

Dynamic Optimal Power Flow Mempertimbangkan Carbon Capture And Storage Plants Menggunakan Metode Multi-Objective Particle Swarm Optimization

Yauri Mahaputra, Rony Seto Wibowo, Ni Ketut Aryani

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: yauri.putra@gmail.com, ronyseto@ee.its.ac.id, ketut.aryani@elect-eng.its.ac.id

Abstrak— Pembangkit tenaga listrik yang beroperasi saat ini masih didominasi oleh pembangkit-pembangkit yang tidak terbarukan. Pembangkit tidak terbarukan tersebut menggunakan bahan bakar fosil sehingga menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) ketika beroperasi. Selain itu permintaan terhadap energi listrik selalu berubah tiap waktu, sedangkan generator memiliki batas untuk kedinamisan dalam pembangkitannya. Saat ini, minimalisasi biaya pembangkitan tidak hanya menjadi satu kriteria dalam operasi sistem tenaga listrik, tetapi juga mempertimbangkan aspek lingkungan dan teknis. Tugas akhir ini membahas permasalahan *Dynamic Optimal Power Flow (DOPF)* dengan penambahan sistem *carbon capture and storage (CCS)* pada pembangkit. Proses *Carbon Capture and Storage (CCS)* adalah rangkaian proses mulai dari pemisahan dan penangkapan CO₂ hingga menyimpannya ke dalam tempat penampungan (formasi geologi) untuk jangka waktu yang sangat lama. Metode optimasi yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)*. Fungsi tujuan yang akan dioptimasi adalah biaya pembangkitan dan emisi karbon dioksida (CO₂). Plan yang digunakan pada optimasi ini adalah sistem IEEE 30 bus dengan modifikasi beban dinamik dan penambahan *Carbon Capture and Storage Plants*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode MOPSO mampu melakukan perhitungan DOPF mempertimbangkan *Carbon Capture and Storage Plants*.

Kata Kunci— *DOPF, Multi-Objective, PSO, CCS, Emisi Karbon Dioksida (CO₂)*

I. PENDAHULUAN

KEBUTUHAN energi listrik yang terus bertambah menyebabkan energi listrik yang harus disuplai oleh pembangkit menjadi sangat besar. Pembangkitan tenaga listrik di Indonesia pada umumnya masih menggunakan pembangkit dengan bahan bakar fosil dan menghasilkan emisi berupa karbon dioksida (CO₂) yang dibuang ke udara dalam jumlah besar. Dan untuk mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan pembangkit tenaga listrik diperlukan teknologi penangkap karbon atau *carbon capture and storage (CCS)* [1]. Selain itu permintaan terhadap energi listrik selalu berubah tiap waktu, sedangkan generator memiliki batas untuk kedinamisan dalam pembangkitannya.

Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) adalah sebuah metode untuk mencari daya yang dibangkitkan generator agar

sesuai dengan permintaan beban yang dibutuhkan selama rentang waktu tertentu, dan sistem dapat dioperasikan secara ekonomis. *Optimal Power Flow (OPF)* konvensional adalah salah satu permasalahan optimisasi yang penting dalam sistem kelistrikan. OPF bertujuan untuk memenuhi permintaan beban dengan mempertimbangkan aspek ekonomi, lingkungan, dan teknis.

Pada tugas akhir ini, dibahas permasalahan DOPF dengan penambahan sistem *carbon capture and storage (CCS)* pada pembangkit. Metode optimasi yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)*. Metode ini dapat mengoptimasi lebih dari satu fungsi tujuan secara bersamaan. Diharapkan hasilnya dapat dipakai sebagai acuan dalam operasi pembangkitan dan penyaluran daya yang optimal, terutama mengenai biaya pembangkitan dan emisi karbon yang dibuang ke udara.

II. DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW

A. Dynamic Optimal Power Flow

Dynamic optimal power flow (DOPF) merupakan perhitungan aliran daya dengan kondisi beban berubah terhadap waktu yang memperhitungkan biaya pembangkitan sehingga didapatkan nilai pembangkitan yang optimal dengan memperhitungkan rugi-rugi saluran. DOPF merupakan perkembangan dari metode economic dispatch (ED) dan *optimal power flow (OPF)*. *Dynamic optimal power flow* direpresentasikan secara matematis sebagai berikut.

$$F = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_g} \left(a_i P_{gi}^t{}^2 + b_i P_{gi}^t + c_i \right) \right) \$/T \quad (1)$$

Keterangan,

F : Fungsi biaya pembangkitan

P_{gi} : Daya yang dibangkitkan setiap unit pembangkit

a_i, b_i, c_i : Koefisien biaya pembangkitan setiap unit pembangkit

t : Periode waktu pembangkitan ke t

N_g : Total pembangkit

T : Total periode waktu pembangkitan

Dalam pengoptimasian aliran daya dinamik, ada batasan-batasan yang harus dipenuhi. Batasan-batasan pada DOPF

dibagi menjadi dua bagian yaitu *equality constraint* dan *inequality constraint*. Berikut adalah batasan-batasan DOPF.

(1) *Equality constraint*

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{gi}(t) = P_D(t) + P_L(t) \quad (2)$$

Equality constraint adalah batasan dimana total daya yang dibangkitkan (P_{gi}) sama dengan total beban (P_D) ditambah dengan rugi-rugi jaringan (P_L).

(2) *Inequality constraint*

$$P_{gi.min} \leq P_{gi} \leq P_{gi.max} \quad (3)$$

$$Q_{gi.min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi.max} \quad (4)$$

$$V_{bi.min} \leq V_{bi} \leq V_{bi.max} \quad (5)$$

$$S_{li} \leq S_{li.max} \quad (6)$$

$$Ramp_{gi(down)} \leq P_{gi(t+1)} - P_{gi} \leq Ramp_{gi(up)} \quad (7)$$

Dimana $P_{gi.min}$ dan $P_{gi.max}$ adalah batas daya aktif minimum dan maksimum keluaran generator ke-I; $Q_{gi.min}$ dan $Q_{gi.max}$ adalah batas daya reaktif minimum dan maksimum keluaran generator ke-I; $V_{bi.min}$ dan $V_{bi.max}$ adalah batas toleransi tegangan minimum dan maksimum bus ke-I; $S_{li.max}$ adalah kapasitas hantar maksimum saluran ke-i; $Ramp_{gi(down)}$ dan $Ramp_{gi(up)}$ adalah batas *ramp rate* generator ke-i.

B. Emisi Karbon Dioksida dan CCS Pembangkit

Pembangkitan tenaga listrik pada umumnya masih menggunakan pembangkit dengan bahan bakar fosil dan menghasilkan emisi berupa karbon dioksida (CO2) yang dibuang ke udara dalam jumlah besar. Berikut adalah persamaan emisi karbon dioksida (CO2) pembangkit [1].

$$C = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_g} (d_i P_{gi}^t) \right) Ton/T \quad (8)$$

Keterangan,

C : Fungsi karbon dioksida yang dihasilkan pembangkitan

P_{gi} : Daya yang dibangkitkan setiap unit pembangkit

d_i : Koefisien karbon dioksida setiap unit pembangkit

t : Periode waktu pembangkitan ke t

N_g : Total pembangkit

T : Total periode waktu pembangkitan

Dan untuk mengurangi emisi karbon dioksida (CO2) yang dihasilkan pembangkit tenaga listrik dipasang plan penangkap karbon atau *carbon capture and storage (CCS) plan*. Proses *Carbon Capture and Storage (CCS)* adalah rangkaian proses mulai dari pemisahan dan penangkapan CO2 hingga menyimpannya ke dalam tempat penampungan (formasi geologi) untuk jangka waktu yang sangat lama. Teknologi ini secara teknis menawarkan langkah konkret dalam menangani volume emisi karbon dioksida (CO2) dengan menggunakan teknologi yang telah ada sebelumnya. Dengan demikian teknologi yang mampu menjembatani masa transisi menuju energi alternatif di masa depan dan memungkinkan dunia untuk tetap menggunakan bahan bakar fosil tanpa kekhawatiran. Pemasangan plan penangkap karbon akan membebani generator, sehingga daya keluaran generator ke sistem akan berkurang. Jika disumsikan daya yang dikonsumsi oleh plan CCS adalah P_S dan daya yang diberikan ke sistem adalah P_G , maka daya yang dibangkitkan oleh generator dengan pemasangan plan ccs (P_E) adalah sebagai berikut.

