

# Optimasi Keekonomian dan Emisi pada Sistem Kelistrikan JAMALI Menggunakan Algoritma PSO

## Economic and Emission Optimization in the JAMALI System Using PSO Algorithm

Arizsatrio Anggawijaya<sup>1</sup>, Jangkung Raharjo<sup>\*2</sup>, Kharisma Bani Adam<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>*School of Electrical Engineering-Telkom University  
Jl. Telekomunikasi Terusan Buah Batu Bandung Indonesia 40257*

<sup>\*:2</sup>Corresponding author: jangkungraharjo@telkomuniversity.ac.id  
<sup>1</sup>arizsatrio@ student.telkomuniversity.ac.id, <sup>3</sup>kharismaadam@telkomuniversity.ac.id

Received on 13-08-2023, accepted on 14-11-2023, published on 31-01-2024

### Abstrak

Sebagian besar listrik di Indonesia dikonsumsi oleh pelanggan yang terkoneksi ke pembangkit Jawa-Madura-Bali (JAMALI) yang menggunakan beberapa tipe pembangkit. Namun, seiring dengan perkembangan waktu dan teknologi, kebutuhan listrik di Indonesia semakin meningkat yang menyebabkan meningkatnya biaya operasional dan juga jumlah emisi yang dihasilkan dari setiap generator, sehingga diperlukan sebuah optimasi biaya operasional dan emisi yang dihasilkan oleh setiap pembangkit. *Combined economic emission dispatch* (CEED) merupakan sebuah upaya untuk mengatur seberapa besar daya yang dihasilkan dari setiap pembangkit dengan memperhatikan jumlah emisi dan biaya operasional yang dihasilkan oleh setiap pembangkit sesuai dengan karakteristik dari setiap pembangkit. Untuk melakukan optimasi pada CEED, algoritma particle swarm optimization (PSO) menjadi salah satu metode optimasi untuk menentukan prediksi hasil CEED terbaik dan terinspirasi dari konsep perilaku sosial hewan seperti kawanan burung dan kawanan ikan. Hasil pada PSO pada saat melakukan optimasi dapat mencapai biaya operasional dan emisi yang optimal pada saat melakukan optimasi 42 generator pembangkit JAMALI. Sehingga PSO dapat menghasilkan hasil optimasi yang terbaik. Algoritma particle swarm optimization (PSO) tidak hanya memberikan solusi optimal untuk penjadwalan pembangkit Jawa-Madura-Bali dengan mempertimbangkan biaya operasional dan gabungan *economic dispatch* dan *emission dispatch*, tetapi juga menunjukkan performa yang unggul dalam waktu iterasi rata-rata 1,4435 detik dan biaya operasional yang lebih rendah sebesar 45,482% dibandingkan dengan KMA.

**Kata kunci:** CEED, biaya operasional, emisi, JAMALI, optimasi, *particle swarm optimization*.

### Abstract

Most of Indonesia's electricity is consumed by the Java-Madura-Bali (JAMALI) grid, which employs various generator types. There is an increase in energy consumption, necessitating optimizing operational costs and emissions for each generator. The Combined Economic Emission Dispatch (CEED) strategy aims to balance power generation from each source, considering their individual emission and operational cost profiles. To enhance the efficiency of CEED, the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, inspired by the social behaviors of animal groups like bird flocks and fish schools, has been employed. This study demonstrates that PSO optimizes operational costs and emissions across JAMALI's 42 generators effectively, outperforming the KMA method. Notably, PSO achieves an average iteration time of approximately 1.4435 seconds (around 4 hours) and reduces operational costs by 45.482%. Thus, PSO emerges as an optimal solution for scheduling power generation in the Java-Madura-Bali grid, balancing economic dispatch with emission considerations.

**Keywords:** CEED, emissions, JAMALI, operational costs, optimization, particle swarm optimization.

## I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi keseluruhan di Indonesia pada tahun 2008 mencapai 179,48 MTOE atau 2087,35 TWh. Sementara, energi listrik yang dihasilkan pada tahun yang sama sebesar 149,44 TWh. Dari seluruh konsumsi listrik tersebut, sebagian besar listrik dikonsumsi oleh pelanggan yang terkoneksi dengan sistem interkoneksi Jawa-Madura-Bali (JAMALI), yaitu sebesar 78,11%. Energi primer yang digunakan oleh sistem interkoneksi JAMALI sebagian besar masih berupa batu bara, minyak bumi, dan gas alam, masing-masing sebesar 40,90%, 29,13% dan 20,14%. Indonesia juga kaya akan potensi energi terbarukan untuk dikembangkan dalam penyediaan tenaga listrik, salah satunya adalah panas bumi. Potensi panas bumi banyak terdapat di Sumatera (13.800 MW), Jawa dan Bali (10.359,5 MW), serta Sulawesi (2.000 MW). Dari total potensi tersebut, hanya 964 MW pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) yang dikembangkan yang berlokasi di Jawa dan Bali. Selain panas bumi, ada juga potensi tenaga air yang merupakan sumber energi terbarukan dengan potensi terbesar, namun belum dapat dimanfaatkan secara efektif dalam hal penyediaan listrik. Potensi PLTA Indonesia diperkirakan mencapai 75.674 MW, namun hanya 4.200 MW (sekitar 5%) yang digunakan untuk memasok listrik[1]

