



**TUGAS AKHIR - TE 141599**

***DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW  
MEMPERTIMBANGKAN CARBON CAPTURE AND STORAGE  
PLANTS MENGGUNAKAN METODE  
MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION***

Yauri Mahaputra  
NRP 2214105030

Dosen Pembimbing  
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.  
Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE 141599**

**DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW  
CONSIDERING CARBON CAPTURE AND STORAGE PLANTS  
USING MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION  
METHOD**

Yauri Mahaputra  
NRP 2214105030

Supervisor  
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.  
Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016

**DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW MEMPERTIMBANGKAN  
CARBON CAPTURE AND STORAGE PLANTS  
MENGUNAKAN METODE MULTI-OBJECTIVE PARTICLE  
SWARM OPTIMIZATION**

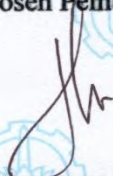
**TUGAS AKHIR**

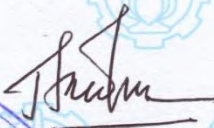
**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

  
**Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT**  
**NIP. 197411292000121001**

  
**Ir. Ni Ketut Aryani, MT.**  
**NIP. 196509011991032002**





***DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW MEMPERTIMBANGKAN  
CARBON CAPTURE AND STORAGE PLANTS  
MENGUNAKAN METODE MULTI-OBJECTIVE PARTICLE  
SWARM OPTIMIZATION***

Yauri Mahaputra  
2214105030

Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT  
Dosen Pembimbing II : Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

**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 (CO<sub>2</sub>) 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 CO<sub>2</sub> 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 (CO<sub>2</sub>). 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 (CO<sub>2</sub>)

*[halaman ini sengaja dikosongkan]*

**DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW CONSIDERING  
CARBON CAPTURE AND STORAGE PLANTS  
USING MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM  
OPTIMIZATION METHOD**

Yauri Mahaputra  
2214105030

Supervisor I : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT  
Supervisor II : Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

**ABSTRACT**

Power plants in operation today are still dominated by plants that are not renewable. Non-renewable power plants using fossil fuels that produce carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) when operating. Besides the demand for electrical energy is always changing every time, while the generator has a limit to the dynamism in generation. Today, the generation cost minimization not only be one criterion in the operation of the power system, but also consider the environmental and technical aspects. This thesis explores the problems Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) system with the addition of carbon capture and storage (CCS) in power plants. The process of Carbon Capture and Storage (CCS) is a series of processes ranging from the separation and capture of CO<sub>2</sub> to keep it in the shelter (geological formations) for a very long time. Optimization method used in this thesis is a Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO). The objective function to be optimized is the cost of generation and emission of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Plan used in this optimization is the IEEE 30 bus system with dynamic load modification and addition of Carbon Capture and Storage Plants. The test results showed that the method is able to perform calculations MOPSO DOPF consider the Carbon Capture and Storage Plants.

Keywords : DOPF, Multi-Objective, PSO, CCS,  
Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Emission

*[halaman ini sengaja dikosongkan]*



# DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan.....	1
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Metodologi Penelitian.....	2
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
1.6 Relevansi.....	4
BAB 2 DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW DAN PLAN CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS).....	5
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.1.1 Sistem Pembangkitan.....	5
2.1.2 Sistem Transmisi.....	6
2.1.3 Sistem Distribusi.....	6
2.1.4 Beban.....	6
2.2 Studi Aliran Daya.....	6
2.2.1 Persamaan Aliran Daya.....	7
2.3 Newton-Raphson (NR).....	8
2.3.1 Fungsi Nonlinear Dengan Satu <i>Variable</i> .....	8
2.3.2 Fungsi Nonlinear Dengan N <i>Variable</i> .....	9
2.4 Dynamic Optimal Power Flow.....	11
2.4.1 Batasan-batasan DOPF.....	11
2.5 Emisi Karbon Dioksida dan CCS Pembangkit.....	12
2.6 <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO).....	14
BAB 3 PENERAPAN MOPSO PADA DOPF DENGAN CCS MEMPERTIMBANGKAN BIA YA DAN EMISI.....	17

3.1	Sistem IEEE 30 Bus Dengan Penambahan CCS .....	17
3.2	Efek Pemasangan Plan CCS [1] .....	22
3.3	<i>Multi Objective Optimization</i> .....	23
3.4	Penerapan MOPSO Untuk Menyelesaikan DOPF Dengan Pemasangan Plan CCS .....	24
3.4.1	Inisialisasi Awal .....	24
3.4.2	Inisialisasi Kecepatan .....	24
3.4.3	Pembangkitan Posisi dan Kecepatan Awal Partikel.....	25
3.4.4	Evaluasi Nilai Fitness Populasi.....	25
3.4.5	Penentuan Posisi Terbaik Lokal dan Global .....	26
3.4.6	Pembaruan Kecepatan Partikel .....	26
3.4.7	Pembatasan Pergerakan Partikel.....	27
BAB 4	SIMULASI DAN ANALISIS .....	29
4.1	Pengujian DOPF Mempertimbangkan Biaya dan Emisi Karbon Dioksida (CO <sub>2</sub> )Menggunakan Metode MOPSO .....	29
4.1.1	Hasil Simulasi dan Analisis Kasus CCS Percobaan 3 .....	33
4.1.2	Hasil Simulasi dan Analisis Kasus CSS Percobaan 6.....	37
4.1.3	Hasil Simulasi dan Analisis Kasus CCS Percobaan 9 .....	42
BAB 5	PENUTUP.....	49
5.1	Kesimpulan .....	49
5.2	Saran.....	50
	DAFTAR PUSTAKA .....	51
	INDEKS .....	53
	LAMPIRAN .....	55
	BIOGRAFI PENULIS .....	75

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Kelistrikan Dengan Tansmisi Interkoneksi .....	5
Gambar 2.2 Ilustrasi Metode Newton-Raphson.....	9
Gambar 2.3 Konsep pencarian Pbest dan Gbest dari PSO .....	15
Gambar 3.1 Sistem IEEE 30 Bus .....	17
Gambar 3.2 Diagram A lir MOPSO Untuk Menyelesaikan DOPF .....	28
Gambar 4.1 Kurva Biaya dan Emisi CO2 Kasus Tanpa Plan CCS .....	30
Gambar 4.2 Kurva Biaya dan Emisi CO2 Kasus Dengan Plan CCS .....	31
Gambar 4.3 Kurva (Plot) Biaya dan Emisi CO2 Kasus Tanpa Plan CCS .....	31
Gambar 4.4 Kurva (Plot) Biaya dan Emisi CO2 Kasus Dengan Plan CCS .....	32
Gambar 4.5 Kurva (Plot) Biaya dan Emisi CO2 Gabungan .....	32
Gambar 4.6 Kurva Daya Pembangkitan Generator Kasus CCS Percobaan 3 .....	33
Gambar 4.7 Kurva Konvergensi Kasus CCS Percobaan 3 .....	34
Gambar 4.8 Kurva Aliran Daya Saluran Kasus CCS Percobaan 3 Jam ke-19 .....	36
Gambar 4.9 Kurva Tegangan Bus Kasus CCS Percobaan 3 Jam ke-19 .	37
Gambar 4.10 Kurva Daya Pembangkitan Generator Kasus CCS Percobaan 6 .....	38
Gambar 4.11 Kurva Konvergensi Kasus CCS Percobaan 6 .....	39
Gambar 4.12 Kurva Aliran Daya Saluran Kasus CCS Percobaan 6 Jam ke-19 .....	41
Gambar 4.13 Kurva Tegangan Bus Kasus CCS Percobaan 6 Jam ke-19 .....	42
Gambar 4.14 Kurva Daya Pembangkitan Generator Kasus CCS Percobaan 9 .....	43
Gambar 4.15 Kurva Konvergensi Kasus CCS Percobaan 9 .....	44
Gambar 4.16 Kurva Aliran Daya Saluran Kasus CCS Percobaan 9 Jam ke-19 .....	46
Gambar 4.17 Kurva Tegangan Bus Kasus CCS Percobaan 9 Jam ke-19 .....	47

*[halaman ini sengaja dikosongkan]*

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data Bus dan Beban Sistem IEEE 30 Bus .....	18
Tabel 3.2 Data Faktor Pengali Beban Sistem IEEE 30 Bus.....	19
Tabel 3.3 Data Saluran Sistem IEEE 30 Bus .....	19
Tabel 3.4 Data Kemampuan Pembangkit Sistem IEEE 30 Bus .....	21
Tabel 3.5 Fungsi Biaya Pembangkitan Sistem IEEE 30 Bus .....	21
Tabel 3.6 Fungsi Emisi CO <sub>2</sub> Pembangkit Sistem IEEE 30 Bus .....	21
Tabel 3.7 Data Plan <i>Carbon Capture and Storage</i> (CCS).....	21
Tabel 4.1 Hasil Kasus 1 Tanpa Plan CCS .....	29
Tabel 4.2 Hasil Kasus 2 Dengan Plan CCS .....	30
Tabel 4.3 Daya Generator, Beban, CCS dan Rugi-rugi Kasus CCS Percobaan 3.....	34
Tabel 4.4 Kenaikan atau Penurunan Daya Generator Kasus CCS Percobaan 3.....	35
Tabel 4.5 Daya Generator, Beban, CCS dan Rugi-rugi Kasus CCS Percobaan 6.....	39
Tabel 4.6 Kenaikan atau Penurunan Daya Generator Kasus CCS Percobaan 6.....	40
Tabel 4.7 Daya Generator, Beban, CCS dan Rugi-rugi Kasus CCS Percobaan 9.....	44
Tabel 4.8 Kenaikan atau Penurunan Daya Generator Kasus CCS Percobaan 9.....	45

*[halaman ini sengaja dikosongkan]*

## **DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran 1 Hasil Simulasi dan Analisis Kasus CCS Percobaan 1.....	55
Lampiran 2 Hasil Simulasi dan Analisis Kasus CCS Percobaan 11 .....	59
Lampiran 3 Hasil Simulasi dan Analisis Kasus Tanpa CCS Perc 3 .....	63
Lampiran 4 Hasil Simulasi dan Analisis Kasus Tanpa CCS Perc 6 .....	67
Lampiran 5 Hasil Simulasi dan Analisis Kasus Tanpa CCS Perc 9 .....	71

*[halaman ini sengaja dikosongkan]*



## DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

$CCS$	$=$	Carbon Capture And Storage
$OPF$	$=$	Optimal Power Flow
$DOPF$	$=$	Dynamic Optimal Power Flow
$MOPSO$	$=$	Multi-Objective Particle Swarm Optimization
$NR$	$=$	Newton-Raphson
$CO_2$	$=$	Karbon dioksida
$F$	$=$	Fungsi biaya pembangkitan
$P_g$	$=$	Daya yang dibangkitkan
$a, b, c$	$=$	Koefisien biaya pembangkitan pembangkit
$t$	$=$	Periode waktu pembangkitan ke $t$
$N_g$	$=$	Total pembangkit
$T$	$=$	Total periode waktu pembangkitan
$P_{g.min}$	$=$	Batas daya aktif minimum keluaran generator
$P_{g.max}$	$=$	Batas daya aktif maksimum keluaran generator
$Q_{g.min}$	$=$	Batas daya reaktif minimum keluaran generator
$Q_{g.max}$	$=$	Batas daya reaktif maksimum keluaran generator
$V$	$=$	Tegangan Bus
$S_{i.max}$	$=$	Kapasitas hantar maksimum saluran
$Ramp$	$=$	Batas <i>ramp rate</i> generator
$C$	$=$	Fungsi karbon dioksida yang dihasilkan pembangkitan
$d$	$=$	Koefisien karbon dioksida pembangkit
$P_E$	$=$	Daya yang dibangkitkan oleh generator dengan pemasangan plan ccs
$P_{OUT(SYSTEM)}$	$=$	Daya yang diberikan ke sistem
$P_S$	$=$	Daya yang dikonsumsi plan ccs
$C_E$	$=$	Jumlah karbon dioksida yang dihasilkan pembangkit dengan pemasangan plan ccs
$C_S$	$=$	Jumlah karbon dioksida yang diserap
$n$	$=$	Rate carbon yang dicapture
$\beta$	$=$	Daya yang dikonsumsi plan ccs per ton serapan
$X_i^{it}$	$=$	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
$c_1$	$=$	<i>Cognitive constant (learning rate)</i>
$c_2$	$=$	<i>Social constant (learning rate)</i>

$r$	=	Nilai random anatar 0 dan 1
$Pbest_i$	=	Posisi terbaik dari partikel ke- $i$
$Gbest$	=	Posisi terbaik dari seluruh populasi
$w^{it}$	=	Koefisien <i>inersia</i> iterasi saat ini
$w_{min}$	=	Koefisien <i>inersia</i> minimal
$w_{max}$	=	Koefisien <i>inersia</i> maksimal
$it$	=	Iterasi yang selalu berubah dari 1,2,3,..., $it_{max}$
$it_{max}$	=	Nilai iterasi maksimal yang di tentukan
$fitness$	=	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)

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

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 (CO<sub>2</sub>) yang dibuang ke udara dalam jumlah besar. Dan untuk mengurangi emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) 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.

### 1.2 Permasalahan

Permasalahan yang diselesaikan pada tugas akhir ini adalah *Dynamic Optimal Power Flow* (DOPF) dengan penambahan sistem *carbon capture and storage* (CCS) pada pembangkit menggunakan *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO). Batasan-batasan seperti *equality constraints* dan *inequality constraints* diterapkan pada penyelesaian optimasi ini. Selanjutnya, yaitu menentukan daya keluaran

setiap pembangkitan agar biaya pembangkitan dan emisi karbon yang dibuang ke udara minimal.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh penambahan plan CCS terhadap output daya pembangkit dan total biaya pembangkit.
2. Menerapkan metode MOPSO pada DOPF dengan penambahan sistem *carbon capture and storage* (CCS) pada pembangkit.
3. Menerapkan batas-batasan (*equality constraints* dan *inequality constraints*) dalam DOPF dengan metode MOPSO.
4. Menentukan daya keluaran setiap pembangkitan agar biaya pembangkitan dan emisi karbon yang dibuang ke udara minimal

### 1.4 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

#### 1. Studi Literatur

Literatur yang digunakan berasal dari buku dan jurnal ilmiah. Dalam studi literatur dipelajari teori-teori pendukung seperti DOPF, pengaruh pemasangan plan *carbon capture and storage* (CCS) pada pembangkit, *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO).

#### 2. Pengumpulan Data

Data yang digunakan meliputi data generator, bus, saluran, beban, plan *carbon capture and storage* (CCS). Data generator meliputi nomor dan tipe pembangkit, kapasitas daya pembangkitan minimum dan maksimum, kapasitas *ramp rate*, fungsi biaya pembangkitan dan fungsi emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Data bus meliputi nomor dan tipe bus serta tegangan bus. Data saluran terdiri dari data impedansi dan kapasitas saluran. Data plan *carbon capture and storage* (CCS) terdiri dari jumlah emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang ditangkap beserta daya diserap dari sistem tiap satu ton tangkapan.

### 3. Pembuatan Program

Membuat program untuk melakukan perhitungan DOPF dengan penambahan sistem *carbon capture and storage* (CCS). Program yang dibuat adalah metode *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) dengan mempertimbangkan batasan-batasan pada DOPF.

### 4. Simulasi dan Analisis

Simulasi dilakukan dengan menggunakan sistem IEEE 30 bus dengan penambahan plan CCS pada generator 1 dan modifikasi beban menjadi dinamik.

### 5. Penulisan Laporan

Hasil penelitian yang telah dilakukan dilaporkan dalam bentuk laporan tugas akhir dan jurnal. Laporan tersebut berisi metode, proses, hasil dan kesimpulan dari penelitian

## 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika Penulisan pada tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut.

### BAB 1 : PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian, metode penelitian, sistematika penulisan dan relevansi dari tugas akhir.

### BAB 2 : DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW DAN PLAN CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS)

Bab ini menjelaskan tentang sistem tenaga listrik, studi aliran daya, emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), *carbon capture and storage* (CCS) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO).

### BAB 3 : PENERAPAN MOPSO PADA DOPF DENGAN PENAMBAHAN CCS MEMPERTIMBANGKAN BIAYA DAN EMISI

Bab ini menjelaskan tentang penerapan MOPSO pada DOPF dengan penambahan CCS mempertimbangkan biaya dan emisi pada sistem IEEE 30 bus (modifikasi).

**BAB 4 : SIMULASI DAN ANALISIS**

Bab ini menjelaskan tentang simulasi dan analisis DOPF dengan penambahan plan CCS pada generator mempertimbangkan biaya dan emisi menggunakan MOPSO.

**BAB 5 : PENUTUP**

Bab ini menjelaskan tentang kesimpulan dan saran dari hasil simulasi dan analisis menggunakan metode MOPSO pada kasus DOPF.

**1.6 Relevansi**

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut.

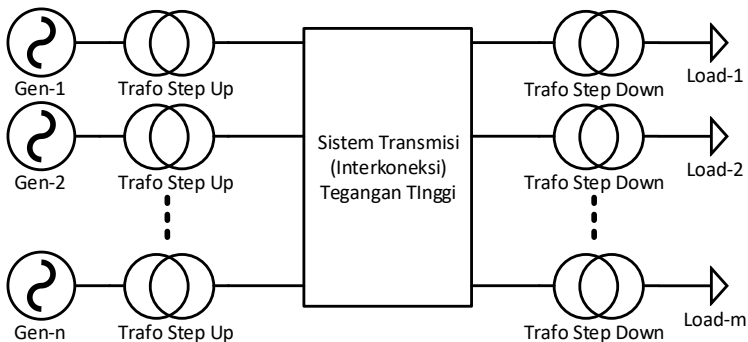
1. Dapat memberikan manfaat perkembangan sistem tenaga listrik khususnya dalam operasi optimum terkait permasalahan DOPF dengan pemasangan plan CCS pada pembangkit.
2. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil topik tugas akhir dengan permasalahan yang serupa.

## BAB 2

# DYNAMIC OPTIMAL POWER FLOW DAN PLAN CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS)

### 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik secara umum digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik. Sistem ini dibagi menjadi menjadi tiga bagian yaitu, sistem pembangkitan, sistem transmisi dan sistem distribusi. Sistem pembangkitan terdiri dari kumpulan pembangkit tenaga listrik yang terhubung dengan sistem transmisi dan sistem distribusi. Sistem transmisi digunakan dalam penyaluran energi listrik dari sistem pembangkit menuju sistem distribusi dengan menggunakan tegangan tinggi. Sedangkan untuk sistem distribusi digunakan untuk penyaluran energi listrik menuju ke beban dengan menggunakan tegangan menengah dan rendah [3].



