

**OPTIMASI PENJADWALAN EKONOMIS DAN EMISI PEMBANGKIT  
LISTRIK HIDROTERMAL MENGGUNAKAN ALGORITMA  
*DRAGONFLY***

Tesis S-2

Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Magister Teknik  
Program Studi Magister Teknik Elektro



Diajukan Oleh

Novita Popi Wulandari

20602200005

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO**

**FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**

**UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG**

**SEMARANG**

**2025**

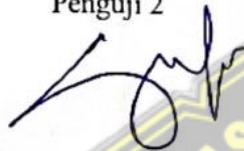
**LEMBAR PENGESAHAN**  
**OPTIMASI PENJADWALAN EKONOMIS DAN EMISI PEMBANGKIT LISTRIK**  
**HIDROTERMAL MENGGUNAKAN ALGORITMA *DRAGONFLY***

Yang dipersiapkan dan disusun oleh  
Novita Popi Wulandari  
20602200005

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji  
Pada tanggal 3 Juni 2025

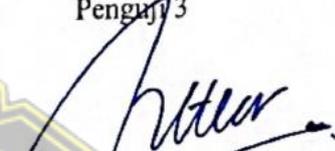
Susunan Dewan Penguji

Penguji 2



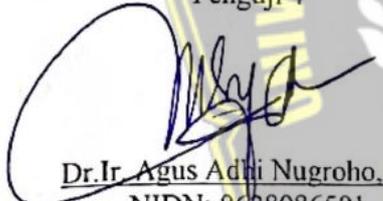
Dr. Ir. Sukarno Budi Utomo, MT  
NIDN: 0619076401

Penguji 3



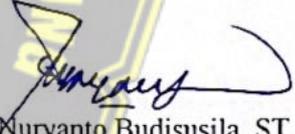
Prof. Dr. Ir. Sri Arttini Dwi Prasetyowati, M.Si.  
NIDN: 0620026501

Penguji 4



Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, MT  
NIDN: 0628086501

Penguji 5



Dr. Eka Nuryanto Budisusila, ST., MT.  
NIDN: 0619107301

Ketua Penguji



Prof. Dr. Ir. Muhamad Haddin, M.T.  
NIDN: 0618066301

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**OPTIMASI PENJADWALAN EKONOMIS DAN EMISI PEMBANGKIT LISTRIK**  
**HIDROTERMAL MENGGUNAKAN ALGORITMA *DRAGONFLY***

Yang dipersiapkan dan disusun oleh  
Novita Popi Wulandari  
20602200005

Telah disahkan oleh Dewan Pembimbing

Susunan Dewan Pembimbing

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping

  
Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, MT  
NIDN: 0628086501

  
Dr. Eka Nuryanto Budisusila, ST., MT.  
NIDN: 0619107301

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan  
untuk memperoleh gelar Magister Teknik  
Tanggal 3 Juni 2025

Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro



  
Prof. Dr. Ir. Sri Ardi Dwi Prasetyowati, M.Si.  
NIDN: 0620026501

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Novita Popi Wulandari  
NIM : 20602200005  
Jurusan : Magister Teknik Elektro  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **“OPTIMASI PENJADWALAN EKONOMIS DAN EMISI PEMBANGKIT LISTRIK HIDROTERMAL MENGGUNAKAN ALGORITMA *DRAGONFLY*”** adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam daftar pustaka. Tugas Akhir ini adalah milik saya segala bentuk kesalahan dan kekeliruan dalam Tugas Akhir ini adalah tanggung jawab saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, 3 Juni 2025

Yang Menyatakan



Novita Popi Wulandari

NIM : 20602200005

## PERNYATAAN PERSETUJUAN UNGGAH KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Novita Popi Wulandari

NIM : 20602200005

Program Studi : Magister Teknik Elektro

Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini menyerahkan karya ilmiah berupa ~~Tugas Akhir/Skripsi/Tesis/Disertasi\*~~ dengan judul :

Optimasi Penjadwalan Ekonomis dan Emisi Pembangkit Listrik Hidrotermal Menggunakan *Algoritma Dragonfly*

dan menyetujuinya menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif untuk disimpan, dialihmediakan, dikelola dalam pangkalan data, dan dipublikasikannya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung.

Semarang, 3 Juni 2025

Yang menyatakan,



(Novita Popi Wulandari)

\*Coret yang tidak perlu

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadirat Allah SWT atas rahmat, hidayah dan inayah yang telah diberikan, sehingga penulis masih diberi kesempatan nikmat iman, islam dan ihsan. Shalawat dan salam, semoga selalu tercurah kepada Baginda Rasulullah Muhammad SAW beserta keluarga, para sahabat dan para pengikutnya. Penulis mengucapkan rasa syukur telah menyelesaikan tesis yang berjudul “Optimasi Penjadwalan Ekonomis Dan Emisi Pembangkit Listrik Hidrotermal Menggunakan Algoritma *Dragonfly*” disusun dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA).

Dalam melakukan penelitian dan penyusunan tesis ini penulis telah mendapatkan banyak dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Penulis mengucapkan terimakasih yang tak terhingga kepada:

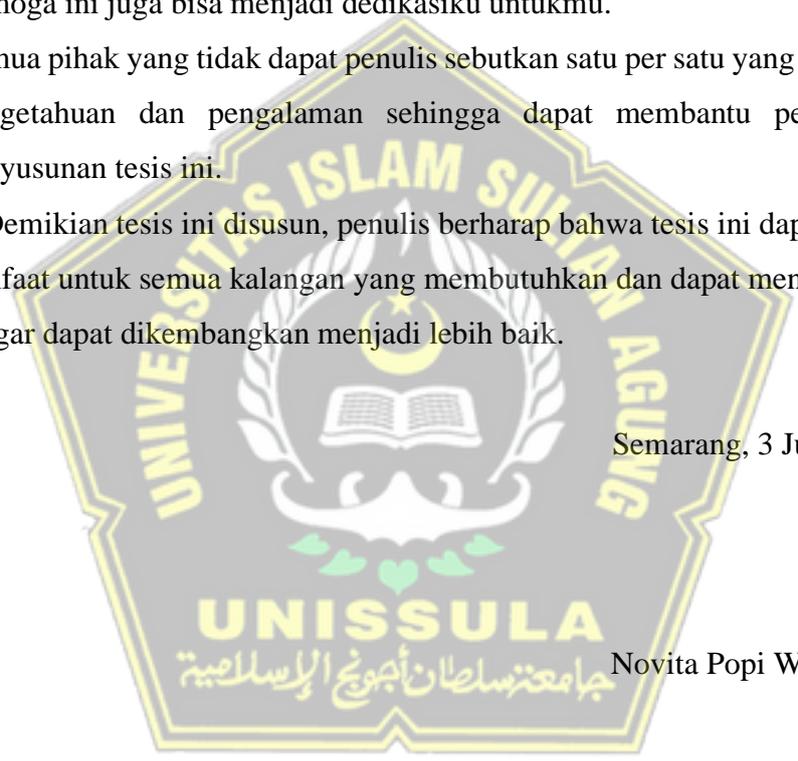
1. Bapak Prof. Dr. H.Gunarto, S.H., S.E Akt., M.Hum. selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung.
2. Ibu Dr. Ir. Novi Marlyana, S.T., M.T., IPU, ASEN. Eng. Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung.
3. Ibu Prof. Dr. Ir. Sri Arttini Dwi Prasetyowati, M.Si. Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung.
4. Bapak Dr.Ir. Agus Adhi Nugroho, MT. selaku pembimbing pertama yang telah banyak memberikan masukan, saran, meluangkan waktu serta kemudahan kepada penulis dalam penyusunan tesis ini.
5. Bapak Dr. Eka Nuryanto Budisusila, ST., MT. selaku pembimbing kedua yang telah banyak memberikan masukan, saran, meluangkan waktu serta kemudahan kepada penulis dalam penyusunan tesis ini.
6. Seluruh Dosen dan Staff Akademik Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung terima kasih telah memberikan ilmu dan pengalamannya kepada penulis, semoga ilmu yang bapak ibu berikan bermanfaat bagi semuanya dan semoga senantiasa mendapat pahala dari Allah SWT.

7. Teman-teman Magister Teknik Elektro angkatan 2022 yang selalu kompak, saling memberikan dukungan, motivasi, bantuan dan semangat selama penulis menempuh studi sampai selesai studi.
8. Bapak dan Mama yang sangat saya sayangi terima kasih atas dukungan materi dan selalu memberikan semangat, motivasi, doa selama penulis mulai menempuh studi Magister hingga selesai dan ini menjadi salah satu bentuk dedikasiku berbakti kepada orang tua.
9. Abang terima kasih sudah menjadi partner hebat yang selalu menemani, menjadi teman diskusi, dan membantu dalam proses penyelesaian tesis ini. Semoga ini juga bisa menjadi dedikasiku untukmu.
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah berbagi pengetahuan dan pengalaman sehingga dapat membantu penulis dalam penyusunan tesis ini.

Demikian tesis ini disusun, penulis berharap bahwa tesis ini dapat bermanfaat untuk semua kalangan yang membutuhkan dan dapat menjadi bahan topik agar dapat dikembangkan menjadi lebih baik.

Semarang, 3 Juni 2025

Novita Popi Wulandari



## DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
Halaman Pengesahan Penguji .....	ii
Halaman Pengesahan Pembimbing .....	iii
Surat Pernyataan Keaslian Tesis .....	iv
Pernyataan Persetujuan Unggah Karya Ilmiah .....	v
Kata Pengantar .....	vii
Daftar Isi.....	viii
Daftar Gambar.....	ix
Daftar Tabel .....	x
Abstrak .....	xii
<i>Abstract</i> .....	xiii
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Keaslian Penelitian .....	5
1.7 Sistematika Penelitian.....	6
<b>BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....</b>	<b>8</b>
2.1 Penelitian Sebelumnya .....	8
2.2 Sistem Tenaga Listrik.....	9
2.3 Karakteristik Unit Pembangkit .....	10
2.4 Optimasi Pembangkit Listrik.....	12
2.5 <i>Combined Economic and Emission Dispatch</i> .....	12
2.6 <i>Dragonfly Algoritma</i> .....	14
2.7 Emisi Gas Metana pada Waduk.....	15

<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>19</b>
3.1 Model Penelitian.....	19
3.2 Alat dan Bahan .....	21
3.3 Metode Penelitian.....	21
3.4 Software dan Hardware yang digunakan.....	21
3.5 Metode Pengambilan Data.....	22
3.6 Proses Simulasi Program Matlab Code .....	22
<b>BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>27</b>
4.1 Hasil Penelitian.....	28
4.2 Pembahasan .....	29
4.2.1 Hasil Perhitungan Emisi CO <sub>2</sub> PLTU .....	30
4.2.2 Kasus 1 dengan W1=1 dan W2=0 .....	33
4.2.3 Kasus 2 dengan W1=0.25 dan W2=0.75 .....	35
4.2.4 Kasus 3 dengan W1=0.5 dan W2=0.5 .....	37
4.2.5 Kasus 4 dengan W1=0.75 dan W2=0.25 .....	39
4.2.6 Kasus 5 dengan W1=0 dan W2=1 .....	42
4.3 Hubungan Biaya Produksi dan Nilai Emisi.....	44
4.4 Skenario Penjadwalan Operasi Pembangkit.....	48
4.5 Intensitas Emisi PLTU .....	53
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>57</b>
5.1 Kesimpulan.....	57
5.2 Saran.....	58
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>59</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem Tenaga Listrik.....	9
Gambar 2.2	Karakteristik Input dan Output Dengan Ketinggian Konstan .....	11
Gambar 2.3	Kurva Karakteristik Input Dan Output Pembangkit Termal .....	11
Gambar 3.1	Flowchart Model Penelitian .....	19
Gambar 3.2	Gambar Flowchart Penelitian.....	19
Gambar 3.2	Flowchart Algoritma Dragonfly.....	20
Gambar 4.1	Plot fungsi Himmelblau .....	27
Gambar 4.2	Test Function.....	28
Gambar 4.3	GUI Algoritma Dragonfly pada Matlab .....	28
Gambar 4.4	Kurva Fitnes dengan memprioritaskan Biaya Produksi.....	29
Gambar 4.5	Kurva Fitnes dengan memprioritaskan Nilai Emisi .....	29
Gambar 4.6	Grafik biaya operasi pembangkit kasus 1 .....	34
Gambar 4.7	Grafik emisi PLTU kasus 1 .....	34
Gambar 4.8	Grafik emisi CO2 PLTA .....	34
Gambar 4.9	Grafik emisi CH4 PLTA .....	34
Gambar 4.10	Grafik biaya operasi pembangkit kasus 2 .....	36
Gambar 4.11	Grafik emisi PLTU kasus 2 .....	36
Gambar 4.12	Grafik emisi CO2 PLTA .....	36
Gambar 4.13	Grafik emisi CH4 PLTA .....	37
Gambar 4.14	Grafik biaya operasi pembangkit kasus 3 .....	38
Gambar 4.15	Grafik emisi PLTU kasus 3 .....	38
Gambar 4.16	Grafik emisi CO2 PLTA .....	39
Gambar 4.17	Grafik emisi CH4 PLTA .....	39
Gambar 4.18	Grafik biaya operasi pembangkit kasus 4 .....	40
Gambar 4.19	Grafik emisi PLTU kasus 4.....	41
Gambar 4.20	Grafik emisi PLTA .....	41
Gambar 4.21	Grafik emisi PLTA.....	41
Gambar 4.22	Grafik biaya operasi pembangkit kasus 5 .....	46
Gambar 4.23	Grafik emisi PLTU kasus 5 .....	46
Gambar 4.24	Grafik emisi CO2 PLTA .....	46
Gambar 4.25	Grafik emisi CH4 PLTA .....	46

Gambar 4.26 Grafik Biaya Produksi.....	47
Gambar 4.27 Grafik nilai emisi PLTU.....	47
Gambar 4.28 Grafik nilai emisi CO2 PLTA .....	47
Gambar 4.29 Grafik nilai emisi CH4 PLTA .....	48
Gambar 4.30 Grafik Beban Harian Tanggal 1 Agustus 2024 .....	50



## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Nilai Pembobotan kasus simulasi .....	23
Tabel 4.1	Data Emisi CO2 Hasil Perhitungan tanpa sistem pembobotan .....	31
Tabel 4.2	Data PLTU dan PLTA yang digunakan dalam pengolahan data pembobotan simulasi matlab .....	32
Tabel 4.3	Hasil Simulasi $W=1$ dan $W2=0$ .....	33
Tabel 4.4	Hasil Simulasi $W1= 0.25$ dan $W2= 0.75$ .....	35
Tabel 4.5	Hasil Simulasi $W1= 0.5$ dan $W2= 0.5$ .....	38
Tabel 4.6	Hasil Simulasi $W1= 0.75$ dan $W2= 0.25$ .....	40
Tabel 4.7	Hasil Simulasi $W1= 0$ dan $W2= 1$ .....	43
Tabel 4.8	Biaya dan Emisi tanggal 1 Agustus 2024.....	45
Tabel 4.9	Biaya dan Emisi tanggal 2 Agustus 2024.....	45
Tabel 4.10	Biaya dan Emisi tanggal 3 Agustus 2024.....	46
Tabel 4.11	Biaya dan Emisi tanggal 4 Agustus 2024.....	46
Tabel 4.12	Biaya dan Emisi tanggal 5 Agustus 2024.....	46
Tabel 4.13	Biaya dan Emisi tanggal 6 Agustus 2024.....	46
Tabel 4.14	Biaya dan Emisi tanggal 7 Agustus 2024.....	49
Tabel 4.15	Data Pembagian beban pembangkit termal dan pembangkit Hidro.....	50
Tabel 4.16	Daya per unit PLTU dan PLTA.....	50
Tabel 4.17	Daya per Unit PLTA Dan PLTU.....	40
Tabel 4.18	Contoh Jadwal Operasi 24 Jam Sederhana .....	51
Tabel 4.18	Data Intensitas Emisi PLTU Pacitan tanpa pembobotan .....	53
Tabel 4.19	Intensitas Emisi Kasus 1 $W1= 1$ dan $W2= 0$ .....	54
Tabel 4.20	Intensitas Emisi Kasus 1 $W1= 0.25$ dan $W2= 0.75$ .....	54
Tabel 4.21	Intensitas Emisi Kasus 1 $W1= 0.5$ dan $W2= 0.5$ .....	54
Tabel 4.22	Intensitas Emisi Kasus 1 $W1= 0.75$ dan $W2= 0.25$ .....	55
Tabel 4.23	Intensitas Emisi Kasus 1 $W1= 0$ dan $W2= 1$ .....	55

## ABSTRAK

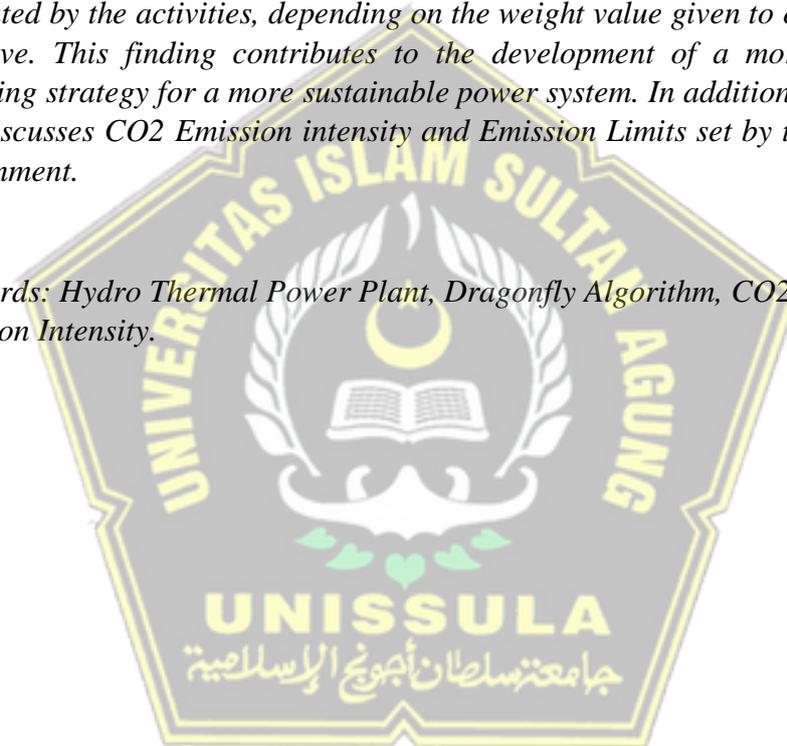
Permasalahan dalam sistem pembangkitan tenaga listrik tidak hanya berkaitan dengan biaya operasional, tetapi juga dampak lingkungan yang ditimbulkan akibat emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, perlu dilakukan optimasi penjadwalan pembangkit listrik agar efisien secara ekonomi dan ramah lingkungan. Penelitian ini mengusulkan penggunaan algoritma Dragonfly dalam menyelesaikan permasalahan multi-objektif penjadwalan ekonomis dan emisi pada pembangkit listrik hidrotermal. Algoritma ini diimplementasikan dalam simulasi menggunakan data pembangkit PLTU dan PLTA untuk beberapa skenario pembobotan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa algoritma Dragonfly mampu menghasilkan solusi yang optimal dalam menyeimbangkan antara biaya operasi dan emisi karbon dioksida dan Metana yang dihasilkan oleh aktivitas PLTA, tergantung pada nilai bobot yang diberikan untuk masing-masing tujuan. Temuan ini memberikan kontribusi dalam pengembangan strategi operasi sistem tenaga listrik yang lebih berkelanjutan. Selain itu pada penelitian ini juga membahas mengenai intensitas Emisi CO<sub>2</sub> dan Batasan Emisi yang ditetapkan Pemerintah Indonesia.

Kata Kunci: Pembangkit Hidro Termal, *Dragonfly Algorithm*, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, dan Intensitas Emisi.

## ABSTRACT

*Problems in the power generation system power generation systems are not only related to operational costs, but also the environmental impact caused by greenhouse gas emissions. Therefore, it is necessary to optimize the scheduling of power plants in order to be economically efficient and environmentally friendly. This research proposes the use of the Dragonfly algorithm in solving the multi-objective problem of economic and emission scheduling problems in hydrothermal power plants. The algorithm algorithm is implemented in simulations using data from PLTU and PLTA plants for several weighting scenarios. The simulation results show that the Dragonfly algorithm is able to produce an optimal solution in balancing between operating costs and the carbon dioxide and Methane emissions generated by the activities, depending on the weight value given to each objective. This finding contributes to the development of a more sustainable operating strategy for a more sustainable power system. In addition, this research also discusses CO<sub>2</sub> Emission intensity and Emission Limits set by the Indonesian Government.*

*Keywords: Hydro Thermal Power Plant, Dragonfly Algorithm, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and Emission Intensity.*



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sistem interkoneksi kelistrikan di Indonesia rata-rata menggunakan jaringan transmisi 150 Kv (Widyastuti et al., 2015) Sepanjang tahun 2022 konsumsi listrik di Indonesia sebesar angka 1.173 kilowatt hour (KWh) per kapita. Angka ini tercatat naik 4,45% jika dibandingkan tahun 2021 sebesar 1.123 kWh per kapita dengan komposisi per sektor pemakai di dominasi oleh sektor rumah tangga, industri, dan publik (Putri., 2023).

