

Optimasi Pengoperasian Pembangkit Listrik Untuk Minimalisasi Emisi Gas Buang Menggunakan Metode Quadratic Constrained Programming

Patria Julianto¹, Risna Febrianti²

[Submission: 15-09-2023, Accepted: 30-01-2024]

Abstract— The current development and advancement of technology have increased the demand for electricity on domestic, commercial, and industrial scales. The power plants used in the power system are mostly thermal plants. Thermal power plants operate on fuels that are generally fossil fuels, such as gas, oil, and coal, so they need special attention. The gas emissions caused by thermal power plants can be nitrogen oxide (NO_x), sulfur dioxide (SO₂), and carbon dioxide (CO₂). These emissions impact the environment and will contribute significantly to global greenhouse gas emissions and climate change. This research aims to minimize power plant emissions by optimizing emission dispatch. The objective function in emission dispatch is the minimum emission of exhaust gases, which consists of the generator power output variable and the emission coefficient of each operating power plant. This study uses the quadratic constrained programming (QCP) method to determine the optimum power output of the generators and successfully implemented it on the IEEE-30 bus system and the Java-Bali 500 kV system.

Intisari— Pertumbuhan jumlah penduduk serta kemajuan teknologi saat ini menyebabkan kebutuhan energi listrik selalu meningkat setiap waktu, baik untuk skala listrik rumah tangga, komersil maupun industri. Untuk memenuhi kebutuhan energi listrik tersebut sebagian besar dilakukan menggunakan pembangkit listrik termal. Pembangkit termal beroperasi dengan bahan bakar yang umumnya berupa bahan bakar fosil seperti gas, minyak dan batu bara sehingga akan menghasilkan emisi gas buang yang berbahaya seperti nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO₂), dan karbon dioksida (CO₂). Emisi gas buang tersebut berdampak buruk pada lingkungan sekitar serta akan berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca dan perubahan iklim global. Penelitian ini mempunyai tujuan untuk meminimalisasi emisi gas buang yang dihasilkan pembangkit melalui optimasi emission dispatch. Fungsi objektif pada emission dispatch merupakan emisi gas buang minimal yang terdiri dari variabel keluaran daya pembangkit dan koefisien emisi masing-masing pembangkit listrik yang beroperasi. Pada penelitian ini emission dispatch diselesaikan menggunakan metode quadratic constrained programming (QCP) dan telah berhasil diujicoba dengan menggunakan data sistem IEEE-30 bus dan sistem Jawa-Bali 500 kV.

Kata Kunci— Pembangkit termal; emission dispatch; quadratic constrained programming.

¹Dosen, Jurusan Teknik Elektro Universitas Borneo Tarakan, Jl. Amal Lama No.1, Tarakan, 77116, Indonesia. (telp: 08115307023; fax: 0551-2052558; e-mail: patria@borneo.ac.id)

²Mahasiswa, Jurusan Teknik Elektro Universitas Borneo Tarakan, Jl. Amal Lama No.1, Tarakan, 77116, Indonesia. (telp: 08115307023; e-mail: febriantirisna2000@gmail.com)

I. PENDAHULUAN

Pertumbuhan jumlah penduduk dan kemajuan teknologi saat ini menyebabkan terjadinya peningkatan kebutuhan energi listrik, baik untuk skala listrik rumah tangga, komersial maupun industri. Hal tersebut menyebabkan tingkat permintaan kebutuhan pasokan energi listrik juga akan meningkat sehingga perusahaan penyedia energi listrik harus dapat menyediakan energi listrik sesuai dengan kebutuhan permintaan konsumen secara berkesinambungan. Permasalahan tersebut tidak dapat diatasi secara langsung hanya dengan melakukan penambahan jumlah pembangkit listrik, tetapi perlu dilakukan cara lain dengan memanfaatkan sumber daya yang tersedia. Oleh karena itu salah satu solusinya adalah dengan melakukan operasi pembangkit listrik secara optimum dengan tujuan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik konsumen namun tetap memperhatikan biaya produksi pembangkitan energi listrik dan emisi gas buang yang dihasilkan.

Pada pengoperasian sistem tenaga listrik secara optimum terdapat beberapa teknik optimasi yang umum digunakan antara lain: *economic dispatch* dan *emission dispatch*. Teknik optimasi yang fungsi objektifnya biaya pembangkitan dikenal dengan nama *economic dispatch*, sedangkan jika fungsi objektifnya emisi gas buang disebut dengan *emission dispatch*. Penelitian ini akan difokuskan pada *emission dispatch* dengan tujuan untuk mereduksi emisi gas buang yang dihasilkan oleh pembangkit-pembangkit yang paralel pada sistem tenaga listrik melalui optimasi pada keluaran daya pembangkit-pembangkit listrik dengan batasan-batasan antara lain: beban konsumen dan kapasitas daya pembangkit.

Beberapa penelitian tentang *emission dispatch* fokus pada permasalahan pengoperasian sistem tenaga listrik dengan jenis pembangkit termal yaitu pembangkit listrik yang berbahan bakar fosil, sehingga sisa pembakarannya akan menghasilkan emisi gas buang. Emisi gas buang yang dihasilkan dapat berupa nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO₂) dan karbon dioksida (CO₂).

Optimasi dilakukan dengan menggunakan pendekatan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) yaitu menggunakan metode *cuckoo optimization algorithm* [1,2]. Pada metode ini, proses optimasi dilakukan melalui pengkompositan persamaan-persamaan yang terdapat pada pembangkit-pembangkit yang paralel pada sistem tenaga listrik dengan tujuan mengurangi bahan bakar yang digunakan sehingga total emisi gas buang yang dihasilkan dapat direduksi. Namun demikian, metode ini memiliki kelemahan karena membutuhkan iterasi yang sangat besar sehingga menyebabkan waktu komputasi menjadi cukup lama.



