

# Pembebanan Ekonomis dengan Pengendalian Emisi pada Pembangkit Termis Menggunakan Algoritma Evolusi Diferensial

Afner Saut Sinaga<sup>1</sup>

**Intisari**—Tujuan utama dari pembebanan ekonomis adalah meminimalkan jumlah biaya operasi setiap unit generator dengan memperhatikan batasan persamaan dan ketidaksamaan sistem. Saat ini dengan meningkatnya perhatian pada polusi lingkungan yang diakibatkan proses pembakaran bahan bakar fosil pada pembangkit termal, emisi polutan tersebut juga menjadi kriteria yang harus diminimalkan. Pembebanan ekonomis dengan mengendalikan emisi (*economic emission dispatch*) yang adalah permasalahan multiobyektif mendapat peranan tersendiri dalam operasi ekonomis sistem tenaga listrik dan banyak mendapatkan perhatian para peneliti. Dalam penelitian ini metode faktor harga penalti diaplikasikan untuk merubah permasalahan multiobyektif kedalam bentuk persamaan obyektif tunggal. Penelitian ini memberikan sebuah pendekatan yang sederhana dan efektif untuk mencari solusi optimal permasalahan tersebut dengan menggunakan algoritma Evolusi Diferensial. Simulasi dilakukan pada sistem dengan skala unit kecil 3-unit dan 6-unit serta pada sistem dengan skala unit besar yaitu 40-unit pembangkit dengan program MATLAB. Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa algoritma ini memberikan hasil yang lebih optimal dan efisien pada permasalahan kombinasi pembebanan optimal ekonomis dan emisi pada sistem dengan skala unit kecil dan memberikan keseimbangan antara biaya bahan bakar dan jumlah emisi jika diterapkan pada sistem dengan skala unit besar.

**Keywords**—Pembebanan ekonomis, emisi lingkungan, algoritma evolusi diferensial, faktor harga penalti.

## I. PENDAHULUAN

Industri Tenaga Listrik mengalami perkembangan secara cepat dikarenakan tingginya tekanan dan permintaan konsumen listrik perubahan. Oleh karena itu berbagai strategi operasi dilakukan untuk memenuhi permintaan tersebut. Suatu perencanaan yang matang diperlukan untuk mengatasi masalah ini. Suatu pembangkit tenaga listrik terdiri dari banyak unit pembangkit yang memiliki parameter karakteristik operasi tersendiri digunakan untuk memenuhi total permintaan pelanggan dengan biaya seminimum mungkin.

Tujuan utama dari pembebanan ekonomis adalah meminimalkan jumlah biaya operasi setiap unit generator dengan memperhatikan batasan persamaan dan ketidaksamaan sistem.. Hal ini menjadikan permasalahan pembebanan ekonomis menjadi sebuah permasalahan optimasi nonlinier

yang rumit.

Hingga saat ini, sumber energi utama penggerak mekanik pada sistem pembangkitan energi listrik umumnya masih berupa bahan bakar fosil (batubara, minyak dan gas). Proses pada pembangkit listrik termal tersebut dapat menimbulkan emisi akibat gas buang hasil pembakaran berupa CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> dan partikulat yang akan menyebabkan dampak lingkungan terhadap masyarakat sekitar dan menjadi polusi di atmosfer bumi. Meningkatnya kepedulian masyarakat dunia yang diawali dengan keputusan kongres Amerika Serikat (*U.S Clean Air Act Amendments of 1990*) yang mengharuskan setiap perusahaan listrik memodifikasi kebijakan dan strategi pengoperasiannya untuk mengurangi polusi dan emisi di atmosfer pada pembangkit listrik tenaga termal.

Beberapa strategi untuk mengurangi emisi telah diusulkan dan diteliti. Diantaranya adalah pemasangan peralatan filter polutan, penggantian dengan bahan bakar beremisi rendah dan penggantian komponen-komponen pembangkit yang telah usang [7,8]. Namun ketiga opsi ini memerlukan pertimbangan biaya/modal yang besar sehingga menjadi opsi jangka-panjang. Opsi alternatif jangka-pendek yang menarik adalah *emission dispatching* yang ditambahkan kedalam fungsi biaya bahan bakar untuk diminimalkan. Meskipun demikian, menangani operasi dengan hanya memperhatikan minimalisasi dampak lingkungan tidak praktis karena menyebabkan biaya bahan bakar yang lebih tinggi. Disisi lain, untuk mengoperasikan sistem pembangkit dengan meminimalkan total biaya bahan bakar juga tidak memenuhi persyaratan baku mutu emisi lingkungan. Oleh sebab itu, pembebanan ekonomis dengan mengendalikan emisi (*economic emission dispatch*) yang adalah permasalahan multiobyektif mendapat peranan tersendiri dalam operasi ekonomis sistem tenaga listrik dan banyak mendapatkan perhatian para peneliti.

