadap Emisi Gas HC <i>I Made Suarta dan Ketut Bangse</i>	184-190
Studi Eksperimental Perbandingan Konsumsi Energi <i>Air Conditioning System</i> Menggunakan <i>Ejector</i> Terhadap <i>Air Conditioning System</i> Konvensional..... <i>I Nyoman Gede Baliarta dan Sudirman</i>	191-199
Otomatisasi Daftar Hadir Kuliah di Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Bali dengan Teknik Pengenalan Wajah..... <i>Sri Andriati Asri dan I Gusti Ngurah Bagus Catur B.</i>	200-206
Rancang Bangun Mesin Pembelah Bambu untuk Meningkatkan Produktivitas Pengrajin Anyaman Bambu di Desa Sulahan Kabupaten Bangli <i>I Made Sudana dan I Made Rajendra</i>	207-214

OPTIMASI DESAIN BANK KAPASITOR UNTUK PERBAIKAN FAKTOR DAYA BERBASIS ASSESMENT STOKASTIK MENGUNAKAN GENETIC ALGORITHM

I Ketut Suryawan, Anak Agung Ngurah Made Narottama dan Kadek Amerta Yasa

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bali
Bukit Jimbaran, P.O. Box 1064 Tuban, Badung, Bali
Phone : 0361-701981, Fax. 0361-701128
Email : suryawanpnb@yahoo.co.id

Abstrak : Bank kapasitor sangat diperlukan untuk memperbaiki faktor daya sistem tenaga listrik serta mengurangi tagihan pemakaian daya reaktif. Dalam penelitian ini dikaji model perhitungan untuk mendapatkan skema bank kapasitor yang optimal. Untuk menyesuaikan dengan kebutuhan daya reaktif yang berubah-ubah, dalam penelitian ini kebutuhan kompensasi daya reaktif dievaluasi secara stokastik. Penelusuran skema bank kapasitor yang optimal dilakukan dengan menggunakan *Genetic Algorithm*. Agar memberikan desain yang efektif secara teknis dan dengan biaya terkecil, penelusuran skema bank kapasitor dilakukan dengan memperhitungkan biaya bank kapasitor, sisa pinalti daya reaktif setelah pemasangan bank kapasitor serta mempertimbangkan kelebihan kompensasi daya reaktif. Untuk melihat kinerja model perhitungan yang diusulkan telah dilakukan simulasi numerik pada satu konsumen tenaga listrik. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa penelusuran skema bank kapasitor yang optimal dapat dilakukan dengan menggunakan *Genetic Algorithm*. Desain skema bank kapasitor berbasis kebutuhan kompensasi daya reaktif yang dievaluasi secara stokastik mampu memberikan perbaikan faktor daya dengan biaya investasi dan rata-rata biaya perbaikan faktor daya tahunan yang lebih kecil daripada desain skema bank kapasitor berbasis kebutuhan kompensasi daya reaktif maksimum.

Kata kunci : perbaikan faktor daya, kompensasi daya reaktif, bank kapasitor, Genetic Algorithm, stokastik.

CAPACITOR BANK DESIGN OPTIMIZATION FOR POWER FACTOR IMPROVEMENT BASED ON STOCHASTIC ASSESSMENT USING GENETIC ALGORITHM

Abstract : Capacitor bank absolutely needed to improve the power factor of power system and reduce reactive power consumption bills. In this research, a calculation model to obtain an optimal capacitor bank schema was conducted. In order to adjust it with changed reactive power needs, the reactive power compensation needs were evaluated stochastically in this research. Trace on optimal capacitor bank schema was done by using genetic algorithm. To give an effective design technically with the relatively lowest cost, capacitor bank schema trace was done considering capacitor bank cost, penalty rest of reactive power after the capacitor bank installation, and reactive power compensation excess. To control the proposed counting model performance, a numeric simulation on an electric consumer was conducted. The numeric simulation results showed that optimal capacitor bank schema trace can be done by using genetic algorithm. The reactive power compensation needs-based capacitor bank schema design evaluated stochastically was able improve power factor with lower investment cost and average yearly power factor improvement cost than maximum reactive power compensation needs-based schema design of capacitor bank.

Keywords: power factor improvement, reactive power compensation, capacitor bank, genetic algorithm, stochastic.

I. PENDAHULUAN

Umumnya beban sistem tenaga listrik bersifat induktif. Beban induktif akan menyerap daya reaktif disamping daya nyata. Hal ini menyebabkan meningkatnya rugi-rugi dan jatuh tegangan pada saluran distribusi serta diperlukan kapasitas peralatan distribusi yang relatif besar. Salah satu alternatif untuk memperbaiki kondisi ini adalah dengan pemasangan bank kapasitor pada jaringan tenaga listrik maupun pada sisi konsumen tenaga listrik [1].