Permasalahan yang terjadi adalah biaya produksi yang besar yang disebabkan oleh sistem tenaga listrik yang terhubung dalam suatu interkoneksi, unit-unit pembangkit juga tidak berada dalam jarak yang sama dengan pusat beban. Selain itu biaya pembangkitan masing-masing unit juga akan berbeda. Dalam kondisi normal kapasitas yang dimiliki sistem pembangkit harus lebih besar dibanding jumlah kebutuhan beban dan rugi-rugi daya. (Rahmat & Abdullah, 2014). Optimasi pembangkit Hidro dan Termal merupakan salah satu cara yang cukup ekonomis untuk memenuhi kebutuhan energi listrik pelanggan (Abdullah et al., 2019). Selain permasalahan biaya pokok produksi sistem tenaga listrik yang ideal perlu memperhatikan dampak terhadap lingkungan (Sutanto et al., n.d.). Pembangkit listrik tenaga termal adalah sumber utama karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), dan nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>) yang menyebabkan polusi atmosfer (Abdullah et al., 2019). Selain itu pembangkit hidro juga menjadi salah satu sumber emisi Gas Rumah Kaca (GRK) (CO<sub>2</sub>e). Aktivitas manusia dan vegetasi di sekitar waduk berpotensi menjadi sumber masuknya bahan organik pada waduk. Sedimen perairan terutama daerah danau, bendungan, atau reservoir dapat memproduksi biogas yang menghasilkan gas karbondioksida (CO<sub>2</sub>) dan gas metana (CH<sub>4</sub>) yang dihasilkan dari dekomposisi mikroorganisme (Andini et al., 2022a).

Solusi dari permasalahan yang terjadi adalah penjadwalan pembangkit hidrotermal merupakan salah satu cara yang paling ekonomis dalam sistem tenaga modern untuk memenuhi kebutuhan dalam pasar energi. Penjadwalan hidrotermal juga digunakan untuk meminimalkan emisi gas yang

mengakibatkan kerusakan lingkungan dengan persyaratan selain minimalisasi biaya bahan bakar dengan membentuk gabungan penjadwalan hidrotermal (Rahmat & Abdullah, 2014). Penjadwalan unit pembangkit menentukan unit yang hidup dan mati (*on and off*) hal ini disebut dengan unit *commitment*, yang didefinisikan sebagai penjadwalan produksi daya listrik dengan memperhatikan kondisi optimal serta batasan-batasan (*constrain*) unit pembangkit pada periode harian, mingguan dan bulanan dengan tujuan mendapatkan biaya ekonomis pembangkitan.

Fokus Penelitian ini adalah Penerapan *Dragonfly Algorithm* sebagai penjadwalan hidrotermal dengan tujuan memaksimalkan pembangkitan hidrotermal sehingga dapat memecahkan pokok permasalahan ekonomi dan *emisi dispatch*. Penulis menerapkan *Dragonfly Algorithm* sebagai algoritma optimasi pengambil keputusan karena *Dragonfly Algorithm* merupakan algoritma baru dan belum banyak yang membahas mengenai optimasi penjadwalan, emisi pada pembangkit termal dan prediksi perkiraan kandungan Emisi yang disebabkan oleh aktivitas waduk pembangkit Hidro. Selain itu Algoritma *Dragonfly* memiliki kemampuan Optimasi yang baik dalam berbagai jenis masalah dan memiliki kecepatan konvergensi dengan cepat dan solusi optimal sehingga dapat menghemat waktu optimasi. Prinsip kerja *Dragonfly Algorithm* terinspirasi dari spesies *Dragonfly* untuk menangkap mangsa yang memiliki dua fase yaitu *Eksplorasi* dan *Eksplorasi*. Tujuan utama Fase *Eksplorasi* yaitu *Dragonfly* menciptakan sub kawanan dan terbang diatas wilayah yang berbeda dalam kawanan dinamis. Namun, dalam kelompok statis *Dragonfly* terbang dalam kawanan yang lebih besar dalam satu arah yang menguntungkan fase *Eksplorasi*. *Dragonfly Algorithm* memiliki lima faktor yaitu faktor pemisahan, faktor penggabungan, faktor penyesuaian, faktor sumber makanan, dan faktor predator (Febriana Nilasari et al., 2019).

Penelitian tentang ekonomi *dispatch* yang dilakukan oleh Kanata yaitu dengan meminimalkan biaya bahan bakar dengan menggunakan metode *Modified Improved Particle Swarm Optimization* (MIPSO) dengan menentukan kombinasi daya *output* dari unit pembangkit dengan kekangan terpenuhinya beban sistem (Kanata & Pramono Hadi, n.d.). Widiatmoko

menerapkan metode *Metode Monte Carlo* untuk menyelesaikan masalah *economic dispart* dengan menghitung putaran maksimal satu mesin dan mengabaikan rugi-rugi pembangkit (Widiatmoko, 2021).

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian yang berjudul Penerapan Algoritma *Dragonfly* Untuk Optimasi Penjadwalan Ekonomis Dan Emisi Pembangkit maka rumusan masalahnya yaitu:

1. Bagaimana cara penjadwalan pengoperasian sistem untuk efisiensi biaya produksi dan mengurangi emisi yang ditimbulkan oleh pembangkit Listrik?
2. Berapa prediksi pengurangan emisi pada pembangkit termal dan hidro?
3. Berapa Intensitas Emisi pada Pembangkit Termal pada saat beroperasi?
4. Bagaimana solusi untuk mengurangi emisi yang dihasilkan oleh pembangkit?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada Penelitian ini adalah perancang menentukan perangkat, alat, dan tempat pengaplikasian sebagai berikut:

1. Rancangan sistem beroperasi menggunakan *algoritma dragonfly* dan Matlab pengolah data untuk simulasi penjadwalan.
2. Data penjadwalan didapatkan dari PLTU Sudimoro Pacitan dan PLTA Ngebel Ponorogo pada Tabel 4.2.
3. Rancangan sistem diaplikasikan untuk simulasi penjadwalan guna meminimalisir biaya operasi dan emisi pembangkit listrik.
4. Emisi yang di hitung adalah gas CO<sub>2</sub> sesuai dengan persamaan pada tinjauan Pustaka dan nilai CH<sub>4</sub> didapatkan berdasarkan perhitungan matematis.
5. Optimalisasi biaya hanya memperhitungkan pembangkit termal dan PLTA difungsikan secara optimal.
6. Penelitian tidak memperhitungkan *Losses* pada jaringan dan menggunakan persamaan laju panas pada pembangkit termal yang disesuaikan dengan output guna mengurangi biaya produksi dan nilai emisi.

7. Besarnya nilai Metana didapatkan dari perhitungan matematis dan mengabaikan nilai laju metana yang dihasilkan oleh pengaruh tinggi rendahnya air pada reservoir.

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan Penelitian yang berjudul Penerapan Algoritma *Dragonfly* Untuk Optimasi Penjadwalan Ekonomis Dan Emisi Pembangkit yaitu:

1. Menghasilkan sistem penjadwalan untuk mengurangi biaya produksi dan emisi pembangkit listrik dengan melakukan koordinasi pembangkit hidro dan pembangkit termal menggunakan Algoritma *Dragonfly*.
2. Memprediksi besar pengurangan emisi (ton CO<sub>2</sub>e) pada pembangkit termal.
3. Memprediksi perkiraan pengurangan emisi (ton CO<sub>2</sub>e) pada reservoir pembangkit Hidro.
4. Menghasilkan sistem penjadwalan dengan optimasi pembangkit hidrotermal dalam sistem tenaga modern menggunakan Algoritma *Dragonfly* untuk mengurangi emisi yang disebabkan oleh pembangkit hidrotermal.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat Penelitian yang berjudul Penerapan Algoritma *Dragonfly* Untuk Optimasi Penjadwalan Ekonomis Dan Emisi Pembangkit yaitu:

1. Mengatasi permasalahan sistem tenaga listrik dengan memperhatikan sektor lingkungan.
2. Algoritma *Dragonfly* dapat digunakan sebagai salah satu metode untuk optimasi pembangkit dan prediksi pengurangan emisi gas rumah kaca pembangkit hidrotermal.
3. Sebagai pengembangan sistem penjadwalan untuk mewujudkan sistem tenaga listrik ideal dengan memperhatikan biaya produksi dan kerusakan lingkungan.

## 1.6 Keaslian Penelitian

Keaslian penelitian ini berdasarkan penelitian sebelumnya yaitu penelitian yang dilakukan oleh:

1. Optimalisasi Operasi Ekonomis PLTMG pada Kawasan Industri dengan Metode *Monte Carlo*. Penelitian ini menjelaskan bahwa perlu adanya penurunan emisi gas rumah kaca pada pembangkit listrik termal karena hal itu sangat berbahaya terhadap lingkungan. Metode Monte Carlo digunakan sebagai perhitungan Statistik untuk memperkirakan perhitungan integral dan optimalisasi dengan sample acak dengan memperhtungkan putaran minimal sebesar kapasitas satu mesin dan tidak memperhitungkan rugi-rugi pembangkit (Widiatmoko, 2021).
2. Optimasi Economic Dispatch Pada Unit Pembangkit Pltu Tanjung Jati B Menggunakan *Metode Sine Cosine Algorithm*. Yulianto menerangkan bahwa *Sine Cosine Algorithm* (SCA) diusulkan sebagai metode penjadwalan ekonomis pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Tanjung Jati B. Untuk melihat performa dari simulasi metode SCA maka metode ini dibandingkan dengan metode Lagrange Multiplier. Hasil simulasi optimasi metode SCA menunjukkan performa yang baik. Hasil simulasi identik dengan metode *Lagrange Multiplier*, sedangkan dalam perbandingan biaya operasi, optimasi metode SCA lebih hemat dibandingkan dengan biaya operasi pembebanan PLTU Tanjung Jati B (Yulianto & Winardi, n.d., 2017).
3. *Modified Improved Particle Swarm Optimization (MIPSO)* Sebagai Solusi *Economic Dispatch* Pada Sistem Kelistrikan 500 kV Jawa-Bali. Kanata menjelaskan metode *Modified Improved Particle Swarm Optimization* (MIPSO) dengan pendekatan *Contraction Factor Based Particle Swarm Optimization* (CFBPSO) Kemudian metode pendekatan ini diterapkan dalam 2 kasus sistem tenaga yaitu pada kasus IEEE 30 bus pada pembebanan 800 MW dan sistem interkoneksi 500 kV Jawa-Bali dengan pembebanan puncak 12058 MW. Dari hasil simulasi IEEE 30 bus, metode MIPSO dengan pendekatan CFBPSO mampu menghasilkan solusi paling optimal ekonomi dibanding metode pendekatan MPSO dan Quadratic

Programming. Untuk kasus sistem interkoneksi 500 kV Jawa-Bali, metode MIPSO dengan pendekatan ini juga mampu memberikan solusi paling optimal dibanding dengan sistem real PT. PLN (Persero) (Kanata & Pramono Hadi, n.d., 2017).

4. Penjadwalan Ekonomis dan Emisi Pembangkit Listrik Hidro dan Termal dalam Sistem 150 KV di Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah menggunakan Algoritma Dragonfly. Pada penelitian Wibowo menjelaskan bahwa optimasi penjadwalan menggunakan Algoritma Dragonfly dapat digunakan untuk menekan biaya operasi pembangkit termal namun mengabaikan nilai emisi dan tidak menggunakan rumus matematis untuk menghitung nilai emisi (Wibowo et al., 2021).
5. Penerapan Dragonfly Optimization Algorithm (Doa) Pada Permasalahan Multiple Constraints Bounded Knapsack (Studi Kasus: Kerajinan Bambu Hitam Desa Pujerbaru Kecamatan Maesan Kabupaten Bondowoso). Nilasari pada penelitian ini menjelaskan penggunaan Algoritma Dragonfly untuk menyelesaikan permasalahan pada Kerajinan Bambu (Febriana Nilasari et al., 2019).

Penelitian 1 sampai 5 telah berhasil menggunakan Algoritma Dragonfly sebagai algoritma pengambil keputusan untuk optimasi dan menyelesaikan masalah economic dispart. Namun, pada penelitian 1-5 belum menyelesaikan masalah emisi yang dihasilkan pembangkit hidrotermal sehingga pada penelitian ini selain membahas economic dispart juga menjelaskan cara penurunan emisi pada pembangkit hidrotermal.

### **1.7 Sistematika Penelitian**

Sistematika pada penelitian ini terdiri dari Halaman judul yang memuat tentang judul penelitian, penulis, dan tahun penelitian. Bab I terdiri dari Latar Belakang, Rumusan Masalah, Tujuan, Manfaat, Keaslian Penelitian, dan Sistematika penelitian. Bab II Berisi tentang Penelitian Sebelumnya dan Teori Dasar Atau Kajian Pustaka. Serta Bab III berisi tentang model penelitian, alat dan bahan, Prosedur Penelitian, metode penelitian, Software dan Hardware, alur

penelitian, dan jadwal penelitian. Bab IV berisi Hasil Penelitian dan Pembahasan. Bab V berisi Kesimpulan dan Saran.

Data yang digunakan untuk penelitian adalah data debit air, data daya yang dihasilkan pembangkit, dan emisi gas. Dengan hasil simulasi penjadwalkan akan diolah dengan Matlab.



## BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

### 2.1 Penelitian Sebelumnya

1. Penjadwalan Ekonomis dan Emisi Pembangkit Listrik Hidro dan Termal dalam Sistem 150 KV di Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah menggunakan Algoritma Dragonfly Penelitian ini menjadi salah satu landasan teori dalam penerapan Algoritma Dragonfly dalam penjadwalan ekonomis untuk mengurangi biaya bahan bakar pembangkit termal dan emisi pembangkit termal. Namun pada penelitian ini tidak menjelaskan mengenai emisi yang dihasilkan pada reservoir pembangkit hidro (Wibowo et al., 2021).
2. Optimasi Penjadwalan Pada Pembangkit di Jaringan 500 Kv Jawa-Bali Untuk Mengurangi Emisi CO<sub>2</sub> Menggunakan Matpower 5.0 Hasil penelitian ini digunakan penulis sebagai landasan hasil optimasi penjadwalan pada pembangkit (Sutanto et al., n.d., 2017).
3. Pengaruh Kedalaman Sedimen Terhadap Emisi Gas Metana (CH<sub>4</sub>) di Situ Kuru Hasil penelitian ini digunakan sebagai landasan teori sedimen perairan diperkirakan memiliki kandungan Gas Metana (CH<sub>4</sub>) pada daerah situ atau danau kecil yang disebabkan oleh dekomposisi mikroorganisme (Andini et al., 2022a).
4. Methane emissions from three tropical hydroelectrical reservoirs Buku ini digunakan sebagai sumber landasan teori reservoir PLTA mengandung metana dan salah satu sumber Gas Rumah Kaca (GRK) (Hällqvist, n.d.2012).
5. Laporan Akhir Penelitian Kualitas Lingkungan Keairan pada Badan Air. Kementerian Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang. Pada penelitian ini digunakan sebagai landasan teori tentang sebab dan sumber gas metana pada waduk. (PUPR., 2014).
6. *Methane Emissions as Energy Reservoir: Context, Scope, Causes and Mitigation Strategies*. Teori pada buku ini digunakan sebagai dasar teori gas metana lebih berbahaya daripada karbondioksida (CO<sub>2</sub>) terhadap lingkungan (Chai et al., n.d., 2016).

7. Metodologi Penghitungan Reduksi Emisi Dan/Atau Peningkatan Serapan GRK. Teori yang dituliskan dalam buku ini digunakan sebagai landasan besarnya perhitungan perkiraan besarnya gas metana (Direktorat Teknik dan Lingkungan Ketenagalistrikan. 2020, n.d.).
8. Dragonfly Algorithm: A New Meta-Heuristic Optimization Technique for Solving Single-Objective, Discrete, and Multi-Objective Problems. Neural Computing and Applications. penelitian ini digunakan sebagai referensi angka pembobotan yang digunakan dalam optimasi pejadwalan (Khaleel & Mitras., 2020).

## 2.2 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang berfungsi untuk membangkitkan, mentransmisikan, dan mendistribusikan energi listrik dari pusat pembangkit sampai konsumen. Prinsip kerja Sistem Tenaga Listrik mulai dari Pembangkit sampai ke konsumen terdapat pada Gambar 2.1 (Marsudi., 2011).



Gambar 2.1. Sistem Tenaga Listrik (Suripto & Eng, 2017)

Menurut Crawford, D.M., and Holt, S.B. (1975) jika masing-masing sistem bekerja secara sendiri-sendiri dan tidak saling tersambung, setiap pusat tenaga listrik dapat beroperasi dengan masing-masing frekuensinya dan gangguan pada salah satu sistem tidak akan mempengaruhi sistem yang lainnya. Namun, akan lebih baik melakukan sistem interkoneksi karena sistem interkoneksi memiliki 3 keuntungan yaitu meningkatkan stabilitas secara menyeluruh, memberikan kontinuitas yang lebih baik dan lebih ekonomis.

Selain itu sistem interkoneksi tenaga listrik memiliki daya cadangan lebih besar. Suatu sistem yang besar akan lebih mampu untuk meredam suatu gangguan besar dan lebih stabil. Jika salah sistem tenaga listrik mengalami gangguan atau dalam proses pemeliharaan, beban dapat di pikul oleh sistem tenaga listrik lainnya. Dalam wilayah yang terhubung dengan sistem interkoneksi, beban keseluruhan dapat dipikul bersama sehingga biaya operasi secara keseluruhan lebih efisien.

### 2.3 Karakteristik Unit Pembangkit

Secara umum jenis - jenis posisi pembangkit dalam sistem adalah pembangkit pemikul beban dasar (*base load*), pemikul beban menengah (*load follower*) dan pemikul beban puncak (*peaker*) (Syam. S. 2020).

#### - Karakteristik Input-output Pembangkit Hidro

Pembangkit Hidro adalah pembangkit yang menggunakan tenaga air untuk menghasilkan listrik. Karakteristik input-output dari pembangkit tenaga listrik hidro menggambarkan hubungan antara input ke penggerak mula (turbin) berupa jumlah air yang dialirkan diantara sudu-sudu turbin persamaan waktu dengan output daya dari generator. Daya output generator sebagai fungsi dari tinggi terjun dan debit air, sehingga dapat dinyatakan dalam bentuk fungsi persamaan (2.1).

$$P_i = 9,8 \times Q_i \times h \times \eta_T \times \eta_G \quad (2.1)$$

dengan:  $P_i$  = Output Pembangkit (MW)

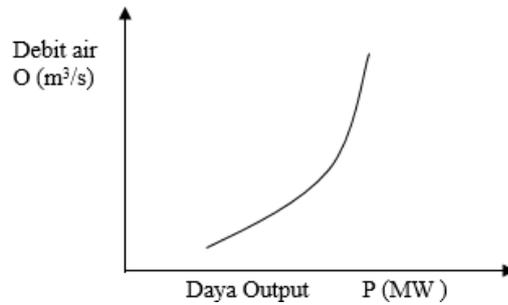
$Q_i$  = Debit air rata-rata ( $m^3/s$ )

$h$  = tinggi efektif air (m)

$\eta_T$  = Efisiensi Turbin

$\eta_G$  = Efisiensi Generator

Jika ketinggian konstan, maka bentuk karakteristik tersebut dapat digambarkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Karakteristik input output dengan ketinggian konstan.

Karena tinggi air terjun dianggap konstan maka besar debit air sebagai fungsi daya output pembangkit dapat dinyatakan dalam persamaan (2.2) polinomial orde 2:

$$Q_i = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (2.2)$$

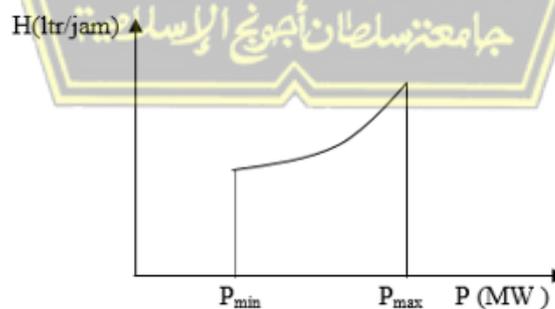
dengan:  $Q_i$  = debit air rata-rata (m<sup>3</sup>/s)

$P_{hi}$  = Ouput Pembangkit (MW)

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  = Konstanta input output unit ke i

- Karakteristik Input-Output Pembangkit Termal.

Pembangkit Termal adalah pembangkit listrik yang menghasilkan energi listrik dengan cara mengubah energi panas (termal) menjadi energi listrik yang diperoleh dari pembakaran bahan bakar seperti batu bara, gas alam, minyak bumi, atau dari reaksi nuklir. Karakteristik input output pembangkit termal adalah karakteristik yang menggambarkan hubungan antara input bahan bakar dan output yang dihasilkan pembangkit (MW) seperti yang ditunjukkan kurva pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Kurva Karakteristik input output Pembangkit Termal.