**Gambar 2.1** Sistem Kelistrikan Dengan Tansmisi Interkoneksi

#### 2.1.1 Sistem Pembangkitan

Sistem pembangkitan tenaga listrik berfungsi membangkitkan energi listrik melalui berbagai macam pembangkit tenaga listrik. Pada pembangkit tenaga listrik ini sumber-sumber energi alam dirubah oleh penggerak mula menjadi energi mekanis yang berupa kecepatan atau putaran dan selanjutnya energi mekanis dirubah menjadi energi listrik oleh generator. Di dalam sebuah sistem pembangkitan beberapa

generator dioperasikan secara paralel dan terhubung dengan sistem guna menyediakan total daya yang diperlukan seperti terlihat pada Gambar 2.1.

### **2.1.2 Sistem Transmisi**

Sistem transmisi berfungsi menyalurkan tenaga listrik dari pusat pembangkit ke pusat beban melalui saluran transmisi. Pada sistem transmisi tegangan yang digunakan adalah tegangan tinggi guna mengurangi rugi-rugi yang disebabkan oleh panas akibat arus yang mengalir pada kabel penghantar [2].

### **2.1.3 Sistem Distribusi**

Sistem Distribusi berfungsi mendistribusikan tenaga listrik ke konsumen yang berupa pabrik, industri, perumahan dan sebagainya. Transmisi tenaga dengan tegangan tinggi maupun tegangan ekstra tinggi pada saluran transmisi dirubah pada gardu induk menjadi tegangan menengah atau tegangan distribusi primer, yang selanjutnya tegangannya diturunkan lagi menjadi tegangan distribusi sekunder untuk melayani konsumen residential dan komersial.

### **2.1.4 Beban**

Secara umum beban yang dilayani oleh sistem distribusi dibagi dalam beberapa sektor yaitu sektor perumahan, sektor industri, sektor komersial dan sektor usaha. Masing-masing sektor beban tersebut mempunyai karakteristik-karakteristik yang berbeda, hal ini berkaitan dengan pola konsumsi energi pada masing-masing konsumen di sektor tersebut.

## **2.2 Studi Aliran Daya**

Studi aliran daya merupakan studi dasar dalam menganalisa suatu sistem tenaga listrik, baik untuk perencanaan maupun operasi. Pada dasarnya sasaran utama dari semua analisa aliran daya adalah menentukan besar dan sudut fasa tegangan pada setiap bus, dengan diketahuinya tegangan maka daya aktif ( $P$ ) dan daya reaktif ( $Q$ ) dapat dihitung. Jika  $P$  dan  $Q$  pada dua buah bus diketahui maka aliran daya dengan jelas dapat diketahui, serta rugi-rugi daya saluran penghubung dapat diketahui [2].



### 2.2.1 Persamaan Aliran Daya

Persamaan aliran daya dapat diturunkan dari persamaan matriks admitansi bus yang ditulis dalam bentuk persamaan berikut.

$$P_i - jQ_i = (V_j^*) \sum_{j=1}^n (Y_{ij} V_j) \quad (2.1)$$

Jika persamaan aliran daya yang digunakan dalam bentuk *rectangular* untuk sebuah besaran, maka diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} P_i &= e_i \left( \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) \right) - f_i \left( \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \right) \\ Q_i &= f_i \left( \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) \right) - e_i \left( \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Pada persamaan ini, elemen matriks  $Y_{bus}$  dinyatakan dalam bentuk *rectangular* sebagai berikut.

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (2.3)$$

Jika dipilih persamaan aliran daya dalam bentuk *polar*, maka diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} P_i &= |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij}) \\ Q_i &= |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_i - \theta_j - \Psi_{ij}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Pada persamaan ini, elemen matriks  $Y_{bus}$  dinyatakan dalam bentuk *rectangular* sebagai berikut.

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \Psi_{ij} \quad (2.5)$$

Persamaan diatas jika dinyatakan ke dalam bentuk matriks admitansi adalah sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

## 2.3 Newton-Raphson (NR)

Metode Newton-Raphson banyak digunakan untuk menyelesaikan persamaan nonlinear. Dengan metode Newton-Raphson persamaan nonlinear diubah kedalam bentuk linear dan digunakan untuk menentukan solusi dari persamaan nonlinear tersebut. Metode ini dapat diterapkan untuk menentukan satu besaran yang tidak diketahui dalam satu persamaan atau sistem dengan sejumlah persamaan dengan besaran yang tidak diketahui yang jumlahnya sama dengan jumlah persamaannya.

### 2.3.1 Fungsi Nonlinear Dengan Satu Variable

Diberikan  $F(x) = 0$  sebagai persamaan nonlinear. Setiap nilai  $x$  yang memenuhi  $F(x) = 0$  adalah akar dari  $F(X)$ , untuk mendapatkan akar tertentu, diperlukan perkiraan awal untuk  $x$  pada sekitar nilai akar tersebut. Dengan perkiraan awal yaitu  $x_0$ .

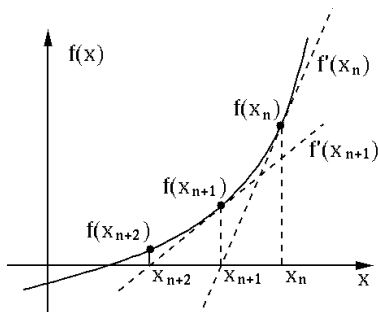
$$F(x_0) = \Delta F_0 \quad (2.7)$$

Berdasarkan persamaan tersebut,  $\Delta F_0$  adalah kesalahan (*error*) bila  $x_0$  bukan akar dari  $F(X)$ . Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.2. Garis singgung ditarik pada titik di kurva yang sesuai dengan  $x_0$ , dan diproyeksikan sampai memotong sumbu  $x$  untuk menentukan perkiraan kedua dari akar dan seterusnya sampai nilai  $\Delta F_0$  lebih kecil dari indeks presisi yang ditentukan (toleransi). Garis singgung pada persamaan ini diberikan oleh persamaan sebagai berikut.

$$y(x) = F(x_n) + F'(x_n)(x - x_n) \quad (2.8)$$

Dari persamaan tersebut, apabila  $y(x) = 0$ , diberikan rumus untuk perkiraan nilai akar pada setiap iterasi.

$$x_{n-1} = x_n - \frac{F(x_n)}{F'(x_n)} \quad (2.9)$$



**Gambar 2.2** Ilustrasi Metode Newton-Raphson

### 2.3.2 Fungsi Nonlinear Dengan $N$ Variable

Konsep dimensi tunggal dari metode NR dapat diperluas sampai dimensi  $N$ . Dalam hal ini diperlukan analogi dimensi  $N$  dari turunan pertama dengan menggunakan matriks Jacobian. Setiap baris dari  $N \times N$  matriks Jacobian terdiri dari turunan parsial salah satu persamaan nonlinear dari sistem. Untuk memahami konsep ini, digunakan contoh khusus untuk  $N = 2$ . Asumsikan bahwa diketahui dua persamaan nonlinear  $F_1, F_2$ .

$$F_1(x_1, x_2) = 0 \quad F_2(x_1, x_2) = 0 \quad (2.10)$$

Matriks Jacobian untuk sistem  $2 \times 2$  adalah sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \frac{\delta F_1}{\delta x_1} & \frac{\delta F_1}{\delta x_2} \\ \frac{\delta F_2}{\delta x_1} & \frac{\delta F_2}{\delta x_2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Bila matriks Jacobian secara numerik dievaluasi pada titik  $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$ , maka hubungan linear untuk perubahan kecil  $(\Delta x_1, \Delta x_2)$  diberikan pada persamaan berikut.

$$\begin{bmatrix} \frac{\delta F_1}{\delta x_1} & \frac{\delta F_1}{\delta x_2} \\ \frac{\delta F_2}{\delta x_1} & \frac{\delta F_2}{\delta x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(x) \\ \Delta x_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta F_1(x) \\ \Delta F_2(x) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Algoritma rekursif dapat dikembangkan untuk perhitungan vektor  $(\Delta x_1, \Delta x_2)$ . Setiap perubahan kecil  $(\Delta x_1, \Delta x_2)$  adalah penyelesaian untuk persamaan linear yang saling berhubungan. Dengan menggunakan perkiraan awal yang benar, algoritma ini akan konvergen dan diperoleh penyelesaian dari persamaan non linear tersebut. Bila  $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$  adalah perkiraan awal. Kemudian kesalahan adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta F_1^{(0)} &= -F_1[x_1^{(0)}, x_2^{(0)}] \\ \Delta F_2^{(0)} &= -F_2[x_1^{(0)}, x_2^{(0)}]\end{aligned}\quad (2.13)$$

Matriks Jacobian dievaluasi pada penyelesaian percobaan di titik  $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$ . Setiap elemen dari matriks Jacobian dihitung dari rumus aljabar untuk turunan parsial yang sehubungan menggunakan  $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}$ .

$$\begin{bmatrix} \frac{\delta F_1^{(0)}}{\delta x_1} & \frac{\delta F_1^{(0)}}{\delta x_2} \\ \frac{\delta F_2^{(0)}}{\delta x_1} & \frac{\delta F_2^{(0)}}{\delta x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(1)} \\ \Delta x_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta F_1^{(0)} \\ \Delta F_2^{(0)} \end{bmatrix}\quad (2.14)$$

Pada sistem dengan persamaan linear kemudian diselesaikan secara langsung untuk koreksi pertama. Koreksi tersebut kemudian ditambahkan ke variable pada iterasi awal (nol) untuk memperoleh nilai variable pada iterasi pertama.

$$\begin{bmatrix} x_1^{(1)} \\ x_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{(0)} \\ x_2^{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(1)} \\ \Delta x_2^{(1)} \end{bmatrix}\quad (2.15)$$

Persamaan (2.14) dan (2.15) akan ditulis kembali menggunakan simbol matriks dan *superscript* umum  $h$  untuk menunjukkan proses iterasi.

$$[j^{h-1}][\Delta x^h] = [\Delta F^{h-1}]\quad (2.16)$$

$$x^h = x^{h-1} + \Delta\quad (2.17)$$

Algoritma ini diulang sampai  $\Delta F^h$  memenuhi angka toleransi tertentu. Pada hampir semua masalah yang diselesaikan dengan algoritma NR dapat digunakan toleransi sangat kecil (mendekati nol).

## 2.4 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.

$$F = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^{N_g} \left( a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + c_i \right) \right) \$/T \quad (2.18)$$

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

### 2.4.1 Batasan-batasan DOPF

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*

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{gi}(t) = P_D(t) + P_L(t) \quad (2.19)$$

*Equality constraint* adalah batasan dimana total daya yang dibangkitkan sama dengan total beban ditambah dengan rugi-rugi jaringan.

## 2. *Inequality constraint*

$$P_{gi.min} \leq P_{gi} \leq P_{gi.max} \quad (2.20)$$

$$Q_{gi.min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi.max} \quad (2.21)$$

$$V_{bi.min} \leq V_{bi} \leq V_{bi.max} \quad (2.22)$$

$$S_{li} \leq S_{li.max} \quad (2.23)$$

$$Ramp_{gi(down)} \leq P_{gi(t+1)} - P_{gi} \leq Ramp_{gi(up)} \quad (2.24)$$

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.

## 2.5 Emisi Karbon Dioksida dan CCS Pembangkit

Pembangkitan tenaga listrik pada umumnya masih menggunakan pembangkit dengan bahan bakar fosil dan menghasilkan emisi berupa karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang dibuang ke udara dalam jumlah besar. Berikut adalah persamaan emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) pembangkit [1].

$$C = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^{Ng} (d_i P_{gi}^t) \right) Ton/T \quad (2.25)$$

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 (CO<sub>2</sub>) 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 CO<sub>2</sub> 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 (CO<sub>2</sub>) 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.

$$P_E = P_{OUT(SYSTEM)} + P_S \quad (2.26)$$

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

Besar daya yang dikonsumsi plan ccs dipengaruhi oleh jumlah karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang diserap dan daya konsumsi tiap ton serapan. Berikut adalah persamaan daya konsumsi plan ccs.

$$C_E = d \times P_E \quad (2.27)$$

$$C_S = C_E \times n \quad (2.28)$$

$$P_S = \beta \times C_S \quad (2.29)$$

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 dicaprute

$\beta$  : Daya yang dikonsumsi plan ccs per ton serapan

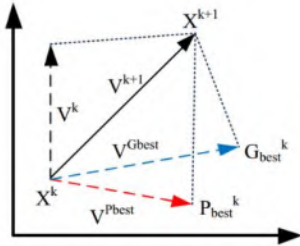
Dari persamaan (2.26) - (2.29), daya pembangkitan generator dengan pemasangan plan ccs ( $P_E$ ) dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$P_E = \frac{1}{1-\beta n d} P_{OUT(SYSTEM)} \quad (2.30)$$

## 2.6 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) [4]. Proses pencarian Pbest dan Gbest dapat diilustrasikan pada Gambar 2.3 [5].





**Gambar 2.3** 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.

$$V_i^{it+1} = w^{it} \cdot V_i^{it} + c_1 \cdot r \cdot (Pbest_i - X_i^{it}) + c_2 \cdot r \cdot (Gbest - X_i^{it}) \quad (2.31)$$

$$X_i^{it+1} = X_i^{it} + V_i^{it+1} \quad (2.32)$$

$$w^{it} = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min})it}{it_{max}} \quad (2.33)$$

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

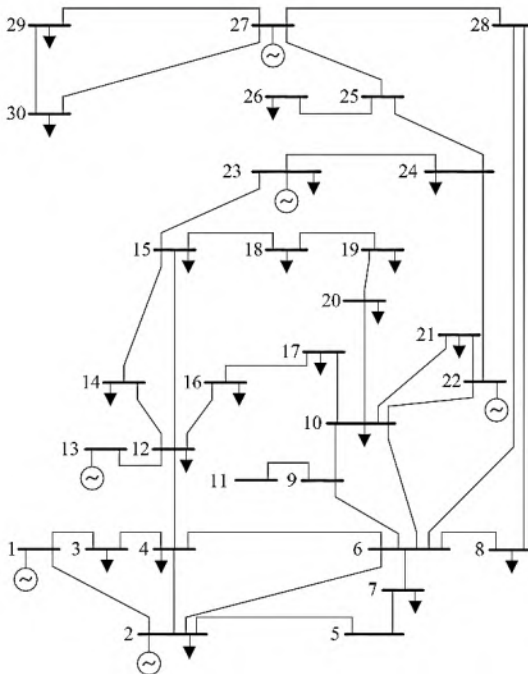
*[halaman ini sengaja dikosongkan]*

# BAB 3

## PENERAPAN MOPSO PADA DOPF DENGAN CCS MEMPERTIMBANGKAN BIAYA DAN EMISI

### 3.1 Sistem IEEE 30 Bus Dengan Penambahan CCS

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-data seperti data bus, data faktor pengali beban, data saluran, batasan kemampuan pembangkit, fungsi biaya pembangkitan, fungsi emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan data plan *carbon capture and storage* (CCS). Data-data tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.1 - 3.7.



**Gambar 3.1** Sistem IEEE 30 Bus

**Tabel 3.1** Data Bus dan Beban Sistem IEEE 30 Bus

Nomor Bus	Jenis Bus	Beban	
		MW	MVAR
1	Slack	0	0
2	Generator	21,7	12,7
3	Beban	2,4	1,2
4	Beban	7,6	1,6
5	Generator	94,2	19
6	Beban	0	0
7	Beban	22,8	10,9
8	Generator	30	30
9	Beban	0	0
10	Beban	5,8	2
11	Generator	0	0
12	Beban	11,2	7,5
13	Generator	0	0
14	Beban	6,2	1,6
15	Beban	8,2	2,5
16	Beban	3,5	1,8
17	Beban	9	5,8
18	Beban	3,2	0,9
19	Beban	9,5	3,4
20	Beban	2,2	0,7
21	Beban	17,5	11,2
22	Beban	0	0
23	Beban	3,2	1,6
24	Beban	8,7	6,7
25	Beban	0	0
26	Beban	3,5	2,3
27	Beban	0	0
28	Beban	0	0
29	Beban	2,4	0,9
30	Beban	10,6	1,9

**Tabel 3.2** Data Faktor Pengali Beban Sistem IEEE 30 Bus

Jam	Faktor Pengali	Total Beban	
		MW	MVAR
1	0,712773	202	89,95201
2	0,67043	190	84,60833
3	0,638673	181	80,60056
4	0,64573	183	81,49118
5	0,673959	191	85,05363
6	0,705716	200	89,0614
7	0,818631	232	103,3112
8	0,889203	252	112,2174
9	0,899788	255	113,5533
10	0,942131	267	118,897
11	0,949188	269	119,7876
12	0,889203	252	112,2174
13	0,822159	233	103,7565
14	0,868031	246	109,5455
15	0,832745	236	105,0924
16	0,892731	253	112,6627
17	0,94566	268	119,3423
18	0,984474	279	124,2406
19	1	283,4	126,2
20	0,97036	275	122,4594
21	0,959774	272	121,1235
22	0,892731	253	112,6627
23	0,836274	237	105,5378
24	0,793931	225	100,1941

**Tabel 3.3** Data Saluran Sistem IEEE 30 Bus

Saluran	Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Kapasitas Saluran (MVA)
1	1	2	0,0192	0,0575	0,0264	130
2	1	3	0,0452	0,1852	0,0204	130
3	2	4	0,057	0,1737	0,0184	65
4	3	4	0,0132	0,0379	0,0042	130
5	2	5	0,0472	0,1983	0,0209	130
6	2	6	0,0581	0,1763	0,0187	65

**Tabel 3.3** Data Saluran Sistem IEEE 30 Bus (lanjutan)

Saluran	Dari	Ke	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Kap Sal (MVA)
7	4	6	0,0119	0,0414	0,0045	90
8	5	7	0,046	0,116	0,0102	70
9	6	7	0,0267	0,082	0,0085	130
10	6	8	0,012	0,042	0,0045	32
11	6	9	0	0,208	0	65
12	6	10	0	0,556	0	32
13	9	11	0	0,208	0	65
14	9	10	0	0,11	0	65
15	4	12	0	0,256	0	65
16	12	13	0	0,14	0	65
17	12	14	0,1231	0,2559	0	32
18	12	15	0,0662	0,1304	0	32
19	12	16	0,0945	0,1987	0	32
20	14	15	0,221	0,1997	0	16
21	16	17	0,0824	0,1923	0	16
22	15	18	0,1073	0,2185	0	16
23	18	19	0,0639	0,1292	0	16
24	19	20	0,034	0,068	0	32
25	10	20	0,0936	0,209	0	32
26	10	17	0,0324	0,0845	0	32
27	10	21	0,0348	0,0749	0	32
28	10	22	0,0727	0,1499	0	32
29	21	22	0,0116	0,0236	0	32
30	15	23	0,1	0,202	0	16
31	22	24	0,115	0,179	0	16
32	23	24	0,132	0,27	0	16
33	24	25	0,1885	0,3292	0	16
34	25	26	0,2544	0,38	0	16
35	25	27	0,1093	0,2087	0	16
36	28	27	0	0,396	0	65
37	27	29	0,2198	0,4153	0	16
38	27	30	0,3202	0,6027	0	16
39	29	30	0,2399	0,4533	0	16
40	8	28	0,0636	0,2	0,0214	32
41	6	28	0,0169	0,0599	0,065	32