Pemasangan bank kapasitor pada jaringan tenaga listrik digunakan terutama untuk memperbaiki profil tegangan, sedangkan bank kapasitor yang dipasang pada konsumen tenaga listrik digunakan

terutama untuk menjaga agar faktor daya dalam batas-batas yang diijinkan oleh otoritas penyedia tenaga listrik. Di Indonesia, konsumen dengan faktor daya yang lebih kecil daripada 0,85 akan dikenai pinalti oleh PT PLN (Persero) berupa tagihan pemakaian daya reaktif [2]. Pinalti ini dapat dihindari dengan pemasangan bank kapasitor untuk memperbaiki faktor daya. Bank kapasitor akan memberikan kompensasi daya reaktif untuk memperbaiki faktor daya yang rendah.

Umumnya faktor daya konsumen berubah-ubah. Untuk menyesuaikan dengan perubahan faktor daya, bank kapasitor dirancang bekerja multi step. Bank kapasitor yang bekerja multi step terdiri dari

beberapa unit kapasitor dengan kapasitas sama atau berbeda-beda. Karena tidak ada parameter yang dapat dijadikan acuan dalam pemilihan kapasitas kapasitor per unit menyebabkan bank kapasitor tidak bekerja secara efektif. Di samping itu, bank kapasitor yang didesain berdasarkan pada kebutuhan daya reaktif maksimum, umumnya kapasitasnya menjadi relatif besar, tidak selalu terpakai dan secara ekonomis menjadi investasi berlebih (over investasi), karena kebutuhan daya reaktif maksimum hanya terjadi dalam durasi waktu tertentu dan umumnya tidak 24 jam sehari. Oleh karena itu, perlu dikaji model desain bank kapasitor yang optimal.

Dalam penelitian ini dikaji model perhitungan untuk mendesain skema bank kapasitor yang optimal untuk memperbaiki faktor daya. Skema bank kapasitor yang optimal adalah skema bank kapasitor yang efektif secara teknis dan dengan biaya terkecil. Skema bank kapasitor menunjukkan kapasitas kapasitor tiap-tiap step sebanyak step yang diperlukan.

Faktor daya umumnya berubah secara acak sehingga kompensasi daya reaktif yang dibutuhkan akan berubah-ubah secara acak juga, baik besar maupun durasinya. Oleh karena itu, dalam penelitian ini kebutuhan kompensasi daya reaktif dievaluasi secara stokastik. Evaluasi secara stokastik telah banyak dilakukan untuk mendapatkan solusi yang optimal yang berkaitan dengan fenomena-fenomena acak yang terjadi dalam sistem tenaga listrik [3,4,5].

Desain skema bank kapasitor meliputi penentuan banyak step dan kapasitas unit kapasitor pada tiap-tiap step yang dihitung secara simultan. Desain skema bank kapasitor merupakan permasalahan optimasi kombinasi skala besar *integer non linier*. Dalam penelitian ini dikaji penelusuran skema bank kapasitor yang optimal menggunakan *Genetic Algorithm (GA)*. Walaupun GA tidak memberikan jaminan bahwa penyelesaian akhir adalah solusi optimal global tetapi GA berpotensi menghindari solusi optimal lokal dan penelusuran dengan GA konvergen ke arah solusi optimal global. GA mampu memberikan solusi yang baik dalam waktu komputasi yang layak, *robust* dan tidak dibatasi oleh asumsi-asumsi ruang penelusuran seperti sifat kontinuitas, keberadaan turunan dari fungsi-fungsi obyektif [6]. GA telah banyak digunakan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan dalam bidang sistem tenaga listrik [7,8,9]. Dengan keunggulan-keunggulan yang dimiliki, GA diharapkan dapat menyelesaikan permasalahan optimasi ini untuk mendapatkan skema bank kapasitor yang optimal.

II. METODE PENELITIAN

A. Faktor Daya dan Kompensasi Daya Reaktif

Faktor daya (*power factor, pf*) didefinisikan sebagai rasio daya nyata P [Watt] terhadap daya semu S [VA] [10]. Faktor daya dapat bervariasi antara 0 dan 1, *lagging* untuk beban induktif dan *leading* untuk beban kapasitif.

Faktor daya beban induktif dapat diperbesar dengan memberikan kompensasi daya reaktif. Idealnya besar kompensasi daya reaktif adalah sebesar kebutuhan daya reaktif kapasitif sedemikian sehingga faktor daya sama dengan 1 [11]. Kapasitas kapasitor yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya beban induktif ke faktor daya yang diperlukan dapat dihitung dengan persamaan berikut [12].

$$Q_c = P \left(\frac{1}{\sqrt{pf_{orig}^2}} - 1 - \left[\frac{1}{\sqrt{pf_{new}^2}} - 1 \right] \right) \quad (1)$$

dimana

Q_c	= kapasitas kapasitor [VAr]
P	= daya nyata beban [Watt]
pf_{orig}	= faktor daya semula
pf_{new}	= faktor daya yang diperlukan

Kompensasi daya reaktif yang berlebihan akan menyebabkan faktor daya menjadi *leading*. Permasalahan yang sangat mendasar bila faktor daya menjadi *leading* yaitu tegangan lebih. Kenaikan tegangan sistem tenaga listrik adalah salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan dalam pemasangan kapasitor [13].