Beberapa penelitian telah dilakukan dengan mempertimbangkan emisi dan biaya bahan bakar menjadi sebuah fungsi tujuan tunggal. Diantaranya, permasalahan multiobyektif ini dikonversi menjadi sebuah obyektif tunggal dengan memperlakukan emisi sebagai sebuah fungsi batasan/kekangan dalam batas yang diijinkan. Metode ini memiliki beberapa kesulitan dalam memperoleh hubungan *trade-off* antara biaya dan emisi. Ada peneliti yang mengkonversi multiobyektif ini menjadi sebuah obyektif tunggal dengan kombinasi linier fungsi obyektif yang berbeda-beda ini sebagai jumlah pembobotan [7,8], dimana melalui metode ini sejumlah solusi-solusi yang non-inferior dapat diperoleh dengan bervariasi nilai bobot ( $w$ ). Pada tahun belakangan ini oleh para peneliti, permasalahan multiobyektif ini dikonversi menjadi sebuah obyektif tunggal

<sup>1</sup>Dosen, Teknik Elektronika Universitas Cenderawasih Kampus Baru Waena Jayapura telp :0967 - 587290 ; e-mail: afnerss@yahoo.com

dengan menggunakan factor harga penalti  $h$  yang kemudian diselesaikan dengan antara lain menggunakan algoritma QP [6], PSO [12], ACO [20], GA [10], dll.. Metode ini lebih efisien dalam menemukan nilai kompromi antara fungsi-fungsi obyektif yang berkonflik ini.

Tujuan penelitian ini adalah mencari solusi optimal permasalahan pembebanan ekonomis dengan pengendalian emisi, dimana total biaya bahan bakar dan biaya emisi yang memperhatikan batasan-batasan sistem dengan menggunakan algoritma DE, serta menginvestigasi efektivitas algoritma DE untuk beberapa uji kasus dan membandingkan hasil yang diperoleh metode diatas dengan hasil yang diperoleh pada beberapa penelitian sebelumnya.

## II. PEMBEBANAN EKONOMIS DENGAN PENGENDALIAN EMISI

### A. Kombinasi Pembebanan Optimal Ekonomis dan Emisi

Secara umum fungsi biaya dari tiap pembangkit yang memiliki turbin banyak-katup (*multi-valve turbines*) dapat diformulasikan secara matematis sebagai berikut:

$$F_T = \sum_{i=1}^n (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + |e_i \sin[f_i(P_{i \min} - P_i)]|) \quad (1)$$

dimana,  $F_T$  adalah total biaya bahan bakar (\$/jam),  $P_i$  adalah daya keluaran unit- $i$  (MW),  $P_{i \min}$  adalah batas minimum daya keluaran unit- $i$  (MW) dan  $a_i, b_i, c_i, e_i, f_i$  adalah koefisien biaya unit- $i$ .

Fungsi biaya bahan bakar diminimalkan dengan memenuhi kendala-kendala (*constraints*) sebagai berikut:

$$P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D + P_L \quad (3)$$

dimana,  $P_{i \min}$  dan  $P_{i \max}$  adalah batas minimum dan maksimum daya keluaran unit- $i$  (MW),  $P_D$  adalah jumlah beban sistem (MW) dan  $P_L$  adalah jumlah rugi-rugi transmisi sistem (MW).

Rugi transmisi dapat dihitung dengan menggunakan matriks  $B$  dan dinyatakan dengan:

$$P_L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j \quad (4)$$

dimana,  $B_{ij}$  adalah elemen dari koefisien rugi-rugi matriks  $B$ .

Permasalahan pembebanan emisi (*emission dispatch*) dapat digambarkan sebagai optimasi total nilai emisi yang diberikan oleh persamaan berikut:

$$E_T = \sum_{i=1}^n \{ \alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i + \xi_i e^{\tau_i P_i} \} \quad (5)$$

dimana,  $E_T$  adalah total emisi (kg/jam) dan  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \xi_i, \tau_i$  adalah koefisien emisi unit- $i$ .

Dispatch ekonomis dan dispatch emisi adalah dua masalah berbeda. Dispatch emisi dapat digabungkan kedalam permasalahan dispatch ekonomis konvensional dengan penambahan biaya emisi kedalam biaya dispatch ekonomis

yang disebut dengan teknik kombinasi pembebanan ekonomis dan emisi. Fungsi multiobyektif dikonversi menjadi obyektif tunggal dengan memasukkan faktor harga penalti  $h$  yang dapat dirumuskan sebagai:

$$\Phi_T = F_T + h * E_T \quad (6)$$

dimana,  $\Phi_T$  adalah total biaya operasional sistem.

Konstanta  $h$  adalah faktor harga penalti yang mengkompromikan biaya emisi dan biaya bahan bakar. Nilai  $h$  ditentukan dengan melalui prosedur sebagai berikut:

- Biaya bahan bakar setiap generator dihitung untuk setiap daya keluaran maksimumnya.
- Pelepasan emisi setiap generator dihitung untuk setiap daya keluaran maksimumnya.
- Faktor penalti  $h$  untuk setiap unit generator dihitung dengan persamaan:

$$h_i = \frac{(a_i P_{i \max}^2 + b_i P_{i \max} + c_i)}{(\alpha_i P_{i \max}^2 + \beta_i P_{i \max} + \gamma_i)} \text{ $/kg} \quad (7)$$

- Menyusun urutan  $h_i$  secara berurut dari nilai yang terkecil.
- Nilai daya maksimum unit- $i$  ( $P_{i \max}$ ) satu persatu ditambahkan mulai dari nilai  $h_i$  yang terkecil hingga  $\sum P_{i \max} \geq P_D$
- Nilai  $h$  yang berasosiasi dengan unit terakhir pada langkah 5 diambil sebagai faktor harga penalti  $h$  (\$/Kg) pada beban yang diberikan ( $P_D$ ).