**Tabel 3.4** Data Kemampuan Pembangkit Sistem IEEE 30 Bus

Pembangkit	Pmin (MW)	Pmax (MW)	Ramp Rate (MW)
1	50	200	50
2	20	80	20
3	15	50	14
4	10	35	9
5	10	30	8
6	12	40	10

**Tabel 3.5** Fungsi Biaya Pembangkitan Sistem IEEE 30 Bus

Pembangkit	Fungsi Biaya Pembangkitan (\$/Jam)		
	a	b	c
1	0,00375	2	0
2	0,0175	1,75	0
3	0,0625	1	0
4	0,0083	3,25	0
5	0,025	3	0
6	0,025	3	0

**Tabel 3.6** Fungsi Emisi CO2 Pembangkit Sistem IEEE 30 Bus

Pembangkit	Fungsi Emisi CO2 (Ton/Jam)
	d
1	1,186
2	1,186
3	1,186
4	0,434
5	0,434
6	0,78

**Tabel 3.7** Data Plan *Carbon Capture and Storage* (CCS)

Pemasangan	$\beta$ (MW/Ton)	$n$ (%)
Generator 1	0,23	85

### 3.2 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 (CO<sub>2</sub>) 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].

$$\sum_{t=1}^T [P_E^t + \sum_{i=2}^{N_g} P_{gi}^t] = \sum_{t=1}^T [P_D^t + P_L^t + P_S^t] \quad (3.1)$$

$$C = \sum_{t=1}^T \left[ ((1 - n) d_1 P_E^t) + \left( \sum_{i=2}^{N_g} (d_i P_{gi}^t) \right) \right] \quad (3.2)$$

keterangan,

$P_E$  : Daya yang dibangkitkan pembangkit unit 1  
(pembangkit dengan 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



### 3.3 *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. Metode *weighted sum* menggabungkan beberapa fungsi tujuan dengan *weights*. Persamaan metode *weighted sum* adalah sebagai berikut.

$$fitness = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 + \dots + w_n f_n \quad (3.3)$$

keterangan,

- fitness* : Fungsi tujuan
- $w_1$  : Bobot (weight) fungsi tujuan 1
- $f_1$  : Fungsi tujuan 1
- $w_2$  : Bobot (weight) fungsi tujuan 2
- $f_2$  : Fungsi tujuan 2
- $w_n$  : Bobot (weight) fungsi tujuan ke-n
- $f_n$  : Fungsi tujuan ke-n

Terdapat dua fungsi tujuan dalam perhitungan DOPF dengan penambahan sistem *carbon capture and storage* (CCS) pada pembangkit. Berikut adalah persamaan *multi objective* yang digunakan pada tugas akhir ini.

$$\min (fitness) = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 \quad (3.4)$$

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 (CO<sub>2</sub>)
- $f_2$  : Fungsi tujuan emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>)

### 3.4 Penerapan MOPSO Untuk Menyelesaikan DOPF Dengan Pemasangan Plan CCS

Metode penyelesaian yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah Algoritma MOPSO. Bertujuan untuk mencari nilai *fitnes* minimum dari 2 fungsi tujuan yaitu biaya pembangkitan dan emisi karbon dengan memperhatikan batasan-batasan DOPF. Berikut adalah diagram alir metode MOPSO untuk menyelesaikan DOPF dengan pemasangan Plan CCS beserta penjelasannya pada sub bab 3.4.1 - 3.4.7.

#### 3.4.1 Inisialisasi Awal

Parameter awal yang digunakan pada tugas akhir ini merupakan inisialisasi awal algoritma PSO yang digunakan dalam analisi 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

Pertikel 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 *fitnes* 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 *fitnes*. *Social* dan *Cognitive* adalah konstanta yang telah ditetapkan dalam metode optimasi menggunakan algoritma *particle swarm optimization*.

#### 3.4.2 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.

$$V_{max} = 0,5 \times (P_{max} - P_{min}) \quad (3.5)$$

keterangan,

$V_{max}$  : Kecepatan maksimal partikel

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

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

### 3.4.3 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 yang telah dijelaskan pada sub bab 3.4.2. Pembangkitan posisi dan kecepatan awal partikel dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$X^1 = P_{min} + (P_{max} - P_{min}).rand \quad (3.6)$$

$$V^1 = V_{min} + (V_{max} - V_{min}).rand \quad (3.7)$$

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

### 3.4.4 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.

#### **3.4.5 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 (CO<sub>2</sub>) 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.

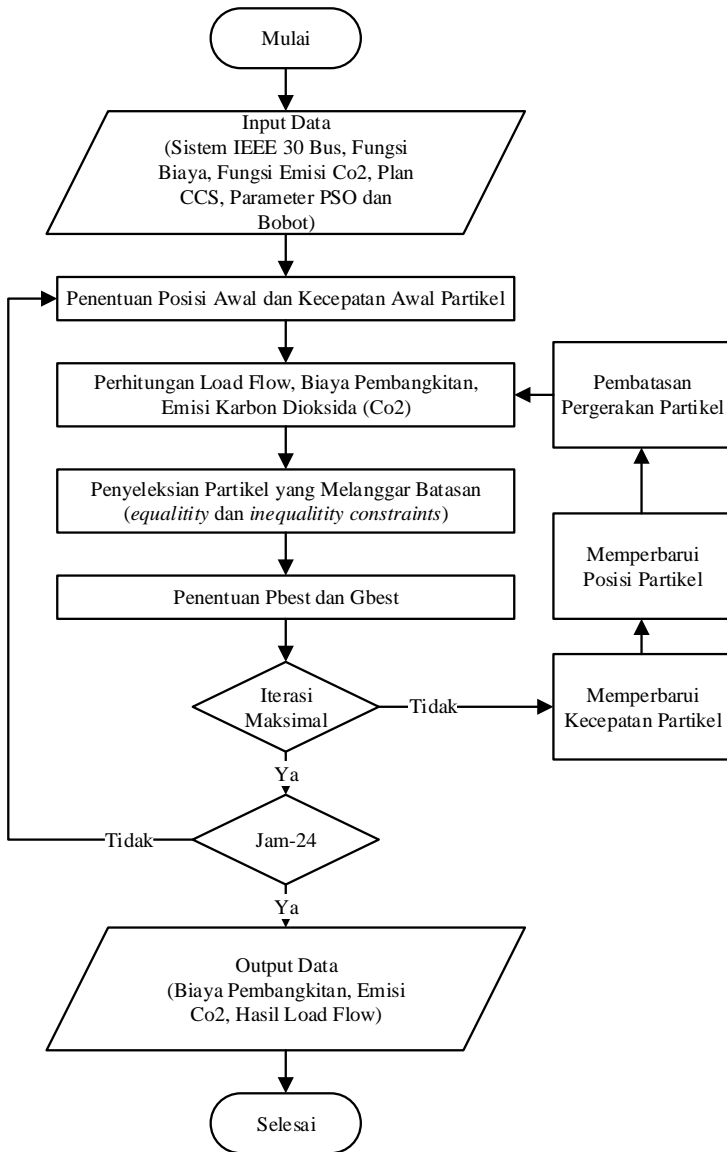
#### **3.4.6 Pembaruan Kecepatan Partikel**

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.

### **3.4.7 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.



**Gambar 3.2** Diagram Alir MOPSO Untuk Menyelesaikan DOPF

## BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

### 4.1 Pengujian DOPF Mempertimbangkan Biaya dan Emisi Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>) Menggunakan Metode MOPSO

Pada pengujian ini dilakukan perhitungan *Dynamic Optimal Power Flow* (DOPF) mempertimbangkan biaya pembangkitan dan emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) menggunakan metode MOPSO. Pada tugas akhir ini 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 4.1 dan Tabel 4.2. Dari hasil tabel tersebut dibuat kurva biaya dan emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) tiap-tiap kasus yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 – 4.5.

Berdasarkan hasil percobaan tersebut dapat diketahui bahwa pemasangan plan *carbon capture and storage* (CCS) akan memperbesar biaya pembangkitan dan dapat mengurangi emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Variasi pembobotan sangat mempengaruhi biaya pembangkitan dan emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Dimana, semakin besar nilai bobot yang diberikan untuk biaya pembangkitan atau emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), maka biaya pembangkitan atau karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) semakin kecil. Sebaliknya, Semakin kecil nilai bobot yang diberikan untuk biaya pembangkitan atau emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), maka biaya pembangkitan atau karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) semakin besar. Hasil simulasi lengkap dapat dilihat pada Lampiran.

**Tabel 4.1** Hasil Kasus 1 Tanpa Plan CCS

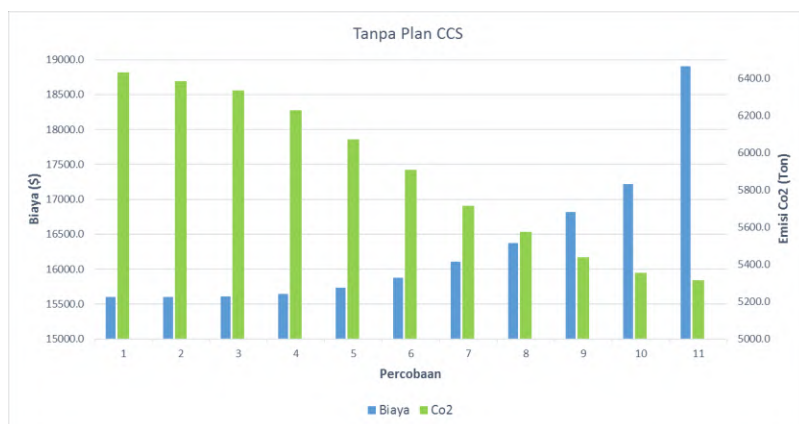
Percobaan	Weight 1 (Biaya)	Weight 2 (CO <sub>2</sub> )	Biaya (\$)	CO <sub>2</sub> (Ton)
1	1,00	0,00	15602,97430	6432,06551
2	0,90	0,10	15604,56089	6383,96610
3	0,80	0,20	15609,46395	6336,75593
4	0,70	0,30	15647,88817	6228,15730
5	0,60	0,40	15735,19425	6071,69699
6	0,50	0,50	15879,21720	5909,70828
7	0,40	0,60	16109,26702	5716,17566

**Tabel 4.1** Hasil Kasus 1 Tanpa Plan CCS (lanjutan)

Percobaan	Weight 1 (Biaya)	Weight 2 (CO2)	Biaya (\$)	CO2 (Ton)
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

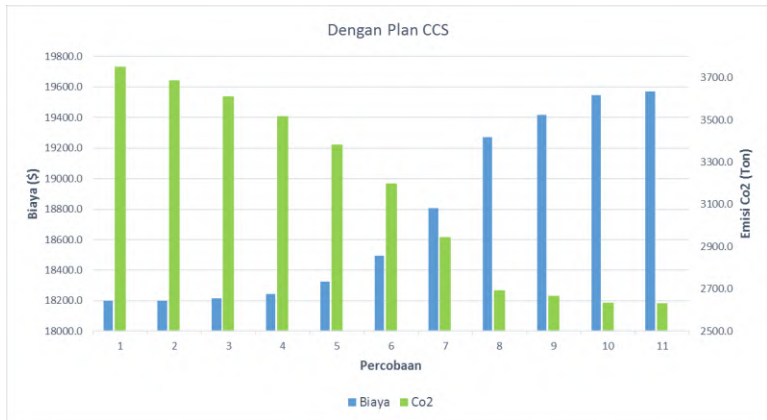
**Tabel 4.2** Hasil Kasus 2 Dengan Plan CCS

Percobaan	Weight 1 (Biaya)	Weight 2 (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

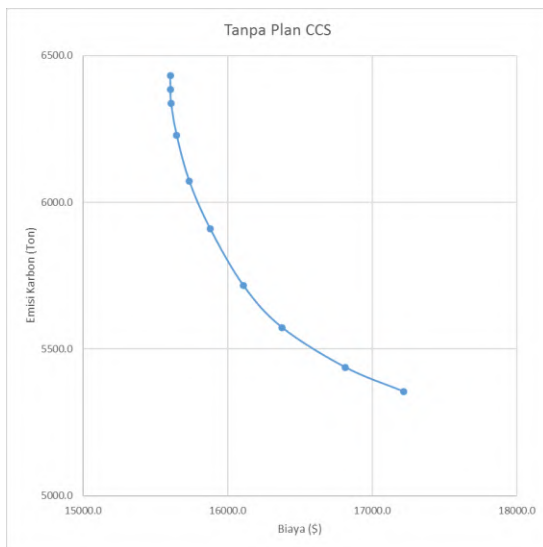


**Gambar 4.1** Kurva Biaya dan Emisi CO2 Kasus Tanpa Plan CCS

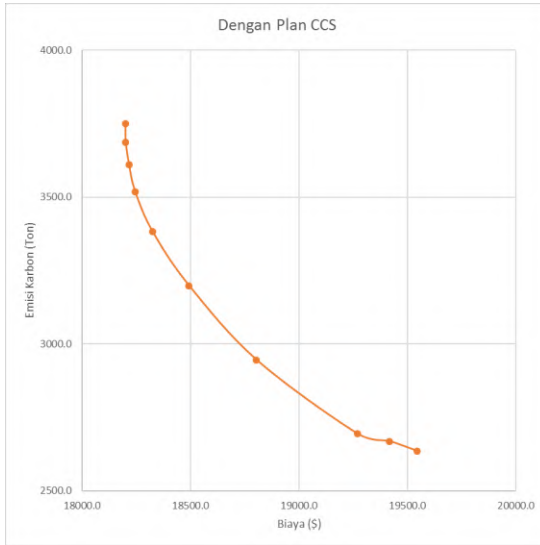




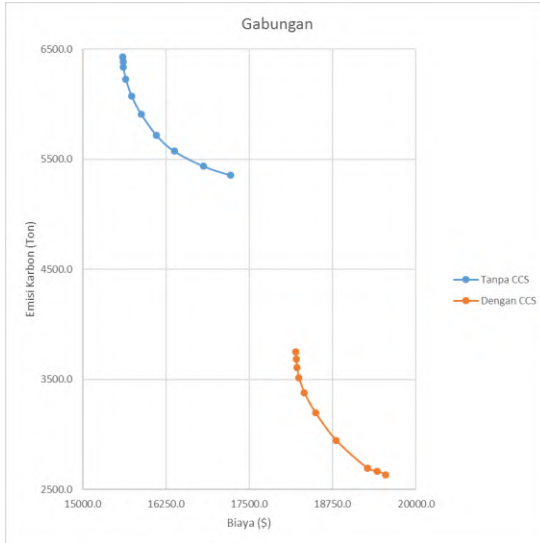
**Gambar 4.2** Kurva Biaya dan Emisi CO2 Kasus Dengan Plan CCS



**Gambar 4.3** Kurva (Plot) Biaya dan Emisi CO2 Kasus Tanpa Plan CCS



**Gambar 4.4** Kurva (Plot) Biaya dan Emisi CO2 Kasus Dengan Plan CCS



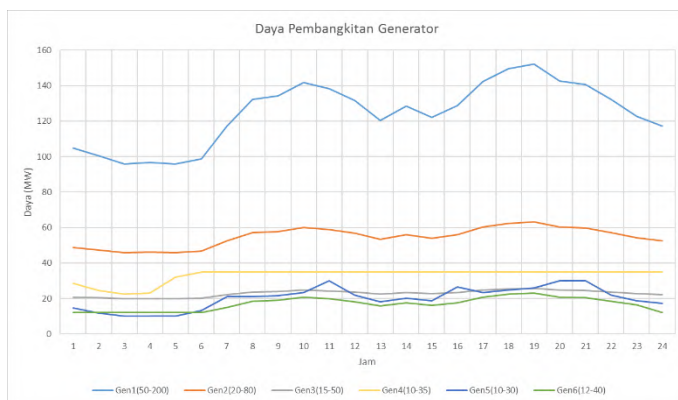
**Gambar 4.5** Kurva (Plot) Biaya dan Emisi CO2 Gabungan

### 4.1.1 Hasil Simulasi dan Analisis Kasus CCS Percobaan 3

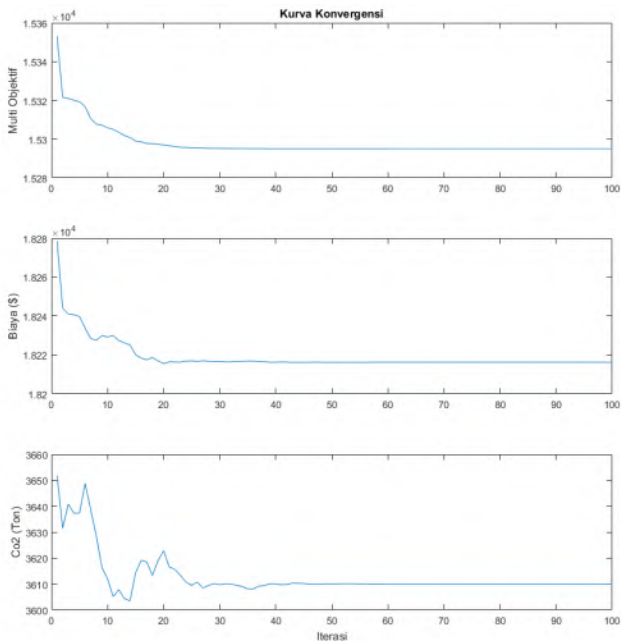
Pada kasus ini, dilakukan simulasi dan analisis *Dynamic Optimal Power Flow* (DOPF) dengan pemasangan plan *carbon capture and storage* (CCS). Bobot yang digunakan pada kasus ini adalah  $w_1 = 0,8$  untuk biaya pembangkitan dan  $w_2 = 0,2$  untuk emisi karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ). Kurva konvergensi simulasi dan kurva daya pembangkitan tiap jam ditunjukkan pada Gambar 4.6 dan 4.7. Dilihat dari kurva daya pembangkitan tiap jam, generator dengan biaya pembangkitan murah dioperasikan mendekati pembangkitan maksimal ( $P_{\max}$ ). Hal ini disebabkan oleh pembobotan yang lebih besar pada biaya pembangkitan.

Hasil simulasi seperti daya pembangkitan generator, daya total beban, daya plan *carbon capture and storage* (CCS) dan rugi-rugi daya dapat dilihat pada Tabel 4.3. Dari tabel tersebut diketahui bahwa daya yang dibangkitkan sama dengan dengan jumlah daya total beban ditambah daya plan *carbon capture and storage* (CCS) dan rugi-rugi daya, sehingga telah memenuhi batasan *equality*. Dari tabel tersebut juga dapat diketahui daya pembangkitan generator telah memenuhi batasan *inequality* ( $P_{\min}$  dan  $P_{\max}$ ).

