

Optimasi *Economic Emission Dispatch* menggunakan *Whale Optimization Algorithm* untuk Penentuan Biaya Reduksi Emisi

INTAN LAILY MUFLIKHAH, JANGKUNG RAHARJO*, ASHWIN SASONGKO
SASTROSUBROTO

Universitas Telkom, Indonesia
Email: intanlaily001@gmail.com

Received 14 Januari 2024 | *Revised* 25 Februari 2024 | *Accepted* 1 Maret 2024

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Uap Batu bara menghasilkan zat SO₂, CO₂, NO₂, dan partikel yang merupakan emisi dari proses pembakarannya. Emisi tersebut menyebabkan peningkatan efek pemanasan global, kerusakan lingkungan, dan merusak kesehatan. Dikarenakan pembangkit batu bara masih banyak digunakan di Indonesia maka Economic Emission Dispatch yang dikombinasikan dengan algoritma Whale Optimization Algorithm menjadi solusi dalam pengurangan emisi pembangkit listrik. Dengan cara memasukkan nilai weighted sum pada fungsi biaya dan emisi agar dapat dilihat pembangkit mana yang memiliki kadar emisi lebih rendah untuk memenuhi beban listrik yang dibutuhkan. Pada simulasi tersebut didapatkan pengurangan kadar emisi sebesar 12,73% dibandingkan tanpa menggunakan weighted sum dengan algoritma WOA. Hal ini mampu untuk membantu program pemerintah dalam mengurangi emisi karbon agar tidak melebihi standar emisi yang telah ditetapkan sesuai dengan Peraturan Menteri Nomor P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019.

Kata kunci: PLTU batu bara, emisi, EED, WOA, weighted sum

ABSTRACT

Coal-fired power plants produce SO₂, CO₂, NO₂, and particulate matter as emissions from the combustion process. These emissions cause increased global warming effects, environmental damage, and damage to health. coal plants are still widely used in Indonesia, Economic Emission Dispatch combined with the Whale Optimization Algorithm is a solution for reducing power plant emissions. By entering the weighted sum value in the cost and emission functions, it can be seen which plants have lower emission levels to meet the required electricity load. The simulation obtained a reduction in emission levels of 12.73% compared to not using weighted sum with the WOA algorithm. This method is able to help government programs in reducing carbon emissions so as not to exceed the emission standards that have been set in accordance with Peraturan Menteri Nomor P.15/MENLHK/SETJEN/ KUM.1/4/2019.

Keywords: coal power plant, emission, EED, WOA, weighted sum

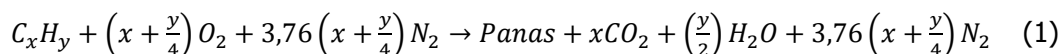
1. PENDAHULUAN

Kebutuhan pasokan listrik yang semakin meningkat dan jumlah pembangkit listrik energi baru terbarukan (EBT) yang belum memadai, menyebabkan penggunaan PLTU batu bara memiliki beban yang semakin meningkat **(Walujanto, dkk, 2019)**. Dikarenakan batu bara memiliki harga yang murah, pembangkit yang sudah lama berdiri, dan mudah dalam proses pengoperasiannya maka sampai sekarang PLTU batu bara masih sangat diminati sebagai bahan baku untuk kebutuhan konsumsi energi nasional **(Kementerian ESDM RI, 2018)**. Dari Tabel 1 diketahui laporan dari Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral (Pusdatin ESDM) pembangkit listrik yang menggunakan bahan baku batu bara mencapai 56% dari keseluruhan pembangkit listrik dari sumber daya lainnya **(Harsanto, 2018)**.

Tabel 1. Pembangkit Listrik Nasional Tahun 2018

Pembangkit Listrik	Persentase
PLTU batu bara	56%
PLTGU	16%
PLTA	8%
PLTD	6%

Dalam efisiensi pengolahan batu bara banyak menyisakan residu dan hanya 40% listrik yang dapat dihasilkan.



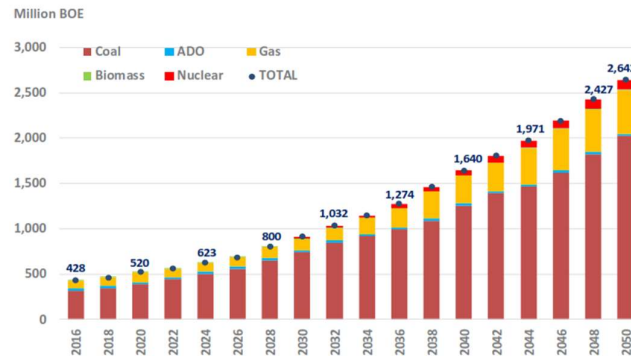
Residu tersebut berupa emisi yang sangat merusak kesehatan dan lingkungan sekitar. Emisi merupakan zat atau senyawa yang terlepas ke udara yang dapat mencemari lingkungan. Emisi yang dihasilkan dari proses tersebut berupa SO₂, NO_x, CO₂, dan partikel lainnya. Kemudian tingkat efisiensi bahan bakar fosil yang rendah menyebabkan sisa buangan berupa uap panas yang lebih banyak daripada listrik yang dihasilkan, atau setara 20% **(Almanda, 1999)** dimana uap panas ini menjadi radiasi bagi lingkungan dan merusak generator. Dari beberapa senyawa tersebut sebanyak 70% emisi yang dihasilkan berupa CO₂ yang menjadi penyumbang terbesar dari efek rumah kaca (GRK) **(Yudiartono, dkk, 2018)**.

Tabel 2. Dampak Emisi Batu Bara yang Terlepas di Udara Bagi Kesehatan dan Lingkungan

Jenis Emisi	Dampak Bagi Kesehatan	Dampak Bagi Lingkungan
SO ₂	-Menyebabkan ISPA -Radang paru – paru menahun	-Hujan asam yang dapat merusak ekosistem sungai, danau dan hutan -Menggangu kualitas jarak pandang mata
NO _x	-Menyebabkan ISPA -Kanker paru - paru	-Hujan Asam -Lapisan ozon semakin tipis
CO ₂	-Jika menghirup terlalu lama dapat menyebabkan ISPA	-Ekosistem rusak dan tidak seimbang -Pemanasan global (Efek Rumah Kaca)
Partikel	-Iritasi pada tenggorokan, hidung dan mata -Kerusakan paru-paru/bronkitis	-Menggangu kualitas jarak pandang mata

Tabel 2 menjabarkan tentang indikasi bahwa emisi dari pembangkit listrik menyebabkan penyakit saluran pernafasan dari yang ringan sampai ketinggian yang parah. Dan penyakit-penyakit tersebut menyebabkan kematian dini bagi penduduk yang seharusnya memiliki taraf hidup yang tinggi. Sebanyak 6.500 jiwa pertahun meninggal akibat terpapar polusi udara dari

pembangkit batu bara (**Sabubu, 2020**), jika pembangunan pembangkit listrik bahan bakar batu bara ini terus berlanjut, maka dipastikan angka kematian dini meningkat sebanyak 15.000 jiwa pertahun.