B. Bank kapasitor

Bank kapasitor adalah rangkaian yang terdiri dari beberapa unit kapasitor. Kapasitas unit kapasitor menyatakan besar daya reaktif nominal yang dihasilkan pada tegangan dan frekuensi nominal. dinyatakan dalam satuan dasar Var. Praktisnya, unit kapasitor diproduksi dalam kapasitas tertentu dan bersifat diskrit [14].

Pada bank kapasitor multi step, kerja unit-unit kapasitor diatur dengan regulator untuk menyesuaikan dengan kebutuhan daya reaktif riil. Praktisnya, sebuah regulator memiliki banyak step yang tertentu dan terbatas [15,16]. Regulator bank kapasitor akan mengatur kerja unit-unit kapasitor sesuai mode operasi yang dipilih. Sebagai contoh *stack operation, circulating operation, optimal mode* dan lain-lain. Pada *optimal mode*, operasi unit-unit kapasitor diatur sedemikian sehingga besar kompensasi daya reaktif sama dengan besar daya reaktif yang dibutuhkan agar sistem tenaga listrik mempunyai faktor daya yang diinginkan atau dengan kelebihan kompensasi minimum.

Kapasitas unit kapasitor untuk step pertama merupakan unit kapasitor dengan kapasitas terkecil. Kapasitas unit kapasitor step pertama akan menentukan arus aktivasi yaitu level arus reaktif yang mana regulator mulai mengoperasikan step bank kapasitor.

C. Metode Analisis Ekonomi

Untuk menentukan pilihan terbaik dari beberapa alternatif penerapan rekayasa teknik dapat dilakukan dengan membandingkan biaya dari alternatif-alternatif tersebut. Bila alternatif-alternatif tersebut mempunyai manfaat yang identik ataupun mempunyai kemiripan, maka pemilihan hanya didasarkan pada biaya yang paling ekonomis. Bila

beberapa alternatif yang ada memberikan manfaat yang berbeda maka dipakai analisis hubungan manfaat dan biaya [17].

Ada beberapa metode analisis ekonomi yang digunakan untuk menilai kelayakan penerapan suatu peralatan pada sistem tenaga listrik, antara lain *payback period*, *benefit to cost*, *equivalent first cost* dan lain-lain [3,4]. Meskipun memberikan hasil yang sama, metode *payback period*, dan *benefit to cost* tidak stabil dalam penelusuran heuristik [3].

Secara umum, metode *equivalent first cost* dapat dinyatakan dengan

$$C_{tot} = C_{im} + C_r \dots\dots\dots (2)$$

dimana

C_{tot} = biaya total tahunan

C_{im} = biaya peralatan tahunan, termasuk biaya investasi, penyusutan, instalasi, perawatan, rugi-rugi listrik dan lain-lain yang di rata-rata per tahun.

C_r = biaya yang harus dikeluarkan oleh konsumen setelah peralatan dipasang di rata-rata per tahun.

D. Metode Genetic Algorithm (GA)

GA adalah sebuah teknik penelusuran global yang berdasarkan prinsip-prinsip genetik dan mekanisme evolusi sistem alam beserta populasi yang hidup di dalamnya, seperti seleksi alam, *crossover* dan mutasi. Sebuah populasi terdiri dari kromosom-kromosom (*chromosomes*) yang diciptakan secara random. Sebuah kromosom terdiri dari sejumlah angka yang merupakan kode-kode pengganti dari nilai variabel-variabel yang sedang diuji. Angka-angka ini merupakan gen-gen yang memberikan karakteristik khas pada setiap kromosom. Angka-angka ini dihasilkan secara random. Sebuah kromosom merupakan sebuah solusi dari permasalahan.

