

OPTIMISASI BIAYA PEMBANGKITAN PADA SISTEM 500 KV JAWA-BALI MENGGUNAKAN METODE ANT COLONY OPTIMIZATION (ACO)

Wahyu Ridhani^{*)}, Hermawan, and Susatyo Handoko

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: Lannistark79@gmail.com

Abstrak

Tingkat kebutuhan energi listrik yang semakin meningkat menyebabkan meningkatnya biaya operasi pembangkitan energi listrik. Permasalahan yang umum terjadi pada pengoperasian sistem tenaga listrik yaitu bagaimana menghasilkan daya output yang maksimal dengan meminimalisasi biaya operasi pembangkit. Oleh karena itu diperlukan adanya suatu fungsi optimasi yang dapat meminimalisasikan biaya pembangkitan energi listrik yang dipengaruhi oleh perubahan kebutuhan energi dalam jangka waktu tertentu. Pada Tugas Akhir ini, optimasi pencarian biaya pembangkitan termurah dilakukan dengan menggunakan metode Ant Colony Optimization (ACO) pada pembangkit listrik yang terhubung dalam sistem interkoneksi 500 kV Jawa-Bali dengan batasan *equality* dan *inequality*. Parameter batasan *equality* adalah jumlah total daya yang dihasilkan harus dapat memenuhi total permintaan beban dan rugi-rugi daya pada jaringan. Sedangkan parameter batasan *inequality* adalah daya yang dihasilkan pembangkit harus lebih besar dari batasan daya minimal pembangkit dan lebih kecil dari batasan daya maksimal pembangkit. Hasil pengujian menunjukkan bahwa optimasi menggunakan metode ACO memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan hasil perhitungan sebelum menerapkan ACO, yaitu 0.86% lebih rendah untuk total daya yang dibangkitkan, 33.5% lebih rendah untuk rugi-rugi daya, 12% lebih ekonomis untuk total biaya pembangkitan. Biaya pembangkitan termurah pada saat beban puncak adalah sebesar Rp.5.226.483.927,-.

Kata Kunci : *Pembangkitan Energi Listrik, Optimasi Operasi Sistem Pembangkit Listrik, Biaya Pembangkitan, Ant Colony Optimization (ACO).*

Abstract

The increasing demand of electrical energy causes the increasing operational cost in generating the electrical energy. The common problem in the electric power system operation is producing maximum output power with minimum operational cost. Therefore, it is necessary to create an optimization function with minimum cost in generating the electric energy affected by changes in energy needs in certain range of time. In this final assignment, the cheapest optimization in the cost of generating is carried out by using Ant Colony Optimization (ACO). The method is implemented to power plants connected to the Java-Bali 500 kV interconnection system with equality and inequality constraints. Parameter equality constraints are the total amount of power generated that must be able to fulfill total demand load and power losses in the network. While parameter inequality constraints are the generated power by plants that must be greater than the minimum power generation limits and smaller than maximum power generation limits. The results show that the ACO method gives better results than the calculated result before implementing ACO, it gives 0.86% lower for the total power generated, 33.5% lower for the power loss, 12% more economical for the total cost of generation. The cheapest generation cost at the peak time load is equal to Rp.5,226,483,927, -.

Keywords : *Electrical Energy Generation, Optimization of Power System Operation, Generating Cost, Ant Colony Optimization (ACO).*

1. Pendahuluan

Peran utama dari sistem tenaga listrik adalah untuk memastikan bahwa kebutuhan energi listrik dari pelanggan dapat dilayani. Namun dalam melakukannya, pengoperasian sistem tenaga listrik biasanya memiliki

permasalahan umum yaitu bagaimana menghasilkan daya output yang maksimal dengan meminimalisasi biaya operasi pembangkit. Kebutuhan energi listrik yang semakin meningkat menyebabkan meningkatnya biaya operasi pembangkitan energi listrik. Oleh karena itu diperlukan adanya suatu fungsi optimasi yang dapat

meminimalisasikan biaya pembangkitan energi listrik yang dipengaruhi oleh perubahan kebutuhan energi dalam waktu tertentu. *Economic Dispatch* adalah prosedur untuk menentukan daya listrik yang dibangkitkan oleh pembangkit yang terhubung pada sistem tenaga listrik sehingga total biaya pembangkitan diminimalkan sementara secara bersamaan permintaan beban dapat terpenuhi [3][10][11].

Pada sistem tenaga listrik yang terhubung dalam suatu interkoneksi, unit-unit pembangkit tidak berada dalam jarak yang sama dengan pusat beban. Selain itu, biaya pembangkitan masing-masing unit pembangkit juga berbeda. Dalam kondisi operasi normal sekalipun, kapasitas yang dimiliki oleh sistem pembangkitan harus lebih besar dibanding jumlah kebutuhan beban dan rugi-rugi daya pada sistem. Karena hal inilah optimasi operasi sistem pembangkit listrik diperlukan untuk mencari aliran daya yang paling optimal secara ekonomis dalam suatu operasi pembangkitan energi listrik. Analisis aliran daya optimal adalah suatu perhitungan yang bertujuan untuk meminimalkan biaya pembangkitan dan rugi-rugi transmisi dengan mengatur daya aktif pembangkitan tiap pembangkit pada sistem tenaga yang terinterkoneksi dengan memperhatikan batasan (*constraint*) tertentu [4][8].

