



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

***ECONOMIC DISPATCH DENGAN MEMPERTIMBANGKAN
CARBON CAPTURE PLANTS MENGGUNAKAN FIREFLY
ALGORITHM***

Rudy Arif Prasajo
NRP 2214105050

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Danar Fahmi, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

***ECONOMIC DISPATCH WITH CARBON CAPTURE PLANTS
CONSIDERED USING FIREFLY ALGORITHM***

Rudy Arif Prasajo
NRP 2214105050

Supervisor
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Danar Fahmi, ST., MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

***ECONOMIC DISPATCH DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN CARBON CAPTURE PLANTS
MENGUNAKAN FIREFLY ALGORITHM***

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

Daniar Fahmi, ST., MT.
NIP. 198909252014041002



ECONOMIC DISPATCH DENGAN MEMPERTIMBANGKAN CARBON CAPTURE PLANTS MENGGUNAKAN FIREFLY ALGORITHM

Rudy Arif Prasajo
2214105050

Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Dosen Pembimbing II : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRAK

Sistem pembangkit listrik termal pada umumnya masih menghasilkan emisi berupa karbon dioksida (CO₂) yang dibuang keudara dalam jumlah besar, diperlukan teknologi penangkapan karbon untuk mengatasi jumlah karbon yang dihasilkan. Selain permintaan terhadap energi listrik selalu berubah setiap waktu akan memberikan pengaruh signifikan pada keseluruhan emisi karbon dioksida pada pembangkit listrik. Poses penangkapan karbon agar berjalan maksimal, maka diperlukan analisis dengan mempertimbangkan karakteristik pembangkit dan operasi CCP (*carbon capture plants*) pada pembangkit listrik. Tugas akhir ini penulis melakukan perancangan dan analisis ED (*economic dispatch*) dengan mempertimbangkan penambahan *carbon capture plants* pada sistem pembangkit tenaga listrik. Metode optimisasi yang digunakan pada tugas akhir ini adalah FA (*firefly algorithm*). Fungsi tujuan yang akan dioptimasi adalah biaya pembangkitan dan emisi karbon dioksida pada waktu yang bersamaan. Selain itu ditambahkan *wind turbine* sebagai salah satu pengujian untuk melihat efek dari pemasangannya. Plan sistem yang digunakan pada optimasi ini adalah sistem IEEE 30 bus dengan modifikasi beban yang berubah dan penambahan *carbon capture plants*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan menggunakan metode optimisasi *firefly algorithm* mampu melakukan perhitungan *economic dispatch* dengan mempertimbangkan *carbon capture plants*.

Kata Kunci : *Economic Dispatch* (ED), *Carbon Capture Plants* (CCP)
Firefly Algorithm (FA), *Weight Sum Method*
Emisi Karbon Dioksida (CO₂), *Wind Turbine*

ECONOMIC DISPATCH WITH CARBON CAPTURE PLANTS CONSIDERED USING FIREFLY ALGORITHM

Rudy Arif Prasajo
2214105050

Supervisor I : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
Supervisor II : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRACT

In general, the system of thermal generation electricity that produces carbon dioxide (CO₂) emission that discharge to the air within the big amount, needs the technology of capture carbon to cope the output from amount of carbon. Beside that, the supply demand of electricity that is always change from time to time would give a significant effect for all carbon dioxide emission against the power plant. The process of capturing carbon will be going smoothly and reach maximum output, then analysis within consider the characteristic of power plant and CCP(carbon capture plants) operation was required in power plant itself. In this final project, the writer was creating a design and doing analysis ED (economic dispatch) through consider of adding CCP in the system of power plant. FA (firefly algorithm) is the optimization method of this final project. The purpose of optimization is for the cost of power plant and also carbon dioxide emission in the same time. Wind turbine also adding in this case to get impact analysis within consider it. IEEE 30 bus with the fluctuate load modifications and adding CCP that will be used in this optimization. The result of test shows that using FA optimization could calculate ED with considering CCP.