$$P_E = P_{OUT(SYSTEM)} + P_S \quad (9)$$

Keterangan,

P_E : Daya yang dibangkitkan oleh generator dengan Pemasangan plan ccs

$P_{OUT(SYSTEM)}$: Daya yang diberikan ke sistem

P_S : Daya yang dikonsumsi plan ccs

$$C_E = d \times P_E \quad (10)$$

$$C_S = C_E \times n \quad (11)$$

$$P_S = \beta \times C_S \quad (12)$$

Keterangan,

C_E : Jumlah karbon dioksida yang dihasilkan pembangkit dengan pemasangan plan ccs

C_S : Jumlah karbon dioksida yang diserap

d : Koefisien karbon dioksida pembangkit

n : Rate carbon yang dicapture

β : Daya yang dikonsumsi plan ccs per ton serapan

Dari persamaan (9) - (12), daya pembangkitan generator dengan pemasangan plan ccs (P_E) dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$P_E = \frac{1}{1-\beta n d} P_{OUT(SYSTEM)} \quad (13)$$

C. Efek Pemasangan Plan CCS [1]

Pengoperasian plan CCS menggunakan energi listrik, dan energi listrik tersebut dibebankan pada pembangkit yang dipasang sistem CCS. Sehingga daya keluaran generator ke sistem akan berkurang dan emisi karbon dioksida (CO2) yang dihasilkan pembangkit akan berkurang. Dalam tugas akhir ini pemasangan plan CCS diletakkan pada pembangkit unit 1, dengan rate carbon yang dicapture $n = 85\%$ dan daya dibebankan ke pembangkit $\beta = 0.23$ MW/Ton. Berikut adalah persamaan daya yang harus dipenuhi (*equality-constraints*) DOPF dan persamaan emisi yang dihasilkan pembangkit ketika dipasang plan CCS pada pembangkit unit 1 [1].

$$\sum_{t=1}^T [P_E^t + \sum_{i=2}^{N_g} P_{gi}^t] = \sum_{t=1}^T [P_D^t + P_L^t + P_S^t] \quad (14)$$

$$C = \sum_{t=1}^T \left[((1-n)d_1 P_E^t) + \left(\sum_{i=2}^{N_g} (d_i P_{gi}^t) \right) \right] \quad (15)$$

Keterangan,

P_E : Daya yang dibangkitkan pembangkit unit 1 (pembangkit tanpa Plan CCS)

P_{gi} : Daya yang dibangkitkan setiap unit pembangkit (pembangkit tanpa Plan CCS)

P_D : Total beban sistem

P_L : Total rugi-rugi saluran

P_S : Daya yang diserap plan CCS

C : Fungsi karbon dioksida yang dihasilkan pembangkitan

d_i : Koefisien karbon dioksida setiap unit pembangkit

n : Rate carbon yang dicapture (0.85)

t : Periode waktu pembangkitan ke t

N_g : Total pembangkit

T : Total periode waktu pembangkitan

III. PENERAPAN MOPSO PADA DOPF DENGAN CCS MEMPERTIMBANGKAN BIAYA DAN EMISI

A. Multi Objective Optimization

Multi objective optimization merupakan pemecahan masalah optimasi dengan beberapa fungsi tujuan. Dalam pemecahannya, sering kali terjadi konflik diantara tujuan dan solusinya bukanlah solusi yang tunggal tetapi berupa himpunan solusi. Pada tugas ini menggunakan metode *weighted sum* untuk pemecahan masalah *multi objective optimization*. Metode ini mengkombinasikan beberapa fungsi tujuan ke-dalam satu fungsi tujuan saja. Metode ini sering kali digunakan karena kesederhanaan dan efisiensi dalam komputasi. Berikut adalah persamaan *multi objective* yang digunakan pada tugas akhir ini.

$$\min(\text{fitness}) = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 \tag{16}$$

keterangan,

fitness : Fungsi tujuan

w_1 : Bobot (weight) fungsi biaya pembangkitan

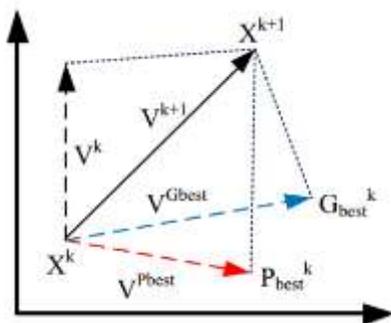
f_1 : Fungsi tujuan biaya pembangkitan

w_2 : Bobot (weight) fungsi emisi karbon dioksida (CO2)

f_2 : Fungsi tujuan emisi karbon dioksida (CO2)

B. Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle Swarm Optimization mulai diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995. Algoritma PSO terinspirasi dari perilaku populasi burung untuk mencari sumber makanan yang terbaik. Setiap individu pada populasi burung disebut partikel. Letak sumber makanan terbaik direpresentasikan sebagai nilai yang optimal pada pencarian oleh algoritma PSO. Ketika partikel menemukan letak makanan terbaik, partikel lain akan bergerak ke arah partikel yang menemukan letak makanan terbaik tersebut. Bila ada partikel lain yang menemukan letak makanan yang lebih baik dari pada letak sebelumnya, partikel yang lain akan mengubah arah ke arah makanan yang lebih baik. Ketika burung terbang untuk mencari makanan, setiap burung menentukan posisinya berdasarkan pengalamannya sendiri (Pbest) dan berdasarkan pengalaman dari partikel lainnya (Gbest) [2]. Proses pencarian Pbest dan Gbest dapat diilustrasikan pada Gambar 1 [3].



Gambar 1. Konsep pencarian Pbest dan Gbest dari PSO

Selama proses pencarian makanan tersebut, terdapat dua istilah yang ada pada algoritma PSO yaitu kecepatan partikel

dan posisi partikel. Kedua istilah tersebut direpresentasikan pada persamaan berikut.

$$V_i^{it+1} = w^{it} \cdot V_i^{it} + c_1 \cdot r \cdot (Pbest_i - X_i^{it}) + c_2 \cdot r \cdot (Gbest - X_i^{it}) \tag{17}$$

$$X_i^{it+1} = X_i^{it} + V_i^{it+1} \tag{18}$$

$$w^{it} = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min})it}{it_{max}} \tag{19}$$

Keterangan,

X_i^{it} : Posisi partikel ke-i, iterasi saat ini

V_i^{it} : Kecepatan partikel ke-i, iterasi saat ini

X_i^{it+1} : Posisi partikel ke-i, iterasi selanjutnya

V_i^{it+1} : Kecepatan partikel ke-i, iterasi selanjutnya

c_1 : *Cognitive constant (learning rate)*

c_2 : *Social constant (learning rate)*

r : Nilai random anatar 0 dan 1

$Pbest_i$: Posisi terbaik dari partikel ke-i

$Gbest$: Posisi terbaik dari seluruh populasi

w^{it} : Koefisien *inersia* iterasi saat ini

w_{min} : Koefisien *inersia* minimal

w_{max} : Koefisien *inersia* maksimal

it : Iterasi yang selalu berubah dari 1,2,3,..., it_{max}

it_{max} : Nilai iterasi maksimal yang di tentukan

C. Penerapan MOPSO Untuk Menyelesaikan DOPF Dengan Pemasangan Plan CCS

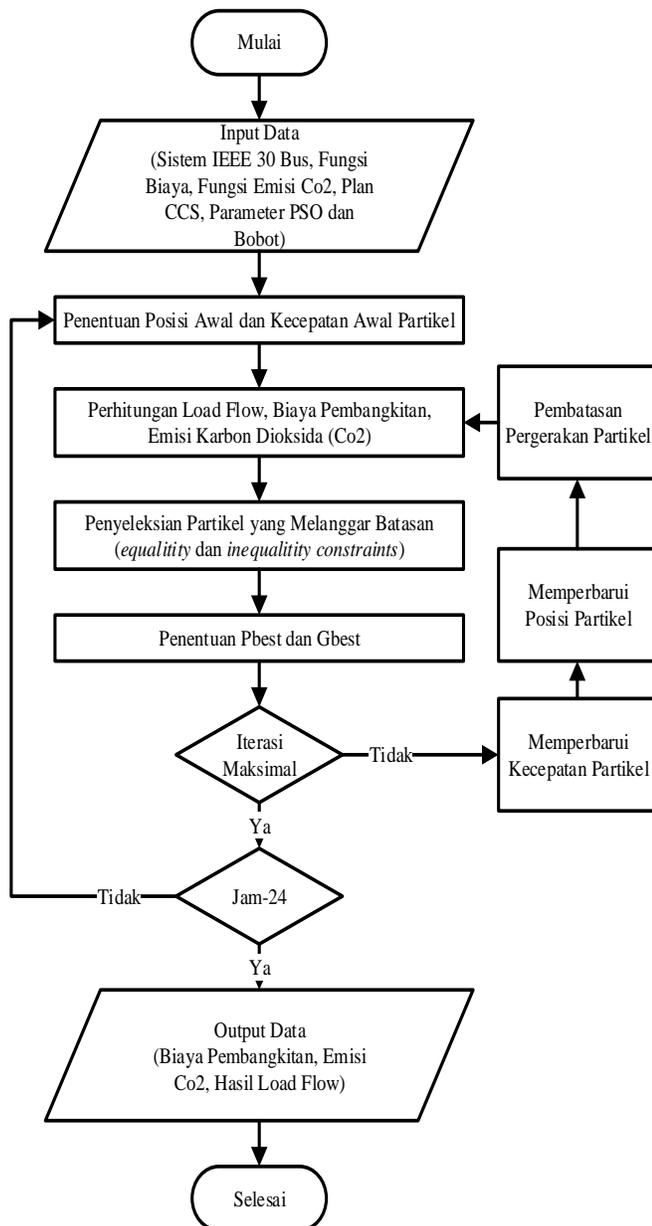
Metode penyelesaian yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah Algoritma MOPSO. Bertujuan untuk mencari nilai *fitness* minimum dari 2 fungsi tujuan yaitu biaya pembangkitan dan emisi karbon dengan memperhatikan batasan-batasan DOPF. Diagram Alir MOPSO Untuk Menyelesaikan DOPF dapat dilihat pada Gambar 2.