Dari penjelasan diatas, nilai faktor harga penalti  $h$  tergantung pada jumlah permintaan daya ( $P_D$ ) sehingga memiliki nilai yang berbeda untuk permintaan daya yang berbeda-beda pula.

### B. Algoritma Evolusi Diferensial

Evolusi Diferensial adalah sebuah metode yang dikembangkan oleh Kenneth Price, dkk [4]. Evolusi Diferensial adalah algoritma optimasi berdasarkan populasi yang merupakan pengembangan dari algoritma Genetik. Seperti algoritma evolusioner lainnya, pembangkitan pertama dimulai secara acak dan untuk pembangkitan berikutnya berevolusi melalui aplikasi operator tertentu hingga kriteria pemberhentian tercapai. Proses optimasi dilakukan dengan empat operasi dasar yang disebut inialisasi, mutasi, pindah-silang dan seleksi.

#### 1) Inialisasi

Algoritma diawali dengan membuat vektor populasi  $P_x$  dengan ukuran  $N_p$  yang terdiri dari individu-individu yang berevolusi pada iterasi/generasi  $g$ . Setiap individu  $x_{i,g}$ , adalah besaran vektor yang berisi unsur-unsur sebagai variabel dari masalah. Populasi berukuran  $N_p$  adalah parameter yang ditentukan oleh programmer. Individu atau calon solusi adalah vektor yang mengandung banyak parameter atau variabel keputusan  $D$ . Ukuran populasi  $N_p$  selalu tetap selama proses optimasi.

$$P_{\mathbf{x},g} = [ \mathbf{x}_{i,g} ] \tag{8}$$

$$\mathbf{x}_{i,g} = [ x_{j,i,g} ] \tag{9}$$

$i = 1, 2, \dots, Np$

Langkah pertama adalah membuat sebuah populasi awal dari calon-calon solusi dengan membangkitkan nilai-nilai acak dari setiap individu dari populasi dimana batas atas dan batas bawah setiap parameter harus ditetapkan. Probabilitas distribusi uniform seluruh variabel acak diasumsikan dalam bentuk persamaan berikut:

$$x_{j,i,0} = \text{rand}_j (b_{j, \text{maks}} - b_{j, \text{min}}) + b_{j, \text{min}} \tag{10}$$

$j = 1, 2, \dots, Np$

dimana  $b_{j, \text{maks}}$  dan  $b_{j, \text{min}}$  adalah batas bawah dan atas parameter dan  $\text{rand}_j$  adalah bilangan acak dalam rentang [0, 1] yang dibangkitkan untuk setiap nilai  $j$ .

2) *Mutasi*

Setelah diinisialisasi, DE akan memutasi dan merekombinasi populasi awal untuk menghasilkan populasi vektor-vektor uji (*trial vectors*)  $Np$ . Operator mutasi menghasilkan vektor mutan dengan memutasi sebuah vektor acak  $\mathbf{x}_{r0}$  dengan dua vektor acak yang lain yaitu  $\mathbf{x}_{r1}$  dan  $\mathbf{x}_{r2}$ . Seluruh vektor ini harus berbeda satu sama lain. Untuk mengontrol mutasi dan memperbaiki konvergennya, vektor differensial diskalakan oleh pengguna dengan sebuah konstanta dalam rentang [0, 2] yang disebut dengan konstanta  $F$ .

$$\mathbf{v}_{i,g} = \mathbf{x}_{r0,g} + F \cdot (\mathbf{x}_{r1,g} - \mathbf{x}_{r2,g}) \tag{11}$$

dimana  $\mathbf{x}_{r0}$ ,  $\mathbf{x}_{r1}$ ,  $\mathbf{x}_{r2}$  adalah vektor yang dipilih secara acak, dengan  $a \neq b \neq c \neq i$ . Faktor mutasi  $F$  adalah parameter yang ditentukan pemakai untuk mengontrol ukuran perturbasi dalam operasi mutasi.

3) *Pindah-Silang*

Untuk melengkapi strategi pencarian mutasi differensial, Evolusi Diferensial menggunakan operasi pindah-silang dengan tujuan meningkatkan diversitas parameter populasi. Pindah-silang membangkitkan vektor-vektor uji (*trial vectors*) dari nilai parameter yang telah disalin dari dua vektor berbeda. Persamaan vektor uji adalah:

$$\mathbf{u}_{i,g} = u_{j,i,g} = \begin{cases} v_{j,i,g} & \text{jika } \text{rand}_j \leq Cr \text{ atau } j = j_{\text{rand}} \\ x_{j,i,g} & \text{sebaliknya} \end{cases} \tag{12}$$

dimana  $Cr$  adalah konstanta pindah-silang yang ditentukan pengguna.  $\mathbf{u}_{i,g}$  adalah vektor uji,  $\mathbf{v}_{i,g}$  adalah vektor mutasi, dan  $\mathbf{x}_{i,g}$  adalah vektor target.

