

Artikel Penelitian

Analisis Economic Dispatch PLTU Tanjung Jati B dengan Menggunakan Metode Lagrange dan Particle Swarm Optimization

Rahmad Setya Darmawan¹, Sri Arttini Dwi Prasetyowati^{2*}, Muhamad Haddin³

¹ Teknik Industri Universitas Islam Sultan Agung; Indonesia

² Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung; Indonesia ; email : arttini@unissula.ac.id

³ Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung; Indonesia

* Korespondensi: Sri Arttini Dwi Prasetyowati

Abstract: This study examines the application of the Lagrange method and Particle Swarm Optimization (PSO) in solving the Economic Dispatch problem at the Tanjung Jati B Steam Power Plant (PLTU). The main objective is to compare the effectiveness of both methods in optimizing load distribution among generation units and to evaluate potential operational cost savings compared to actual operating conditions. The optimization model minimizes a quadratic generation cost function, subject to system load demand and the power output limits of each unit. Simulation data includes daily load distribution and fuel-related parameters such as calorific value and fuel price. The results show that the Lagrange method yields an average power output of 2,367 MW, equal to the real condition, while PSO produces 1,966 MW, which is 16.94% lower. In terms of cost savings, PSO achieves an average saving of IDR 938,501, while the Lagrange method and real operation yield average savings of IDR 1,078,064 and IDR 1,073,076 respectively. In percentage terms, Lagrange shows 12.95% higher savings than PSO and 0.46% higher than the actual condition. This study highlights the importance of integrating optimization methods in power plant operations to improve efficiency and reliability of electricity supply.

Keywords: Economic Dispatch, Lagrange Method, Particle Swarm Optimization, PLTU Tanjung Jati B.

Abstrak: Penelitian ini mengkaji penerapan metode Lagrange dan Particle Swarm Optimization (PSO) dalam menyelesaikan permasalahan Economic Dispatch pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Jati B. Tujuan utamanya adalah membandingkan efektivitas kedua metode dalam mengoptimalkan distribusi beban antar unit pembangkit dan mengevaluasi potensi penghematan biaya operasional dibandingkan dengan kondisi operasional riil. Model optimasi yang digunakan adalah mempertimbangkan fungsi biaya total pembangkitan yang bersifat kuadratik, dengan kendala pemenuhan total beban sistem dan batasan daya pembangkit. Data simulasi meliputi distribusi beban harian dan parameter bahan bakar (nilai kalori dan harga). Hasil menunjukkan bahwa metode Lagrange menghasilkan distribusi daya rata-rata sebesar 2.367 MW, setara dengan kondisi riil, sedangkan PSO menghasilkan 1.966 MW atau 16,94% lebih rendah. Dari sisi biaya, PSO menunjukkan penghematan rata-rata sebesar Rp 938.501, sedangkan Lagrange dan kondisi riil masing-masing sebesar Rp 1.078.064 dan Rp 1.073.076. Secara persentase, Lagrange unggul 12,95% dibanding PSO dan 0,46% dibanding kondisi riil. Penelitian ini menegaskan pentingnya integrasi metode optimasi dalam manajemen operasional PLTU guna meningkatkan efisiensi dan keandalan pasokan listrik.

Kata kunci: Economic Dispatch, Lagrange, Particle Swarm Optimization, PLTU Tanjung Jati B.

Diterima: Mei 05, 2025
Direvisi: Mei 19, 2025
Diterima: Juni 02, 2025
Diterbitkan: Juni 04, 2025
Versi sekarang: Juni 04, 2025



Hak cipta: © 2025 oleh penulis.
Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

1. Pendahuluan

Energi listrik merupakan salah satu faktor penunjang yang sangat penting bagi perkembangan suatu negara. Di Indonesia, setiap tahunnya semakin meningkat kegiatan industri dan jumlah penduduknya, sehubungan dengan hal tersebut kebutuhan energi listriknya pun juga mengalami peningkatan[1]. Untuk mendukung hal tersebut, sudah banyak Pembangkit listrik yang beroperasi sebagai penyedia listrik di Indonesia. Pembangkit Listrik di Indonesia umumnya merupakan pembangkit listrik termal seperti PLTU, PLTG, PLTGU, PLTD. Pembangkit Listrik termal menggunakan energi panas dalam pengoperasiannya untuk membangkitkan energi Listrik. Energi panas ini biasanya dalam bentuk fosil. Saat ini jumlah ketersediaan bahan bakar fosil ini semakin langka, hal ini akan berdampak kepada semakin tingginya harga bahan bakar tersebut. Harga bahan bakar yang tinggi tentunya akan berdampak ke biaya produksi energi Listrik yang meningkat juga[2]. Berdasarkan data realisasi PLTU Tanjung Jati B Tahun 2023 bahwa biaya bahan bakar untuk PLTU Tanjung Jati B mencapai 60% dari total biaya operasi pembangkitan selama 1 tahun 2023 sebesar Rp 14.805.585.183.613 dan untuk biaya bahan bakarnya sendiri adalah Rp 8.880.041.232.745[3]. Tingginya biaya bahan bakar ini yang nantinya akan membuat biaya operasi pembangkit menjadi tidak ekonomis, khususnya pembangkit termal yang memang diperuntukan untuk menanggung beban dasar [4].Seperti penjelasan diatas bahwa pada pengoperasian pembangkit listrik pemakaian bahan bakar menjadi salah satu hal yang perlu mendapatkan perhatian khusus karena sekitar 60-70% dari total biaya operasi yang dikeluarkan merupakan biaya bahan bakar.

Pertambahan beban pada suatu pembangkit listrik akan mendorong pertambahan jumlah pemakaian bahan bakar yang pada akhirnya akan meningkatkan juga pertambahan biaya operasi pembangkit. Oleh karena itu perlu dilakukan upaya untuk mengurangi biaya operasi dengan mengurangi biaya bahan bakar sampai dengan tingkat yang paling minimum.

Salah satu proses untuk meminimalisir pembiayaan produksi pembangkit ini dengan menggunakan Economic Dispatch. Solusi dari masalah Economic Dispatch dengan menggunakan berbagai metode baik secara deterministik maupun undeterministik telah menjadi perhatian para peneliti sejak lama. Pendekatan deterministik berdasarkan cabang ilmu matematika teknik sedangkan pendekatan undeterministik bersifat heuristik menggunakan teknik probabilitas. Contoh Solusi deterministik dalam masalah Economic Dispatch menggunakan metode Lagrange, Iterasi Lambda dan Base Point, sedangkan pendekatan undeterministik masalah Economic Dispatch misalnya menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO), Hybrid Chaotic Particle Swarm Optimizer, Genetic Algorithm (GA), Ant Colony Optimization dan metode Taguchi[5].

Penggunaan metode Lagrange dalam pendekatan deterministik didasarkan pada keunggulannya dalam menyelesaikan masalah optimasi dengan kendala secara matematis, yang memungkinkan penyelesaian yang lebih tepat dan terstruktur. Sementara itu, metode Particle Swarm Optimization (PSO) sebagai pendekatan non-deterministik menawarkan keunggulan dalam mencari solusi optimal melalui simulasi perilaku sosial kawanan, yang mampu menangani masalah optimasi yang kompleks dan non-linier dengan lebih fleksibel dan cepat.

