

Studi *Optimal Power Flow* pada Sistem Kelistrikan 500 kV Jawa-Bali dengan Menggunakan *Particle Swarm Optimization* (PSO)

Taqiyuddin¹, Sasongko Pramono Hadi²

Abstract— This paper presents a Particle Swarm Optimization (PSO) method to solve Optimal Power Flow (OPF) problem. The proposed PSO method is used to minimize power losses in transmission line with involves two stages optimization, namely the minimization of power generation and followed by the minimization of reactive power or Optimal Reactive Power Dispatch (ORPD) in the optimization process. Then, this approach is applied to the 500 kV Java-Bali electrical power system during peak loads. Simulation results on the 500 kV Java-Bali electrical power system showed that, the proposed method is able to reduce power losses in transmission lines and also production costs amounted to 23.37 MW or 17.85% and amounted to RP 631.61 million per hour or 9.63%, respectively, compared with PT. PLN (Persero) operational data.

Intisari— Paper ini menyajikan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk menyelesaikan masalah *Optimal Power Flow* (OPF). Metode PSO yang diusulkan digunakan untuk meminimalkan rugi-rugi daya saluran transmisi dengan melibatkan dua tahapan optimisasi, yakni minimisasi daya pembangkitan dan diikuti dengan minimisasi daya reaktif atau *Optimal Reactive Power Dispatch* (ORPD) dalam satu proses optimisasi. Kemudian, pendekatan ini diterapkan ke sistem kelistrikan 500 kV Jawa-Bali pada saat pembebanan puncak. Hasil simulasi pada sistem kelistrikan 500 kV Jawa-Bali menunjukkan bahwa, metode yang diusulkan mampu mereduksi rugi-rugi daya saluran transmisi dan juga biaya produksi masing-masing sebesar 23,37 MW atau 17,85% dan sebesar Rp 631,61 juta perjam atau 9,63% dibandingkan dengan data operasional PT. PLN (Persero).

Kata Kunci— *Optimal Power Flow* (OPF), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Optimal Reactive Power Dispatch* (ORPD), sistem kelistrikan 500 kV Jawa-Bali.

I. PENDAHULUAN

Dalam sistem kelistrikan, permasalahan mengoperasikan sistem kelistrikan secara optimal menjadi semakin penting seiring dengan meningkatnya beban dan semakin mahal dan terbatasnya sumber energi primer dan keterbatasan kapasitas peralatan operasi. Upaya untuk mengoptimalkan penyaluran daya ke beban menjadi semakin penting, baik menyangkut

daya aktif dalam penyaluran daya listrik dengan tetap mempertahankan kualitas tegangan sistem. Bagian kedua menjadi titik berat penelitian dalam studi *Optimal Power Flow* (OPF) ini.

Gagasan OPF diperkenalkan pada awal 1960-an sebagai perluasan *Economic Dispatch* (ED) konvensional untuk menentukan pengaturan optimal dari variabel kontrol dengan tetap mematuhi variasi kendala yang ada. Istilah ini digunakan sebagai sebutan umum untuk serangkaian besar masalah optimisasi jaringan yang terkait [1].

Perkembangan analisis OPF sudah mengalami perjalanan yang sangat panjang untuk kemudian menjadi algoritma yang sukses untuk diaplikasikan penggunaannya, sejak pertama kali diperkenalkan. Berbagai metode telah dikembangkan sampai saat ini, mulai dari algoritma OPF klasik seperti Metode Newton, Metode Gradient, dan Pemrograman Linier. Begitu pula dengan algoritma terbaru seperti metode *Interior Point*, *Genetic Algorithm* (GA), ataupun dengan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO).

Berbagai penelitian terdahulu terkait dengan OPF yang menitikberatkan pada minimisasi biaya pembangkit telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya dengan menggunakan pendekatan algoritma PSO, baik yang konvensional maupun dengan PSO yang sudah dimodifikasi pada [2]-[4]. Demikian pula penelitian lainnya tentang minimisasi rugi-rugi daya di saluran transmisi atau biasa juga dikenal sebagai *Optimal Reactive Power Dispatch* (ORPD) dengan menggunakan algoritma PSO pada [5]-[8]. Beberapa peneliti lainnya menggunakan metode selain PSO atau menggabungkan PSO dengan metode lain untuk menyelesaikan masalah OPF pada [9]-[11].