Adapun hasil simulasi seperti nilai tegangan bus, daya yang mengalir pada saluran dan kenaikan atau penurunan daya generator dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.8 dan 4.9. Dari tabel tersebut juga dapat diketahui bahwa simulasi ini telah memenuhi batasan *inequality* (ramp rate generator, kapasitas daya saluran, tegangan bus 0,95-1,05 pu).



Gambar 4.6 Kurva Daya Pembangkitan Generator Kasus CCS Percobaan 3



**Gambar 4.7** Kurva Konvergensi Kasus CCS Percobaan 3

**Tabel 4.3** Daya Generator, Beban, CCS dan Rugi-rugi Kasus CCS Percobaan 3

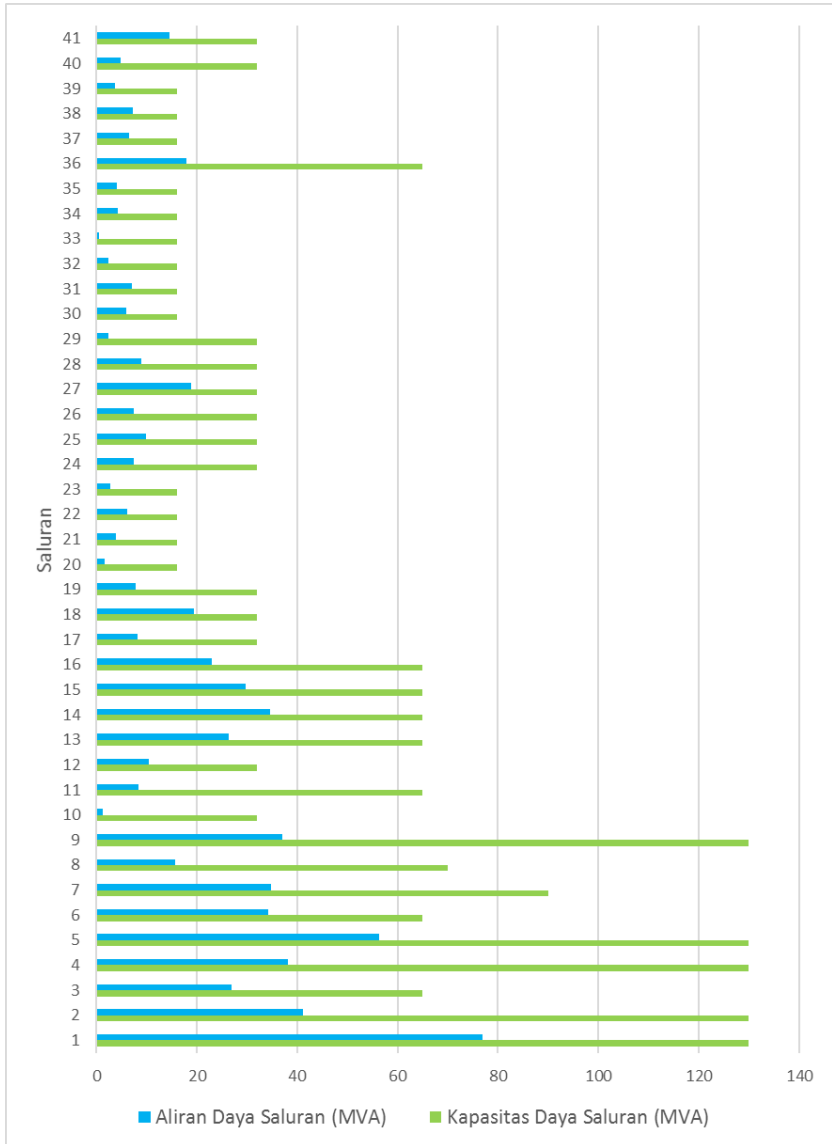
Jam ke-	Daya Pembangkitan Generator ke- (MW)						Beban (MW)	CCS (MW)	Rugi <sup>2</sup> (MW)
	1	2	3	4	5	6			
1	104,92	48,71	20,81	28,38	14,59	12,00	202,00	24,33	3,11
2	100,33	47,28	20,37	24,38	11,76	12,00	190,00	23,26	2,84
3	95,73	45,90	19,85	22,33	10,00	12,00	181,00	22,20	2,62
4	96,84	46,24	19,96	23,07	10,00	12,00	183,00	22,45	2,67
5	95,99	46,00	19,93	32,07	10,00	12,00	191,00	22,26	2,72
6	98,64	46,82	20,23	35,00	13,07	12,00	200,00	22,87	2,90
7	117,37	52,54	22,14	35,00	21,07	15,04	232,00	27,21	3,93
8	132,31	57,12	23,65	35,00	21,01	18,42	252,00	30,68	4,82
9	134,21	57,71	23,85	35,00	21,47	18,85	255,00	31,12	4,95
10	141,79	60,05	24,64	35,00	23,29	20,58	267,00	32,88	5,48
11	138,29	58,99	24,33	35,00	30,00	19,80	269,00	32,06	5,34
12	131,57	56,90	23,58	35,00	22,00	18,25	252,00	30,51	4,79
13	120,28	53,42	22,41	35,00	18,15	15,69	233,00	27,89	4,06

**Tabel 4.3** Daya Gen, Beban, CCS dan Rugi-rugi Kasus CCS Perc 3 (lanjutan)

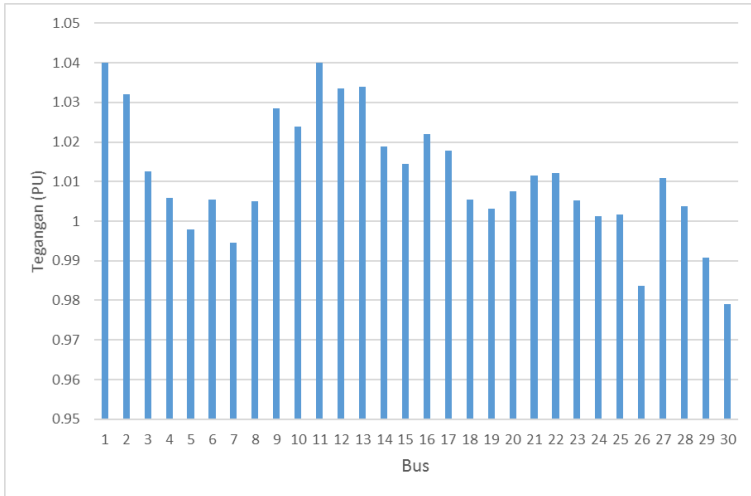
Jam ke-	Daya Pembangkitan Generator ke- (MW)						Beban (MW)	CCS (MW)	Rugi <sup>2</sup> (MW)
	1	2	3	4	5	6			
14	128,50	55,95	23,26	35,00	20,10	17,55	246,00	29,80	4,57
15	122,16	53,99	22,60	35,00	18,60	16,12	236,00	28,32	4,17
16	128,86	56,08	23,34	35,00	26,60	17,65	253,00	29,88	4,68
17	142,41	60,25	24,71	35,00	23,43	20,73	268,00	33,02	5,52
18	149,54	62,39	25,44	35,00	24,80	22,55	279,00	34,67	6,05
19	152,12	63,25	25,74	35,00	25,89	22,93	283,40	35,27	6,25
20	142,78	60,37	24,79	35,00	30,00	20,82	275,00	33,11	5,65
21	140,52	59,68	24,56	35,00	30,00	20,30	272,00	32,58	5,49
22	132,29	57,12	23,66	35,00	22,00	18,41	253,00	30,67	4,83
23	122,83	54,21	22,67	35,00	18,75	16,26	237,00	28,48	4,21
24	117,10	52,44	22,06	35,00	17,37	12,00	225,00	27,15	3,81

**Tabel 4.4** Kenaikan atau Penurunan Daya Generator Kasus CCS Percobaan 3

Jam ke-	Kenaikan atau Penurunan Pembangkitan (MW)					
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
1-2	-4,59	-1,43	-0,44	-4,00	-2,83	0,00
2-3	-4,60	-1,38	-0,52	-2,05	-1,76	0,00
3-4	1,11	0,34	0,11	0,74	0,00	0,00
4-5	-0,86	-0,24	-0,03	9,00	0,00	0,00
5-6	2,66	0,82	0,30	2,93	3,07	0,00
6-7	18,73	5,72	1,91	0,00	8,00	3,04
7-8	14,94	4,58	1,52	0,00	-0,06	3,38
8-9	1,91	0,59	0,20	0,00	0,46	0,44
9-10	7,57	2,34	0,79	0,00	1,82	1,73
10-11	-3,50	-1,06	-0,31	0,00	6,71	-0,78
11-12	-6,72	-2,09	-0,75	0,00	-8,00	-1,55
12-13	-11,29	-3,47	-1,17	0,00	-3,85	-2,56
13-14	8,23	2,53	0,85	0,00	1,96	1,86
14-15	-6,35	-1,96	-0,65	0,00	-1,50	-1,44
15-16	6,70	2,09	0,74	0,00	8,00	1,54
16-17	13,55	4,17	1,37	0,00	-3,17	3,08
17-18	7,13	2,14	0,73	0,00	1,37	1,82
18-19	2,58	0,86	0,30	0,00	1,09	0,38
19-20	-9,34	-2,87	-0,95	0,00	4,11	-2,10
20-21	-2,26	-0,70	-0,23	0,00	0,00	-0,52
21-22	-8,24	-2,56	-0,90	0,00	-8,00	-1,89
22-23	-9,46	-2,91	-0,99	0,00	-3,25	-2,15
23-24	-7,44	-2,25	-0,77	0,00	-1,70	-2,03



**Gambar 4.8** Kurva Aliran Daya Saluran Kasus CCS Percobaan 3 Jam ke-19



**Gambar 4.9** Kurva Tegangan Bus Kasus CCS Percobaan 3 Jam ke-19

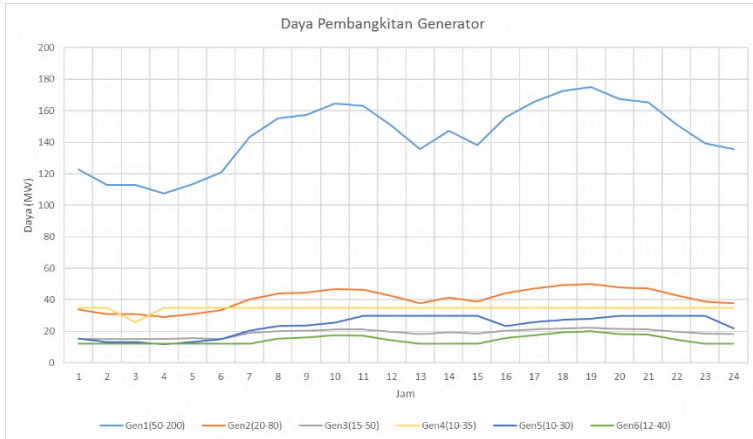
#### 4.1.2 Hasil Simulasi dan Analisis Kasus CSS Percobaan 6

Pada kasus ini, dilakukan simulasi dan analisis *Dynamic Optimal Power Flow (DOPF)* dengan pemasangan plan *carbon capture and storage (CCS)*. Bobot yang digunakan pada kasus ini adalah  $w_1 = 0,5$  untuk biaya pembangkitan dan  $w_2 = 0,5$  untuk emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Kurva konvergensi simulasi dan kurva daya pembangkitan tiap jam ditunjukkan pada Gambar 4.10 dan 4.11.

Hasil simulasi seperti daya pembangkitan generator, daya total beban, daya plan *carbon capture and storage (CCS)* dan rugi-rugi daya dapat dilihat pada Tabel 4.5. Dari tabel tersebut diketahui bahwa daya yang dibangkitkan sama dengan dengan jumlah daya total beban ditambah daya plan *carbon capture and storage (CCS)* dan rugi-rugi daya, sehingga telah memenuhi batasan *equality*. Dari tabel tersebut juga dapat diketahui daya pembangkitan generator telah memenuhi batasan *inequality* ( $P_{min}$  dan  $P_{max}$ ).

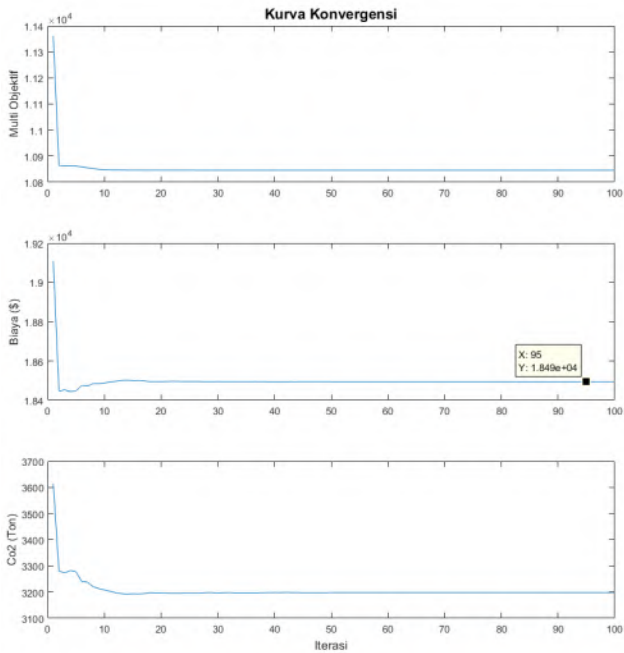
Adapun hasil simulasi seperti nilai tegangan bus, daya yang mengalir pada saluran dan kenaikan atau penurunan daya generator dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.12 dan 4.13. Dari tabel tersebut juga

dapat diketahui bahwa simulasi ini telah memenuhi batasan *inequality* (ramp rate generator, kapasitas daya saluran, tegangan bus 0,95-1,05 pu).



**Gambar 4.10** Kurva Daya Pembangkitan Generator Kasus CCS Percobaan 6





**Gambar 4.11** Kurva Konvergensi Kasus CCS Percobaan 6

**Tabel 4.5** Daya Generator, Beban, CCS dan Rugi-rugi Kasus CCS Percobaan 6

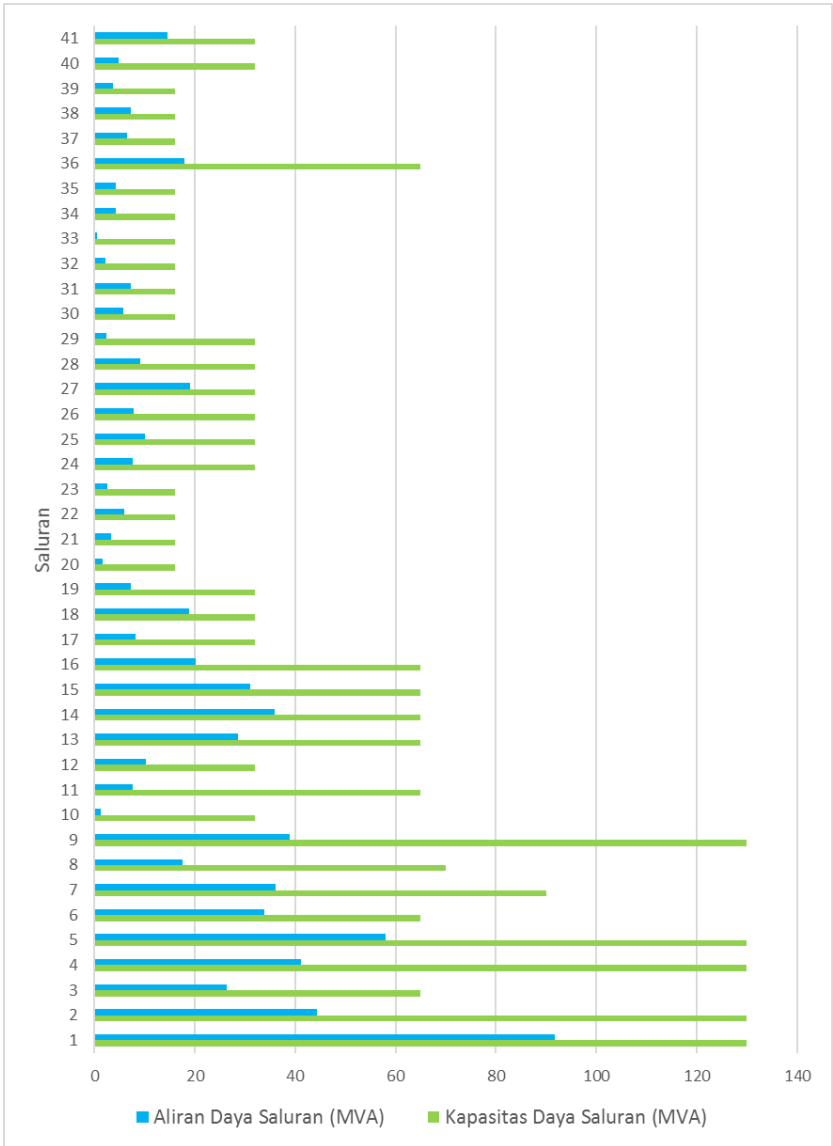
Jam ke-	Daya Pembangkitan Generator ke- (MW)						Beban (MW)	CCS (MW)	Rugi <sup>2</sup> (MW)
	1	2	3	4	5	6			
1	122,55	33,92	15,00	35,00	15,40	12,00	202,00	28,41	3,48
2	113,07	31,00	15,00	35,00	13,17	12,00	190,00	26,22	3,01
3	112,91	30,93	15,00	26,00	13,22	12,00	181,00	26,18	2,89
4	107,50	29,30	15,00	35,00	11,87	12,00	183,00	24,93	2,75
5	113,14	31,02	15,89	35,00	13,19	12,00	191,00	26,23	3,00
6	120,97	33,43	15,00	35,00	15,02	12,00	200,00	28,05	3,40
7	143,24	40,29	18,95	35,00	20,33	12,00	232,00	33,21	4,60
8	155,34	44,06	20,25	35,00	23,27	15,54	252,00	36,02	5,44
9	157,23	44,66	20,45	35,00	23,73	15,99	255,00	36,46	5,58
10	164,76	47,01	21,26	35,00	25,58	17,72	267,00	38,20	6,14
11	162,99	46,47	21,10	35,00	30,00	17,30	269,00	37,79	6,08
12	150,36	42,53	19,77	35,00	30,00	14,41	252,00	34,86	5,21
13	135,55	37,95	18,24	35,00	30,00	12,00	233,00	31,43	4,31