Metode *fireflies algorithm* diterapkan untuk menyelesaikan masalah minimalisasi biaya bahan bakar pada pembangkit-pembangkit termal dengan emisi gas buang sebagai batasan untuk mereduksi biaya operasi dan emisi dari setiap unit pembangkit [3]. Pada penelitian ini parameter emisi diperhitungkan hanya sebagai batasan optimasi sehingga emisi gas buang yang dihasilkan tidak optimal.

Pada penelitian [4], dinyatakan bahwa pada dasarnya permasalahan *emission dispatch* sama dengan permasalahan *economic dispatch*, hanya berbeda pada fungsi objektifnya. *Economic dispatch* lebih mengutamakan faktor ekonomis, sedangkan *emission dispatch* lebih mengutamakan pengurangan emisi gas yang dihasilkan tiap unit pembangkit. Optimasi dilakukan dengan metode *modified artificial bee colony algorithm* sehingga diperoleh hasil simulasi yang menunjukkan bahwa faktor pembebanan akan berpengaruh pada biaya pembangkitan. Ketika faktor pembebanan lebih diprioritaskan pada faktor ekonomis maka biaya pembangkitan akan lebih murah tetapi menghasilkan emisi yang lebih tinggi.

Metode *Lagrange Multipliers* diterapkan menggunakan Software Matpower 5.0. untuk penyelesaian masalah reduksi emisi gas buang [5]. Pada penelitian tersebut dijelaskan bahwa daya keluaran pembangkit termal berbanding lurus dengan emisi CO₂ yang dihasilkan. Proses reduksi emisi CO₂ dilakukan dengan penjadwalan yang tepat pada pembangkit-pembangkit listrik yang saling terinterkoneksi agar daya yang dibangkitkan oleh pembangkit listrik termal menjadi optimum. Metode ini efektif diterapkan pada sistem skala kecil namun tidak efektif pada sistem dengan skala yang lebih besar.

Metode Iterasi Lamda dan Metode *Quadratic Programming* diimplementasikan dan dibandingkan untuk penyelesaian *economic dispatch* [6]. Untuk sistem skala kecil tidak terdapat perbedaan yang signifikan sedangkan untuk sistem skala lebih besar metode *quadratic programming* lebih unggul jika dibandingkan dengan metode iterasi lamda untuk mereduksi biaya pembangkitan. Namun demikian, kedua metode tersebut tidak memperhitungkan emisi gas buang yang dihasilkan oleh pembangkit-pembangkit termal.

Pada penelitian ini perhitungan *emission dispatch* dilakukan menggunakan metode *Quadratic Constrained Programming* (QCP) dan diselesaikan menggunakan CONOPT Solvers yang terdapat pada software *General Algebraic Modeling System* (GAMS). Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah Sistem IEEE 30 bus dan Sistem Jawa-Bali 500 kV. Hasil perhitungan dibandingkan dengan beberapa metode untuk penyelesaian *emission dispatch*, yaitu metode Iterasi Lamda dan *Flower Pollination Algorithm* (FPA). Metode QCP unggul dibandingkan dengan metode yang lain dengan menghasilkan emisi yang paling minimal.

II. STUDI PUSTAKA

Emission dispatch adalah teknik optimasi yang dilakukan dengan cara mengatur keluaran daya aktif pembangkit-pembangkit termal yang beroperasi pada suatu sistem tenaga listrik dengan tujuan untuk meminimalisasi emisi gas buang yang dihasilkan oleh pembangkit-pembangkit termal tersebut. Optimasi ini merupakan modifikasi dari optimasi untuk meminimalisasi biaya pembangkitan atau yang umum dikenal sebagai *economic dispatch* [7-12] dengan fungsi objektif pada perhitungan optimasi sebagai berikut:

$$\min T_{FC}(t) = \sum_{i=1}^{NG} [\alpha_i P_i^2(t) + \beta_i P_i(t) + \gamma_i] \quad (1)$$

Sedangkan untuk *emission dispatch*, emisi gas buang yang paling minimal diperoleh berdasarkan fungsi objektif yang dapat dinyatakan dengan persamaan matematika berikut:

$$\min E(t) = \sum_{i=1}^{NG} [\delta_i P_i^2(t) + \varepsilon_i P_i(t) + \zeta_i] \quad (2)$$

Perhitungan optimasi *emission dispatch* harus memenuhi batasan-batasan yang terdapat pada sistem tenaga listrik. Batasan pertama adalah keseimbangan daya aktif. Pada batasan ini, untuk menjaga frekuensi sistem tenaga listrik agar konstan pada nilai nominalnya, maka permintaan beban pada waktu t harus sama dengan total keluaran daya aktif pembangkit-pembangkit yang beroperasi, sebagaimana persamaan berikut ini:

$$P_D(t) = \sum_{i=1}^{NG} P_i(t) \quad (3)$$

Batasan yang kedua pada optimasi *emission dispatch* adalah kapasitas pembangkit pada waktu t . Setiap pembangkit termal memiliki kapasitas keluaran daya minimal dan maksimal sebagaimana pertidaksamaan berikut ini:

$$P_i^{\min} \leq P_i(t) \leq P_i^{\max} \quad (4)$$

Keterangan:

$T_{FC}(t)$: biaya pembangkitan total pada waktu t ;

NG : jumlah pembangkit termal yang beroperasi pada waktu t ;

$P_i(t)$: keluaran daya aktif pembangkit termal unit i pada waktu t ;

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$: koefisien biaya bahan bakar (pembangkitan) pembangkit termal unit i ;

$E(t)$: emisi gas buang total pembangkit termal pada waktu t ;

$\delta_i, \varepsilon_i, \zeta_i$: koefisien emisi gas buang pembangkit unit i ;

P_i^{\min} : daya minimum pembangkit termal unit i ;

P_i^{\max} : daya maksimum pembangkit termal unit i .