Dalam penelitian terkait OPF ini, pendekatan algoritma PSO digunakan untuk meminimalkan rugi-rugi daya di saluran transmisi yang dilakukan dengan terlebih dahulu meminimalkan daya pembangkitan yang kemudian hasilnya diumpankan pada proses ORPD.

II. OPTIMAL POWER FLOW (OPF)

OPF pertamakali diperkenalkan oleh Carpentier pada tahun 1962. Tujuan OPF adalah untuk menemukan pengaturan optimal dari suatu jaringan sistem daya dengan mengoptimalkan fungsi tujuan sistem seperti biaya pembangkitan total, rugi-rugi sistem, penyimpangan tegangan bus, emisi unit pembangkit, jumlah tindakan pengendalian, dan *load shedding* sambil memenuhi persamaan aliran daya, keamanan sistem, dan batasan operasi peralatan. Variabel kontrol yang berbeda, beberapa di antaranya adalah output daya nyata dan tegangan dari generator, pengaturan tap transformator, penggeseran fase, kapasitor dan reaktor yang

¹ Mahasiswa Pascasarjana, Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika No. 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA (e-mail: taqiyuddin.rahman@gmail.com)

² Pengajar, Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika No. 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA (e-mail: sasongko@te.ugm.ac.id)

diaktifkan, yang dimanipulasi untuk mencapai pengaturan jaringan yang optimal berdasarkan masalah formulasi [12].

Ketika semua variabel kontrol yang digunakan dalam minimisasi biaya (seperti kelayakan ketika kendala kontinjensi disertakan), minimisasi rugi-rugi daya menjadi tidak diperlukan. Namun, ketika minimisasi biaya dilakukan hanya melibatkan pembangkitan daya aktif sebagai variabel kontrol, maka perhitungan minimisasi rugi-rugi dengan menggunakan suatu set variabel kontrol yang berbeda dapat berguna dalam mendapatkan profil tegangan yang lebih baik dan aliran arus yang lebih kecil dalam saluran transmisi [1].

A. *Pemodelan Fungsi Minimisasi Rugi-rugi Daya* [1]

Fungsi tujuan (obyektif) untuk diminimalkan diberikan oleh jumlah rugi-rugi saluran sebagai :

$$P_L = \sum_{k=1}^{N_L} P_{lk} \tag{1}$$

dengan P_L sebagai rugi-rugi daya aktif total dan P_{lk} sebagai rugi-rugi daya aktif pada saluran k.

Rugi-rugi saluran individual P_{lk} dapat diekspresikan dalam bentuk tegangan dan sudut fase sebagai :

$$P_{lk} = g_k [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad k = 1, \dots, N_L \tag{2}$$

dengan g_k konduktansi seri pada saluran k, v_i dan v_j masing-masing adalah tegangan pada bus i dan bus j, serta θ_i dan θ_j adalah masing-masing sebagai sudut fase tegangan pada bus i dan bus j.

Kendala-kendala yang harus dipenuhi dalam pemodelan ini, adalah sebagai berikut :

- 1) Persamaan aliran daya aktif pada kondisi stabil di seluruh bus kecuali bus *slack* :

$$P_{gi} - P_{di} - v_i \sum_{j=N_i} v_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0$$

- 2) Persamaan aliran daya reaktif pada kondisi stabil di seluruh bus P-Q (bus beban)

$$Q_{gi} - Q_{di} - v_i \sum_{j=N_i} v_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

- 3) Batas daya reaktif pembangkit pada setiap bus generator (bus P-V)

$$Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max}, i \in N_g$$

- 4) Batas magnitude tegangan pada setiap bus

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, i \in N_g$$

- 5) Kendala tap-setting transformator

$$T_k^{\min} \leq T_k \leq T_k^{\max}$$

- 6) Kendala batas aliran daya pada setiap saluran transmisi :

$$S_i \leq S_i^{\max}$$

III. *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION*

Particle Swarm Optimization, disingkat PSO, didasarkan pada perilaku koloni atau segerombolan serangga, seperti semut, rayap, lebah, dan tawon, kawanan burung; ataupun ikan dalam mencari makanan. Algoritma PSO meniru perilaku sosial organisme ini. Kata partikel menunjukkan, misalnya, lebah di koloni atau burung di kawanan. Setiap individu atau partikel dalam kawanan berperilaku dalam cara didistribusikan dengan menggunakan kecerdasan sendiri dan kecerdasan kolektif atau kelompok kawanan. sebagaimana, jika satu partikel menemukan jalur yang baik menuju makanan, sisa kawanan juga akan langsung mampu mengikuti jalur yang baik bahkan meskipun lokasi mereka jauh dari kawanan tersebut.