Dari uraian di atas, maka perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui biaya operasi yang optimal dan efisien dengan membandingkan dua metode antara pendekatan deterministik menggunakan metode Lagrange dan pendekatan non-deterministik menggunakan metode Particle Swarm Optimization. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi yang lebih baik dalam mengoptimalkan biaya operasi pembangkit listrik PLTU Tanjung Jati B, sehingga dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap efisiensi energi dan penghematan biaya operasional.

2. Tinjauan Literatur

Meninjau dari penelitian sebelumnya, penelitian yang dilakukan oleh Fajar Sihombing, Karnoto dan Bambang Winardi tahun 2016 dengan judul “Analisis konsumsi bahan bakar pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap pada studi kasus di PLTU Tanjung Jati B”. Penelitian ini berfokus kepada tingginya jam operasi pembangkit maka sebanding dengan bahan bakar yang digunakan semakin banyak. Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah Bahan Bakar Minyak (BBM). Penelitian ini dilakukan dengan cara menghitung biaya penghematan bahan bakar HSD dan MFO terhadap bahan bakar LNG dan Batubara dengan menggunakan metode perhitungan terhadap biaya bahan bakar dan perhitungan terhadap konsumsi spesifik bahan bakar, *beatrate* dan efisiensi termal.

Selain penelitian tersebut meninjau dari penelitian oleh A.S Murti pada tahun 2020 tentang “Optimasi Unit PLTU Berbahan Bakar Batubara di PLTU Suralaya dengan menggunakan Metode Lagrange”. Dimana tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan biaya pembangkitan paling minimum pada suatu kondisi pembebanan tertentu pada sistem tenaga listrik yang mana data yang digunakan hanya data di tanggal 14 Mei 2018 pada pukul 07:00 WIB. Hasil akhir menunjukkan bahwa, dengan total pembangkitan sebesar 2644 MW, biaya yang harus dikeluarkan sebesar Rp1.180.776.616,22 sedangkan dengan metode Lagrange yang digunakan untuk mengoptimasi pembangkit, didapatkan biaya pembangkitan Rp1.160.220.968,97. Besar penghematan yang bisa dilakukan selama satu jam yaitu jam 07.00 Wib yaitu sebesar Rp 20.555.647,26. Dari studi yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa metode Lagrange mampu menghasilkan biaya pembangkitan minimum yang cukup baik dibandingkan dengan biaya pembangkitan riil.

Berdasarkan ide penelitian tersebut, penulis memiliki ide untuk mengembangkan analisa dari penelitian sebelumnya yang hanya menggunakan satu metode menjadi dua metode tentang analisa *economic dispatch* di PLTU Tanjung Jati B dengan menggunakan 2 metode yaitu metode Lagrange dan Metode *Particle Swarm Optimization (PSO)* untuk mengetahui perbandingan distribusi beban dan penghematan biaya operasi antara kondisi riil dengan kedua metode tersebut

Economic Dispatch

Economic Dispatch adalah menjadwalkan keluaran unit pembangkit agar dapat memenuhi permintaan beban pada suatu sistem dengan biaya operasi seminimal mungkin. Perubahan sedikit saja pada Economic Dispatch dapat mengakibatkan perbedaan biaya operasi yang signifikan. Besar beban pada suatu sistem tenaga berubah-ubah pada suatu beban tertentu, sehingga perhitungan pembebanan pembangkit secara optimal pada beban dan waktu yang berubah-ubah disebut *Dynamic Economic Dispatch (DED)*

Permasalahan *Economic Dispatch* adalah masalah optimasi yang kompleks. Proses optimasi ini bertujuan untuk meminimalkan biaya bahan bakar, yang umumnya memiliki karakteristik non-linear. Bentuk umum dari persamaan biaya pembangkitan direpresentasikan dengan fungsi kuadrat seperti berikut:

$$F_i(P_i) = \alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i \tag{1}$$

Dimana :

$F_i(P_i)$ = Biaya operasi tiap unit pembangkit (\$/h)

P_i = Daya keluaran pembangkit (MW)

i = 1, 2, 3, ..., n (untuk n pembangkit) $\alpha_i \beta_i \gamma_i$ = Koefisian biaya operasi pembangkit

Metode Lagrange

Metode Lagrange sering digunakan untuk menyelesaikan persamaan Ekonomi Dinamis (*Economic Dispatch*). Metode ini bertujuan menghitung biaya minimal pembangkitan listrik berdasarkan nilai Lambda dari persamaan ED pada setiap waktu tertentu. Oleh karena itu, jika terjadi perubahan waktu atau beban, metode ini akan menghitung kembali nilai Lambda dan biaya minimum yang dibutuhkan. Lagrange Multipler merupakan teknik dalam matematika, khususnya dalam optimasi multivariat, yang digunakan untuk mencari nilai maksimum atau minimum dari suatu fungsi yang dibatasi oleh satu atau lebih kendala (constraints).

$$\mathcal{L} = F_t + \lambda(P_D + P_{loss} - \sum P_i) \tag{2}$$

Dimana :

F_t = Total biaya pembangkitan (Rp/jam)

λ = *Lagrange Multiplier*

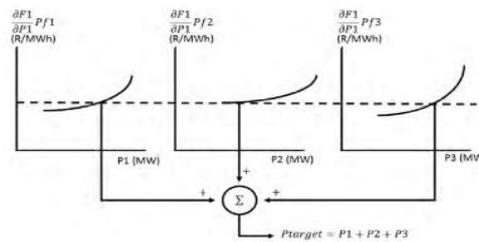
P_D = Total kebutuhan beban pada sistem (MW)

P_{Loss} = Rugi Transmisi (MW)

P_i = Daya output masing-masing Pembangkit (MW)

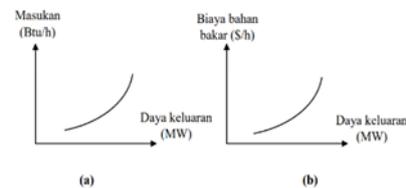
Biaya operasi unit pembangkit termis sangat ditentukan oleh besarnya biaya bahan bakar yang digunakan. Efisiensi unit pembangkit termis dapat dilihat dari karakteristik laju konsumsi bahan bakar terhadap daya keluaran. Laju konsumsi bahan bakar unit pembangkit pada dasarnya merupakan besar biaya yang harus dikeluarkan untuk per-MegaWatt (MW) daya keluaran yang dihasilkan oleh unit pembangkit tersebut.