Pendekatan pembangkit termal dapat dilakukan dengan menggunakan fungsi polinomial orde dua pada persamaan (2.3).

$$H_i = \alpha_i + \beta_i P_{ii} + \gamma_i P_{ii}^2 \quad (2.3)$$

dengan:

- $H_i$  : input bahan bakar pembangkit termal ke I (liter/jam)  
 $P_{ii}$  : Output Pembangkit termal ke I (MW)  
 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  : Konstanta input output unit termal ke i.

## 2.4 Optimasi Pembangkit Listrik

Pembagian beban pembangkit dalam suatu operasi sistem tenaga listrik merupakan hal yang penting untuk mencapai suatu operasi yang optimal. Diperlukan koordinasi dalam penjadwalan pembebanan besar daya listrik yang dibangkitkan masing-masing pusat pembangkit listrik, sehingga diperoleh biaya pembangkit yang minimum (Adya Pratama et al., 2016).

### 1. Penjadwalan Ekonomis (*Economic Dispatch*)

Penjadwalan ekonomis merupakan suatu usaha untuk menentukan besar daya yang harus disuplai dari tiap unit generator untuk memenuhi beban tertentu dengan cara membagi beban tersebut pada unit-unit pembangkit yang ada dalam sistem secara optimal ekonomis dengan tujuan meminimumkan biaya operasi pembangkitan (Prayogo NRP et al., n.d., 2016).

### 2. Penjadwalan Jangka Pendek Hidrotermal

Penjadwalan hidrotermal tujuan utamanya adalah untuk memenuhi permintaan sistem dan sekaligus perkiraan beban untuk jangka waktu beberapa jam sampai satu minggu dengan menyebarkan produksinya diantara pembangkit hidro dan pembangkit termal (Vieri, 2022).

## 2.5 Combined Economic and Emission Dispatch

*Combined Economic and Emission Dispatch* adalah optimalisasi dengan tujuan untuk memitigasi tingkat emisi dari semua unit pembangkit dan biaya yang dikeluarkan oleh unit operasi. Untuk mencari nilai *Combined Economic and Emission Dispatch* dapat menggunakan persamaan (2.4) (Nagarajan et al., 2022).

$$\text{Min Objective} = w1 \times F1 (P_{si,m}) + w2 \times P_{Rm} \times F2 (P_{si,m}) \quad (2.4)$$

dengan:

$w1$  : *weight factor associate with fuel cost objective*

$w2$  : *weight factor associate with emission objective*

$F1$  : *fuel cost objective*

$F2$  : *Emission objective*

$P_{si,m}$  : *power output of hidro unit i at subinterval m*

$P_{Rm}$  : *price penalty factor during subinterval m*

Pada penelitian ini Emisi pembangkit akan dihitung berdasarkan data menggunakan persamaan (2.5) hingga persamaan (2.7)

- Energi listrik yang dibangkitkan = kapasitas  $\times$  waktu operasi (2.5)

- Energi bahan bakar =  $\frac{\text{Energi listrik yang dibangkitkan}}{\text{Efisiensi Thermal}}$  (2.6)

- Konsumsi Bahan Bakar =  $\frac{\text{Energi Bahan Bakar}}{\text{Net Caloric Value}}$

- Emisi CO<sub>2</sub> = Konsumsi Bahan Bakar  $\times$  %C bahan bakar  $\times \frac{44}{12}$  (2.7)

Atau dapat menggunakan persamaan (2.8)

- Emisi CO<sub>2</sub> =  $\frac{\text{daya} \times \text{waktu operasi} \times \text{faktor emisi CO}_2}{\text{Efisiensi Pembangkit}}$  (2.8)

Keterangan:

Dalam menghitung emisi PLTU perlu dikemukakan berbagai asumsi antara lain:

- Batubara yang digunakan adalah batubara yang memiliki kalori sedang (batubara bituminous) dengan 66,6% carbon (Pasa. Faris. Alfaroby.,2023)
- Efisiensi thermis (30%-33,4%), dalam perhitungan penelitian ini diambil 33%.
- Faktor kapasitas 80%
- Faktor Emisi CO<sub>2</sub> PLTU 0,8.
- *Net Caloric Value* batubara bituminous (sedang) sebesar 7,2 kWh/kg. NCV untuk batubara bituminous (sedang) adalah sebesar 25,8 Tjoule/kTon atau 7,2 kWh/kg. (Ardiansyah. Faiz.2024).

Selain perhitungan besar emisi pada penelitian ini menghitung batas Intensitas Emisi CO<sub>2</sub> PLTU yang telah ditetapkan oleh pemerintah Indonesia. Batas emisi PLTU mengacu pada jumlah emisi yang dihasilkan oleh per unit energi listrik yang dihasilkan yang dinyatakan dalam satuan gram CO<sub>2</sub> per kilowatt-hour dengan persamaan (2.9). Intensitas Emisi digunakan sebagai indikator efisiensi dan dampak lingkungan dari pembangkit. Di Indonesia Batas Intensitas emisi PLTU diatur oleh Permen LHK No.15 Tahun 2019.

Selain itu pemerintah telah menetapkan target penurunan emisi Gas Rumah Kaca melalui Nationally Determined Contribution (NDC) dalam Perjanjian Paris. Intensitas Emisi PLTU Batubara di Indonesia berkisar 800-1050 gCO<sub>2</sub>/kWh (*Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan. 2019. Peraturan Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia No. 15 Tahun 2019. Tentang Baku Mutu Dan Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal., n.d.*) dan Batasan Emisi CO<sub>2</sub> PLTU Batu Bara sebesar 0.918ton CO<sub>2</sub>/MWh (*Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan. 2021. Peraturan Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia No. 13 Tahun 2021. Tentang Sistem Informasi Pemantauan Emisi Industri Secara Terus Menerus., n.d.*). tergantung pada efisiensi pembangkit dan kualitas jenis Batubara yang digunakan. Perhitungan besarnya Intensitas Emisi menggunakan persamaan (2.9) (Firmansyah et al., n.d.) .

$$\text{Intensitas Emisi} = \frac{\text{Total Emisi CO}_2 \text{ (kg)}}{\text{Energi yang dihasilkan (kWh)}} \quad (2.9)$$

## 2.6 Dragonfly Algoritma

Tujuan utama dari algoritma Dragonfly pengambil keputusan dimulai dengan statis sebagai titik awal dan kerumunan energik perilaku *Dragonfly* (Vieri. 2022. (N.D.)). Kedua perilaku mengerumuni itu terlihat serupa di kedua tahap utama dalam pengoptimalan melalui meta algoritma heuristik, yaitu investigasi dan pemanfaatan. Perilaku ini diwakili oleh model matematika berikut menggunakan persamaan (2.10) hingga persamaan (2.14) (Ehteram. M., 2023).

1. Perilaku Pemisahan:

$$S_i = \sum_{j=1}^n X - X_j \quad (2.10)$$

2. Perilaku menjaga penerbangan terkoordinasi dengan kelompok *Dragonfly*:

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^n V_j}{N} \quad (2.11)$$

3. Perilaku mendekat satu sama lain untuk setiap individu (Kohesi):

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{N} - X \quad (2.12)$$

4. Perilaku mencari makan:

$$F_i = X^+ - X \quad (2.13)$$

5. Perilaku menghindari musuh:

$$E_i = X + X \quad (2.14)$$

Keterangan:

$j$  : Nama Klasifikasi.

$N$  : Jumlah kelas klasifikasi.

$X, X_j$  : Posisi Grup dalam mempertahankan posisi.

$V_j$  : Kecepatan kelompok individu.

$X^+$  : Posisi *Dragonfly* dalam skor maksimal.

$X^-$  : Posisi *Dragonfly* skor minimal dengan posisi sebenarnya.

Menentukan Titik *Himmelblau*

Titik *Himmelblau* merupakan titik fungsi matematika untuk menentukan nilai maksimum dan minimum suatu fungsi dalam konteks optimalisasi. Nilai fungsi maksimal atau fungsi *Himmelblau* atau dikenal sebagai salah satu fungsi benchmark. fungsi dalam optimasi menggunakan persamaan (2.15).

$$F(x, y) = (x^2 + y - 11)^2 + (x + y^2 - 7)^2 \quad (2.15)$$

Keterangan:

$x, y$  : Menentukan Posisi

$-2$  hingga  $2$  : fungsi *Himmelblau* mengembalikan nilai maksimal.

## 2.7 Emisi Gas Metana pada Waduk

Biogas merupakan salah satu jenis bioenergi yang didefinisikan sebagai gas yang dilepaskan jika bahan-bahan organik seperti kotoran ternak, kotoran manusia jerami, sekam dan daun-daun hasil sortiran sayur difermentasi atau mengalami proses metanisasi. Prinsip pembentukan biogas adalah adanya

dekomposisi organik secara anaerobik untuk menghasilkan gas yang sebagian besar adalah berupa gas metan dan karbon dioksida, gas inilah yang disebut biogas. Menurut Pujiati pada buku Produksi Biogas Berbasis Biomassa Gas yang terkandung di dalam biogas yaitu gas metana ( $\text{CH}_4$ ) sebesar 50-75%, gas  $\text{CO}_2$  sebesar 25-45%, dan gas lainnya (Pujiati., 2020). Metana adalah salah satu komponen utama gas alam sebagai sumber bahan bakar. Metana merupakan hidrokarbon yang memiliki bentuk paling sederhana yang berbentuk gas dengan rumus kimia  $\text{CH}_4$ . Metana adalah salah satu gas rumah kaca yang dinyatakan dalam fraksi mol yaitu 1.745 nmol/mol bagian per miliar (NOAA., 2023).

Menurut Laporan Akhir Penelitian Kualitas Lingkungan Keairan Pada Badan Air Sumber gas metana terbagi menjadi 2 yaitu sumber alamiah dan kegiatan manusia. Sumber alamiah antara lain berasal dari lahan basah, emisi geologis, danau, dan tumbuh-tumbuhan. Sedangkan metana yang bersumber akibat kegiatan manusia berasal dari waduk, kegiatan penambangan, pemakaian bahan bakar fosil, kegiatan peternakan dan pertanian, serta tempat pembuangan sampah (Pusat Penelitian Dan Pengembangan Sumber Daya Air. 2014. Laporan Akhir Penelitian Kualitas Lingkungan Keairan Pada Badan Air).

Penelitian yang dilakukan oleh Andini menjelaskan bahwa Waduk merupakan salah satu sumber gas metana yang terbentuk didasar waduk akibat aktivitas mikroorganisme methanogens dalam kondisi anaerobic (Andini et al., 2022a). Pembentukan gas metana pada waduk dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu: kondisi lahan sebelum diairi, kondisi kualitas air waduk, dan kondisi waduk. Jika bakal waduk sebelum diairi mengandung banyak bahan organik didalam tanah atau berupa tanaman, maka potensi terbentuknya gas metana akan lebih besar jika dibandingkan dengan lahan yang mengandung bahan organik dengan jumlah yang sedikit. Selain itu kualitas air yang mengandung bahan organik dan kadar oksigen kecil memungkinkan terbentuk gas metana.

Berdasarkan buku Laporan Akhir Penelitian Kualitas Lingkungan Keairan Pada Badan Air Sumber emisi gas metana pada waduk adalah pada air dan dasar waduk. Air waduk menghasilkan gas metana karena mengandung bahan anorganik dan bahan organik sebagai sumber terbentuknya gas metana. Selain itu potensi terbentuknya gas metana dari dasar waduk lebih besar daripada

potensi air waduk di sebabkan pada dasar waduk terdapat bahan organik yang lebih banyak dibanding yang terdapat dalam air waduk. Bahan organik pada waduk berasal dari tanaman dan tumbuhan yang terendam saat penggenangan waduk dan kadar oksigen dasar waduk lebih sedikit dibanding bagian atas waduk sehingga memungkinkan gas metana yang terbentuk lebih besar.

Metode perhitungan Gas Metana pada waduk atau reservoir PLTA berdasarkan Metodologi Penghitungan Reduksi Emisi Dan/Atau Peningkatan Serapan GRK berdasarkan buku Metodologi Penghitungan Reduksi Emisi Dan/Atau Peningkatan Serapan GRK (Direktorat Teknik dan Lingkungan Ketenagalistrikan., 2020.). Perhitungan Emisi CO<sub>2</sub> kegiatan waduk air dengan persamaan (2.16) (LR. Widyastuti. 2018).

$$PE_{HP,y} = \frac{EF_{Res} \times TEG_y}{1000} \quad (2.16)$$

Untuk menghitung nilai Konversi CO<sub>2</sub>e ke CH<sub>4</sub> menggunakan persamaan (2.17).

$$Emisi_{CH_4} = \frac{Emisi_{CO_2e}}{GWP_{CH_4}} \quad (2.17)$$

Untuk menghitung nilai ekuivalen CO<sub>2</sub>e menggunakan persamaan (2.18)

$$\begin{aligned} CO_{2e} &= Emisi_{CH_4} \times GWP_{CH_4} \\ Total\ CO_{2e} &= CO_2 + (CH_4 \times GWP_{CH_4}) \end{aligned} \quad (2.18)$$

LR. Widyastuti menerangkan bahwa 1 CH<sub>4</sub> setara dengan 28 CO<sub>2</sub> atau *Global Warming Potential* dan 1 kWh listrik dari PLTU menghasilkan sekitar 623,28 gCO<sub>2</sub>/kWh. Rumus matematis yang menggambarkan pengaruh tinggi rendahnya air reservoir dipengaruhi oleh beberapa faktor biologis dan fisik terutama pada waduk, bendungan, dan reservoir. Salah satu pendekatan menggunakan model empiris atau semi empiris. Untuk mencari nilai metana dengan memperhatikan Luas Permukaan dan kedalaman atau tinggi air menggunakan persamaan (2.19).

$$F_{CH_4} = k \cdot A \cdot e^{\alpha \cdot H} \quad (2.19)$$

Keterangan:

PE<sub>HP,y</sub> : Emisi kegiatan waduk air (ton CO<sub>2</sub>e/tahun).

EF<sub>Res</sub> : Faktor emisi (default) untuk emisi dari PLTA dengan waduk (90 kg CO<sub>2</sub>e/kWh).

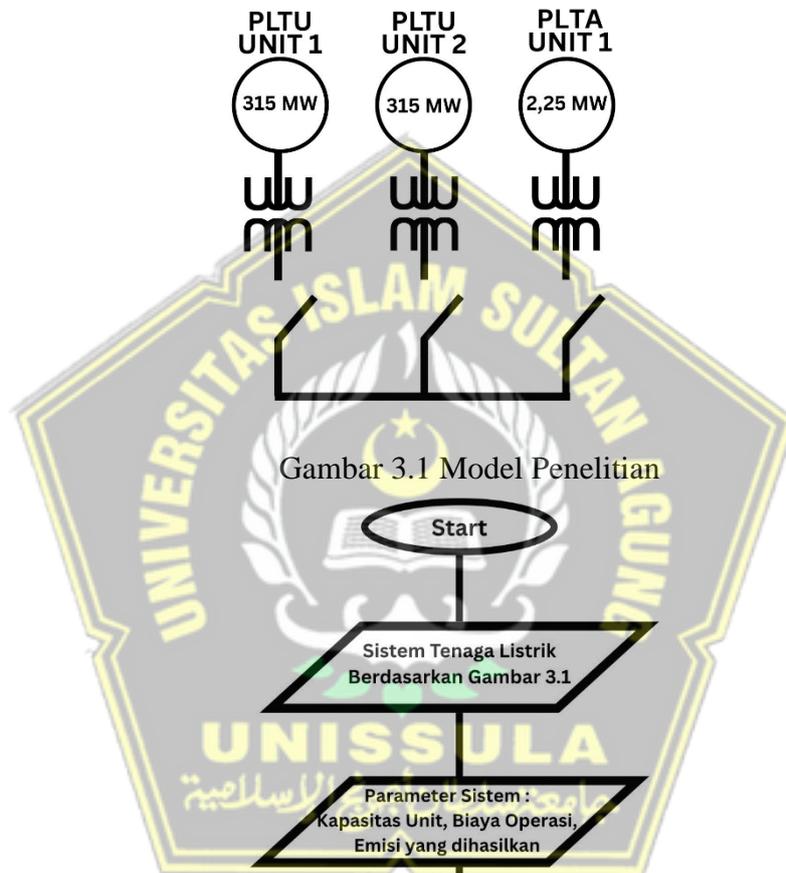
- TEG<sub>y</sub> : Total produksi listrik (bruto) PLTA dengan waduk (kWh).
- GWP CH<sub>4</sub> : Global Warming Potential (1 CH<sub>4</sub> setara dengan 28 CO<sub>2</sub>).
- F<sub>CH<sub>4</sub></sub> : Laju Emisi Metana (misalnya dalam mg CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/hari)
- k : konstanta yang tergantung pada kondisi biologis waduk atau reservoir berkisar 0.01-1.5 mg/m<sup>2</sup>/hari.
- α : koefisien yang menggambarkan sensitivitas produksi metana terhadap tinggi air sekitar 0.05-0.15/m.
- A : Luas Permukaan Reservoir.
- H : kedalaman atau tinggi air.



### BAB III METODE PENELITIAN

#### 3.1 Model Penelitian

Berikut desain model penelitian yang digunakan pada Penelitian Penerapan Algoritma *Dragonfly* Untuk Optimasi Penjadwalan Ekonomis Dan Emisi Pembangkit pada Gambar 3.1.



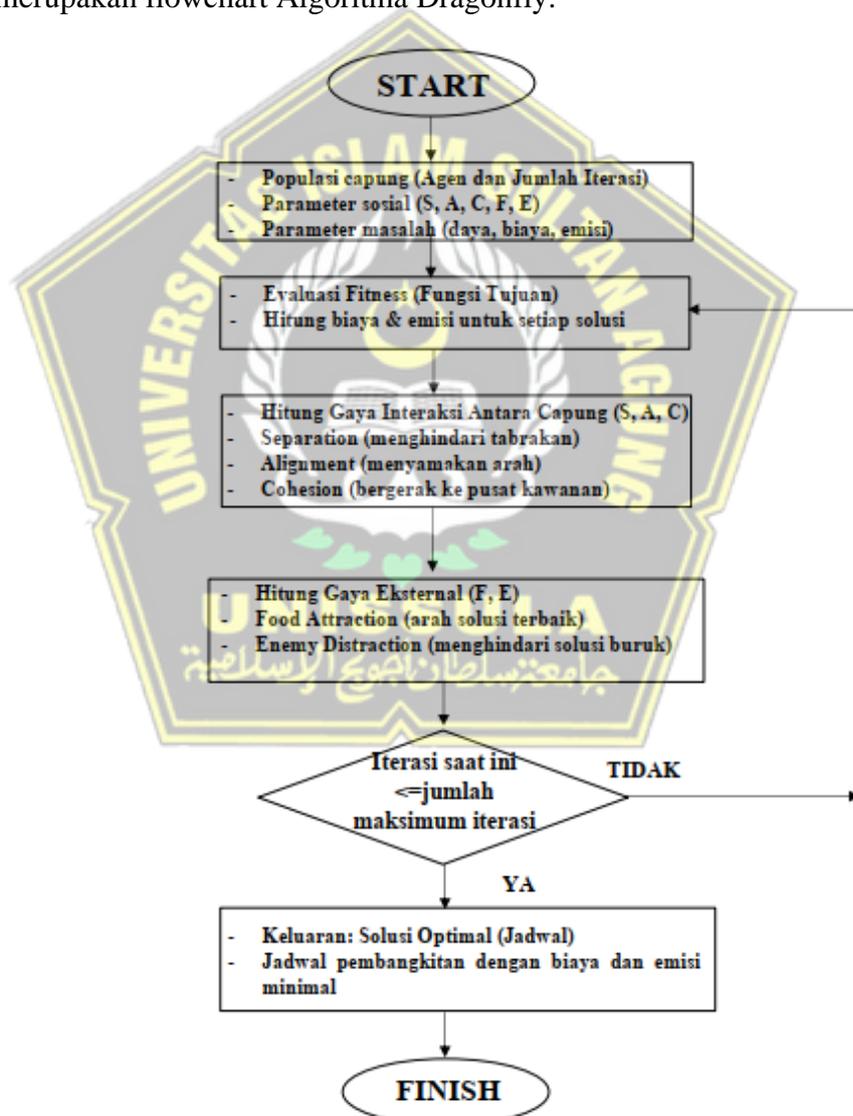
Gambar 3.1 Model Penelitian



Gambar 3.2 Flowchart Penelitian

Gambar 3.2 merupakan Gambar Flowchart Penelitian dengan penjelasan sebagai berikut.

1. Pembangkit Hidro dan Pembangkit Termal merupakan sumber pembangkitan dan masing-masing memiliki karakteristik seperti biaya, emisi, dan batas daya.
2. Parameter Sistem merupakan informasi tentang unit pembangkit seperti Daya, Data Emisi Pembangkit, dan Kurva Efisiensi.
3. Algoritma Dragonfly digunakan untuk menyeimbangkan biaya dan emisi serta mencari jadwal optimal untuk pengoperasian unit. Pada Gambar 3.2 merupakan flowchart Algoritma Dragonfly.



Gambar 3.3 Flowchart Algoritma Dragonfly.