Keyword: *Economic Dispatch (ED), Carbon Capture Plants (CCP)
Firefly Algorithm, Weight Sum Method
Carbon Dioxide (CO₂) Emission, Wind Turbine*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin, segala puji bagi Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "***Economic Dispatch Dengan Mempertimbangkan Carbon Capture Plants Menggunakan Firefly Algorithm***".

Pada pengerjaan Tugas Akhir ini, penulis dapat belajar lebih banyak dan meningkatkan apa yang telah didapatkan selama menempuh perkuliahan di Jurusan Teknik Elektro ITS. Dengan ini penulis dapat menghasilkan suatu implementasi dari apa yang telah penulis pelajari, dengan harapan agar dapat berguna pada proses selanjutnya. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Agus Waluyo, A.Md. Ibu Sri Nurti, S.H. Toto Setyawan, S.H dan Elsa Rizkiya Kencana, ST. yang tidak pernah berhenti memberikan motivasi dan doa.
2. Bapak Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., M.T. dan Bapak Daniar Fahmi, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bantuan, saran dan bimbingan.
3. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS serta seluruh dosen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu selama proses perkuliahan.
4. Teman-teman asisten *Power System Simulation Laboratory* dan *Energy Conversion Laboratory* yang telah banyak membantu dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
5. Teman-teman satu angkatan 2014 Lintas Jalur dan 2011 Reguler Jurusan Teknik Elektro ITS.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki banyak kekurangan, sehingga dengan kerendahan hati, saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBARPERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Metodologi Penelitian	3
1.6 Sistematika Laporan	4
1.7 Relevansi	5

BAB 2 *ECONOMIC DISPATCH* DAN *CARBON CAPTURE PLANTS* DENGAN *FIREFLY ALGORITHM*

2.1 Sistem Tenaga Listrik	7
2.1.1 Generator	7
2.1.2 Sistem Transmisi	8
2.1.3 Sistem Distribusi	8
2.1.4 Beban	8
2.2 Karakteristik <i>Input – Output</i> Pembangkit <i>Thermal</i>	9
2.3 <i>Economic Dispatch</i> (ED)	11
2.4 <i>Carbon Capture Plants</i> (CCP)	12
2.5 Penerapan <i>Wind Turbine</i>	14
2.6 Algoritma Kunang – Kunang (<i>Firefly Algorithm</i>)	15
2.6.1 Intensitas Cahaya dan Keatraktifan <i>Firefly</i>	17
2.6.2 Jarak Antara <i>Firefly</i>	18
2.6.3 Pergerakan <i>Firefly</i>	18

BAB III PENERAPAN *ECONOMIC DISPATCH* DENGAN MEMPERTIMBANGKAN *CARBON CAPTURE PLANTS* MENGGUNAKAN *FIREFLY ALGORITHM*

3.1 Sistem IEEE 30 Bus	19
------------------------------	----

3.1.1	Fungsi Biaya	22
3.1.2	Kapasitas Pembangkit.....	22
3.1.3	Keseimbangan Daya	22
3.1.4	<i>Ramp Rate</i>	23
3.2	<i>Weight Sum Method</i>	23
3.3	Pemasangan CCP (<i>Carbon Capture Plants</i>)	25
3.4	Data Turbin Angin (<i>Wind Turbine</i>).....	26
3.5	Penerapan <i>Firefly Algorithm</i>	27
3.5.1	Inisialisasi Awal <i>Firefly</i>	27
3.5.2	Pergerakan <i>Firefly</i>	28

BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS

4.1	Data Spesifikasi CPU	33
4.2	Validasi <i>Firefly Algorithm</i> Refrensi Allan J. Wood	33
4.3	<i>Economic Dispatch</i> dengan <i>Carbon Capture Plants</i> Menggunakan <i>Firefly Algorithm</i>	35
4.4	Studi Kasus 1 Tanpa CCP Percobaan 1.....	39
4.5	Studi Kasus 1 Tanpa CCP Percobaan 6.....	42
4.6	Studi Kasus 1 Tanpa CCP Percobaan 11.....	45
4.7	Studi Kasus 2 Dengan CCP Percobaan 1	48
4.8	Studi Kasus 2 Dengan CCP Percobaan 6	51
4.9	Studi Kasus 2 Dengan CCP Percobaan 11	54
4.10	Studi Kasus Dengan Penambahan <i>Wind Turbine</i>	58
4.11	Studi Kasus 3 Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 1	62
4.12	Studi Kasus 3 Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 6	66
4.13	Studi Kasus 3 Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 11	70
4.14	Studi Kasus 4 Dengan CCP Dengan WT Percobaan 1.....	74
4.15	Studi Kasus 4 Dengan CCP Dengan WT Percobaan 6.....	78
4.16	Studi Kasus 4 Dengan CCP Dengan WT Percobaan 11.....	82

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan	89
5.2	Saran	90

DAFTAR PUSTAKA	91
-----------------------------	----

LAMPIRAN	93
-----------------------	----

RIWAYAT HIDUP	123
----------------------------	-----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem Tenaga Listrik Secara Umum.....	7
Gambar 2.2	Kurva Karakteristik I-O Pembangkit <i>Thermal</i>	9
Gambar 2.3	Kurva Kenaikan <i>Input</i>	10
Gambar 2.4	Kurva <i>Heat Rate</i> Pembangkit <i>Thermal</i>	10
Gambar 2.5	Kurva Daya Aktual dan Model wt10000dd	14
Gambar 3.1	Sistem IEEE 30 Bus.....	19
Gambar 3.2	Grafik Beban Dinamik.....	21
Gambar 3.3	Grafik Kecepatan Angin Dinamik	26
Gambar 3.4	Diagram Alir Inisialisasi Awal Populasi.....	27
Gambar 3.5	Diagram Alir Proses Update Nilai Fitness.....	29
Gambar 3.6	Diagram Alir <i>Firefly Algorithm</i>	31
Gambar 4.1	Diagram Biaya dan Emisi CO ₂ Tanpa CCP.....	36
Gambar 4.2	Kurva Biaya dan Emisi CO ₂ Tanpa CCP.....	36
Gambar 4.3	Diagram Biaya dan Emisi CO ₂ Dengan CCP	37
Gambar 4.4	Kurva Biaya dan Emisi CO ₂ Dengan CCP	38
Gambar 4.5	Kurva Daya Pembangkitan Tanpa CCP Percobaan 1.....	40
Gambar 4.6	Kurva Konvergensi Kasus 1 Tanpa CCP Percobaan 1.....	40
Gambar 4.7	Kurva Daya Pembangkitan Tanpa CCP Percobaan 6.....	43
Gambar 4.8	Kurva Konvergensi Kasus 1 Tanpa CCP Percobaan 6.....	43
Gambar 4.9	Kurva Daya Pembangkitan Tanpa CCP Percobaan 11.....	46
Gambar 4.10	Kurva Konvergensi Kasus 1 Tanpa CCP Percobaan 11.....	46
Gambar 4.11	Kurva Daya Pembangkitan Dengan CCP Percobaan 1.....	49
Gambar 4.12	Kurva Konvergensi Kasus 2 Dengan CCP Percobaan 1.....	49
Gambar 4.13	Kurva Daya Pembangkitan Dengan CCP Percobaan 6.....	52
Gambar 4.14	Kurva Konvergensi Kasus 2 Dengan CCP Percobaan 6.....	52
Gambar 4.15	Kurva Daya Pembangkitan Dengan CCP Percobaan 11.....	55