Dalam metode Lagrange, nilai Lambda dari persamaan di atas sangat penting. Metode yang digunakan dalam Penelitian ini untuk menyelesaikan persamaan *Dynamic Economic Dispatch* adalah metode iterasi Lambda. Konsep iterasi Lambda melibatkan pengamatan karakteristik *incremental heat rate* (ihr) dari setiap unit pembangkit. Gambar dibawah ini menunjukkan bagaimana konsep iterasi Lambda bekerja. Lambda yang dimaksud di sini adalah nilai dari incremental heat rate



Gambar 1. Konsep Interaksi *Lambda*

Biaya operasi unit pembangkit termis sangat ditentukan oleh besarnya biaya bahan bakar yang digunakan. Efisiensi unit pembangkit termis dapat dilihat dari karakteristik laju konsumsi bahan bakar terhadap daya keluaran. Laju konsumsi bahan bakar unit pembangkit pada dasarnya merupakan besar biaya yang harus dikeluarkan untuk per-MegaWatt (MW) daya keluaran yang dihasilkan oleh unit pembangkit tersebut

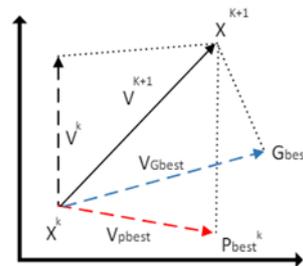


Gambar 2. (a) Kurva Input-Output, (b) Kurva Biaya Bahan Bakar

Metode Particle Swarm Optimization

PSO (*Particle Swarm Optimization*) adalah metode optimasi berbasis populasi yang dikembangkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995. PSO menggunakan prosedur pencarian yang melibatkan populasi, di mana setiap anggota populasi disebut partikel. Kumpulan partikel ini membentuk suatu kelompok yang disebut *Swarm*. Setiap partikel dalam *Swarm* mewakili calon solusi dan bergerak dalam ruang pencarian multidimensi.

Selama proses pencarian, setiap partikel dalam PSO berusaha menemukan posisi terbaiknya sendiri berdasarkan pengalaman individu yang disebut *P_best*, serta posisi terbaik berdasarkan pengalaman partikel-partikel tetangganya yang disebut *G_best*. Proses pencarian ini membantu partikel untuk menyesuaikan posisi dan kecepatannya menuju solusi optimal. Gambar dibawah ini mengilustrasikan bagaimana partikel mencari *P_best* dan *G_best*.



Gambar 3. Ilustrasi pencarian *P_{best}* dan *G_{best}*

Adapun formulasi matematika yang menggambarkan posisi dan kecepatan partikel dalam dimensi tertentu adalah sebagai berikut.

$$x_i(0), x_2(0), \dots, x_n(0) \tag{3}$$

$$V_i(0), V_2(0), \dots, V_n(0) \tag{4}$$

Modifikasi ini dapat diwakili sebagai sebuah konsep kecepatan, kecepatan dari setiap partikel dapat dirumuskan pada persamaan berikut.

$$V_i(t) = wv_i(t - 1) + c_1r_1(P_{best_i} - x_i(t - 1)) + c_2r_2(G_{best_i} - x_i(t - 1)) \tag{5}$$

Menggunakan persamaan di atas kecepatan tertentu secara berharap akan semakin mendekati P_best dan G_best . Adapun posisi ketika sedang melakukan pencarian saat ini dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$x_i(t) = v_i(t) + x_i(t - 1) \tag{6}$$

Adapaun bobot inersia untuk meredam kecepatan selama iterasi menuju titik target secara lebih akurat dan efisien. Untuk mencapai itu bobot inersia diperkecil nilainya semakin bertambahnya iterasi adalah sebagai berikut:

$$w(t) = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{max.iter} \times t \tag{7}$$

Dimana :

- x = Posisi Partikel
- V = Kecepatan Partikel
- i = Indeks Partikel
- t = Iterasi ke- t
- P_{best_i} = Posisi terbaik lokal
- G_{best_i} = Posisi terbaik global
- w = bobot inersia
- c_1, c_2 = konstanta positif = 2
- r_1, r_2 = Bilangan random 0-1
- w_{max}, w_{min} = iterasi ke- t
- $max.iter$ = iterasi maksimal

3. Metode

Model Penelitian

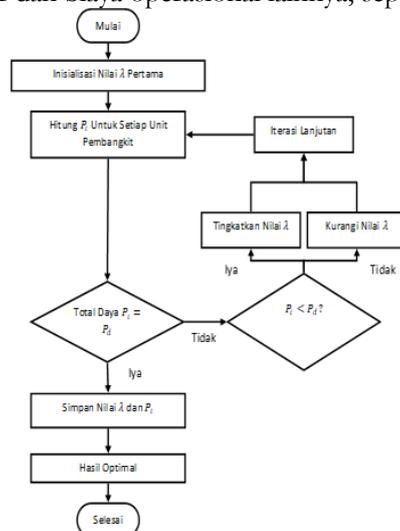
Model optimasi dalam penelitian ini didasarkan pada fungsi biaya pembangkitan yang bersifat kuadratik, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (1). Model ini memperhitungkan hubungan antara output daya dari masing-masing unit pembangkit dan total biaya operasi. Model ini menjadi dasar perhitungan pada kedua metode optimasi yang digunakan, yaitu metode Lagrange dan Particle Swarm Optimization (PSO).

Metode

Terdapat dua metode dalam penyelesaian model diatas

1. Metode Lagrange

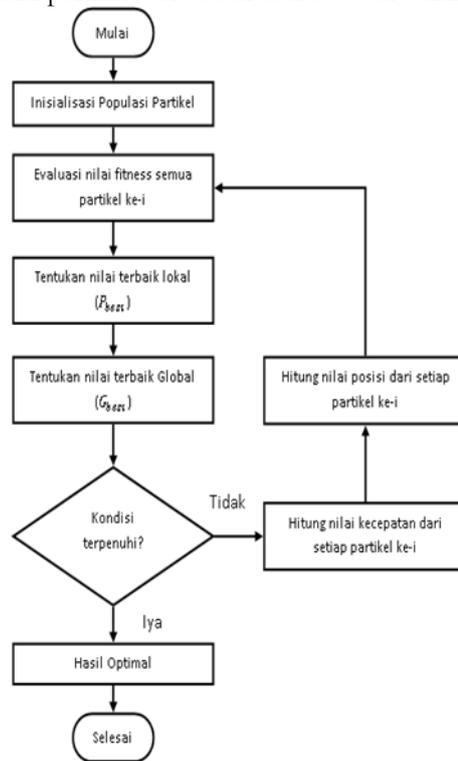
Merupakan teknik optimasi matematis yang memanfaatkan multipliers Lagrange untuk menyelesaikan fungsi objektif dengan mempertimbangkan sejumlah kendala (constraints) yang dimiliki sistem. Dalam konteks Economic Dispatch, fungsi objektifnya adalah untuk meminimalkan biaya operasional total dari pembangkit listrik, yang terdiri dari biaya bahan bakar dan biaya operasional lainnya, seperti biaya pemeliharaan dan biaya operasi harian.