Ant Colony Optimization (ACO) merupakan salah satu dari banyak metode optimasi matematis yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan *Economic Dispatch* (ED). ACO berasal dari Algoritma Koloni Semut yang diperkenalkan oleh Moyson dan Mendrik dan secara meluas dikembangkan oleh Marco Dorigo, merupakan teknik probalistik untuk menyelesaikan masalah komputasi dengan menemukan jalur terbaik melalui grafik. Algoritma ini terinspirasi oleh perilaku semut dalam menemukan jalur dari koloninya dalam mencari makanan [1][2][7].

Beberapa penelitian mengenai penerapan ACO pada sistem tenaga listrik telah dilakukan sebelumnya, yang mempunyai judul *Ant Colony Optimization based Optimal Power Flow Analysis for the Iraqi Super High Voltage Grid*. Penelitian ini membahas penerapan metode ACO untuk mendapatkan *Optimal Power Flow* (OPF) pada sistem kelistrikan 400 kV di Iraq, hasil dari penelitiannya adalah aliran daya yang optimal sehingga mampu menghasilkan biaya pembangkitan yang ekonomis. Metode *Linear Programming* (LP) digunakan sebagai pembanding optimasi ACO [9]. Sedangkan penelitian lain berjudul *Penjadwalan Pembangkit Tenaga Listrik Jangka Pendek Menggunakan Ant Colony Optimization* membahas tentang penerapan metode ACO untuk optimasi biaya pembangkitan dengan cara seleksi kombinasi *on-off* unit pembangkit pada kondisi beban harian (24 jam). Metode Lagrange digunakan sebagai metode pembanding hasil optimasi metode ACO [5].

Tujuan pembuatantugasakhiriniadalah menyelesaikan permasalahan *Economic Dispatch* dengan menggunakan metode *Ant Colony Optimization* (ACO) untuk mengoptimasi daya yang dibangkitkan oleh tiap-tiap unit pembangkit yang beroperasi pada periode beban rendah dan beban puncak. Nantinya akan didapatkan kombinasi daya optimal yang dibangkitkan dan biaya pembangkitan yang ekonomis dengan menggunakan metode ACO. Supaya pembahasan tidak menyimpang, maka ditentukan pembatasan masalah pada Tugas Akhir ini sebagai berikut:

1. Perhitungan *Economic Dispatch* hanya dilakukan pada pembangkit listrik yang terhubung pada sistem interkoneksi 500 KV Jawa-Bali.
2. Data yang dipergunakan dalam perhitungan yaitu data batasan pembebanan minimum dan maksimum pembangkit, data fungsi biaya untuk masing-masing pembangkit, data saluran transmisi 500 kV Jawa-Bali serta data pembebanan pada 25 September 2013.
3. Fungsi objektif yang dicari adalah biaya pembangkitan masing-masing pembangkit pada sistem interkoneksi 500 kV Jawa-Bali serta biaya totalnya.
4. Perbandingan daya yang dibangkitkan dan biaya pembangkitan hanya dianalisa pada kondisi beban rendah (pukul 12.00 WIB) dan beban puncak (pukul 18.00 WIB).
5. Tegangan magnitude dan sudut pada bus yang dihasilkan setelah optimisasi ACO tidak dimasukkan ke dalam syarat sehingga hasilnya tidak dipermasalahkan.
6. *Software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah Matlab R2013a.

2. Metode

2.1 Perumusan Masalah *Economic Dispatch*

Permasalahan *Economic Dispatch* (ED) dapat diselesaikan dengan meminimalisasi biaya pembangkitan pada sistem interkoneksi. Hasil solusi ini memberikan keluaran daya pembangkitan yang optimal sehingga dapat memenuhi permintaan beban pada sistem, di saat bersamaan juga dapat memenuhi beberapa persyaratan (*constraints*). Fungsi tujuan dari *Economic Dispatch* ini adalah sebagai berikut :

$$F_T = \sum_{i=1}^{ng} F_i(P_{gi}) \quad (1)$$

$$F_i(P_{gi}) = a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2 \quad (2)$$

Dimana :

- F_T = Total biaya pembangkitan (Rp.)
- $F_i(P_{gi})$ = Fungsi biaya dari pembangkit i (Rp/jam)
- a_i, b_i, c_i = Koefisien biaya dari pembangkit i
- P_{gi} = Daya keluaran pembangkit i (MW)
- ng = Jumlah unit pembangkit

Pada persamaan (2), daya keluaran pembangkit i dioptimasi untuk meminimalisasi total biaya pembangkitan pada persamaan (1). Sedangkan persyaratan yang diperlukan untuk menjaga sistem selalu berada dalam kondisi normal dan ekonomis yaitu :

1. Batasan Kesetimbangan Daya (*Equality Constraint*)

Jumlah total daya yang dibangkitkan (P_{g_i}) harus sama dengan jumlah total permintaan beban (P_{d_i}) ditambah rugi-rugi pada jaringan (P_L) [6]. Persamaannya adalah sebagai berikut :

$$\sum_{i=1}^{NS} P_{g_i} = P_{d_i} + P_L \quad (3)$$

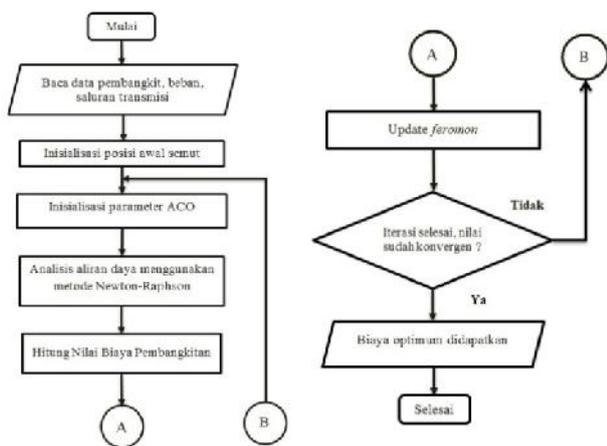
2. Batasan Daya Minimum dan Maksimum Pembangkit (*Inequality Constraint*)

