

Studi *Optimal Power Flow* Sistem Kelistrikan 500 kV Jawa Bali dengan Metode Algoritma Genetika

Yassir¹, Sarjiya², T. Haryono³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi
Universitas Gadjah Mada

Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 Indonesia

e-mail: yassirasnawi@gmail.com, sarjiya@ugm.ac.id, thr@ugm.ac.id

ABSTRAK

Salah satu solusi untuk mengurangi kenaikan harga listrik adalah dengan melakukan optimisasi biaya pada proses produksi energi listrik. *Optimal Power Flow (OPF)* adalah salah satu metode untuk meminimiliasi biaya bahan bakar pembangkit dengan tetap menjaga batasan keandalan sistem. Pada penelitian ini diaplikasikan metode *Genetic Algorithm with tournament selection* untuk menyelesaikan masalah *OPF*. Efektifitas metode diuji pada kasus sistem IEEE 30 bus. Hasil menunjukkan lebih baik dari metode *differential evolution* dan *evolutionary programming*. Simulasi pada sistem tenaga Jawa-Bali 500 kV dengan metode yang diusulkan dapat mengurangi biaya pembangkitan sebesar 12,19% dibanding dengan data operasi PLN.

Kata kunci: *Optimal Power Flow; Genetic Algorithm; fitness; Tournament selection*

PENDAHULUAN

Kebutuhan pembangkit thermal terhadap bahan bakar dengan jumlah ketersediaan yang semakin menipis dan semakin mahal, membuat biaya produksi listrik semakin meningkat. Dalam komponen biaya pokok penyediaan listrik di jaringan Jawa Bali, kontribusi biaya bahan bakar sekitar 60% terhadap total biaya. Sementara itu, biaya bahan bakar pembangkit didominasi oleh biaya penyediaan gas, batu bara dan minyak untuk jenis pembangkit thermal. Salah satu solusi untuk mengurangi kenaikan harga listrik adalah dengan melakukan optimisasi biaya pada proses produksi energi listrik. Dalam sistem tenaga interkoneksi, salah satu optimisasi biaya dilakukan dengan

mengatur daya aktif dan daya reaktif masing-masing pembangkit untuk meminimalkan biaya operasi. Metode ini disebut *optimal power flow (OPF)* [1].

OPF menggunakan variabel kontrol untuk membantu meminimalkan biaya operasi sistem tenaga listrik. OPF mempunyai kekangan dengan memperhitungkan batas daya aktif dan reaktif pembangkit, batas kemampuan daya dari sistem transmisi, tap transformator dan tegangan pembangkit [2].

Banyak teknik solusi telah diterapkan untuk masalah OPF seperti *Linear Programming (LP)* [3,4], *Non-Linear programming (NLP)* [5] dan Metode *Interior Point (IP)* [6]. Metode tradisional tersebut dapat

dilakukan jika kurva karakteristik *incremental cost* diidealkan terlebih dahulu, sehingga kurva terbentuk menjadi halus dan *convex* dan dengan demikian dipaksa untuk menyederhanakan hubungan dalam rangka untuk memastikan konveksitas. Untuk unit pembangkit yang memiliki kurva *non-convex* tidak dapat di selesaikan dengan menggunakan metoda tradisional ini. Metode optimasi klasik sangat sensitif terhadap titik awal dan sering menghasilkan solusi optimasi lokal atau menyimpang sama sekali. Metode ini biasanya terbatas pada kasus-kasus OPF tertentu dan tidak menawarkan kebebasan yang besar dalam fungsi tujuan atau jenis kendala yang dapat digunakan. Hal itu penting untuk mengembangkan, algoritma baru, yang lebih umum dan dapat diandalkan yang mampu menggabungkan kendala baru yang timbul.