Pembangkit listrik tradisional memiliki kelemahan, seperti pembangkit listrik tenaga batu bara menghasilkan gas karbon dioksida ( $CO_2$ ) yang berdampak pada lingkungan. Energi nuklir memiliki biaya dan limbah energi nuklir dalam jumlah besar yang berbahaya bagi manusia [2]. Sebagian besar pembangkit di Indonesia adalah pembangkit panas yang menggunakan bahan bakar fosil. Pembelian bahan bakar untuk penggunaan pembangkit listrik menghabiskan biaya 60% dari total biaya operasi [3]. Kemahalan harga BBM sangat bergantung pada beban masing-masing unit produksi. Semakin tinggi beban pada generator, semakin tinggi biaya bahan bakar. Oleh karena itu, terdapat korelasi antara beban listrik dengan biaya produksi seperti daya input generator, sehingga beban listrik merupakan fungsi dari biaya produksi. Meminimalkan biaya bahan bakar dalam membangkitkan energi listrik tanpa mengurangi kualitas layanan serta tidak boleh melanggar batasan/kendala yang ada dikenal dengan istilah *Economic Dispatch (EcD)*, yang menghormati batasan masing-masing unit produksi [4]. Dengan terwujudnya ECD dalam sistem ketenagalistrikan, maka biaya produksi setiap unit dalam produksi listrik yang dihasilkan dapat diminimalkan. Ketika bahan bakar fosil dibakar di pembangkit listrik termal, emisi seperti sulfur oksida ( $SO_x$ ), nitrogen oksida ( $NO_x$ ) dan karbon dioksida ( $CO_2$ ) dilepaskan ke lingkungan. Dalam hal ini, emisi dari setiap unit produksi diminimalkan untuk mengurangi dampak lingkungan. Ini disebut pengiriman daya dengan emisi terendah atau *emission dispatch (EmD)*. Kombinasi dari pemecahan dua masalah produksi ini disebut optimasi pengiriman daya dengan mempertimbangkan biaya dan emisi atau disebut *combined economy and emissions dispatch (CEED)*. Dengan mengimplementasikan CEED pada sistem tenaga listrik, diharapkan pelayanan konsumen terjaga dengan tetap mengoptimalkan setiap unit produksi, sehingga emisi dan biaya bahan bakar ditekan serendah mungkin dan batasan setiap unit produksi diperhitungkan [5]–[10]

Untuk melakukan implementasi CEED, terdapat beberapa algoritma yang dapat dipakai, seperti algoritma *cuckoo optimization algorithm (COA)*, *firefly algorithm (FA)*, *particle swarm optimization (PSO)*, dan lain-lain. Algoritma yang digunakan pada penelitian jurnal ini adalah PSO. Pada studi sebelumnya [11]–[14], algoritma ini dinilai memiliki hasil yang lebih baik dalam hal biaya pembangkitan daya dibandingkan dengan algoritma COA dan FA. Untuk mengetahui tingkat hasil performa algoritma ini, diperlukan simulasi menggunakan data 42 generator pembangkit listrik Jawa-Madura-Bali (JAMALI) serta hasilnya divalidasi dengan cara membandingkan hasil tersebut dengan hasil algoritma komodo mlipir algorithm (KMA)[15].

## II. STUDI PUSTAKA

Daya listrik yang dikeluarkan pembangkit harus dapat mengikuti permintaan beban secara dinamis. Daya yang dikeluarkan pembangkit lebih kecil dari permintaan beban tentu tidak diharapkan karena akan terjadi pemadaman Sebagian beban. Pembangkitan daya yang berlebih juga tidak diharapkan karena berhubungan erat dengan pemborosan. Idealnya daya yang dibangkitkan adalah sama dengan permintaan beban ditambah rugi-rugi daya yang terjadi. Untuk itu optimasi pembangkitan daya pada setiap pembangkit perlu dilakukan. Untuk melakukan optimasi, diperlukan fungsi obyektif yang harus diikuti serta beberapa *constraint* yang tidak boleh dilanggar.

### A. Economic Dispatch (ED)

Economic Dispatch memiliki tujuan untuk mengirimkan daya yang dibangkitkan beberapa generator sehingga biaya operasional, terutama biaya bahan bakarnya termurah tanpa melanggar kendala-kendala yang ada. Fungsi obyektif ED ditunjukkan pada persamaan (1).

$$F_i = \sum_{i=1}^N (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (1)$$

Dimana  $F_i$  adalah biaya operasional,  $P_i$  adalah daya yang dibangkitkan oleh pembangkit atau generator- $i$ , untuk  $a_i, b_i, c_i$  adalah konstanta Economic dari Generator- $i$ , dan  $N$  adalah jumlah generator.

### B. Emission Dispatch (ED)

Tujuan Emission Dispatch adalah untuk mencari kombinasi dari masing-masing generator untuk menghasilkan total emisi minimum oleh setiap generator dalam satuan gram/jam (Gram/h). Fungsi obyektif dari ED ditunjukkan pada persamaan (2).

$$F_i = \sum_{i=1}^N (\alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i) \quad (2)$$

Dimana  $F_i$  adalah biaya operasional,  $P_i$  adalah daya yang dibangkitkan oleh pembangkit atau generator  $i$ ,  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  adalah rumus koefisien emisi dari generator ke- $i$  dan  $N$  adalah jumlah generator.

### C. Pengiriman Daya dengan Mempertimbangkan Biaya dan Emisi yang Optimal

Pengiriman daya dengan mempertimbangkan biaya dan emisi yang optimal atau CEED memiliki dua tujuan, yaitu mencari biaya operasi dan emisi yang optimal tanpa melanggar kendala-kendala atau Batasan-batasan yang ditetapkan. Pada penelitian ini, algoritma CEED diterapkan pada sistem kelistrikan JAMALI. Fungsi obyektif dari CEED ditunjukkan pada persamaan (3).

$$\sum_{i=1}^N F_i = A(a_i + b_i P_i + c_i P_i) + B(\alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i) \quad (3)$$

Dimana  $F_i$  adalah biaya operasional,  $P_i$  adalah daya yang dibangkitkan oleh generator ke- $i$ ,  $a_i, b_i, c_i$  koefisien-koefisien *economic* dari generator  $i$ ,  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  merupakan koefisien emisi dari generator  $i$ ,  $N$  adalah jumlah generator, dan  $A, B$  masing-masing menyatakan bobot EcD dan EmD yang diuji dari berbagai variasi harga.