Gambar 1. Prediksi Penggunaan Bahan Bakar Pembangkit Tiap Tahun

Diketahui Indonesia menjadi penyumbang GRK terbesar ke lima di Dunia, dengan pembangkit listrik sebagai sektor kedua terbesar penyumbang polusi setelah sektor transportasi. Data dari *Indoneisa Energy Outlook 2019* menyatakan bahwa batu bara sebagai bahan bakar pembangkit akan terus meningkat tiap tahunnya dan tidak diimbangi dengan kenaikan sumber energi terbarukannya. Hal inilah yang mendorong pemerintah Indonesia untuk aktif dalam mengurangi emisi yang dihasilkan oleh pembangkit listrik, diantaranya dengan melakukan reformasi yang mengatur ambang batas emisi yang diperbolehkan untuk pembangkit listrik, yang tertuang dalam Peraturan Menteri Nomor P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 Tentang : Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal. Perusahaan Listrik Negara (PLN) juga menerapkan Clean Coal Technology. Proyek pembangkit berbasis EBT yang masih dikejar dalam pembangunannya, dan banyaknya pembangkit batu bara menyebabkan pengurangan emisi ini masih jauh dari tujuan pemerintah untuk mengurangi sebanyak 29% emisi karbon dengan kekuatan sendiri (*business as usual*) (**Mufarrihah, 2023**). Karena permasalahan tersebut yang tidak serta merta menghapuskan penggunaan pembangkit listrik batu bara, maka digunakanlah Teknik Economic Emission Dispatch (EED) dengan menggunakan optimasi algoritma yang dapat memenuhi permintaan pasokan listrik dengan memperhatikan efisiensi biaya dan penggunaan pembangkit yang memiliki emisi terendah. Algoritma Whale Optimization Algorithm (WOA) akan digunakan dalam optimasi, agar dapat diketahui seberapa efektifnya hasil yang akan didapatkan.

2. METODE

2.1 Sistem Pembangkit Listrik

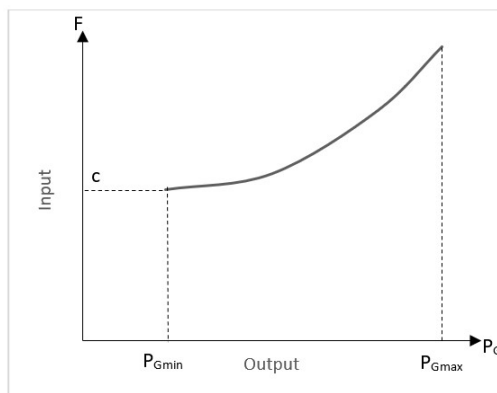
Sebuah sistem yang mengkonversikan bahan baku primer menjadi energi listrik, dan didistribusikan kepada pelanggan (**Hasanah, dkk, 2015**). Bahan baku tersebut berupa bahan baku fosil, air, angin, panas bumi, dll. Kemudian berdasarkan bahan baku pembuatannya, pembangkit listrik dibagi menjadi dua kategori yaitu :

- a. Pembangkit listrik dengan bahan baku yang tidak dapat diperbaharui I), biasanya disebut dengan pembangkit konvensional. Contohnya Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), dan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).

- b. Pembangkit listrik dengan bahan baku yang dapat diperbaharui (*renewable*), seperti Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), dll.

2.2 Karakteristik Input-Output Pembangkit Termal

Karakteristik Input-Output merupakan gambaran dari inputan bahan bakar dalam satuan liter/jam dan output yang merupakan hasil dari keluaran pembangkit (MW).



Gambar 2. Input-Output Pembangkit Thermal

Pada Gambar 2 memperlihatkan kurva yang ideal dari input-output pembangkit thermal (**Pratama, dkk, 2016**). Pada pembangkit thermal terdapat batasan minimal dan maksimal suatu pembangkit dapat beroperasi. Dimana outputan tidak boleh kurang dan melebihi nilai batas maksimalnya. Berikut merupakan persamaan dalam tingkat kedua dari karakteristik input-output pembangkit thermal (**Angdrie, dkk, 2012**).

$$F(P) = a + bP + cP^2 \quad (2)$$

$F(P)$ merupakan input dari pemakaian bahan bakar (liter/jam), sedangkan a, b, c merupakan koefisien dari pembangkit listrik dan P merupakan output pembangkit listrik (MW).

2.3 Fungsi Multi-Objektif pada *Economic Emission Dispatch* (EED)

EED merupakan fungsi persamaan dengan mencari nilai optimal dari biaya dan emisi sehingga dihasilkan biaya dan emisi keluaran yang serendah mungkin dari pembangkit saat digunakan.

- a. Fungsi Biaya (*Economic*)

Fungsi biaya memiliki dua sub kategori, yaitu biaya tetap dan biaya variabel (**Marsudi, 2016**). Biaya tetap adalah biaya yang akan terus ada meskipun pembangkit dalam keadaan tidak beroperasi. Dimana biaya tetap memiliki dua koefisien yaitu a dan b . (a) merupakan biaya penyusutan dan bunga, dan (b) merupakan biaya pemeliharaan alat dan biaya pegawai. Biaya variabel (c) merupakan biaya yang dibutuhkan saat pembangkit dalam keadaan beroperasi, seperti biaya bahan bakar. Koefisien tersebut kemudian disatukan dalam bentuk persamaan dan menjadi fungsi biaya yang berfungsi mencari nilai optimal dari suatu pembangkit dan menghasilkan total biaya yang paling sedikit. Namun dalam menentukan biaya terendah tersebut harus memenuhi Batasan *equality* dan *inequality*nya.

