

OPTIMISASI OPERASI EKONOMIS UNIT PEMBANGKIT PADA PLTU TANJUNG JATI B MENGGUNAKAN METODE *IMPROVED WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM*

Yoga Wahyu Wibawa^{*)}, Agung Nugroho, and Tejo Sukmadi

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

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

Abstrak

Bahan bakar merupakan salah satu biaya terbesar pada pembangkitan energi listrik. Setiap unit generator mempunyai karakteristik biaya pembangkitan tersendiri. Diperlukan adanya penjadwalan operasi pembangkit, untuk mendapatkan pengoperasian pembangkit yang optimal. *Improved Whale Optimization Algorithm* (IWOA) diusulkan sebagai metode operasi ekonomis pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Tanjung Jati B. Metode IWOA mengadaptasi dari tingkah laku paus bungkuk mencari makan. Untuk melihat performa dari simulasi metode IWOA maka metode ini dibandingkan dengan metode *Lagrange Multiplier*. Hasil simulasi optimisasi dengan metode IWOA menunjukkan performa yang baik. Hasil simulasi identik dengan metode Lagrange Multiplier, sedangkan dalam perbandingan biaya operasi, optimisasi metode IWOA lebih hemat dibandingkan dengan biaya operasi pembebanan PLTU Tanjung Jati B. Pada perbandingan 3 generator aktif penghematan rata-rata 255,4615 \$/Jam, Selisih biaya terbesar pada beban 1629,086 MW dengan selisih biaya 425,4638 \$/Jam dan selisih biaya terkecil pada pembebanan 1968,350 MW dengan selisih biaya 36,8328 \$/Jam. Pada perbandingan 4 generator aktif penghematan rata-rata 409,9577 \$/Jam, selisih biaya terbesar pada beban 2160,581 MW dengan selisih biaya 604,9971 \$/Jam dan selisih biaya terkecil pada pembebanan 1485,869 MW dengan selisih biaya 215,2947 \$/Jam.

Kata kunci: Operasi ekonomis, IWOA, biaya pembangkitan, lagrange multiplier.

Abstract

The biggest cost of electricity generation is the cost of fuel. Each generator unit has its own generating cost characteristics. Operation scheduling is required, In order to obtain optimal plant operation. Improved Whale Optimization Algorithm (IWOA) is proposed as an economic dispatch method for steam power plant (PLTU) in Tanjung Jati B. The IWOA method is inspired by the way of humpback whales are looking for prey. To see the performance of the IWOA method simulation, this method is compared with Lagrange Multiplier as validation. Optimization simulation results show good performance. The simulation result is identical with Lagrange Multiplier, while optimizing operating costs in comparison IWOA method is more efficient than the operating cost Tanjung Jati B. At a ratio of 3 active generator average savings of \$ 255,4615 \$ / hour, the biggest cost difference in loading 1629,086 MW by the difference in cost 425,4638 \$ / hour and the smallest cost difference in loading 1968,350 MW by the difference in cost of 36,8328 \$ / hour. At a ratio of 4 active generator average savings of \$ 409,9577 \$ / hour, the biggest cost difference in loading 2160,581 MW with the difference in cost 604,9971 \$ / hour and the smallest cost difference in loading 1485,869 MW by the difference in cost 215,2947 \$ / hour.

Keywords: Economic dispatch, IWOA, Generation costs, Lagrange Multiplier

1. Pendahuluan

Proses pembangkitan tenaga listrik merupakan perubahan energi primer menjadi energi listrik yang di lakukan oleh generator. Dari segi ekonomi komponen biaya penyediaan tenaga listrik terbesar adalah biaya pembangkitan, khususnya bahan bakar sedangkan pada unit-unit

pembangkit tenaga listrik memiliki karakteristik yang berbeda-beda dalam hal biaya pembangkitannya [1]. Agar menghasilkan operasi pembangkitan yang optimal dalam memenuhi variasi perubahan beban maka penjadwalan pengoperasian suatu generator pada pembangkit dan koordinasi antar pembangkitan sangat diperlukan dalam upaya melakukan optimalisasi pembebanan yang bertujuan

untuk memperoleh biaya operasi yang optimal dan ekonomis dengan memperhatikan batasan – batasan dari kapasitas unit pembangkit itu sendiri[2][3][4][5].