Salah satu teknik untuk mengatasi masalah tersebut digunakan metode optimasi global heuristic. Penggunaan metode heuristik sudah banyak digunakan untuk menyelesaikan masalah OPF, seperti *differential evolution* (DE) [7-8], *intelligent search evolution algorithm* (ISEA) [9], *particle swarm optimization* (PSO) [10], *distributed algorithms* (DA) [11] dan *genetic algorithm* (GA) [12-14]. Metode GA dapat digunakan untuk menyelesaikan

masalah OPF dengan kurva *non-convex*. GA tidak dibatasi oleh bentuk kurva karakteristik pembangkit, karena algoritma ini bekerja dengan menggunakan metode probabilitas, bukan deterministik, GA juga mencari solusi dari populasi yang dibangkitkan sehingga GA dapat memberikan banyak pilihan solusi.

Metode-metode GA [12-14] diatas menggunakan seleksi *roulette wheel* untuk seleksi orang tua. Sistem seleksi ini tidak memberikan konvergensi hasil yang cepat pada kasus-kasus tertentu seperti pada sistem yang besar. Hasil yang diberikan biasanya jauh berbeda untuk setiap kali program dijalankan.

Pada penelitian ini diusulkan metode GA dengan *tournamen selection*. Penggunaan seleksi ini mempunyai keunggulan untuk meningkatkan kemampuan menemukan nilai *fitness* dengan lebih cepat dan konstan sehingga waktu yang dibutuhkan untuk konvergen lebih cepat. Pengkodean kromosom menggunakan *real coding* dengan fungsi fitness yang melibatkan fungsi biaya pembangkitan ditambah hubungan pembatas pada nilai minimum biaya total pembangkit untuk memperoleh biaya operasi pembangkit yang minimum dengan memperhitungkan batasan maksimum dan minimum dari pembangkit, dan batasan

tegangan pada bus generator. Pengujian efektifitas metode dilakukan pada kasus sistem IEEE 30 bus dan sistem tenaga 500 kV Jawa-Bali.

Model Matematika Optimal Power Flow

Fungsi objektif diberikan oleh model biaya bahan bakar berikut:

$$F(P_g) = \sum_{i=1}^{N_g} r_i + S_i P_{g_i} + X_i P_{g_i}^2$$

dengan batasan kesetaraan mewakili keseimbangan daya aktif dan reaktif:

$$P_i - P_{g_i} + P_{d_i} = 0 \quad i = 1, \dots, N_b$$

$$Q_i - Q_{g_i} + Q_{d_i} = 0 \quad i = 1, \dots, N_b$$

dimana persamaan daya aktif dan reaktif setiap bus diberikan pada persamaan (4) dan (5).

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{N_b} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\alpha_i - \alpha_j + \beta_{ij})$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^{N_b} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\alpha_i - \alpha_j + \beta_{ij})$$

dengan kendala pertidaksamaan:

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad i = 1 \dots n_g$$

$$P_{g_i}^{min} \leq P_{g_i} \leq P_{g_i}^{max} \quad i = 1 \dots n_g$$

$$Q_{g_i}^{min} \leq Q_{g_i} \leq Q_{g_i}^{max} \quad i = 1 \dots n_g$$

Dengan melibatkan total rugi-rugi daya maka hubungan pembatas pada nilai minimum $F(P_g)$ adalah :

$$\sum_{i=1}^{n_g} P_i - \sum P_L - P_D = 0 \tag{9}$$

dengan :

$F(P_g)$ = Total biaya bahan bakar, sebagai fungsi dari P_g

P_{g_i} = Daya aktif pembangkit pada bus i

P_{d_i} = Daya aktif beban pada bus i

Q_{g_i} = Daya reaktif pembangkit pada bus i

Q_{d_i} = Daya reaktif beban pada bus i

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ = Parameter biaya bahan bakar unit i

N_g = Jumlah unit pembangkit

N_b = Jumlah total bus

V_i, V_j = Tegangan pada bus i dan j

θ_i, θ_j = Sudut pada bus i dan j

A_i = Daya aktif injeksi pada node i

Q_i = Injeksi daya reaktif pada node i

R_L = Rugi-rugi transmisi

P_D = Daya total beban

Y_{ij} = Besaran matriks admitansi baris ke-i dan kolom ke-j

θ_{ij} = Sudut elemen matriks admitansi pada posisi i,j

V_i^{min}, V_i^{max} = Batasan besarnya tegangan pada bus i

$Q_{gi}^{min}, Q_{gi}^{max}$ = Batasan daya reaktif dari pembangkit i .