Dalam PSO, sejumlah N partikel membentuk kawanan yang berkembang atau terbang di seluruh ruang pencarian untuk mencari solusi optimal atau dekat dengan optimal [12].

Metode optimisasi berdasarkan kecerdasan kawanan, sifat perilaku inilah yang menjadi inspirasi dari algoritma PSO yang bertentangan dengan algoritma genetika, yang prosedurnya berbasis evolusi [13]. Algoritma PSO awalnya diusulkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995 [14].

Koordinat setiap partikel merupakan solusi yang mungkin dengan dua vektor yang terkait dengan itu, vektor posisi X dan vektor kecepatan V. Selama pencarian mereka, partikel berinteraksi satu sama lain dengan cara tertentu untuk mengoptimalkan pengalaman pencarian mereka. Ada varian yang berbeda dari paradigma partikel kawanan, tetapi yang paling umum adalah model P_{gb} , dimana seluruh populasi dianggap sebagai lingkungan tunggal selama proses optimisasi. Dalam setiap iterasi, partikel dengan solusi terbaik menyampaikan informasi koordinat posisinya (P_{gb}) kepada kawanan yang lain.

Dengan demikian variabel didefinisikan sebagai berikut.

Posisi dan kecepatan partikel ke-i pada waktu t adalah n-dimensi vektor dinotasikan dengan

$$X_i(t) = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}) \in S \tag{3}$$

$$V_i(t) = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,n}) \in S \tag{4}$$

Posisi terbaik sebelumnya dari partikel ke-i pada waktu t dan Posisi global terbaik yang pernah dicapai di antara semua partikel adalah titik di S, yang dinotasikan dengan

$$P_i(t) = (p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,n}) \in S \tag{5}$$

$$P_{gb} = (p_{gb,1}, p_{gb,2}, \dots, p_{gb,n}) \in S \tag{6}$$

Kemudian, masing-masing partikel diperbarui koordinatnya berdasarkan pada pengalaman pencarian terbaiknya sendiri (P_i) dan P_{gb} sesuai dengan kecepatan dan persamaan posisi baru berikut:

$$V_i(t+1) = \theta \times V_i(t) + C_1 \times r_1 \times (P_i - X_i(t)) + C_2 \times r_2 \times (P_{gb} - X_i(t)) \tag{7}$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \tag{8}$$

dengan θ adalah bobot inersia, C_1 , C_2 koefisien akselerasi (*learning rate*), r_1 , r_2 dua pemisah yang dihasilkan angka acak merata dalam kisaran [0,1] ditambahkan dalam model untuk memperkenalkan sifat stokastik.

Bobot inersia θ diperkenalkan oleh Shi dan Eberhart pada tahun 1998, untuk meredam kecepatan selama proses iterasi, sehingga memungkinkan kawanan untuk konvergen lebih akurat dan efisien dibandingkan dengan algoritma PSO yang asli [15]. Bobot inersia dirumuskan sebagai :

$$\theta(i) = \theta_{max} - \left(\frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{i_{max}} \right) \times i \quad (9)$$

dengan θ_{max} dan θ_{min} masing-masing adalah nilai-nilai awal dan akhir dari bobot inersia, dan i_{max} adalah jumlah iterasi maksimum yang digunakan dalam PSO. Nilai-nilai $\theta_{max} = 0,9$ dan $\theta_{min} = 0.4$ yang umum digunakan.

Clerc M pada tahun 1999 melakukan penerapan faktor penyempitan (*constriction factor*) χ pada PSO [16]. Hal ini bertujuan untuk menjamin suatu penelusuran dalam algoritma PSO untuk konvergen lebih cepat. Persamaan dinamis dari PSO menjadi:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + \chi \times V_i(t+1) \quad (10)$$

Dengan

$$\chi = \frac{2}{2 - \phi - \sqrt{\phi^2 - 4\phi}} \quad (11)$$

dan $\phi = c_1 + c_2$; $\phi > 4$ (12)