**Tabel 4.5** Daya Gen, Beban, CCS dan Rugi-rugi Kasus CCS Perc 6 (lanjutan)

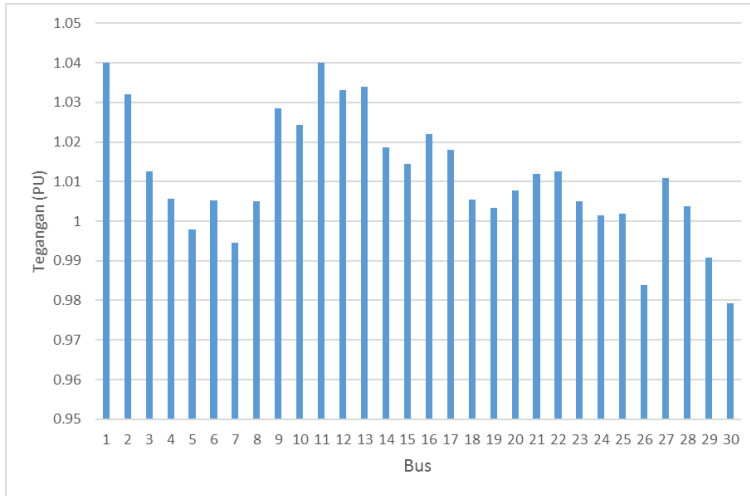
Jam ke-	Daya Pembangkitan Generator ke- (MW)						Beban (MW)	CCS (MW)	Rugi <sup>2</sup> (MW)
	1	2	3	4	5	6			
14	147,13	41,52	19,42	35,00	30,00	12,00	246,00	34,11	4,96
15	138,19	38,76	18,51	35,00	30,00	12,00	236,00	32,04	4,45
16	156,00	44,27	20,32	35,00	23,35	15,69	253,00	36,17	5,48
17	165,49	47,28	21,34	35,00	25,77	17,67	268,00	38,37	6,19
18	172,43	49,44	22,09	35,00	27,27	19,49	279,00	39,98	6,74
19	175,08	50,25	22,38	35,00	28,12	20,13	283,40	40,59	6,96
20	167,45	47,86	21,58	35,00	30,00	18,36	275,00	38,83	6,40
21	165,20	47,16	21,34	35,00	30,00	17,84	272,00	38,30	6,24
22	151,08	42,76	19,85	35,00	30,00	14,57	253,00	35,03	5,25
23	139,14	39,05	18,61	35,00	30,00	12,00	237,00	32,26	4,50
24	135,53	37,92	18,19	35,00	22,00	12,00	225,00	31,42	4,20

**Tabel 4.6** Kenaikan atau Penurunan Daya Generator Kasus CCS Percobaan 6

Jam ke-	Kenaikan atau Penurunan Pembangkitan (MW)					
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
1-2	-9,48	-2,91	0,00	0,00	-2,23	0,00
2-3	-0,16	-0,07	0,00	-9,00	0,05	0,00
3-4	-5,41	-1,64	0,00	9,00	-1,35	0,00
4-5	5,64	1,72	0,89	0,00	1,32	0,00
5-6	7,83	2,41	-0,89	0,00	1,84	0,00
6-7	22,27	6,86	3,95	0,00	5,31	0,00
7-8	12,10	3,77	1,29	0,00	2,94	3,54
8-9	1,89	0,59	0,20	0,00	0,45	0,46
9-10	7,53	2,35	0,81	0,00	1,85	1,73
10-11	-1,77	-0,54	-0,15	0,00	4,42	-0,42
11-12	-12,63	-3,94	-1,33	0,00	0,00	-2,89
12-13	-14,81	-4,59	-1,53	0,00	0,00	-2,41
13-14	11,59	3,58	1,18	0,00	0,00	0,00
14-15	-8,94	-2,76	-0,91	0,00	0,00	0,00
15-16	17,81	5,51	1,80	0,00	-6,65	3,69
16-17	9,49	3,01	1,02	0,00	2,42	1,98
17-18	6,93	2,16	0,75	0,00	1,50	1,82
18-19	2,65	0,81	0,29	0,00	0,85	0,63
19-20	-7,63	-2,38	-0,80	0,00	1,88	-1,77
20-21	-2,25	-0,70	-0,24	0,00	0,00	-0,52
21-22	-14,12	-4,40	-1,49	0,00	0,00	-3,26
22-23	-11,94	-3,70	-1,24	0,00	0,00	-2,57
23-24	-3,61	-1,13	-0,42	0,00	-8,00	0,00



**Gambar 4.12** Kurva Aliran Daya Saluran Kasus CCS Percobaan 6 Jam ke-19



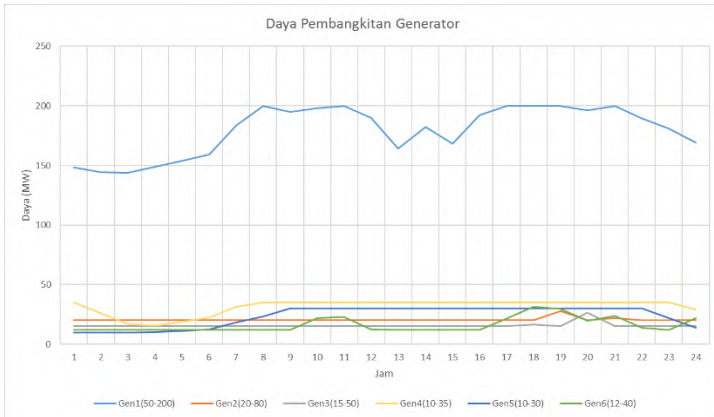
**Gambar 4.13** Kurva Tegangan Bus Kasus CCS Percobaan 6 Jam ke-19

#### 4.1.3 Hasil Simulasi dan Analisis Kasus CCS Percobaan 9

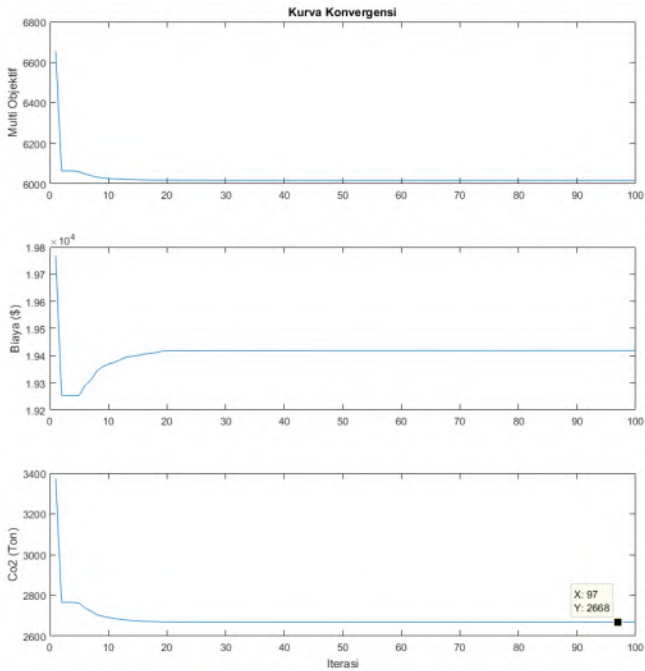
Pada kasus ini, dilakukan simulasi dan analisis *Dynamic Optimal Power Flow* (DOPF) dengan pemasangan plan *carbon capture and storage* (CCS). Bobot yang digunakan pada kasus ini adalah  $w_1 = 0,2$  untuk biaya pembangkitan dan  $w_2 = 0,8$  untuk emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Kurva konvergensi simulasi dan kurva daya pembangkitan tiap jam ditunjukkan pada Gambar 4.14 dan 4.15. Dilihat dari kurva daya pembangkitan tiap jam, generator dengan emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) sedikit untuk tiap MW pembangkitannya dioperasikan mendekati pembangkitan maksimal ( $P_{max}$ ). Hal ini disebabkan oleh pembobotan yang lebih besar emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>).

Hasil simulasi seperti daya pembangkitan generator, daya total beban, daya plan *carbon capture and storage* (CCS) dan rugi-rugi daya dapat dilihat pada Tabel 4.7. Dari tabel tersebut diketahui bahwa daya yang dibangkitkan sama dengan dengan jumlah daya total beban ditambah daya plan *carbon capture and storage* (CCS) dan rugi-rugi daya, sehingga telah memenuhi batasan *equality*. Dari tabel tersebut juga dapat diketahui daya pembangkitan generator telah memenuhi batasan *inequality* ( $P_{min}$  dan  $P_{max}$ ).

Adapun hasil simulasi seperti nilai tegangan bus, daya yang mengalir pada saluran dan kenaikan atau penurunan daya generator dapat dilihat pada Tabel 4.8 dan Gambar 4.16 dan 4.17. Dari tabel tersebut juga dapat diketahui bahwa simulasi ini telah memenuhi batasan *inequality* (ramp rate generator, kapasitas daya saluran, tegangan bus 0,95-1,05 pu).



**Gambar 4.14** Kurva Daya Pembangkitan Generator Kasus CCS Percobaan 9



**Gambar 4.15** Kurva Konvergensi Kasus CCS Percobaan 9

**Tabel 4.7** Daya Generator, Beban, CCS dan Rugi-rugi Kasus CCS Percobaan 9

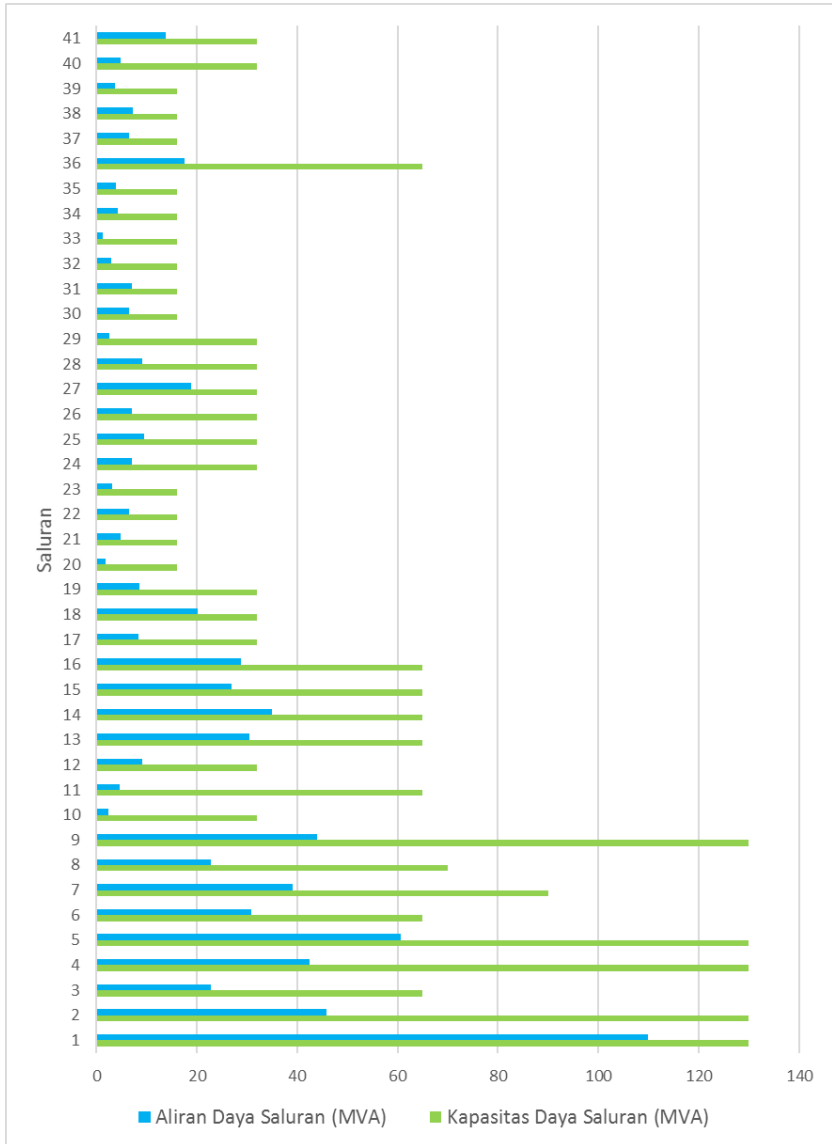
Jam ke-	Daya Pembangkitan Generator ke- (MW)						Beban (MW)	CCS (MW)	Rugi <sup>2</sup> (MW)
	1	2	3	4	5	6			
1	148,53	20,00	15,00	14,95	30,00	12,00	202,00	34,44	4,07
2	138,80	20,00	15,00	10,00	30,00	12,00	190,00	32,18	3,60
3	126,41	20,00	15,00	10,00	30,00	12,00	181,00	29,31	3,10
4	116,94	20,00	15,00	19,00	30,00	12,00	183,00	27,11	2,84
5	140,16	20,00	15,00	10,00	30,00	12,00	191,00	32,50	3,66
6	147,09	20,00	15,00	13,99	30,00	12,00	200,00	34,11	4,00
7	190,32	20,00	15,00	22,99	22,00	12,00	232,00	44,13	6,17
8	193,79	20,00	15,00	31,99	20,90	22,00	252,00	44,93	6,73
9	200,00	20,00	15,00	35,00	26,38	12,00	255,00	46,37	6,98
10	200,00	28,78	15,00	35,00	30,00	12,00	267,00	46,37	7,41
11	200,00	20,00	15,67	35,00	30,00	22,00	269,00	46,37	7,30
12	200,00	20,00	15,00	35,00	23,31	12,00	252,00	46,37	6,93
13	181,08	20,00	15,00	35,00	17,68	12,00	233,00	41,99	5,77

**Tabel 4.7** Daya Gen, Beban, CCS dan Rugi-rugi Kasus CCS Perc 9 (lanjutan)

Jam ke-	Daya Pembangkitan Generator ke- (MW)						Beban (MW)	CCS (MW)	Rugi <sup>2</sup> (MW)
	1	2	3	4	5	6			
14	194,75	20,00	15,00	35,00	20,99	12,00	246,00	45,16	6,59
15	184,20	20,00	15,00	35,00	18,43	12,00	236,00	42,71	5,95
16	200,00	20,00	15,00	35,00	24,29	12,00	253,00	46,37	6,95
17	200,00	20,00	15,00	35,00	30,00	21,66	268,00	46,37	7,30
18	200,00	26,74	15,00	35,00	30,00	26,36	279,00	46,37	7,73
19	200,00	28,93	15,00	35,00	30,00	28,75	283,40	46,37	7,91
20	200,00	20,00	15,00	35,00	30,00	28,92	275,00	46,37	7,52
21	200,00	20,00	15,00	35,00	30,00	25,78	272,00	46,37	7,42
22	196,16	20,00	15,00	35,00	23,30	15,78	253,00	45,48	6,80
23	185,32	20,00	15,00	35,00	18,70	12,00	237,00	42,97	6,02
24	162,38	20,00	15,00	35,00	13,28	22,00	225,00	37,65	4,99

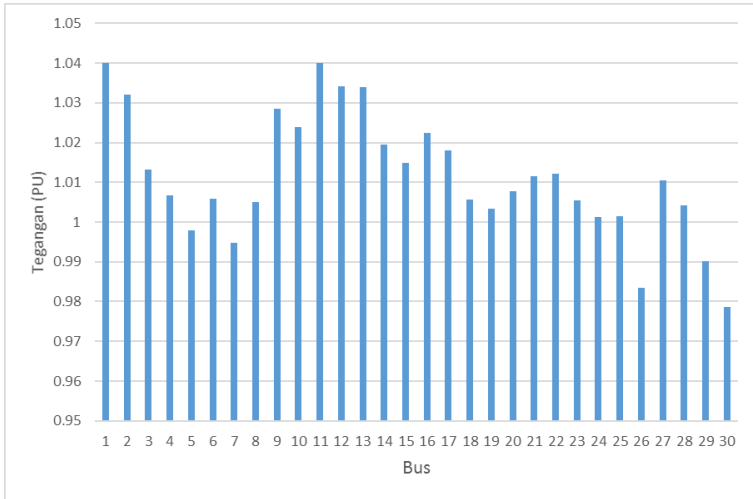
**Tabel 4.8** Kenaikan atau Penurunan Daya Generator Kasus CCS Percobaan 9

Jam ke-	Kenaikan atau Penurunan Pembangkitan (MW)					
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
1-2	-9,73	0,00	0,00	-4,95	0,00	0,00
2-3	-12,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3-4	-9,47	0,00	0,00	9,00	0,00	0,00
4-5	23,22	0,00	0,00	-9,00	0,00	0,00
5-6	6,93	0,00	0,00	3,99	0,00	0,00
6-7	43,23	0,00	0,00	9,00	-8,00	0,00
7-8	3,47	0,00	0,00	9,00	-1,10	10,00
8-9	6,21	0,00	0,00	3,01	5,49	-10,00
9-10	0,00	8,78	0,00	0,00	3,62	0,00
10-11	0,00	-8,78	0,67	0,00	0,00	10,00
11-12	0,00	0,00	-0,67	0,00	-6,69	-10,00
12-13	-18,92	0,00	0,00	0,00	-5,63	0,00
13-14	13,67	0,00	0,00	0,00	3,31	0,00
14-15	-10,55	0,00	0,00	0,00	-2,56	0,00
15-16	15,80	0,00	0,00	0,00	5,86	0,00
16-17	0,00	0,00	0,00	0,00	5,71	9,66
17-18	0,00	6,74	0,00	0,00	0,00	4,70
18-19	0,00	2,19	0,00	0,00	0,00	2,39
19-20	0,00	-8,93	0,00	0,00	0,00	0,16
20-21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-3,13
21-22	-3,84	0,00	0,00	0,00	-6,70	-10,00
22-23	-10,85	0,00	0,00	0,00	-4,60	-3,78
23-24	-22,94	0,00	0,00	0,00	-5,43	10,00



**Gambar 4.16** Kurva Aliran Daya Saluran Kasus CCS Percobaan 9 Jam ke-19





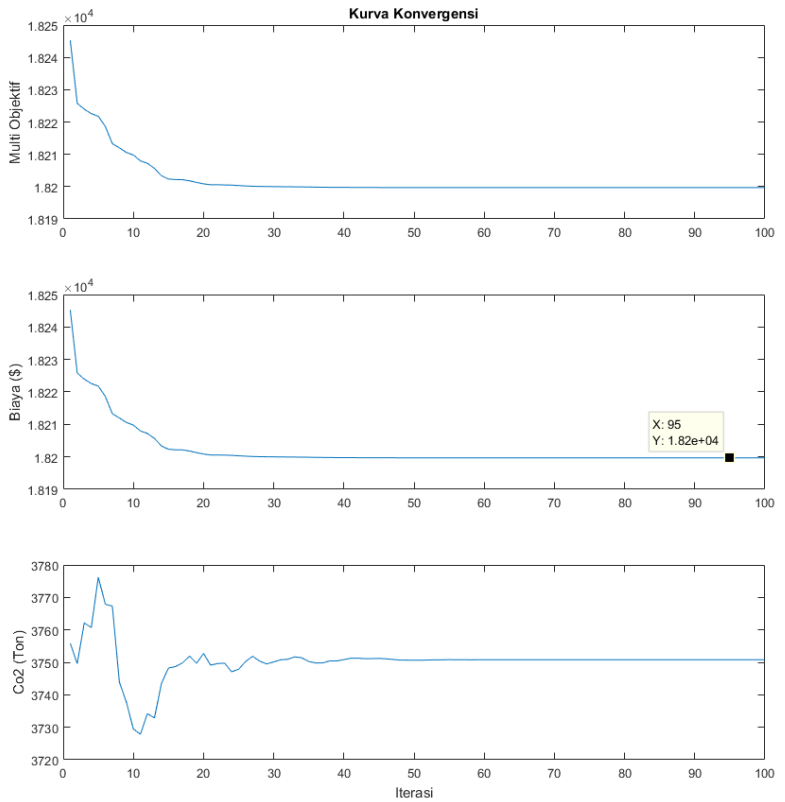
**Gambar 4.17** Kurva Tegangan Bus Kasus CCS Percobaan 9 Jam ke-19