Keluaran daya dari setiap pembangkit mempunyai batas minimum ($P_{g_i \text{ min}}$) dan maksimum ($P_{g_i \text{ max}}$) yang harus dipenuhi. Persamaan untuk batasan daya minimum dan maksimum untuk masing-masing pembangkit adalah sebagai berikut :

$$P_{g_i \text{ min}} \leq P_{g_i} \leq P_{g_i \text{ max}} \quad (4)$$

2.2 Perancangan Sistem

Langkah-langkah secara keseluruhan dari optimisasi menggunakan metode ACO dapat dilihat pada diagram alir gambar 1. Pada penelitian ini, ada beberapa modifikasi dilakukan untuk membuatnya cocok diterapkan pada sistem tenaga listrik.



Gambar 1. Diagram Alir Pembuatan Program Simulasi menggunakan metode ACO

1. Baca data
jumlah pembangkit beserta nomor busnya, data pembebanan dan pembangkitan pada tanggal 25 september 2013, pukul 12.00 WIB (beban rendah) dan pukul 18.00 WIB (beban puncak) serta data impedansi

saluran transmisi untuk menghitung rugi-rugi daya pada sistem interkoneksi Jawa-Bali 500 KV.

2. Inisialisasi Posisi Awal Semut

Penentuan posisi awal semut / feromon dilakukan dengan nilai awal berupa batas daya minimum dan maksimum pembangkit P2-P8. Selain itu, pada langkah ini juga diatur nilai diskrit / ruas yang akan membagi nilai daya yang dilalui semut nantinya.

3. Inisialisasi Parameter ACO

Parameter algoritma ACO seperti jumlah semut (N), Iterasi Maksimum (I_{max}), parameter penguapan feromon (ρ), konstanta (c) ditetapkan disini. Kemudian dilakukan pembuatan ruas yang akan dilalui semut dan probabilitas pemilihan lintasannya oleh semut secara random berdasarkan aturan *roulette-wheel*. Nilai daya P2-P8 akan dibawa oleh semut dan didapat pada langkah ini.

4. Analisis Aliran Daya

Lakukan analisis aliran daya menggunakan metode Newton-Raphson dengan persyaratan $P_{g_i} = P_{d_i} + P_L$, hasilnya akan didapatkan nilai daya untuk pembangkit P1 [6].

5. Hitung Biaya Pembangkitan

Nilai daya yang didapatkan tadi akan dimasukkan ke fungsi biaya masing-masing pembangkit untuk mendapatkan nilai biaya pembangkitan masing-masing pembangkit serta total biaya keseluruhan. Total biaya pembangkitan jumlah keseluruhan biaya pembangkit.

6. Update Feromon

Perbarui nilai feromon untuk jalur terbaik sesuai dengan rumus berikut ini :

$$\tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} + \Delta\tau^k \quad (5)$$

Sedangkan untuk jalur lainnya, rumusnya adalah :

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \tau_{ij} \quad (6)$$

Dimana nilai parameter penguapan feromon adalah : $0 < \rho < 1$. Dan $\tau_{ij}^{(k)}$ adalah jumlah feromon yang diletakkan pada ruas ij oleh semut terbaik k .

$$\Delta\tau_{ij}^{(k)} = \begin{cases} c \cdot \frac{1}{f_{best}^{(k)}} & \text{jika } ij \text{ ada di jalur terbaik} \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (7)$$

Dimana f_{best} adalah nilai terbaik dari fungsi tujuan dan f_{worst} adalah nilai terjelek dari fungsi tujuan. Tujuan pemberian nilai ini adalah memberi sejumlah nilai feromon pada jalur terbaik (lintasan terpendek) sehingga probabilitas jalur ini untuk kembali dipilih semut pada iterasi selanjutnya menjadi lebih besar. Sedangkan feromon pada jalur lainnya diperkecil sedikit demi sedikit sehingga semakin sedikit semut yang akan melewati jalur tersebut pada iterasi selanjutnya [1][7].

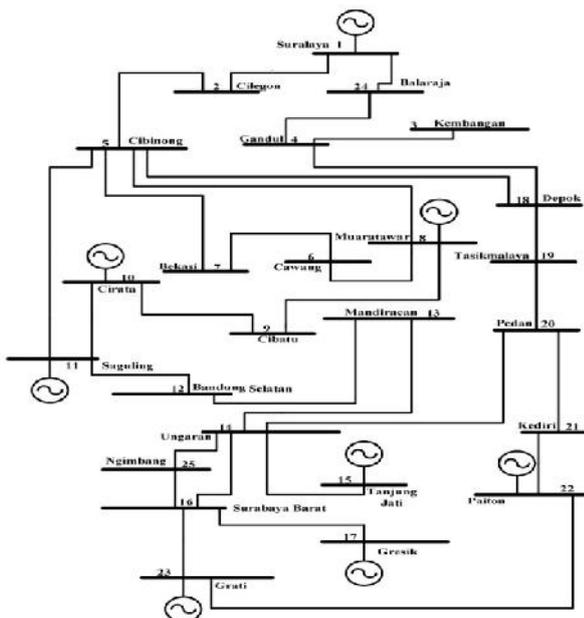
7. Iterasi selesai, apabila nilai hasilnya belum konvergen, lakukan kembali pengaturan inisialisasi parameter ACO (langkah ketiga). Jika nilai hasilnya sudah konvergen, maka diperoleh solusi permasalahan *Economic Dispatch* yaitu total biaya pembangkitan yang ekonomis.