4) *Seleksi*

Operator seleksi memilih vektor yang akan menyusun populasi pada generasi berikutnya. Seleksi diulangi untuk setiap pasang dari target atau vektor uji hingga populasi dari generasi berikutnya selesai. Jika vektor uji  $\mathbf{u}_{i,g}$  memiliki nilai fungsi obyektif yang sama atau lebih rendah dari vektor target  $\mathbf{x}_{i,g}$ , akan menggantikan vektor target pada generasi berikutnya. Seleksi diulangi untuk setiap pasang vektor

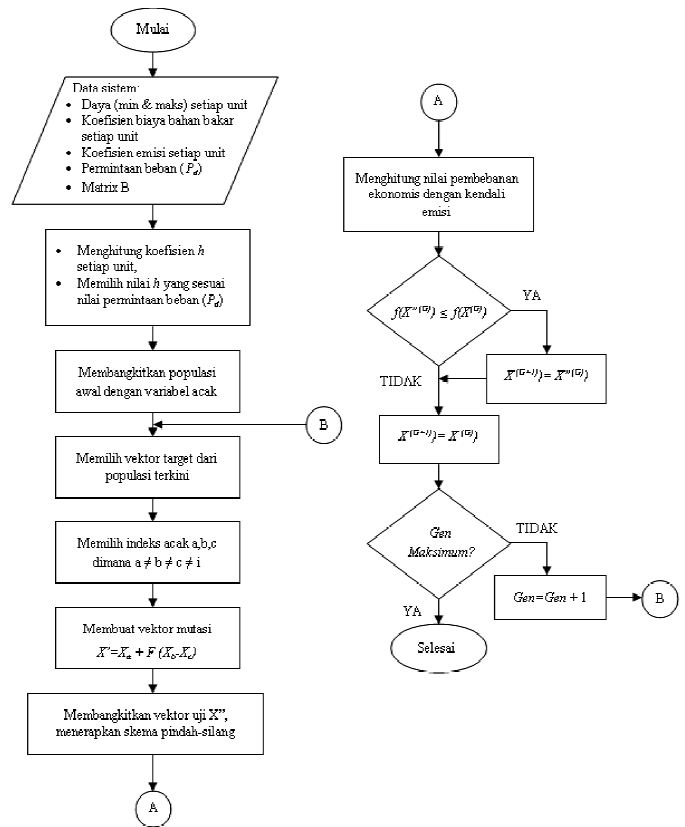
target/uji hingga populasi untuk pembangkitan selanjutnya selesai. Jika  $f$  melambangkan fungsi biaya optimasi maka,

$$\mathbf{x}_{i,g+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_{i,g} & \text{jika } f(\mathbf{u}_{i,g}) \leq f(\mathbf{x}_{i,g}) \\ \mathbf{x}_{i,g} & \text{sebaliknya.} \end{cases} \tag{13}$$

Proses optimasi diulangi untuk beberapa pembangkitan seterusnya. Hal ini mengakibatkan individu-individu memperbaiki nilai optimum dalam ruang solusinya. Proses iterasi dari mutasi, pindah-silang dan seleksi terus berlangsung hingga kriteria penghentian tercapai.

III. METODOLOGI

Penyelesaian permasalahan pembebanan ekonomis dengan pengendalian emisi dengan menggunakan algoritma evolusi differensial disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB. Simulasi dilakukan pada sistem skala kecil yaitu 3-unit dan 6-unit serta sistem skala besar 40-unit. Hasil simulasi tersebut kemudian dibandingkan dengan penggunaan algoritma lain pada penelitian-penelitian sebelumnya (GA dan PSO). Tahapan perhitungan dapat dilihat pada Gbr. 1.



Gbr. 1 Diagram alir pengolahan data dengan DE

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kasus I (sistem 3-unit)

Simulasi pada sistem dengan 3-unit pembangkit thermal. Koefisien biaya bahan bakar dan batas setiap unit pembangkit

diperlihatkan pada Tabel I dan koefisien emisi gas buang NOx unit-unit tersebut diperlihatkan pada Tabel II [24].

TABEL I  
KOEFSIEN BIAYA BAHAN BAKAR

Unit <i>i</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>P<sub>min</sub></i> (kW)	<i>P<sub>maks</sub></i> (kW)
1	0,03546	38,30553	1243,5311	35	210
2	0,02111	36,32782	1658,5696	130	325
3	0,01799	38,27041	1356,6592	125	315

TABEL II  
KOEFSIEN EMISI NO<sub>x</sub>

Unit <i>i</i>	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
1	0,00683	-0,54551	40,26690
2	0,00461	-0,51160	42,89553
3	0,00461	-0,51160	42,89553

Dengan koefisien rugi-rugi matrix (*B<sub>mn</sub>*) sebagai berikut,

$$B_{mn} = \begin{bmatrix} 0,000071 & 0,000030 & 0,000025 \\ 0,000030 & 0,000069 & 0,000032 \\ 0,000025 & 0,000032 & 0,000080 \end{bmatrix}$$

Simulasi dilakukan pada *P<sub>D</sub>* 500 kW dengan nilai *h* adalah 44,0792 dengan 20 kali percobaan. Hasil optimal dapat dilihat pada Tabel III.