Emission dispatch sebagaimana *economic dispatch* merupakan permasalahan matematika dalam bentuk persamaan non linier, sehingga dalam penyelesaiannya dibutuhkan metode khusus. Untuk penyelesaian permasalahan non linier dapat digunakan model yang berada satu tingkat di atas model *linear programming* yaitu: *quadratic programming*. Pada *quadratic programming* permasalahan matematika akan dimodelkan melalui persamaan kuadrat dan diselesaikan melalui pemodelan persamaan kuadrat tersebut ke dalam sebuah fungsi objektif. Selanjutnya untuk mencapai fungsi objektif yang ditentukan harus ada batasan-batasan yang harus dipenuhi baik dalam bentuk persamaan maupun pertidaksamaan matematika. Secara spesifik metode tersebut disebut dengan metode *quadratic constrained programming* (QCP) [13,14].

QCP adalah metode atau teknik optimasi yang khusus digunakan untuk melakukan proses perhitungan dengan tujuan untuk meminimalkan atau memaksimalkan fungsi objektif yang ditentukan. Dalam QCP, fungsi objektif akan selalu dalam bentuk fungsi atau persamaan kuadrat dan terdiri dari beberapa variabel didalamnya serta terdapat batasan-batasan dalam bentuk persamaan linier yang harus dipenuhi dalam perhitungannya.

Fungsi objektif dari metode QCP secara umum [15] dapat dimodelkan secara matematis menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$F(x) = \frac{1}{2}x^T Hx + f^T x + c \quad (5)$$

Sedangkan untuk batasan-batasan (*constraints*) dalam bentuk persamaan linier pada metode QCP secara umum dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan dan pertidaksamaan sebagai berikut:

$$Aeq \cdot x = Beq \quad (6)$$

$$LB \leq x \leq UB \quad (7)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (8)$$

Keterangan:

- f : matriks komponen linier;
- H : matriks komponen kuadratik;
- UB : batas atas variabel;
- LB : batas bawah variabel;
- Aeq : matriks persamaan;
- Beq : matriks persamaan (konstan);
- c : konstanta matriks n-vektor;
- x : n-vektor yang nilainya akan diproses optimasi.

Pada penelitian ini, fungsi objektif untuk perhitungan optimasi *emission dispatch* dilakukan dengan menggunakan Persamaan (2), sedangkan untuk batasan-batasan yang harus dipenuhi yang terdapat pada sistem tenaga listrik menggunakan Persamaan (3) dan (4).

III. METODOLOGI

Pada penelitian ini pemodelan sistem dan simulasi *emission dispatch* dilakukan menggunakan bahasa pemrograman *General Algebraic Modelling Systems* (GAMS) [16-18], dengan *CONOPT Solvers* yang tersedia pada *software* GAMS tersebut. Untuk flowchart *emission dispatch* menggunakan metode QCP dapat dilihat pada Gambar 1. Sedangkan untuk prosedur dan struktur optimasi *emission dispatch* yang pada bagian ini dilakukan menggunakan data sistem IEEE 30-bus dapat dijelaskan sebagai berikut:

A. Menentukan pemodelan matematis di *software* GAMS yaitu: jumlah pembangkit termal yang sedang paralel dan juga permintaan beban total yang terdapat pada sistem tenaga listrik.

Patria Julianto: Optimasi Pengoperasian Pembangkit Listrik ...

1) Menentukan jumlah pembangkit termal yang sedang paralel sebagai berikut:

```
Set
Gen / G1*G6 /;
```

2) Menentukan permintaan beban total sistem tenaga listrik dalam MW sebagai berikut:

```
Scalar load / 283.4 /;
```

B. Memasukkan karakteristik atau parameter pembangkit-pembangkit termal, seperti koefisien emisi dan kapasitas minimum dan maksimum sebagai berikut:

	d	e	f	Pmin	Pmax
G1	0.0126	-1.2000	22.983	50	200
G2	0.0200	-0.1000	25.313	20	80
G3	0.0270	-0.0100	25.505	15	50
G4	0.0291	-0.0050	24.900	10	35
G5	0.0290	-0.0040	24.700	10	30
G6	0.0271	-0.0055	25.300	12	40;

C. Memasukkan batasan keluaran daya minimal dan maksimal pembangkit termal sebagaimana Persamaan (4) sebagai berikut:

```
Variable
OBJ
P.lo(gen) = data(gen, 'Pmin');
P.up(gen) = data(gen, 'Pmax');
```

D. Memasukkan persamaan matematika yang menjelaskan hubungan antara data dan variabel yaitu: emisi pembangkit-pembangkit termal, kendala keseimbangan daya, dan lain-lain.