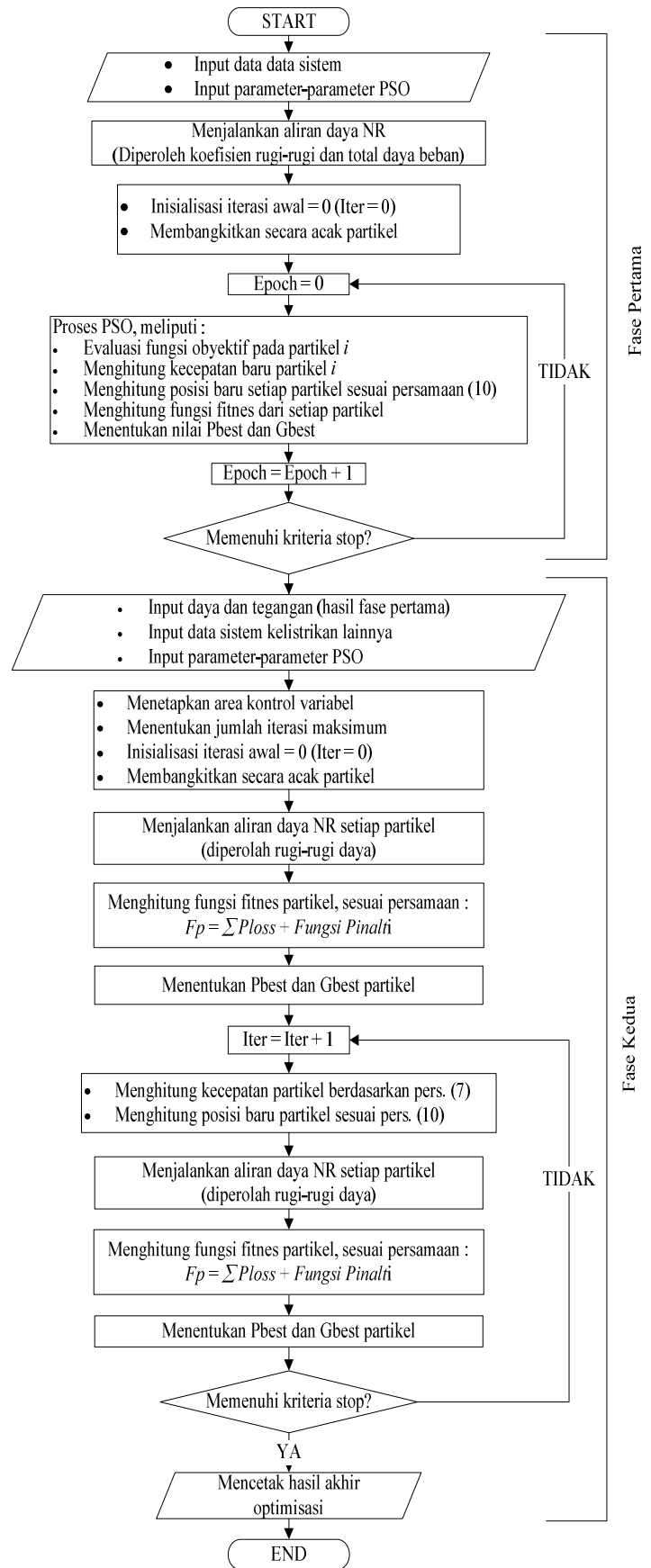
IV. METODOLOGI

Pemodelan sistem dari minimisasi rugi-rugi transmisi pada sistem kelistrikan 500 kV Jawa-Bali yang diusulkan, terdiri dari dua fase yakni fase awal untuk menentukan daya pembangkitan optimal dengan tanpa memperhatikan kondisi profil tegangan pada setiap bus. Kemudian nilai daya pembangkitan dan tegangan tiap bus yang diperoleh pada fase pertama, sebagai data input pada fase kedua untuk menentukan nilai minimisasi rugi-rugi daya transmisi dengan tegangan pada setiap bus generator, tap trafo, dan injeksi kapasitor sebagai variable kontrol dengan menggunakan ORPD yang berbasis pada algoritma PSO. Diagram alir proses optimisasi ditunjukkan pada Gbr. 1.

A. Prosedur Fase Pertama

Langkah-langkah prosedur pada fase pertama yang mengacu kepada proses *dispatch* daya pembangkit adalah sebagai berikut :

- 1) Menginput data sistem kelistrikan 500 kV Jawa-Bali dan parameter-parameter PSO.