3. Hasil dan Analisa

Data yang digunakan adalah data batasan pembebanan minimum dan maksimum pembangkit, data fungsi biaya untuk masing-masing pembangkit, data saluran transmisi 500 kV Jawa-Bali serta data pembebanan seluruh beban pada 25 September 2013. Perhitungan diaplikasikan pada dua kondisi beban yaitu beban rendah (pukul 12.00 WIB) dan beban puncak (pukul 18.00 WIB) dengan menggunakan metode *Ant Colony Optimization (ACO)*.

3.1 Data Sistem 500 kV 25 bus Jawa-Bali

Sistem interkoneksi 500 kV Jawa-Bali terbagi menjadi 4 region yaitu Region 1 terdiri dari wilayah provinsi Jakarta Raya dan Banten. Region 2 meliputi wilayah Jawa Barat. Jawa Tengah dan D.I.Y merupakan region 3 serta Jawa Timur dan Bali yang merupakan region 4. Gambar 2 menunjukkan diagram segaris sistem 500 kV Jawa-Bali yang terdiri dari 25 bus, 8 pusat pembangkit dan 30 saluran transmisi.



Gambar 2. Diagram Segaris Sistem Interkoneksi 500 KV Jawa-Bali

Ada 8 pembangkit yang terpasang pada sistem interkoneksi, terdiri dari 6 pembangkit termal yaitu Suralaya (bus 1), pembangkit Muaratawar (bus 8), pembangkit Tanjung Jati (bus 15), pembangkit Gresik (bus 17), pembangkit Paiton (bus 22), pembangkit Grati (bus 23) serta 2 pembangkit hidro yaitu pembangkit Cirata (bus 10) dan pembangkit Saguling (bus 11).

Berikut ini adalah batasan pembebanan minimum dan maksimum serta fungsi biaya pembangkitan untuk masing-masing pembangkit.

Tabel 1. Batasan pembebanan minimum dan maksimum pembangkit 500 kV

No.	Pembangkit	Daya (MW)	
		Minimum	Maksimum
1	Suralaya	2015	3800
2	Muaratawar	830	1890
3	Cirata	400	950
4	Saguling	400	700
5	Tanjung Jati	1620	2644
6	Gresik	250	560
7	Paiton	3184	4610
8	Grati	160	450

Sumber : P3B Jawa-Bali PT.PLN (Persero)

Tabel 2. Fungsi biaya unit pembangkit 500 kV Jawa-Bali

No.	Pembangkit	Fungsi Biaya (Rp/Jam)
1	Suralaya	$C_1 = -5,39 P_1^2 + 394107,9 P_1 + 74299104$
2	Muaratawar	$C_2 = -215,43 P_2^2 + 2231082,7 P_2 + 201825868$
3	Cirata	$C_3 = 7000 P_3$
4	Saguling	$C_4 = 7000 P_4$
5	Tanjung Jati	$C_5 = 1,72 P_5^2 + 299471 P_5 + 28290214$
6	Gresik	$C_6 = 67,25 P_6^2 + 537064,75 P_6 + 13102724$
7	Paiton	$C_7 = -3,26 P_7^2 + 313404,3 P_7 + 12277434,2$
8	Grati	$C_8 = 27,11 P_8^2 + 464579,65 P_8 + 8053900,85$

Sumber : P3B Jawa-Bali PT.PLN (Persero)

3.2 Hasil Pengujian

Pengujian ini dimaksudkan mendapatkan biaya pembangkitan yang ekonomis setelah dilakukan optimasi menggunakan metode ACO. Hasil pengujian akan dibandingkan hasil load flow tanpa menggunakan metode ACO sebagai perbandingannya.

3.2.1 Hasil Simulasi Sebelum Menggunakan Optimisasi ACO

Tabel 3 menunjukkan hasil *loadflow* dari 8 pembangkit yang disimulasikan pada kondisi beban rendah sebelum optimasi ACO. Hasil simulasi diperoleh pembebanan sebesar 9970 MW dan 4112 MVar, dengan daya aktif sebesar 10181.49 MW dan daya reaktif sebesar 6354.28 MVar. Tegangan magnitude tertinggi ada pada bus 1 yaitu sebesar 1.020 Volt dan tegangan magnitude terendah pada bus 19 yaitu sebesar 0.920 Volt. Total rugi-rugi daya pada saluran transmisi 500 kV ini adalah sebesar 211.49 MW dan 2242.28 Mvar.