### D. Batasan-batasan

Semua fungsi target yang digunakan harus memberikan hasil yang optimal, sesuai dengan kapasitas pembangkitan dan karakteristik masing-masing generator pembangkit listrik JAMALI, serta sesuai dengan permintaan daya. Selain mengacu pada fungsi obyektif (fungsi tujuan), optimasi juga harus memenuhi kendala-kendala atau batasan-batasan yang ditetapkan seperti ditunjukkan pada persamaan (4) hingga persamaan (7). Namun, hasil keluaran dari setiap generator harus memenuhi nilai terendah dan nilai tertinggi daya operasi dari setiap generator yang diekspresikan dengan rumus:

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_D + P_R \quad (4)$$

Dimana  $P_D$  adalah permintaan daya beban dan  $P_R$  adalah rugi-rugi saluran. Apabila rugi-rugi saluran diabaikan maka berlaku persamaan (5).

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_D \quad (5)$$

Apabila persamaan (4) atau (5) tidak dipenuhi, maka akan terjadi dua kemungkinan yaitu kekurangan pasokan atau kelebihan pasokan. Setiap generator harus beroperasi pada daerah operasinya, yaitu batas minimum dan batas maksimum seperti ditunjukkan pada persamaan (6).

$$P_{imin} \leq P_i \leq P_{imax} \quad (6)$$

Dimana  $P_{imin}$  dan  $P_{imax}$  masing-masing adalah daya minimum dan daya maksimum generator ke- $i$  dengan satuan Megawatt (MW). Setiap generator harus memenuhi respon perubahan permintaan beban baik untuk permintaan yang menaik maupun permintaan yang menurun, yang ditunjukkan pada persamaan (7) dan (8) [15].

$$P_{i,min} = \max\{P_{i,min}, P_i(t-1) - RD_i\} \quad (7)$$

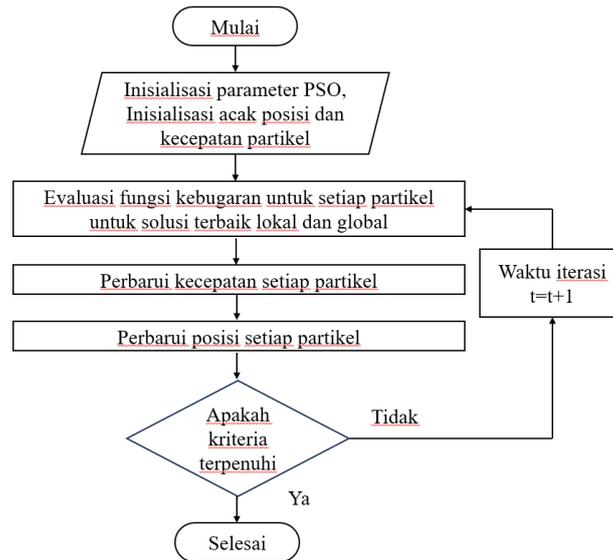
$$P_{i,max} = \max\{P_{i,max}, P_i(t-1) - RU_i\} \quad (8)$$

Di sini,  $P_{i,min}$  dan  $P_{i,max}$  masing-masing merupakan batas daya minimum dan maksimum dari generator ke- $i$ , sedangkan *ramp down* dan *ramp up* generator ke- $i$  masing-masing dilambangkan dengan  $RD_i$  dan  $RU_i$ .

### III. METODOLOGI

#### A. Algoritma PSO

*Particle Swarm Optimization* (PSO) merupakan sebuah algoritma stokastik yang memiliki basis berupa sebuah kawanan yang awalnya diusulkan oleh Kennedy dan Eberhearth [13] dengan mengeksploitasi konsep perilaku sosial hewan seperti kawanan burung dan kawanan ikan. PSO bekerja dengan menggunakan banyak partikel yang membentuk kawanan (*population size*) [13], [16]. Setiap partikel terkait dengan sebuah kandidat solusi. Kandidat-kandidat solusi ini hidup berdampingan dan berkolaborasi secara bersamaan. Setiap partikel dalam kawanan terbang di area pencarian untuk mencari tempat pendaratan yang terbaik. Oleh karena itu, area pencarian merupakan kumpulan dari solusi yang mungkin, dan kelompok partikel yang terbang (kawanan) mewakili solusi yang terus berubah. Selama proses pembangkitan (iterasi), setiap partikel mengikuti solusi terbaiknya (optimal) dan solusi terbaik (optimal) dari kawanan tersebut. Kemudian, mereka mengubah dua parameter, yaitu kecepatan dan posisi. Lebih spesifik lagi, setiap partikel secara dinamis menyesuaikan kecepatan terbangnya sebagai respons terhadap pengalaman terbangnya sendiri dan pengalaman tetangganya. Demikian pula, partikel tersebut mencoba mengubah lokasinya berdasarkan informasi tentang lokasi saat ini, kecepatan, jarak antara lokasi saat ini dan optimal pribadi, serta antara lokasi saat ini dan optimal kawanan. Kawanan partikel (burung) terus bergerak ke wilayah yang menjanjikan hingga menemukan optimum global yang dapat memecahkan masalah optimasi [13], [16]. Algoritma PSO secara sederhana dijelaskan melalui diagram alir pada Gambar 1 [17].