Gambar 4. Flowchart Metode Lagrange

2. Metode Particle Swarm Optimization (PSO).

PSO merupakan metode yang efektif dan efisien dalam menemukan solusi optimal pada masalah yang kompleks dan berdimensi tinggi. Dalam penerapannya pada Economic Dispatch, PSO bertujuan untuk mengalokasikan daya yang dihasilkan oleh setiap unit pembangkit sedemikian rupa sehingga biaya operasional total menjadi minimal, sambil memenuhi permintaan beban dan batasan teknis dari unit pembangkit



Gambar 5. Flowchart Metode PSO

4. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini akan membahas hasil implementasi dari masing-masing metode berdasarkan data yang ada periode 1 Desember 2023, di mana akan ditunjukkan bagaimana daya beban dialokasikan serta biaya operasional yang dihasilkan dari penerapan metode tersebut.

Karakteristik input-output unit PLTU didapat dari pengolahan data *beatrate* masing-masing pembangkit, serta data performance test yang berisikan data harga bahan bakar, nilai kalor, dan beban unit. dalam mencari fungsi polynomial, digunakan 4 kondisi pembebanan dari 4 titik pembebanan saat performance test yaitu berdasarkan pendekatan polinomial orde 2 yang dilakukan pada masing-masing unit:

Tabel 1. Karakteristik dan Fungsi Biaya masing-masing unit

No	Unit Pembangkit	P_{min}	P_{max}	Fungsi Biaya (Rp/jam)
1	PLTU TJB 1	330	660	$F_1(P_1) = 0.53P_1^2 - 168.08P_1 + 191.565.64$
2	PLTU TJB 2	330	660	$F_2(P_2) = 0.53P_2^2 - 168.08P_2 + 191.565.64$
3	PLTU TJB 3	330	660	$F_3(P_3) = 0.49P_3^2 - 138.59P_3 + 168.744.82$
4	PLTU TJB 4	330	660	$F_4(P_4) = 0.49P_4^2 - 138.59P_4 + 168.744.82$

Dengan menggunakan Fungsi Biaya tersebut selanjut kita dapat menghitung Total Cost tiap periode pembebanan yang dimana berikut merupakan data riil beban PLTU Tanjung Jati B Periode 1 Desember 2023

Tabel 2. Data Riil PLTU Tanjung Jati B

Tanggal	Unit 1 (MW)	Unit 2 (MW)	Unit 3 (MW)	Unit 4 (MW)	Total P (MW)	Biaya Total (Rp/jam)
12/01/2023 10:30	605	602	600	594	2.401	Rp 1.087.685
12/01/2023 11:00	601	607	601	596	2.404	Rp 1.089.026
12/01/2023 11:30	595	604	601	594	2.394	Rp 1.084.392
12/01/2023 12:00	596	607	572	561	2.336	Rp 1.059.376
12/01/2023 12:30	599	608	553	546	2.306	Rp 1.047.321
12/01/2023 13:00	599	605	584	564	2.352	Rp 1.066.172
12/01/2023 13:30	605	603	603	594	2.405	Rp 1.089.267
12/01/2023 14:00	601	606	603	592	2.402	Rp 1.088.230
12/01/2023 14:30	601	605	603	595	2.404	Rp 1.088.833
12/01/2023 15:00	600	605	603	594	2.402	Rp 1.087.800
12/01/2023 15:30	602	606	604	594	2.405	Rp 1.089.438
12/01/2023 16:00	604	607	603	594	2.408	Rp 1.090.971
12/01/2023 16:30	604	606	603	594	2.408	Rp 1.090.864
12/01/2023 17:00	605	607	603	595	2.410	Rp 1.091.553
12/01/2023 17:30	598	605	602	595	2.400	Rp 1.086.953
12/01/2023 18:00	595	602	601	594	2.392	Rp 1.083.267
12/01/2023 18:30	591	599	601	594	2.384	Rp 1.079.513
12/01/2023 19:00	588	596	602	593	2.379	Rp 1.077.257
12/01/2023 19:30	593	609	602	593	2.396	Rp 1.085.515
12/01/2023 20:00	596	607	591	583	2.376	Rp 1.076.665
12/01/2023 20:30	598	607	553	543	2.301	Rp 1.045.334
12/01/2023 21:00	594	600	554	545	2.293	Rp 1.041.310
12/01/2023 21:30	601	602	554	546	2.303	Rp 1.046.043
12/01/2023 22:00	607	608	555	548	2.317	Rp 1.052.443
12/01/2023 22:30	604	607	554	549	2.315	Rp 1.051.204
12/01/2023 23:00	599	606	554	549	2.307	Rp 1.047.733
12/01/2023 23:30	604	604	553	549	2.310	Rp 1.048.876

IMPLEMENTASI METODE LAGRANGE

Persamaan Lagrange ini diselesaikan dengan menghitung turunan parsial terhadap persamaan (1) dan menyamakan hasilnya dengan nol

Turunan parsial P_i Unit 1 dan 2:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_{1,2}} = 1,06P_{1,2} - 168,08 - \lambda = 0$$

Turunan parsial P_i Unit 3 dan 4:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_{3,4}} = 0,98P_{3,4} - 138,59 - \lambda = 0$$

Dan turunan parsial λ masing-masing unit berdasarkan persamaan (1) untuk mengetahui jumlah total daya yang dibangkitkan oleh 4 unit pembangkit P_i harus sama dengan total permintaan daya P_D

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^4 P_i - P_D = 0$$

Selanjutnya, kita bandingkan hasil alokasi daya menggunakan Metode Lagrange dengan pembebanan riil yang dilakukan pada tanggal 1 Desember 2023 pukul 10:30:

Untuk menghitung alokasi daya optimal menggunakan Metode Lagrange, kita akan mengikuti langkah-langkah yang telah disebutkan. Pertama, kita hitung nilai λ menggunakan data permintaan beban pada 1 Desember 2023 pukul 10:30, yaitu:

$$P_D = 605 + 602 + 600 + 594.0 = 2401 MW$$

Dari persamaan diatas, maka didapat nilai $\lambda = 458,71$. Setelah mendapatkan nilai λ maka bisa didapat untuk nilai $P_{1,2}$ dan $P_{3,4}$. Dimana nilai $P_{1,2}$ adalah 591 MW dan nilai $P_{3,4}$ adalah 609 MW.