(a) Memasukkan fungsi objektif, yaitu: emisi gas buang sebagaimana terdapat pada Persamaan (2) sebagai berikut:

```
OF =e= sum(gen,
data(gen, 'd') * P(gen) * P(gen) +
data(gen, 'e') * P(gen) +
data(gen, 'f'));
```

(b) Memasukkan kendala keseimbangan daya listrik pada sistem sebagaimana terdapat pada Persamaan (3) sebagai berikut:

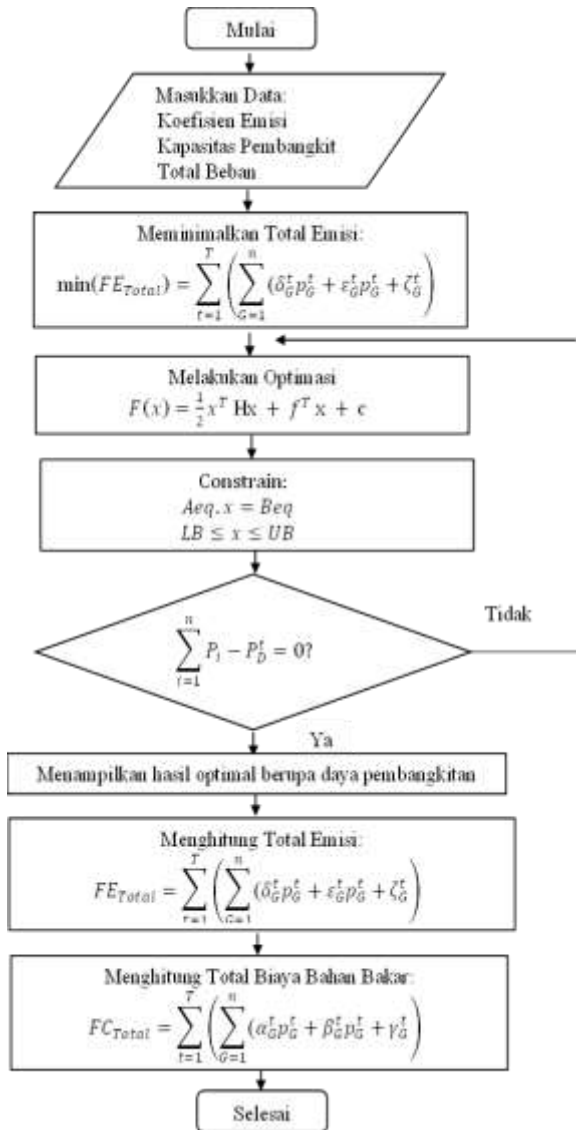
```
sum(gen, P(gen)) =g= load;
```

E. Menyelesaikan optimasi *emission dispatch* menggunakan metode QCP untuk meminimalkan emisi gas buang yang dihasilkan oleh pembangkit-pembangkit termal sebagai berikut:

```
Model ED / eq1, eq2 /;
solve ED using qcp minimizing of;
```

p-ISSN:1693 – 2951; e-ISSN: 2503-2372





Gambar 1: Flowchart Emission Dispatch Menggunakan Metode QCP

IV. DATA SISTEM PENGUJIAN

Pada penelitian ini komputer yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut: processor Intel Core i5 1,85 GHz dan RAM 4 GB. Untuk software yang digunakan adalah software GAMS sedangkan untuk metode QCP diselesaikan menggunakan CONOPT Solvers yang tersedia di dalam software GAMS.

Untuk menguji keberhasilan metode QCP pada optimasi *emission dispatch*, maka dalam penelitian ini digunakan data yang merepresentasikan sistem tenaga listrik skala kecil yaitu: sistem IEEE 30-bus [19] dan data yang merepresentasikan sistem dalam skala besar yaitu: sistem Jawa-Bali 500 kV [20].

Pada penelitian ini, untuk memperoleh hasil emisi gas yang paling minimal perhitungan optimasi harus memperhatikan batasan-batasan generator tiap unit pembangkit termal agar diperoleh hasil yang sesuai dengan konsep *emission dispatch*. Sebagai tambahan, untuk menunjukkan kinerja metode QCP pada optimasi *emission dispatch*, maka dalam penelitian ini metode QCP akan dibandingkan dengan metode lain dalam hal hasil emisi gas buang yang dapat direduksi.

TABEL I

KOEFISIEN BIAYA PEMBANGKIT TERMAL PADA SISTEM IEEE-30 BUS

Unit	α (\$/MW ²)	β (\$/MW)	γ (\$)
G1	0,00375	2,00	0
G2	0,01750	1,75	0
G3	0,06250	1,00	0
G4	0,00830	3,25	0
G5	0,02500	3,00	0
G6	0,02500	3,00	0

TABEL III

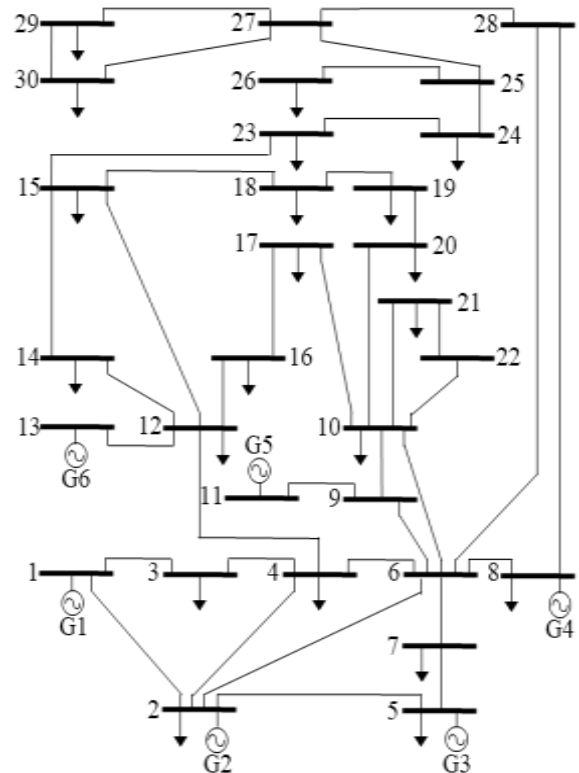
KOEFISIEN EMISI PEMBANGKIT TERMAL PADA SISTEM IEEE-30 BUS

Unit	δ (t/MW ²)	ϵ (t/MW)	ζ (t)
G1	0,0126	-1,2000	22,983
G2	0,0200	-0,1000	25,313
G3	0,0270	-0,0100	25,505
G4	0,0291	-0,0050	24,900
G5	0,0290	-0,0040	24,700
G6	0,0271	-0,0055	25,300