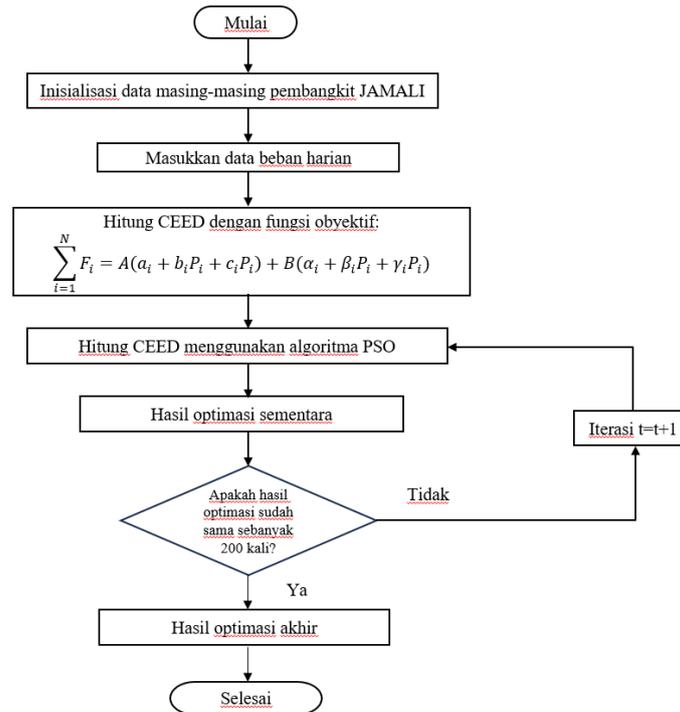


Gambar 1 Diagram Alur untuk Algoritma PSO Dasar

## B. Pengimplementasian Algoritma PSO.

Pengimplementasian PSO akan dilihat lebih jelas pada diagram alir metode PSO pada CEED yang ditunjukkan pada Gambar 2. Implementasi program dilakukan dengan menggunakan data kuantitatif pembangkit JAMALI yang kemudian akan dikalkulasikan dengan menggunakan persamaan CEED dan algoritma PSO. Algoritma PSO akan menentukan hasil optimasi biaya operasional dan emisi yang dihasilkan untuk memenuhi kebutuhan permintaan daya. Parameter yang diatur untuk menentukan hasil prediksi dari Algoritma PSO yang pertama adalah jumlah *population size* (*PopSize*). *Popsize* merupakan angka acak yang akan dikalkulasikan ke dalam rumus CEED. Hasil CEED sendiri akan menyesuaikan dengan karakteristik biaya operasional dan emisi dari setiap pembangkit, kemudian hasil CEED ini yang akan menjadi populasi angka untuk dilakukan optimasi oleh algoritma PSO. Dari populasi angka ini, algoritma PSO akan memilih hasil kalkulasi terbaik sesuai dengan cara kerja algoritma dari populasi angka CEED dan akan melakukan iterasi secara berulang. Pada simulasi ini, jumlah angka acak (*PopSize*) yang akan dimunculkan adalah sebanyak 1000 angka [5], [6], [18]–[20].

Kemudian, apabila setelah 200 kali iterasi hasil iterasi tidak terjadi perubahan atau tidak menghasilkan hasil yang lebih baik dari hasil sebelumnya, maka hasil iterasi algoritma PSO ini menjadi hasil yang terbaik. Ini berarti, dalam proses iterasi, algoritma secara berkala mengevaluasi apakah terdapat peningkatan pada solusi yang dihasilkan. Jika dalam 200 iterasi berturut-turut tidak ditemukan peningkatan, algoritma akan menganggap bahwa solusi terakhir yang diperoleh adalah yang terbaik yang bisa dicapai dalam konteks yang diberikan. Pendekatan ini digunakan untuk menghindari proses iterasi yang tidak efektif dan berlarut-larut tanpa memberikan peningkatan yang signifikan. Oleh karena itu, algoritma PSO menggunakan kondisi berhenti ini untuk memastikan bahwa sumber daya komputasi digunakan secara efisien, menghemat waktu dan energi yang diperlukan untuk mencapai solusi yang dianggap optimal dalam konteks yang spesifik. Pengimplementasian PSO akan dilihat lebih jelas pada diagram alir metode PSO pada CEED yang dilampirkan pada Gambar 1. Untuk mendapatkan hasil optimasi akhir, dilakukan iterasi berulang kali hingga didapatkan hasil optimasi yang sama pada itersi sebanyak dua ratus kali. Hal ini tentunya merupakan syarat yang sangat ketat, sehingga hasilnya dapat dikatakan sebagai solusi.



Gambar 2. Diagram Alir Metode PSO pada CEED

#### IV. HASIL DAN DISKUSI

Data karakteristik generator dan karakteristik emisi diambil melalui pengujian setiap generator secara berkala yang dilakukan oleh penyedia pembangkitan. Untuk pengujian system pada makalah ini diambil dari [15], data yang digunakan merupakan data kuantitatif yang merupakan data karakteristik empat puluh dua generator pembangkit JAMALI serta data emisi pembangkit JAMALI yang ditunjukkan pada Tabel 1 (Karakteristik Generator) dan Tabel 2 (Karakteristik Emisi).