$$F_T = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (3)$$

$$FC_i(P_i) = a_i + b_iP + c_iP^2 \quad (4)$$

Dimana F_T merupakan total biaya pembangkit listrik (Rp), $FC_i(P_i)$ merupakan fungsi biaya pembangkit listrik i (Rp/jam). a_i, b_i, c_i adalah koefisien dari pembangkit listrik i. P_i merupakan outputan pembangkit listrik i (MW). N adalah jumlah pembangkit listrik dan i merupakan indeks pembangkit ke- i ($i= 1,2,3,\dots,N$).

b. Fungsi Emisi (*Emission*)

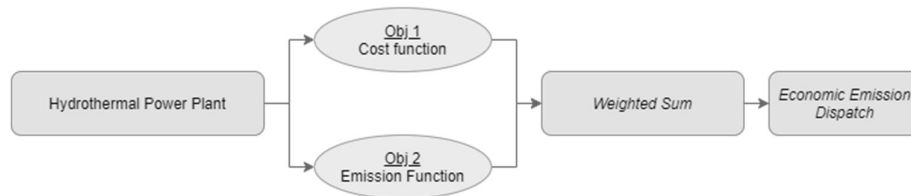
Fungsi dari nilai ekonomi dan emisi adalah sama, namun yang membedakan adalah menekankan pada nilai emisi, dimana koefisien pada persamaan tersebut diubah menjadi koefisien emisi, seperti keterangan pada persamaan berikut ini (**Arindra, dkk, 2016**).

$$FE_i(P_i) = d_i + e_iP + f_iP^2 \quad (5)$$

$FE_i(P_i)$ adalah fungsi Emisi dari pembangkit listrik i (gr/jam). d_i merupakan koefisien emisi SO₂ dari pembangkit i. e_i merupakan koefisien emisi CO₂ dari pembangkit i, dan f_i merupakan koefisien emisi NO_x dari pembangkit i

c. Fungsi EED

Dengan metode *weight sum* yaitu dengan menggabungkan persamaan fungsi ekonomi dan emisi menjadi multi-objektif EED (**Demirel, 2004**) menghasilkan keluaran berupa nilai biaya dan emisi yang optimal.



Gambar 3. Weight Sum untuk mencari nilai EED yang optimum

Gambar 3 memperlihatkan terdapat dua fungsi objektif yang bisa dilambangkan sebagai nilai W_1 yaitu *cost function* atau nilai biaya dan W_2 merupakan *emission function* atau nilai emisi, dimana antara W_1 dan W_2 harus sama dengan 1 dan nilai antara W diisi sesuai dengan skala prioritas yang akan dicapai (**Pratama, dkk, 2016**). Misalnya nilai $W_1=0.75$ $W_2=0.25$ | $W_1 + W_2=1$. Berikut ini merupakan persamaan dari fungsi multi-objektif EED.

$$F = W_1 \cdot \sum_{i=1}^N (FC_i) + W_2 \cdot \sum_{i=1}^N (FE_i) \quad (6)$$

F merupakan nilai fungsi dari tujuan EED. FC adalah fungsi biaya dan FE adalah fungsi emisi.

d. Batasan

Constrains adalah batasan yang digunakan untuk mempertahankan nilai konsistensi data. Batasan ini harus digunakan karena dalam perhitungan pembangkit listrik terdapat aturan yang tidak boleh dilanggar guna proses perhitungan dan operasi berjalan dengan stabil. Terdapat tiga constraints yang digunakan dalam EED, yaitu

Equality yang mengacu pada daya yang masuk harus sama dengan daya yang dikeluarkan, yang dapat dinyatakan dalam persamaan (7).

$$\sum P_i = P_d \quad (7)$$

Dimana merupakan P_i nilai daya yang dikeluarkan dari pembangkitan dan P_d merupakan total daya yang dibutuhkan. Yang kedua adalah *Inequality* yang memberi Batasan daya yang dihasilkan oleh setiap generator atau pembangkit tidak boleh kurang dan melebihi ambang batas yang telah ditetapkan. Dimana P_{min} merupakan ambang batas minimum daya yang harus dihasilkan, dan P_{max} merupakan ambang batas maksimal daya yang boleh dihasilkan. Dan yang ketiga adalah nilai Ramp yang dapat mengukur seberapa cepat penurunan atau lonjakan daya yang dihasilkan, ini berguna jika saat terjadi beban puncak maka pembangkit tidak kekurangan daya yang nantinya akan didistribusikan ke pelanggan.

2.4 Whale Optimization Algorithm

Terinspirasi dari perburuan paus bungkuk (*Humpback*) dimana saat paus tersebut mendapatkan lokasi mangsanya, dia akan membuat suatu jebakan berupa gelembung yang mengitari mangsanya dan kemudian dipersempit gerakannya. Saat mangsanya terjebak paus bungkuk akan langsung memakan buruan tersebut. Perilaku paus inilah yang membuat Seyedali Mirjalili at. El (**Faseela, dkk, 2018**) membuat algoritma tersebut. WOA kemudian diujikan dengan beberapa algoritma lain yang setipe yaitu *nature-inspired metaheuristic*, yaitu Genetic Algorithm (GA) dan Particle Swarm Optimization (PSO) (**Jangir, dkk, 2016**). Hasil yang didapat berupa kombinasi nilai optimum daripada dua algoritma yang diujikan.

Pada algoritma WOA terdapat beberapa tahap untuk mencapai nilai optimal, yaitu:

a. *Exploration Phase*

Saat dimana paus berkelana mencari mangsa (*search for the prey*) yang ditulis dengan rumus

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{rand} - \vec{X}| \quad (8)$$

$$\vec{X}(iter + 1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (9)$$

Dimana \vec{X} merupakan perwujudan dari titik lokasi paus/ pemangsa, \vec{D} mewakili jarak antara mangsa dan paus, dan \vec{X}_{rand} mewakili *random position vector*.

b. *Encircling Prey*

Proses paus dalam menjebak mangsanya dimodelkan dengan persamaan (10) dan (11).