TABEL III

KAPASITAS DAYA PEMBANGKIT TERMAL PADA SISTEM IEEE-30 BUS

Unit	p^{min} (MW)	p^{max} (MW)	Rup (MW/h)	RDn (MW/h)
G1	50	200	65	85
G2	20	80	12	22
G3	15	50	12	15
G4	10	35	8	16
G5	10	30	6	9
G6	12	40	8	16



Gambar 2: Diagram Segaris Sistem IEEE-30 Bus

TABEL IV
 DATA BEBAN PADA SISTEM IEEE-30 BUS

Bus No.	Beban (MW)	Beban (MVar)
1	0,00	0,00
2	21,70	12,70
3	2,40	1,20
4	7,60	1,60
5	94,20	19,00
6	0,00	0,00
7	22,80	10,90
8	30,00	30,00
9	0,00	0,00
10	5,80	2,00
11	0,00	0,00
12	11,20	7,50
13	0,00	0,00
14	6,20	1,60
15	8,20	2,50
16	3,50	1,80
17	9,00	5,80
18	3,20	0,90
19	9,50	3,40
20	2,20	0,70
21	17,50	11,20
22	0,00	0,00
23	3,20	1,60
24	8,70	6,70
25	0,00	0,00
26	3,50	2,30
27	0,00	0,00
28	0,00	0,00
29	2,40	0,90
30	10,60	1,90
Total Beban	283,40	126,20

TABEL V
 KOFISIEN BIAYA PEMBANGKIT TERMAL
 PADA SISTEM JAWA BALI 500 KV

Unit	α (\$/MW ²)	β (\$/MW)	γ (\$)
G1	-400,81	3.332.794,44	57.5743.208,50
G2	123,80	982.201,25	45.915.179,30
G3	-216,78	1.687.044,26	26.078.106,50
G4	-216,78	1.687.044,26	26.078.106,50
G5	203,72	2.707.932,51	66.802.287,30
G6	-51,78	2.707.932,51	175.648.457,90
G7	691,77	3.047.098,70	519.353.767,10
G8	0,00	400,00	0,00
G9	218,29	2.104.640,99	180.205.527,90
G10	-198,13	16.260.663,24	36.865.968,40
G11	0,00	400,00	0,00
G12	0,00	600,00	0,00
G13	-123,97	1.535.364,19	49.030.275,10
G14	-52,12	1.745.451,56	44.057.796,00
G15	551,86	1.577.296,45	138.462.967,60
G16	-80,97	2.828.349,26	133.177.025,60
G17	-73,82	5.877.235,44	112.522.922,10
G18	-108,39	2.530.566,39	39.117.159,80
G19	203,41	2.545.843,46	140.621.312,50
G20	-102,23	2.480.952,82	110.670.582,70

TABEL VI
 KOFISIEN EMISI GAS BUANG PEMBANGKIT TERMAL
 PADA SISTEM JAWA BALI 500 KV

Unit	δ (t/MW ²)	ϵ (t/MW)	ζ (t)
G1	-236,68	1.983.806,00	43.251.910
G2	37,78	299.725,74	14.011.346
G3	-66,15	514.813,63	7.957.921
G4	-66,15	514.813,63	7.957.921
G5	62,17	826.344,98	20.385.196
G6	-11,11	621.268,84	37.692.802
G7	96,17	423.620,00	72.202.665
G8	0,00	0,00	0,00
G9	149,51	1.441.534,92	123.428.444
G10	-60,46	496.204,88	11.249.914
G11	0,00	0,00	0,00
G12	0,00	0,00	0,00
G13	-87,18	1.079.721,65	4.903.0275
G14	-11,19	374.560,42	9.454.463
G15	96,17	423.620,01	72.202.665
G16	-56,94	1.988.993,85	93.654.730
G17	-15,84	1.261.209,32	24.146.550
G18	-76,22	1.779.582,55	27.508.551
G19	62,07	2.545.832,46	140.621.313
G20	-71,89	1.744.692,56	77.827.414

TABEL VII
 KAPASITAS DAYA PEMBANGKIT TERMAL
 PADA SISTEM JAWA BALI 500 KV

Unit	p^{min} (MW)	p^{max} (MW)
G1	1610	4200
G2	690	1725
G3	800	2000
G4	800	2000
G5	848	2119
G6	1149	2872
G7	1080	2700
G8	360	900
G9	1886	4714
G10	640	1600
G11	403	1008
G12	696	1740
G13	824	2060
G14	760	1900
G15	1060	2650
G16	1856	4640
G17	1216	3040
G18	1200	3000
G19	546	1365
G20	1436	3589

A. Sistem IEEE 30-Bus

Sistem IEEE 30-Bus terdiri dari 30 bus, 6 unit pembangkit termal, 41 saluran dan 21 titik beban. Untuk *single line diagram* sistem IEEE 30-Bus dapat dilihat pada Gambar 1, sedangkan untuk data koefisien biaya pembangkitan dapat dilihat pada Tabel I, data koefisien emisi gas buang pada Tabel II, data kapasitas daya pembangkit termal pada Tabel III dan data beban pada Tabel IV. Total daya yang diserap oleh beban adalah sebesar 283,40 MW.