Tabel 1. Karakteristik Generator

Gen	a	b	c	(MW)		(MW/h)	
				Pmin	Pmax	RU	RD
1	1.06	-796.5	500770.41	250	371.5	300	300
2	1.06	-796.5	500770.41	250	371.5	300	300
3	1.06	-796.5	500770.41	250	371.5	300	300
4	1.06	-796.5	500770.41	250	371.5	300	300
5	0.53	-580.731	548169.063	408	575	300	300
6	0.53	-580.731	548169.063	408	575	300	300
7	0.53	-580.731	548169.063	408	575	300	300
8	0	0	10000	87.5	174.6	720	720
9	0	0	10000	87.5	174.6	720	720
10	0	0	10000	87.5	174.6	720	720
11	0	0	10000	87.5	174.6	720	720
12	-29.86	2116.1058	578259.403	40	80	60	60
13	-29.86	2116.1058	578259.403	40	80	60	60
14	-1.88	253.0934	437774.976	75	170	120	120
15	-1.88	253.0934	437774.976	75	170	120	120
16	1.661	-1475.578	674957.404	220	480	300	300
17	1.661	-1475.578	674957.404	220	480	300	300
18	1.661	-1475.578	674957.404	220	480	300	300
19	967.659	-26243.28	837352.902	5	16	120	120
20	967.659	-26243.28	837352.902	5	16	120	120

21	0	0	15000	60	118.5	7200	7200
22	0	0	15000	60	118.5	7200	7200
23	0	0	15000	60	118.5	7200	7200
24	0	0	15000	60	118.5	7200	7200
25	0	0	15000	60	118.5	7200	7200
26	0	0	15000	60	118.5	7200	7200
27	0	0	15000	60	118.5	7200	7200
28	0	0	15000	60	118.5	7200	7200
29	0.67	-803.4	664191.82	400	661	180	180
30	0.67	-803.4	664191.82	400	661	180	180
31	0.67	-803.4	664191.82	400	661	180	180
32	0.67	-803.4	664191.82	400	661	180	180
33	-5.98	61.9058	620176.752	120	140	240	240
34	2.429	-2101.891	934134.238	200	459	240	240
35	2.429	-2101.891	934134.238	200	459	240	240
36	0.536	-727.78	828790.263	345	640	1200	1200
37	1.071	-1494.774	1142590.01	180	274	300	300
38	4.045	-3723.275	1659160.91	200	420	540	540
39	4.045	-3723.275	1659160.91	200	420	540	540
40	13.045	-5341.694	1068419.16	180	214	420	420
41	1.36	-963.92	541408.16	250	370	240	240
42	1.36	-963.92	541408.16	250	370	240	240

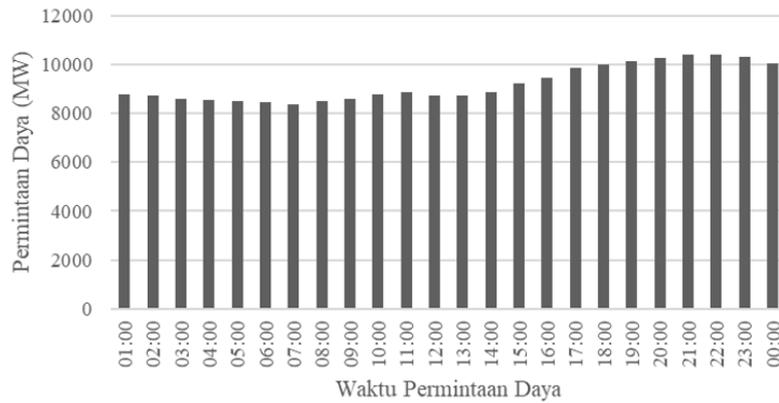
Tabel 2. Karakteristik Emisi

Gen	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	Gen	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
1	23.0041	-1.2414	0.0142	22	0	0	0
2	23.0041	-1.2414	0.0142	23	0	0	0
3	23.0041	-1.2414	0.0142	24	0	0	0
4	23.0041	-1.2414	0.0142	25	0	0	0
5	331.0012	-3.8812	0.0512	26	0	0	0
6	331.0012	-3.8812	0.0512	27	0	0	0
7	331.0012	-3.8812	0.0512	28	0	0	0
8	0	0	0	29	44.0031	-4.4123	0.0556
9	0	0	0	30	44.0031	-4.4123	0.0556
10	0	0	0	31	44.0031	-4.4123	0.0556
11	0	0	0	32	44.0031	-4.4123	0.0556
12	330.0021	-3.7884	0.04332	33	21.0334	-0.6224	0.0345
13	330.0021	-3.7884	0.04332	34	559.441	-0.9412	0.0553
14	14.9231	-0.3277	0.3485	35	559.441	-0.9412	0.0553
15	14.9231	-0.3277	0.3485	36	12.9953	-0.2339	0.0332
16	49.823	-0.2134	0.0423	37	34.8343	-0.1584	0.0848
17	49.823	-0.2134	0.0423	38	55.0012	-5.4332	0.0823
18	49.823	-0.2134	0.0423	39	55.0012	-5.4332	0.0823
19	387.121	-0.3213	0.0113	40	32.4525	-0.4123	0.04231
20	387.121	-0.3213	0.0113	41	22.8831	-1.2321	0.0112
21	0	0	0	42	22.8831	-1.2321	0.0112