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(iter) - \vec{X}(iter)| \quad (10)$$

$$\vec{X}(iter + 1) = \vec{X}_p(iter) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (11)$$

\vec{A} merupakan nilai koefisien untuk mencari vektor posisi dengan nilai random $[-a, a]$ $[-1, 1]$ dan \vec{C} merupakan koefisien dari vektor (**Chao, dkk, 2020**). \vec{X}_p merupakan solusi terbaik yang didapat untuk sementara, dan jika didapatkan nilai terbaik, maka solusi akan diperbaharui.

c. *Exploitation Phase (Bubble net attacking)*

Dalam perburuan dilakukan pengukuran jarak antara pemangsa (paus humpback) dan buruannya, yang kemudian dituangkan dalam persamaan (12).

$$\vec{X}(iter + 1) = \vec{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}(iter) \tag{12}$$

Dimana \vec{D} merupakan jarak antara pemangsa dan buruannya. Yang dapat dicari dalam rumus $\vec{D} = |X_p(iter) - \vec{X}(iter)|$. Nilai l merupakan nilai random antara [-1,1].

Dalam masa *exploitation phase* terdapat dua mekanisme dalam mencari solusi terbaik, yaitu *shrinking encircling mechanism* dan *spiral updating position*. Karena terdapat dua mekanisme pencarian mangsa, maka dalam persamaannya diasumsikan tiap pencarian mangsanya sama besar, yaitu 50% per skenario.

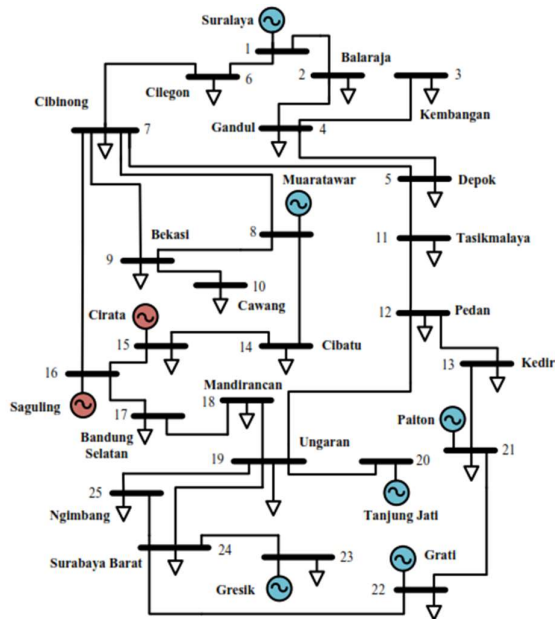
$$\vec{X}(iter + 1) = \begin{cases} \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{jika } p < 0.5 \\ \vec{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}(iter) & \text{jika } p \geq 0.5 \end{cases} \tag{13}$$

p merupakan nilai random antara [0,1]. Setelah diketahui nilai akhir dari kedua pencarian, maka akan diseleksi Kembali untuk dijadikan hasil akhir pencarian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Masukan

Beberapa data diperlukan dalam proses pengerjaan EED menggunakan WOA, diantaranya adalah penggunaan sistem Jawa Bali Grid 500kV Ruptl 2014-2024 (Eliezer, dkk, 2016). Gambar 4 memperlihatkan 25 bus dan 8 generator utama yaitu P_1 (Bus 1 PLTU Suralaya), P_2 (Bus 8 PLTU Muaratawar), P_3 (Bus 15 PLTA Cirata), P_4 (Bus 16 PLTA Saguling), P_5 (Bus 20 PLTU Tanjung Jati), P_6 (Bus 21 PLTU Patton), P_7 (Bus 22 PLTU Grati), dan P_8 Bus 23 PLTU Gresik). Kemudian data nilai fungsi biaya, fungsi emisi, dan data nilai ramp pada pembangkit.



Gambar 4. Pembangkit listrik Jawa Bali Grid

Karakteristik pembangkit yang berisi konstanta fungsi biaya ($a_i, b_i, dan c_i$) dan konstanta fungsi emisi ($d_i, e_i, dan f_i$), batasan generator yaitu $P_{i,min}$ (MW), $P_{i,max}$ (MW), dan batasan laju perubahan daya atau *ramp rate* (MW/jam) yang digunakan sebagai masukan pada simulasi dengan algoritma WOA ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Karakteristik Pembangkit

Gen	Fungsi Biaya F(C)			Fungsi Emisi F(E)			Batasan Daya		Ramp Rate
	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	$P_{i,min}$	$P_{i,max}$	
P_1	57.543.208,00	3.332.794	-400	34.251.909,80	1.983.806,20	-236,7	1.610	4.200	300
P_2	519.353.767,10	3.047.098	691	72.202.664,70	423,6	96,2	1.080	2.700	510
P_3	0	400	0	0	0	0	403	1.008	930
P_4	0	660	0	0	0	0	696	1.740	660
P_5	133.177.025,60	2.828.349	-80	93.654.729,70	1.988.993,90	-56,9	1.856	4.640	337
P_6	180.205.527,90	2.104.640	218	123.428.443,80	1.441.534,90	149,5	1.886	4.714	420
P_7	140.621.312,50	2.545.832	203	140.621.312,50	2.545.832,50	62,1	546	1.365	240
P_8	112.522.922,10	5.877.235	-73	24.146.549,80	1.261.209,30	-15,8	1.216	3.040	420

Rekam daya beban yang akan digunakan, diambil pada tanggal 09 Juni 2014 saat terjadinya beban puncak. Rekam daya tersebut kemudian diambil dalam empat waktu yang berbeda, yaitu pada pukul 18:00, 19:00, 20:00, dan 21:00 WIB, yang ditunjukkan pada Tabel 4.