Tabel 3. Hasil analisis aliran daya pada beban rendah sebelum optimisasi ACO

No. Bus	Kode Bus	Tegangan (Volt)		Beban (MW,MVar)		Generator (MW,MVar)	
		Mag.	Sudut	P	Q	P	Q
1	1	1.02	0.000	223	-64	2475.49	1273.26
2	0	1.016	-0.299	275	104	0	0
3	0	0.956	-5.229	594	194	0	0
4	0	0.960	-4.619	798	274	0	0
5	0	0.962	-4.656	332	306	0	0
6	0	0.960	-6.095	591	159	0	0
7	0	0.953	-6.174	679	412	0	0
8	2	0.990	-4.004	0	0	1007	1586.14
9	0	0.972	-4.035	749	474	0	0
10	2	0.970	-2.946	580	218	120	887.79
11	2	0.960	-1.891	0	0	306	-24.98
12	0	0.945	-0.625	487	272	0	0
13	0	0.927	5.467	-138	80	0	0
14	0	0.930	16.184	780	359	0	0
15	2	0.980	23.467	305	113	1885	72190
16	0	0.960	21.687	742	511	0	0
17	2	0.970	21.844	174	52	438	763.94
18	0	0.959	-4.568	476	144	0	0
19	0	0.920	4.289	151	50	0	0
20	0	0.922	16.067	693	173	0	0
21	0	0.955	24.629	-559	-179	0	0
22	2	1.000	32.419	572	5	3796	694.26
23	2	0.980	26.495	402	200	154	451.96
24	0	0.986	-2.718	253	7	0	0
25	0	0.937	18.881	611	248	0	0
TOTAL				9970	4112	10181.49	6354.28

Tabel 4. Hasil analisis aliran daya pada beban puncak sebelum optimisasi ACO

No. Bus	Kode Bus	Tegangan (Volt)		Beban (MW,MVar)		Generator (MW,MVar)	
		Mag.	Sudut	P	Q	P	Q
1	1	1.02	0.000	222	-63	2089.38	1426.88
2	0	1.016	-0.234	224	122	0	0
3	0	0.951	-4.289	603	188	0	0
4	0	0.955	-3.663	716	282	0	0
5	0	0.957	-3.625	508	282	0	0
6	0	0.956	-4.724	567	164	0	0
7	0	0.950	-5.119	929	418	0	0
8	2	0.990	-1.844	0	0	1260	1754.32
9	0	0.971	-1.365	867	547	0	0
10	2	0.970	0.407	690	250	535	950.75
11	2	0.960	1.507	0	0	467	197.71
12	0	0.939	2.848	575	267	0	0
13	0	0.907	9.544	26	76	0	0
14	0	0.895	23.363	1041	698	0	0
15	2	0.960	31.953	397	42	2163	837.55
16	0	0.958	31.883	928	409	0	0
17	2	0.970	32.099	198	24	546	867.73
18	0	0.954	-3.566	477	126	0	0
19	0	0.889	7.414	252	75	0	0
20	0	0.890	23.397	754	122	0	0
21	0	0.937	34.371	-731	-273	0	0
22	2	1.000	43.663	703	13	4283	873.64
23	2	0.980	37.298	352	205	178	529.1
24	0	0.982	-2.253	314	50	0	0
25	0	0.928	28.496	611	248	0	0
TOTAL				11223	4272	11521.38	7437.68

Tabel 4 menunjukkan hasil *loadflow* dari 8 pembangkit yang disimulasikan pada kondisi beban rendah sebelum optimisasi ACO. Hasil simulasi diperoleh pembebanan sebesar 11223 MW dan 4272 MVar, dengan daya aktif sebesar 11521.38 MW dan daya reaktif sebesar 7437.68 MVar. Tegangan magnitude tertinggi ada pada bus 1 yaitu sebesar 1.020 Volt dan tegangan magnitude terendah pada bus 19 yaitu sebesar 0.899 Volt. Total rugi-rugi daya pada saluran transmisi 500 kV ini adalah sebesar 298.38 MW dan 3165.65 Mvar.

Dengan memasukkan daya generator yang dihasilkan dari simulasi kondisi beban rendah dan beban puncak diatas pada fungsi biaya masing-masing unit pembangkit, maka akan didapatkan biaya pembangkitan untuk masing-masing kondisi beban sebagai berikut :

Tabel 5. Perbandingan daya yang dihasilkan dengan biaya pembangkitan pada beban rendah dan beban puncak sebelum optimisasi ACO

Pembangkit	Energi yang dihasilkan (MWh)		Biaya Pembangkitan (Rp/Jam)	
	Beban rendah	Beban puncak	Beban rendah	Beban puncak
Suralaya	2475	2089	1.016.877.698	874.211.364
Muaratawar	1007	1260	2.230.069.571	2.670.973.402
Cirata	120	535	840.000	3.754.000
Saguling	306	467	2.142.000	3.269.000
Tanjung Jati	1885	2163	598.904.596	684.093.126
Gresik	438	546	261.238.594	326.388.379
Paiton	3796	4283	1.154.984.809	1.294.786.321
Grati	154	178	78.956.226	89.890.125
TOTAL	10181	11521	5.343.835.667	5.947.356.716

3.2.2 Hasil Simulasi Setelah Menggunakan Optimisasi ACO

Penyelesaian permasalahan *Economic Dispatch* (ED) dengan metode *Ant Colony Optimization* (ACO) menggunakan parameter yang diinisialisasi sebelum perhitungan, yaitu :

- Jumlah Semut (N) : 20
- Parameter penguapan feromon (ρ) : 0.15
- Maksimum Iterasi (I_{max}) : 40
- Konstanta (c) : 2
- Jumlah Ruas Diskrit (ds) : 100

Pada tabel 6 terlihat hasil optimisasi menggunakan metode ACO pada kondisi beban rendah. Pada kondisi beban yang sama dengan sebelum optimisasi, yaitu 9970 MW dan 4112 MVar, 8 unit pembangkit menghasilkan daya aktif sebesar 10101.839 MW dan daya reaktif sebesar 5509.33 MVar. Sedangkan total rugi-rugi daya (P_L) pada saluran transmisi adalah sebesar 131.839 MW dan 1397.33 Mvar.