4. Fungsi Tujuan yaitu meminimalkan biaya total operasi dan meminimalkan emisi yang dihasilkan oleh pembangkit.
5. Jadwal Optimasi merupakan Output berupa jadwal operasi setiap unit pembangkit dalam periode tertentu biasanya dalam kurun waktu 24 jam.
6. Evaluasi Hasil Ekonomi dan Emisi merupakan validasi data apakah Optimasi Penjadwalan menggunakan Algoritma Dragonfly dapat mengurangi biaya dan emisi dibandingkan metode konvensional yang lain seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO).

### **3.2 Alat dan Bahan**

Berikut adalah alat bahan yang digunakan dalam makalah yang berjudul Penerapan Algoritma Dragonfly Untuk Optimasi Penjadwalan Ekonomis Dan Emisi Pembangkit. Alat yang digunakan Matlab yang digunakan untuk membuat simulasi program penjadwalan Ekonomis dan Emisi Pembangkit. Bahan yang digunakan pada makalah ini adalah data debit air, volume reservoir, dan emisi gas.

### **3.3 Metode Penelitian**

Metode penelitian yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian kuantitatif. Metode penelitian ini digunakan untuk mengumpulkan data yang diperoleh dari suatu pengukuran pada pembangkit dan penulis membuat suatu program untuk melakukan perhitungan biaya produksi dan emisi yang dihasilkan pembangkit. Penulis menggunakan Software Matlab dan Algoritma Dragonfly sebagai pengambil keputusan dalam melakukan perhitungan untuk mendapatkan besar biaya produksi dan emisi yang dihasilkan pembangkit.

### **3.4 Software dan Hardware yang Digunakan**

Pada penelitian ini data yang diolah adalah data data debit air, volume reservoir, dan emisi gas yang diolah dengan Dragonfly Algoritma atau Algoritma perilaku *Dragonfly* dan pembuatan simulasi jadwal menggunakan Matlab.

### 3.5 Metode Pengambilan Data

Pengambilan data yang digunakan sebagai data simulasi penjadwalan dilakukan pada Sistem Kelistrikan pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap Sudimoro Kabupaten Pacitan dan Pembangkit Listrik Tenaga Air Ngebel Kabupaten Ponorogo Jawa Timur.

### 3.6 Proses Simulasi Program Matlab Code

Pada penelitian ini pengolahan data dilakukan menggunakan Matlab 2021a untuk selanjutnya akan di analisis serta penarikan kesimpulan hasil penelitian. Pemrograman Matlab akan dilakukan menggunakan beberapa fungsi objektif yang akan diinputkan pada *source code* Matlab untuk simulasi. Fungsi objektif yang akan diinputkan sebagai berikut.

- 1) Menentukan Titik *Himmelblau*  
nilai fungsi maksimal atau fungsi *Himmelblau* atau dikenal sebagai salah satu fungsi benchmark. fungsi dalam optimasi, dengan rumus matematis pada persamaan (2.10).
- 2) Penentuan Biaya Pembangkitan  
Total biaya pembangkitan dihitung berdasarkan 2 jenis biaya yaitu biaya operasional pembangkit dan biaya pembangkit berdasarkan emisi.
- 3) Daya dari PLTA  
Input daya PLTA.
- 4) Penentuan Besar Nilai Emisi

Dalam perhitungan faktor emisi CO<sub>2</sub> pembangkit listrik terdapat dua macam cara perhitungan jumlah emisi CO<sub>2</sub>, yaitu perhitungan berdasarkan reaksi stoikiometri dan neraca massa suatu proses dan cara ke dua berdasarkan faktor yang sudah tercatat dan faktor ini merupakan rasio yang digunakan untuk menghubungkan emisi terhadap pengukuran aktivitas suatu sumber emisi. Pada penelitian ini Emisi pembangkit akan dihitung berdasarkan data menggunakan fungsi objektif yang diinput pada *source code software* Matlab persamaan 2.5.

- 5) Hubungan Biaya Operasi Pembangkit dan Emisi

Persamaan yang digunakan untuk menentukan factor pinalti beban input dan hasil optimasi:

Total Pembangkitan < Data Load = biaya \* 500

Total pembangkitan > Data Load = biaya \* 500

Untuk menghasilkan keterkaitan antara biaya operasi pembangkit dengan emisi adalah dengan melakukan nilai pembobotan pada biaya operasi pembangkit  $W_1$  dan bobot emisi pembangkit  $W_2$ . Nilai faktor pembobotan dengan nilai 0 sampai 1. Jika faktor ekonomis biaya operasi pembangkit diutamakan maka nilai pembobotan  $W_1 = 1$  dan  $W_2 = 0$ . Dan jika nilai emisi diutamakan maka nilai pembobotan  $W_1 = 0$  dan  $W_2 = 1$ . Nilai pembobotan pada simulasi setiap kasus terdapat pada Tabel.

Tabel 3.1. Nilai Pembobotan kasus simulasi

Kasus	Bobot Biaya Pembangkit	Bobot Emisi Pembangkit
	$W_1$	$W_2$
1	1	0
2	0,25	0,75
3	0,5	0,5
4	0,75	0,25
5	0	1

Pada penelitian ini Pembobotan yang digunakan adalah rentang 0-1 yaitu 0, 0.25, 0.5, 0.75, dan 1.

Keterangan:

- 0** : Tidak ada pengaruh (mengabaikan *separation* jika fokus pada eksploitasi).
- 0.25 dan 0.75** : Memberikan pengaruh parsial untuk menyeimbangkan eksplorasi-eksploitasi.
- 0.5** : Titik netral (keseimbangan sempurna antara dua perilaku).
- 1** : Pengaruh maksimal (misalnya, memberi prioritas penuh pada *cohesion* untuk mencapai solusi global).

Penggunaan skala gradasi 0-1 pada penelitian ini karena skala gradasi yang simetris, kemudahan dalam tuning parameter dengan nilai diskrit seperti ini memudahkan analisis sensitivitas untuk menentukan kombinasi bobot terbaik tanpa kompleksitas berlebihan, Interpretasi mudah dengan nilai-nilai seperti 0.25 atau 0.75 lebih intuitif dibanding angka acak, dan Kompabilitas dengan Multi-Objective: Memungkinkan penyesuaian bobot untuk tiap tujuan misalnya biaya dan emisi. (Khaleel & Mitras, 2020).

Langkah-Langkah Simulasi sebagai berikut:

1. Inisialisasi desain pada GUI
2. Input nilai-nilai yg ada di edit text diantaranya:
  - Agent: Input dari tool menu
  - Jumlah Iterasi: Input dari tool menu
  - Beban: Data beban yang akan di inputkan pada simulasi
  - Debit: Input debit air untuk mendapatkan nilai daya untuk unit PLTA
3. Load data yang ada pada Data Pembangkit ialah Data pembangkit yang Data beban pembangkit termal dan pembangkit hidro, nilai konstanta (alpa, beta, gamma) yang didapat dari regresi polynomial orde 2 serta data efisien termal, kalori bahan bakar untuk menghitung emisi selanjutnya untuk menentukan Fungsi Biaya Pembangkit Termal dan Hidro serta Emisi.
4. Menginputkan nilai bobot W1 sebagai Bobot prioritas Ekonomi dan W2 sebagai Bobot Prioritas Emisi. Nilai pembobotan (W) memiliki nilai 0, 0.25, 0.5, 0.75, dan 1.
5. Menggabungkan jumlah variabel yg ada pada variabel thermal yaitu PLTU Sudimoro Pacitan terdiri dari 2 Unit dan Variabel Hidro yaitu PLTA Ngebel terdiri dari 1 Unit.
6. Inisialisasi variabel pembuatan grafik.
7. Inisialisasi variabel-variabel.  
 $\Delta_{max} = (ub-lb)/10$ . Delta max itu adalah range daya selisih antara batas atas daya dengan batas bawah daya. Dibagi 10 karena dikonversi satuannya.

Food\_fitness ialah nilai fitness yg paling minimal.

Enemy\_fitness ialah nilai fitness yg paling maksimal dengan catatan X berada pada range lb dan ub.

X = zeros (jumlahVariabel,jumlahAgent); merupakan posisi agent dalam algoritma dragonfly

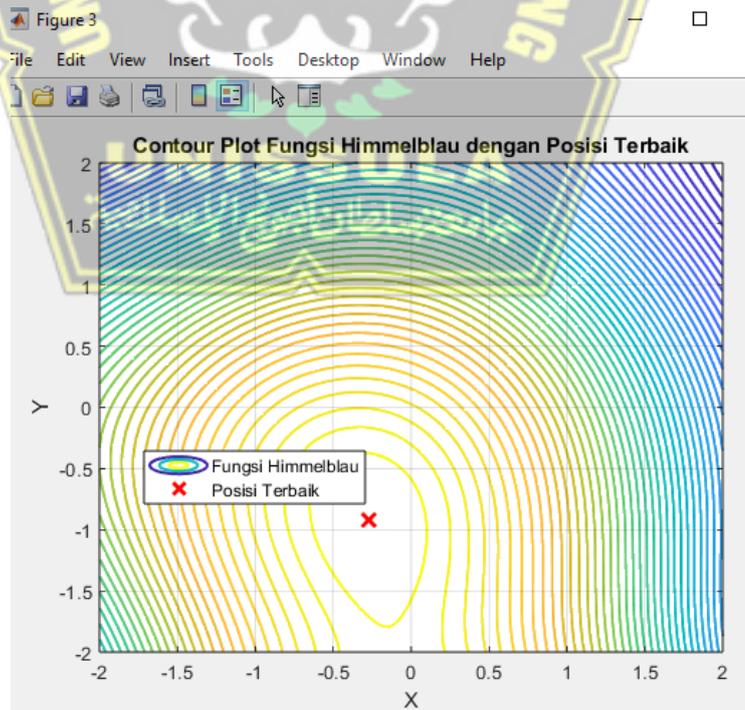
8. Mengenerate bilangan random pada X (posisi Agent) dan pada DeltaX.
9. Melakukan pengolahan data pada setiap iterasi
  - Inisialisasi perhitungan iterasi untuk lopping, lopping ialah pengecekan atau pengulangan proses di tiap iterasi.
  - Kalkulasi nilai objektif melakukan pengolahan data terhadap seluruh Agent dengan menghitung nilai Fitness menggunakan Fungsi Biaya. (Food\_fitness adalah nilai fitness yg paling minimal, Enemy\_fitness adalah nilai fitness yg paling maksimal dengan catatan X berada pada range lb dan ub.)
  - Solusi neighbouring ialah menghitung jarak setiap Agent yg sat dengan Agent lainnya serta mencari pasangan Agent yg jaraknya kurang dari  $r = (ub-lb)/4 + ((ub-lb) * (iter/jumlahIterasi) * 2$ .
10. Persamaan *dragonfly algorithm* (Pemisahan, koordinasi, pendekatan, mencari makan dan menghindari musuh) yang diperlukan untuk melakukan optimasi ekonomi dan emisi.
11. Pemisahan (S)= jika neighbours\_no>1 maka S merupakan akumulasi selisih jarak antara posisi Neighbours\_X dan X.
12. Koordinasi (A)= jika neighbours\_no>1 maka A adalah jumlah dari Neighbours\_DeltaX dibagi dengan neighbours\_no jika neighbours\_no <=1 maka A adalah DeltaX Pendekatan (C)= jika neighbours\_no>1 maka C\_temp adalah jumlah dari Neighbours\_X dibagi dengan neighbours\_no jika neighbours\_no <=1 maka C\_temp adalah X (posisi Agent. C merupakan selisih C\_temp dengan X (posisi Agent).
13. Mencari makan (F)= menghitung jarak antara X (posisi Agent) dengan Food\_pos jika jarak antara X dengan Food\_pos kurang dari r maka F adalah selisih Food\_pos dengan X jika lebih dari r maka F diset nol.

14. Menghindari musuh (E) = menghitung jarak antara X (posisi Agent) dengan Enemy\_pos jika jarak antara X dengan Enemy\_pos kurang dari r maka E adalah jumlah Enemy\_pos dengan X jika lebih dari r maka Enemy diset nol
15. Menghitung kembali nilai X berdasarkan nilai Flag4ub dan Flag4lb, batas atas (ub) dan batas bawah (lb) yg telah ditentukan pada PMax dan Pmin Variabel (PLTU).
16. Membaca nilai Total Biaya, Daya PLTU dan Grafik;
  - Best\_score ialah hasil Total Biaya Pembangkit PLTU dan PLTA dalam bentuk Rupiah.
  - Best\_post ialah Daya PLTU yang telah dioptimasi cg\_curve ialah Grafik yang terbaca untuk Best\_score dan iterasi.
17. Melakukan pengolahan data pada setiap iterasi untuk menampilkan grafik.
18. Menghitung nilai energi Bahan Bakar, konsumsi Bahan Bakar Termal, emisi CO<sub>2</sub> Thermal, dan total Emisi CO<sub>2</sub>.
19. Menampilkan Daya pada Unit PLTA yang merupakan hasil dari data debit air pembangkit m<sup>3</sup>/s.
20. Delta P atau selisih daya ialah pengurangan dari nilai beban yang telah di optimasi menggunakan algoritma dragonfly dengan data beban inputan.
21. Membaca nilai S atau menampilkan Best score berupa Total Biaya Pembangkit PLTU dan PLTA dalam bentuk rupiah dan Best pos berupa nilai Daya PLTU yang telah dioptimasi.
22. Selesai (Tombol tekan keluar apabila ingin menghentikan simulasi).

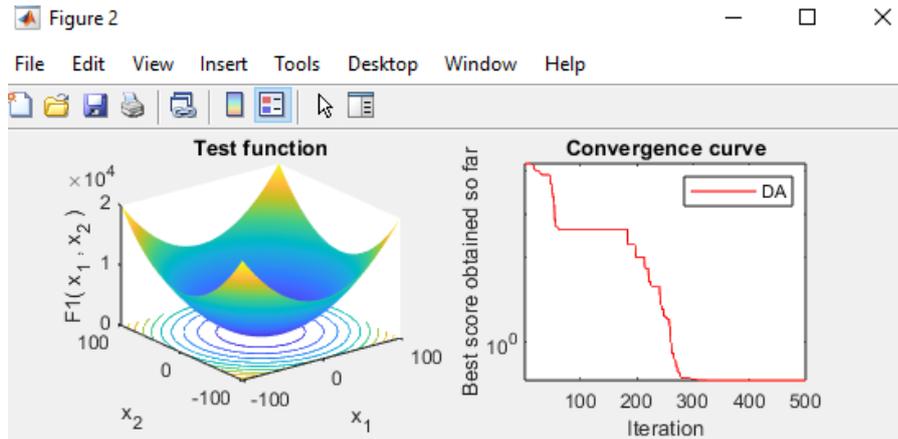
## BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### 4.1 HASIL PENELITIAN

Berdasarkan Model Penelitian pada Bab III Gambar 3.1 Optimasi Penjadwalan Pembangkit Hidrotermal menggunakan Algoritma Dragonfly bertujuan untuk meminimalkan biaya operasi dan nilai emisi pembangkit. Kapasitas Pembangkit Termal masing-masing 315 MW dan Pembangkit Hidro berkapasitas 2.25 MW. Sistem ini dirancang untuk menyuplai beban harian namun dapat meminimalkan biaya operasi dan nilai emisi pembangkit. Pembangkit Termal memiliki karakteristik biaya operasi tinggi dan menghasilkan emisi yang tinggi, sedangkan Pembangkit Hidro memiliki Biaya Operasi rendah dan emisi yang relative rendah namun kapasitasnya terbatas. Strategi penjadwalan adalah salah satu cara dengan menggunakan Algoritma Dragonfly untuk meminimalkan biaya operasi dan nilai emisi secara bersamaan. Berikut pada Gambar 4.1 dan 4.2 adalah bentuk fungsi Himmelblau penelitian ini pada matlab sebagai awal untuk melakukan optimasi penjadwalan menggunakan Algoritma Dragonfly.

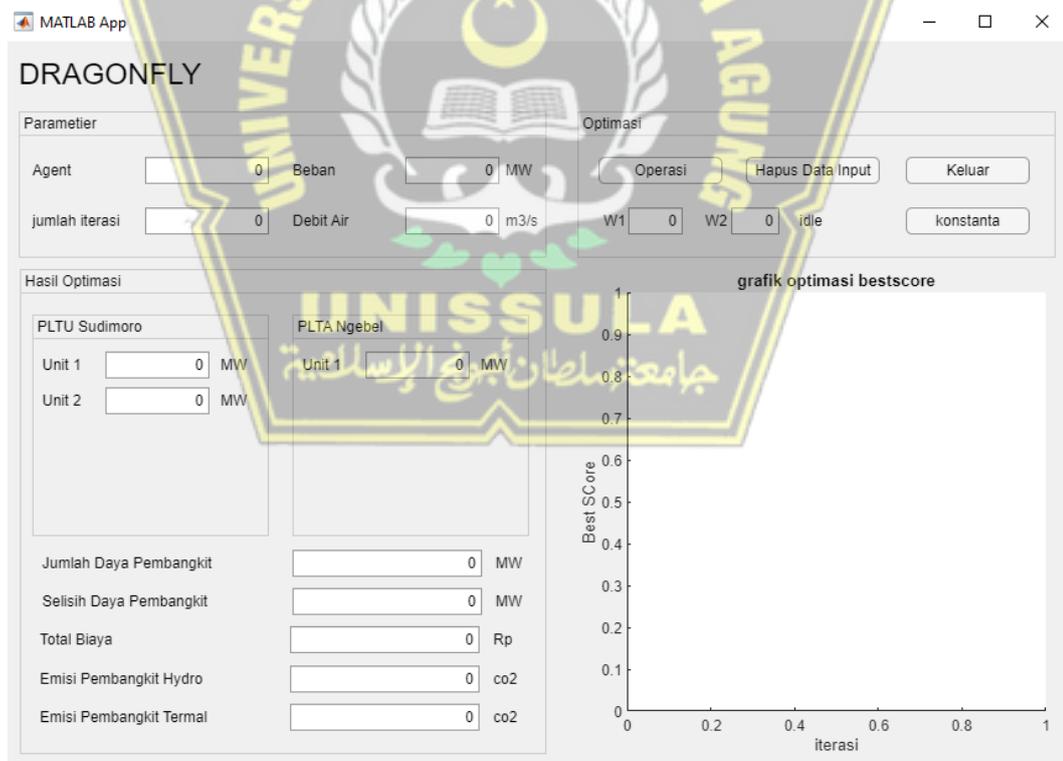


Gambar 4.1 Plot fungsi Himmelblau.



Gambar 4.2 Test Function

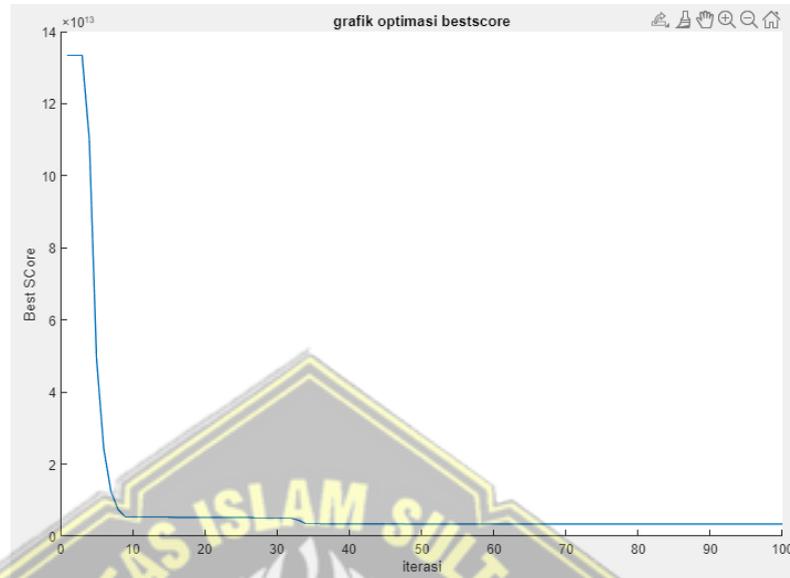
Analisis data pada penelitian ini menggunakan matlab 2021 dengan menggunakan Algoritma Dragonfly untuk menyelesaikan penjadwalan hidrotermal. Algoritma Dragonfly akan menentukan kombinasi pembangkitan unit hidro dan unit termal selama periode 7 x 24 jam untuk memenuhi pembebanan dan mendapatkan penurunan biaya produksi dan nilai emisi pembangkit.