Gbr. 1 Diagram alir proses optimisasi

- 2) Menjalankan aliran daya untuk menentukan koefisien rugi-rugi daya pada sistem kelistrikan. Data koefisien rugi-rugi daya ini menjadi input pada proses selanjutnya.
- 3) Inisialisasi awal posisi dan kecepatan partikel secara acak berdasarkan batas masing-masing unit.
- 4) Memulai proses iterasi, pada epoch = 0, setiap partikel dari populasi membangkitkan keluaran tergantung pada permintaan beban (P_d) dan matriks koefisien rugi-rugi daya.
- 5) Menghitung nilai fungsi fitness, kemudian evaluasi dari masing-masing partikel (P_{gi}) dalam populasi.
- 6) Bandingkan nilai evaluasi fungsi masing-masing individu dengan "personal best (P_{best})"-nya. Evaluasi terbaik nilai antara P_{best} dilambangkan sebagai "global best (G_{best})".
- 7) Pada epoch = $k + 1$, update kecepatan partikel i $V_i(t+1)$ dan posisi partikel i $X_i(t+1)$ dengan menggunakan faktor bobot inersia θ sesuai "(9)".
- 8) Perbarui posisi tiap partikel pada epoch = $k + 1$ dengan menambahkan faktor penyempitan χ (constriction factor) sesuai "(10)".
- 9) Evaluasi nilai P_{best} dari setiap partikel i dan dibandingkan dengan nilai sebelumnya. Nilai P_{best} terbaik dari setiap partikel diset menjadi P_{best} saat ini dan nilai P_{best} terbaik seluruh partikel diset menjadi G_{best} .
- 10) Ulangi langkah 4-9 dan berhenti jika nilai G_{best} pada epoch saat ini memenuhi kriteria eror yang ditetapkan atau jika mencapai nilai iterasi maksimum.

B. Prosedur Fase Kedua

Langkah-langkah prosedur pada fase kedua, merupakan "optimal reactive power dispatch" (ORPD) yang bertujuan untuk meminimasi rugi-rugi daya adalah sebagai berikut :

- 1) Menginput data sistem kelistrikan, dengan nilai daya pembangkit dan tegangan tiap bus berdasarkan nilai yang diperoleh pada fase pertama.
- 2) a. Menetapkan area kontrol variable ($v_1, v_{10}, v_{13}, v_{14}, v_{17}, v_{21}, v_{23}, v_{25}, Q_{C11}, Q_{C15}, Q_{C18}, Q_{C19}, Q_{C22}, Q_{C24}$ dan Q_{C26}) dalam batas area yang dibolehkan,
b. menentukan jumlah populasi, jumlah iterasi maksimum, menentukan nilai parameter-parameter PSO,
c. inisialisasi iterasi awal sama dengan nol (iter = 0),
d. membangkitkan secara acak populasi dari partikel dan posisi awalnya.
- 3) Menjalankan aliran daya Newton-Raphson untuk mencari nilai rugi-rugi daya.
- 4) Menghitung nilai fungsi fitness dari setiap partikel dengan memperhitungkan fungsi penalti yang dapat dinyatakan:

$$Fp = \Sigma P_{loss} + Fungsi\ Penalti \quad (13)$$
- 5) Mencari nilai terbaik individu P_{best} dari seluruh partikel dan nilai terbaik global G_{best} partikel dari nilai fitness.
- 6) Memulai proses iterasi, iter = iter + 1 dan mengeset kriteria eror.
- 7) Menghitung kecepatan dari setiap partikel yang merujuk pada "(7)" dan mengaturnya kembali jika melanggar batas-batas yang telah ditetapkan.
- 8) Menghitung posisi baru dari setiap partikel berdasarkan pada "(10)".
- 9) Menjalankan aliran daya Newton-raphson untuk mencari nilai rugi-rugi daya.