Algoritma Genetika Umum

Algoritma genetika adalah algoritma komputasi untuk masalah optimasi yang terinspirasi oleh teori evolusi untuk mencari solusi suatu permasalahan. Terdapat banyak sekali variasi pada Algoritma Genetika, salah satunya adalah Algoritma Genetika untuk masalah optimasi kombinasi, yaitu mendapatkan nilai solusi yang optimal terhadap suatu masalah yang memiliki banyak kemungkinan solusi.

Algoritma genetika pertama kali dirintis oleh John Holland dari Universitas Michigan pada tahun 1960-an, algoritma genetika telah diaplikasikan secara luas pada berbagai bidang. Algoritma Genetika banyak digunakan untuk memecahkan masalah optimasi, walaupun pada kenyataannya juga memiliki kemampuan yang baik untuk masalah-masalah selain optimasi. John Holland menyatakan bahwa setiap masalah yang berbentuk adaptasi (alam maupun buatan) dapat diformulasikan dalam teknologi genetika.

Penerapan Proposed Method Inisialisasi Populasi

Suatu matrik dengan nilai pada setiap elemennya berupa bilangan acak antara 0 dan 1 dibangkitkan. Dalam populasi tersebut, satu baris adalah satu individu, setiap individu terdapat kromosom, dan setiap satu kromosom terdiri atas beberapa gen. Skema pengkodean kromosom yang digunakan dalam penelitian ini adalah *real number encoding*. Setiap kromosom dalam populasi tersebut dikodekan menjadi nilai pembangkitan daya aktif pada pembangkit sesuai batasan nilai minimum dan maksimumnya.

$$P = MW_{\min} + (MW_{\max} - MW_{\min}) \cdot \text{kromosom} \quad (10)$$

Nilai Fitness

Suatu individu atau kromosom dievaluasi berdasarkan suatu fungsi tertentu sebagai ukuran performasinya. Fungsi yang digunakan untuk mengukur nilai kecocokan atau derajat optimalitas suatu kromosom disebut dengan *fitness function*. Nilai yang dihasilkan dari fungsi tersebut menandakan seberapa optimal solusi yang diperoleh.

Dalam kasus yang dibahas dalam penelitian ini tujuannya adalah minimasi

maka fitness adalah kebalikan dari nilai paling maksimum sehingga nilai *fitness* ditentukan oleh satu dibagi jumlah total biaya pembangkitan, total rugi-rugi dan hubungan pembatas pada nilai minimum dari persamaan (9). Fungsi tujuannya adalah untuk mencari biaya pembangkitan dan besar rugi jaringan yang minimal sehingga jika semua batasan pada analisis aliran daya optimal telah terpenuhi, maka *fitness* dapat dihitung dari variabel tersebut.

$$F = \frac{1}{\sum F(P_g) + P_L + (\sum P_g - \sum P_L - P_D)}$$

Seleksi Orang Tua

Dalam bentuk paling sederhana, metode ini mengambil dua kromosom secara random dan kemudian menyeleksi salah satu yang bernilai fitness paling tinggi untuk menjadi orang tua pertama. Cara yang sama dilakukan lagi untuk mendapatkan orang tua kedua. Metode *tournament selection* yang lebih rumit adalah dengan mengambil m kromosom secara random. Kemudian kromosom bernilai fitness tertinggi dipilih sebagai orang tua pertama jika bilangan random yang dibangkitkan kurang dari suatu nilai batas yang ditentukan p dalam interval $[0,1]$. Pemilihan orang tua akan dilakukan secara random dari $m - 1$ kromosom yang

ada jika bilangan random yang dibangkitkan lebih dari atau sama dengan p . Pada *tournament selection*, variabel m adalah *tournament size* dan p adalah *tournament probability*.