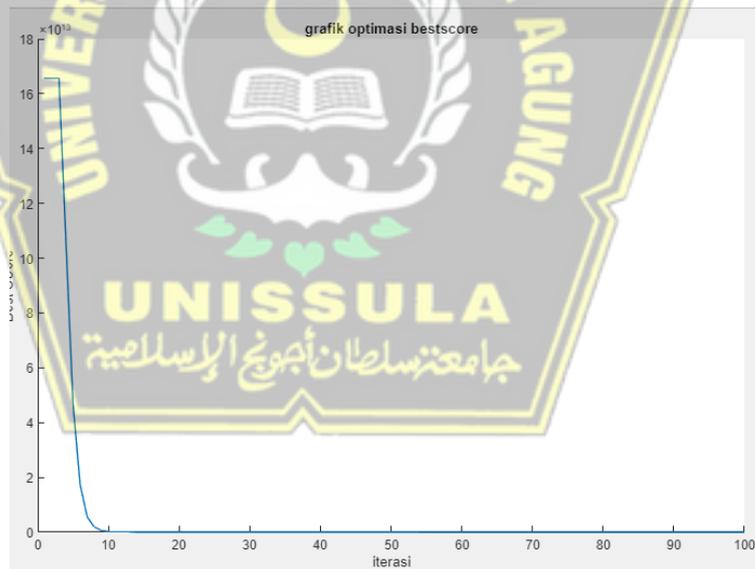
Gambar 4.3 GUI Algoritma Dragonfly pada Matlab

Pada Gambar 4.3 terdapat icon parameter jumlah agent, jumlah iterasi, beban, dan debit air sebagai input optimasi pada icon operasi pada hasil optimasi

daya PLTU unit 1 dan unit 2 serta daya PLTA unit 1 menggunakan algoritma Dragonfly. Nilai optimasi dari input parameter dan hasil dari optimasi adalah total biaya, emisi, dan grafik yang menunjukkan nilai iterasi.



Gambar 4.4 Kurva Fitnes dengan memprioritaskan Biaya Produksi



Gambar 4.5 Kurva Fitnes dengan memprioritaskan Nilai Emisi.

## 4.2 PEMBAHASAN

Pengujian sistem pada penelitian ini disimulasikan dengan menerapkan *Algoritma Dragonfly* dengan Faktor Pembobotan. Pada setiap percobaan akan diterapkan faktor pembobotan berupa W1 adalah pembobotan nilai ekonomi

dan W2 Pembobotan nilai Emisi. Simulasi dilakukan menggunakan beberapa parameter input yang dibutuhkan untuk menjalankan *Algoritma Dragonfly* diantaranya Jumlah Agent, Jumlah Iterasi, Data dari Pembangkit Termal dan Pembangkit Hidro, serta Beban Simulasi. Pada penelitian ini simulasi dilakukan sebanyak 5 kali percobaan dengan kasus pertama memprioritaskan optimalisasi biaya pembangkit, kasus ketiga pengoptimalan secara *balance*, kasus ke 2 dan ke 4 merupakan kasus pengujian parsial untuk mengetahui perubahan nilai signifikan yang diuji, dan kasus kelima memprioritaskan penurunan emisi pembangkit. Pada Tabel 4.1 adalah data yang digunakan dalam simulasi pembobotan. Data yang digunakan dalam pengolahan data adalah data yang diambil dari PLTU Sudimoro Pacitan dan PLTA Ngebel Ponorogo pada tanggal 1 sampai 7 Agustus 2024.

#### 4.2.1 Hasil Perhitungan Emisi CO<sub>2</sub> PLTU

Pada kasus penelitian ini diasumsikan batubara yang digunakan PLTU Pacitan adalah batubara bituminous, sehingga besar emisi CO<sub>2</sub> PLTU dapat dihitung dengan persamaan (2.5) dan persamaan (2.6).

- Perhitungan emisi CO<sub>2</sub> Unit 1 dan Unit 2 PLTU jika yang diketahui adalah nilai Kapasitas PLTU.

$$\begin{aligned}
 \text{Energi listrik yang dibangkitkan} &= \text{kapasitas} \times \text{waktu operasi} \\
 &= 315 \text{ MW} \times 24 \text{ jam/hari} \\
 &= 7560 \text{ MWh} \\
 &= 7.560.000 \text{ kWh}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Energi bahan bakar} &= \frac{\text{Energi listrik yang dibangkitkan}}{\text{Efisiensi Thermal}} \\
 &= \frac{7.560.000 \text{ kWh}}{0.33} \\
 &= 22.909.090,9 \text{ kWh}
 \end{aligned}$$

$$\text{Konsumsi Bahan Bakar} = \frac{\text{Energi Bahan Bakar}}{\text{Net Caloric Value}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{22.909.090,9 \text{ kWh}}{\frac{7.2\text{kWh}}{\text{kg}}} \\
 &= 3.181.818,18 \text{ kg} \\
 \text{Emisi CO}_2 &= \text{Konsumsi Bahan Bakar} \times \%C \\
 &\quad \text{bahan bakar} \times \frac{44}{12} \\
 &= 3.181.818,18 \text{ kg} \times 0.667 \times \frac{44}{12} \\
 &= 7.781.666,7 \text{ kg} \\
 &= 7.781,7 \text{ ton.}
 \end{aligned}$$

Jika data yang diketahui adalah besar daya maka perhitungan emisi menggunakan persamaan (2.6).

Contoh pada kasus Tanggal 1 Agustus 2024 Unit 1 dan Unit 2

$$\begin{aligned}
 \text{Emisi CO}_2 &= \frac{\text{daya} \times \text{waktu operasi} \times \text{faktor emisi CO}_2}{\text{Efisiensi Pembangkit}} \\
 &= \frac{569.8 \text{ MW} \times 1000 \times 24 \text{ Jam} \times 0,8}{33} \\
 &= 331.520 \text{ kgCO}_2 \\
 &= 331,52 \text{ Ton CO}_2.
 \end{aligned}$$

Tabel 4.1 Data Emisi CO2 Hasil Perhitungan tanpa sistem pembobotan.

Tanggal	PLTU		Total Beban (MW)	Data Emisi Tanpa Pembobotan Sistem (CO <sub>2</sub> e)
	Unit 1	Unit 2		
1	285.3	284.5	569.8	331.52
2	293	287.3	580.3	337.63
3	284.5	285	569.5	331.35
4	288.1	281	569.1	331.11
5	292	285	577	335.71
6	288	289	577	335.71
7	287	284	571	332.22

Perhitungan emisi CO2 PLTA

Perhitungan CH<sub>4</sub> PLTA dan di konversi ke CO<sub>2</sub> menggunakan persamaan (2.14).

$$\begin{aligned}
 PE_{HP,y} &= \frac{EF_{Res} \times TEG_y}{1000} \\
 &= \frac{90 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \times 2.25 \text{ MWh} \times 1000}{1000} \\
 &= 202.5 \text{ Kg CO}_2\text{e}
 \end{aligned}$$

Rumus Konversi CO<sub>2</sub>e ke CH<sub>4</sub>

$$\begin{aligned}
 \text{Emisi CH}_4 &= \frac{\text{Emisi CO}_2\text{e}}{GWP_{CH_4}} \\
 &= \frac{202.5}{28} = 7.2 \text{ KgCH}_4
 \end{aligned}$$

Rumus ekuivalen CO<sub>2</sub>e

$$\begin{aligned}
 \text{CO}_2\text{e} &= \text{Emisi CH}_4 \times GWP_{CH_4} \\
 &= 7.2 \times 28 \\
 &= 202.5 \text{ KgCO}_2\text{e}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Total CO}_2\text{e} &= \text{CO}_2 + (\text{Emisi CH}_4 \times GWP_{CH_4}) \\
 &= 202.5 + (7.2 \times 28) \\
 &= 405.00 \text{ KgCO}_2\text{e} \\
 &= 0.405 \text{ tonCO}_2\text{e}.
 \end{aligned}$$

Tabel 4.2 Data PLTU dan PLTA yang digunakan dalam pengolahan data pembobotan simulasi matlab.

Tanggal	PLTU		PLTA	Total Pembobotan Beban (MW)
	Unit 1 (MW)	Unit 2 (MW)	Unit 1 (MW)	
1	285.3	284.5	2.25	572.05
2	293	287.3	2.23	582.53
3	284.5	285	2.23	571.73
4	288.1	281	2.21	571.31
5	292	285	2.2	579.2
6	288	289	2.21	579.21
7	287	284	2.22	573.2

Pada penelitian ini Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang dihasilkan karena aktivitas manusia dan vegetasi di sekitar waduk berpotensi menjadi sumber masuknya bahan organik pada waduk. Sedimen perairan terutama daerah danau, bendungan, atau reservoir contohnya aktivitas pembangkit hidro (Andini et al., 2022) Emisi Gas Rumah (GRK) terdiri dari CO<sub>2</sub> sebagai komponen utamanya, uap air, dan sisanya bentuk gas lainnya seperti metana dan nitrogen oksida.

(Asra.I.Made. 2010). Emisi Gas Rumah Kaca dinyatakan dalam satuan CO<sub>2</sub>e sebagai standarisasi pengukuran emisi Gas Rumah Kaca dan memiliki efek pemanasan global yang paling signifikan (IPB University. 2019).

#### 4.2.2 Kasus 1 dengan W1=1 dan W2=0

Kasus 1 simulasi menggunakan faktor pembobotan W1 dengan nilai 1 pada nilai ekonomi dan W2 dengan nilai 0 pada nilai emisi. Pada kasus pertama hanya akan memprioritaskan pengoptimalan biaya operasi pembangkit dan tidak mengoptimalkan penurunan nilai emisi. Hasil Simulasi terdapat pada Tabel 4.3.

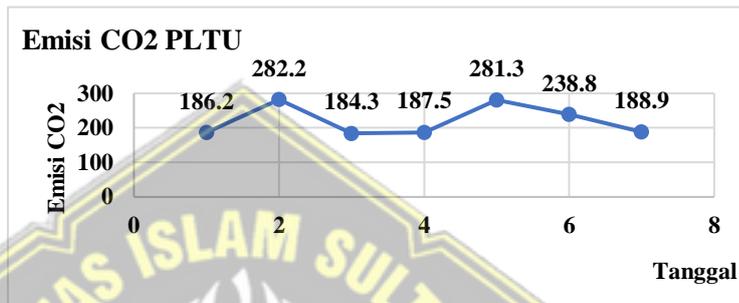
Tabel 4.3 Hasil Simulasi W=1 dan W2=0

Tanggal	W1= 1	W2= 0		Emisi metana (CH <sub>4</sub> ) PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)
	Biaya Produksi (Rp.)	PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	
1	Rp336,336,876	186.2	202.5	405
2	Rp342,637,549	282.2	200.7	401.4
3	Rp335,918,472	184.3	200.7	401.4
4	Rp335,917,400	187.5	198.9	397.8
5	Rp340,657,093	281.3	198.0	396
6	Rp340,657,336	238.8	198.9	397.8
7	Rp337,057,199	188.9	199.8	399.6

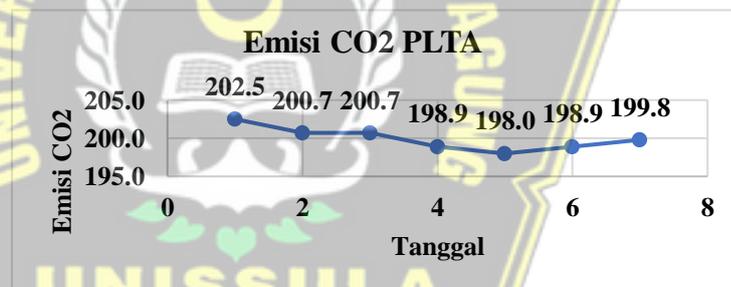
Hasil simulasi kasus 1 pada Tabel 4.3 didapatkan biaya optimal sebesar Rp335,918,472 dengan emisi PLTU sebesar 184.3ton CO<sub>2</sub>e perhari dan emisi PLTA 200.7 Kg CO<sub>2</sub>e atau sama dengan 0.2 tonCO<sub>2</sub>e dan nilai emisi CH<sub>4</sub> sebesar 157.36 KgCH<sub>4</sub> atau sama dengan 0.157 tonCH<sub>4</sub>. Hasil simulasi kasus 1 terdapat pada Gambar 4.6 grafik biaya operasi pembangkit kasus 1, Gambar 4.7 grafik emisi PLTU kasus 1, Gambar 4.8 Grafik emisi CO<sub>2</sub> PLTA dan Gambar 4.9 Emisi CH<sub>4</sub> PLTA.



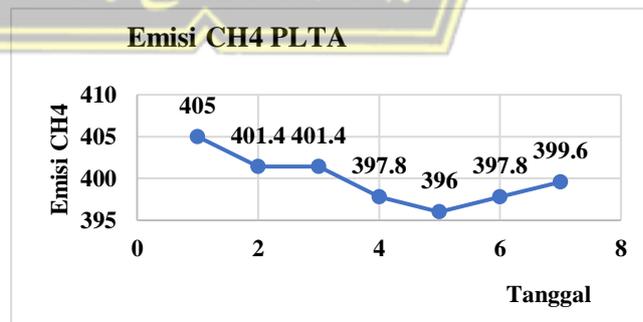
Gambar 4.6 Grafik Biaya Operasi Pembangkit Kasus 1.



Gambar 4.7 Grafik Emisi PLTU Kasus 1.



Gambar 4.8 Grafik Emisi CO2 PLTA.



Gambar 4.9 Grafik Emisi CH4 PLTA

Berdasarkan Grafik hasil Simulasi pada Gambar 4.6 hingga Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa besar daya setiap tanggal pengujian berpengaruh dengan biaya produksi dan emisi yang dihasilkan pembangkit. Apabila

daya pembangkit semakin besar maka biaya produksi dan nilai emisi semakin besar.

#### 4.2.3 Kasus 2 dengan W1=0,25 dan W2=0,75

Kasus 2 simulasi menggunakan faktor pembobotan W1 dengan nilai 0.25 pada nilai ekonomi dan W2 dengan nilai 0.75 pada nilai emisi. Pada kasus kedua memprioritaskan pengoptimalan biaya operasi pembangkit tidak mengoptimalkan penurunan nilai emisi. Hasil Simulasi terdapat pada Tabel 4.4.

Rumus Konversi CO<sub>2</sub>e ke CH<sub>4</sub> menggunakan persamaan (2.14).

Data CO<sub>2</sub>e berdasarkan data hasil simulasi sistem penjadwalan.

$$\begin{aligned} \text{Emisi CH}_4 &= \frac{\text{Emisi CO}_2\text{e}}{\text{GWP CH}_4} \\ &= \frac{151.88}{28} = 5.4 \text{ KgCH}_4 \end{aligned}$$

Rumus ekuivalen CO<sub>2</sub>e

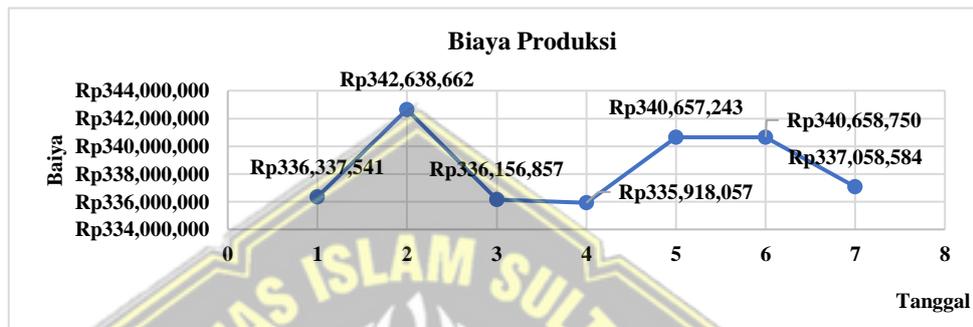
$$\begin{aligned} \text{CO}_2\text{e} &= \text{Emisi CH}_4 \times \text{GWP CH}_4 \\ &= 5.4 \times 28 \\ &= 151.88 \text{ KgCO}_2\text{e} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Total CO}_2\text{e} &= \text{CO}_2 + (\text{Emisi CH}_4 \times \text{GWP CH}_4) \\ &= 151.88 + (7.2 \times 28) \\ &= 303.75 \text{ KgCO}_2\text{e} \\ &= 0.303 \text{ tonCO}_2\text{e}. \end{aligned}$$

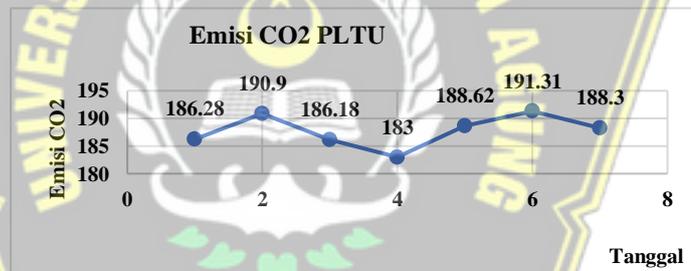
Tabel 4.4 Hasil Simulasi W1= 0.25 dan W2= 0.75

Tanggal	Biaya Produksi (Rp.)	W1= 0.25	W2= 0.75	Emisi metana (CH <sub>4</sub> ) PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)
		Emisi		
		PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	
1	Rp336,337,541	186.28	151.88	303.75
2	Rp342,638,662	190.9	151.53	301.05
3	Rp336,156,857	186.18	150.53	301.05
4	Rp335,918,057	183.0	149.18	298.35
5	Rp340,657,243	188.62	148.5	297
6	Rp340,658,750	191.31	149.18	298.35
7	Rp337,058,584	188.3	149.85	299.7

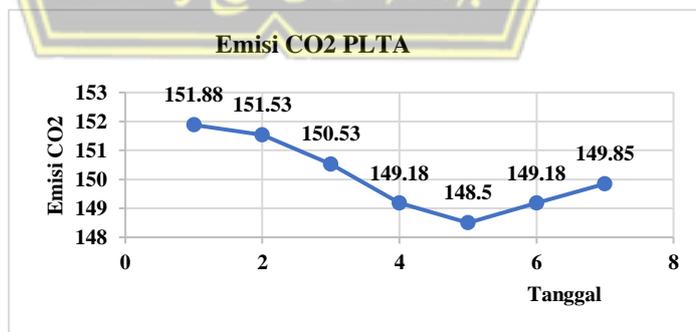
Hasil simulasi kasus 2 pada Tabel 4.4 didapatkan biaya optimal sebesar Rp336,156,857 dengan emisi PLTU sebesar 186.18ton CO<sub>2</sub>e dan emisi PLTA 150.53 Kg CO<sub>2</sub>e atau 0.150ton CO<sub>2</sub>e, dan Emisi CH<sub>4</sub> sebesar 301.05 Kg CO<sub>2</sub>e atau 0.301 tonCH<sub>4</sub>. Hasil simulasi kasus 2 terdapat pada Gambar 4.10 grafik biaya operasi pembangkit kasus 2, Gambar 4.11 grafik emisi PLTU kasus 2, Gambar 4.12 Grafik emisi CO<sub>2</sub> PLTA, dan Gambar 4.12 Grafik emisi CH<sub>4</sub> PLTA.



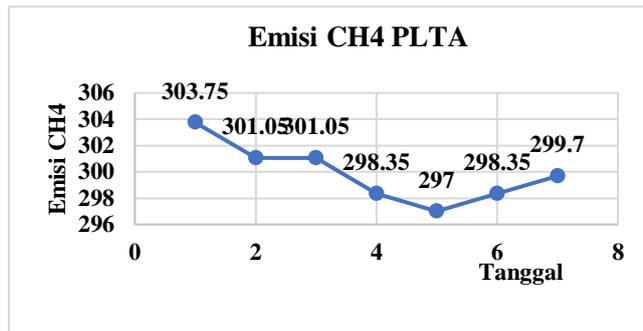
Gambar 4.10 Grafik Biaya Operasi Pembangkit Kasus 2



Gambar 4.11 Grafik Emisi PLTU kasus 2



Gambar 4.12 Grafik Emisi CO<sub>2</sub> PLTA.



Gambar 4.13 Grafik emisi CH4 PLTA.

Berdasarkan Grafik hasil Simulasi pada Gambar 4.11 hingga Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa besar daya setiap tanggal pengujian berpengaruh dengan biaya produksi dan emisi yang dihasilkan pembangkit. Apabila daya pembangkit semakin besar maka biaya produksi dan nilai emisi semakin besar. Selain besarnya daya nilai pembobotan juga berpengaruh terhadap besarnya biaya produksi. Pada pembobotan  $W=1$  biaya produksi lebih kecil dari biaya produksi dengan pembobotan  $W1=0.25$ .