*[halaman ini sengaja dikosongkan]*

# LAMPIRAN

## 1. Hasil Simulasi dan Analisis Kasus CCS Percobaan 1

Pembobotan,  $w_1 = 1$  |  $w_2 = 0$



**Gambar 1.1** Kurva Konvergensi Kasus CCS Percobaan 1

**Tabel 1.1** Daya Generator, Beban, CCS dan Rugi-rugi Kasus CCS Percobaan 1

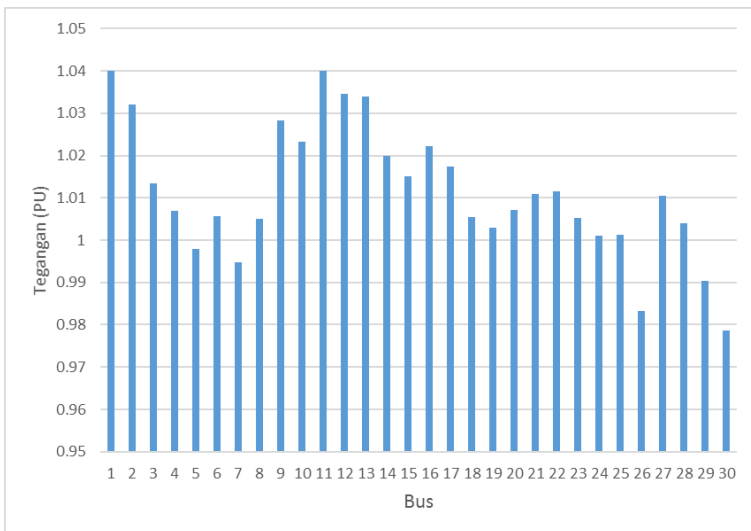
Jam ke-	Daya Pembangkitan Generator ke- (MW)						Beban (MW)	CCS (MW)	Rugi <sup>2</sup> (MW)
	1	2	3	4	5	6			
1	98,65	53,55	22,10	27,34	14,21	12,00	202,00	22,87	3,02
2	97,68	53,22	21,94	19,33	10,00	13,38	190,00	22,65	2,89
3	88,24	50,38	21,04	20,45	11,83	12,00	181,00	20,46	2,49
4	83,64	49,02	20,65	29,45	10,00	12,00	183,00	19,39	2,38
5	90,47	51,08	21,30	21,77	18,00	12,00	191,00	20,98	2,64
6	94,68	52,36	21,74	30,77	13,27	12,00	200,00	21,95	2,87
7	113,16	58,01	23,61	35,00	20,34	12,00	232,00	26,24	3,87
8	124,53	61,49	24,79	35,00	20,23	19,49	252,00	28,87	4,64
9	126,51	62,08	24,99	35,00	20,72	19,82	255,00	29,33	4,76
10	132,20	63,84	25,59	35,00	25,10	21,11	267,00	30,65	5,19
11	139,65	66,11	26,31	35,00	17,10	22,79	269,00	32,38	5,59
12	124,60	61,49	24,80	35,00	20,27	19,38	252,00	28,89	4,64
13	116,38	58,96	23,92	35,00	12,27	17,52	233,00	26,98	4,06
14	120,11	60,12	24,34	35,00	20,27	18,38	246,00	27,85	4,36
15	114,42	58,38	23,74	35,00	17,90	17,06	236,00	26,53	4,00
16	125,20	61,68	24,86	35,00	20,41	19,53	253,00	29,03	4,68
17	134,73	64,61	25,85	35,00	22,69	21,69	268,00	31,24	5,33
18	137,51	65,48	26,18	35,00	30,00	22,33	279,00	31,88	5,62
19	138,32	65,76	26,31	35,00	23,62	32,33	283,40	32,07	5,87
20	139,46	66,06	26,34	35,00	23,82	22,33	275,00	32,33	5,66
21	137,27	65,39	26,11	35,00	23,29	22,27	272,00	31,83	5,51
22	125,22	61,69	24,86	35,00	20,38	19,54	253,00	29,03	4,68
23	115,09	58,58	23,82	35,00	18,00	17,25	237,00	26,69	4,04
24	107,65	56,34	23,06	35,00	16,30	15,23	225,00	24,96	3,61

**Tabel 1.2** Kenaikan atau Penurunan Daya Generator Kasus CCS Percobaan 1

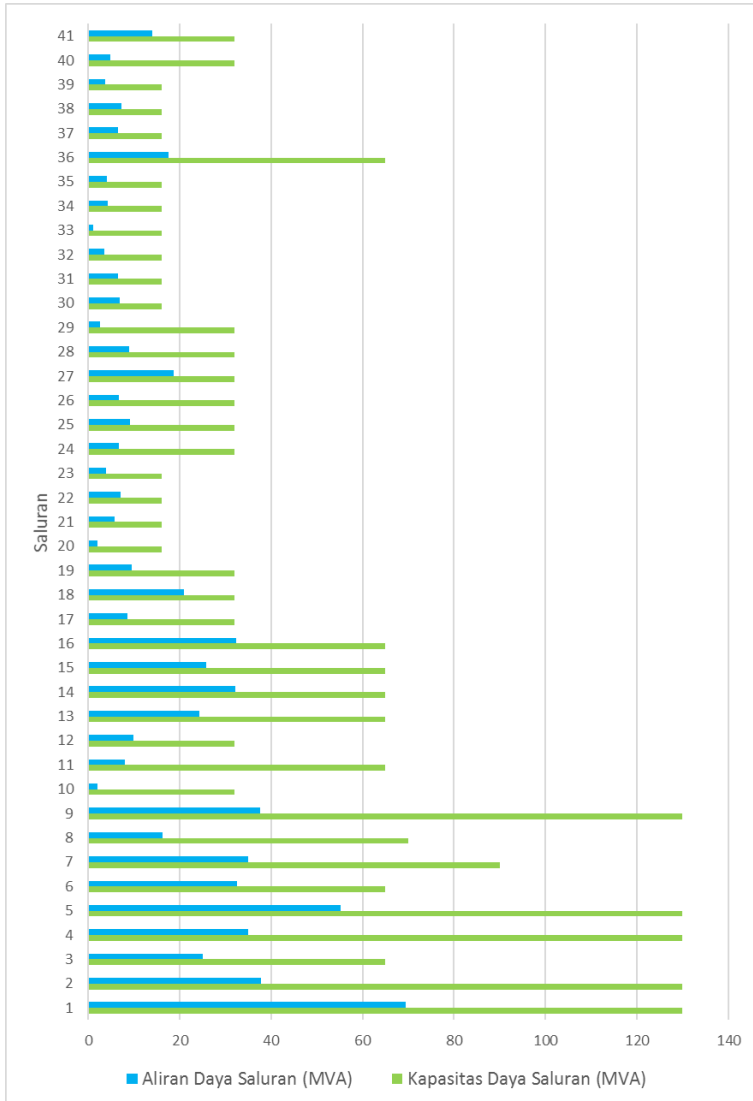
Jam ke-	Kenaikan atau Penurunan Pembangkitan (MW)					
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
1-2	-0,97	-0,33	-0,17	-8,01	-4,21	1,38
2-3	-9,45	-2,84	-0,90	1,12	1,83	-1,38
3-4	-4,60	-1,36	-0,39	9,00	-1,83	0,00
4-5	6,83	2,06	0,66	-7,69	8,00	0,00
5-6	4,21	1,28	0,43	9,00	-4,73	0,00
6-7	18,48	5,65	1,87	4,23	7,07	0,00
7-8	11,37	3,48	1,18	0,00	-0,11	7,49
8-9	1,98	0,59	0,21	0,00	0,49	0,33
9-10	5,69	1,75	0,59	0,00	4,38	1,29
10-11	7,46	2,27	0,73	0,00	-8,00	1,68

**Tabel 1.2** Kenaikan atau Penurunan Daya Gen Kasus CCS Perc 1 (lanjutan)

Jam ke-	Kenaikan atau Penurunan Pembangkitan (MW)					
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
11-12	-15,06	-4,62	-1,52	0,00	3,16	-3,41
12-13	-8,22	-2,53	-0,88	0,00	-8,00	-1,86
13-14	3,73	1,16	0,43	0,00	8,00	0,86
14-15	-5,69	-1,74	-0,61	0,00	-2,36	-1,31
15-16	10,78	3,30	1,12	0,00	2,50	2,47
16-17	9,53	2,93	0,99	0,00	2,28	2,16
17-18	2,78	0,87	0,34	0,00	7,31	0,65
18-19	0,81	0,28	0,12	0,00	-6,38	10,00
19-20	1,14	0,31	0,03	0,00	0,20	-10,00
20-21	-2,19	-0,67	-0,23	0,00	-0,53	-0,07
21-22	-12,05	-3,70	-1,25	0,00	-2,91	-2,73
22-23	-10,12	-3,10	-1,04	0,00	-2,37	-2,28
23-24	-7,44	-2,25	-0,77	0,00	-1,70	-2,03



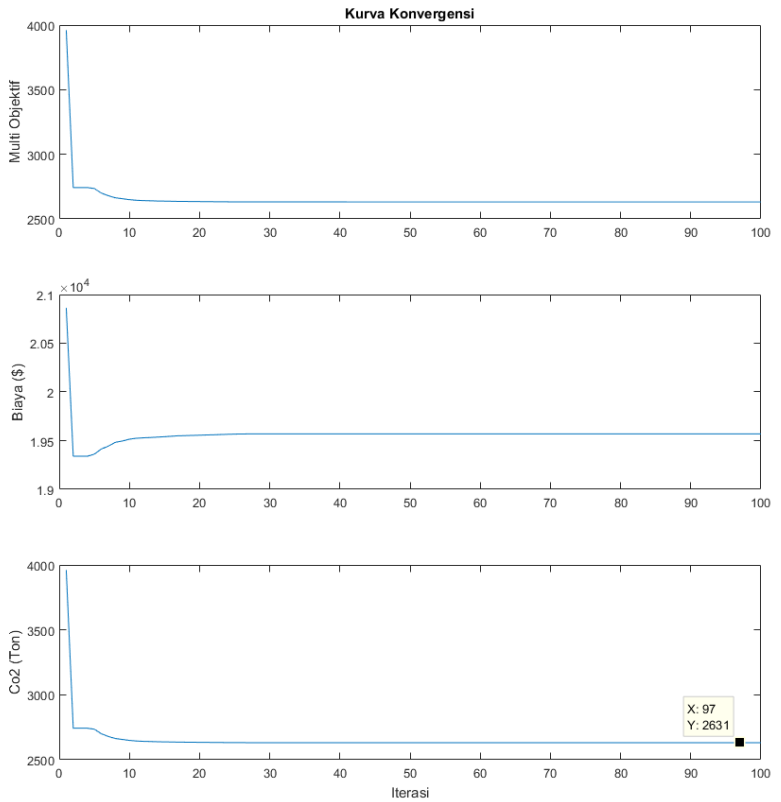
**Gambar 1.2** Tegangan Bus Kasus CCS Percobaan 1 Jam-19



**Gambar 1.3** Aliran Daya Saluran Kasus CCS Percobaan 1 Jam-19

## 2. Hasil Simulasi dan Analisis Kasus CCS Percobaan 11

Pembobotan,  $w_1 = 0$  |  $w_2 = 1$



**Gambar 2.1** Kurva Konvergensi Kasus CCS Percobaan 11

**Tabel 2.1** Daya Generator, Beban, CCS dan Rugi-rugi Kasus CCS Percobaan 11

Jam ke-	Daya Pembangkitan Generator ke- (MW)						Beban (MW)	CCS (MW)	Rugi <sup>2</sup> (MW)
	1	2	3	4	5	6			
1	182,89	20,00	15,00	10,00	10,00	12,00	202,00	42,40	5,51
2	166,20	20,00	15,00	10,00	10,00	12,00	190,00	38,54	4,65
3	153,70	20,00	15,00	10,00	10,00	12,00	181,00	35,64	4,06
4	156,45	20,00	15,00	10,00	10,00	12,00	183,00	36,28	4,19
5	167,58	20,00	15,00	10,00	10,00	12,00	191,00	38,86	4,72
6	180,10	20,00	15,00	10,00	10,00	12,00	200,00	41,76	5,36
7	200,00	20,00	15,00	10,88	18,00	21,28	232,00	46,37	6,77
8	200,00	20,00	15,00	19,88	26,00	24,57	252,00	46,37	7,07
9	200,00	20,00	15,00	28,83	30,00	14,57	255,00	46,37	7,00
10	200,00	20,00	15,00	35,00	26,11	24,57	267,00	46,37	7,32
11	200,00	20,00	15,00	35,00	26,72	26,02	269,00	46,37	7,37
12	200,00	20,00	15,00	35,00	19,33	16,02	252,00	46,37	6,97
13	189,87	20,00	15,00	35,00	11,33	12,00	233,00	44,02	6,18
14	200,00	20,00	15,00	35,00	17,21	12,00	246,00	46,37	6,84
15	195,89	20,00	15,00	35,00	10,00	12,00	236,00	45,42	6,50
16	200,00	20,00	15,00	35,00	18,00	18,35	253,00	46,37	7,01
17	200,00	20,00	15,00	35,00	26,00	25,71	268,00	46,37	7,35
18	200,00	20,00	15,00	35,00	30,00	32,97	279,00	46,37	7,60
19	200,00	20,00	15,00	35,00	27,58	40,00	283,40	46,37	7,82
20	198,52	20,00	15,00	35,00	30,00	30,00	275,00	46,03	7,47
21	200,00	20,00	15,00	35,00	30,00	25,78	272,00	46,37	7,42
22	197,97	20,00	15,00	35,00	22,00	15,78	253,00	45,90	6,88
23	191,83	20,00	15,00	35,00	14,00	12,00	237,00	44,48	6,32
24	192,96	20,00	15,00	26,00	10,00	12,00	225,00	44,74	6,21

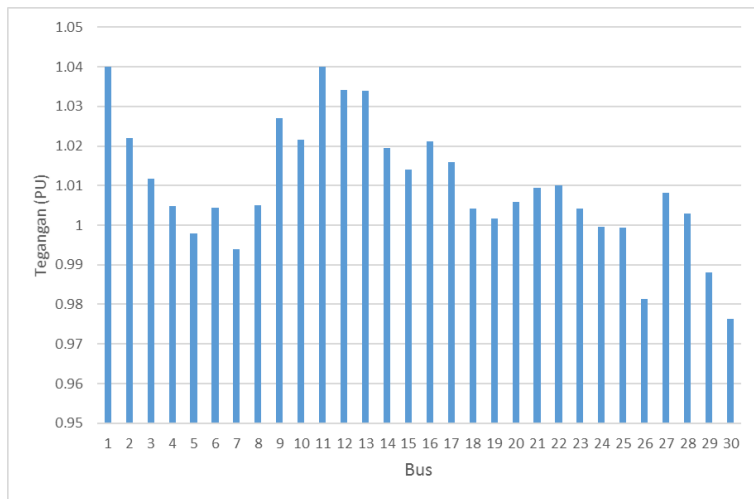
**Tabel 2.2** Kenaikan atau Penurunan Daya Generator Kasus CCS Percobaan 11

Jam ke-	Kenaikan atau Penurunan Pembangkitan (MW)					
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
1-2	-16,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2-3	-12,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3-4	2,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4-5	11,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5-6	12,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6-7	19,90	0,00	0,00	0,88	8,00	9,28
7-8	0,00	0,00	0,00	9,00	8,00	3,29
8-9	0,00	0,00	0,00	8,95	4,00	-10,00
9-10	0,00	0,00	0,00	6,17	-3,89	10,00
10-11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,61	1,45

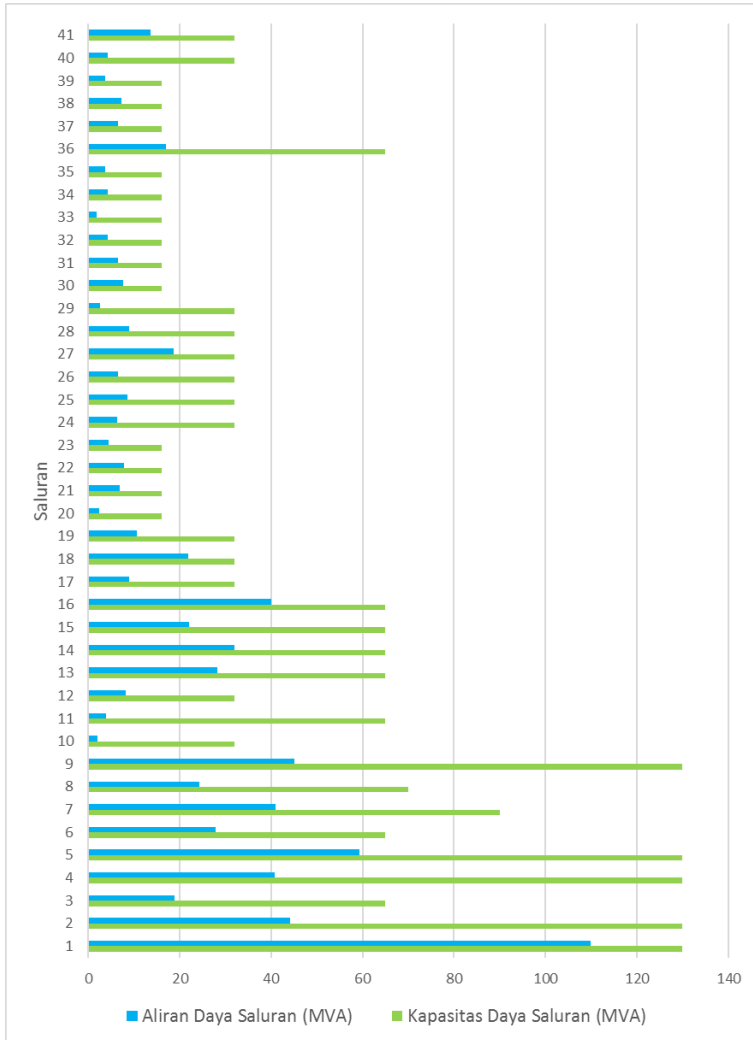


**Tabel 2.2** Kenaikan atau Penurunan Daya Gen Kasus CCS Perc 11 (lanjutan)

Jam ke-	Kenaikan atau Penurunan Pembangkitan (MW)					
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
11-12	0,00	0,00	0,00	0,00	-7,39	-10,00
12-13	-10,13	0,00	0,00	0,00	-8,00	-4,02
13-14	10,13	0,00	0,00	0,00	5,88	0,00
14-15	-4,11	0,00	0,00	0,00	-7,21	0,00
15-16	4,11	0,00	0,00	0,00	8,00	6,35
16-17	0,00	0,00	0,00	0,00	8,00	7,36
17-18	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	7,25
18-19	0,00	0,00	0,00	0,00	-2,42	7,03
19-20	-1,48	0,00	0,00	0,00	2,42	-10,00
20-21	1,48	0,00	0,00	0,00	0,00	-4,22
21-22	-2,03	0,00	0,00	0,00	-8,00	-10,00
22-23	-6,14	0,00	0,00	0,00	-8,00	-3,78
23-24	1,14	0,00	0,00	-9,00	-4,00	0,00