Pindah Silang

Proses pindah silang adalah salah satu operator penting dalam algoritma genetika, metode dan tipe pindah silang yang dilakukan tergantung dari *encoding* dan permasalahan yang diangkat. Sebuah kromosom yang mengarah pada solusi yang bagus dapat diperoleh dari proses memindahsilangkan dua buah kromosom. Pindah silang dikendalikan oleh probabilitas tertentu p_c . Artinya, pindah silang dilakukan hanya jika suatu bilangan random yang dibangkitkan kurang dari p_c yang ditentukan. Pada umumnya p_c diset mendekati 1, misalnya 0,8.

Mutasi

Mutasi merupakan proses mengubah nilai dari satu atau beberapa gen dalam suatu kromosom. Mutasi ini berperan untuk menggantikan gen yang hilang dari populasi akibat seleksi yang memungkinkan munculnya kembali gen yang tidak muncul pada inisialisasi populasi.

Elitisme

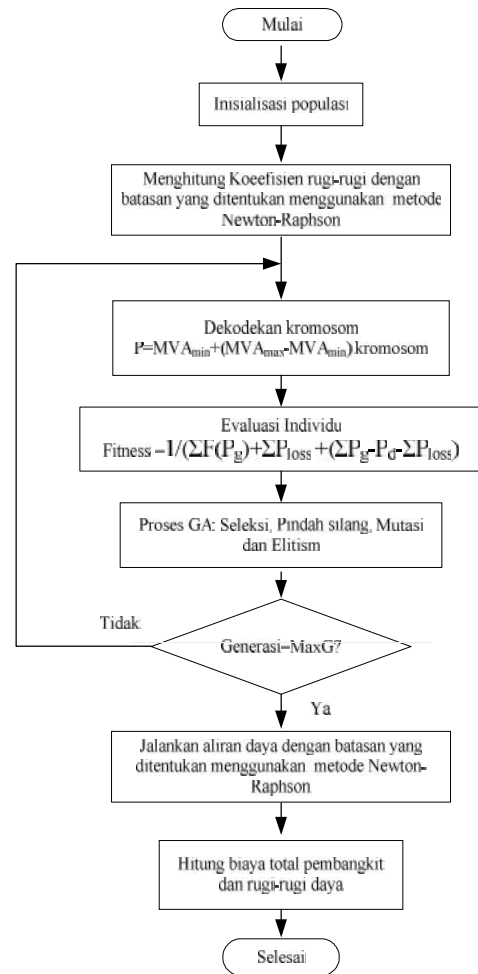
Karena seleksi dilakukan secara random, maka tidak ada jaminan bahwa suatu individu bernilai fitness tertinggi akan selalu terpilih. Walaupun individu bernilai fitness tertinggi terpilih, mungkin saja individu tersebut akan rusak (nilai fitness turun) karena proses pindah silang. Untuk menjaga individu tersebut tidak hilang selama evolusi, maka perlu dibuat satu atau beberapa kopinya. Prosedur ini dikenal sebagai *elitisme*.

Tahapan Penelitian

Tahap-tahap penelitian dengan metode yang ditawarkan adalah sebagai berikut:

1. Membangkitkan populasi awal
2. Menghitung koefisien rugi-rugi dengan batasan yang ditentukan menggunakan metode Newton-Raphson.
3. Mendekodekan kromosom
4. Evaluasi individu untuk mencari fitness.
5. Melakukan proses seleksi dengan metode *tournament selection*, Elitisme, pindah silang dan mutasi.
6. Ulangi langkah 5 - 7 sampai generasi maksimum.
7. Menghitung daya pembangkit, rugi-rugi dan biaya total pembangkit.