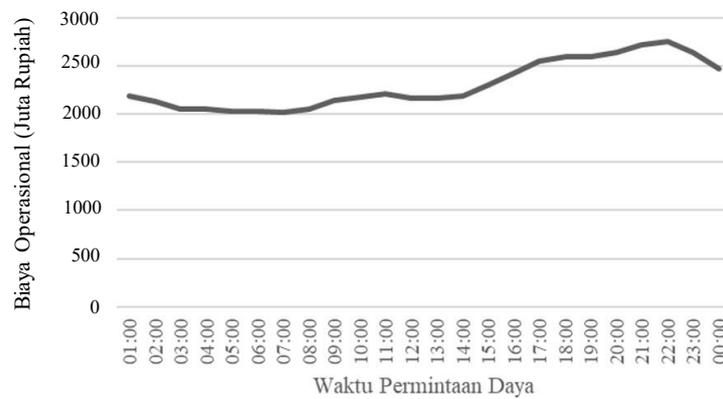
Data generator pada Tabel 1 dan Tabel 2 digunakan untuk simulasi CEED menggunakan algoritma PSO. Simulasi dilakukan dengan menggunakan data permintaan beban selama 24 jam seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Permintaan daya berlangsung secara dinamis. Gambar 3 menunjukkan permintaan daya beban pada system kelistrikan JAMALI setiap jam, dari jam 01.00 hingga jam 24.00, berdasarkan referensi [15].

Tujuan optimasi adalah mencari nilai terbaik sesuai dengan permasalahan yang ditunjukkan fungsi tujuan atau fungsi obyektifnya. Sebagai contoh dalam kasus *economic dispatch*, fungsi tujuannya adalah nilai biaya operasional seluruh pembangkit listrik yang paling murah, sementara pada kasus *emission dispatch*, fungsi tujuannya adalah nilai emisi yang dihasilkan seluruh pembangkit listrik yang paling minimal. Sementara itu fungsi tujuan pada kasus CEED adalah nilai optimal dari biaya operasional dan emisi yang dihasilkan. Data permintaan beban dinamis pada Gambar 3 ini digunakan untuk menguji algoritma PSO dalam

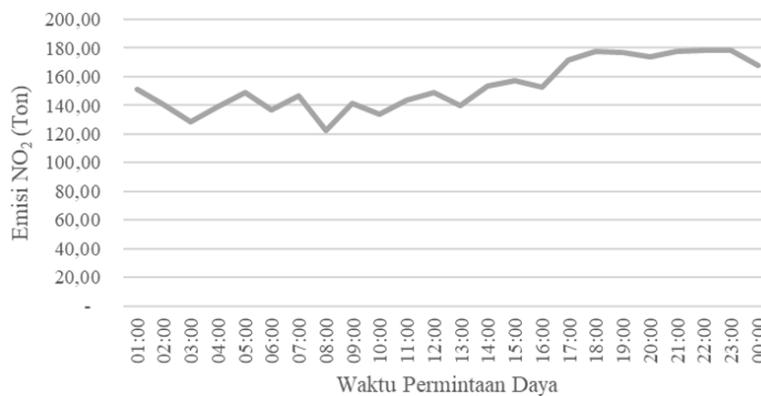
mengoptimasi keekonomian dan emisi pembangkit listrik JAMALI. Hasil simulasi CEED ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 3. Data Permintaan Load 24 Jam



Gambar 4. Hasil *Economic Dispatch* Dari CEED

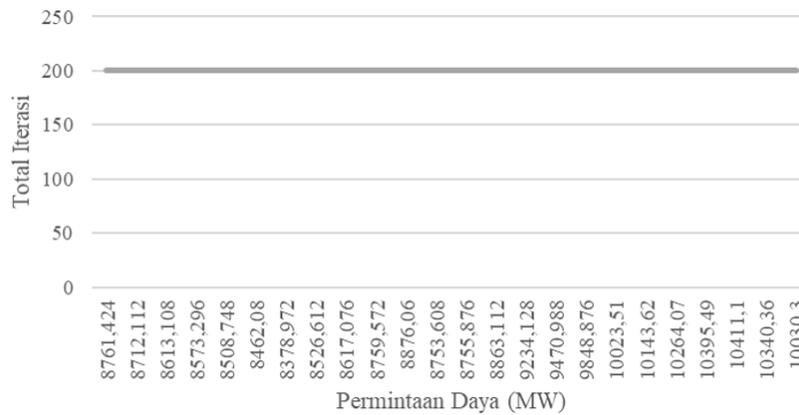


Gambar 5. Hasil *Emission Dispatch* dari CEED

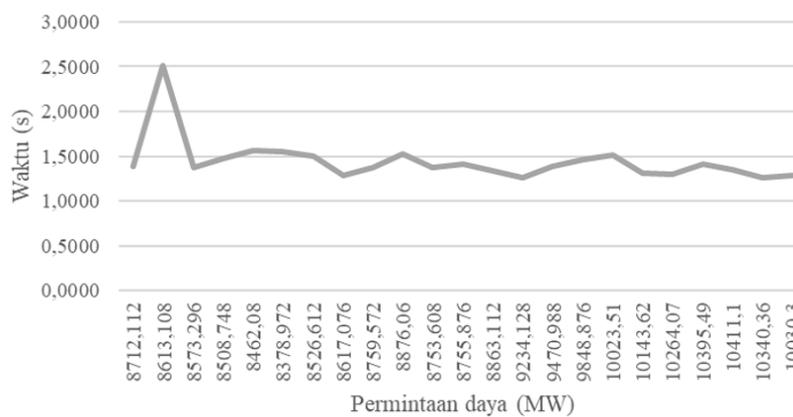
Dari hasil percobaan yang ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5 terlihat seberapa besar hasil biaya operasional dan emisi setiap jam yang dihasilkan untuk setiap permintaan daya. Untuk hasil biaya operasional yang dihasilkan menurut iterasi algoritma PSO dari setiap generator berkisar dari Rp.2.000.000.000,00/jam hingga Rp.2.800.000.000,00/jam dan untuk hasil emisi berkisar 120 hingga 180