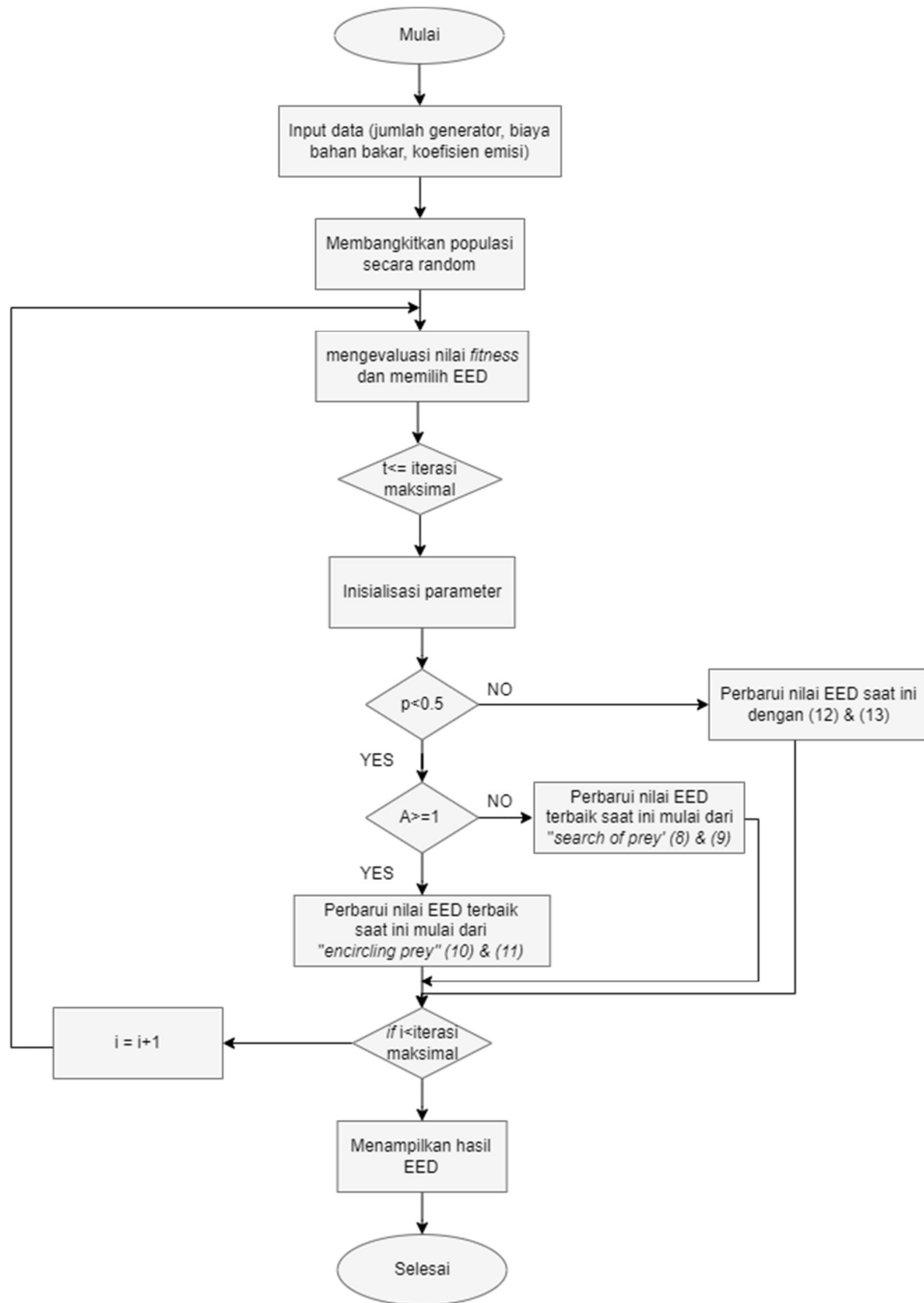
Tabel 4. Beban Daya Pembangkit

Pukul	Beban (MW)
18.00	13.096
19.00	13.108
20.00	12.863
21.00	12.228

3.2 Simulasi dalam menggunakan WOA

Berikut merupakan prosedur yang dilakukan dalam penggunaan algoritma WOA :

- Menginisialisasi data masukan berupa input beban daya, nilai equality dan inequality, nilai ramp, dan nilai fungsi ekonomi maupun fungsi biaya dari pembangkit dan menentukan batas variabel dari pembangkit yaitu $N_1, N_2, N_3, \dots, N_x$.
- Mengatur fungsi EED, jumlah maksimal iterasi, dan nilai parameter yang dibutuhkan algoritma WOA seperti $\vec{a}, \vec{A}, \vec{C}$.
- Memasukkan nilai data magsa yang nantinya akan dipilih secara random oleh sistem yang dibuat berdasarkan nilai fitnessnya (baik tidaknya nilai suatu solusi yang ditemukan). Kandidat yang memiliki nilai fungsi biaya dan emisi yang optimal akan dipilih, kemudian akan dibandingkan kembali. Dan kandidat yang sesuai dengan nilai iterasi maksimalnya akan ditampilkan sebagai hasil. Gambar 5 berikut ini merupakan diagram alir dari algoritma WOA.



Gambar 5. Diagram alir EED menggunakan Algoritma WOA

3.3 Hasil simulai Economic Emission Dispatch menggunakan WOA

Dalam pencarian nilai optimum dari EED digunakan iterasi maksimal sebanyak 150 kali, parameter agen sebanyak 50 search agen, jumlah matrix 8, dan penggunaan lima kondisi pembobotan yaitu nilai fungsi biaya (W_c) dan fungsi emisi (W_s).

Tabel 5. Nilai pembobotan

Kondisi	W_c	W_s
Kondisi A	1	0
Kondisi B	0,75	0,25
Kondisi C	0,5	0,5
Kondisi D	0,25	0,75
Kondisi E	0	1

Pada Tabel 5 menunjukkan kondisi A yang ditekankan pada nilai ekonomis yang didapat, tanpa mempertimbangkan berapa emisi yang akan dikeluarkan, pada kondisi B nilai emisi dipertimbangkan namun dalam jumlah yang sedikit. Pada kondisi C antara nilai ekonomi dan emisi dipertimbangkan hasilnya sama besar. Pada kondisi D lebih mementingkan nilai emisi yang dikeluarkan. Dan pada kondisi E nilai emisi lebih dipertimbangkan tanpa melihat biaya yang akan dikeluarkan.

Hasil simulasi EED menggunakan WoA yaitu daya yang dihasilkan masing-masing generator dalam kondisi optimal dan biaya pembangkitan serta emisi yang dihasilkan untuk berbagai variasi beban serta ditunjukkan pada Tabel 6. Daya yang dihasilkan dalam menyuplai beban memenuhi batas persamaan (7) dan setiap generator tidak melanggar batasan daerah operasi dayanya serta tidak ada *ramp rate* yang terlanggar. Tabel 7 menunjukkan biaya tambahan yang diperlukan untuk mengurangi emisi. Dibutuhkan biaya IDR2.414.763,73 untuk mengurangi 1 ton emisi.