Flow chart tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. *Flow chart* tahapan penelitian

Hasil dan Pembahasan

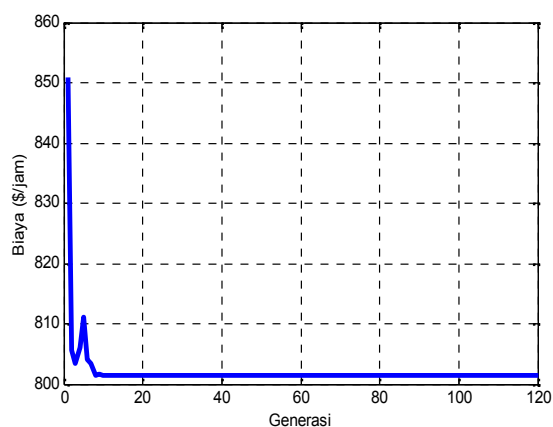
Kasus 1: Sistem IEEE 30 bus

Sebelum diterapkan pada sistem Jawa Bali, untuk mengetahui efektifitas dalam menyelesaikan masalah OPF, metode yang diusulkan terlebih dahulu diuji dengan sistem IEEE 30 bus. Sistem ini mempunyai 6 pembangkit thermal, 30 bus dan 41 saluran dengan total beban sebesar 283,4 MW [19]. Sistem ini mempunyai 16 variabel pengontrolan, yaitu: enam unit

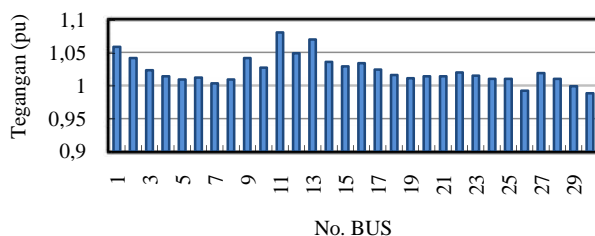
daya aktif output, enam *magnitude* tegangan bus pembangkit dan empat pengaturan tap transformer.

Dalam kasus ini, simulasi dilakukan dengan 5 variabel, 100 populasi dan 120 generasi. Simulasi dilakukan sepuluh kali dengan hasil terbaik yang diambil. Gambar 2 menunjukkan total biaya pembangkitan yang nilai optimalnya dapat dicapai sebelum generasi ke-20. Perbandingan hasil simulasi metode Algoritma Genetika yang diusulkan dengan metode *evolutionary programming* (EP) [7], *Differential Evolution* (DE) [7] dan metode *Intelligent Search Evolution Algorithm* (ISEA) [9] dengan besaran daya yang dibangkitkan setiap pembangkit dalam MW ditunjukkan pada Tabel 1. Hasil menunjukkan penghematan 1,15 \$/jam dibandingkan dengan metode EP dan penghematan 7,479 \$/jam dibandingkan dengan metode ISEA. Tegangan setelah simulasi seperti pada Gambar 3 terlihat bahwa berada dalam batasan maksimum dan minimum yang ditentukan yaitu 0,90 pu sampai 1,1 pu untuk bus pembangkit dan 0,95 pu sampai 1,05 pu untuk bus beban .

Pembangkit	DE ^[7]	EP ^[7]	ISEA ^[9]	PGA
P _{G1}	177,30	175,58	156,868	178,56
P _{G2}	49,18	49,08	48,260	48,09
P _{G5}	12,24	14,74	24,676	20,09
P _{G8}	11,19	11,18	24,232	21,71
P _{G11}	21,23	21,27	20,654	12,69
P _{G13}	21,74	39,53	17,134	12,00
Total Biaya (\$/Jam)	802,23	802,65	808,979	801,50
Total Rugi-rugi (MW)	9,53	9,47	8,424	9,74