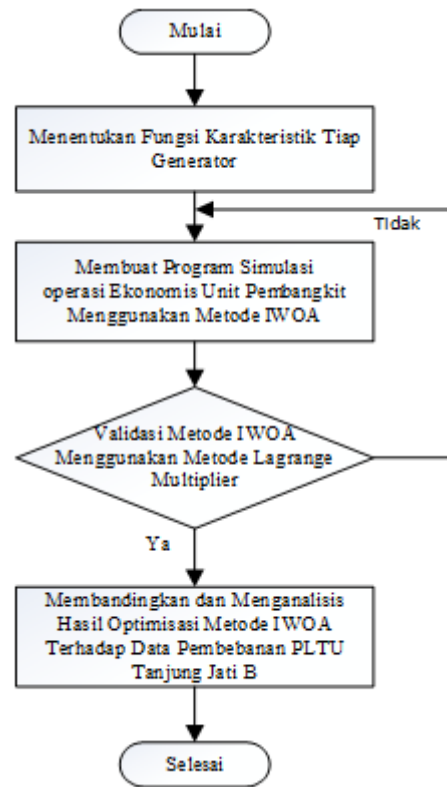
Salah satu solusi untuk menyelesaikan permasalahan optimisasi yaitu dengan menggunakan teknik *Improved Whale Optimization Algorithm (IWOA)*. IWOA merupakan salah satu dari banyak metode optimisasi yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan *Economic Dispatch*. Algoritma ini terinspirasi oleh perilaku paus dalam mencari makanan [6][7]. Penelitian mengenai penerapan IWOA pada sistem tenaga listrik telah dilakukan sebelumnya, yang berjudul *Study of The Economic Dispatch Problem on IEEE 30-Bus System using Whale Optimization Algorithm*. Penelitian ini membahas penerapan metode IWOA untuk mendapatkan *Economic Dispatch* optimum pada permasalahan IEEE 30 Bus [8] .

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Jati B merupakan salah satu pembangkit yang menyuplai kebutuhan tenaga listrik di sistem Jawa-Bali. PLTU Tanjung Jati B memiliki 4 unit dengan kapasitas generator dengan masing-masing berkapasitas 660 MW. Pada saat ini biaya operasi PLTU memanfaatkan batubara yang dihargai Dolar Amerika Serikat (US\$). Dalam penelitian ini membahas operasi ekonomis menggunakan metode *Improved Whale Optimization Algorith (IWOA)* pada ke 4 unit PLTU Tanjung Jati B dengan daya keluaran generator yang terhubung pada satu bus utama yang sama. Hasil dari penelitian ini adalah kombinasi daya yang dibangkitkan oleh tiap-tiap generator dan biaya pembangkitan yang ekonomis diatas beban dasar setiap generator yaitu 330 MW dan dibawah batas maksimumnya yaitu 660 MW serta membandingkan hasil optimisasi operasi pembangkit metode IWOA dengan metode *Lagrange Multiplier* yang bertujuan untuk membuktikan validitas dari metode IWOA, Setelah itu mencari biaya operasi pembangkitan paling optimal berdasarkan metode IWOA. Lalu membandingkan operasi aktual pembangkit PLTU Tanjung Jati B dengan hasil simulasi IWOA generator untuk mengetahui apakah metode IWOA bisa digunakan dalam masalah optimisasi.

2. Metode

2.1. Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakn dalam beberapa tahap penelitian. Pada Gambar 1 dapat dilihat langkah-langkah metode penelitian dalam penelitian ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

2.2. Perancangan Sistem

Secara umum fungsi tujuan dari program simulasi ini adalah penjadwalan pendistribusian beban optimal pada masing-masing unit pembangkit PLTU Tanjung Jati B untuk permintaan daya tertentu dengan mempertimbangkan batasan dari masing-masing generator itu sendiri sehingga permintaan daya dapat dipenuhi dengan biaya pembangkitan yang seminimal mungkin. Fungsi tujuan dari optimisasi operasi ekonomis ini dinyatakan dalam fungsi biaya bahan bakar dari unit pembangkit yang sesuai dengan Persamaan 1 :

$$C_i = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (1)$$

Dimana,

C_i = biaya bahan bakar (masukan unit i), dollar/jam

P_i = daya yang dihasilkan (keluaran unit i), MW

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ = konstanta

2.2.1. Kapasitas Unit Pembangkit

Generator dari setiap unit pembangkit seharusnya membangkitkan daya tidak melebihi nilai maksimumnya serta tidak boleh dioperasikan untuk membangkitkan daya dibawah nilai minimumnya

Dalam hal ini unit PLTU Tanjung Jati B memiliki batasan sebagai berikut:

Tabel 1. Batasan Pembangkitan PLTU Tanjung Jati B

Generator	Batas Bawah (MW)	Batas Atas (MW)
STG 1	330	660
STG 2	330	660
STG 3	330	660
STG 4	330	660

2.2.2. Kecepatan Perubahan Beban ($\Delta P \leq 35 \text{ MW/menit}$)

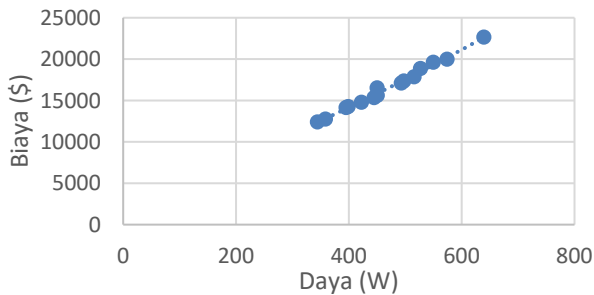
Dalam hal ini unit PLTU Tanjung Jati B memiliki kecepatan perubahan beban sebesar 35 MW/menit.