Ton/jam. Kemudian pada saat PSO melakukan optimasi, terlihat pada Gambar 4 dan Gambar 5 bahwa setiap generator mengalami perubahan pengeluaran emisi dan biaya operasional per jam yang cukup konsisten meskipun terdapat beberapa perubahan yang terlalu signifikan. Perubahan ini terlihat pada permintaan daya pada pukul 07.00 pagi (8378,972 MW) memiliki permintaan daya lebih rendah dibandingkan dengan pukul 08.00 pagi (8526,612 MW) pagi namun hasil emisi yang dihasilkan jam 07.00 yaitu 146,45 ton/jam, lebih tinggi bila dibandingkan dengan emisi yang dihasilkan pada jam 08.00 yaitu sebesar 122,26 ton/jam. Hal ini juga terjadi juga antara jam 15.00 dan jam 16.00, jam 22.00 dan 23.00, serta jam 04.00 dan jam 05.00. Salah satu perubahan ini terlihat pada permintaan daya pada jam 07.00 yaitu sebesar 8378,972 MW, memiliki permintaan daya lebih rendah dibandingkan permintaan pada jam 08.00, yaitu sebesar 8526,612 MW.

Idealnya pada proses optimasi, jumlah iterasi bukan dijadikan batasan dalam mencapai nilai optimal. Banyak cara dalam menghentikan proses iterasi dalam suatu permasalahan optimasi. Sebagai contoh apabila nilai optimasi pada iterasi ke-k dan ke-(k+1) tidak terjadi perbedaan yang signifikan maka nilai pada iterasi ke-k dijadikan sebagai nilai optimal. Cara lain adalah dilakukan sejumlah iterasi yang menunjukkan pada iterasi ke-k apabila diulang beberapa kali tetap menunjukkan nilai yang sama, pada nilai optimasi pada iterasi ke-k tersebut dianggap sebagai nilai optimal. Pada makalah ini, nilai optimal diambil dari hasil optimasi pada suatu iterasi yang menunjukkan nilai yang sama sebanyak dua ratus kali, maka nilai pada iterasi tersebut dianggap sebagai nilai optimal.



Gambar 6. Total Iterasi PSO Untuk Mencari Hasil CEED Terbaik.



Gambar 7. Kecepatan Iterasi PSO pada Saat Mencari Hasil CEED Terbaik.

Performansi algoritma PSO dalam mengoptimasi CEED yang diuji dengan permintaan beban dinamis selama 24 jam ditunjukkan pada Gambar 5. Nilai dianggap optimal apabila diperoleh hasil sebanyak 200 kali dengan nilai yang sama pada setiap beban. Pada penelitian ini juga dipertimbangkan waktu proses mengingat bahwa EcD, EmD, maupun CEED biasanya digunakan untuk penjadwalan pembangkit atau

lelang energi listrik, maka waktu proses menjadi pertimbangan. Pada penelitian ini, proses optimasi akan berhenti apabila hasil optimasi sudah memiliki hasil yang selalu sama untuk dua ratus iterasi, seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Gambar 6 menunjukkan waktu proses dari setiap pengujian beban, yaitu waktu proses CEED rata-rata adalah selama 1,4435 detik. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma PSO memiliki waktu proses yang sangat cepat sehingga cocok untuk keperluan penjadwalan pembangkit maupun lelang energi listrik yang biasanya dilakukan per satu jam. Gambar 7 menunjukkan waktu iterasi yang diperlukan dalam mencapai kondisi optimal dalam mensuplai setiap beban, dimana waktu yang diperlukan lebih kecil dari 2,5 detik. Sementara itu, EcD, EcD, dan CEED dalam penerapannya digunakan untuk penjadwalan pembangkit yang terkait dengan lelang energi listrik yang dilaksanakan setiap satu jam oleh penyedia energi listrik. Dengan demikian algoritma PSO layak dipertimbangkan untuk diterapkan dalam penjadwalan pembangkit-pembangkit dalam mensuplai beban.

Penerapan algoritma PSO pada EcD sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (JAMALI) ini juga divalidasi dengan membandingkan hasilnya dengan algoritma Komodo Mlipir atau Komodo Mlipir Algorithm (KMA) [8], seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Perbandingan dilakukan melalui simulasi mencari biaya operasional terendah dengan menggunakan data karakteristik yang sama dan jumlah generator yang sama serta menggunakan permintaan daya sebesar 11,013 MW [8].

Table.3 Perbandingan Dengan Algoritma Pembanding

Metode	Jumlah Generator	Biaya Operasional (Rp/Jam)
PSO	42	2.819.633.402,22
KMA	42	4.479.537.419,61

Dari hasil pengujian dan perbandingan yang ditunjukkan pada Tabel 3, menunjukkan bahwa dalam mengoptimasi ED memakai algoritma PSO memberikan hasil yang lebih unggul dengan perbedaan sebesar 45,482% dengan selisih harga sebesar Rp1.659.904.017,39 dibandingkan dengan algoritma komodo mlipir algorithm (KMA).