Gambar 2. Total biaya pembangkitan sistem IEEE 30 bus

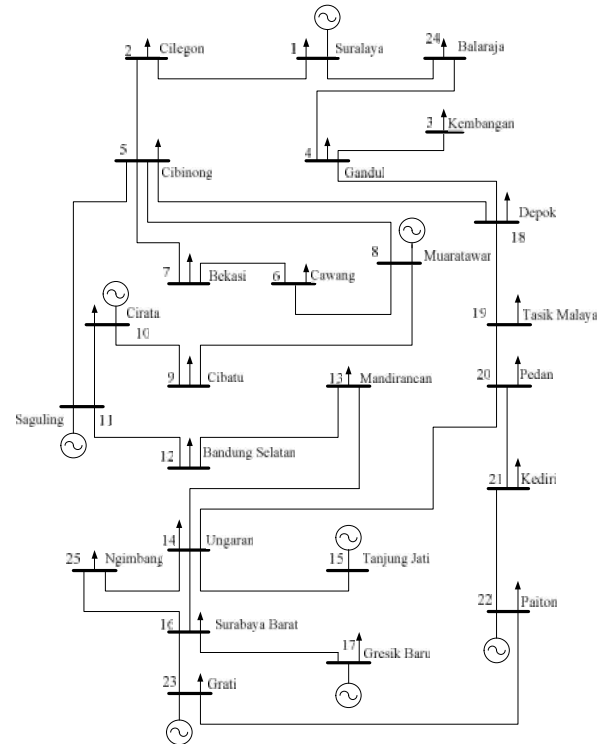


Gambar 3. Tegangan setiap bus sistem IEEE 30 bus

TABEL 1. Perbandingan hasil simulasi sistem IEEE 30 bus, dengan beberapa penelitian sebelumnya

Kasus 2: Sistem Tenaga 500 kV Jawa Bali

Data sistem 500 kV Jawa Bali bersumber dari PT.PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengaturan Beban Jawa Bali. Sistem ini terdiri dari 25 bus dengan 8 unit pembangkit dan 30 saluran. Unit pembangkit Suralaya sebagai slack bus sedangkan bus Muaratawar, Cirata, Saguling, Tanjung Jati, Gresik Baru, Grati, dan Paiton sebagai bus generator. Diagram satu garis sistem tenaga 500 kV Jawa Bali ditunjukkan pada Gambar 4. Diantara 8 pembangkit tersebut, pembangkit Cirata dan Saguling merupakan pembangkit tenaga air, sedangkan lainnya merupakan pembangkit tenaga thermal. Tabel 2 menunjukkan fungsi biaya pembangkitan. Data beban ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 4. Sistem 500 kV Jawa Bali

TABEL 2. Fungsi biaya pembangkitan sistem 500 kV Jawa Bali

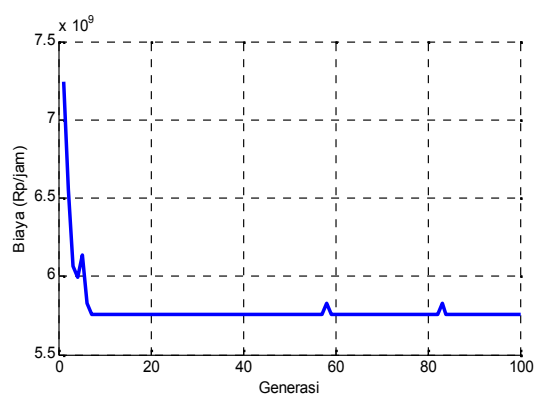
Pembangkit	r	s	x
Suralaya	51229001,206 9	385454,4175	-6,9952
Muara T.	5375795989,5	- 873046,208	137,925
Cirata	-	-	-
Saguling	-	-	-
Tnjng Jt	55581458.221	284810,3582	3,372
Gresik	10905899,548 5	188547,9031	12,5263
Grati	11848037,155 5	2657586,5332	-0,8734
Paiton	- 113129690,32	500247,0217	-41,974