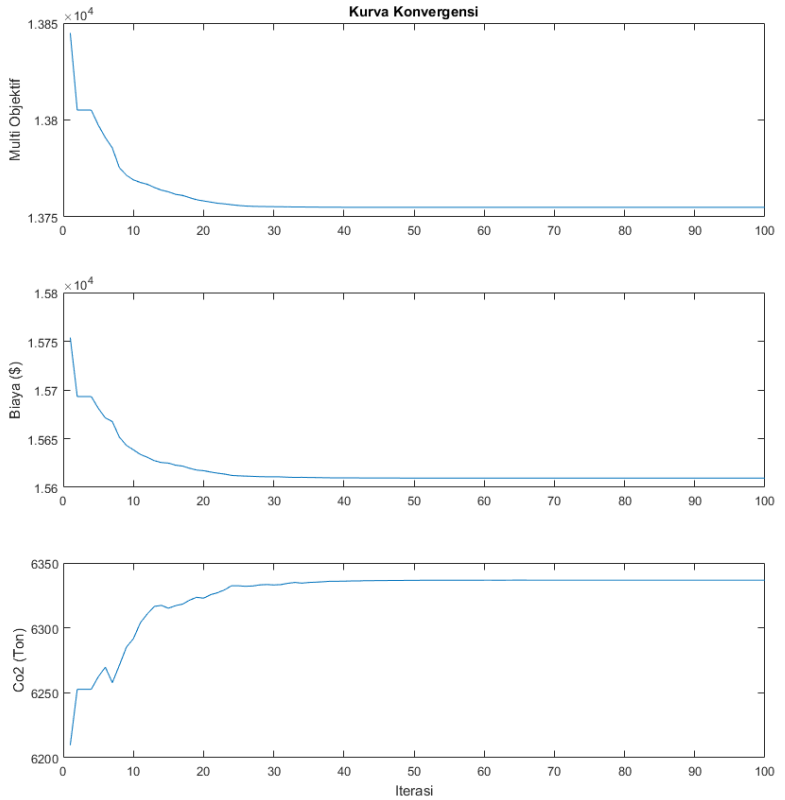
**Gambar 2.2** Tegangan Bus Kasus CCS Percobaan 11 Jam-19



**Gambar 2.3** Aliran Daya Saluran Kasus CCS Percobaan 11 Jam-19

### 3. Hasil Simulasi dan Analisis Kasus Tanpa CCS Percobaan 3

Pembobotan,  $w_1 = 0,8$  |  $w_2 = 0,2$



**Gambar 3.1** Kurva Konvergensi Kasus Tanpa CCS Percobaan 3

**Tabel 3.1** Daya Gen, Beban, CCS dan Rugi-rugi Kasus Tanpa CCS Percobaan 3

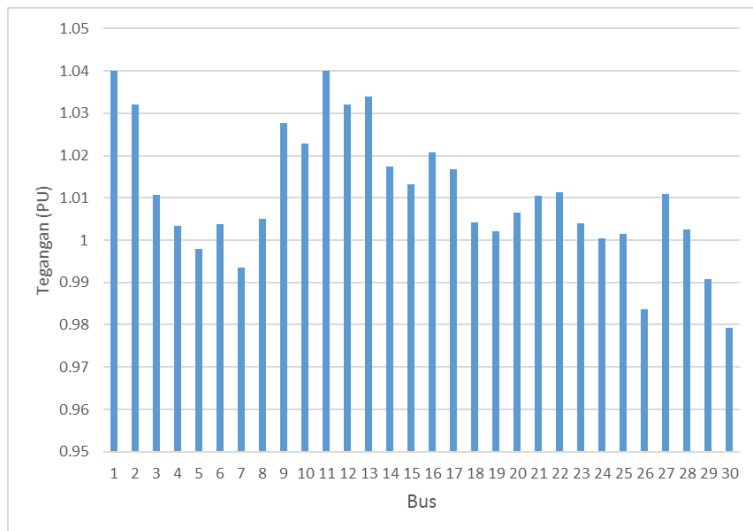
Jam ke-	Daya Pembangkitan Generator ke- (MW)						Beban (MW)	CCS (MW)	Rugi <sup>2</sup> (MW)
	1	2	3	4	5	6			
1	123,58	36,37	15,00	10,00	10,00	12,00	202,00	0,00	4,98
2	113,38	33,88	15,00	10,00	10,00	12,00	190,00	0,00	4,24
3	104,97	31,84	15,88	10,00	10,00	12,00	181,00	0,00	3,68
4	107,40	32,43	15,00	10,00	10,00	12,00	183,00	0,00	3,85
5	112,93	33,77	16,51	10,00	10,00	12,00	191,00	0,00	4,20
6	121,88	35,95	15,00	10,00	10,00	12,00	200,00	0,00	4,85
7	138,53	40,04	18,65	19,00	10,00	12,00	232,00	0,00	6,21
8	152,81	43,57	19,85	21,26	10,00	12,00	252,00	0,00	7,48
9	153,20	43,62	19,89	21,47	12,40	12,00	255,00	0,00	7,55
10	161,08	45,63	20,58	26,01	10,00	12,00	267,00	0,00	8,32
11	162,21	45,93	20,67	26,43	10,20	12,00	269,00	0,00	8,44
12	152,81	43,57	19,85	21,26	10,00	12,00	252,00	0,00	7,48
13	139,98	40,45	18,75	15,84	12,30	12,00	233,00	0,00	6,33
14	148,90	42,58	19,51	19,05	11,08	12,00	246,00	0,00	7,12
15	143,95	41,37	19,08	16,21	10,00	12,00	236,00	0,00	6,65
16	153,37	43,71	19,90	21,52	10,00	12,00	253,00	0,00	7,54
17	159,83	45,33	20,49	25,23	13,34	12,00	268,00	0,00	8,23
18	165,32	46,70	20,98	28,42	14,40	12,00	279,00	0,00	8,83
19	167,54	47,26	21,19	29,64	14,84	12,00	283,40	0,00	9,07
20	163,35	46,21	20,81	27,24	14,03	12,00	275,00	0,00	8,61
21	161,74	45,76	20,64	27,02	13,26	12,00	272,00	0,00	8,44
22	153,34	43,70	19,90	21,56	10,00	12,00	253,00	0,00	7,54
23	147,75	42,30	19,38	12,56	10,00	12,00	237,00	0,00	6,95
24	137,90	39,87	18,56	12,78	10,00	12,00	225,00	0,00	6,11

**Tabel 3.2** Kenaikan atau Penurunan Daya Gen Kasus Tanpa CCS Percobaan 3

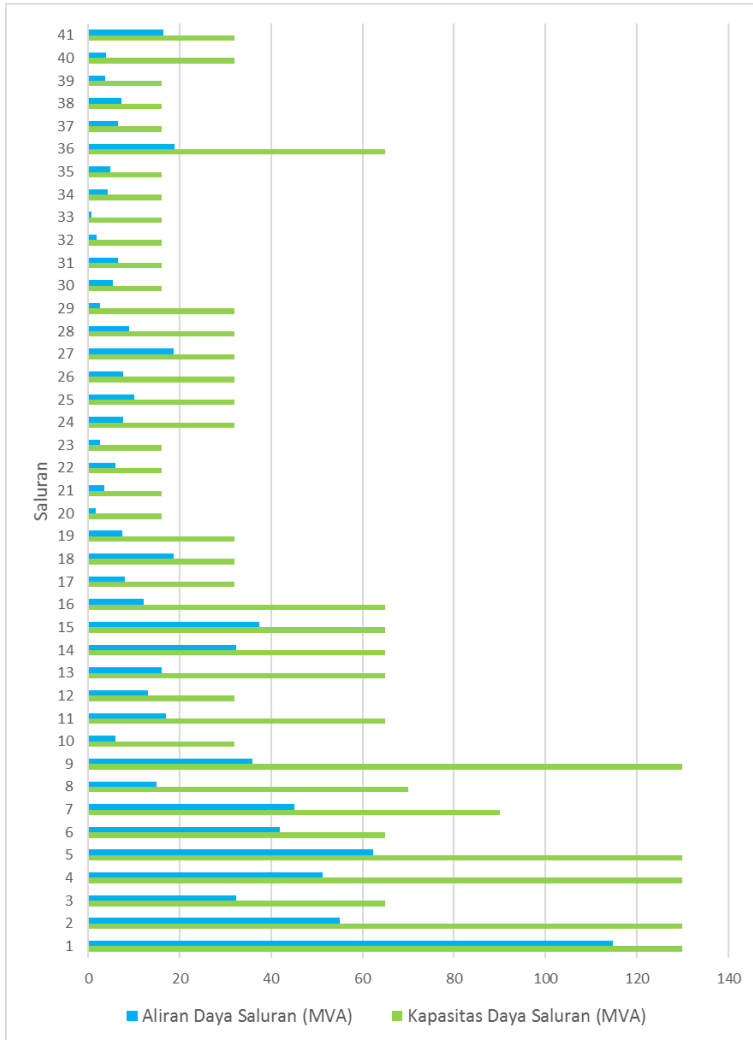
Jam ke-	Kenaikan atau Penurunan Pembangkitan (MW)					
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
1-2	-10,20	-2,49	0,00	0,00	0,00	0,00
2-3	-8,41	-2,04	0,88	0,00	0,00	0,00
3-4	2,44	0,59	-0,88	0,00	0,00	0,00
4-5	5,53	1,34	1,51	0,00	0,00	0,00
5-6	8,95	2,19	-1,51	0,00	0,00	0,00
6-7	16,64	4,09	3,65	9,00	0,00	0,00
7-8	14,28	3,53	1,20	2,26	0,00	0,00
8-9	0,39	0,05	0,04	0,21	2,40	0,00
9-10	7,89	2,02	0,69	4,54	-2,40	0,00
10-11	1,13	0,29	0,09	0,42	0,20	0,00

**Tabel 3.2** Kenaikan atau Penurunan P Gen Kasus Tanpa CCS Perc 3 (lanjutan)

Jam ke-	Kenaikan atau Penurunan Pembangkitan (MW)					
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
11-12	-9,40	-2,36	-0,82	-5,17	-0,20	0,00
12-13	-12,83	-3,12	-1,10	-5,43	2,30	0,00
13-14	8,92	2,12	0,76	3,22	-1,22	0,00
14-15	-4,94	-1,21	-0,42	-2,84	-1,08	0,00
15-16	9,42	2,34	0,82	5,31	0,00	0,00
16-17	6,46	1,61	0,59	3,70	3,34	0,00
17-18	5,48	1,37	0,49	3,20	1,06	0,00
18-19	2,23	0,56	0,20	1,21	0,44	0,00
19-20	-4,20	-1,05	-0,38	-2,40	-0,82	0,00
20-21	-1,61	-0,44	-0,17	-0,22	-0,76	0,00
21-22	-8,39	-2,06	-0,74	-5,46	-3,26	0,00
22-23	-5,60	-1,40	-0,52	-9,00	0,00	0,00
23-24	-9,84	-2,42	-0,82	0,22	0,00	0,00



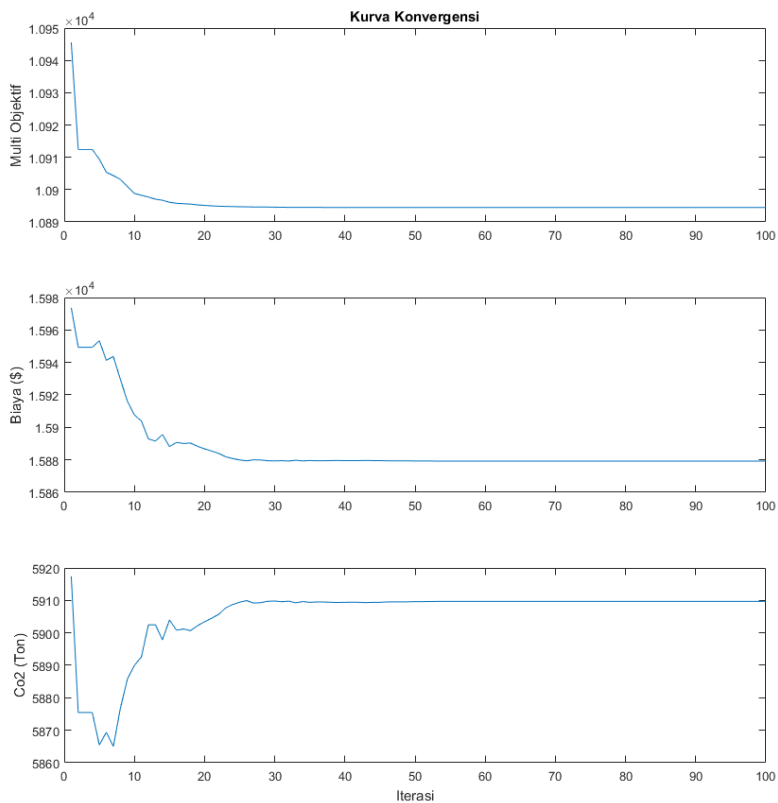
**Gambar 3.2** Tegangan Bus Kasus Tanpa CCS Percobaan 3 Jam-19



**Gambar 3.3** Aliran Daya Saluran Kasus Tanpa CCS Percobaan 3 Jam-19

#### 4. Hasil Simulasi dan Analisis Kasus Tanpa CCS Percobaan 6

Pembobotan,  $w_1 = 0,5$  |  $w_2 = 0,5$



**Gambar 4.1** Kurva Konvergensi Kasus Tanpa CCS Percobaan 6

**Tabel 4.1** Daya Gen, Beban, CCS dan Rugi-rugi Kasus Tanpa CCS Percobaan 6

Jam ke-	Daya Pembangkitan Generator ke- (MW)						Beban (MW)	CCS (MW)	Rugi <sup>2</sup> (MW)
	1	2	3	4	5	6			
1	95,41	30,18	15,00	22,82	30,00	12,00	202,00	0,00	3,44
2	99,53	31,16	15,00	13,82	22,00	12,00	190,00	0,00	3,50
3	100,97	31,48	16,02	10,00	14,00	12,00	181,00	0,00	3,48
4	96,72	30,45	15,00	19,00	13,11	12,00	183,00	0,00	3,29
5	96,13	30,33	15,00	28,00	12,90	12,00	191,00	0,00	3,35
6	103,01	32,04	15,00	27,44	14,27	12,00	200,00	0,00	3,78
7	115,00	35,06	17,44	35,00	22,27	12,00	232,00	0,00	4,76
8	132,26	39,38	18,92	35,00	20,06	12,44	252,00	0,00	6,04
9	134,63	39,98	19,13	35,00	20,53	12,00	255,00	0,00	6,23
10	141,36	41,69	19,75	35,00	21,92	14,13	267,00	0,00	6,88
11	142,58	42,00	19,85	35,00	22,19	14,37	269,00	0,00	6,99
12	132,56	39,45	18,94	35,00	20,11	12,00	252,00	0,00	6,06
13	119,54	36,18	17,80	35,00	17,51	12,00	233,00	0,00	5,02
14	128,44	38,42	18,58	35,00	19,28	12,00	246,00	0,00	5,72
15	121,58	36,69	17,98	35,00	17,90	12,00	236,00	0,00	5,18
16	133,06	39,55	19,00	35,00	20,22	12,24	253,00	0,00	6,11
17	141,96	41,80	19,90	35,00	22,17	14,09	268,00	0,00	6,93
18	148,76	43,58	20,40	35,00	23,21	15,64	279,00	0,00	7,60
19	151,31	44,23	20,66	35,00	23,98	16,07	283,40	0,00	7,85
20	146,23	42,93	20,20	35,00	22,93	15,08	275,00	0,00	7,35
21	146,26	42,92	20,17	35,00	22,91	12,00	272,00	0,00	7,27
22	133,27	39,60	18,96	35,00	20,26	12,00	253,00	0,00	6,12
23	122,30	36,87	18,04	35,00	18,05	12,00	237,00	0,00	5,23
24	115,80	35,25	15,00	35,00	16,72	12,00	225,00	0,00	4,77

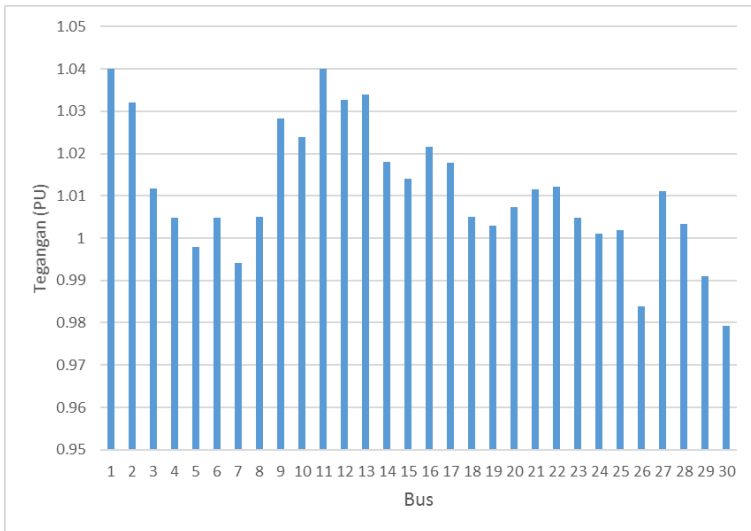
**Tabel 4.2** Kenaikan atau Penurunan Daya Gen Kasus Tanpa CCS Percobaan 6

Jam ke-	Kenaikan atau Penurunan Pembangkitan (MW)					
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
1-2	4,13	0,98	0,00	-9,00	-8,00	0,00
2-3	1,44	0,32	1,02	-3,82	-8,00	0,00
3-4	-4,25	-1,03	-1,02	9,00	-0,89	0,00
4-5	-0,59	-0,13	0,00	9,00	-0,20	0,00
5-6	6,89	1,71	0,00	-0,56	1,37	0,00
6-7	11,99	3,02	2,44	7,56	8,00	0,00
7-8	17,26	4,32	1,48	0,00	-2,21	0,44
8-9	2,37	0,60	0,21	0,00	0,48	-0,44
9-10	6,74	1,72	0,63	0,00	1,39	2,13
10-11	1,22	0,31	0,09	0,00	0,27	0,24