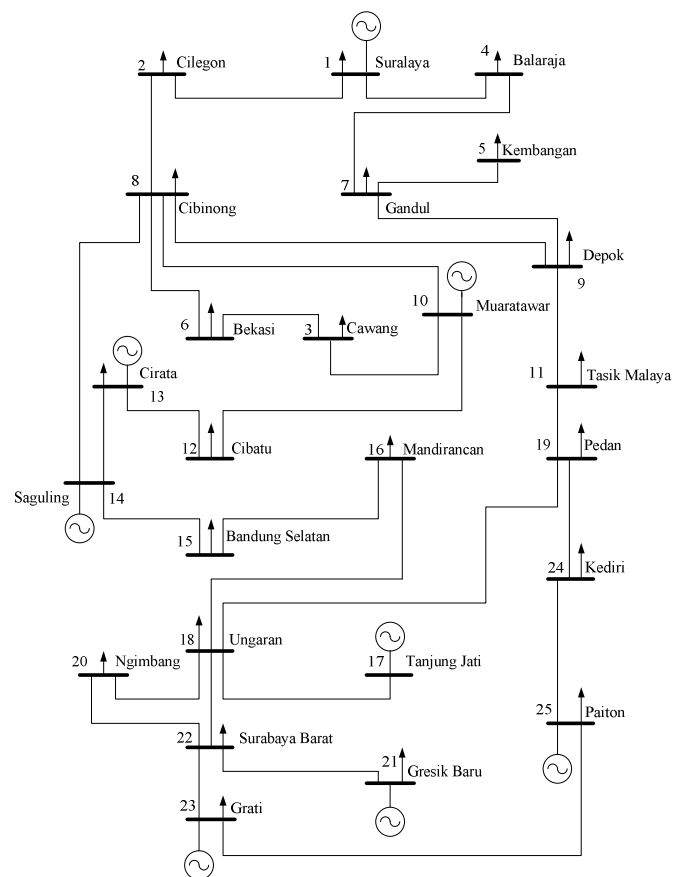
- 10) Menghitung nilai fungsi fitness dari setiap partikel dengan memperhitungkan fungsi penalti, berdasarkan "(11)".
- 11) Dari seluruh partikel, jika nilai fitness saat ini (P), maka nilai P_{best} diset sama dengan nilai P ($P_{best} = P$)
- 12) Mengeset nilai terbaik dari P_{best} sebagai G_{best} .
- 13) Mengulangi langkah ke-6 sampai tercapai eror lebih kecil dari kriteria eror yang telah ditentukan atau jika iterasi maksimum tercapai.
- 14) Terakhir adalah mengkoordinasikan nilai G_{best} partikel yang memberikan nilai optimisasi pada kontrol variabel sedangkan nilai fitnessnya menjadi nilai minimisasi pada rugi-rugi daya.

V. HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

A. Data Sistem Kelistrikan 500 kV Jawa-Bali

Data sistem kelistrikan Jawa-Bali 500 kV yang digunakan dalam penelitian ini, meliputi : data bus, pembangkitan dan pembebanan, data saluran transmisi, serta data koefisien biaya pembangkit dan kapasitas pembangkit, mengacu pada [17].

Terdiri dari 8 stasiun pembangkit, 25 bus, dan 30 saluran transmisi. Total permintaan beban adalah 12.058 MW dan 4.650 MVar. Dengan basis daya semu sebesar 1000 MVA. Diagram saluran tunggal sistem kelistrikan 500 kV Jawa-Bali ditunjukkan pada Gbr. 2.



Gbr. 2 Diagram saluran tunggal sistem kelistrikan 500 kV Jawa-Bali

Klasifikasi sistem bus pada sistem kelistrikan Jawa-Bali dibedakan sebagai berikut :

- 1) Bus *slack* adalah bus 25 (bus stasiun pembangkit Paiton)

- 2) Bus generator pengontrol (bus P-V)
Terdiri dari 7 buah bus generator pengontrol yakni : bus 1 (Suralaya), bus 10 (Muaratawar), bus 13 (Cirata), bus 14 (Saguling), bus 17 (Tanjung Jati), bus 21 (Gresik), dan bus 23 (Grati).
- 3) Bus beban (bus P-Q)
Bus-bus lainnya merupakan bus beban (bus P-Q) yang terdiri dari 17 buah bus.

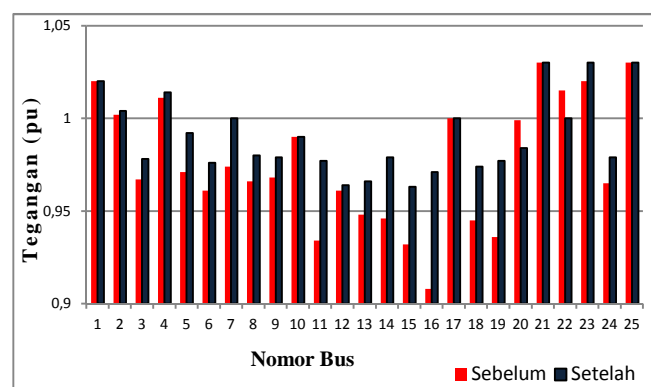
B. Hasil Simulasi Sistem Kelistrikan 500 kV Jawa-Bali

Kondisi profil tegangan sebelum dan setelah dilakukan optimisasi, ditunjukkan pada Gbr. 3. Data sebelum optimisasi diperoleh dari aliran daya dengan menggunakan aliran daya Newton-Raphson pada tahapan awal. Sedangkan setelah optimisasi, diperoleh setelah dilakukannya tahapan akhir proses minimisasi rugi-rugi daya saluran transmisi.