(1) Inisialisasi Awal

Parameter awal yang digunakan pada tugas akhir ini merupakan inisialisasi awal algoritma PSO yang digunakan dalam analisis aliran daya optimal pada sistem. Parameter tersebut adalah sebagai berikut.

Jumlah swarm	=	50
Jumlah variable	=	6
Iterasi maksimal	=	100
<i>Cognitive constant</i>	=	0.01
<i>Social constant</i>	=	0.5
Koefisien <i>inersia</i> min	=	0.4
Koefisien <i>inersia</i> max	=	0.9

Partikel adalah sebuah himpunan yang terdiri dari variable. Variable adalah parameter yang akan dioptimasi dalam tugas akhir ini. Fungsi objektif dari tugas akhir ini mencari nilai *fitness* minimum dari 2 fungsi tujuan yaitu biaya pembangkitan dan emisi karbon dengan memperhatikan batasan-batasan DOPF. Iterasi maksimal adalah banyaknya proses pengulangan yang dilakukan dalam optimasi nilai *fitness*. *Social* dan *Cognitive* adalah konstanta yang telah ditetapkan dalam metode optimasi menggunakan algoritma *particle swarm optimization*.



Gambar 2. Diagram Alir MOPSO Untuk Menyelesaikan DOPF

(2) *Inisialisasi Kecepatan*

Parameter kedua yang diinisialisasi adalah kecepatan gerak partikel. Kecepatan gerak partikel didefinisikan menjadi dua yaitu kecepatan minimal dan kecepatan maksimal. Kecepatan minimal partikel adalah nol dan kecepatan maksimal dari partikel adalah nilai acak dari setengah selisih batas maksimal pembangkitan dikurang batas minimal pembangkitan. Kecepatan maksimal partikel dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$V_{max} = 0.5 \times (P_{max} - P_{min}) \tag{20}$$

Keterangan,

V_{max} : Kecepatan maksimal partikel

P_{max} : Daya pembangkitan maksimal dari tiap unit pembangkit

P_{min} : Daya pembangkitan minimal dari tiap unit pembangkit

(3) *Pembangkitan Posisi dan Kecepatan Awal Partikel*

Pembangkitan Posisi dan Kecepatan Awal Partikel

menggunakan metode pembangkitan acak. Pembangkitan posisi awal dari tiap-tiap partikel (pembangkit) tidak boleh melebihi batas daya pembangkitan minimal dan maksimal dari tiap-tiap unit. Selain itu, pembangkitan kecepatan awal tidak boleh melebihi kecepatan maksimal. Pembangkitan posisi dan kecepatan awal partikel dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$X^1 = P_{min} + (P_{max} - P_{min}) \tag{21}$$

$$V^1 = V_{min} + (V_{max} - V_{min}) \tag{22}$$

Keterangan,

X^1 : Posisi awal dari tiap partikel (pembangkit)