2.3. Pemodelan Unit-Unit Pembangkit

Berikut merupakan pemodelan unit-unit pembangkit STG 1, STG 2, STG 3 dan STG 4 pada PLTU Tanjung Jati B.

a. STG 1

Grafik fungsi kuadratis karakteristik pembangkit Unit 1.1 dapat dilihat pada Gambar 2

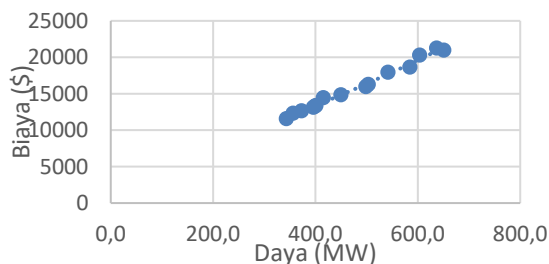


Gambar 2. Grafik karakteristik STG 1, Biaya (\$) terhadap Daya (MW)

Persamaan karakteristik pembangkit unit 1 adalah $C_1 = 2816.7 + 24.029P + 0.0109P^2$

b. STG 2

Grafik fungsi kuadratis karakteristik pembangkit Unit 2 dapat dilihat pada Gambar 3

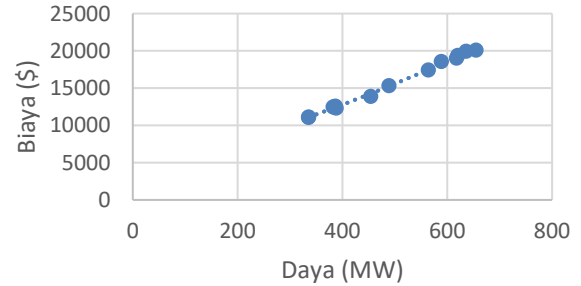


Gambar 3. Grafik karakteristik STG 2, Biaya (\$) terhadap Daya (MW)

Persamaan karakteristik pembangkit unit 2 adalah $C_2 = 4025.8 + 18.124P + 0.0131P^2$

c. STG 3

Grafik fungsi kuadratis karakteristik pembangkit Unit 3 dapat dilihat pada Gambar 4

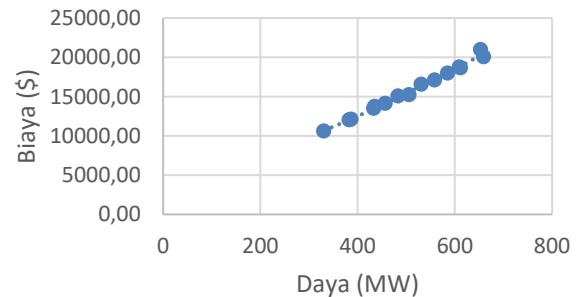


Gambar 4. Grafik karakteristik STG 3, Biaya (\$) terhadap Daya (MW)

Persamaan karakteristik pembangkit unit 3 adalah $C_3 = 3774.9 + 17.158P + 0.0111P^2$

d. STG 4

Grafik fungsi kuadratis karakteristik pembangkit Unit 4 dapat dilihat pada Gambar 5



Gambar 5. Grafik karakteristik STG 4, Biaya (\$) terhadap Daya (MW)

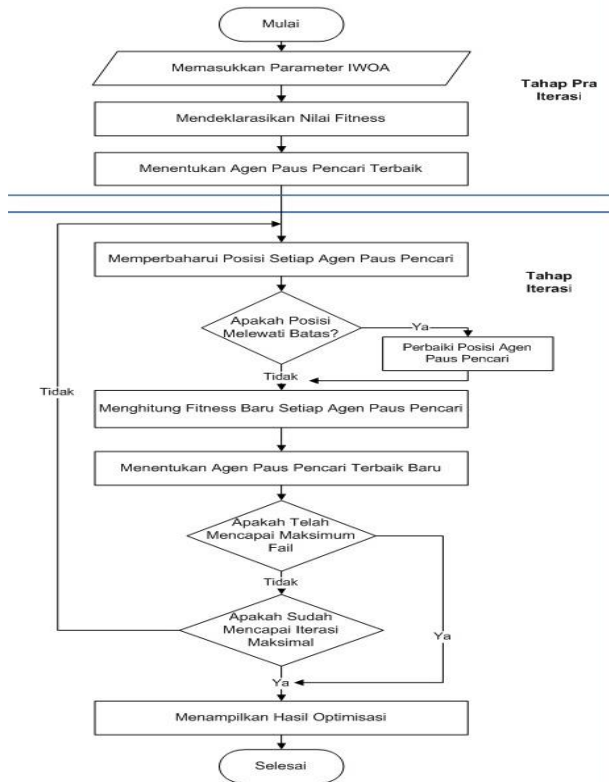
Persamaan karakteristik pembangkit unit 2.1 adalah $C_4 = 3440.5 + 17.861P + 0,0121P^2$

Dari perhitungan diatas maka pada pusat pembangkit listrik PLTU Tanjung Jati B yang terdiri 4 unit STG, mempunyai karakteristik sebagai berikut.