Tabel 6. Total Biaya dan Emisi per Jam

Kondisi	Waktu	Daya (MW)	Biaya (IDR)	Emisi (ton)
A	18:00	13.096	33.689.139.196	17.544,48
	19:00	13.108	33.689.139.196	17.544,48
	20:00	12.863	33.616.503.606	17.337,78
	21:00	12.228	32.325.974.017	16.493,80
Rata-rata			33.330.189.004	17.230,14
B	18:00	13.096	36.072.705.012	17.865,22
	19:00	13.108	33.703.229.519	17.113,68
	20:00	12.863	33.119.003.752	16.775,17
	21:00	12.228	32.833.135.801	16.602,50
Rata-rata			33.932.018.521	17.089,14
C	18:00	13.096	37.881.617.905	16.897,14
	19:00	13.108	33.815.808.960	15.892,70
	20:00	12.863	33.208.062.529	15.462,43
	21:00	12.228	33.064.103.874	15.373,29
Rata-rata			34.492.398.317	15.906,39
D	18:00	13.096	39.040.136.360	16.067,58
	19:00	13.108	35.694.049.369	15.543,20
	20:00	12.863	35.693.829.609	15.543,20
	21:00	12.228	35.693.481.360	15.543,20
Rata-rata			36.530.374.175	15.674,30
E	18:00	13.096	38.954.770.656	15.729,42
	19:00	13.108	39.347.401.699	16.215,07
	20:00	12.863	35.930.330.791	15.309,92
	21:00	12.228	35.021.491.885	15.178,45
Rata-rata			37.313.498.758	15.608,21

Tabel 7. Biaya Tambahan untuk Mengurangi Emisi

Kondisi	w_c	w_s	Biaya (IDR)	Emisi (ton)	Reduksi Emisi (ton)	Biaya Tambahan (IDR)	Biaya tambahan/ton pengurangan emisi (IDR)
A	1,00	0,00	33.330.189.004	17.230,14	-	-	-
B	0,75	0,25	33.932.018.521	17.089,14	141,00	601.829.517	4.268.294,45
C	0,50	0,50	34.492.398.317	15.906,39	1.323,75	1.162.209.313	877.967,38
D	0,25	0,75	36.530.374.175	15.674,30	1.555,84	3.200.185.171	2.056.885,78
E	0,00	1,00	37.313.498.758	15.608,21	1.621,93	3.983.309.754	2.455.907,32
Rata-rata							2.414.763,73

Pada Tabel 6 dan Tabel 7 didapat dari simulasi EED menggunakan algoritma WoA dengan cara memasukkan daya total yang dibutuhkan pada setiap jam (18.00-20.00), kemudian dilakukan skenario pembobotan menggunakan *weighted sum*. Sehingga tabel tersebut memperlihatkan hasil pada masing-masing kondisi A, B, C, D, dan E berupa total biaya yang dikeluarkan setiap jam dan total emisi yang dihasilkan setiap jam. Dimana pada nilai biaya diukur dengan satuan US\$/jam dan pada nilai emisi diukur dengan satuan ton/jam.

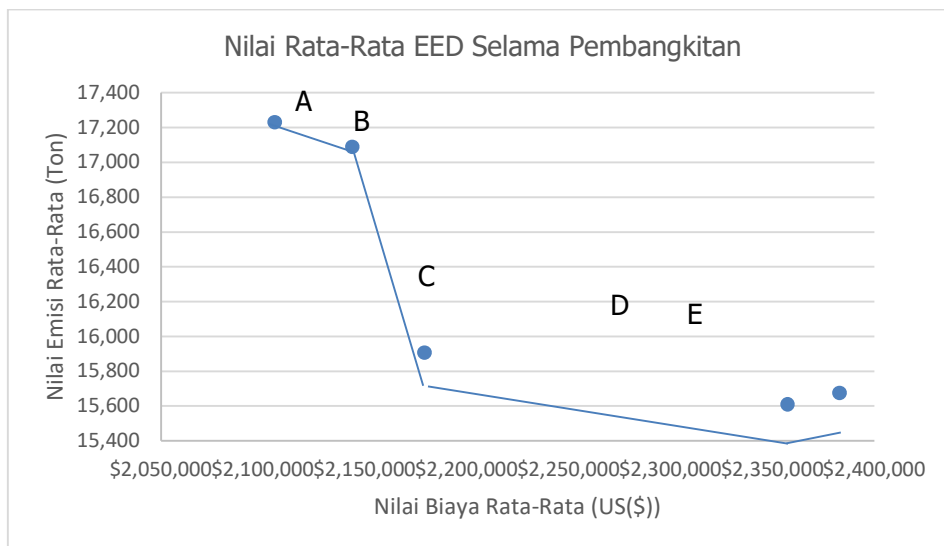
Sementara Tabel 8 menunjukkan perubahan daya masing-masing generator dalam melayani perubahan beban di setiap kondisi. Perubahan daya setiap generator pada setiap kondisi tersebut tidak ada yang melanggar ketentuan *ramp rate* yang dipersyaratkan.

Tabel 8. Perubahan Daya Pembangkitan

Kondisi	Waktu	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
A	18.00-19.00	214,68	0,00	15,15	24,80	-337,00	110,50	-16,13	0,00
	19.00-20.00	21,19	0,00	-303,62	89,18	0,00	167,46	-219,20	0,00
	20.00-21.00	-235,87	0,00	31,37	-152,55	0,00	-277,95	0,00	0,00
B	18.00-19.00	278,84	-344,49	316,37	37,82	34,82	-300,00	-11,42	0,06
	19.00-20.00	-44,91	0,00	-134,16	89,24	-34,82	0,00	-77,28	-43,06
	20.00-21.00	-305,09	0,00	-337,65	7,74	0,00	0,00	0,00	0,00
C	18.00-19.00	111,77	-287,82	17,35	741,09	-91,87	30,87	-89,38	-420,00
	19.00-20.00	4,70	0,00	-73,74	50,10	-129,14	-85,41	-11,51	0,00
	20.00-21.00	-350,00	0,00	417,52	-702,52	0,00	0,00	0,00	0,00
D	18.00-19.00	-350,00	-510,00	28,89	843,11	0,00	0,00	0,00	0,00
	19.00-20.00	0,00	0,00	223,31	-468,31	0,00	0,00	0,00	0,00
	20.00-21.00	0,00	0,00	-252,20	-374,80	0,00	0,00	0,00	0,00
E	18.00-19.00	-148,75	219,24	-61,91	-65,45	214,99	79,84	106,89	-332,85
	19.00-20.00	-37,17	-441,30	159,32	299,04	-129,76	8,06	-105,09	1,90
	20.00-21.00	-164,07	-68,70	-410,00	-25,62	212,14	-87,91	-1,80	-89,04
Ramp rate (MW)		300	510	930	660	337	420	240	420