Dari Gbr. 3 sebelum optimisasi, pada bus 11, 13, 14, 15, 16, 18, dan bus 19 terjadi penurunan tegangan di bawah batas tegangan minimal sebesar -5% atau 0,95 pu. Sedangkan setelah optimisasi, telah dilakukan perbaikan profil tegangan yang cukup signifikan, sehingga memenuhi kriteria dalam batasan tegangan yang diperbolehkan.

Untuk aplikasi metode yang diusulkan, ukuran partikel yang digunakan sebanyak 30 dan maksimum iterasi adalah 50. Parameter-parameter PSO yang digunakan adalah konstanta akselerasi (*learning rate*) $C_1 = C_2 = 2,05$, dan $\theta_{max} = 0,9$ serta $\theta_{min} = 0,4$. Tabel I menunjukkan hasil dari metode yang digunakan setelah dijalankan sebanyak 10 kali simulasi. Meliputi nilai maksimum, minimum, rerata, dan standard deviasi dari total rugi-rugi daya saluran transmisi serta total biaya pembangkitan dari sistem kelistrikan 500 kV Jawa-Bali. Sedangkan Gbr. 4 menunjukkan grafik optimisasi total rugi-rugi daya saluran transmisi berdasarkan iterasi yang dilakukan.

Perbandingan salah satu hasil simulasi dari metode yang diusulkan dengan data operasional PLN ditunjukkan pada Tabel II. Dengan demikian, jika dibandingkan dengan data operasional PLN yang diperoleh pada hari Rabu, tanggal 30

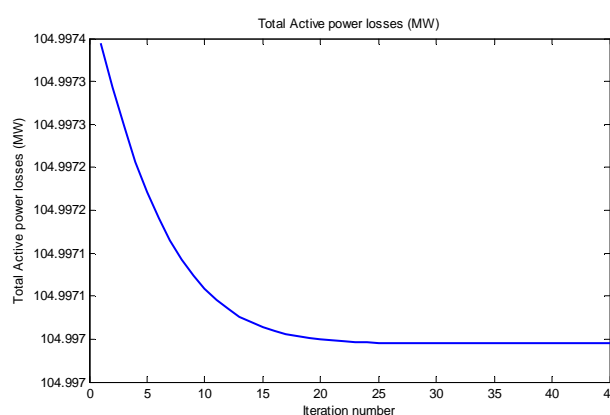


Gbr. 3 Profil tegangan sebelum dan setelah optimisasi

TABEL I
HASIL SIMULASI SISTEM KELISTRIKAN 500 kV JAWA-BALI

Nilai	Rugi-rugi Daya (MW)	Biaya pembangkitan (dalam Ribuan Rp/jam)
Maks (terjelek)	118,34	6.127.256,63
Min (terbaik)	107,57	5.841.247,65
Rerata	114,27	5.988.212,43
Standar Deviasi	3,60	99.263,46

November 2011, pukul 19:00 (beban puncak PLN), maka terjadi penurunan rugi-rugi daya saluran transmisi sebesar 23,37 MW atau 17,85%, sedangkan biaya pembangkitan dapat direduksi sebesar Rp 631,61 juta perjam atau 9,63 %.



Gbr. 4 Grafik Total rugi-rugi daya per-iterasi

VI. KESIMPULAN

Di dalam studi OPF ini, algoritma PSO digunakan sebagai basis optimisasi dengan membagi kedalam dua tahapan, yakni tahap optimisasi daya pembangkit kemudian dilanjutkan dengan tahap pengaturan variabel kontrol untuk meminimalkan rugi-rugi daya saluran transmisi sebagai fungsi tujuan.

Minimisasi rugi-rugi daya saluran transmisi dengan menerapkan ORPD menjadi lebih optimal lagi ketika daya dari pembangkit sistem telah terlebih dahulu dioptimalkan, hal ini ditunjukkan dari hasil yang diperoleh pada sistem kelistrikan 500 kV Jawa-Bali dibandingkan dengan data operasional PLN sebagai berikut : reduksi rugi-rugi daya saluran transmisi sebesar **23,37 MW** atau **17,85%**, dan reduksi biaya pembangkitan sebesar **Rp 631,61 Juta perjam** atau **9,63 %**. Hal ini berlaku untuk nilai permintaan pembebanan yang serupa yakni sebesar 12.058 MW dan 4.650 MVar.