1. Unit 1 $C_1 = 2816.7 + 24.029P + 0.0109P^2$
2. Unit 2 $C_2 = 4025.8 + 18.124P + 0.0131P^2$
3. Unit 3 $C_3 = 3774.9 + 17.158P + 0.0111P^2$
4. Unit 4 $C_4 = 3440.5 + 17.861P + 0,0121P^2$

2.4. Perancangan Metode IWOA

Metode optimisasi untuk operasi ekonomis pada penelitian ini adalah *Improved Whale Optimization Algorithm* (IWOA). IWOA merupakan metode metaheuristik yang mengadaptasi paus bungkuk mencari makan yang dimodifikasi. Diperkenalkan pertama kali oleh Seyedali Mirjalili pada tahun 2015.



Gambar 6. Diagram Alir Optimisasi Operasi Generator dengan IWOA.

Pada Gambar 6 memperlihatkan diagram alir metode optimisasi IWOA dengan tahap pra iterasi dan tahap iterasi. Berikut penjelasan dari diagram alir pada Gambar 6.

a. Tahap pra-iterasi IWOA

Tahap pra-iterasi adalah tahapan yang dilakukan sebelum di mulainya proses iterasi IWOA. Pada tahap pra-iterasi algoritma di mulai dengan mendeklarasikan parameter IWOA berupa jumlah agen paus pencari dan jumlah iterasi maksimum. Selanjutnya mendeklarasikan nilai fitness yang diambil dari persamaan karakteristik masing-masing unit pembangkit. Kemudian menentukan agen pencari terbaik berdasarkan posisi yang menghasilkan fitness terbaik.

b. Tahap iterasi IWOA

Pada tahap ini terjadi looping utama dari IWOA. Tahap ini dimulai dengan memperbaharui posisi agen dan menyesuaikan posisi tersebut sesuai dengan batasannya. Kemudian dilakukan menghitung fitness dari setiap agen sebagai landasan untuk menentukan agen pencari terbaik yang baru. Simulasi akan selesai setelah mencapai konvergensi atau mencapai iterasi maksimum.

3. Hasil dan Analisa

3.1. Perbandingan Metode IWOA dengan Metode Lagrange Multiplier

Perbandingan metode IWOA dengan Metode Lagrange Multiplier ini dilakukan untuk mengetahui keakuratan program yang telah dibuat sudah berjalan sesuai dengan perhitungan secara manual. Keberhasilan program diukur dari kemampuannya untuk menganalisis pendistribusian beban yang optimal sehingga daya yang dibangkitkan pada masing-masing unit memenuhi batas yang telah ditentukan dan juga menghasilkan biaya yang hemat.

3.1.1. Perbandingan IWOA dengan Lagrange Multiplier

Berikut adalah contoh perhitungan metode *Lagrange Multiplier* untuk permintaan daya 1485,869 MW:

Diasumsikan $\lambda = 30$

Untuk iterasi pertama P_1, P_2, P_3 dan P_4 adalah

$$P_1^{(1)} = \frac{30 - 24,029}{0,0218} = 273,8991$$

$$P_2^{(1)} = \frac{30 - 18,124}{0,0262} = 453,2824$$

$$P_3^{(1)} = \frac{30 - 17,158}{0,0222} = 578,4685$$

$$P_4^{(1)} = \frac{30 - 17,861}{0,0242} = 501,6116$$

$$\Delta P^{(1)} = 1485,86 - (273,8991 + 453,2824 + 578,4685 + 501,6116) = -321,3925010333012$$

Maka perubahan lamda dihasilkan

$$\Delta \lambda^{(1)} = \frac{-321,3925010333012}{\frac{1}{0,0218} + \frac{1}{0,0262} + \frac{1}{0,0222} + \frac{1}{0,0242}} = -1,8860$$

Kemudian nilai λ baru adalah

$$\lambda^{(2)} = 30 + (-1,8860) = 28,114$$

Dilanjutkan pada proses iterasi ke-2

$$P_1^{(2)} = \frac{28,114 - 24,029}{0,0218} = 187,3839$$

$$P_2^{(2)} = \frac{28,114 - 18,124}{0,0262} = 381,2966$$

$$P_3^{(2)} = \frac{28,114 - 17,158}{0,0222} = 493,5121$$

$$P_4^{(2)} = \frac{28,114 - 17,861}{0,0242} = 423,6764$$

$$\Delta P^{(2)} = 1485,869 - (187,384 + 381,297 + 493,512 + 423,676) = 0$$

Maka perubahan lamda dihasilkan

$$\Delta \lambda^{(2)} = \frac{0}{\frac{1}{0,0218} + \frac{1}{0,0262} + \frac{1}{0,0222} + \frac{1}{0,0242}} = 0$$