Tegangan magnitude tertinggi ada pada bus 1 yaitu sebesar 1.020 Volt dan tegangan magnitude terendah pada bus 19 yaitu sebesar 0.946 Volt. Hal ini menunjukkan bahwa persyaratan kesetimbangan daya (*equality constraint*) telah dipenuhi, dimana total daya yang dihasilkan sebesar 10101.839 MW sama dengan penjumlahan total beban sebesar 9970 MW dengan rugi-rugi daya sebesar 131.839 MW. Dan juga persyaratan batasan daya minimum dan maksimum setiap pembangkit (*inequality constraints*) telah terpenuhi. Daya yang dibangkitkan setiap pembangkit sudah sesuai dengan kemampuan tiap pembangkitnya.

Tabel 6. Hasil analisis aliran daya pada beban rendah setelah optimisasi ACO

No. Bus	Kode Bus	Tegangan (Volt)		Beban (MW,MVar)		Generator (MW,MVar)	
		Mag.	Sudut	P	Q	P	Q
1	1	1.02	0.000	223	-64	2975.637	1194.52
2	0	1.016	-0.358	275	104	0	0
3	0	0.959	-6.534	594	194	0	0
4	0	0.964	-5.929	798	274	0	0
5	0	0.965	-6.029	332	306	0	0
6	0	0.961	-7.632	591	159	0	0
7	0	0.955	-7.658	679	412	0	0
8	2	0.990	-5.689	0	0	830.000	1338.58
9	0	0.977	-5.688	749	474	0	0
10	2	0.980	-4.585	580	218	416.667	348.29
11	2	0.980	-3.843	0	0	554.545	461.20
12	0	0.969	-3.339	487	270	0	0
13	0	0.959	0.178	-138	80	0	0
14	0	0.956	5.867	780	359	0	0
15	2	1.000	11.676	305	113	1630.343	635.42
16	0	0.969	8.251	942	511	0	0
17	2	0.980	8.272	174	52	281.313	824.93
18	0	0.963	-5.951	476	144	0	0
19	0	0.946	-1.046	151	50	0	0
20	0	0.951	5.977	693	173	0	0
21	0	0.976	12.488	-559	-179	0	0
22	2	1.000	17.872	572	5	3241.616	499.12
23	2	0.980	12.556	402	200	171.717	207.25
24	0	0.987	-3.427	253	7	0	0
25	0	0.951	6.103	611	248	0	0
TOTAL				9970	4112	10101.839	5509.330

Pada tabel 7 terlihat hasil optimasi menggunakan metode ACO pada kondisi beban puncak. Pada kondisi ini, pembebanan sebesar 11223 MW dan 4272 MVar dipenuhi oleh 8 unit pembangkit yang menghasilkan daya aktif sebesar 11421.141 MW dan daya reaktif sebesar 6377.636 MVar. Sedangkan total rugi-rugi daya (P_L) pada saluran transmisi adalah sebesar 198.142 MW dan 2105.637 Mvar. Tegangan magnitude tertinggi ada pada bus 1 yaitu sebesar 1.020 Volt dan tegangan magnitude terendah pada bus 14 yaitu sebesar 0.922 Volt. Hal ini menunjukkan bahwa persyaratan kesetimbangan daya (*equality constraint*) telah dipenuhi, dimana total daya yang dihasilkan sebesar 11421.141 MW sama dengan penjumlahan total beban sebesar 11223 MW dengan rugi-rugi daya sebesar 198.142 MW. Dan juga persyaratan batasan daya minimum dan maksimum setiap pembangkit

(*inequality constraints*) telah terpenuhi. Daya yang dibangkitkan setiap pembangkit sudah sesuai dengan kemampuan tiap pembangkitnya.

Tabel 7. Hasil analisis aliran daya pada beban puncak setelah optimisasi ACO

No. Bus	Kode Bus	Tegangan (Volt)		Beban (MW,MVar)		Generator (MW,MVar)	
		Mag.	Sudut	P	Q	P	Q
1	1	1.02	0.000	222	-63	2912.556	1323.612
2	0	1.016	-0.336	224	122	0	0
3	0	0.955	-6.414	603	188	0	0
4	0	0.959	-5.794	716	282	0	0
5	0	0.961	-5.989	508	282	0	0
6	0	0.958	-7.681	567	164	0	0
7	0	0.952	-7.889	929	418	0	0
8	2	0.990	-5.315	0	0	830.000	1698.988
9	0	0.971	-4.897	867	547	0	0
10	2	0.970	-3.185	690	250	807.576	914.852
11	2	0.960	-2.296	0	0	601.010	-105.240
12	0	0.946	-1.700	575	267	0	0
13	0	0.928	2.632	26	76	0	0
14	0	0.922	11.386	1041	698	0	0
15	2	0.980	18.888	397	42	2018.384	754.591
16	0	0.960	16.004	928	409	0	0
17	2	0.970	15.997	198	24	262.525	715.515
18	0	0.959	-5.816	477	126	0	0
19	0	0.923	1.031	252	75	0	0
20	0	0.925	11.628	754	122	0	0
21	0	0.963	20.266	-731	-273	0	0
22	2	1.000	27.095	703	13	3826.162	630.637
23	2	0.980	21.068	352	205	162.929	451.681
24	0	0.984	-3.402	314	50	0	0
25	0	0.936	13.376	611	248	0	0
TOTAL				11223	4272	11421.141	6377.636