## V. KESIMPULAN

Dengan mengimplementasikan data kuantitatif dari persamaan karakteristik pembangkit serta karakteristik emisi pembangkit Jawa-Madura-Bali, dapat disimpulkan bahwa algoritma PSO memberikan hasil yang optimal untuk penjadwalan pembangkit JAMALI dengan mempertimbangan biaya operasional atau yang sering disebut dengan ED. PSO juga mampu memberikan hasil yang optimal pada gabungan EcD dan EmD yang dikenal dengan *Combine Economic and Emission Dispatch*. Performa Algoritma PSO dalam melakukan pencarian hasil CEED terbaik dilakukan dengan sangat baik dan cepat dengan waktu iterasi rata-rata selama 1,4435 detik. PSO memberikan hasil CEED dengan baik setelah dilakukan pengujian kembali sebanyak 200 kali. Dibandingkan dengan KMA dalam optimasi biaya operasi pembangkit, PSO lebih unggul dengan biaya yang lebih rendah, yaitu sebesar Rp. 1.659.904.017,39 atau sebesar 45,482% lebih rendah dibanding dengan KMA. Proses optimasi menggunakan algoritma PSO memakan waktu kurang dari 2.5 detik, sehingga algoritma ini cocok untuk diterapkan pada optimasi penjadwalan pembangkit-pembangkit dalam mendukung proses kediatan lelang energi listrik yang dilakukan oleh penyedia energi listrik.

## REFERENCES

- [1] S. Kanata, "Kajian Ekonomis Pembangkit Hybrid Renewable Energi Menuju Desa Mandiri Energi di Kabupaten Bone-Bolango," *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. 11, no. 2, Apr. 2015, doi: 10.17529/jre.v11i2.2288.
- [2] B. C. Babu and K. B. Mohanty, "Doubly-Fed Induction Generator for Variable Speed Wind Energy Conversion Systems-Modeling & Simulation," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, pp. 141-147, 2010, doi: 10.7763/ijcee.2010.v2.127.
- [3] "PENJADWALAN OPERASI PEMBANGKIT PLTG GUNUNG MEGANG BERDASARKAN BIAYA BAHAN BAKAR Yusro Hakimah\*)."
- [4] H. Saadat, *Power System Analysis*, no. v. 1. in McGraw-Hill series in electrical and computer engineering. WCB/McGraw-Hill, 1999. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=kSa4AAAACAAJ>

- [5] F. P. Mahdi, P. Vasant, V. Kallimani, J. Watada, P. Y. S. Fai, and M. Abdullah-Al-Wadud, "A holistic review on optimization strategies for combined economic emission dispatch problem," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81. Elsevier Ltd, pp. 3006–3020, Jan. 01, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2017.06.111.
- [6] K. M. D. Puspitasari, J. Raharjo, A. S. Sastrosubroto, and B. Rahmat, "Generator Scheduling Optimization Involving Emission to Determine Emission Reduction Costs," *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, vol. 35, no. 8, Aug. 2022, doi: 10.5829/IJE.2022.35.08B.02.
- [7] C. K. Wachjoe, H. Zein, and J. Raharjo, "A fast scheduling method to solve economic load dispatch problem," *International Review of Automatic Control*, vol. 13, no. 1, pp. 12–18, 2020, doi: 10.15866/ireaco.v13i1.18130.
- [8] H. Zein, J. Raharjo, and A. Soeprijanto, "Dynamic Economic Load Dispatch of Electric Power System Using Direct Method," 2018. [Online]. Available: <http://www.ripublication.com>
- [9] J. Raharjo, A. Soeprijanto, and H. Zein, "Novel Method to Solve Economic Dispatch Scheduling for Large-Scale Power System," 2017. [Online]. Available: <http://www.ripublication.com12500>
- [10] J. Raharjo, H. Zein, and K. B. Adam, "Optimal economic load dispatch with prohibited operating zones using large to small area technique," *International Journal on Energy Conversion*, vol. 9, no. 1, pp. 29–34, 2021, doi: 10.15866/irecon.v9i1.19548.
- [11] J. Zhu, "Unit Commitment," in *Optimization of Power System Operation*, IEEE, 2015, pp. 253–296. doi: 10.1002/9781118887004.ch7.
- [12] A. G. Gad, "Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications: A Systematic Review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 2531–2561, Aug. 2022, doi: 10.1007/s11831-021-09694-4.
- [13] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 1995, pp. 1942–1948 vol.4. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [14] J.-B. Park, K.-S. Lee, J.-R. Shin, and K. Y. Lee, "A Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch With Nonsmooth Cost Functions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 34–42, Feb. 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2004.831275.
- [15] I. A. Aditya, A. A. Simaremare, J. Raharjo, Suyanto, and I. Wijayanto, "Komodo Mlipir Algorithm to Solve Generator Scheduling Problems," in *Proceedings - 2022 2nd International Conference on Electronic and Electrical Engineering and Intelligent System, ICE3IS 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 84–88. doi: 10.1109/ICE3IS56585.2022.10010294.
- [16] R. Poli, J. Kennedy, and T. Blackwell, "Particle swarm optimization," *Swarm Intelligence*, vol. 1, no. 1, pp. 33–57, Oct. 2007, doi: 10.1007/s11721-007-0002-0.
- [17] R. Umar, "Hybrid Cooperative Energy Detection Techniques in Cognitive Radio Networks," 2014. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/266614526>
- [18] G. A. Kristanto and W. Koven, "Estimating greenhouse gas emissions from municipal solid waste management in Depok, Indonesia," *City and Environment Interactions*, p. 100027, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.CACINT.2020.100027.
- [19] Z. Yuan and M. R. Hesamzadeh, "Applying Convex Optimal Power Flow to Combined Economic and Emission Dispatch," *Journal of Geoscience and Environment Protection*, vol. 04, no. 07, pp. 9–14, 2016, doi: 10.4236/gep.2016.47002.
- [20] E. E. Elattar and S. K. ElSayed, "Modified JAYA algorithm for optimal power flow incorporating renewable energy sources considering the cost, emission, power loss and voltage profile improvement," *Energy*, vol. 178, pp. 598–609, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.04.159.