Karena P_1 kurang dari batas bawah 330 MW, maka $P_1 = 330$

$$\Delta P^{(2)baru} = 1485,869063 - (187,384 + 381,297 + 493,512 + 423,676) = -142,6160699273574$$

$$\Delta \lambda^{(2)baru} = \frac{-142,6160699273574}{\frac{1}{0,0262} + \frac{1}{0,0222} + \frac{1}{0,0242}} = -1,1452$$

Kemudian nilai λ baru adalah

$$\lambda^{(3)} = 28,114 + (-1,452) = 26,969$$

Dilanjutkan pada proses iterasi ke-3

$$P_1^{(3)} = 330$$

$$P_2^{(3)} = \frac{28,114 - 18,124}{0,0262} = 337,587$$

$$P_3^{(3)} = \frac{28,114 - 17,158}{0,0222} = 441,927$$

$$P_4^{(3)} = \frac{28,114 - 17,158}{0,0242} = 376,355$$

$$\Delta P^{(3)} = 1485,869 - (330 + 337,587 + 441,927 + 376,355) = 0$$

Maka perubahan lamda dihasilkan

$$\Delta \lambda^{(3)} = \frac{0}{\frac{1}{0,0262} + \frac{1}{0,0222} + \frac{1}{0,0242}} = 0$$

$$\Delta \lambda^{(3)} = 0$$

$\Delta P^{(3)} = 0$, dan $\Delta \lambda^{(3)} = 0$ maka proses iterasi telah selesai.

Dihasilkan kombinasi generator dan lamda sebagai berikut

$$P_1 = 330 \text{ MW}$$

$$P_2 = 337,587 \text{ MW}$$

$$P_3 = 441,927 \text{ MW}$$

$$P_4 = 376,355 \text{ MW}$$

$$\lambda = 26,966 \frac{\$}{\text{MWh}}$$

Energi masing masing pembangkit adalah

$$C_1 = 2816,7 + 24,029(330) + 0,0109(330)^2 = 11933,28$$

$$C_2 = 4025,8 + 18,124(337,587) + 0,0131(337,587)^2 = 11637,1725$$

$$C_3 = 3774,9 + 17,158(441,927) + 0,0111(441,927)^2 = 13525,3129$$

$$C_4 = 3440,5 + 17,861(376,355) + 0,0121(376,355)^2 = 11876,4499$$

Biaya total pada saat permintaan daya 1485,869063 MW adalah

$$C_{Total} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = 48972,2154 \text{ \$/Jam}$$

Hasil pengujian simulasi dari metode IWOA dan metode *Lagrange Multiplier* menghasilkan daya keluaran dan biaya total untuk empat unit generator yang dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Hasil perhitungan lagrange multiplier

Daya (MW)	Lagrange Multiplier				Total Biaya (\\$/Jam)
	STG 1 (MW)	STG 2 (MW)	STG 3 (MW)	STG 4 (MW)	
1485,869	330	337,587	441,928	376,355	48972,2154
1732,331	330	413,123	531,074	458,134	55862,8638
1829,024	330	442,758	566,048	490,217	58699,4516
2008,673	330	497,818	631,028	549,827	64168,9645
2160,581	373,350	536,032	660	591,200	68975,5456
2220,353	395,221	554,230	660	610,902	70912,5303
2396,420	464,525	611,895	660	660	76785,2905
2407,607	470,631	616,976	660	660	77168,1450
2507,359	527,359	660	660	660	80647,8413
2516,115	536,115	660	660	660	80959,7310

Tabel 3. Hasil simulasi IWOA

Daya (MW)	Metode IWOA				Total Biaya (\\$/Jam)
	STG 1 (MW)	STG 2 (MW)	STG 3 (MW)	STG 4 (MW)	
1485,869	330	337,564	441,776	376,528	48972,2146
1732,331	330	413,143	531,128	458,060	55862,8748
1829,024	330	442,790	566,032	490,202	58699,4656
2008,673	330	497,705	631,050	549,918	64168,9778
2160,581	373,333	536,036	660	591,212	68975,5436
2220,353	395,205	554,233	660	610,914	70912,5405
2396,420	464,527	611,893	660	660	76785,2990
2407,607	470,630	616,977	660	660	77168,1428
2507,359	527,359	660	660	660	80647,8413
2516,115	536,115	660	660	660	80959,7376

Berdasarkan Tabel 3 menunjukkan hasil daya keluaran dan biaya dari metode IWOA dan metode *Lagrange Multiplier* untuk PLTU Tanjung Jati B. Dapat dilihat hasil perbandingan simulasi antara metode optimisasi IWOA dengan metode optimisasi *Lagrange Multiplier* memiliki jumlah biaya masing masing dengan permintaan daya yang hampir sama dan konfigurasi generator yang tidak jauh berbeda dengan eror kurang dari 1 %. Dengan demikian metode optimisasi IWOA merupakan metode yang dapat digunakan untuk solusi dari permasalahan operasi ekonomis pada sistem tenaga listrik.