#### 4.2.4 Kasus 3 dengan $W1=0,5$ dan $W2=0,5$

Kasus 3 simulasi menggunakan faktor pembobotan  $W1$  dengan nilai 0.5 pada nilai ekonomi dan  $W2$  dengan nilai 0.5 pada nilai emisi. Pada kasus ketiga pembobotan secara seimbang antara biaya operasi pembangkit dan nilai emisi. Hasil Simulasi terdapat pada Tabel 4.5. Rumus Konversi  $CO_2e$  ke  $CH_4$ , menggunakan persamaan (2.14). Data  $CO_2e$  berdasarkan data hasil simulasi sistem penjadwalan.

$$\begin{aligned} \text{Emisi } CH_4 &= \frac{\text{Emisi } CO_2e}{GWP \text{ } CH_4} \\ &= \frac{101.25}{28} = 3.6 \text{ Kg}CH_4 \end{aligned}$$

Rumus ekuivalen  $CO_2e$

$$\begin{aligned} CO_2e &= \text{Emisi } CH_4 \times GWP \text{ } CH_4 \\ &= 3.6 \times 28 \\ &= 101.25 \text{ Kg}CO_2e \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Total } CO_2e &= CO_2 + (\text{Emisi } CH_4 \times GWP \text{ } CH_4) \\ &= 101.25 + (3.6 \times 28) \end{aligned}$$

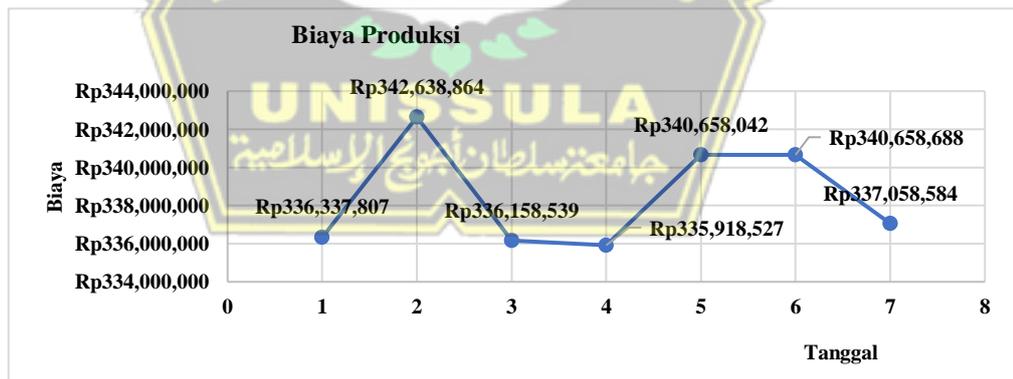
$$= 202.5 \text{ KgCO}_2\text{e}$$

$$= 0.202 \text{ tonCO}_2\text{e.}$$

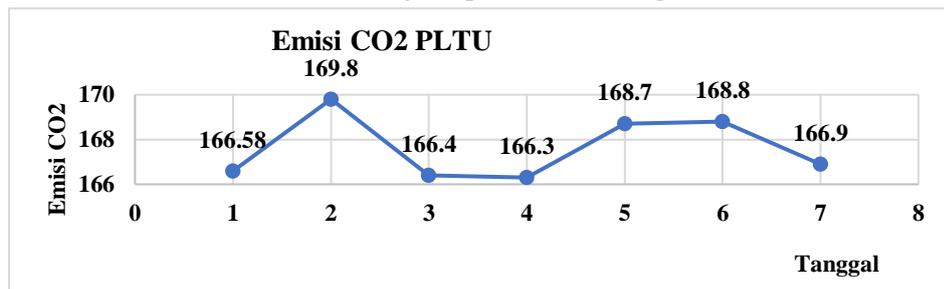
Tabel 4.5 Hasil Simulasi W1= 0.5 dan W2= 0.5

Tanggal	Biaya Produksi (Rp.)	Emisi		Emisi metana (CH4) PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)
		PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	
1	Rp336,337,807	166.58	101.25	202.5
2	Rp342,638,864	169.8	100.35	200.7
3	Rp336,158,539	166.4	100.35	200.7
4	Rp335,918,527	166.3	99.45	198.9
5	Rp340,658,042	168.7	99	198
6	Rp340,658,688	168.8	99.45	198.9
7	Rp337,058,584	166.9	99.9	199.8

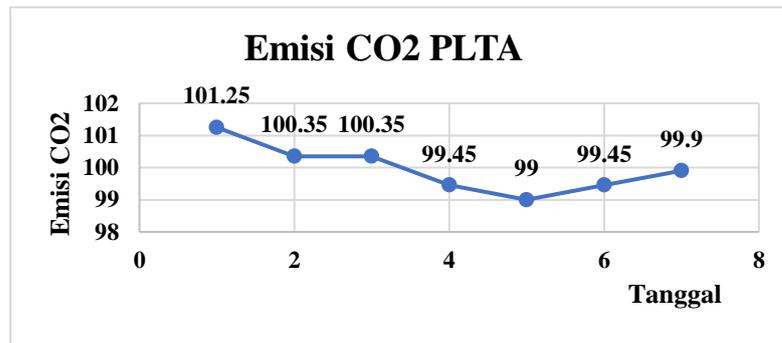
Hasil simulasi kasus 3 pada Tabel 4.5 didapatkan biaya optimal sebesar Rp335,918,527 dengan emisi PLTU sebesar 166.3ton CO<sub>2</sub>e, emisi PLTA 99.45 Kg CO<sub>2</sub>e atau 0.99ton CO<sub>2</sub>e, dan emisi CH<sub>4</sub> sebesar 198.9 Kg CO<sub>2</sub>e atau 0.198 ton CO<sub>2</sub>e. hasil simulasi kasus 2 terdapat pada Gambar 4.14 grafik biaya operasi pembangkit kasus 3, Gambar 4.15 grafik emisi PLTU kasus 3, Gambar 4.16 Grafik emisi CO<sub>2</sub> PLTA, dan Gambar 4.17 Grafik Emisi CH<sub>4</sub> PLTA.



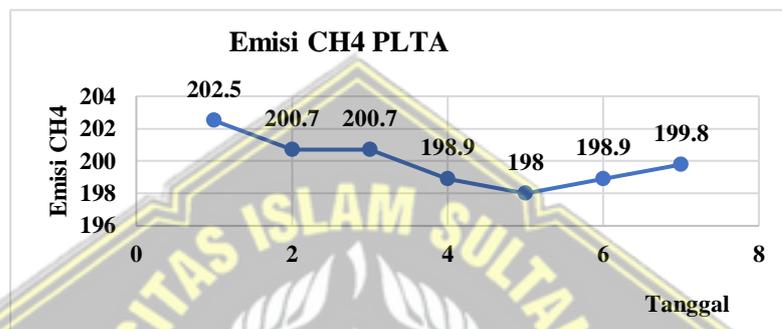
Gambar 4.14 Grafik Biaya Operasi Pembangkit Kasus 3



Gambar 4.15 Grafik Emisi PLTU Kasus 3



Gambar 4.16 Grafik Emisi CO2 PLTA



Gambar 4.17 Grafik Emisi CH4 PLTA

Berdasarkan Grafik hasil Simulasi pada Gambar 4.14 hingga Gambar 4.17 dapat dilihat bahwa besar daya setiap tanggal pengujian berpengaruh dengan biaya produksi dan emisi yang dihasilkan pembangkit. Apabila daya pembangkit semakin besar maka biaya produksi dan nilai emisi semakin besar. Selain itu, nilai pembobotan berpengaruh terhadap besarnya biaya produksi. Pada pembobotan  $W=1$  biaya produksi lebih kecil dari biaya produksi dengan pembobotan  $W=0.5$ .

#### 4.2.5 Kasus 4 dengan $W1=0,75$ dan $W2=0,25$

Kasus 4 simulasi menggunakan faktor pembobotan  $W1$  dengan nilai 0.75 pada nilai ekonomi dan  $W2$  dengan nilai 0.25 pada nilai emisi. Pada kasus ke-empat pembobotan akan memprioritaskan penurunan emisi dibanding biaya produksi. Hasil Simulasi terdapat pada Tabel 4.6. Rumus Konversi  $CO_2e$  ke  $CH_4$  menggunakan persamaan (2.14). Data  $CO_2e$  berdasarkan data hasil simulasi sistem penjadwalan.

$$\begin{aligned} \text{Emisi CH}_4 &= \frac{\text{Emisi CO}_2e}{\text{GWP CH}_4} \\ &= \frac{50.6}{28} = 1.81 \text{ KgCH}_4 \end{aligned}$$

Rumus ekuivalen CO<sub>2</sub>e

$$\begin{aligned} \text{CO}_2e &= \text{Emisi CH}_4 \times \text{GWP CH}_4 \\ &= 1.81 \times 28 \\ &= 50.6 \text{ KgCO}_2e \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Total CO}_2e &= \text{CO}_2 + (\text{Emisi CH}_4 \times \text{GWP CH}_4) \\ &= 50.6 + (1.81 \times 28) \\ &= 101.3 \text{ KgCO}_2e \\ &= 0.101 \text{ tonCO}_2e \end{aligned}$$

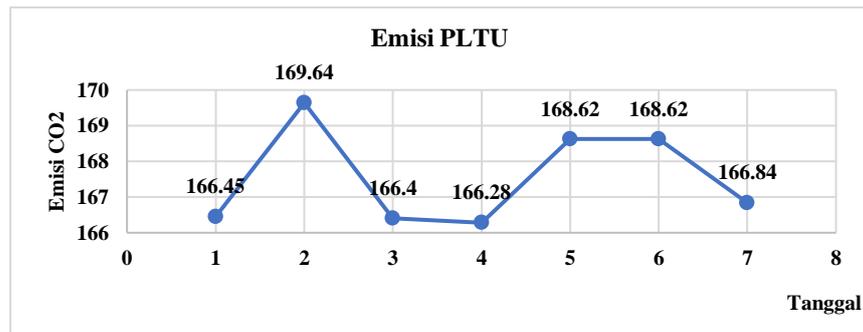
Tabel 4.6 Hasil Simulasi W1= 0.75 dan W2= 0.25

Tanggal	W1= 0.75	W2= 0.25		Emisi metana (CH <sub>4</sub> ) PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)
	Biaya Produksi (Rp.)	Emisi		
		PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	
1	Rp336,338,016	166.45	50.6	101.3
2	Rp342,638,864	169.64	50.2	100.4
3	Rp336,158,539	166.4	50.2	100.4
4	Rp336,158,487	166.28	49.7	99.5
5	Rp340,658,764	168.62	49.5	99.0
6	Rp340,658,246	168.62	49.7	99.5
7	Rp337,058,274	166.84	50.0	99.9

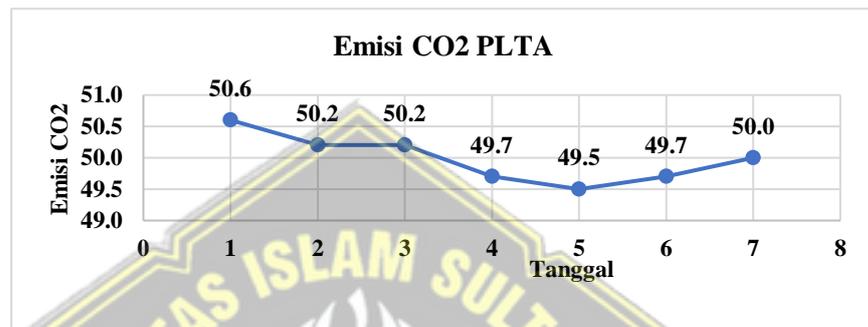
Hasil simulasi kasus 4 pada Tabel 4.6 didapatkan biaya optimal sebesar Rp336,158,487 dengan emisi PLTU sebesar 166.28ton CO<sub>2</sub>e, emisi PLTA 49.7 KgCO<sub>2</sub>e atau 0.497 tonCO<sub>2</sub>e, dan Emisi CH<sub>4</sub> sebesar 99.5 Kg CO<sub>2</sub>e atau 0.995 tonCO<sub>2</sub>e. Hasil simulasi kasus 4 terdapat pada Gambar 4.10 grafik biaya operasi pembangkit kasus 4, Gambar 4.11 grafik emisi PLTU kasus 4, dan Gambar 4.12 Grafik emisi PLTA.



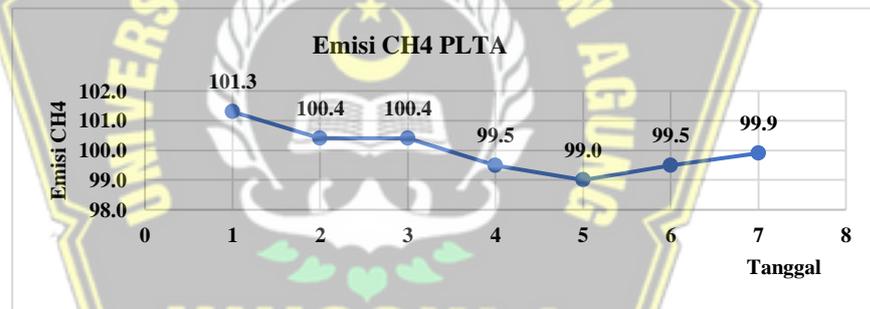
Gambar 4.18 Grafik Biaya Operasi Pembangkit Kasus 4.



Gambar 4.19 Grafik Emisi PLTU Kasus 4.



Gambar 4.20 Grafik Emisi PLTA.



Gambar 4.21 Grafik Emisi PLTA

Berdasarkan Grafik hasil Simulasi pada Gambar 4.18 hingga Gambar 4.21 dapat dilihat bahwa besar daya setiap tanggal pengujian berpengaruh dengan biaya produksi dan emisi yang dihasilkan pembangkit. Apabila daya pembangkit semakin besar maka biaya produksi dan nilai emisi semakin besar. Selain itu, nilai pembobotan berpengaruh terhadap besarnya biaya produksi. Dengan pembobotan  $W_2 = 0.25$  yang memprioritaskan penurunan nilai emisi, pada kasus ke 4 nilai emisi lebih rendah dari kasus 1-3.

#### 4.2.6 Kasus 5 dengan W1=0 dan W2=1

Kasus 5 simulasi menggunakan faktor pembobotan W1 dengan nilai 0 pada nilai ekonomi dan W2 dengan nilai 1 pada nilai emisi. Pada kasus ke-empat pembobotan akan memprioritaskan penurunan emisi dibanding biaya produksi. Hasil Simulasi terdapat pada Tabel 4.7.

Rumus Konversi CO<sub>2</sub>e ke CH<sub>4</sub> menggunakan persamaan (2.14).

Data CO<sub>2</sub>e berdasarkan data hasil simulasi sistem penjadwalan.

$$\begin{aligned} \text{Emisi CH}_4 &= \frac{\text{Emisi CO}_2\text{e}}{\text{GWP CH}_4} \\ &= \frac{20.6}{28} = 0.73 \text{ KgCH}_4 \end{aligned}$$

Rumus ekuivalen CO<sub>2</sub>e

$$\begin{aligned} \text{CO}_2\text{e} &= \text{Emisi CH}_4 \times \text{GWP CH}_4 \\ &= 0.73 \times 28 \\ &= 20.3 \text{ KgCO}_2\text{e} \end{aligned}$$

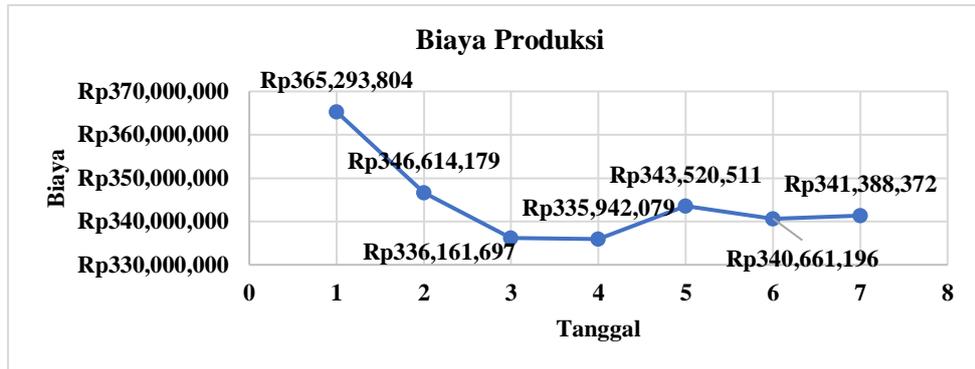
$$\begin{aligned} \text{Total CO}_2\text{e} &= \text{CO}_2 + (\text{Emisi CH}_4 \times \text{GWP CH}_4) \\ &= 20.3 + (0.73 \times 28) \\ &= 40.6 \text{ KgCO}_2\text{e} \\ &= 0.040 \text{ tonCO}_2\text{e}. \end{aligned}$$

Tabel 4.7 Hasil Simulasi W1= 0 dan W2= 1

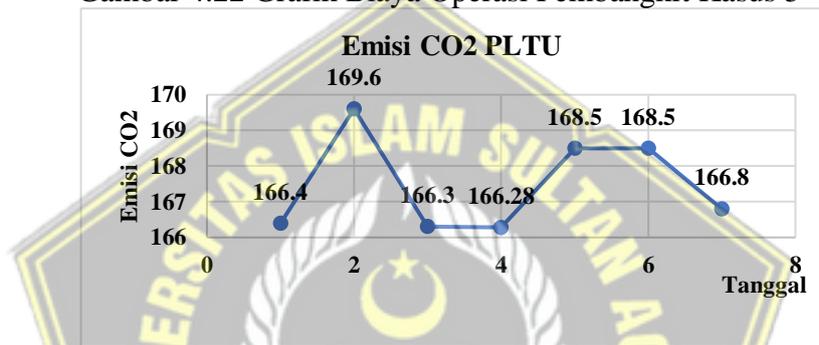
Tanggal	W1= 0	W2= 1		Emisi metana (CH <sub>4</sub> ) PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)
	Biaya Produksi (Rp.)	PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	
1	Rp365,293,804	166.4	20.3	40.6
2	Rp346,614,179	169.6	20.1	40.2
3	Rp336,161,697	166.3	20.1	40.2
4	Rp335,942,079	166.28	19.9	39.8
5	Rp343,520,511	168.5	19.8	39.6
6	Rp340,661,196	168.5	19.9	39.8
7	Rp341,388,372	166.8	20.0	40

Hasil simulasi kasus 5 pada Tabel 4.7 didapatkan biaya optimal sebesar Rp335,942,079 dengan emisi PLTU sebesar 166.28 ton CO<sub>2</sub>e, emisi PLTA 19.9 KgCO<sub>2</sub>e atau 0.019 ton CO<sub>2</sub>e, dan Emisi CH<sub>4</sub> sebesar 39.8 Kg CO<sub>2</sub>e atau 0.039 ton CO<sub>2</sub>e. hasil simulasi kasus 2 terdapat pada

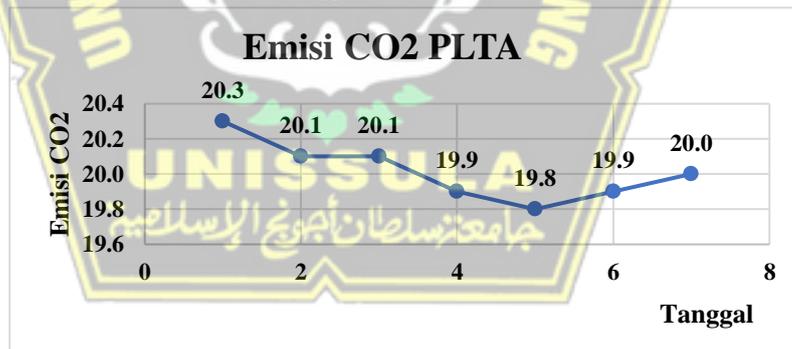
Gambar 4.13 grafik biaya operasi pembangkit kasus 5, Gambar 4.14 grafik emisi PLTU kasus 5, dan Gambar 4.15 Grafik emisi PLTA.



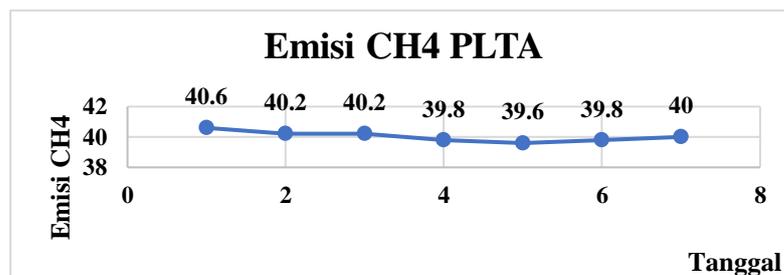
Gambar 4.22 Grafik Biaya Operasi Pembangkit Kasus 5



Gambar 4.23 Grafik Emisi PLTU Kasus 5



Gambar 4.24 Grafik Emisi CO2 PLTA.



Gambar 4.25 Grafik Emisi CH4 PLTA.

Berdasarkan Grafik hasil Simulasi pada Gambar 4.21 hingga Gambar 4.25 dapat dilihat bahwa besar daya setiap tanggal pengujian berpengaruh dengan biaya produksi dan emisi yang dihasilkan pembangkit. Apabila daya pembangkit semakin besar maka biaya produksi dan nilai emisi semakin besar. Selain itu, nilai pembobotan berpengaruh terhadap besarnya biaya produksi. Dengan pembobotan  $W_2=1$  yang memprioritaskan penurunan nilai emisi, pada kasus ke 5 nilai emisi lebih rendah dari kasus 1-4.

### 4.3 Hubungan Biaya Produksi dan Nilai Emisi

Kasus 1 dan dengan  $W_1=1$  dan  $W_2=0$  yaitu dengan memprioritaskan penurunan biaya produksi dan mengabaikan nilai emisi Pada Kasus 2, kasus 3, dan Kasus 4 yaitu dengan pembobotan 0.25, 0.5 dan 0.75 yang diterapkan pada masing-masing nilai  $W_1$  digunakan untuk mencari pembobotan yang paling optimal untuk mendapatkan penjadwalan yang paling efektif dalam pengoperasian algoritma dragonfly sehingga mendapatkan solusi yaitu menurunkan nilai emisi dan biaya operasi. Dan pada kasus kelima dengan  $W_1=0$  dan  $W_2=1$  hanya memprioritaskan penurunan nilai emisi dan mengabaikan biaya produksi. Berikut hasil pengoptimalan biaya produksi dan nilai emisi menggunakan Algoritma Dragonfly dengan data yang diambil pada 1-7 Agustus 2024 pada Tabel 4.7 hingga 4.13.