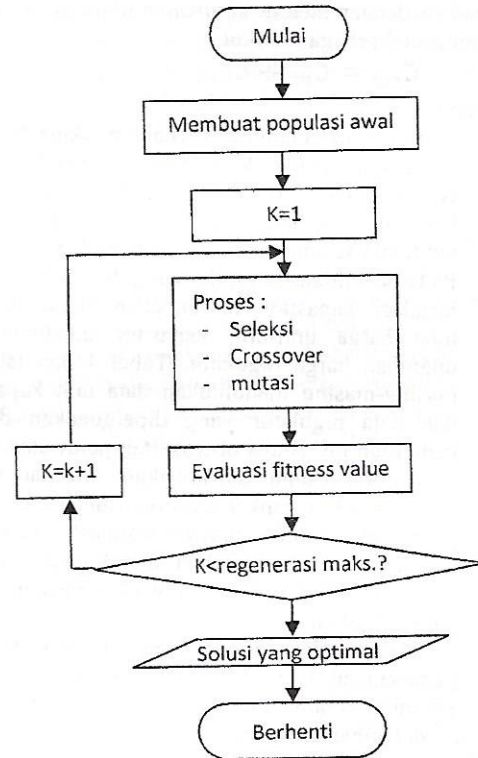
Fitness function digunakan untuk memberikan karakteristik kepada kromosom-kromosom dalam sebuah populasi. Setiap kromosom dievaluasi dengan *fitness function* tersebut dan diberi *fitness value*. *Fitness value* ini menunjukkan keoptimalan dari sebuah kromosom. Kromosom dengan *fitness value* yang berkaitan merupakan sebuah individu. Desain kromosom terbaik mempunyai *fitness value* terbesar dan berpeluang terbesar dipilih sebagai induk untuk membentuk generasi baru.

Fitness function sangat dekat dan sejajar dengan fungsi obyektif. *Fitness function* mungkin sebuah evaluator atau kombinasi berbobot dari beberapa faktor. Batasan-batasan optimasi dapat pula difaktorkan di dalamnya menggunakan *a penalty function*. Karena bentuk umum GA adalah untuk memaksimalkan *fitness function* maka untuk permasalahan minimalisasi, *fitness function* dapat dinyatakan dengan bentuk dasar

$$F = \text{nilai dasar} - \text{nilai evaluator} - \text{nilai pinalti} \dots\dots (3)$$

Nilai dasar digunakan untuk menjaga agar *fitness value* lebih besar atau sama dengan nol.

Dalam suatu mekanisme seleksi, sebagian populasi dalam prosentase tertentu akan terpilih dan sebagian lagi akan terhapus tergantung pada besar *fitness value*-nya. Individu-individu yang terpilih akan mengikuti mekanisme *crossover* dan mutasi. Hasil *crossover* dan mutasi akan menjadi populasi generasi baru dan akan dievaluasi kembali untuk mengikuti proses regenerasi selanjutnya. Proses penelusuran dengan GA ditunjukkan pada gambar 1 berikut.



Gambar 1 Algoritma Penelusuran GA

E. Optimasi desain bank kapasitor

1. Analisis Kebutuhan Kompensasi Daya Reaktif

Dalam penelitian ini analisis kebutuhan kompensasi daya reaktif dilakukan dengan asumsi dan model berikut.

- a. Daya yang diserap beban dari pengukuran ke t_n sampai dengan pengukuran ke t_{n+1} diasumsikan sama besar dengan daya yang diserap pada hasil pengukuran ke t_{n+1} .
- b. Interval waktu pengukuran dari t_n ke t_{n+1} yaitu Δt ditentukan secara *trial and error*.
- c. Kompensasi daya reaktif (Q_C) dihitung sebesar daya reaktif yang diperlukan untuk perbaikan faktor daya sehingga faktor daya menjadi minimal 0,85 dan dihitung pada setiap pengukuran ke t_n dengan persamaan 1.
- d. Kompensasi daya reaktif diklasifikasikan berdasarkan besar dan durasinya, dan dibuat matrik distribusi peluang. Analisis durasi kebutuhan kompensasi daya reaktif dibuat

dengan interval $n \times \Delta t$, dimana n adalah bilangan bulat dan ditentukan secara *trial and error*. Analisis besar kebutuhan kompensasi daya reaktif dibuat dengan interval yang dihitung dari pembulatan Q_C terbesar dibagi k , dimana k adalah banyak rentang berupa bilangan bulat dan ditentukan secara *trial and error*.

2. Analisis Biaya

Biaya dari pemasangan bank kapasitor dianalisis dengan metode *equivalent first cost* sesuai persamaan 2 sebagai berikut.

$$C_{tot} = C_{im} + C_r$$

dimana :

C_{tot} = rata-rata biaya tahunan perbaikan faktor daya.

C_{im} = biaya bank kapasitor, termasuk biaya pengembalian pinjaman dan bunga pinjaman, biaya operasi dan perawatan, dihitung rata-rata per tahun selama umur efektif bank kapasitor.

Pada penelitian ini modal yang diperlukan untuk instalasi kapasitor diasumsikan sama dengan total harga unit-unit kapasitor dikalikan 1,6 ditambah harga regulator. Tabel 1 dan tabel 2 masing-masing menunjukkan data unit kapasitor dan data regulator yang dipergunakan dalam penelitian ini. Biaya operasi dan perawatan bank kapasitor pertahun diasumsikan 1% dari besar biaya instalasi bank kapasitor. Bunga bank atas pinjaman untuk biaya instalasi kapasitor diasumsikan 8% pertahun dan konstan. Umur pakai efektif bank kapasitor diasumsikan sama yaitu 20 tahun.