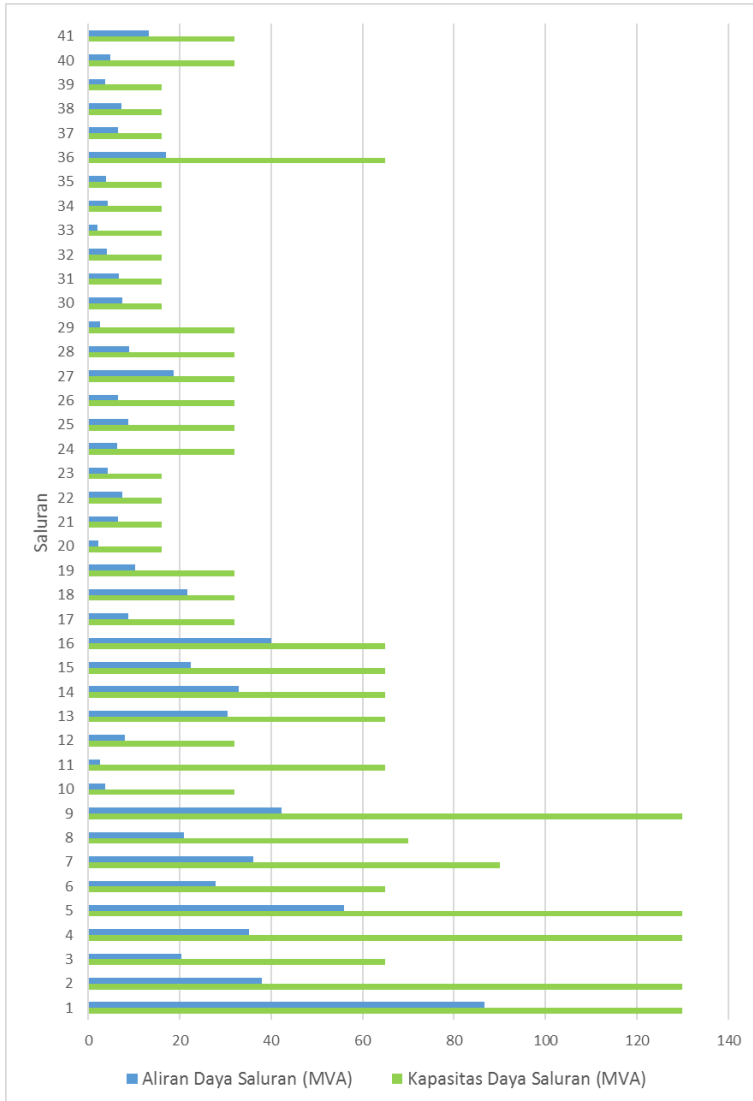


**Tabel 4.2** Kenaikan atau Penurunan P Gen Kasus Tanpa CCS Perc 6 (lanjutan)

Jam ke-	Kenaikan atau Penurunan Pembangkitan (MW)					
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
11-12	-10,03	-2,55	-0,90	0,00	-2,08	-2,37
12-13	-13,02	-3,27	-1,15	0,00	-2,61	0,00
13-14	8,90	2,24	0,78	0,00	1,77	0,00
14-15	-6,86	-1,73	-0,60	0,00	-1,38	0,00
15-16	11,48	2,86	1,02	0,00	2,32	0,24
16-17	8,90	2,25	0,91	0,00	1,95	1,84
17-18	6,80	1,78	0,50	0,00	1,04	1,56
18-19	2,55	0,65	0,26	0,00	0,78	0,42
19-20	-5,08	-1,30	-0,47	0,00	-1,06	-0,99
20-21	0,03	-0,01	-0,03	0,00	-0,02	-3,08
21-22	-12,99	-3,32	-1,21	0,00	-2,65	0,00
22-23	-10,96	-2,73	-0,92	0,00	-2,21	0,00
23-24	-6,50	-1,62	-3,04	0,00	-1,32	0,00



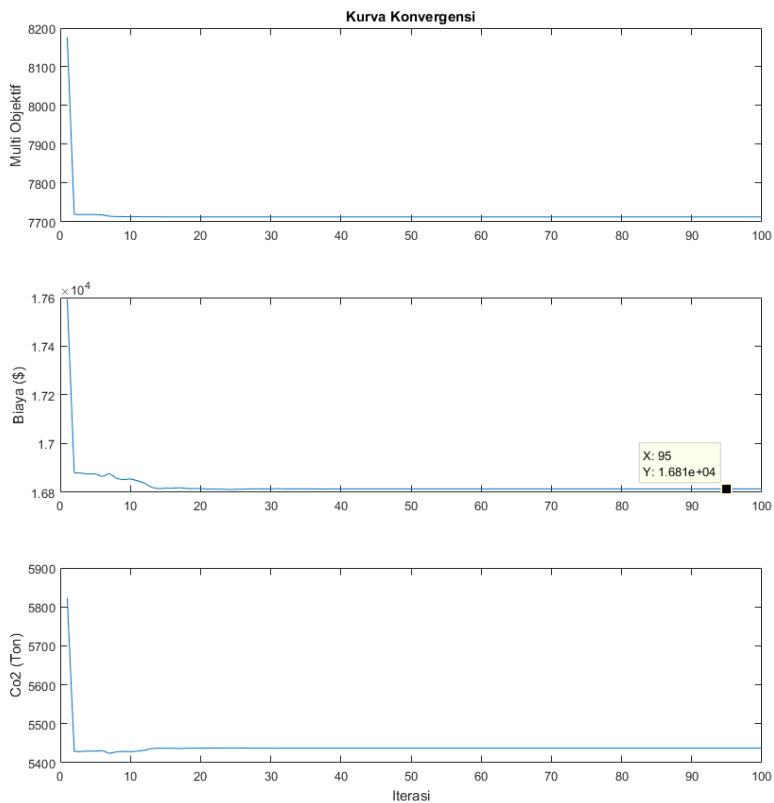
**Gambar 4.2** Tegangan Bus Kasus Tanpa CCS Percobaan 6 Jam-19



**Gambar 4.3** Aliran Daya Saluran Kasus Tanpa CCS Percobaan 6 Jam-19

## 5. Hasil Simulasi dan Analisis Kasus Tanpa CCS Percobaan 9

Pembobotan,  $w_1 = 0,2$  |  $w_2 = 0,8$



**Gambar 5.1** Kurva Konvergensi Kasus Tanpa CCS Percobaan 9

**Tabel 5.1** Daya Gen, Beban, CCS dan Rugi-rugi Kasus Tanpa CCS Percobaan 9

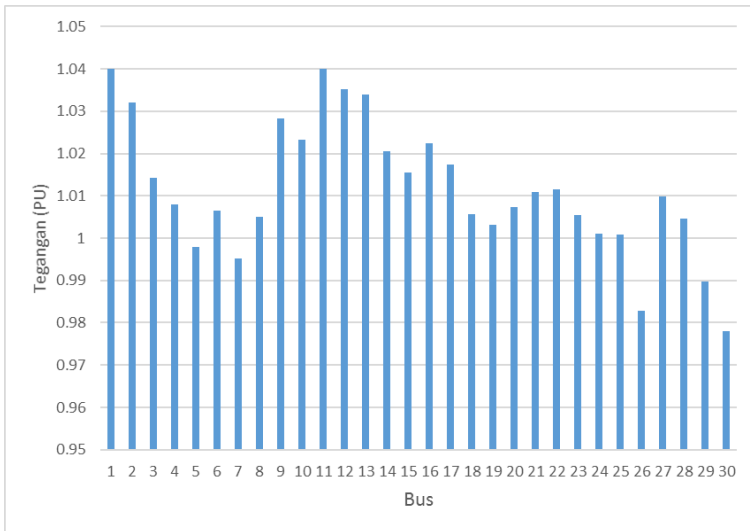
Jam ke-	Daya Pembangkitan Generator ke- (MW)						Beban (MW)	CCS (MW)	Rugi <sup>2</sup> (MW)
	1	2	3	4	5	6			
1	72,21	26,38	15,00	35,00	30,00	26,11	202,00	0,00	2,73
2	63,83	24,09	15,00	35,00	30,00	24,35	190,00	0,00	2,32
3	59,60	20,00	15,00	35,00	30,00	23,41	181,00	0,00	2,07
4	58,92	22,76	15,00	35,00	30,00	23,34	183,00	0,00	2,10
5	64,52	24,28	15,00	35,00	30,00	24,49	191,00	0,00	2,35
6	70,80	25,99	15,00	35,00	30,00	25,84	200,00	0,00	2,65
7	91,45	31,62	17,62	35,00	30,00	30,15	232,00	0,00	3,84
8	104,57	35,23	19,02	35,00	30,00	32,94	252,00	0,00	4,75
9	101,53	34,46	18,82	35,00	30,00	40,00	255,00	0,00	4,77
10	114,43	37,96	20,08	35,00	30,00	35,04	267,00	0,00	5,52
11	115,75	38,32	20,23	35,00	30,00	35,33	269,00	0,00	5,63
12	104,57	35,23	19,02	35,00	30,00	32,94	252,00	0,00	4,75
13	94,03	32,35	15,00	35,00	30,00	30,66	233,00	0,00	4,05
14	100,62	34,15	18,60	35,00	30,00	32,10	246,00	0,00	4,46
15	96,13	32,93	15,00	35,00	30,00	31,11	236,00	0,00	4,19
16	105,20	35,41	19,09	35,00	30,00	33,07	253,00	0,00	4,80
17	115,08	38,14	20,15	35,00	30,00	35,19	268,00	0,00	5,57
18	119,87	39,50	20,74	35,00	30,00	40,00	279,00	0,00	6,11
19	123,25	40,43	21,10	35,00	30,00	40,00	283,40	0,00	6,38
20	116,82	38,66	20,42	35,00	30,00	40,00	275,00	0,00	5,87
21	114,49	38,02	20,17	35,00	30,00	40,00	272,00	0,00	5,69
22	105,20	35,41	19,09	35,00	30,00	33,07	253,00	0,00	4,80
23	94,74	32,53	17,97	35,00	30,00	30,85	237,00	0,00	4,05
24	86,86	30,37	17,14	35,00	30,00	29,19	225,00	0,00	3,55

**Tabel 5.2** Kenaikan atau Penurunan Daya Gen Kasus Tanpa CCS Percobaan 9

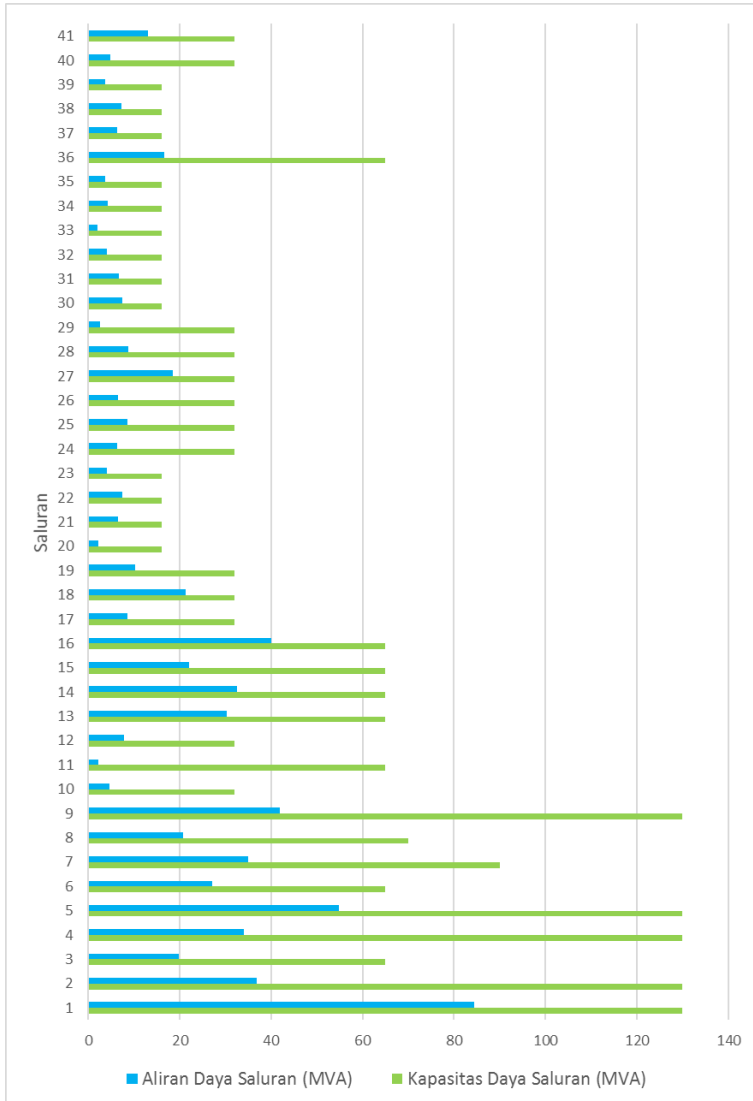
Jam ke-	Kenaikan atau Penurunan Pembangkitan (MW)					
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
1-2	-8,38	-2,29	0,00	0,00	0,00	-1,76
2-3	-4,23	-4,09	0,00	0,00	0,00	-0,94
3-4	-0,67	2,76	0,00	0,00	0,00	-0,07
4-5	5,60	1,52	0,00	0,00	0,00	1,15
5-6	6,28	1,71	0,00	0,00	0,00	1,35
6-7	20,65	5,64	2,62	0,00	0,00	4,32
7-8	13,12	3,61	1,40	0,00	0,00	2,78
8-9	-3,04	-0,78	-0,20	0,00	0,00	7,06
9-10	12,90	3,50	1,27	0,00	0,00	-4,96
10-11	1,32	0,37	0,14	0,00	0,00	0,28

**Tabel 5.2** Kenaikan atau Penurunan P Gen Kasus Tanpa CCS Perc 9 (lanjutan)

Jam ke-	Kenaikan atau Penurunan Pembangkitan (MW)					
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
11-12	-11,18	-3,09	-1,21	0,00	0,00	-2,39
12-13	-10,54	-2,88	-4,02	0,00	0,00	-2,27
13-14	6,59	1,79	3,60	0,00	0,00	1,43
14-15	-4,49	-1,22	-3,60	0,00	0,00	-0,99
15-16	9,07	2,48	4,09	0,00	0,00	1,97
16-17	9,88	2,73	1,07	0,00	0,00	2,11
17-18	4,78	1,36	0,58	0,00	0,00	4,81
18-19	3,38	0,93	0,36	0,00	0,00	0,00
19-20	-6,43	-1,78	-0,68	0,00	0,00	0,00
20-21	-2,32	-0,64	-0,24	0,00	0,00	0,00
21-22	-9,29	-2,61	-1,08	0,00	0,00	-6,93
22-23	-10,46	-2,88	-1,12	0,00	0,00	-2,22
23-24	-7,87	-2,16	-0,83	0,00	0,00	-1,66



**Gambar 5.2** Tegangan Bus Kasus Tanpa CCS Percobaan 9 Jam-19



**Gambar 5.3** Aliran Daya Saluran Kasus Tanpa CCS Percobaan 9 Jam-19

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Setelah dilakukan simulasi DOPF menggunakan metode *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) dengan penambahan sistem *carbon capture and storage* (CCS) pada pembangkit, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) mampu menyelesaikan perhitungan *Optimal Power Flow* (OPF) dengan penambahan sistem *carbon capture and storage* (CCS) mempertimbangkan biaya dan emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) pembangkitan dengan menjaga batasan-batasan seperti *equality constraints* dan *inequality constraints*.
2. 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 4.5).
3. 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).
4. Semakin besar nilai bobot yang diberikan untuk emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), maka emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang dihasilkan pembangkit akan semakin kecil yaitu sebesar 2631,23970 Ton dan sebaliknya semakin kecil nilai bobot yang diberikan untuk emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), maka emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang dihasilkan pembangkit akan semakin besar yaitu sebesar 3750,80980 Ton (kasus pembobotan yang sama).

## 5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya pada bidang operasi optimum sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut.

1. Menambahakan pengaruh dari cadangan berputar, sehingga menjadi permasalahan DOPF dengan mempertimbangkan cadangan berputar dan *carbon capture and storage (CCS) plants*.
2. Mengganti fungsi tujuan emisi karbon (Ton) dengan perhitungan penalti karbon (\$), sehingga tidak diperlukan optimasi multi tujuan.
3. Menyelesaikan permasalahan DOPF dengan mempertimbangkan *carbon capture and storage (CCS) plants* menggunakan metode selain MOPSO, seperti *firefly algorithm*, *diffensial evolution*, *genetic algorithm*, *ant colony algorithm* dan lain-lain.



## 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] Saadat, Hadi, "Power System Analysis 2nd Edition", McGrawHill. Ch.1, 1999
- [3] Wood, A. J., Wollenberg, B. F, "Power Generation Operation and Control", John Willey & Sons Inc, America, 1996
- [4] Santosa Budi, Willy Paul, "Metoda Metaheuristik Konsep dan Implementasi", Prima Printing, Surabaya, 2011
- [5] 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
- [6] K. Xie, Y. H. Song, "Dynamic Optimal power Flow by Interior Point Method", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 148, No. 1, January 2001.
- [7] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization", In IEEE Int. Conf on Neural Networks, Perth, Australia, 1942-1948, 1995.

*[halaman ini sengaja dikosongkan]*

## BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama Yauri Mahaputra lahir di Kabupaten Sinjai pada tanggal 2 Agustus 1993. Merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis memulai pendidikan di SD Negeri 036 Balikpapan (1999-2005). Kemudian, melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama dan Sekolah Menengah Kejuruan masing-masing di SMP Negeri 7 Balikpapan (2005-2008) dan SMK Negeri 1 Balikpapan Jurusan Teknik Komputer dan Jaringan (2008-2011). Pada tahun 2011, penulis melanjutkan pendidikan jenjang Diploma di Institut Teknologi Telkom Bandung dengan konsentrasi bidang studi Teknik Telekomunikasi. Pada tahun 2014 penulis berhasil menyelesaikan pendidikan Diploma dan melanjutkan pendidikan sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan konsentrasi bidang studi Teknik Elektro Sistem Tenaga. Selama masa perkuliahan penulis aktif di Laboratorium Rangkaian Listrik (RL) Institut Teknologi Telkom Bandung dan Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga (PSSL) sebagai asisten. Selain aktif di Laboratorium penulis juga aktif mengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Telekomunikasi (HIMATEL) Institut Teknologi Telkom Bandung.

Email : [yauri.putra@gmail.com](mailto:yauri.putra@gmail.com)

*[halaman ini sengaja dikosongkan]*