Tabel 4.8 Biaya dan Emisi tanggal 1 Agustus 2024

Kasus 1 Agustus	Nilai Bobot		Biaya Produksi (Rp.)	Emisi		Emisi metana (CH <sub>4</sub> ) PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)
	W1	W2		PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	
1	1	0	Rp336,336,876	186.2	202.5	405
2	0.75	0.25	Rp336,338,016	166.4	50.6	101.3
3	0.5	0.5	Rp336,337,807	166.58	101.25	202.5
4	0.25	0.75	Rp336,337,541	186.2	151.88	303.75
5	0	1	Rp365,293,804	166.4	20.3	40.6

Tabel 4.9 Biaya dan Emisi tanggal 2 Agustus 2024

Kasus 2 Agustus	Nilai Bobot		Biaya Produksi (Rp.)	Emisi		Emisi metana (CH4) PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)
	W1	W2		PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	
1	1	0	Rp342,637,549	282.2	200.7	401.4
2	0.75	0.25	Rp342,638,662	169.64	50.2	100.4
3	0.5	0.5	Rp342,638,864	169.8	100.35	200.7
4	0.25	0.75	Rp342,638,864	190.9	151.53	301.05
5	0	1	Rp346,614,179	169.6	20.1	40.2

Tabel 4.10 Biaya dan Emisi tanggal 3 Agustus 2024

Kasus 3 Agustus	Nilai Bobot		Biaya Produksi (Rp.)	Emisi		Emisi metana (CH4) PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)
	W1	W2		PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	
1	1	0	Rp335,918,472	184.3	200.7	401.4
2	0.75	0.25	Rp336,156,857	166.4	50.2	100.4
3	0.5	0.5	Rp336,158,539	166.4	100.35	200.7
4	0.25	0.75	Rp336,158,539	186.18	150.53	301.05
5	0	1	Rp336,161,697	166.3	20.1	40.2

Tabel 4.11 Biaya dan Emisi tanggal 4 Agustus 2024

Kasus 4 Agustus	Nilai Bobot		Biaya Produksi (Rp.)	Emisi		Emisi metana (CH4) PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)
	W1	W2		PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	
1	1	0	Rp335,917,400	187.5	198.9	397.8
2	0.75	0.25	Rp335,918,057	166.28	49.7	99.5
3	0.5	0.5	Rp336,158,487	166.3	99.45	198.9
4	0.25	0.75	Rp335,918,527	183.0	149.18	298.35
5	0	1	Rp335,942,079	166.2	19.9	39.8

Tabel 4.12 Biaya dan Emisi tanggal 5 Agustus 2024

Kasus 5 Agustus	Nilai Bobot		Biaya Produksi (Rp.)	Emisi		Emisi metana (CH4) PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)
	W1	W2		PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	
1	1	0	Rp340,657,093	2813.2	198.0	396
2	0.75	0.25	Rp340,657,243	168.62	49.5	99.0
3	0.5	0.5	Rp340,658,764	168.7	99	198
4	0.25	0.75	Rp340,658,042	188.62	148.5	297
5	0	1	Rp343,520,511	168.5	19.8	39.6

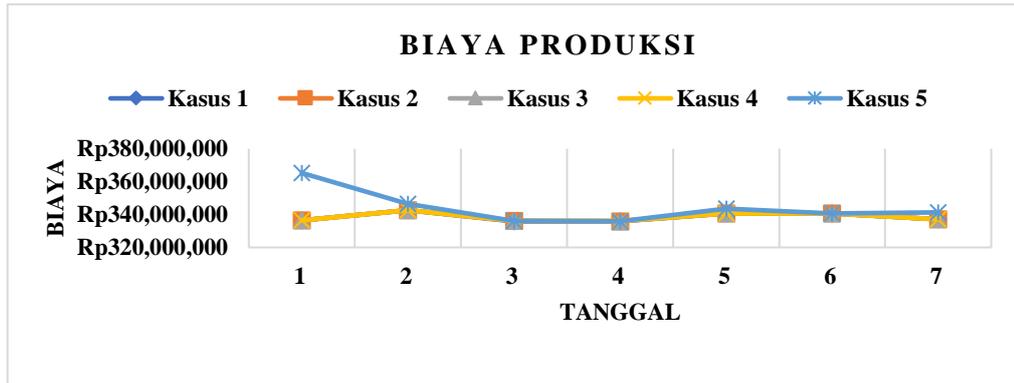
Tabel 4.13 Biaya dan Emisi tanggal 6 Agustus 2024

Kasus 6 Agustus	Nilai Bobot		Biaya Produksi (Rp.)	Emisi		Emisi metana (CH4) PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)
	W1	W2		PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	
1	1	0	Rp340,657,336	238.85	198.9	397.8
2	0.75	0.25	Rp340,658,246	168.62	49.7	99.5
3	0.5	0.5	Rp340,658,688	168.8	99.45	198.9
4	0.25	0.75	Rp340,658,750	191.31	149.18	298.35
5	0	1	Rp340,661,196	168.5	19.9	39.8

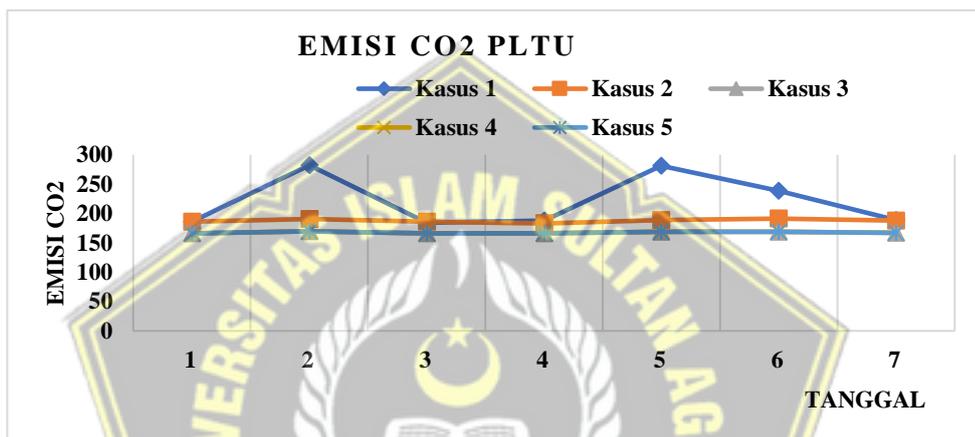
Tabel 4.14 Biaya dan Emisi tanggal 7 Agustus 2024

Kasus 7 Agustus	Nilai Bobot		Biaya Produksi (Rp.)	Emisi		Emisi metana (CH4) PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)
	W1	W2		PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	
1	1	0	Rp337,057,199	188.9	199.8	399.6
2	0.75	0.25	Rp337,058,274	166.84	50.0	99.9
3	0.5	0.5	Rp337,058,584	166.9	99.9	199.8
4	0.25	0.75	Rp337,058,584	188.3	149.85	299.7
5	0	1	Rp341,388,372	166.8	20.0	40

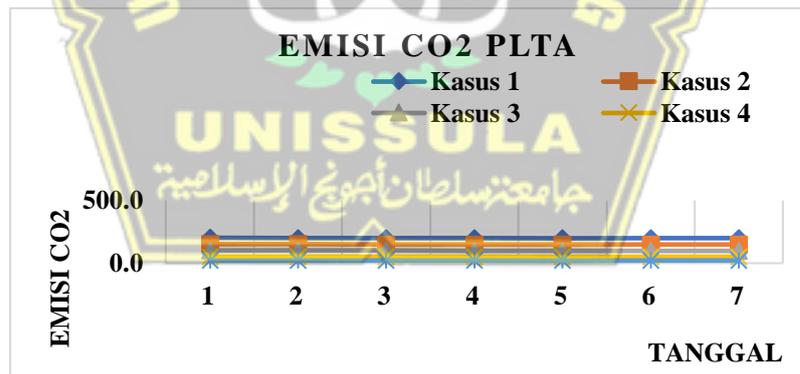
Hasil simulasi pembobotan kasus 1-kasus 4 dari tanggal 1-7 Agustus 2024 terdapat pada Gambar 4.26 Grafik Biaya Produksi, Gambar 4.27 Grafik nilai emisi PLTU, Gambar 4.28 Grafik nilai emisi CO<sub>2</sub> PLTA, dan Gambar 4.29 Grafik nilai emisi CH<sub>4</sub> PLTA.



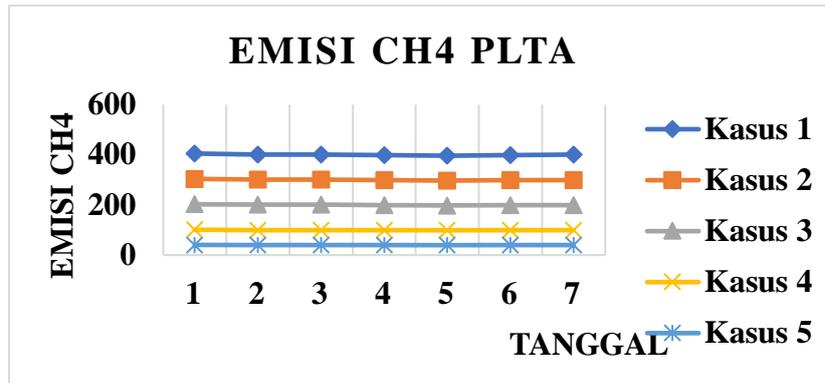
Gambar 4.26 Grafik Biaya Produksi.



Gambar 4.27 Grafik nilai emisi PLTU



Gambar 4.28 Grafik nilai emisi CO2 PLTA.



Gambar 4.29 Grafik nilai emisi CH4 PLTA.

Pada hasil percobaan dapat dilihat bahwa besar nilai pembobotan berpengaruh dengan besar biaya produksi dan nilai emisi pembangkit. Tanpa mengabaikan nilai biaya produksi dan nilai emisi maka didapatkan dengan pembobotan  $W_1=0.75$  dan  $W_2=0.25$  biaya produksi dapat turun sebesar 8%, dan nilai emisi CO2 turun sebesar 41%, emisi CO2 PLTA turun sebesar 75% dan Emisi CH4 PLTA turun sebesar 75%.

#### 4.4 Skenario Penjadwalan Operasi Pembangkit

Pembagian pembebanan pembangkit termal dilakukan dengan metode Algoritma Dragonfly. Data yang digunakan dalam operasi algoritma dragonfly adalah persamaan biaya bahan bakar pembangkit termal, kapasitas maksimum dan minimum masing-masing unit pembangkit termal dalam 1 hari. Beban yang ditanggung oleh pembangkit termal merupakan sisa beban total yang dikurangi oleh beban yang ditanggung oleh pembangkit hidro yang terdapat pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Data Pembagian beban pembangkit termal dan pembangkit Hidro

Tanggal	PLTU (MW)	PLTA (MW)	Total Pembobotan Beban (MW)
1	569.8	2.25	572.05
2	580.3	2.23	582.53
3	569.5	2.23	571.73
4	569.1	2.21	571.31
5	577	2.2	579.2
6	577	2.21	579.21
7	571	2.22	573.2

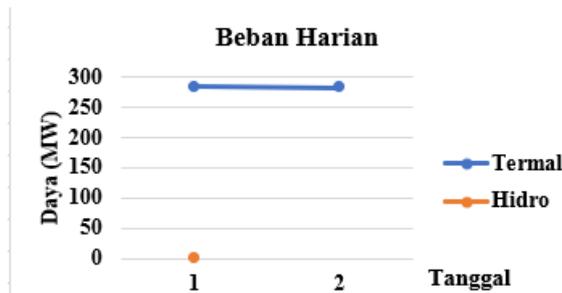
Skenario penjadwalan dan pembagian beban menggunakan Algoritma Dragonfly. Tujuan menggunakan metode ini adalah untuk menentukan beban tiap unit setiap state dalam kurun waktu 24 jam.

Prosedur penjadwalan meliputi kombinasi pembangkit termal dan pembangkit hidro. Selain itu karakteristik setiap unit pembangkit termal dan harga bahan bakar setiap unit pembangkit termal beban dan nilai emisi yang dihasilkan pembangkit termal yang akan ditanggung pembangkit termal lama 24 jam dengan kombinasi 2 unit pembangkit termal unit pembangkit termal. Pada tahap ini program menentukan dan menghitung biaya operasi yang paling rendah dan nilai emisi yang paling kecil dengan masing-masing faktor pembobotan dengan perbandingan 25:75.

Berdasarkan hasil percobaan pada Tabel 4.7 hingga Tabel 4.13 dan pada grafik Gambar 4.16 hingga Gambar 4.18 dapat dibuktikan bahwa dengan koordinasi unit pembangkit termal dan unit pembangkit hidro dengan faktor pembobotan dapat meminimalisir biaya operasi pada unit pembangkit termal. Unit pembangkit hidro dapat dioperasikan untuk memenuhi kebutuhan harian lebih lama karena biaya operasi yang lebih rendah. Pada Tabel 4.16 menampilkan daya per unit pembangkit termal dan pembangkit hidro pada beban yang telah ditentukan.

Tabel 4.16 Daya per unit PLTU dan PLTA

Tanggal	PLTU		PLTA	Total Pembobotan Beban pada Simulasi (MW)
	Unit 1 (MW)	Unit 2 (MW)	Unit 1 (MW)	
1	285.3	284.5	2.25	572.05
2	293	287.3	2.23	582.53
3	284.5	285	2.23	571.73
4	288.1	281	2.21	571.31
5	292	285	2.2	579.2
6	288	289	2.21	579.21
7	287	284	2.22	573.2



Gambar 4.30 Grafik Beban Harian Tanggal 1 Agustus 2024

Pada gambar 4.30 adalah gambar grafik pembebanan hasil pembangkitan 24 jam tanggal 1 Agustus 2024 selama 24 jam. Grafik biru adalah pembebanan pada pembangkit termal. Kemudian untuk memikul beban dasar unit hidro dibangkitkan. Sisanya untuk memenuhi beban dasar tersebut ialah unit termal dibangkitkan agar total pembangkitan mampu memikul beban keseluruhan.

Pada Tabel 4. 17 ialah pembagian beban dari daya minimum (P Min) hingga daya Maksimum (P Max) pembangkit termal.

Tabel 4.17 Daya per Unit PLTA Dan PLTU.

Tanggal	PLTU		PLTA	Total Pembobotan Beban (MW)
	Unit 1 (MW)	Unit 2 (MW)	Unit 1 (MW)	
1	201	210.5	2.25	411.5
2	231	233.9	2.23	464.9
3	200	189.1	2.23	389.1
4	201.1	200.2	2.21	401.3
5	193	190.6	2.2	383.6
6	236	198	2.21	434
7	253	190	2.22	443

Tabel 4.17 adalah pembagian daya beban per unit pembangkit termal. Pada saat daya beban 411.5 atau P Min pada pembangkit termal dan Pembangkit Hidro akan mensuplai 2.25 MW sehingga akan menjadi 413.75 MW. Pada saat beban beban 569.8 MW dan PLTA mensuplai 2.25 sehingga hasil simulasi 572.05 MW. Unit pembangkit Hidro dapat dioperasikan untuk memenuhi kebutuhan daya harian lebih lama karena biaya pembangkit hidro lebih rendah dan dapat membantu mengurangi biaya unit pembangkit termal.

Tabel 4.18 contoh penjadwalan sederhana selama 24 menggunakan Algoritma Dragonfly.

Tabel 4.18 Contoh Jadwal Operasi Perhari Sederhana tanpa Pembobotan

Hari	PLTU-1 (MW)	PLTU-2 (MW)	PLTA (MW)	Total (MW)	Emisi (ton CO <sub>2</sub> )	Keterangan
1	285.3	284.5	0	569.8	331.52	PLTU 1 & 2 aktif proporsional
2	293	287.3	0	580.3	337.63	PLTU 1 & 2 aktif proporsional
3	284.5	285	0	569.5	331.35	PLTU 1 & 2 aktif proporsional
4	288.1	281	0	569.1	331.11	PLTU 1 & 2 aktif proporsional
5	292	285	0	577	335.71	PLTU 1 & 2 aktif proporsional
6	288	289	0	577	335.71	PLTU 1 & 2 aktif proporsional
7	287	284	0	571	332.22	PLTU 1 & 2 aktif proporsional

Tabel 4.19 Contoh Jadwal Operasi Perhari Sederhana dengan Kasus Pembobotan

Kasus	Total PLTU-1 (MW)	PLTU-2 (MW)	PLTA (MW)	Total (MW)	Biaya (Rp.)	Rata-Rata Emisi PLTU (ton CO <sub>2</sub> )	Rata-Rata Emisi PLTA (Kg CO <sub>2</sub> )	Rata-Rata Emisi CH <sub>4</sub> PLTA (Kg CO <sub>2</sub> )	Keterangan
1	2017.9	1995.8	15.75	4029.45	Rp 2,369,181,925.00	221.31	199.92	399.85	Fokus Biaya, PLTU Lebih Dominan
2	2017.9	1995.8	15.75	4029.45	Rp 2,369,425,694.00	187.79	150.09	299.89	Biaya Lebih rendah namun Emisi

									tergolong tinggi
3	2017.9	1995.8	15.75	4029.45	Rp 23,694,299,051.00	167.64	99.96	199.92	Penurunan Seimbang Biaya dan Emisi
4	2017.9	1995.8	15.75	4029.45	Rp 2,369,669,190.00	167.55	49.98	100	Pembobotan Efektif dari W1 dan W2 Biaya dan Emisi Turun
5	2017.9	1995.8	15.75	4029.45	Rp 2,409,581,838.00	167.5	20.01	40.02	Hanya Fokus pada penurunan Emisi kerja PLTA Lebih Dominan

Berdasarkan Tabel 4.18 dan Tabel 4.19 pertimbangan penjadwalan sebagai berikut:

1. Pembangkit Hidro dioperasikan secara maksimal.
2. Pembangkit Termal hanya hidup satu unit jika beban rendah untuk efisiensi.
3. Kedua Unit Pembangkit Termal hidup saat beban tinggi namun tidak overload.
4. Fungsi Algoritma Dragonfly dan pembobotan untuk menentukan kombinasi Pembangkit yang paling efisien dan minim emisi dan juga mempertimbangkan Start-up/ shutdown cost, perubahan daya perjam, dan Water Constrain pada pembangkit Hidro.
5. Penurunan Biaya operasi dari pembobotan yang memprioritas penurunan biaya operasi sebesar 6.2%. Persentase angka penurunan diperoleh dari biaya produksi terbesar dikurangi nilai produksi terkecil dibagi dengan biaya produksi terbesar lalu dikalikan 100%.
6. Penurunan Emisi PLTU dari kasus tanpa pembobotan dan menggunakan pembobotan turun sebesar 6.1%. Persentase angka penurunan diperoleh dari nilai emisi PLTU terbesar dikurangi nilai emisi PLTU terkecil dibagi dengan nilai emisi PLTU terbesar lalu dikalikan 100%.

7. Penurunan Emisi PLTA CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> Sebesar 63%. Persentase angka penurunan diperoleh dari nilai emisi PLTA terbesar dikurangi nilai emisi PLTA terkecil dibagi dengan nilai emisi PLTA terbesar lalu dikalikan 100%
8. Nilai 1 kWh sama dengan 623,28 gCO<sub>2</sub>/kWh sehingga dalam 1 hari Unit 1 PLTU Sudimoro Pacitan menghasilkan rata-rata 179.67 kgCO<sub>2</sub>e/kWh.
9. Nilai 1 kWh sama dengan 0.01 gCO<sub>2</sub>/kWh sehingga dengan Persamaan (2.19) maka:

$$\begin{aligned}
 F_{CH_4} &= k \cdot A \cdot e^{\alpha \cdot H} \\
 &= 0.01 \text{ mg/h} * 1430000 * 0.05 * 8 * 356 \\
 &= 5720 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2/\text{hari} \\
 &= 5.720 \text{ Kg CH}_4/\text{m}^2/\text{hari}
 \end{aligned}$$

Dan dalam kurun waktu setahun maka 1 Kwh setara dengan:

$$\begin{aligned}
 F_{CH_4} &= 50\% * \text{energi yang dihasilkan} * \text{waktu operasi} \\
 &= 0.5 * 1.600.000 * 182.5 \\
 &= 0.0004 \text{ kg CO}_2\text{e} \\
 &= 4 \text{ g CO}_2\text{e}
 \end{aligned}$$

#### 4.5 Intensitas Emisi PLTU

Pada penelitian ini selain menghitung besarnya emisi yang dihasilkan oleh pembangkit peneliti juga menghitung besarnya intensitas emisi PLTU dengan menggunakan persamaan (2.9). Intensitas Emisi CO<sub>2</sub> PLTU yang telah ditetapkan oleh pemerintah Indonesia. Batas emisi PLTU mengacu pada jumlah emisi yang dihasilkan oleh per unit energi listrik yang dihasilkan. Intensitas Emisi PLTU Batubara di Indonesia berkisar 800-1050 gCO<sub>2</sub>/kWh tergantung pada efisiensi pembangkit dan kualitas jenis Batubara yang digunakan. Berikut data Intensitas Emisi PLTU dengan perhtingan menggunakan persamaan (2.9).