B. Sistem Jawa Bali 500 kV

Data koefisien biaya bahan bakar dapat dilihat pada Tabel V, koefisien emisi gas buang yang dihasilkan oleh pembangkit termal pada Tabel VI dan kapasitas minimum dan maksimum daya yang dibangkitkan dapat dilihat pada Tabel VII. Sedangkan untuk permintaan beban total pada sistem Jawa Bali 500 kV menggunakan permintaan beban pada pukul 19.00 WIB sebesar 39.983 MW [20].

V. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Pada penelitian ini, permasalahan optimasi *emission dispatch* berupa permasalahan dalam bentuk persamaan non linier diselesaikan dengan menggunakan metode QCP. Selanjutnya, metode QCP dimodelkan dan diselesaikan menggunakan CONOPT *Solvers* yang terdapat pada *Software* GAMS. Hasil dari simulasi berupa penjadwalan pembangkit-pembangkit termal dalam satu periode, keluaran daya aktif optimum pembangkit-pembangkit termal, dan emisi gas buang yang dihasilkan oleh pembangkit-pembangkit termal yang beroperasi dalam satu periode pada sistem IEEE 30-bus dan sistem Jawa Bali 500 kV.

TABEL VIII
HASIL SIMULASI EMISSION DISPATCH PADA SISTEM IEEE 30-BUS

Unit	Daya Optimum (MW)	Emisi (kg/jam)	Biaya (\$/jam)
G1	112,734	59,108	273,127
G2	46,022	63,071	117,604
G3	32,424	53,566	98,131
G4	29,998	50,967	104,963
G5	30,000	50,680	112,500
G6	32,221	53,258	122,618
Total	283,400	330,620	828,942

TABEL IX
HASIL SIMULASI EMISSION DISPATCH PADA SISTEM
JAWA-BALI 500 KV

Unit	Daya Optimum (MW)	Emisi (Ton/jam)	Biaya (Juta Rp/jam)
G1	4200	4,191	7.503
G2	1725	0,643	2.108
G3	2000	0,773	2.533
G4	2000	0,773	2.533
G5	2119	2,051	6.719
G6	2872	1,730	8.063
G7	2700	1,917	13.789
G8	900	0	0
G9	1886	3,374	4.926
G10	1600	0,650	2.131
G11	1008	0	0
G12	1740	0	0
G13	2060	1,903	2.686
G14	1900	0,681	3.172
G15	2650	1,870	8.194
G16	1856	3,589	5.104
G17	3040	3,712	17.297
G18	1745	2,900	4.125
G19	546	1,549	1.591
G20	1436	2,435	3.462
Total	39983	34,743	95.941

A. Sistem IEEE 30-Bus

Hasil simulasi *emission dispatch* menggunakan metode QCP pada sistem IEEE 30-bus dapat dilihat pada Tabel VIII. Selanjutnya, analisa dilakukan melalui beberapa tahapan perhitungan sebagai berikut:

Persamaan emisi:

$$E_1 = 0,0126P^2 - 1,1P + 22,983$$

$$E_2 = 0,02P^2 - 0,1P + 25,313$$

$$E_3 = 0,027P^2 - 0,01P + 25,505$$

$$E_4 = 0,0291P^2 - 0,005P + 24,9$$

$$E_5 = 0,029P^2 - 0,004P + 24,7$$

$$E_6 = 0,0271P^2 - 0,0055P + 25,3$$

Batasan:

$$A_{eq} = B_{eq}$$

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = P_D$$

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 283,4$$

$$LB \leq P \leq UB$$

$$50 \leq P \leq 200$$

$$20 \leq P \leq 80$$

$$15 \leq P \leq 50$$

$$10 \leq P \leq 35$$

$$10 \leq P \leq 30$$

$$12 \leq P \leq 40$$

Fungsi objektif:

$$\text{Min } F(x) = \frac{1}{2}x^T H x + f^T x + c$$

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} 0,0126 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,02 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,027 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,0291 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,029 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0271 \end{bmatrix} H = 2 \times \\
 & \begin{bmatrix} 0,0252 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,04 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,054 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,0582 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,058 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0542 \end{bmatrix} = \\
 & f = \begin{bmatrix} -1,1 \\ -0,1 \\ -0,01 \\ -0,005 \\ -0,004 \\ -0,0055 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$f^T = [-1,1 \quad -0,1 \quad -0,01 \quad -0,005 \quad -0,004 \quad -0,0055]$$

$$e = 22,983 + 25,313 + 25,505 + 24,9 + 24,7 + 25,3$$

Batasan:

$$LB = \begin{bmatrix} 50 \\ 20 \\ 15 \\ 10 \\ 10 \\ 12 \end{bmatrix}$$

$$UB = \begin{bmatrix} 200 \\ 80 \\ 50 \\ 35 \\ 30 \\ 40 \end{bmatrix}$$

$$A_{eq} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

$$B_{eq} = 283,4$$

Maka:

$$\text{Min } F_{(x)} = \frac{1}{2}x^T H_x + f^T x + c$$

$$= \frac{1}{2} \times [P_1 \quad P_2 \quad P_3 \quad P_4 \quad P_5 \quad P_6]$$

$$\times \begin{bmatrix} 0,0252 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,04 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,054 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,0582 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,058 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0542 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix}$$

$$+ [-1,1 \quad -0,1 \quad -0,01 \quad -0,005 \quad -0,004 \quad -0,0055]$$

$$\times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} + 22,983 + 25,313 + 25,505 + 24,9 + 24,7 + 25,3$$