C_r = besar sisa pinalti daya reaktif setelah pemasangan bank kapasitor, dihitung rata-rata per tahun selama umur efektif bank kapasitor.

Besar sisa tagihan daya reaktif C_r dihitung sebagai berikut.

$$C_r = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M q_{c,i} \cdot t_i \cdot p_i \cdot T_{kvarh,j} \cdot N}{y} \dots (4)$$

dimana :

Indeks j menunjukkan tahun ke j setelah pemasangan bank kapasitor dan indeks i menunjukkan elemen ke i dari matrik distribusi peluang besar dan durasi kebutuhan kompensasi daya reaktif

$q_{c,i}$ = kekurangan daya reaktif yang disuplai oleh bank kapasitor dari kebutuhan kompensasi daya reaktif yang semestinya sesuai elemen ke i dari matrik distribusi peluang besar dan durasi kebutuhan kompensasi daya reaktif [kVarh].

t_i = durasi kebutuhan kompensasi daya reaktif sesuai elemen ke i dari matrik distribusi peluang besar dan durasi kebutuhan daya reaktif [jam].

p_i = peluang kebutuhan kompensasi daya reaktif sesuai elemen ke i dari matrik distribusi peluang besar dan durasi kebutuhan kompensasi daya reaktif.

$T_{kvarh,j}$ = harga energi reaktif [rupiah/kVarh] pada tahun ke j .

Dalam penelitian ini diasumsikan harga energi reaktif 735 rupiah/kVarh [2], dan dengan kenaikan sebesar 4% pertahun.

y = umur pakai efektif bank kapasitor [tahun]

m = banyak elemen matrik distribusi peluang dari besar dan durasi kebutuhan kompensasi daya reaktif.

N = total kejadian kebutuhan kompensasi daya reaktif per tahun.

Tabel 1. Data unit kapasitor

No.	Kapasitas unit kapasitor [kVar]	Harga unit kapasitor [Rp.]
1	2,5	1.120.000
2	5	1.200.000
3	10	1.280.000
4	20	2.170.000
5	25	2.530.000
6	30	2.840.000
7	40	3.700.000
8	50	4.480.000
9	60	5.400.000
10	70	6.850.000
11	80	8.900.000
12	100	11.500.000

Sumber :

<http://panelkapasitorbank.indonetwork.co.id/2348765/abb-power-capasitor.htm>, diunduh 27 Juli 2012

Tabel 2. Data regulator bank kapasitor

Step regulator	Untuk desain bank kapasitor dengan jumlah step	Harga regulator [Rp.]
3	1 - 3	3.900.000
6	4 - 6	4.200.000
8	7 - 8	4.300.000
10	9 - 10	4.500.000
12	11 -12	4.700.000

Sumber :

<http://panelkapasitorbank.indonetwork.co.id/2348765/abb-power-capasitor.htm>, diunduh 27 Juli 2012.

3. Kriteria Optimasi Desain Bank Kapasitor

Optimasi desain bank kapasitor bertujuan mendapatkan jumlah step yang diperlukan dan kapasitas unit kapasitor untuk tiap-tiap step sehingga bank kapasitor yang akan dipasang mempunyai rata-rata biaya tahunan perbaikan faktor daya C_{tot} terkecil.

Adapun fungsi obyektif optimasi yaitu :

$$H = \text{minimalisasi} \{C_{tot}\} \dots \dots \dots (5)$$

4. Penelusuran dengan Genetic Algorithm

Dalam penelusuran desain bank kapasitor yang optimal, kromosom akan berbentuk vektor dengan pengkodean bilangan cacah. Bilangan cacah menunjukkan kapasitas unit kapasitor tertentu dengan harga tertentu sesuai tabel 1 di atas, kecuali angka nol menunjukkan tidak ada kapasitor yang akan dipasang. Panjang dari setiap kromosom sama dengan jumlah step maksimum dari regulator yang tersedia. Dalam

penelitian ini, sesuai tabel 2 yaitu 12. Panjang setiap kromosom dikurangi dengan banyak elemen nol menunjukkan jumlah step regulator bank kapasitor yang dipilih.

Dalam penelusuran desain bank kapasitor yang optimal akan menggunakan *fitness function* sesuai persamaan 3. Besar pinalti daya reaktif sebelum pemasangan bank kapasitor C_o digunakan sebagai nilai dasar karena memiliki nilai terbesar. Untuk menjaga agar *fitness value* lebih besar atau sama dengan nol, nilai dasar sama dengan besar pinalti daya reaktif dikalikan faktor tertentu. Rata-rata biaya tahunan perbaikan faktor daya C_{tot} sebagai nilai evaluator.