- Intensitas Emisi pada Kasus tanggal 1 Agustus 2024 Tanpa Pembobotan

$$\begin{aligned}
 \text{Intensitas Emisi} &= \frac{\text{Total Emisi CO}_2 \text{ (kg)}}{\text{Energi yang dihasilkan (kWh)}} \\
 &= \frac{331.52 \times 1000}{569.8 \times 1000} \\
 &= 0.582 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} \\
 &= 582 \text{ g CO}_2/\text{kWh}
 \end{aligned}$$

- Intensitas Emisi pada Kasus 1 tanggal 1 Agustus 2024 dengan sistem pembobotan.

$$\begin{aligned} \text{Intensitas Emisi} &= \frac{\text{Total Emisi CO}_2 \text{ (kg)}}{\text{Energi yang dihasilkan (kWh)}} \\ &= \frac{186.2 \times 1000}{569.8 \times 1000} \\ &= 0.327 \text{ kgCO}_2/\text{kWh} \\ &= 327 \text{ gCO}_2/\text{kWh}. \end{aligned}$$

Berikut Tabel data keseluruhan Intensitas Emisi PLTU Pacitan.

Tabel 4.19 Data Intensitas Emisi PLTU Pacitan tanpa pembobotan.

Tanggal	PLTU		Total Pembobotan Beban	Data Emisi Tanpa Pembobotan Sistem (tonCO <sub>2</sub> )	Intensitas Emisi PLTU	
	Unit 1	Unit 2			kgCO <sub>2</sub> /kWh	gCO <sub>2</sub> /kWh
1	285.3	284.5	569.8	331.52	0.5818	582
2	293	287.3	580.3	337.63	0.5818	582
3	284.5	285	569.5	331.35	0.5818	582
4	288.1	281	569.1	331.11	0.5818	582
5	292	285	577	335.71	0.5818	582
6	288	289	577	335.71	0.5818	582
7	287	284	571	332.22	0.5818	582

Berdasarkan Tabel 4.19 Intensitas PLTU Pacitan dibawah angka kisaran yang telah ditetapkan oleh pemerintah Indonesia yaitu berkisar 800-1050 gCO<sub>2</sub>/kWh dan dibawah Batasan emisi harian yaitu 0.918 tonCO<sub>2</sub>/MWh sebesar 582 gCO<sub>2</sub>/kWh. Maka PLTU Pacitan memiliki kinerja yang baik dalam mengurangi emisi Gas Rumah Kaca.

Pada Tabel 4.20 Hingga Tabel 4.23 memaparkan data Intensitas Emisi PLTU berdasarkan data Emisi setelah dilakukan pembobotan dengan sistem Algoritma Dragonfly.

Tabel 4.19 Intensitas Emisi Kasus 1 W<sub>1</sub>= 1 dan W<sub>2</sub>= 0

Tanggal	PLTU		Total Beban	W <sub>2</sub> = 0 Emisi		Intensitas Emisi PLTU	
	Unit 1	Unit 2		PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	kgCO <sub>2</sub> /kWh	gCO <sub>2</sub> /kWh

1	285.3	284.5	569.8	186.2	202.5	0.327	327
2	293	287.3	580.3	282.2	200.7	0.486	486
3	284.5	285	569.5	184.3	200.7	0.324	324
4	288.1	281	569.1	187.5	198.9	0.329	329
5	292	285	577	281.3	198.0	0.488	488
6	288	289	577	238.8	198.9	0.414	414
7	287	284	571	188.9	199.8	0.331	331

Tabel 4.20 Intensitas Emisi Kasus 1 W1= 0.25 dan W2= 0.75

Tanggal	PLTU		Total Pembobotan Beban	W2= 0.75 Emisi		Intensitas Emisi PLTU	
	Unit 1	Unit 2		PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	kgCO <sub>2</sub> /kWh	gCO <sub>2</sub> /kWh
1	285.3	284.5	569.8	186.28	151.88	0.327	327
2	293	287.3	580.3	190.9	151.53	0.329	329
3	284.5	285	569.5	186.18	150.53	0.327	327
4	288.1	281	569.1	183	149.18	0.322	322
5	292	285	577	188.62	148.5	0.327	327
6	288	289	577	191.31	149.18	0.332	332
7	287	284	571	188.3	149.85	0.330	330

Tabel 4.21 Intensitas Emisi Kasus 1 W1= 0.5 dan W2= 0.5

Tanggal	PLTU		Total Pembobotan Beban	W2= 0.5 Emisi		Intensitas Emisi PLTU	
	Unit 1	Unit 2		PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	kgCO <sub>2</sub> /kWh	gCO <sub>2</sub> /kWh
1	285.3	284.5	569.8	166.58	101.25	0.292	292
2	293	287.3	580.3	169.8	100.35	0.293	293
3	284.5	285	569.5	166.4	100.35	0.292	292
4	288.1	281	569.1	166.3	99.45	0.292	292
5	292	285	577	168.7	99	0.292	292
6	288	289	577	168.8	99.45	0.293	293
7	287	284	571	166.9	99.9	0.292	292

Tabel 4.22 Intensitas Emisi Kasus 1 W1= 0.75 dan W2= 0.25

Tanggal	PLTU		Total Pembobotan Beban	W2= 0.25 Emisi		Intensitas Emisi PLTU	
	Unit 1	Unit 2		PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	kgCO <sub>2</sub> /kWh	gCO <sub>2</sub> /kWh
1	285.3	284.5	569.8	166.45	50.6	0.292	292
2	293	287.3	580.3	169.64	50.2	0.292	292
3	284.5	285	569.5	166.4	50.2	0.292	292
4	288.1	281	569.1	166.28	49.7	0.292	292
5	292	285	577	168.62	49.5	0.292	292
6	288	289	577	168.62	49.7	0.292	292
7	287	284	571	166.84	50.0	0.292	292

Tabel 4.23 Intensitas Emisi Kasus 1 W1= 0 dan W2= 1

Tanggal	PLTU		Total Pembobotan Beban	W2= 1 Emisi		Intensitas Emisi PLTU	
	Unit 1	Unit 2		PLTU (ton CO <sub>2</sub> e/hari)	PLTA (Kg CO <sub>2</sub> e/hari)	kgCO <sub>2</sub> /kWh	gCO <sub>2</sub> /kWh
1	285.3	284.5	569.8	166.4	20.3	0.292	292
2	293	287.3	580.3	169.6	20.1	0.292	292
3	284.5	285	569.5	166.3	20.1	0.292	292
4	288.1	281	569.1	166.28	19.9	0.292	292
5	292	285	577	168.5	19.8	0.292	292
6	288	289	577	168.5	19.9	0.292	292
7	287	284	571	166.8	20.0	0.292	292

Berdasarkan Tabel 4.19 hingga Tabel 4.23 Intensitas PLTU Pacitan dengan menggunakan daya Emisi setelah Pembobotan dengan Algoritma Dragonfly nilai Intensitas dibawah angka kisaran yang telah ditetapkan oleh pemerintah Indonesia yaitu berkisar 800-1050 gCO<sub>2</sub>/kWh dan dibawah Batasan emisi harian yaitu 0.918 tonCO<sub>2</sub>/MWh dengan Intensitas Emisi terbesar yaitu 488 gCO<sub>2</sub>/kWh pada kasus 1 tanggal 5 Agustus 2024 dan Nilai Intensitas Emisi terkecil sebesar 292 gCO<sub>2</sub>/kWh. Maka PLTU Pacitan memiliki kinerja yang baik dalam mengurangi emisi Gas Rumah Kaca.

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil Algoritma Dragonfly dapat digunakan sebagai salah satu cara untuk optimasi penjadwalan Pembangkit Hidrotermal dengan sistem Pembobotan W1 dan W2. Penerapan penjadwalan sederhana yang dapat dilihat pada Tabel 4.18 dan Tabel 4.19.
2. Hasil simulasi optimasi penjadwalan dengan menggunakan Algoritma Dragonfly dengan pembobotan dapat menurunkan biaya operasi PLTU sebesar 6.2%, menurunkan Emisi PLTU CO<sub>2</sub> sebesar 6.1%, emisi PLTA CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> sebesar 63%. Dengan angka ekuivalen 1 kWh PLTU menghasilkan CO<sub>2</sub> setara dengan 623,28 gCO<sub>2</sub>/kWh dengan rata-rata PLTU Pacitan menghasilkan perhari sebesar 179.67 KgCO<sub>2</sub>/hari dan 1 kWh PLTA setara dengan 0.01 CO<sub>2</sub>/kWh dan rata-rata PLTA Ngebel 4 gCO<sub>2</sub>/Hari.
3. Intensitas Emisi yang dihasilkan oleh PLTU Pacitan berdasarkan data emisi tanpa pembobotan menggunakan perhitungan persamaan konstan sebesar 582 gCO<sub>2</sub>/kWh dan Intensitas Emisi berdasarkan data hasil pembobotan yaitu intensitas Emisi terbesar 488 gCO<sub>2</sub>/kWh dan angka Intensitas Emisi terkecil sebesar 292 gCO<sub>2</sub>/kWh atau menurunkan Intensitas Emisi terkecil 16% dan terbesar 50% intensitas Emisi.
4. Pengurangan emisi CO<sub>2</sub>e pada waduk atau reservoir PLTA yaitu aerasi air atau proses penambahan oksigen kedalam air untuk meningkatkan kualitas air, pengelolaan kualitas air, pengaturan aliran air, dan melakukan rehabilitasi seperti pengendalian vegetasi, pengelolaan endapan organik, dan kebijakan mitigasi emisi. Pengurangan emisi CO<sub>2</sub>e pada PLTU dapat dilakukan dengan penerapan teknologi pengendali emisi seperti penerapan *Electrostatic Precipitator* (ESP) dan *Bag Filter*.

## 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, saran teknis yang dapat penulis berikan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Studi lebih lanjut untuk mengembangkan sistem penjadwalan agar dapat mendeteksi dan memperhitungkan jumlah emisi pembangkit lebih terperinci berdasarkan jenis emisi yang dihasilkan oleh pembangkit termal seperti sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ), nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ), dan emisi Gas Rumah Kaca (GRK), dan kandungan metana ( $\text{CH}_4$ ) pada waduk atau reservoir PLTA.
2. Pengembangan sistem dengan memperhatikan *losses* pada jaringan, *Start-up/shutdown cost*, *Ramp-up/down constraints* atau perubahan daya per jam, *Water constraint*, dan kerugian transmisi lainnya yang berkaitan dengan biaya produksi dan mempengaruhi besarnya nilai emisi yang dihasilkan oleh pembangkit.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Widyastuti, C., Suyanto, H., Febrianini, D. R., Elektro, T., & Tinggi Teknik -Pln, S. (2015). Analisa Interkoneksi Sistem Menggunakan Dlgsilent (Studi Kasus Pltu Pulang Pisau Kalimantan Tengah). In *24 / Jurnal Sutet* (Vol. 5, Issue 1).
- [2] Putri. 2023. *Tak Sampai Target, Konsumsi Listrik RI Naik 4,45% Pada 2022*. (N.D.). Retrieved Mei 10, 2023, From <https://www.cnbcindonesia.com/research/20230203102404-128-410698/tak-sampai-target-konsumsi-listrik-ri-naik-445-pada-2022>.
- [3] Rahmat, S., & Abdullah, A. G. (2014). Koordinasi Hidro Thermal Unit Pembangkitan Jawa-Bali Menggunakan *Metode Dynamic Programming*. In *Electrans* (Vol. 13, Issue 2). <http://jurnal.upi.edu/>.
- [4] Abdullah, R., Dachyar, M., & Farizal, D. (2019). Seminar Dan Konferensi Nasional IDEC Optimalisasi Pembebanan Pembangkit Pada Sistem 500 Kv Jawa Bali Dengan Menggunakan *Cuckoo Search Algorithm*. *Jurnal: Transient*. Vol. 6, No. 4. Desember 2017. Issn: 2302-9927. 535.
- [5] Sutanto, H., Haryono, T., & Setiawan, A. A. (N.D.). 2017. Optimasi Penjadwalan Pada Pembangkit Di Jaringan 500 Kv Jawa-Bali Untuk Mengurangi Emisi Co 2 Menggunakan *Matpower 5.0*. *Jurnal: Transient*. Vol. 6, No. 4. Desember 2017. Issn: 2302-9927. 535.
- [6] Andini, P. P. U., Yunisa, Z., Tamala, A. R., Hasanah, N. A., Rizki, M. I. M., Pikoli, M. R., & Sugoro, I. (2022). Pengaruh Kedalaman Sedimen Terhadap Emisi Gas Metana (CH<sub>4</sub>) Di Situ Kuru. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(3), 579–587. <https://doi.org/10.14710/jil.20.3.579-587>.
- [7] Pusat Penelitian Dan Pengembangan Sumber Daya Air. 2014. Laporan Akhir Penelitian Kualitas Lingkungan Keairan Pada Badan Air. Kementerian Pekerjaan Umum Dan Penataan Ruang. Pusat Litbang Sumber Daya Air.
- [8] Febriana Nilasari, L., Agung Santoso, K., & Riski Jurusan Matematika, A. (2019). Penerapan Dragonfly Optimization Algorithm (Doa) Pada Permasalahan *Multiple Constraints Bounded Knapsack* (Studi Kasus: Kerajinan Bambu Hitam Desa Pugerbaru Kecamatan Maesan Kabupaten Bondowoso) (*Application of Dragonfly Optimization Algorithm (DOA) In Multiple Constraints Bounded Knapsack Problems* (Case Study: Black Bamboo Crafts Pugerbaru Village Maesan District

- Bondowoso Regency)). In *Majalah Ilmiah Matematika Dan Statistika* (Vol. 19, Issue 1). <https://jurnal.unej.ac.id/index.php/MIMS/index>.
- [9] Kanata, S., & Pramono Hadi, S. (N.D.). 2017. *Modified Improved Particle Swarm Optimization (Mipso) Sebagai Solusi Economic Dispatch Pada Sistem Kelistrikan 500 Kv Jawa-Bali*. *Jurnal: Transient*. Vol. 6, No. 4. Desember 2017. Issn: 2302-9927. 535.
- [10] Widiatmoko, K. A. (2021). Optimalisasi Operasi Ekonomis PLTMG Pada Kawasan Industri Dengan Metode Monte Carlo. *ENERGI & KELISTRIKAN*, 13(2), 123–130. <https://doi.org/10.33322/energi.v13i2.1222>.
- [11] Yulianto, A., & Winardi, B. (N.D.). 2017. Optimasi Economic Dispatch Pada Unit Pembangkit Pltu Tanjung Jati B Menggunakan Metode Sine Cosine Algorithm. *Jurnal: Transient*. Vol. 6, No. 4. Desember 2017. Issn: 2302-9927. 535.
- [12] Wibowo, B. S., Handoko, S., & Hermawan, H. (2021). Optimasi Ekonomi Dan Emisi Pembangkit Listrik Di Kalimantan Menggunakan Dragonfly Algoritmh. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 9(3), 619. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v9i3.619>.
- [13] Hällqvist, E. (N.D.). 2012. *Methane Emissions from Three Tropical Hydroelectrical Reservoirs*. Degree project in biology, Master of science (2 years), 2012 Examensarbete i biologi 30 hp till masterexamen, 2012 Biology Education Centre, Uppsala University Supervisors: Erik Sahlée and Luciana de Oliveira Vidal External opponent: Roger Andre Müller.
- [14] Chai, X., Tonjes, D. J., & Mahajan, D. (N.D.). 2016 *Methane Emissions as Energy Reservoir: Context, Scope, Causes and Methane Emissions as Energy Reservoir: Context, Scope, Causes and Mitigation Strategies Mitigation Strategies*. <https://commons.library.stonybrook.edu/techsoc-articles/9>.
- [15] Direktorat Teknik dan Lingkungan Ketenagalistrikan. 2020. Lampiran Buku Metodologi GRK Versi Tahun 2020. (N.D.) Metodologi Penghitungan Reduksi Emisi Dan/Atau Peningkatan Serapan GRK. Lampiran Buku Metodologi GRK Versi Tahun 2020.
- [16] Tangkilisan, Peils Yusac, dkk. 2015. Analisa Perhitungan *Specific Water Consumption* Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air Di Sistem Minahasa. E-Journal

- Teknik Elektro dan Komputer vol. 4, no. 5 (2015), ISSN: 2301-8402. Onard. (N.D.). *PEILS YUSAC TANGKILISAN\_080213125*.
- [17] Nagarajan, K., Rajagopalan, A., Angalaeswari, S., Natrayan, L., & Mammo, W. D. (2022). *Combined Economic Emission Dispatch of Microgrid With The Incorporation Of Renewable Energy Sources Using Improved Mayfly Optimization Algorithm. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022*. <https://doi.org/10.1155/2022/6461690>.
- [18] D. Marsudi. 2011. *Pembangkitan Energi Listrik, Edisi Kedua / Djiteng Marsudi*; Editor: Lameda Simarmata, | Perpustakaan Universitas Muhammadiyah Makassar. (N.D.). Retrieved November 13, 2023, From <https://library.unismuh.ac.id/opac/detail-opac?id=755>.
- [19] Syam. S. 2020. *Hidro-Termal Dengan Menggunakan Metode Gradien Orde Dua*. (N.D.). Yogyakarta: Deepublish.
- [20] Adya Pratama, D., Penangsang, O., & Ketut Aryani Jurusan Teknik Elektro, N. (2016). *Economic And Emission Dispatch Pada Sistem Transmisi Jawa Bali 500 Kv Berdasarkan RUPTL 2015-2024 Menggunakan Modified Artificial Bee Colony Algorithm. JURNAL TEKNIK ITS, 5(2)*.
- [21] Prayogo NRP, B., Rony Seto Wibowo, A., & Ir Ni Ketut Ar Yani, M. (N.D.). 2016. *Short Term Hydrothermal Coordination Generation Using Firefly Algorithm. TEK.ITS.2016*.
- [22] Vieri. 2022. *Penerapan Dragonfly Algorithm untuk Menyelesaikan Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows*. (N.D.). Repository Universitas Katolik Parahyangan.
- [23] Ehteram. M. 2023. *Application Of Machine Learning Models in Agricultural And Meteorological Sciences 9789811997334, 9789811997327, 9811997330 - EBIN.PUB*. (N.D.). Retrieved November 13, 2023, From <https://ebin.pub/application-of-machine-learning-models-in-agricultural-and-meteorological-sciences-9789811997334-9789811997327-9811997330.html.36>
- [24] NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration - *Carbon Dioxide, Methane Rise Sharply In 2007*. (N.D.). Retrieved November 13, 2023, From

[https://web.archive.org/web/20110811174656/http://www.noaanews.noaa.gov/stories2008/20080423\\_methane.html](https://web.archive.org/web/20110811174656/http://www.noaanews.noaa.gov/stories2008/20080423_methane.html)

- [25] Pasa. Faris. Alfaroby.2023. Aplikasi *Website* Perhitungan Estimasi Biaya Dan Emisi Dalam Pengembangan Energi Baru Terbarukan Secara *Realtime*. TELKATIKA, VOL. 3, NO. 1
- [26] Ardiansyah. Faiz.2024. Analisis Perhitungan Emisi Dari Pengembangan Energi Baru Terbarukan. e-Proceeding of Engineering: Vol.11, No.1 Februari 2024 | Page 68. ISSN: 2355-9365.
- [27] Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2019. Peraturan Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. 15 Tahun 2019. Tentang Baku Mutu dan Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal.
- [28] Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan. 2021. Peraturan Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia No. 13 Tahun 2021. Tentang Sistem Informasi Pemantauan Emisi Industri Secara Terus Menerus.
- [29] Budi. Rizky. Frimansyah Setya. Suparman.2013. Perhitungan Faktor Emisi Co2 PLTU Batubara Dan PLTN. Jurnal Pengembangan Energi Nuklir Vol. 15 No. 1.
- [30] LR. Widyastuti. 2018. Lampiran 1. Perhitungan Emisi CO<sub>2</sub> CH<sub>4</sub> Serta N<sub>2</sub>O Dari Pemakaian Listrik. Universitas Islam Indonesia.
- [31] Asra. I. Made. 2010. Lampiran 1. Energi dan Dampaknya Terhadap Lingkungan. Jurnal Meteorologi Dan Geofisika. Vol. 11 No.2 – November 2010: 131-139.
- [32] Tim CFP IPB University. 2019. Laporan Perhitungan Jejak Karbon. Bogor: IPB University.
- [33] Pujiati, dkk. 2020. Produksi Biogas Berbasis Biomassa. UNIPMA Press (Anggota IKAPI) Universitas PGRI Madiun. ISBN: 978-602-0725-76-5.
- [34] Mirjalili, S. (2016) Dragonfly Algorithm: A New Meta-Heuristic Optimization Technique for Solving Single-Objective, Discrete, and Multi-Objective Problems. Neural Computing and Applications, 27, 1053-1073. <https://doi.org/10.1007/s00521-015-1920-1>.
- [35] Suropto, Ir. Slamet. 2017. Sistem Tenaga Listrik. Penerbit: LP3M Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. ISBN: 978-602-5450-20-4.