3.4 Hubungan dari biaya pembangkit dan kadar emisi

Dari Tabel 6 dan Tabel 7 dapat dilihat bahwa nilai pembobotan antara w_c dan w_s sangat berpengaruh pada biaya pembangkit yang dibangkitkan dan emisi yang dihasilkan. Jika nilai w_c lebih ditekankan, maka biaya yang dikeluarkan akan lebih sedikit, namun tentu saja berbanding terbalik dengan emisi yang dihasilkan. Karena diketahui bahwa pembangkit listrik tenaga batu bara memiliki harga bahan baku yang murah, sekitar USD 70 per ton dengan nilai kalori 6.322 GAR (**ESDM RI, 2018**). Namun jika pembobotan lebih ditekankan pada nilai w_s maka emisi yang dihasilkan akan lebih sedikit, karena pembangkit yang dioptimalkan dalam pembangkitan adalah pembangkit yang memiliki emisi lebih sedikit atau 0, seperti pembangkit listrik tenaga hidro (PLTH) pada grid Jawa Bali.



Gambar 6. Pengaruh nilai pembobotan dalam pembangkitan

Pada Gambar 6, terlihat gap yang cukup besar pada kondisi B dan C dimana hal ini dapat dipengaruhi oleh kondisi optimasi dalam beberapa kali percobaan. Ini menandakan bahwa pada kondisi tersebut nilai yang dihasilkan adalah kondisi optimum dari sampel yang diujikan.

3.5 Perbandingan total biaya dan emisi dari beberapa algoritma

Setelah diketahui hasil dari pengujian algoritma WOA, diketahui bahwa algoritma tersebut dapat bekerja dengan baik dalam melakukan optimasi pengurangan biaya dan emisi. Oleh karena itu digunakan juga beberapa perbandingan untuk dapat melihat seberapa baik algoritma WOA bekerja. Dengan menggunakan data masukan yang sama, akan diperlihatkan berapa persentase dari beberapa kondisi dalam mengurangi atau menambah jumlah emisi yang dikeluarkan. Tabel 9 dan 8 memperlihatkan nilai dari referensi algoritma yang digunakan dalam pengurangan emisi dengan algoritma *Cuckoo Optimization Algorithm* (COA) (Rahmatullah, dkk, 2017) dan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO). Pada percobaan ini semua data disamakan agar hasil yang didapat sesuai dengan data masukan perbandingan.

Tabel 9. Karakteristik Generator Untuk Perbandingan

Gen	Fungsi Biaya F(C)			Fungsi Emisi F(E)		
	a _i	b _i	c _i	d _i	e _i	f _i
P ₁	44.445.587,75	391.059,27	-11.008.313	26.388.095,96	232.126,27	-6,53435
P ₂	447.887.239,80	673.189,59	-5.565.550	62.263.614,50	93.584	-0,7737
P ₃	0	6.000	0	0	0	0
P ₄	0	660	0	0	0	0
P ₅	192.669.508	125.456,19	35,8	135.397.090,20	8.816,75	25,15782
P ₆	17.209.148,67	382.129,48	-19,37	11.786.612,11	261.721,95	-13,2668
P ₇	25.244.481,54	371.803,55	8,09	7.702.435,50	113.442,50	2,467
P ₈	78.152.917,59	459.705,07	7,59	16.768.083	98.632	1,62795

Berikut ini adalah hasil dari optimasi *economic emission dispatch* menggunakan beberapa algoritma *nature-inspired metaheuristic*, dan menunjukkan berapa emisi yang dapat dikurangi dari setiap kondisi awal (A) yang tidak memperhitungkan emisi yang dikeluarkan ke kondisi lainnya dimana emisi sedikit demi sedikit diperhitungkan juga.

Tabel 10. Penguraan emisi dengan metode WOA

Kondisi	Total Biaya rata-rata(Rp/Jam)	Total Emisi (g/Jam)	Emisi yang dapat dikurangi dari kondisi awal (%)
Kondisi A	4.880.445.000	1.987.356.750	0
Kondisi B	5.045.422.500	1.968.773.500	0,93
Kondisi C	5.134.307.500	1.913.781.250	3,70
Kondisi D	5.237.150.000	1.749.372.500	11,97
Kondisi E	5.286.702.500	1.734.281.500	12,73

Tabel 11. Penguraan emisi dengan metode Cuckoo

Kondisi	Total Biaya rata-rata(Rp/Jam)	Total Emisi (g/Jam)	Emisi yang dapat dikurangi dari kondisi awal (%)
Kondisi A	4.661.464.021	2.144.324.359	0
Kondisi B	4.706.065.481	2.122.342.879	1,02
Kondisi C	4.711.404.808	2.097.476.058	2,18
Kondisi D	4.735.102.171	1.990.293.940	7,18
Kondisi E	5.147.727.763	1.940.483.743	9,5

Tabel 12. Penguraan emisi dengan metode PSO

Kondisi	Total Biaya rata-rata(Rp/Jam)	Total Emisi (g/Jam)	Emisi yang dapat dikurangi dari kondisi awal(%)
Kondisi A	4.554.072.063	2.048.226.668	0
Kondisi B	4.564.469.251	2.003.831.166	2,16
Kondisi C	4.590.215.984	1.990.558.655	2,81
Kondisi D	4.629.494.157	1.967.241.358	3,95
Kondisi E	5.171.401.981	1.871.127.458	8,64

Dari Tabel 10, Tabel 11, dan Tabel 12 diperlihatkan hasil dari pengurangan emisi yang didapat dari optimasi algoritma. Dimana algoritma WOA menunjukkan hasil yang lebih baik dalam menurunkan kadar emisi di setiap kondisi, namun karena pengurangan emisi berbanding terbalik dengan biaya yang harus dikeluarkan.

Untuk mendapatkan hasil yang lebih teliti, perlu dilakukan pembobotan yang lebih halus, sebagai contoh ditunjukkan pada Tabel 13.