Langkah selanjutnya adalah menghitung biaya optimal dengan menggunakan persamaan (1) untuk per masing-masing unit yang kemudian dijumlah semuanya untuk mendapatkan total biaya optimal

Biaya Optimal Unit 1-2

$$F_{1,2}(P_{1,2})(Optimal) = 0,53(591)^2 - 168,08(591) + 194.565,54$$

$$F_1(P_2)(Optimal) \approx 280.437$$

Biaya Optimal Unit 3-4

$$F_{3,4}(P_{3,4})(Optimal) = 0,49(609)^2 - 138,75(609) + 168.744,82$$

$$F_1(P_2)(Optimal) \approx 266.241$$

Total Biaya Optimal

$$F_T(P_T)(Optimal) \approx 1.093.353$$

Dari contoh perhitungan diatas maka didapat perhitungan keseluruhan data sebagai berikut:

Tabel 3. Data dengan menggunakan Metode Lagrange

Tanggal	Daya Unit 1 (MW)	Daya Unit 2 (MW)	Daya Unit 3 (MW)	Daya Unit 4 (MW)	Total P (MW)	Total Cost (Rp)
01/12/2023 10:30	591	591	609	609	2.401	Rp 1.093.353
01/12/2023 11:00	592	592	610	610	2.404	Rp 1.094.730
01/12/2023 11:30	590	590	608	608	2.394	Rp 1.090.149
01/12/2023 12:00	575	575	592	592	2.336	Rp 1.063.906
01/12/2023 12:30	568	568	585	585	2.306	Rp 1.050.763
01/12/2023 13:00	579	579	597	597	2.352	Rp 1.071.010
01/12/2023 13:30	592	592	610	610	2.405	Rp 1.094.960
01/12/2023 14:00	591	591	610	610	2.402	Rp 1.093.904
01/12/2023 14:30	592	592	610	610	2.404	Rp 1.094.546
01/12/2023 15:00	591	591	609	609	2.402	Rp 1.093.537
01/12/2023 15:30	592	592	610	610	2.405	Rp 1.095.143
01/12/2023 16:00	593	593	611	611	2.408	Rp 1.096.615
01/12/2023 16:30	593	593	611	611	2.408	Rp 1.096.523
01/12/2023 17:00	593	593	612	612	2.410	Rp 1.097.214
01/12/2023 17:30	591	591	609	609	2.400	Rp 1.092.711
01/12/2023 18:00	589	589	607	607	2.392	Rp 1.089.054
01/12/2023 18:30	587	587	605	605	2.384	Rp 1.085.367
01/12/2023 19:00	586	586	604	604	2.379	Rp 1.083.145
01/12/2023 19:30	590	590	608	608	2.396	Rp 1.091.201
01/12/2023 20:00	585	585	603	603	2.376	Rp 1.082.104
01/12/2023 20:30	567	567	583	583	2.301	Rp 1.048.725
01/12/2023 21:00	565	565	581	581	2.293	Rp 1.045.225
01/12/2023 21:30	568	568	584	584	2.303	Rp 1.049.678
01/12/2023 22:00	571	571	588	588	2.317	Rp 1.055.730
01/12/2023 22:30	570	570	587	587	2.315	Rp 1.054.638
01/12/2023 23:00	569	569	585	585	2.307	Rp 1.051.371
01/12/2023 23:30	569	569	586	586	2.310	Rp 1.052.415

IMPLEMENTASI METODE PSO

Pada bagian ini, dibahas implementasi metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) yang digunakan untuk menyelesaikan masalah Economic Dispatch (ED) pada PLTU Tanjung Jati B. Metode ini bertujuan untuk mengoptimalkan alokasi daya pembangkit guna meminimalkan biaya operasional. Implementasi PSO dilakukan dengan menggunakan bahasa pemrograman Python. Langkah-langkah implementasi PSO untuk *Economic Dispatch* akan dijelaskan secara rinci sebagai berikut:

1. Inisialisasi Parameter PSO

Pertama, parameter PSO yang akan digunakan dalam algoritma didefinisikan sebagai berikut:

```

24 # Parameter PSO
25 num_particles = 30
26 num_iterations = 100
27 w = 0.5 # Inertia weight
28 c1 = 2.0 # Cognitive parameter
29 c2 = 2.0 # Social parameter
    
```

Gambar 6 Inisialisasi Parameter PSO pada program python

- num_particles = 30: Jumlah partikel dalam swarm.
- num_iterations = 100: Jumlah iterasi yang akan dijalankan algoritma.
- w = 0.5: *Inertia weight*, yang mengatur kontribusi kecepatan partikel sebelumnya terhadap kecepatan saat ini.

- $c_1 = 2.0$: Koefisien kognitif, yang mengatur pengaruh pengalaman partikel terhadap pergerakannya.
- $c_2 = 2.0$: Koefisien sosial, yang mengatur pengaruh pengalaman *Swarm* terhadap pergerakan partikel.

2. Inisialisasi Partikel

Setiap partikel dalam *Swarm* merepresentasikan solusi potensial untuk masalah ED. Setiap partikel diinisialisasi dengan posisi dan kecepatan acak dalam batasan yang diberikan (P_{min} dan P_{max} untuk setiap unit pembangkit).

```
12 # Batas daya masing-masing unit
13 P_min = [330, 330, 330, 330]
14 P_max = [660, 660, 660, 660]
```

Gambar 7 Inisialisasi Partikel PSO pada Program Python

3. Evaluasi Fitness

Fitness dari setiap partikel dihitung berdasarkan fungsi biaya pada persamaan (1). Dimana untuk fungsi biaya unit 1&2:

$$F_{1,2}(P_{1,2}) = 0,53P_{12}^2 - 168,08P_{12} + 194.565,54$$

Untuk unit 3 dan 4:

$$F_{3,4}(P_{3,4}) = 0,49P_{34}^2 - 138,59P_{34} + 168.744,82$$

4. Pembaruan Kecepatan dan Posisi Partikel

Kecepatan dan posisi setiap partikel dapat diinisialisasi dengan menggunakan program python seperti pada gambar dibawah ini.

```
46 for P_load in P_loads:
47     # Inisialisasi posisi dan kecepatan partikel
48     positions = np.random.uniform(P_min, P_max, (num_particles, 4))
49     velocities = np.zeros((num_particles, 4))
```

Gambar 8 Inisialisasi kecepatan dan posisi partikel pada program python

5. Pembaruan Posisi Terbaik

Jika posisi baru partikel menghasilkan nilai fitness yang lebih baik daripada posisi terbaik individu sebelumnya, maka posisi tersebut diperbarui. Jika nilai fitness dari posisi baru partikel juga lebih baik daripada posisi terbaik global, maka posisi terbaik global juga diperbarui.

```
51 # Inisialisasi pbest dan gbest
52 pbest_positions = positions.copy()
53 pbest_costs = np.array([np.inf] * num_particles)
54 gbest_position = positions[0].copy()
55 gbest_cost = np.inf
```

Gambar 9 Inisialisasi posisi terbaik pada program python

6. Iterasi

Langkah-langkah di atas diulangi selama jumlah iterasi yang ditentukan ($num_iterations$) yang ada pada program seperti pada gambar 4. Setelah iterasi selesai, posisi terbaik global (g_best) dianggap sebagai solusi optimal untuk masalah ED.

```

57 # PSO main loop
58 for iteration in range(num_iterations):
59     for i in range(num_particles):
60         # Evaluasi fungsi biaya
61         cost = cost_function(positions[i])
62         if cost < pbest_costs[i] and check_constraints(positions[i], P_load):
63             pbest_costs[i] = cost
64             pbest_positions[i] = positions[i].copy()
65         if cost < gbest_cost and check_constraints(positions[i], P_load):
66             gbest_cost = cost
67             gbest_position = positions[i].copy()
68
69     # Update kecepatan dan posisi
70     for i in range(num_particles):
71         r1, r2 = np.random.rand(2)
72         velocities[i] = (w * velocities[i] +
73                        c1 * r1 * (pbest_positions[i] - positions[i]) +
74                        c2 * r2 * (gbest_position - positions[i]))
75         positions[i] += velocities[i]
76
77     # Pastikan posisi berada dalam batas
78     positions[i] = np.clip(positions[i], P_min, P_max)