V^1 : Kecepatan awal dari tiap partikel (pembangkit)

P_{min} : Daya pembangkitan maksimal dari tiap unit pembangkit

P_{max} : Daya pembangkitan minimal dari tiap unit pembangkit

V_{min} : Kecepatan minimal tiap partikel (pembangkit)

V_{max} : Kecepatan maksimal tiap partikel (pembangkit)

rand : Nilai random anatar 0 dan 1

(4) *Evaluasi Nilai Fitness Populasi*

Parameter nilai *fitness* populasi adalah proses menentukan nilai *fitness* terbaik dengan memperhatikan batasan-batasan yang telah ditentukan. Batasan tersebut adalah aliran daya pada sistem, tegangan bus minimal dan maksimal, *ramp rate*. Partikel yang melanggar batasan yang telah ditentukan akan diberi tanda sehingga partikel tersebut tidak termasuk dalam pemilihan calon solusi.

Cara yang dilakukan untuk penandaan partikel yang melanggar batas adalah dengan merubah nilai *fitness* partikel tersebut menjadi nilai yang sangat besar sehingga partikel tersebut tidak termasuk dalam pemilihan calon solusi.

(5) *Penentuan Posisi Terbaik Lokal dan Global*

Parameter pemilihan *fitness* pada metode PSO didasarkan pada dua hal yaitu posisi terbaik lokal dan posisi terbaik global. Posisi terbaik lokal adalah posisi terbaik yang dimiliki masing-masing partikel sedangkan posisi terbaik global adalah posisi terbaik yang dimiliki oleh kumpulan partikel tersebut.

Fungsi tujuan pada tugas akhir ini mencari nilai *fitness* minimum dari dua fungsi tujuan yaitu biaya pembangkitan dan emisi karbon dioksida (CO2) dengan memperhatikan batasan-batasan yang telah ditentukan dalam DOPF. Jika partikel yang menjadi calon solusi memenuhi batasan tersebut maka nilai *fitness* partikel tersebut akan menjadi posisi terbaik partikel itu sendiri (Pbest).

Posisi terbaik global (Gbest) didapatkan dengan cara mencari nilai paling minimum dari partikel yang memiliki posisi terbaik lokal. Setiap partikel akan mengevaluasi dirinya sendiri dan partikel lain dalam pencarian posisi terbaik global.

(6) *Pembaruan Kecepatan Partikel*

Proses pembaruan kecepatan masing-masing partikel bertujuan agar metode PSO dapat mencapai konvergensi dengan cepat. Setiap partikel memiliki kecenderungan tersendiri dalam menentukan pembaruan kecepatannya. Pembaruan kecepatan setiap partikel mengacu pada dua hal yaitu posisi terbaik lokal partikel itu sendiri (Pbest) atau posisi terbaik global dari keseluruhan partikel (Gbest). Partikel tersebut dengan konstanta pergerakan yang diatur acak akan

cenderung mendekati posisi terbaik global atau cenderung menjauh dari posisi terbaik global karena pada iterasi tertentu posisi terbaik global tersebut belum tentu akan menjadi nilai dengan fungsi tujuan terbaik.

(7) Pembatasan Pergerakan Partikel

Pada setiap transisi antara akhir iterasi dan kembali ke tahap awal iterasi selanjutnya, partikel akan bergerak acak sehingga ada kemungkinan partikel tersebut menuju daerah yang melanggar batasan. Cara yang dilakukan untuk menghindari hal tersebut adalah dengan membatasi pergerakan partikel.

IV. HASIL DAN ANALISIS

Pengujian DOPF dengan penambahan CCS mempertimbangkan biaya dan emisi pada tugas akhir ini menggunakan sistem IEEE 30 bus dengan penambahan plan CCS pada generator 1 dan modifikasi beban menjadi dinamik [1]. Data beban dan plan CCS yang digunakan pada simulasi ini adalah sebagai berikut.