3.2. Perbandingan Pembebanan PLTU Tanjung Jati B Dengan Metode IWOA

Perbandingan dilakukan dengan membandingkan biaya operasi metode IWOA terhadap biaya operasi pembebanan PLTU Tanjung Jati B. Perbandingan dilakukan dengan membandingkan dengan keadaan PLTU Tanjung Jati B ketika empat generator aktif, tiga generator aktif dan dua generator aktif.

3.2.1. Perbandingan Biaya TJB dengan Metode IWOA Empat Generator Aktif

Tabel 6. Operasi Ekonomis TJB 4 Generator Aktif

Daya (MW)	STG 1 (MW)	STG 2 (MW)	STG 3 (MW)	STG 4 (MW)	Biaya (\$/Jam)
1485,869	365,193	363,421	378,564	378,691	49187,5092
1732,331	412,763	414,402	453,240	451,927	56192,2570
1829,024	408,861	417,483	502,334	500,346	58938,8013
2008,673	505,486	500,680	502,434	500,073	64726,8059
2160,581	562,664	504,270	549,178	544,470	69580,5408
2220,353	558,831	552,494	554,030	554,997	71453,9756
2396,420	600,296	597,542	600,836	597,746	77232,2318
2407,607	611,325	599,928	597,505	598,850	77657,7944
2507,359	623,920	623,378	631,333	628,728	80950,1389
2516,115	640,115	625,517	624,918	625,565	81332,1595

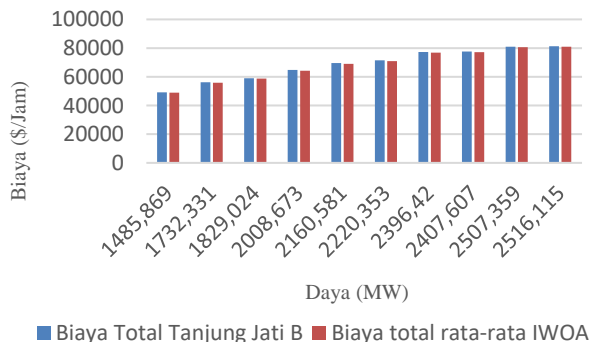
Tabel 7. Operasi Ekonomis IWOA 4 Generator Aktif

Daya (MW)	Metode IWOA				Total Biaya (\$/Jam)
	STG 1 (MW)	STG 2 (MW)	STG 3 (MW)	STG 4 (MW)	
1485,869	330	337,564	441,776	376,528	48972,2146
1732,331	330	413,143	531,128	458,060	55862,8748
1829,024	330	442,790	566,032	490,202	58699,4656
2008,673	330	497,705	631,050	549,918	64168,9778
2160,581	373,333	536,036	660	591,212	68975,5436
2220,353	395,205	554,233	660	610,914	70912,5405
2396,420	464,527	611,893	660	660	76785,2990
2407,607	470,630	616,977	660	660	77168,1428
2507,359	527,359	660	660	660	80647,8413
2516,115	536,115	660	660	660	80959,7376

Tabel 8. Operasi Ekonomis TJB 4 Generator Aktif

Daya (MW)	Biaya TJB (\$/Jam)	Biaya Metode IWOA (\$/Jam)	Selisih (\$/Jam)
1485,869	49187,5092	48972,2146	215,2947
1732,331	56192,2570	55862,8748	329,3822
1829,024	58938,8013	58699,4656	239,3357
2008,673	64726,8059	64168,9778	557,8281
2160,581	69580,5408	68975,5436	604,9971
2220,353	71453,9756	70912,5405	541,4351
2396,420	77232,2318	76785,2990	446,9328
2407,607	77657,7944	77168,1428	489,6516
2507,359	80950,1389	80647,8413	302,2976
2516,115	81332,1595	80959,7376	372,4219
Rata-rata			409,9577

Berdasarkan Tabel 8 dapat dibuat grafik sebagai berikut



Gambar 7. Perbandingan TJB dengan Metode IWOA

Dari Tabel 8. dan Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa untuk seluruh pembebanan, biaya operasi hasil optimisasi metode IWOA lebih hemat dari biaya operasi pembebanan PLTU Tanjung Jati B. Penghematan rata-rata 409,9577 \$/Jam, Selisih biaya terbesar pada beban 2160,581 MW dengan selisih biaya 604,9971 \$/Jam dan selisih biaya terkecil pada pembebanan 1485,869 MW dengan selisih biaya 215,2947 \$/Jam.