TABEL 3. Data Beban Sistem 500 kV Jawa Bali

No	Nama bus	Type	Beban	
			MW	Mvar
1	Suralaya	Slack	201	98
2	Cilegon	Beban	293	221
3	Kembangan	Beban	522	125
4	Gandul	Beban	761	132
5	Cibinong	Beban	616	330
6	Cawang	Beban	322	75
7	Bekasi	Beban	1118	264
8	Muaratawar	Generator	-	-
9	Cibatu	Generator	688	467
10	Cirata	Generator	586	-
11	Saguling	Beban	-	-
12	Bandung Selatan	Beban	733	423
13	Mandirancan	Beban	309	131
14	Ungaran	Beban	417	468
15	Tanjung Jati	Generator	238	11
16	Surabaya Barat	Beban	899	512
17	Gresik Baru	Generator	174	64
18	Depok	Beban	641	204
19	Tasikmalaya Baru	Beban	219	83
20	Pedan	Beban	608	229
21	Kediri	Beban	627	188
22	Paiton	Generator	650	146
23	Grati	Generator	510	191
24	Balaraja	Beban	624	-14
25	Ngimbang	Beban	302	70
	Total		12058	4650

Simulasi dilakukan pada kondisi beban tanggal 30 November 2011 pukul 19.00 dengan total pembebanan sebesar 12058 MW dengan hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 5. Pembangkit PLTA dianggap membangkitkan daya sesuai data operasi PLN, karena pembangkit PLTA berbeda perhitungan biaya

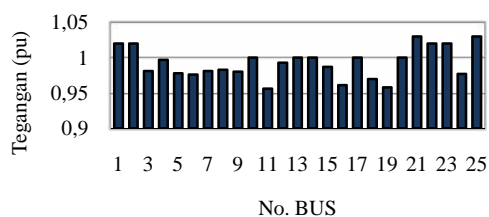
pembangkitannya. Hal ini disebabkan dalam pengoperasian PLTA harus dilihat dari cadangan air, pengoperasian waduk dan lain-lain. Dari Gambar 5 terlihat bahwa biaya nominal dapat tercapai sebelum generasi ke-20. Tabel 4 memperlihatkan perbandingan hasil simulasi pembangkitan setiap pembangkit dalam MW dengan daya operasi yang diperoleh dari PT. PLN. Biaya total pembangkit dari data daya operasi PLN adalah sebesar Rp. 6.556.151.000/jam. Metode yang diusulkan mampu mereduksi sebesar Rp. 798.995.000/jam atau sebesar 12,19%. Dengan rugi-rugi total sebesar 255,97 MW. Gambar 6 diperlihatkan tegangan setiap bus yang berada dalam batasan maksimum minimum yang ditetapkan PLN sesuai dengan Grid Code (aturan jaringan 2007) yaitu $\pm 5\%$ dari tegangan nominal untuk sistem 500 kV.



Gambar 5. Total biaya pembangkitan sistem 500 kV Jawa Bali

TABEL 4. Perbandingan hasil simulasi sistem Jawa Bali, metode yang diusulkan dengan Data Operasi PLN

Pembangkit	Data Operasi PLN		GA	
	Daya (MW)	Biaya (Rp/Jam)x10 ³	Daya (MW)	Biaya (Rp/Jam)x10 ³
Suralaya	2792.94	1.125.458	2221,15	914.304
Muara Tawar	1785	1.819.867	1397,93	1.425.176
Cirata	594	-	594	-
Saguling	662	-	662	-
Tanjung Jati	1971	632.633	1762,97	564.942
Gresik	1371	1273.483	962,79	884.628
Paiton	2572	972784	4384,35	1.374.815
Grati	441	731.926	328,74	593.290
Jumlah Total	12188,94	6.556.151	12313,92	5.757.156
Total Rugi-rugi (MW)	130,94		255,97	



Gambar 6. Tegangan setiap bus sistem 500 kV Jawa Bali

Kesimpulan

Dalam penelitian ini metode algoritma genetika dengan *tournament selection* diusulkan untuk menyelesaikan *optimal power flow*. Simulasi terhadap sistem IEEE 30 bus dan sistem tenaga Jawa Bali 500 kV dilakukan sehingga dapat disimpulkan bahwa:

1. Metode yang diusulkan mampu mereduksi biaya total pembangkitan sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV sebesar Rp. 798.995.000/jam atau sebesar 12,19% dan mampu menjaga tegangan setiap bus tetap dalam batasan yang ditentukan yaitu minimum 0,95 pu dan maksimum 1,05 pu untuk sistem Jawa Bali 500 kV.
2. Pada sistem IEEE 30 bus dan sistem 500 kV Jawa Bali konvergen sudah tercapai sebelum generasi ke-20, Hal ini menunjukkan metode yang diusulkan mampu menemukan nilai optimal dengan cepat.

Daftar Pustaka

- [1] Hadi Saadat, "Power System Analysis," WCB McGraw-Hil, New York, 1999.
- [2] Allen J. Wood and Bruce F, Wollenberg. "Power Generation, Operation and Control". John Wiley & Sons, Inc., 1996. Pp. 514-518.
- [3] H.W. Dommel dan W.F. Tinney, "Optimal power flow solutions," IEEE Trans. Power Apparatus Syst, pp. 1866-1876, 1968.
- [4] R. Ristanovic, "Successive Linear Programming Based OPF Solution", Optimal Power Flow: Solution Techniques, Requirements and

- Challenges, IEEE Power Engineering Society, 1996, pp. 1 - 9.
- [5] S.M. Shahidehpour and V.C. Ramesh, "Nonlinear Programming Algorithms and Decomposition Strategies for OPF", Optimal Power Flow: Solution Techniques, Requirements and Challenges, IEEE Power Engineering Society, 1996, pp 10 - 24.
- [6] J.A. Momoh, S.X. Guo, E.C. Ogbuobiri & R. Adapa, "The Quadratic Interior Point Method Solving Power System Optimisation Problems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, Aug. 1994, pp 1327 - 1336.
- [7] K. Vaisakh, L.R. Srinivas, "Differential Evolution based OPF with Conventional and Non-Conventional Cost Characteristics," IEEE, 2008
- [8] Hongwen Yan dan Xinran Li, "Stochastic Optimal Power Flow Based Improved Differential Evolution," IEEE, 2010.
- [9] A.V. Naresh Babu dan S. Sivanagaraju, "A Solution to the Optimal Power Flow Problem : A New Approach Based on Two Step Initialization," India Convergence (INDICOM) Annual IEEE, 2011.
- [10] M.A. Abido "Optimal power flow using particle swarm optimization," Electrical Power and Energy System, 24: 2000, Pp. 563-571.
- [11] Y.S. Lam Albert, Zhang Baosen, Tse David, "Distributed Algorithms for Optimal Power Flow Problem," Math OC., 2011
- [12] J. Chen, D. Yang "Optimal Power Flow Optimization Based on Bio-inspired Computing," IEEE, 2010.
- [13] Z. L. Gaing dan R. F. Chang, "Security-Constrained Optimal Power Flow by Mixed-Integer Genetic Algorithm with Arithmetic Operators," IEEE, 2006.
- [14] G. Bakirtzis dan E. Zaumas, "Optimal Power Flow by Enhanced Genetic Algorithm," IEEE, 2002
- [15] Suyanto, "Algoritma Genetika dalam MATLAB," Andi Yogyakarta, 2005.
- [16] William D. Stevenson, Jr., "Power System Analysis," McGraw-Hill Inc, 1994.
- [17] James A. Momoh, "*Electric power system applications of optimization*," Marcel Dekker, Inc., 2001. Pp. 339-348
- [18] Kelompok Pembakuan Bidang Transmisi, "Tegangan-Tegangan Standar," SPLN 1, PT. PLN (Persero) Kelistrikan Negara, Jakarta, 1995.

IEEE 30-bus system data available at
<http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>