Tabel 1. Fungsi Emisi CO2 Pembangkit Sistem IEEE 30 Bus

Jam	Total Beban	
	MW	MVAR
1	202	89.95201
2	190	84.60833
3	181	80.60056
4	183	81.49118
5	191	85.05363
6	200	89.0614
7	232	103.3112
8	252	112.2174
9	255	113.5533
10	267	118.897
11	269	119.7876
12	252	112.2174
13	233	103.7565
14	246	109.5455
15	236	105.0924
16	253	112.6627
17	268	119.3423
18	279	124.2406
19	283.4	126.2000
20	275	122.4594
21	272	121.1235
22	253	112.6627
23	237	105.5378
24	225	100.1941

Tabel 2. Data Plan Carbon Capture and Storage (CCS)

Pemasangan	B (MW/Ton)	n (%)
Generator 1	0.23	85

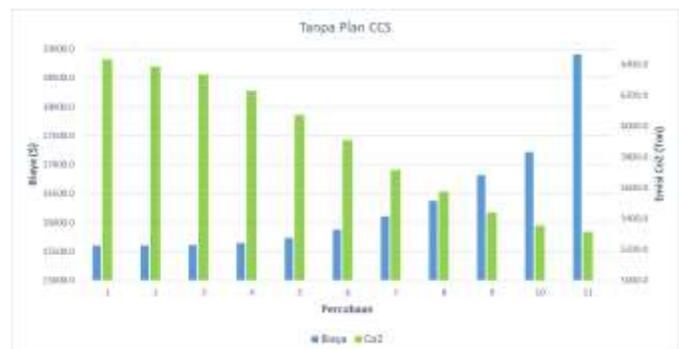
Pengujian dibagi menjadi dua kasus utama, kasus pertama DOPF tanpa pemasangan plan CCS dan kasus kedua DOPF dengan pemasangan plan carbon capture and storage (CCS). Pada tiap kasus utama dilakukan 11 percobaan dengan pembobotan yang berbeda-beda. Hasil percobaan ini ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4. Dari hasil tabel tersebut dibuat kurva biaya dan emisi kardon dioksida (CO2) tiap-tiap kasus yang ditunjukkan pada Gambar 3 - 5.

Tabel 3. Hasil Kasus 1 Tanpa Plan CCS

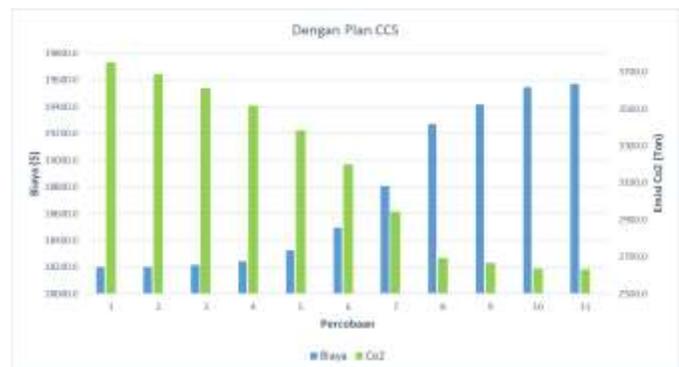
Percobaan	W1 (Biaya)	W2 (CO2)	Biaya (\$)	CO2 (Ton)
1	1.00	0.00	15602.97430	6432.06551
2	0.90	0.10	15604.56089	6383.96610
3	0.80	0.20	15609.46395	6336.75593
4	0.70	0.30	15647.88817	6228.15730
5	0.60	0.40	15735.19425	6071.69699
6	0.50	0.50	15879.21720	5909.70828
7	0.40	0.60	16109.26702	5716.17566
8	0.30	0.70	16374.95994	5573.61257
9	0.20	0.80	16814.00346	5437.36924
10	0.10	0.90	17215.58921	5355.10182
11	0.00	1.00	18910.18984	5313.84688