Karena tujuan optimasi adalah untuk mendapatkan biaya perbaikan faktor daya terkecil maka kompensasi daya reaktif yang lebih besar dari yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya menjadi 0,85 harus dihindari. Secara teknis kompensasi daya reaktif yang lebih besar dari yang diperlukan berpotensi menimbulkan tegangan lebih dan mengurangi umur pakai efektif bank kapasitor. Regulator dengan *optimal mode* dapat digunakan untuk mengatur kerja unit-unit kapasitor sehingga besar kompensasi daya reaktif yang diberikan oleh bank kapasitor sama atau lebih besar dari yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya menjadi 0,85. Jika kompensasi daya reaktif yang diberikan oleh bank kapasitor lebih besar dari yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya menjadi 0,85, maka dengan optimal mode, regulator akan mengatur kerja unit-unit kapasitor sehingga kelebihan kompensasi daya reaktif adalah yang terkecil. Cara menghitung nilai kelebihan kompensasi daya reaktif ini sama seperti menghitung besar sisa tagihan daya reaktif setelah pemasangan bank kapasitor di atas. Kelebihan kompensasi daya reaktif ini dihitung dengan persamaan berikut.

$$C_{oc} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{2M} q_{oc,i} f_i P_{ij} T_{kvar} h_i^N}{y} \dots (6)$$

dimana

C_{oc} = ekivalen biaya akibat kelebihan kompensasi daya reaktif setelah kerja unit-unit kapasitor diatur optimal, dihitung rata-rata per tahun selama umur efektif bank kapasitor.

$q_{oc,i}$ = kelebihan daya reaktif setelah kerja unit-unit kapasitor diatur optimal sesuai elemen ke i dari matrik distribusi peluang besar dan durasi kebutuhan kompensasi daya reaktif [kVarh].

Berdasarkan hal-hal di atas maka *fitness value* sebuah kromosom dihitung dengan persamaan berikut

$$F = C_p - C_{fDI} - C_{oc} \dots (7)$$

Proses regenerasi dilakukan sesuai dengan gambar 1. Mekanisme seleksi dilaksanakan dengan model *roulette* dan mekanisme *crossover* dilakukan secara *single layer* dan acak.

Tabel 3 berikut menunjukkan parameter-parameter yang digunakan dalam proses penelusuran dengan GA.

No.	Parameter	Nilai
1	Banyak populasi	30
2	Panjang kromosom	12
3	Peluang <i>crossover</i>	0.8
4	Peluang mutasi	0.1
5	Banyak regenerasi	100

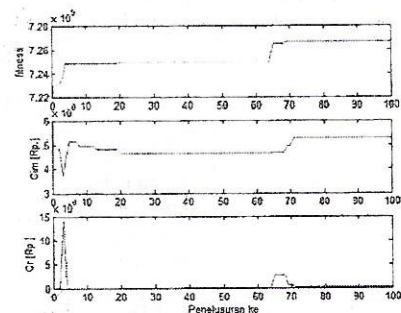
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk melihat kinerja dari model perhitungan optimasi yang diusulkan di atas, telah dilakukan simulasi numerik menggunakan satu konsumen tenaga listrik dengan Kebutuhan kompensasi daya reaktif maksimum sebesar 183,89 kVar. Analisis durasi kebutuhan kompensasi daya reaktif menggunakan interval 30 menit dan analisis besar kebutuhan kompensasi daya reaktif dibagi menjadi 18 rentang dan 12 rentang, masing-masing ditunjukkan pada tabel 4 dan 5 berikut.

Pada tabel 4 dan 5 dapat dilihat bahwa besar dan durasi kebutuhan kompensasi daya reaktif mempunyai peluang yang berbeda-beda. Kebutuhan daya reaktif maksimum hanya berlangsung dalam durasi yang relatif pendek dengan peluang yang relatif kecil. Durasi kebutuhan daya reaktif tidak ada yang mencapai 24 jam.

Gambar 2 berikut menunjukkan proses konvergensi penelusuran untuk mendapatkan skema bank kapasitor yang optimal. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa *fitness value* meningkat selama proses penelusuran dan konvergen dalam penelusuran yang relatif singkat.

Hasil-hasil optimasi desain bank kapasitor yang optimal 6. Sebagai pembanding dari hasil penelusuran dengan GA, juga ditunjukkan hasil perhitungan skema bank kapasitor tanpa metode optimasi. Skema bank kapasitor tanpa metode optimasi dihitung berbasis kebutuhan kompensasi daya reaktif maksimum tanpa memperhatikan durasi dan peluang terjadinya. Pada skema bank kapasitor tanpa metode optimasi, kapasitas unit kapasitor per step diatur sama besar dan jumlah step sesuai dengan yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan kompensasi daya reaktif maksimum.