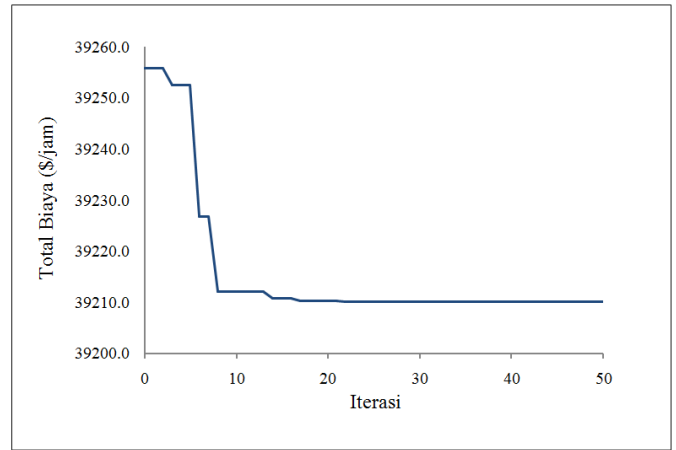
TABEL III  
HASIL OPTIMUM PADA SISTEM 3-UNIT

Unit <i>-i</i>	Beban Optimal (MW)	Biaya b.bakar (\$/jam)	Jumlah Emisi (kg/jam)	Total Biaya (\$/jam)
1	128,79	6764.97	83.29	10436.619
2	192,61	9438.93	115.39	14524.959
3	190,29	9290.72	112.48	14248.618
Total	511,69	25494.62	311.16	39210.197

Beban ( <i>P<sub>D</sub></i> )	500 MW
Rugi ( <i>P<sub>loss</sub></i> )	11,69 MW
Waktu proses	0,154 detik

Gbr. 2 memperlihatkan grafik konvergensi penyelesaian pembebanan ekonomis sistem 3-unit pada permintaan beban 500 MW. Hasil optimal ini kemudian dibandingkan dengan hasil optimal penelitian sebelumnya [24] yang dapat dilihat pada Tabel IV.



Gbr. 2 Grafik konvergensi sistem 3-unit

TABEL IV  
PERBANDINGAN HASIL OPTIMASI  
PADA *P<sub>D</sub>* 500 MW

Metode	Biaya b. bakar (\$/jam)	Jumlah Emisi (kg/jam)	Total Biaya (\$/jam)	Waktu eksekusi (detik)
GA	25.499,4	311,273	39.220,1	0,172
PSO	25.495	311,15	39210,2	0,156
<b>DE</b>	<b>25.494,62</b>	<b>311,16</b>	<b>39210,197</b>	<b>0,154</b>

Perbandingan diatas menunjukkan bahwa algoritma DE dapat memberikan solusi yang lebih optimal dan memerlukan waktu komputasi yang cepat dan efektif pada permasalahan kombinasi pembebanan ekonomis dan emisi pada sistem 3-unit.

**B. Kasus II (sistem 6-unit)**

Simulasi dilakukan pada sistem 6-unit pembangkit thermal. Koefisien biaya bahan bakar dan batas setiap unit pembangkit diperlihatkan pada Tabel V dan koefisien emisi gas buang NOx unit-unit tersebut diperlihatkan pada Tabel VI [15].

TABEL V  
KOEFSIEN BIAYA BAHAN BAKAR

Unit <i>i</i>	<i>a</i>	<i>B</i>	<i>c</i>	<i>P<sub>min</sub></i> (kW)	<i>P<sub>maks</sub></i> (kW)
1	0,15247	38,53973	756,79886	10	125
2	0,10587	46,15916	451,32513	10	150
3	0,02803	40,39655	1049,9977	35	225
4	0,03546	38,30553	1243,5311	35	210
5	0,02111	36,32782	1658,5696	130	325
6	0,01799	38,27041	1356,6592	125	315

TABEL VI  
KOEFSIEN EMISI NO<sub>x</sub>

Unit <i>i</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>F</i>
1	0,00419	0,32767	13,85932
2	0,00419	0,32767	13,85932
3	0,00683	-0,54551	40,26690
4	0,00683	-0,54551	40,26690
5	0,00461	-0,51116	42,89553
6	0,00461	-0,51116	42,89553