Tabel 4. Hasil Kasus 2 Dengan Plan CCS

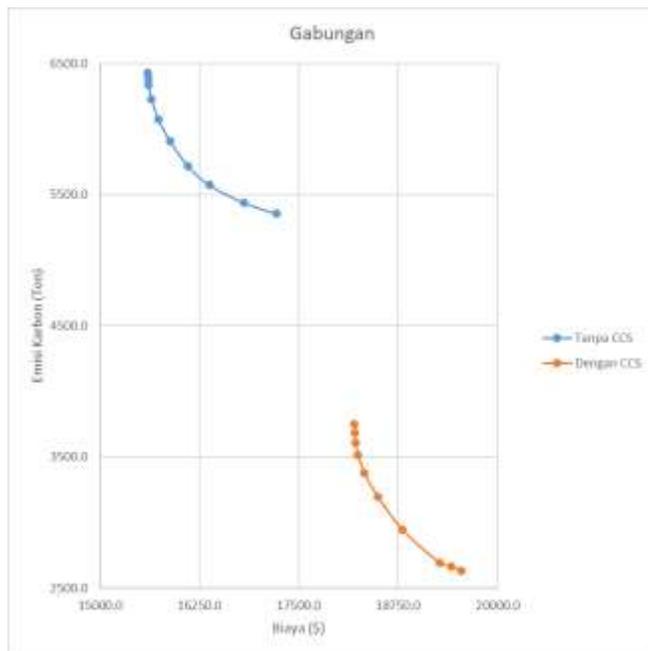
Percobaan	W1 (Biaya)	W2 (CO2)	Biaya (\$)	CO2 (Ton)
1	1.00	0.00	18199.67698	3750.80980
2	0.90	0.10	18201.20424	3686.70938
3	0.80	0.20	18216.24478	3610.02021
4	0.70	0.30	18244.98728	3517.44624
5	0.60	0.40	18325.28275	3381.79884
6	0.50	0.50	18493.31273	3198.29830
7	0.40	0.60	18804.15266	2945.45443
8	0.30	0.70	19269.49936	2694.04982
9	0.20	0.80	19417.97398	2668.27866
10	0.10	0.90	19544.52003	2635.15374
11	0.00	1.00	19568.82365	2631.23970



Gambar 3. Kurva Biaya dan Emisi CO2 Kasus Tanpa Plan CCS



Gambar 4. Kurva Biaya dan Emisi CO2 Kasus Dengan Plan CCS



Gambar 5. Kurva (Plot) Biaya dan Emisi CO2 Gabungan

Berdasarkan hasil percobaan tersebut dapat diketahui bahwa pemasangan plan *carbon capture and storage* (CCS) akan memperbesar biaya pembangkitan dan dapat mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂). Variasi pembobotan sangat mempengaruhi biaya pembangkitan dan emisi karbon dioksida (CO₂). Dimana, semakin besar nilai bobot yang diberikan untuk biaya pembangkitan atau emisi karbon dioksida (CO₂), maka biaya pembangkitan atau karbon dioksida (CO₂) semakin kecil. Sebaliknya, Semakin kecil nilai bobot yang diberikan untuk biaya pembangkitan atau emisi karbon dioksida (CO₂), maka biaya pembangkitan atau karbon dioksida (CO₂) semakin besar.

V. KESIMPULAN

Pengujian dilakukan dengan cara membandingkan DOPF tanpa pemasangan plan *carbon capture and storage* (CCS) dan DOPF dengan pemasangan plan *carbon capture and storage* (CCS). Hasil simulasi membuktikan bahwa pemasangan plan *carbon capture and storage* (CCS) akan memperbesar biaya pembangkitan dan dapat mengurangi emisi karbon dioksida (lihat Gambar 5).

Semakin besar nilai bobot yang diberikan untuk biaya pembangkitan, maka biaya pembangkit akan semakin murah yaitu sebesar \$18199.67698 dan sebaliknya semakin kecil nilai bobot yang diberikan untuk biaya pembangkit, maka biaya pembangkitan akan semakin mahal yaitu sebesar \$ 19568.82365 (kasus pembobotan yang sama).

Sebaliknya ketika nilai bobot yang diberikan untuk emisi karbon dioksida (CO₂) semakin besar, maka emisi karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan pembangkit akan semakin kecil yaitu sebesar 2631.23970 Ton dan sebaliknya semakin kecil nilai bobot yang diberikan untuk emisi karbon dioksida (CO₂), maka emisi karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan pembangkit akan semakin besar yaitu sebesar 3750.80980 Ton (kasus pembobotan yang sama).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yupeng Xiang, Zhinong Wei, Guoqiang Sun, Yonghui Sun, Haixiang Zang. Multi-Objective Dynamic Optimal Power Flow using Fuzzy Sets Theory Incorporating a Carbon Capture Power Plant. Hohai University, China : 2015
- [2] Santosa Budi, Willy Paul, "Metoda Metaheuristik Konsep dan Implementasi", Prima Printing, Surabaya, 2011
- [3] Wahyudi Afif Nur, Wibowo Rony Seto, Robandi Imam, "Dynamic Optimal Power Flow dengan kurva biaya pembangkitan tidak mulus menggunakan Particle Swarm Optimization", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia, 2014