Dengan memasukkan daya generator yang dihasilkan dari simulasi kondisi beban rendah dan beban puncak diatas pada fungsi biaya masing-masing unit pembangkit, maka akan didapatkan biaya pembangkitan untuk masing-masing kondisi beban sebagai berikut :

Tabel 8. Perbandingan daya yang dihasilkan dengan biaya pembangkitan pada beban rendah dan beban puncak setelah optimisasi ACO

Pembangkit	Energi yang dihasilkan (MMh)		Biaya Pembangkitan (Rp/Jam)	
	Beban rendah	Beban puncak	Beban rendah	Beban puncak
Suralaya	2975	2912	1.199.295.771	1.176.436.982
Muaratawar	830	830	1.905.214.782	1.905.214.782
Cirata	416	807	2.916.667	5.653.030
Saguling	554	601	3.881.818	4.207.071
Tanjung Jati	1630	2018	521.102.587	639.744.703
Gresik	281	262	169.508.059	158.730.620
Paiton	3241	3826	993.957.553	1.163.688.126
Grati	171	162	87.030.818	83.027.874
TOTAL	10101	11421	4.982.548.311	5.226.483.927

3.3 Analisa Perbandingan Biaya Pembangkitan Sebelum dan Setelah Optimisasi ACO

Untuk mengetahui seberapa efisien biaya pembangkitan setelah optimisasi menggunakan metode ACO, kita harus membandingkannya dengan biaya pembangkitan sebelum optimisasi ACO. Perbandingan keduanya pada beban rendah dan beban puncak dapat kita lihat pada tabel berikut ini.

Tabel 9. Perbandingan biaya pembangkitan sebelum dan setelah optimisasi ACO pada kondisi beban rendah dan beban puncak

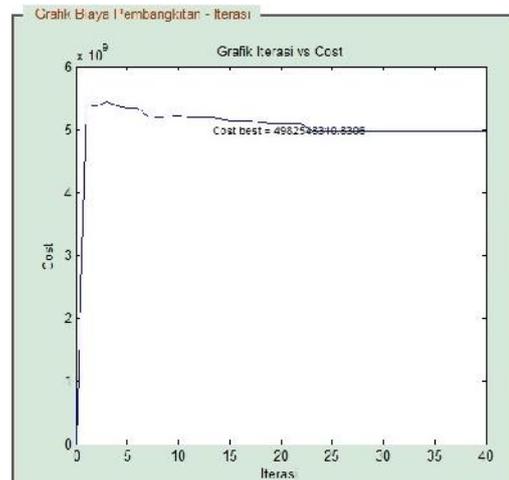
Pembangkit	Biaya Pembangkitan (Rp/Jam) sebelum optimisasi ACO		Biaya Pembangkitan (Rp/Jam) setelah optimisasi ACO	
	Beban rendah	Beban puncak	Beban rendah	Beban puncak
Suralaya	1.016.877.698	874.211.364	1.199.295.771	1.176.436.982
Muaratawar	2.230.069.571	2.670.973.402	1.905.214.782	1.905.214.782
Cirata	840.000	3.754.000	2.916.667	5.653.030
Saguling	2.142.000	3.269.000	3.881.818	4.207.071
Tanjung Jati	598.904.596	684.093.126	521.102.587	639.744.703
Gresik	261.238.594	326.388.379	169.508.059	158.730.620
Paiton	1.154.984.809	1.294.786.321	993.957.553	1.163.688.126
Grati	78.956.226	89.890.125	87.030.818	83.027.874
TOTAL	5.343.835.667	5.947.356.716	4.982.548.311	5.226.483.927

Pada tabel 9 terlihat bahwa biaya pembangkitan yang diperlukan pada saat setelah optimisasi ACO menjadi lebih efisien dibandingkan pada saat sebelum optimisasi ACO dilakukan. Pada kondisi beban rendah, total biaya pembangkitan yang diperlukan sebelum optimisasi ACO adalah sebesar Rp.5.343.835.667,-. Sedangkan setelah optimisasi ACO, biaya pembangkitan yang diperlukan turun menjadi Rp.4.982.548.311,-. Terdapat selisih biaya pembangkitan sebesar Rp.361.287.356,- atau dengan kata lain, optimisasi ACO menghemat biaya pembangkitan sebesar 6.76% dibandingkan sebelum menggunakan optimisasi ACO.

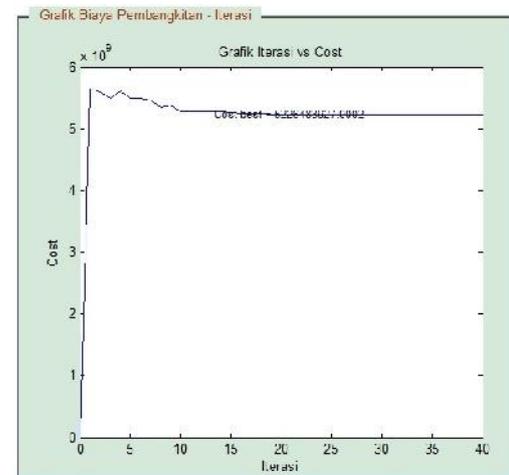
Pada kondisi beban puncak, total biaya pembangkitan yang diperlukan sebelum optimisasi ACO adalah sebesar Rp.5.947.356.716,-, sedangkan setelah optimisasi ACO dilakukan, biaya pembangkitan yang diperlukan turun menjadi Rp.5.226.483.927,-. Selisih biaya pembangkitannya adalah sebesar Rp.720.872.789,- yang berarti optimisasi ACO menghemat biaya pembangkitan sebesar 12.12%.