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 112,734 \\ 46,022 \\ 32,424 \\ 29,998 \\ 30 \\ 32,221 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan hasil tersebut didapatkan hasil perhitungan *emission dispatch* berupa keluaran daya pembangkit termal sebagai berikut:

$$P_1 = 112,734 \text{ MW}$$

$$P_2 = 46,022 \text{ MW}$$

$$P_3 = 32,424 \text{ MW}$$

$$P_4 = 29,998 \text{ MW}$$

$$P_5 = 30 \text{ MW}$$

$$P_6 = 32,221 \text{ MW}$$

Untuk sistem IEEE 30 bus, emisi gas buang yang dihasilkan oleh pembangkit-pembangkit termal sebagaimana dapat dilihat pada Tabel VIII dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$E_{Gi} = \alpha_{Gi} P_i^2 + \beta_{Gi} P_i + \gamma_{Gi}$$

$$\begin{aligned} E_{G1} &= (0,0126 \times (112,734)^2) \\ &\quad - (1,1 \times 112,734) + 22,983 \\ &= 59,108 \text{ MW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{G2} &= (0,02 \times (46,022)^2) - (0,1 \times 46,022) + \\ &\quad 25,313 \\ &= 63,071 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{G3} &= (0,027 \times (32,424)^2) - (0,01 \times 32,424) + \\ &\quad 25,505 \\ &= 53,566 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{G4} &= (0,0291 \times (29,998)^2) - (0,005 \times \\ &\quad 29,998) + 24,9 \\ &= 50,967 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{G5} &= (0,029 \times (30)^2) - (0,004 \times 30) + 24,7 \\ &= 50,680 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{G6} &= (0,0271 \times (32,221)^2) - (0,0055 \times \\ &\quad 32,221) + 25,3 \\ &= 53,258 \text{ kg} \end{aligned}$$

Sehingga total emisi gas buang yang dihasilkan oleh pembangkit-pembangkit termal yang sedang beroperasi adalah sebagai berikut:

$$FE_{Total} = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{G=1}^n (\delta_G^t p_G^t + \varepsilon_G^t p_G^t + \zeta_G^t) \right)$$

$$\begin{aligned} FE_{Total} &= E_{G1} + E_{G2} + E_{G3} + E_{G4} + E_{G5} + E_{G6} \\ &= 59,10843 + 63,07129 + 53,56629 + \\ &\quad 50,93652 + 50,68 + 53,25781 \\ &= 330,620 \text{ kg} \end{aligned}$$

B. Sistem Jawa-Bali 500 kV

Hasil simulasi *emission dispatch* menggunakan metode *Quadratic Constrained Programming* (QCP) pada sistem Jawa-Bali 500 kV dapat dilihat pada Tabel IX. Sebanyak 20 unit pembangkit termal dalam kondisi beroperasi dan paralel pada sistem tenaga listrik melayani permintaan beban sebesar 39.983 MW. Emisi gas buang yang dihasilkan dari perhitungan optimasi sebesar 34,743 ton per jam dan biaya pembangkitan yang dihasilkan sebesar Rp. 95.941.022.193 per jam. Sedangkan untuk analisa hasil perhitungan, menggunakan tahapan yang sama seperti analisa yang dilakukan pada sistem IEEE 30-Bus.



C. Perbandingan Perhitungan *Emission Dispatch* Dengan Beberapa Metode

Pada penelitian ini, metode *Quadratic Constrained Programming* (QCP) dibandingkan dengan beberapa metode. Untuk data sistem IEEE 30-bus perbandingan dilakukan dengan metode Iterasi Lamda, sedangkan untuk data sistem Jawa-Bali 500 kV perbandingan dilakukan dengan metode Iterasi Lamda dan metode berbasis *Artificial Intelligence* (AI) yaitu *Flower Pollination Algorithm* [20].

Hasil perbandingan metode-metode untuk menyelesaikan *emission dispatch* dapat dilihat pada Tabel X untuk data sistem IEEE 30-bus dan pada Tabel XI untuk data sistem Jawa-Bali 500 kV. Dari hasil perbandingan dapat dilihat bahwa metode QCP merupakan metode terbaik karena menghasilkan emisi gas buang yang paling minimal dibandingkan dengan metode-metode lainnya.

TABEL X
PERBANDINGAN HASIL *EMISSION DISPATCH* DENGAN BEBERAPA METODE
PADA SISTEM IEEE 30-BUS

Metode	Total Emisi (kg)
Iterasi Lamda	330,622
QCP	330,620

TABEL XI
PERBANDINGAN HASIL *EMISSION DISPATCH* DENGAN BEBERAPA METODE
PADA SISTEM JAWA-BALI 500 KV

Metode	Total Emisi (Ton)
Iterasi Lamda	39,698
<i>Flower Pollination Algorithm</i>	37,906
QCP	34,743

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk meminimalisasi emisi gas buang yang dihasilkan oleh pembangkit-pembangkit listrik termal yang beroperasi pada suatu sistem tenaga listrik dengan cara mengatur pola pengoperasian atau pembebanan pembangkit-pembangkit tersebut secara optimum (*emission dispatch*). Metode yang digunakan untuk menyelesaikan *emission dispatch* adalah *quadratic constrained programming* (QCP). Sedangkan untuk data yang digunakan adalah data IEEE 30-bus dan sistem Jawa-Bali 500 kV.