```

Gambar 10 Proses Iterasi pada program python

Hasil optimal alokasi daya dan biaya total untuk setiap periode waktu dihitung menggunakan metode PSO kemudian dapat dilihat dibawah ini:

Tabel 4. Data dengan menggunakan Metode PSO

Datetime	P1 (MW)	P2 (MW)	P3 (MW)	P4 (MW)	Total Cost (Rp)
2023-12-01 10:30:00	454	644	572	528	Rp 1.014.980
2023-12-01 11:00:00	347	368	331	660	Rp 871.709
2023-12-01 11:30:00	364	347	612	636	Rp 950.166
2023-12-01 12:00:00	334	538	448	365	Rp 843.611
2023-12-01 12:30:00	632	406	415	449	Rp 914.789
2023-12-01 13:00:00	489	632	591	451	Rp 1.002.819
2023-12-01 13:30:00	559	441	536	410	Rp 919.461
2023-12-01 14:00:00	350	633	583	523	Rp 986.103
2023-12-01 14:30:00	518	457	549	550	Rp 959.315
2023-12-01 15:00:00	586	573	451	507	Rp 980.558
2023-12-01 15:30:00	454	539	471	346	Rp 876.978
2023-12-01 16:00:00	343	634	397	592	Rp 949.593
2023-12-01 16:30:00	494	383	451	614	Rp 922.846
2023-12-01 17:00:00	548	499	603	345	Rp 946.685
2023-12-01 17:30:00	343	393	370	438	Rp 796.317
2023-12-01 18:00:00	501	501	660	605	Rp 1.041.594
2023-12-01 18:30:00	614	546	574	606	Rp 1.067.439
2023-12-01 19:00:00	361	458	340	501	Rp 832.023
2023-12-01 19:30:00	507	351	370	495	Rp 851.313
2023-12-01 20:00:00	558	365	641	459	Rp 959.045
2023-12-01 20:30:00	380	602	342	650	Rp 957.011
2023-12-01 21:00:00	378	464	645	469	Rp 932.243
2023-12-01 21:30:00	402	412	430	649	Rp 913.041
2023-12-01 22:00:00	376	489	335	624	Rp 895.640
2023-12-01 22:30:00	550	523	385	535	Rp 937.374
2023-12-01 23:00:00	512	350	658	549	Rp 978.285
2023-12-01 23:30:00	486	622	548	608	Rp 1.038.578

ANALISIS PERBANDINGAN HASIL

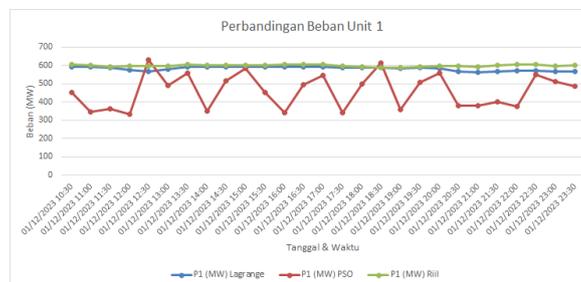
Analisis perbandingan hasil antara metode Lagrange dan Particle Swarm Optimization (PSO) merupakan tahap krusial dalam penelitian ini. Pada bagian ini, akan dilakukan evaluasi terhadap distribusi optimal beban dan biaya operasional yang dihasilkan oleh kedua metode tersebut. Selain itu, perbandingan akan dilakukan dengan mempertimbangkan data pembebanan riil yang diamati pada PLTU Tanjung Jati B pada tanggal 1 Desember 2023. Hal ini bertujuan untuk mengukur keefektifan dan keakuratan kedua metode dalam mengoptimalkan alokasi daya, serta membandingkannya dengan kondisi operasional aktual. Analisis ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang mendalam mengenai performa relatif dari masing-masing metode dalam konteks aplikasi pada sistem pembangkit tenaga.

PERBANDINGAN DISTRIBUSI BEBAN

Untuk menganalisis perbandingan distribusi beban setiap unit antara metode Lagrange, metode PSO, dan beban riil pada PLTU Tanjung Jati B, kita dapat melihat perbedaan serta kemiripan dalam alokasi daya yang dihasilkan oleh kedua metode optimasi dan perbandingannya dengan kondisi riil yang terjadi.

Tabel 5. Perbandingan Distribusi Beban Unit 1

Tanggal	P1 (MW) Lagrange	P1 (MW) PSO	P1 (MW) Riil
01/12/2023 10:30	591	454	605
01/12/2023 11:00	592	347	601
01/12/2023 11:30	590	364	595
01/12/2023 12:00	575	334	596
01/12/2023 12:30	568	632	599
01/12/2023 13:00	579	489	599
01/12/2023 13:30	592	559	605
01/12/2023 14:00	591	350	601
01/12/2023 14:30	592	518	601
01/12/2023 15:00	591	586	600
01/12/2023 15:30	592	454	602
01/12/2023 16:00	593	343	604
01/12/2023 16:30	593	494	604
01/12/2023 17:00	593	548	605
01/12/2023 17:30	591	343	598
01/12/2023 18:00	589	501	595
01/12/2023 18:30	587	614	591
01/12/2023 19:00	586	361	588
01/12/2023 19:30	590	507	593
01/12/2023 20:00	585	558	596
01/12/2023 20:30	567	380	598
01/12/2023 21:00	565	378	594
01/12/2023 21:30	568	402	601
01/12/2023 22:00	571	376	607
01/12/2023 22:30	570	550	604
01/12/2023 23:00	569	512	599
01/12/2023 23:30	569	486	604



Gambar 8 Grafik perbandingan distribusi beban Unit 1

Berdasarkan tabel dan gambar diatas, analisis perbandingan distribusi beban Unit 1 antara metode Lagrange, metode PSO, dan beban riil pada PLTU Tanjung Jati B, terdapat beberapa temuan penting terkait konsistensi, ketepatan, dan kualitas solusi yang dihasilkan oleh kedua metode optimasi dibandingkan dengan kondisi riil. Metode Lagrange cenderung memberikan distribusi beban yang konsisten dengan nilai yang relatif tinggi. Sebaliknya, metode PSO menunjukkan variasi yang lebih dinamis dalam distribusi beban. Secara umum, PSO mampu menghasilkan alokasi daya yang lebih terdiversifikasi di sepanjang periode, dengan kecenderungan untuk menyesuaikan daya secara lebih dinamis terhadap perubahan permintaan atau kondisi operasional yang berubah. Hal ini terlihat dari fluktuasi beban yang lebih signifikan pada beberapa titik waktu tertentu.