Dengan koefisien rugi-rugi matrix (*B<sub>mn</sub>*) sebagai berikut,

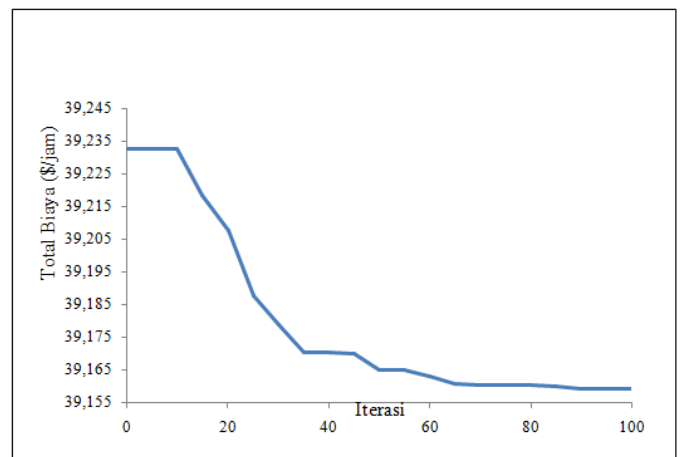
$$B_{mn} = 10^{-4} \times \begin{pmatrix} 1.40 & 0.17 & 0.15 & 0.19 & 0.26 & 0.22 \\ 0.17 & 0.60 & 0.13 & 0.16 & 0.15 & 0.20 \\ 0.15 & 0.13 & 0.65 & 0.17 & 0.24 & 0.19 \\ 0.19 & 0.16 & 0.17 & 0.71 & 0.30 & 0.25 \\ 0.26 & 0.15 & 0.24 & 0.30 & 0.69 & 0.32 \\ 0.22 & 0.20 & 0.19 & 0.25 & 0.32 & 0.85 \end{pmatrix}$$

Simulasi dilakukan pada variasi beban *P<sub>D</sub>* yaitu 500 MW, 700 MW dan 900 MW dengan nilai *h* berturut-turut 43,898, 44,788, dan 47,822 masing-masing sebanyak 20 kali percobaan. Hasil simulasi tersebut diperlihatkan pada Tabel VII.

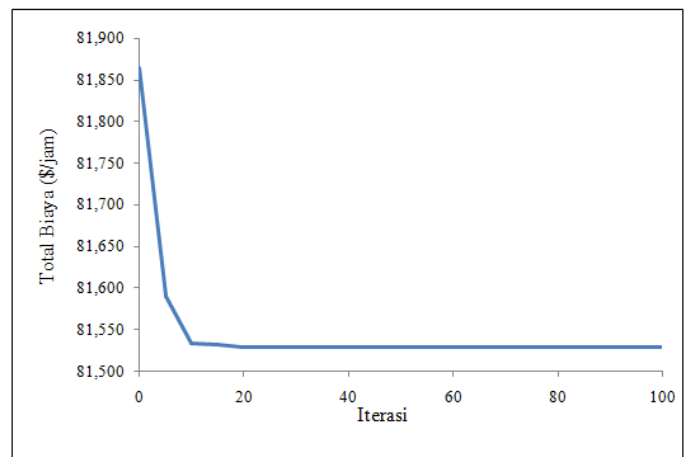
TABEL VII  
HASIL OPTIMUM PADA SISTEM 6-UNIT

Alokasi	500 MW	700 MW	900 MW
<i>P</i> <sub>1</sub> (MW)	33,0668	62,1045	92,3297
<i>P</i> <sub>2</sub> (MW)	26,4921	61,6732	98,3912
<i>P</i> <sub>3</sub> (MW)	89,4627	119,9717	150,1948
<i>P</i> <sub>4</sub> (MW)	91,1117	119,4721	148,5588
<i>P</i> <sub>5</sub> (MW)	136,1353	178,1940	220,4043
<i>P</i> <sub>6</sub> (MW)	132,6764	175,6409	218,1307
<i>P</i> <sub>rugi-rugi</sub> (MW)	8,9450	17,0565	28,0097
<b>Biaya b.bakar (\$/jam)</b>	27.608,8817	37.500,918	48.350,6836
<b>Jumlah Emisi (kg/jam)</b>	263,1191	439,6075	693,7879
<b>Total Biaya (\$/jam)</b>	39.159,286	57.190,06	81.529,01

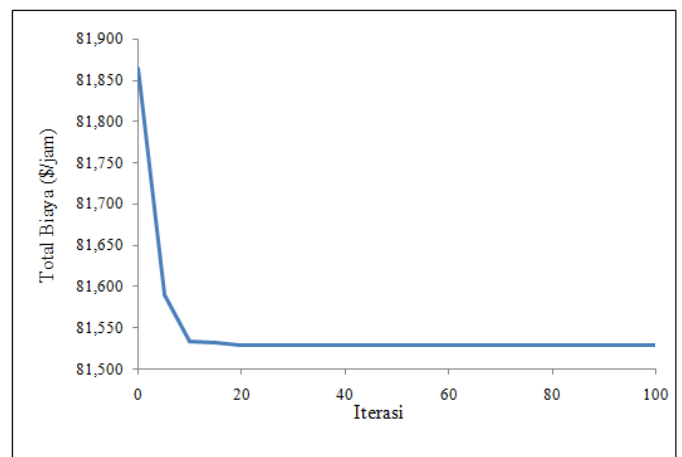
Gbr. 3, Gbr. 4 dan Gbr. 5 berturut-turut memperlihatkan grafik konvergensi penyelesaian pembebanan ekonomis sistem 6-unit pada permintaan beban 500 MW, 700 MW dan 900 MW. Hasil optimal ini kemudian dibandingkan dengan hasil optimal penelitian sebelumnya [15] yang dapat dilihat pada Tabel VIII.