Tabel 13. Pembobotan fungsi ekonomi dan fungsi emisi yang lebih halus

Kond	W_c	W_s	Kond	W_c	W_s	Kond	W_c	W_s	Kond	W_c	W_s
1	1	0	7	0,7	0,3	13	0,4	0,6	19	0,1	0,9
2	0,95	0,05	8	0,65	0,35	14	0,35	0,65	20	0,05	0,95
3	0,9	0,1	9	0,6	0,4	15	0,3	0,7	21	0	1
4	0,85	0,15	10	0,55	0,45	16	0,25	0,75			
5	0,8	0,2	11	0,5	0,5	17	0,2	0,8			
6	0,75	0,25	12	0,45	0,55	18	0,15	0,85			

4. KESIMPULAN

Whale Optimization Algorithm dapat digunakan dalam menyelesaikan masalah *economic emission dispatch*. Dari simulasi tersebut didapatkan bahwa besaran *weighted sum* atau pembobotan mempengaruhi hasil optimasi. Jika pembobotan lebih menekankan pada biaya yang rendah, maka emisi yang dihasilkan juga akan semakin besar, begitu pula sebaliknya. Hasil simulasi dari ketiga algoritma dapat disimpulkan bahwa algoritma WOA mampu mengoptimasi fungsi emisi seoptimal mungkin dengan hasil kadar emisi yang dihasilkan lebih rendah dari algoritma lainnya, dengan rata-rata 7.482,85 (ton/Jam). Namun algoritma PSO lebih seimbang dalam optimasi baik dari segi biaya maupun emisi yang dihasilkan, meskipun emisi yang dihasilkan masih lebih besar daripada optimasi algoritma WOA. Oleh karena itu, dalam menyelesaikan persoalan *economic emission dispatch* ini masih bisa dieksplorasi kembali dengan menggunakan algoritma-algoritma yang sudah dimodifikasi agar hasil yang didapat bisa lebih optimal daripada algoritma yang sudah diujikan. Pada simulasi tersebut didapatkan pengurangan kadar emisi sebesar 12,73% dibandingkan tanpa menggunakan *weighted sum* dengan algoritma WOA. Untuk mendapatkan hasil yang lebih teliti, perlu dilakukan pembobotan yang lebih halus.

DAFTAR RUJUKAN

- Almanda, D. (1999). Cogeneration Pembangkit Listrik Ideal. Jakarta: Majalah Elektro Indonesia. Retrieved from <https://www.elektroindonesia.com>.
- Angdrie, S. V., Patras, L. S., Tumaliang, H., & Lisi, F. (2012). Optimalisasi Biaya Bahan Bakar Untuk Penjadwalan Unit-Unit Pada Pembangkit Thermal Sistem Minahasa Dengan Metode Iterasi Lamda. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 1(2), 1-6. DOI: <https://doi.org/10.35793/jtek.v1i2.599>.
- Arindra, M, Wibowo, R.S., Riawan, D.C. (2016). Unit Commitment Pada Sistem Pembangkitan Tenaga Angin Untuk Mengurangi Emisi Dengan Menggunakan Particle Swarm Optimization. *Jurnal Teknik ITS*, 5(2). DOI: 10.12962/j23373539.v5i2.16122
- Chao, I.M., Hsiung, S.C., Liu, J.L. (2020). Improved Whale Optimization Algorithm Based on Inertia Weights for Solving Global Optimization Problems. *Advances in Technology Innovation*, 5(3), 147-155. DOI: <https://doi.org/10.46604/aiti.2020.4167>
- Demirel, Y., & Demiroren, A. (2004). Economic And Minimum Emission Dispatch. *WSEAS Transactions on Systems*, 3(4), 800- 804.
- Eliezer, G., Penangsang, O. (2016). Dynamic Economic Emission Dispatch Pada Sistem Transmisi Jawa-Bali 500kv Berdasarkan Ruptl Tahun 2014-2024 Menggunakan Metode Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO). Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2016.
- ESDM RI. (2018). Harga Jual Batubara untuk Penyediaan Tenaga Listrik untuk Kepentingan Umum. Retrieved from esdm.go.id

- Faseela, C. K., & Vennila, H. (2018). Economic And Emission Dispatch Using Whale Optimization Algorithm (Woa). *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 8(3), 1297~1304. DOI: 10.11591/ijece.v8i3.pp1297-1304.
- Harsanto, S. (2018). *Statistik Listrik 2012-2017*. Jakarta: BPS.
- Hasanah, A. W., Makkulau, A., & Fadhilah, Z. F. (2015). Perencanaan Pengembangan Sistem Pembangkit Listrik Di Pulau Jawa. *Jurnal Sutet*, 5(1).
- Jangir, P., Rajya, R., Prasaran, V., Limited, N., Bhesdadiya, R., Trivedi, I. N., & Jangir, N. (2016). Price Penalty Factors Based Approach For Combined Economic Emission Dispatch Problem Solution Using Dragonfly Algorithm. *IEEE (ICEETS-2016)*
- Kementerian ESDM RI. (2018). *Buku Panduan Energi dan Statistik Ekonomi Indonesia*. Jakarta: Kementerian ESDM RI.
- Marsudi, D. (2016). *Operasi Sistem Tenaga Listrik Edisi 3*. Yogyakarta
- Mufarrihah, M. (2023). *Kesiapan Regulasi Indonesia untuk Memenuhi Komitmennya dalam COP21*. Retrieved from <https://lk2fhui.law.ui.ac.id/>
- Pratama, D. A., Penangsang, O., & Aryani, N. K. (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). ISSN: 2337-3539 (2301-9271) Print.
- Rahmatullah, A.D., Wibowo, R.S., Fahmi, D. (2017). Pendekatan Dengan Cuckoo Optimization Algorithm Untuk Solusi Permasalahan Economic Emission Dispatch. *Jurnal Teknik ITS*, 6(1). DOI: 10.12962/j23373539.v6i1.22610
- Sabubu, T. A. (2020). Pengaturan Pembangkit Listrik Tenaga Uap Batubara Di Indonesia Prespektif Hak Atas Lingkungan Yang Baik Dan Sehat. *Journal UII*, 5(1), 72-90. <https://doi.org/10.20885/JLR.vol5.iss1.art5>.
- Walujanto, Suharyanti, Pambudi, S. H., Wibowo, J. L., & Pratiwi, N. I. (2019). *Indonesia Energy Outlook*. Jakarta: DEN.
- Yudiarsono, Anindhita, Sugiyanto, A., Wahid, L. M., & Adiarso. (2018). *Outlook Energi Indonesia 2018*. Jakarta: PPIPE