Beban riil, yang merupakan data operasional sebenarnya dari PLTU Tanjung Jati B, memberikan gambaran tentang bagaimana alokasi daya seharusnya terjadi secara praktis. Perbandingan dengan hasil simulasi (Lagrange dan PSO) menunjukkan bahwa meskipun terdapat variasi, secara keseluruhan, beban riil cenderung berada di tengah-tengah antara hasil dari kedua metode optimasi tersebut. Evaluasi lebih lanjut mengenai kualitas solusi optimal menunjukkan bahwa metode PSO memiliki kecenderungan untuk memberikan solusi yang lebih adaptif terhadap kondisi dinamis dan mungkin lebih mendekati kondisi riil dibandingkan dengan Lagrange. Hal ini terutama terlihat pada titik waktu tertentu di mana PSO lebih responsif terhadap fluktuasi permintaan atau kondisi operasional yang tidak terduga. Dari

sudut pandang efisiensi dan performa sistem, distribusi beban yang lebih optimal dari segi teknis, seperti yang dihasilkan oleh PSO yang lebih adaptif, cenderung berpotensi menghasilkan biaya operasional yang lebih rendah, asalkan konsistensi dan stabilitas operasional tetap terjaga.

PERBANDINGAN DISTRIBUSI BEBAN TOTAL

Tabel 6. Perbandingan Distribusi beban Total

Tanggal	P Total (MW) Lagrange	P Total (MW) PSO	P Total (MW) Riil
01/12/2023 10:30	2.401	2.196	2.401
01/12/2023 11:00	2.404	1.706	2.404
01/12/2023 11:30	2.394	1.960	2.394
01/12/2023 12:00	2.336	1.685	2.336
01/12/2023 12:30	2.306	1.902	2.306
01/12/2023 13:00	2.352	2.163	2.352
01/12/2023 13:30	2.405	1.947	2.405
01/12/2023 14:00	2.402	2.089	2.402
01/12/2023 14:30	2.404	2.074	2.404
01/12/2023 15:00	2.402	2.117	2.402
01/12/2023 15:30	2.405	1.810	2.405
01/12/2023 16:00	2.408	1.965	2.408
01/12/2023 16:30	2.408	1.941	2.408
01/12/2023 17:00	2.410	1.994	2.410
01/12/2023 17:30	2.400	1.544	2.400
01/12/2023 18:00	2.392	2.267	2.392
01/12/2023 18:30	2.384	2.340	2.384
01/12/2023 19:00	2.379	1.659	2.379
01/12/2023 19:30	2.396	1.723	2.396
01/12/2023 20:00	2.376	2.022	2.376
01/12/2023 20:30	2.301	1.974	2.301
01/12/2023 21:00	2.293	1.956	2.293
01/12/2023 21:30	2.303	1.893	2.303
01/12/2023 22:00	2.317	1.824	2.317
01/12/2023 22:30	2.315	1.994	2.315
01/12/2023 23:00	2.307	2.069	2.307
01/12/2023 23:30	2.310	2.264	2.310



Gambar 9 Grafik perbandingan distribusi beban total

Secara keseluruhan, analisis ini menunjukkan bahwa metode Lagrange memberikan hasil yang lebih stabil dan mendekati beban riil dengan rata-rata distribusi beban total untuk metode lagrange adalah 2.367 MW setara dengan kondisi riil, yang penting untuk menjaga keseimbangan dan efisiensi operasional pembangkit listrik. Sedangkan untuk metode PSO dengan rata-rata distribusi beban total sebesar 1.966 MW, meskipun lebih fleksibel dan adaptif, menunjukkan variasi yang lebih besar yang bisa menjadi tantangan dalam memastikan kestabilan operasional. Pemilihan metode optimasi yang tepat harus mempertimbangkan kestabilan dan efisiensi untuk mencapai distribusi beban yang optimal sesuai kebutuhan sistem.

PERBANDINGAN BIAYA OPERASIONAL

Perbandingan biaya operasional antara metode Lagrange, metode *Particle Swarm Optimization* (PSO), dan biaya operasional riil memberikan wawasan penting mengenai efisiensi dan efektivitas masing-masing metode dalam konteks pembangkit listrik PLTU Tanjung Jati B. Analisis ini mempertimbangkan biaya operasional yang dihasilkan oleh masing-masing metode untuk memahami bagaimana setiap metode dapat meminimalkan biaya sambil memenuhi permintaan beban.

Tabel 6. Perbandingan biaya

Tanggal	Biaya Riil	Biaya Metode Lagrange	Biaya Metode PSO
01/12/2023 10:30	Rp 1.087.685	Rp 1.093.353	Rp 1.014.980
01/12/2023 11:00	Rp 1.089.026	Rp 1.094.730	Rp 871.709
01/12/2023 11:30	Rp 1.084.392	Rp 1.090.149	Rp 950.166
01/12/2023 12:00	Rp 1.059.376	Rp 1.063.906	Rp 843.611
01/12/2023 12:30	Rp 1.047.321	Rp 1.050.763	Rp 914.789
01/12/2023 13:00	Rp 1.066.172	Rp 1.071.010	Rp 1.002.819
01/12/2023 13:30	Rp 1.089.267	Rp 1.094.960	Rp 919.461
01/12/2023 14:00	Rp 1.088.230	Rp 1.093.904	Rp 986.103
01/12/2023 14:30	Rp 1.088.833	Rp 1.094.546	Rp 959.315
01/12/2023 15:00	Rp 1.087.800	Rp 1.093.537	Rp 980.558
01/12/2023 15:30	Rp 1.089.438	Rp 1.095.143	Rp 876.978
01/12/2023 16:00	Rp 1.090.971	Rp 1.096.615	Rp 949.593
01/12/2023 16:30	Rp 1.090.864	Rp 1.096.523	Rp 922.846
01/12/2023 17:00	Rp 1.091.553	Rp 1.097.214	Rp 946.685
01/12/2023 17:30	Rp 1.086.953	Rp 1.092.711	Rp 796.317
01/12/2023 18:00	Rp 1.083.267	Rp 1.089.054	Rp 1.041.594
01/12/2023 18:30	Rp 1.079.513	Rp 1.085.367	Rp 1.067.439
01/12/2023 19:00	Rp 1.077.257	Rp 1.083.145	Rp 832.023
01/12/2023 19:30	Rp 1.085.515	Rp 1.091.201	Rp 851.313
01/12/2023 20:00	Rp 1.076.665	Rp 1.082.104	Rp 959.045
01/12/2023 20:30	Rp 1.045.334	Rp 1.048.725	Rp 957.011
01/12/2023 21:00	Rp 1.041.310	Rp 1.045.225	Rp 932.243
01/12/2023 21:30	Rp 1.046.043	Rp 1.049.678	Rp 913.041
01/12/2023 22:00	Rp 1.052.443	Rp 1.055.730	Rp 895.640
01/12/2023 22:30	Rp 1.051.204	Rp 1.054.638	Rp 937.374
01/12/2023 23:00	Rp 1.047.733	Rp 1.051.371	Rp 978.285
01/12/2023 23:30	Rp 1.048.876	Rp 1.052.415	Rp 1.038.578



Gambar 9 Grafik perbandingan biaya

Perbandingan Penghematan Biaya Operasional: Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan metode PSO mampu menghasilkan penghematan biaya operasional dibandingkan dengan metode Lagrange yang cenderung memiliki kenaikan biaya jika dibandingkan dengan kondisi operasional yang riil. Metode PSO mampu mengurangi biaya operasional secara konsisten, sedangkan PSO juga memberikan kontribusi yang positif meskipun dengan variasi hasil yang lebih dinamis.

5. Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi penggunaan metode Lagrange dan Particle Swarm Optimization (PSO) dalam penerapan Economic Dispatch pada PLTU Tanjung Jati B, serta untuk menganalisis nilai perbandingan penghematan biaya operasional pembangkit jika dibandingkan dengan kondisi operasional riil. Berdasarkan hasil analisis dan penelitian yang dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Penerapan Metode Lagrange dan PSO: Implementasi metode Lagrange dan PSO pada PLTU Tanjung Jati B berhasil mengoptimalkan distribusi beban secara efektif. Hasil menunjukkan bahwa metode Lagrange menghasilkan rata-rata distribusi daya sebesar 2.367 MW, setara dengan kondisi riil, sedangkan PSO menghasilkan 1.966 MW atau 16,94% lebih rendah. Metode Lagrange memberikan hasil yang stabil dengan akurasi yang baik dalam menyesuaikan beban antara unit-unit pembangkit, sementara PSO menunjukkan kemampuan untuk menemukan solusi optimal dengan cepat dalam kondisi yang berubah.
2. Perbandingan Penghematan Biaya Operasional. PSO menunjukkan penghematan biaya operasional sebesar Rp 938.501, sedangkan Lagrange dan kondisi riil masing-masing sebesar Rp 1.078.064 dan Rp 1.073.076. Secara persentase, Lagrange lebih tinggi 12,95% dibanding PSO dan 0,46% dibanding kondisi riil. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan metode PSO mampu menghasilkan penghematan biaya operasional dibandingkan dengan metode Lagrange yang cenderung memiliki kenaikan biaya jika dibandingkan dengan kondisi operasional yang riil. Metode PSO mampu mengurangi biaya operasional secara konsisten, sedangkan PSO juga memberikan kontribusi yang positif meskipun dengan variasi hasil yang lebih dinamis.

Implementasi dan pengembangan terus-menerus dari rekomendasi ini akan membantu PLTU Tanjung Jati B memaksimalkan manfaat dari metode Lagrange dan PSO, serta memperkuat posisinya dalam mendukung keberlanjutan energi dan keandalan pasokan listrik di masa depan.

Referensi

- [1] Sihombing, F., Karnoto, K., & Winardi, B. (2016). Analisis konsumsi bahan bakar pada pembangkit listrik tenaga uap: Studi kasus PT. PLN Pembangkitan Tanjung Jati. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 4(4), 951–957.
- [2] Al-Qaedi, M. R. (2018). Analisis economic dispatch pada pembangkit termal sistem 500 kV Jawa Bali menggunakan metode firefly [Skripsi, tidak disebutkan institusi].
- [3] Rp, J., et al. (2023). Pengiriman kWh netto: GWh.
- [4] Murti, A. S., Manuaba, I. B. G., & Arjana, I. G. D. (2020). Optimasi unit PLTU berbahan bakar batubara menggunakan metode Lagrange di PT. Indonesia Power UP Suralaya. *Jurnal SPEKTRUM*, 7(1), 76.
- [5] APB Pembangkitan. (2012). Analisis perbandingan. *Jurnal Teknik*, 6(1), 91–96.
- [6] Suroso, H., Perdana, P., Teknik, F., & Gresik, U. M. (n.d.). Gas dan uap PT Petrokimia Gresik dengan metode Lagrange multiplier, 1–9.
- [7] Syah, K., Dachlan, H. S., Hasanah, R. N., & Shidiq, M. (2013). Analisis perbandingan economic dispatch pembangkit menggunakan metode Lagrange dan CFPSO. *JEECCIS*, 6(1), 91–96.
- [8] Asmar, Y., & Tengku, H. (2014). Pembuatan aplikasi untuk analisis economic dispatch stasiun pembangkit tenaga listrik. *Jurnal Electrighsan*, 1(1).
- [9] Senapati, I. G. N. A., Manuaba, I. B. G., & Hartati, R. S. (2020). Optimisasi economic dispatch pada sistem kelistrikan 150 kV Bali menggunakan Imperialist Competitive Algorithm. *Jurnal SPEKTRUM*, 7(3), 61.
- [10] Mahaputra, D. J., Wibowo, R. S., & Priyadi, A. (2017). Economic dan emission dispatch pada sistem kelistrikan 500 kV Jawa-Bali menggunakan composite generation cost function dengan metode cuckoo optimization algorithm. *Jurnal Teknik ITS*, 6(1).
- [11] Ramadhan, N., Fahdilatul, L., Maulana, F. A., & Pembimbing, D. (2022). Makalah perancangan sistem tenaga listrik. No. 2020310034.
- [12] Penyaluran, A. S., & Listrik, T. (2020). Alternatif penanganan losses akibat ketidakseimbangan. *Jurnal Teknik*, 8(1), 83–99.
- [13] Suropto, S. (2016). Buku ajar sistem tenaga listrik. Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- [14] Kumara, N. S. (2009). Telaah terhadap program percepatan pembangunan listrik melalui pembangunan PLTU batubara 10.000 MW. *Majalah Ilmiah Teknik Elektro*, 8(1), 63–68.
- [15] B. A. B. II & T. Pustaka. (n.d.). [11]: 6, 6–22.
- [16] Abdul Halim Abdul Rashid, K. M.-N. (1991). Efficient economic dispatch algorithm for thermal unit commitment. *IEEE*.
- [17] Happ, H. (1977). Optimal power dispatch: A comprehensive survey. *IEEE*.
- [18] Yulianti, E. R. (2019). Skripsi tanpa bab pembahasan, 2, 5–10.
- [19] Wood, A. J., & Wollenberg, B. F. (2014). Power generation, operation, and control (3rd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- [20] Anton, F. (2016). Security constrained unit commitment mempertimbangkan cadangan berputar dan kapasitas saluran transmisi menggunakan algoritma binary particle swarm optimization [Skripsi, ITS].
- [21] Rianta, M. S. M. G. (n.d.). Pengenalan sistem transmisi dan distribusi listrik. <https://indonesiare.co.id/id/article/pengenalan-sistem-transmisi-dan-distribusi-listrik>
- [22] Okta, I. S. (n.d.). Anak elektro wajib paham tentang sistem distribusi listrik beserta rekomendasi softwarenya. https://www.anakteknik.co.id/ish_sagita/articles/anak-elektro-wajib-paham-tentang-sistem-distribusi-listrik-beserta-rekomendasi-softwarenya
- [23] Rakhman, A. (n.d.). Fungsi dan prinsip kerja PLTU. <https://rakhman.net/power-plants-id/fungsi-dan-prinsip-kerja-pltu>