3.2.2 Perbandingan Biaya TJB dengan Metode IWOA Tiga Generator Aktif

Tabel 9. Operasi Ekonomis TJB 3 Generator Aktif

Daya (MW)	STG 1 (MW)	STG 2 (MW)	STG3 (MW)	STG 4 (MW)	Biaya (\$/Jam)
1283,177	426,344	431,521	0	425,312	42553,1108
1304,596	411,379	416,598	0	476,619	43096,9445
1483,726	486,886	493,574	0	503,265	48755,3851
1487,500	490,057	493,735	0	503,707	48883,6200
1535,499	516,605	517,110	0	501,784	50488,2644
1629,086	561,127	566,053	0	501,907	53666,2834
1717,758	582,616	586,338	0	548,805	56558,3051
1822,139	614,181	608,539	0	599,419	60085,6569
1906,325	637,188	639,267	0	629,870	63008,3543
1968,350	657,017	659,366	0	651,967	65208,1541

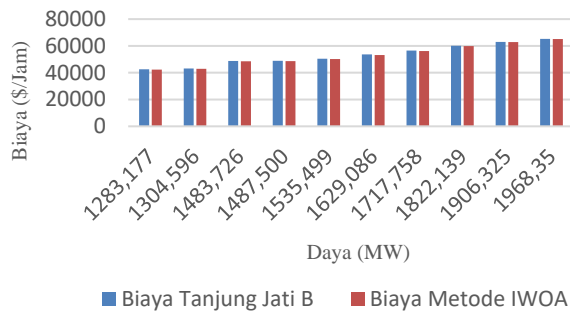
Tabel 10. Operasi Ekonomis IWOA 3 Generator Aktif

Daya (MW)	STG 1 (MW)	STG 2 (MW)	STG3 (MW)	STG 4 (MW)	Biaya (\$/Jam)
1283,177	330	452,438	0	500,739	42258,7860
1304,596	330	462,722	0	511,874	42903,7791
1483,726	367,160	530,881	0	585,685	48500,1446
1487,500	368,580	532,075	0	586,843	48621,0643
1535,499	386,093	546,681	0	602,725	50169,3098
1629,086	420,366	575,161	0	633,559	53240,8196
1717,758	454,328	603,430	0	660	56215,6184
1822,139	511,299	650,839	0	660	59822,4278
1906,325	586,325	660	0	660	62846,1928
1968,350	648,350	660	0	660	65171,3213

Tabel 11. Perbandingan TJB dengan IWOA 3 Generator Aktif

Daya (MW)	Biaya TJB (\$/Jam)	Biaya Metode IWOA (\$/Jam)	Selisih (\$/Jam)
1283,177	42553,1108	42258,7860	294,3248
1304,596	43096,9445	42903,7791	193,1654
1483,726	48755,3851	48500,1446	255,2405
1487,500	48883,6200	48621,0643	262,5557
1535,499	50488,2644	50169,3098	318,9546
1629,086	53666,2834	53240,8196	425,4638
1717,758	56558,3051	56215,6184	342,6867
1822,139	60085,6569	59822,4278	263,2291
1906,325	63008,3543	62846,1928	162,1615
1968,350	65208,1541	65171,3213	36,8328
Rata-rata			255,4615

Berdasarkan Tabel 11 dapat dibuat grafik sebagai berikut :



Gambar 8. Perbandingan TJB dengan Metode IWOA

Dari Tabel 11. dan Gambar 8. dapat dilihat bahwa untuk seluruh pembebanan, biaya operasi hasil optimisasi metode IWOA lebih hemat dari biaya operasi pembebanan PLTU Tanjung Jati B. Penghematan rata-rata 255,4615 \$/Jam. Selisih biaya terbesar pada beban 1629,086 MW dengan selisih biaya 425,4638 \$/Jam dan selisih biaya terkecil pada pembebanan 1968,350 MW dengan selisih biaya 36,8328 \$/Jam.

3.2.3. Perbandingan Biaya TJB dengan Metode IWOA Dua Generator Aktif

Tabel 12. Operasi Ekonomis TJB 2 Generator Aktif

Daya (MW)	STG 1 (MW)	STG 2 (MW)	STG3 (MW)	STG 4 (MW)	Biaya (\$/Jam)
807,465	402,616	0	0	404,850	26912,2870
878,251	430,284	0	0	447,967	29043,3597
915,073	462,399	0	0	452,674	30262,9169
955,415	480,809	0	0	474,605	31532,3528
1004,151	504,799	0	0	499,353	33100,1737
1067,122	515,482	0	0	551,640	35074,5375
1189,153	590,193	0	0	598,960	39274,1728
1202,144	604,234	0	0	597,910	39760,3753
1221,887	621,354	0	0	600,534	40485,3680
1308,510	652,019	0	0	656,491	43498,4013

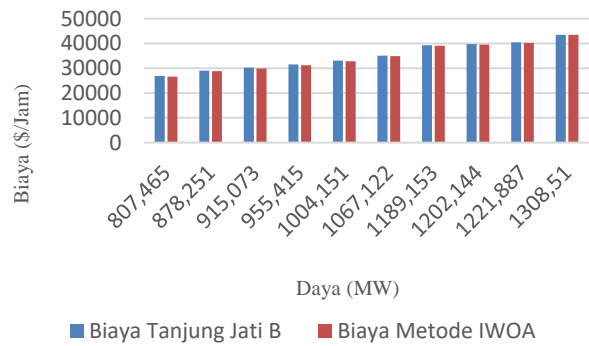
Tabel 13. Operasi Ekonomis IWOA 2 Generator Aktif