Faktor yang mempengaruhi efisiensi biaya pembangkitan setelah menggunakan optimisasi ACO adalah karena metode optimisasi ini mampu memilih jalur terbaik yang dilewati semut, yang dalam hal ini adalah pemilihan pembangkitan daya yang disesuaikan dengan murah/mahalnya biaya pembangkitannya. Untuk itu, semut perlu membaca fungsi biaya masing-masing

pembangkit dan menentukan mana pembangkit dengan fungsi biaya termurah dan mana pembangkit dengan fungsi biaya termahal. Pembangkit dengan fungsi biaya yang mahal akan diperkecil pembangkitan dayanya sehingga biaya pembangkitannya bisa seminimal mungkin



Gambar 3. Grafik Kurva Biaya Pembangkitan pada optimisasi ACO untuk kondisi beban rendah



Gambar 4. Grafik Kurva Biaya Pembangkitan pada optimisasi ACO untuk kondisi beban puncak

Pada gambar 3 dan gambar 4 terlihat grafik konvergensi pencarian biaya pembangkitan terbaik pada saat kondisi beban rendah dan beban puncak menggunakan metode ACO. Pada beban rendah, konvergensi didapat pada saat iterasi mendekati iterasi ke 22. Sedangkan pada beban puncak, konvergensi didapatkan mendekati iterasi ke 17. Sebelum itu, semut-semut melakukan proses pencarian jalur terbaik dengan beberapa kali mengulang iterasi sampai didapatkan hasil yang konvergen. Terlihat pada iterasi 22 dan 17 keatas, garis iterasi – cost sudah mulai lurus. Hal ini menandakan hasil iterasi sudah konvergen. Semua semut melalui jalur terbaik yang sama, yaitu biaya

pembangkitan terkecil yang pada optimisasi ini didapatkan pada angka Rp.4.982.548.311,- untuk beban rendah dan Rp.5.220.483.927,- untuk beban puncak.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa metode *Ant Colony Optimization* (ACO) telah berhasil menyelesaikan permasalahan *Economic Dispatch*, yaitu dengan meminimalisasi biaya pembangkitan pembangkit sistem interkoneksi 500 kV Jawa-Bali. Pada kondisi beban rendah, optimisasi menggunakan ACO dapat menghemat 6.76% total biaya pembangkitan dibandingkan sebelum optimasi. Sedangkan pada kondisi beban puncak, optimisasi menggunakan metode ACO dapat menghemat total biaya pembangkitan sebesar 12.12%. Saran untuk penelitian selanjutnya adalah mencoba optimasi ACO dengan menambahkan persyaratan (*constraint*) lain misalnya batasan tegangan magnitude dan sudut pada bus. Dan juga mencoba optimasi ACO pada objek penelitian lain, misalnya pada sistem tenaga listrik region 3 wilayah operasi PT.PLN, yaitu wilayah Jateng-DIY.

Referensi

- [1]. Dorigo M, Stützle T. 2004. *Ant Colony Optimization*. Cambridge : The MIT Press.
- [2]. Dorigo M, Gambardella, LM. *Ant Colony System : A Cooperative Learning Approach to the Travelling Salesman Problem*. IEEE Transaction for Evolutionary Computation. 1997;1(1) :1-24.
- [3]. Musirin I, Faezaa NH. *Ant Colony Optimization (ACO) Technique in Economic Power Dispatch Problems*. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. Hongkong. 2008;2.
- [4]. Muharnis, Suyono H. *Economic Scheduling Pembangkit Termal Menggunakan Improved Particle Swarm Optimization*. Jurnal Inovtek. 2012;2(1) : 70-78.
- [5]. Riyanto S, Suyono H. *Penjadwalan Pembangkit Tenaga Listrik Jangka Pendek Menggunakan Ant Colony Optimization*. Jurnal IECCIS. 2012; 6(2): 97-106.
- [6]. Saadat H. 1999. *Power System Analysis*. Singapura : McGraw-Hill.
- [7]. Santosa B, Willy P. 2011. *Metode Metaheuristik, Konsep dan Implementasi*. Surabaya : Penerbit Guna Widya.
- [8]. Soliman AH, Mantawy AAH. 2012. *Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power Systems*. New York : Springer Science Business Media.
- [9]. Tuaimah FM, Yaser NA. *Ant Colony Optimization based Optimal Power Flow Analysis for The Iraqi Super High Voltage Grid*. International Journal of Computer Applications. 2013; 67(11) : 13-18.
- [10]. Wood AJ, Wollenberg BF. 1996. *Power Generation, Operational, and Control*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- [11]. Zuliari EA, Robandi I. *The Solution of Economic Dispatch for 26 bus Power System Using Chaotic Ant Swarm Optimization (CASO)*. Proceedings of National Seminar on Applied Technology, Science, and Arts (1st APTECS). Surabaya. 2009;1:325-329.