Gambar 2 Konvergensi Penelusuran GA

Dari tabel 6 dapat dilihat bahwa pemasangan bank kapasitor dapat mengurangi besar daya reaktif C_r . Desain bank kapasitor berbasis kebutuhan kompensasi daya reaktif maksimum dapat menghilangkan seluruh tagihan daya reaktif tetapi membutuhkan investasi relatif besar atau biaya perbaikan faktor daya tahunan C_{tot} yang relatif besar. Dibandingkan dengan desain bank kapasitor dengan metode tanpa optimasi, desain skema bank kapasitor yang optimal mempunyai kapasitas dan investasi lebih

kecil serta biaya perbaikan faktor daya tahunan C_r yang lebih kecil.

Dalam penelitian ini, optimasi desain skema bank kapasitor yang dihitung berbasis analisis kebutuhan kompensasi daya reaktif dengan 18 rentang q_c cenderung memberikan biaya tahunan yang lebih rendah daripada besar kebutuhan kompensasi daya reaktif dengan 12 rentang q_c .

Tabel 4. Distribusi peluang dari besar dan durasi kebutuhan kompensasi daya reaktif dengan 18 rentang Q_c

Kompensasi daya reaktif Q_c [kVar]	Durasi [jam]							
	0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0
0	1	2	3	4	5	6	7	8
0 - 10.2222	0.0176	0.0120	0	0	0	0	0	0
10.2222 - 20.4444	0	0	0.0021	0.0096	0.0126	0.0042	0	0
20.4444 - 30.6667	0.0005	0	0	0	0	0	0	0
30.6667 - 40.8889	0.0065	0.0013	0.0030	0.0073	0.0105	0.0059	0.0010	0.0001
40.8889 - 51.1111	0.0344	0.0043	0.0006	0	0	0	0	0
51.1111 - 61.3333	0.0195	0.0147	0.0080	0	0	0	0	0
61.3333 - 71.5556	0.0368	0.0334	0.0230	0.0069	0.0013	0	0	0
71.5556 - 81.7778	0.0453	0.0340	0.0184	0.0005	0	0	0	0
81.7778 - 92.0000	0.0740	0.0194	0.0072	0.0004	0	0	0	0
92.0000 - 102.2222	0.0853	0.0201	0.0097	0.0141	0.0016	0	0	0
102.2222 - 112.4444	0.0581	0.0119	0.0005	0.0002	0	0	0	0
112.4444 - 122.6667	0.0597	0.0295	0.0084	0.0012	0.0001	0	0	0
122.6667 - 132.8889	0.0624	0.0350	0.0129	0.0012	0.0004	0	0	0
132.8889 - 143.1111	0.0179	0.0131	0.0087	0.0023	0.0002	0	0	0
143.1111 - 153.3333	0.0277	0.0148	0.0025	0.0001	0	0	0	0
153.3333 - 163.5556	0.0009	0	0	0	0	0	0	0
163.5556 - 173.7778	0.0232	0	0	0	0	0	0	0
173.7778 - 184.0000	0.0004	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 5. Distribusi peluang dari besar dan durasi kebutuhan kompensasi daya reaktif dengan 12 rentang Q_c

Kompensasi daya reaktif Q_c [kVar]	Durasi [jam]							
	0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0
0	1	2	3	4	5	6	7	8
0 - 15.3333	0.0013	0.0091	0.0225	0	0	0	0	0
15.3333 - 30.6667	0.0005	0.0046	0.0127	0.0130	0.0013	0	0	0
30.6667 - 46.0000	0.0104	0.0037	0.0024	0.0050	0.0107	0.0096	0.0029	0.0004
46.0000 - 61.3333	0.0167	0.0177	0.0128	0	0	0	0	0
61.3333 - 76.6667	0.0580	0.0521	0.0286	0.0085	0.0023	0.0007	0	0
76.6667 - 92.0000	0.0646	0.0332	0.0237	0.0114	0.0016	0	0	0
92.0000 - 107.3333	0.1073	0.0321	0.0129	0.0156	0.0017	0	0	0
107.3333 - 122.6667	0.0798	0.0404	0.0122	0.0023	0.0001	0	0	0
122.6667 - 138.0000	0.0863	0.0517	0.0204	0.0039	0.0015	0.0001	0	0
138.0000 - 153.3333	0.0410	0.0180	0.0029	0.0002	0	0	0	0
153.3333 - 168.6667	0.0240	0	0	0	0	0	0	0
168.6667 - 184.0000	0.0030	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 6. Hasil optimasi desain bank kapasitor