TABEL II
PERBANDINGAN DENGAN DATA OPERASIONAL PLN

Pembangkit	Data Operasional PLN		Metode yang diusulkan	
	Daya (MW)	Biaya (Ribuan Rp/jam)	Daya (MW)	Biaya (Ribuan Rp/jam)
Suralaya	2.792,94	1.125.458	4.025,00	1.561.229,87
Muaratawar	1.785,00	1.819.867	1.300,40	1.326.687,67
Cirata	594,00	-	594,00	-
Saguling	662,00	-	662,00	-
Tanjungjati	1.971,00	632.633	1.481,17	476.724,78
Gresik	1.371,00	1.273.483	895,62	828.401,01
Grati	441,00	731.926	412,80	696.922,07
Paiton	2.572,00	972.784	2.794,58	1.034.572,55
Total	12.188,94	6.556.151,00	12.165,57	5.924.537,95
Rugi Daya (MW)	130,94		107,57	
Reduksi Losses (MW)	-		23,37	
Reduksi Biaya (Ribuan Rp/jam)	-		631.613,05	

REFERENSI

- [1] J. A. Momoh, *Electric power system applications of optimization*, Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [2] M. A. Abido, "Optimal power flow using particle swarm optimization," *Int. Journal of electrical power and energy systems*, 24 563-571, 2001.
- [3] J. Y. Kim, H. S. Lee, dan J. H. Park, "A modified particle swarm optimization for optimal power flow," *journal of electrical engineering & technology*, Vol. 2, No. 4, pp. 413-419, 2007.
- [4] M. R. AlRashidi, M. F. AlHajri, dan M. E. El-Hawary, "Enhanced particle swarm optimization approach for solving the non-convex optimal power flow," *world academy of science, engineering and technology*, Vol. 38, 2010.
- [5] B. Zhao, C. X. Guo, dan Y. J. Cao, "A multiagent-based particle swarm optimization approach for optimal reactive power dispatch," *IEEE transactions on power systems*, Vol. 20, No. 2, May 2005.
- [6] J. Hazra, dan A. K. Sinha, "A study on real and reactive power optimization using particle swarm optimization," *second international conference on industrial and information systems, ICIIS 2007*, 8 – 11 August 2007, Sri Lanka, 2007.
- [7] J. Rahul, Y. Sharma, dan D. Birla, "A new attempt to optimize optimal power flow based transmission losses using genetic algorithm," *fourth international conference on computational intelligence and communication networks*, 2012.
- [8] G. Cai, Z. Ren, and T. Yu, "Optimal reactive power dispatch based on modified particle swarm optimization considering voltage stability," *power engineering society general meeting*, IEEE, 2007.
- [9] W. Liu, M. Li, dan X. Wang, "An improved particle swarm optimization algorithm for optimal power flow," *IEEE 6th International power electronics and motion control conference. IPEMC '09*, 2009.
- [10] M. Y. Ali, and R. Raahemifar, "Reactive power optimization based on hybrid particle swarm optimization algorithm," *25th IEEE canadian conference on electrical and computer engineering (CCECE)*, 2012.
- [11] Purwoharjono, O. Penangsang, M. Abdillah, dan A. Soeprijanto, "Voltage control on 500kV Java-Bali electrical power system for power losses minimization using gravitational search algorithm," *I³ international conference on informatics and computational intelligence*, 2011.
- [12] J. Zhu, *Optimization of power system operation*, A John Wiley & Sons, Inc. 2009.
- [13] S. S. Rao, *Engineering optimization : theory and practice*, fourth edition. John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [14] J. Kennedy, dan R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *proceedings IEEE international conference on neural networks*, 1995.
- [15] Y. Shi, dan R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," *the 1998 IEEE international conference on evolutionary computation proceedings, IEEE world congress on computational intelligence*, 1998.
- [16] M. Clerc, "The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization," *Proc. 1999 Congress on Evolutionary Computation*, Washington, DC, pp. 1951-1957. Piscataway, NJ: IEEE Service Centre, 1999.
- [17] S. Kanata, Sarjiya, dan S. P. Hadi, "Modified Improved Particle Swarm Optimization (MIPSO) sebagai Solusi Economic Dispatch pada Sistem Kelistrikan 500 Kv Jawa-Bali," *Transmisi – Jurnal ilmiah teknik elektro Undip*, Vol. 15 No. 2 (2013), Semarang-Jawa tengah, Indonesia, 2013.