Daya (MW)	STG 1 (MW)	STG 2 (MW)	STG3 (MW)	STG 4 (MW)	Biaya (\$/Jam)
807,465	330,000	0	0	477,465	26660,2536
878,251	330,000	0	0	548,251	28803,0989
915,073	347,325	0	0	567,748	29958,8245
955,415	368,560	0	0	586,854	31242,9563
1004,151	394,188	0	0	609,963	32819,2440
1067,122	427,290	0	0	639,832	34896,2356
1189,153	529,153	0	0	660	39083,2690
1202,144	542,143	0	0	660	39547,0916
1221,887	561,887	0	0	660	40259,1180
1308,510	648,510	0	0	660	43483,4277

Tabel 14. Perbandingan TJB dengan IWOA 3 Generator Aktif

Daya (MW)	Harga Tanjung Jati B (\$/Jam)	Harga Metode IWOA (\$/Jam)	Selisih (\$/Jam)
807,465	26912,2870	26660,2536	252,0334
878,251	29043,3597	28803,0989	240,2608
915,073	30262,9169	29958,8245	304,0924
955,415	31532,3528	31242,9563	289,3965
1004,151	33100,1737	32819,2440	280,9297
1067,122	35074,5375	34896,2356	178,3019
1189,153	39274,1728	39083,2690	190,9038
1202,144	39760,3753	39547,0916	213,2837
1221,887	40485,3680	40259,1180	226,2500
1308,510	43498,4013	43483,4277	14,9736
		Rata-rata	219.0426

Berdasarkan Tabel 14 dapat dibuat grafik sebagai berikut :



Gambar 9. Perbandingan TJB dengan Metode IWOA

Dari Tabel 14. dan Gambar 9. dapat dilihat bahwa untuk seluruh pembebanan, biaya operasi hasil optimisasi metode IWOA lebih hemat dari biaya operasi pembebanan PLTU Tanjung Jati B. Penghematan rata-rata 219,0426 \$/ Jam, Selisih biaya terbesar pada beban 915,073 MW dengan selisih biaya 304,0924 \$/Jam dan selisih biaya terkecil pada pembebanan 1308,510 MW dengan selisih biaya 14,974 \$/Jam.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan bahwa metode IWOA merupakan metode yang dapat digunakan untuk permasalahan operasi ekonomis yang optimal pada unit pembangkit PLTU Tanjung Jati B. Hal ini dapat dilihat dari hasil perbandingan metode optimisasi IWOA dengan Lagrange Multiplier yang mempunyai selisih kurang dari 1 % . Pembangkitan variasi generator aktif menggunakan metode IWOA dibandingkan dengan pengoperasian generator di PLTU Tanjung Jati B, metode IWOA lebih hemat ketika 2 generator aktif, 3 generator aktif dan 4 generator aktif dimana ketika 2 generator aktif penghematan rata-rata 219,0426 \$/ Jam, Selisih biaya terbesar pada beban 915,073 MW dengan selisih biaya 304,0924 \$/Jam dan selisih biaya terkecil pada

pembebanan 1308,510 MW dengan selisih biaya 14,9736 \$/Jam. Ketika 3 generator aktif penghematan rata-rata 255.4615 \$/ Jam, Selisih biaya terbesar pada beban 1629,086 MW dengan selisih biaya 425,4638 \$/Jam dan selisih biaya terkecil pada pembebanan 1968,350 MW dengan selisih biaya 36,8328 \$/Jam dan ketika 4 generator aktif penghematan rata-rata 409,9577 \$/ Jam, selisih biaya terbesar pada beban 2160,581 MW dengan selisih biaya 604,9971 \$/Jam dan selisih biaya terkecil pada pembebanan 1485,869 MW dengan selisih biaya 215,2947 \$/Jam.

Referensi

- [1]. D. Marsudi, *Pembangkitan Energi Listrik*. Jakarta: Erlangga, 2011.
- [2]. W. D. Stevenson Jr, *Analisis Sistem Tenaga Listrik*, 4th ed. Bandung: Erlangga, 1994.
- [3]. F. Milano, *Power System Modelling and Scripting*. 2010.
- [4]. H. Saadat, *Power System Analysis*. 2002.
- [5]. A. J. Wood, *Power Generation Operation and Control*. 1996.
- [6]. S. Mirjalili and A. Lewis, "Advances in Engineering Software The Whale Optimization Algorithm," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 95, pp. 51–67, 2016.
- [7]. H. Hu, Y. Bai, and T. Xu, "Improved whale optimization algorithms based on inertia weights and theirs applications," *Int. J. Circuits, Systems Signal Process.*, vol. 11, pp. 12–26, 2017.
- [8]. H. J. Touma, "Study of The Economic Dispatch Problem on IEEE 30-Bus System using Whale Optimization Algorithm," *IJETS*, vol. 5, no. 1, pp. 11–18, 2016.