Gbr. 3 Grafik konvergensi sistem 6-unit pada beban 500 MW



Gbr. 4 Grafik konvergensi sistem 6-unit pada beban 700 MW



Gbr. 5 Grafik konvergensi sistem 6-unit pada beban 900 MW

TABEL VIII  
PERBANDINGAN HASIL OPTIMASI SISTEM 6-UNIT  
PADA  $P_D$  500 MW, 700 MW DAN 900 MW

	$P_D$ (MW)	GA	PSO	DE
Total Biaya (\$/jam)	500	39.258,03	39.159	<b>39.159,286</b>
	700	57.346,19	57.191	<b>57.190,060</b>
	900	81.764,45	81.529	<b>81.529,010</b>
Biaya b.bakar (\$/jam)	500	27.638,3	27.613	<b>27.608,882</b>
	700	37.640,37	37.509	<b>37.500,920</b>
	900	48.567,75	48.349	<b>48.350,680</b>
Jumlah Emisi (kg/jam)	500	263,47	263,011	<b>263,1190</b>
	700	439,979	439,635	<b>439,6075</b>
	900	694,169	693,81	<b>693,7879</b>
$P_{\text{rugi-rugi}}$ (MW)	500	10,172	8,9331	<b>8,9450</b>
	700	18,521	17,0558	<b>17,0565</b>
	900	29,725	28,0092	<b>28,0097</b>

Tabel VIII memperlihatkan jika dibandingkan dengan solusi yang diperoleh dengan menggunakan Algoritma Genetik (GA), algoritma Evolusi Diferensial menghasilkan solusi yang lebih baik pada komponen biaya bahan bakar, jumlah emisi dan rugi daya pada setiap permintaan beban ( $P_D$ ). Pada tabel juga terlihat jika dibandingkan dengan PSO, pada komponen biaya bahan bakar, DE memberikan solusi lebih baik pada  $P_D$  500 MW dan 700 MW. Sedangkan pada komponen jumlah emisi yang dikeluarkan, DE memberikan solusi lebih baik pada  $P_D$  700 MW dan 900 MW. Pada  $P_D$  500 MW solusi yang lebih baik diberikan oleh PSO.

### C. Kasus III (sistem 40-unit)

Untuk sistem dengan unit skala besar, simulasi dilakukan pada sistem 40-unit dengan permintaan beban 10.500 MW. Data koefisien biaya bahan bakar dan batas setiap unit pembangkit serta koefisien emisi gas buang NO<sub>x</sub> unit-unit tersebut dapat dilihat pada referensi [26]. Simulasi dengan 50 kali percobaan memberikan hasil optimal sebesar 192.884,477 \$/jam dengan waktu operasi 22,76 detik. Berdasarkan hasil optimasi ini diperoleh nilai biaya bahan bakar sebesar 127.728,4 \$/jam dan jumlah emisi yang dikeluarkan sebesar 185.502,3 ton/jam. Perbandingan hasil optimal ini dapat dilihat pada tabel IX berikut.

TABEL IX  
PERBANDINGAN HASIL OPTIMASI SISTEM 40-UNIT  
PADA  $P_D$  10.500 MW

	PSO	NSGA	SPEA	DE
Biaya b.bakar (\$/jam)	<b>125.730,3</b>	125.810	125.810	<b>127.728,4</b>
Jumlah Emisi (ton/jam)	<b>195.254,80</b>	211.100	211.100	<b>185.502,3</b>

Tabel diatas memperlihatkan perbandingan hasil yang diperoleh dengan algoritma PSO dengan algoritma DE yaitu biaya bahan bakar meningkat sebesar 1,564%, namun pada jumlah emisi yang dikeluarkan terjadi penurunan sebesar 5,257%.

### V. PENUTUP

Permasalahan multiobjektif pembebanan ekonomis dan emisi dapat diselesaikan dengan algoritma Evolusi Diferensial. Perbandingan hasil yang diperoleh dengan penelitian sebelumnya adalah ada sistem skala kecil yaitu 3-unit dan 6-unit, algoritma Evolusi Diferensial memberikan hasil yang lebih optimal dan waktu yang lebih cepat dan efektif jika dibandingkan dengan Algoritma Genetik (GA) dan PSO, namun untuk skala besar yaitu 40-unit jika dibandingkan dengan algoritma PSO maka biaya bahan bakar meningkat sebesar 1,564%, namun pada jumlah emisi yang dikeluarkan terjadi penurunan sebesar 5,257%.

### REFERENSI

- [1] A.J. Wood dan B.F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control, 2nd edition*, New York: Wiley, 1996.
- [2] K.Y. Lee dan M.A. El-Sharkawi, Eds., *Modern Heuristic Optimization Techniques with Applications to Power Systems*, IEEE Power Engineering Society (02TP160), 2002..
- [3] K.V. Price, R.M. Storn dan J.A. Lampinen, *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*, Berlin: Springer 2005.
- [4] R.M. Storn dan K.V. Price, "Differential Evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces," Technical Report TR-95-012, International Computer Science Institute, Berkeley, maret.1995.
- [5] J.S. Dhillon dan S.C. Parti. "Stochastic Economic Emission Load Dispatch," *Electric Power System Research*, vol.26, pp.179-186, 1993.
- [6] A.Faraq, S. Al-Baiyat dan T.C. Cheng, "Economic Load Dispatch Multiobjective Optimization Procedures Using Linear Programming Techniques," *IEEE Trans.on Power Syst.*, vol. 10 no.2, pp.731-738, 1995.
- [7] M. A. Abido, "Environmental/Economic Power Dispatch Using Multiobjective Evolutionary Algorithms," *IEEE Trans.on Power Syst.*, vol.18 no.4, pp.1529-1537, Nov.2003.
- [8] M. A. Abido, "Multiobjective Evolutionary Algorithms for Electric Power Dispatch Problem," *IEEE Trans.on Evolutionary Computation*, vol.10 no.3, pp.315-329, June 2006.