No	Uraian	Kondisi awal	Desain tanpa optimasi	Desain optimal	
				18 rentang q_c	12 rentang q_c
1	Skema bank kapasitor [kVAr]	-	200 (20 20 20 20 20 20 20 20 20 20)	170 (10 10 10 20 30 30 30 30)	167.5 (2,5 10 10 25 30 30 30 30)
2	Investasi [Rp]	-	41.390.000	33.829.000	34.169.000
3	C_{im} [Rp]	-	5.794.600	4.736.060	4.783.660
4	C_r [Rp]	$7.2655 \cdot 10^8$	0	11.424	15.363
5	C_{tot} [Rp]	$7.2655 \cdot 10^8$	5.794.600	4.747.484	4.799.023

III. SIMPULAN

Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa penelusuran skema bank kapasitor yang optimal dapat dilakukan dengan menggunakan GA. Dengan GA, banyak step dari bank kapasitor dan kapasitas unit kapasitor pada tiap-tiap step dapat dihitung secara simultan. Agar memberikan desain yang efektif secara teknis dan dengan biaya terkecil, penelusuran skema bank kapasitor dilakukan dengan memperhitungkan biaya bank kapasitor, sisa pinalti daya reaktif setelah pemasangan bank kapasitor serta mempertimbangkan kelebihan kompensasi daya reaktif. Walaupun tidak menjamin hasil optimal global, GA konvergen ke optimal global. Desain skema bank kapasitor berbasis kebutuhan kompensasi daya reaktif yang dievaluasi secara stokastik mampu memberikan perbaikan faktor daya dengan biaya investasi dan rata-rata biaya perbaikan faktor daya tahunan yang lebih kecil daripada desain skema bank kapasitor berbasis kebutuhan kompensasi daya reaktif maksimum.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menghaturkan terima kasih kepada Direktur Politeknik Negeri Bali dan Kepala P3M PNB yang telah memberikan kesempatan dan bantuan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Daftar Pustaka

- [1]. El-Hadidy, Mohamed A, dkk., 2007, *The Impact of Capacitor Bank Installation on The Performance of Distribution Systems – A Case Study*, Paper 0274 on 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna.
- [2]. *Peraturan Presiden RI No. 8 Tahun 2011 tentang tarif tenaga listrik yang disediakan oleh Perusahaan Perseroan (Persero) PT. Perusahaan Listrik Negara.*
<http://pln.co.id/dataweb/TTL2010>
- [3]. Chang C. S., Yu Zhemin, 2004, "Distributed Mitigasi of Voltage Sag by Optimal Placement of Series Compensation Devices Based on Stochastic Assessment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2.
- [4]. Pirjo Heine, dkk., 2005, *The Reliability Analysis of Distribution Systems with Different Overvoltage Protection Solutions*, Paper pada 15th PSCC, Liege.
- [5]. Patne, Nita R., Thakre K. L., 2010, "Effect of transformer on stochastic estimation of voltage sag due to faults in the power systems" : a PSCAD/EMTDC simulation, Turk J Elce Eng & Comp Sci, Vol. 18, No. 1.
- [6]. Sangren, E., 1994, *Advances in Design Optimization*, Chapman & Hall.
- [7]. Levitin, I. J. R., Kalynzhny, A., Shenkman, A., Chertkov, M., 2000, "Optimal Capacitor Allocation in Distribution Systems Using a Genetic Algorithm and a Fast Energy Loss Computation Technique", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No. 2.
- [8]. Silva, E. L. da, Gil, H. A., Areiza, J. M., 2000, "Transmission Network Expansion Planning Under an Improved Genetic Algorithm", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 3.
- [9]. Gerbex, S., Cherkaoui, R., Germond, A. J., 2001, "Location of Multi-Type FACTS Devices in a Power System by Means of Genetic Algorithm", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 16, No. 3.
- [10]. SCILLC, 2011, *Power Factor Correction Handbook*, rev. 4,.
- [11]. Fairchild Semiconductor, 2004, *Application Note 42047 – Power Factor Correction (PFC) Basics*.
- [12]. Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Beaty H. Wayne, 1996, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill.
- [13]. Blooming, P. E. T. M., Carnovale, P. E. D. J., *Capacitor Application Issues*, www.eaton.com/ecm/idcplg?, diunduh 31 Agustus 2012.
- [14]. Gustavo Brunello, 2003, *Shunt Capacitor Bank Fundamental and Protection*, Conference for Protective Relay Engineers, Texas A&M University.
- [15]. Schneider Electric Industries SAS, 2009, *Varlogic NR6 NR12 Power Factor Controller – User Manual*, <http://www.schneider-electric.com>
- [16]. ABB, 2010, *Power Factor Controller RVC*, www.abb.com/lowvoltage
- [17]. Kodoatie, R. J., 1995, *Analisis Ekonomi Teknik*, Yogyakarta : Andi.