Emission dispatch pada sistem IEEE 30-bus menghasilkan perhitungan emisi gas buang sebesar 330,620 kg per jam dan untuk sistem Jawa-Bali 500 kV emisi gas buang yang dihasilkan sebesar 34,743 ton per jam. Jika dibandingkan dengan metode lain, pada sistem IEEE 30-bus tidak terdapat perbedaan hasil yang signifikan antara metode QCP dengan metode Iterasi Lambda, sedangkan pada sistem Jawa-Bali 500 kV metode QCP unggul dalam meminimalkan emisi gas buang dengan selisih perhitungan sebesar 12,48% terhadap metode Iterasi Lamda dan 8,34% terhadap metode *Flower Pollination Algorithm*.

Pada penelitian selanjutnya, untuk mendekati kondisi riil di lapangan, penelitian ini dapat dipadukan dengan perhitungan unit commitment serta dapat dilakukan secara dinamis dalam periode waktu 24 jam dan dengan mempertimbangkan batasan *ramping* (*ramp-up* dan *ramp-down*) pembangkit listrik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LP2M) Universitas Borneo Tarakan yang mendanai penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Z. Huang, Z. Gao, L. Qi and H. Duan, *A Heterogeneous Evolving Cuckoo Search Algorithm for Solving Large-Scale Combined Heat and Power Economic Dispatch Problems*, IEEE Access, 7:287-301(2019).
- [2] S. Deb, E.H. Houssein, M. Said and D.S. Abdelminaam, *Performance of Turbulent Flow of Water Optimization on Economic Load Dispatch Problem*, IEEE Access, 9:882-893(2021).
- [3] A. Erhami, *Efisiensi Biaya Pembangkitan (Economic Dispatch) Sistem Kelistrikan 500 KV Jawa-Bali menggunakan Metode Fireflies Algorithm*, Doctoral Dissertation, UMM (2021).
- [4] D. A. Pratama, *Economic and Emission Dispatch pada Sistem Transmisi Jawa Bali 500KV Berdasarkan Ruptil 2015-2024 Menggunakan Modified Artificial Bee Colony Algorithm*, Doctoral Dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (2016).
- [5] H. Sutanto, T. Haryono, & A.A. Setiawan, *Optimasi Penjadwalan Pada Pembangkit di Jaringan 500 kV Jawa-Bali untuk Mengurangi Emisi CO2 menggunakan Matpower 5.0.*, Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro, 17,4:199-205(2015).
- [6] R. Faulianur, M.A. Haikal & M.N. Hasan, *Komparasi Metode Iterasi Lamda Dengan Quadratic Programming Pada Sistem Pembangkit Termal*, Jurnal Intake: Jurnal Penelitian Ilmu Teknik dan Terapan, 12,1:37-44(2021).
- [7] M. Said, dkk., *Economic Load Dispatch Problem Based on Search and Rescue Optimization Algorithm*, IEEE Access, 10:109-123(2022).
- [8] S. Xu and W. Wu, *Tractable Reformulation of Two-Side Chance-Constrained Economic Dispatch*, IEEE Transactions on Power Systems, 37,1:796-799(2022).
- [9] A. Garces, *Mathematical Programming for Power System Operation: From Theory to Applications*. John Wiley & sons, Inc, Canada, (2022).
- [10] N. Faisal, R.S. Hartati, I.W. Sukerayasa, *Implementasi Fuzzy Logic dan Algoritma Genetika dalam Pembebanan Ekonomis pada Sistem Pembangkitan di Bali*, Majalah Ilmiah Teknologi Elektro, 16,3:99-105(2017).
- [11] I.M.T. Winasatria, I.M. Mataram, I.B.G. Manuaba, *Economic Dispatch pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Gas (PLTDG) Menggunakan Fuzzy Logic Controller FLC*, Majalah Ilmiah Teknologi Elektro, 18,1:105-112(2019).
- [12] E.Y.I. Christanti, I.N.S. Kumara, C.G.I. Partha, *Analisis Tekno-Ekonomi dari Refuse-Derived Fuel Sebagai Waste to Energy di TPA Pakusari Jawa Timur*, Majalah Ilmiah Teknologi Elektro, 21,2:201-208(2022).
- [13] P. Julianto, A. Soeprijanto, Mardijah, *Dynamic Economic Dispatch with Integration of Compressed Air Energy Storage Considering Large Penetration of Photovoltaic Generation Systems*, International Review on Modelling and Simulations (IREMOS), 14,5:388-398(2021).
- [14] P. Julianto, A. Soeprijanto, Mardijah, *Confronting the Duck curve Problem using Dynamic Economic Emission Dispatch with CAES*, International Journal of Intelligent Engineering and Systems, 15,4:520-532(2022).
- [15] K.B.A.R. Arifin, *Dynamic Economic Dispatch Mempertimbangkan Rugi-Rugi Transmisi Menggunakan Quadratically Constrained Quadratic Program*, Doctoral Dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (2018).
- [16] A. Soroudi, *Power System Optimization Modeling in GAMS*, Springer Nature, Switzerland (2017).
- [17] O.D.M. Giraldo, *Solving a Classical Optimization Problem Using GAMS Optimizer Package: Economic Dispatch Problem Implementation*, Ingenieria y Ciencia, 13,26:39-63(2017).
- [18] P. Julianto, *Unit Commitment dengan Integrasi Pump Storage Hydroelectricity untuk Mengatasi Masalah Duck Curve*, Jurnal Elekrika Borneo, 8,2:12-17(2022).
- [19] Appendix A: Data for IEEE-30 Bus Test System. [Online]. Available: <https://alroomi.org/multimedia/PowerFlow/30BusSystem/IEEE30BusSystemDATA2.pdf>.
- [20] S.P. Sugianto, *Combined Economic and Emission Dispatch menggunakan Flower Pollination Algorithm pada Transmisi 500 KV Jawa Bali*. Prosiding SENTRA (Seminar Teknologi dan Rekayasa) 6:8-17(2021).