- [9] C.L. Chiang, J.H. Liaw dan C.T. Su, "New Approach with a Genetic Algorithm Framework to Multi-objective Generation Dispatch Problems," *European Trans.on Electrical Power*, vol.15, pp.381-395, 2005.
- [10] T. Yalcinoz dan H. Altun, "Environmentally Constrained Economic Dispatch via Genetic Algorithm with Arithmetic Crossover," *IEEE Africon 2002, South Africa*, pp. 923-928., 2002
- [11] R.M.S. Danaraj dan F. Gajendran, "Quadratic Programming Solution to Emission and Economic Dispatch Problems," *Journal of the Indian Institute of Engineers (India)*, vol.86, pp.129-132, Sept.2005.
- [12] J.P.S.Catalao, S.J.P.S.Mariano, V.M.F.Mendes dan L.A.F.M.Ferreira, "Short-term Scheduling of Thermal Units: Emission Constraints and Trade-off Curves," *European Trans.on Electrical Power*, vol.18, pp.1-14, 2008.
- [13] T.S. Prasanna dan P. Somasundaram, "Fuzzy-Tabu Search Algorithm for Combined Economic and Emission Dispatch," in *Proceeding Of National Systems Conference XXXII*, pp.542-547, Dec. 17-19, 2008.
- [14] L.Slimani dan T.Boukir, "Economic Power Dispatch of Power System with Pollution Control using Multiobjective Ant Colony Optimization," *Int.Journal of Computational Intelligence Research*, vol.3 no.2, pp.145-153, 2007.
- [15] K.S. Kumar, V.Tamisilvan, N. Murali, R. Rajaram, N.S. Sundaram dan T.Jayabarathi, "Economic Load Dispatch with Emission Constraints using Various PSO Algorithm," *The WSEAS Trans.Power Syst.*, vol.3 issue 9, pp.596-607, Sept.2008.
- [16] T. Jayabarathi, V. Ramesh, D.P. Kothari, K.Pavan dan M.Thumbi "Hybrid Differential Evolution Technique for Economic Dispatch Problems," *Journal of Elec.Engineering & Tech.*, vol.3 no.4, pp.476-483, 2008.
- [17] K.K. Mandal dan N. Chakraborty, "Effect of Control Parameters on Differential Evolution based Combined Economic Emission Dispatch with Valve-Point Loading and Transmission Loss," *Int.Journal of Emerging Elec.Power Syst.*, vol.9 issue 4, article 5, 2008.
- [18] Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 21 Tahun 2008 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Pembangkit Tenaga Listrik Termal.
- [19] C. Sun dan S. Lu, "A Novel Solution Based on Differential Evolution for Short-Term Combined Economic Emission Hydrothermal Scheduling," *Journal of Engineering*, vol.1, pp.46-54, 2009
- [20] W.F.A. El-Wahed, A.A. Mousa, dan M.A. Elsisy, "Solving Economic Emission Load Dispatch Problem by Using Hybrid ACO-MSM Approach," *The Online Journal on Power and Energy Engineering*, vol.1 no.1, pp.31-35, 2010.
- [21] J.S. Alsumait, M. Qasem, J.K. Sykulski, dan A.K. Al-Othman, "An Improved Pattern Search Based Algorithm to Solve the Dynamic Economic Dispatch Problem with Valve-Point Effect," *Energy Conversion and Management*, vol.51, pp.2062-2067, 2010.
- [22] U. Guvenc, "Combined Economic Emission Dispatch Solution Using Genetic Algorithm based on Similarity Crossover," *Scientific Research and Essay*, vol.5 no.17, pp.2451-2456, 2010.
- [23] K. Senthil and K. Manikandan, "Economic Thermal Power Dispatch with Emission Constraint and Valve Point Effect Loading using Improved Tabu Search Algorithm," *International Journal of Computer Applications*, vol.3 no.9, pp.6-11, July 2010.
- [24] A. Lakshmi Devi and O. Vamsi Krishna, "Combined Economic and Emission Dispatch Using Evolutionary Algorithms – A Case Study," *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol.3 no.6, pp.28-35, December 2008.
- [25] A. Vlachos, "Simulated Annealing Algorithm for Environmental/Economic Dispatch Problem," *Journal of Information and Computing Science*, vol.6 no.1, pp.64-72, 2011.
- [26] H. P. Singh, "Multiobjective Economic Load Dispatch Using Particle Swarm Optimization," *Master of Engineering Thesis, Department Of Electrical and Instrumentation Engineering Thapar University*, 2011.