Gambar 4.16	Kurva Konvergensi Kasus 2 Dengan CCP Percobaan 11	55
Gambar 4.17	Diagram Biaya dan Emisi CO ₂ Tanpa CCP Dengan WT	59
Gambar 4.18	Kurva Biaya dan Emisi CO ₂ Tanpa CCP Dengan WT	59
Gambar 4.19	Diagram Biaya dan Emisi CO ₂ Dengan CCP Dengan WT	60
Gambar 4.20	Kurva Biaya dan Emisi CO ₂ Dengan CCP Dengan WT	61
Gambar 4.21	Kurva Daya Pembangkitan Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 1	64
Gambar 4.22	Kurva Konvergensi Kasus 3 Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 1	64
Gambar 4.23	Kurva Daya Pembangkitan Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 6	68
Gambar 4.24	Kurva Konvergensi Kasus 3 Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 6	68
Gambar 4.25	Kurva Daya Pembangkitan Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 11	72
Gambar 4.26	Kurva Konvergensi Kasus 3 Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 11	72
Gambar 4.27	Kurva Daya Pembangkitan Dengan CCP Dengan WT Percobaan 1	76
Gambar 4.28	Kurva Konvergensi Kasus 4 Dengan CCP Dengan WT Percobaan 1	76
Gambar 4.29	Kurva Daya Pembangkitan Dengan CCP Dengan WT Percobaan 6	80
Gambar 4.30	Kurva Konvergensi Kasus 4 Dengan CCP Dengan WT Percobaan 6	80
Gambar 4.31	Kurva Daya Pembangkitan Dengan CCP Dengan WT Percobaan 11	84
Gambar 4.32	Kurva Konvergensi Kasus 4 Dengan CCP Dengan WT Percobaan 11	84

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data Pembangkit Sistem IEEE 30 Bus.....	20
Tabel 3.2	Fungsi Biaya Pembangkitan Sistem IEEE 30 Bus	20
Tabel 3.3	Fungsi Emisi CO ₂ Pembangkit Sistem IEEE 30 Bus	20
Tabel 3.4	Data Plan <i>Carbon Capture Plants</i> (CCP).....	21
Tabel 3.5	Beban Sistem IEEE 30 Bus.....	21
Tabel 3.6	Data Turbin Angin (<i>Wind Turbine</i>)	26
Tabel 4.1	Data Pembangkit <i>Example 3A</i>	33
Tabel 4.2	Hasil Studi Kasus 1 Tanpa CCP.....	35
Tabel 4.3	Hasil Studi Kasus 2 Dengan CCP.....	37
Tabel 4.4	Daya Pembangkitan Generator, Beban, dan Karbon Kasus 1 Tanpa CCP Percobaan 1	39
Tabel 4.5	Kenaikan atau Penurunan Daya Pembangkitan	41
Tabel 4.6	Daya Pembangkitan Generator, Beban, dan Karbon Kasus 1 Tanpa CCP Percobaan 6	42
Tabel 4.7	Kenaikan atau Penurunan Daya Pembangkitan	44
Tabel 4.8	Daya Pembangkitan Generator, Beban, dan Karbon Kasus 1 Tanpa CCP Percobaan 11	45
Tabel 4.9	Kenaikan atau Penurunan Daya Pembangkitan	47
Tabel 4.10	Daya Pembangkitan Generator, Beban, Karbon dan CCP Kasus 2 Dengan CCP Percobaan 1	48
Tabel 4.11	Kenaikan atau Penurunan Daya Pembangkitan	50
Tabel 4.12	Daya Pembangkitan Generator, Beban, Karbon dan CCP Kasus 2 Dengan CCP Percobaan 6	51
Tabel 4.13	Kenaikan atau Penurunan Daya Pembangkitan.....	53
Tabel 4.14	Daya Pembangkitan Generator, Beban, Karbon dan CCP Kasus 2 Dengan CCP Percobaan 11.....	54
Tabel 4.15	Kenaikan atau Penurunan Daya Pembangkitan	56
Tabel 4.16	Hasil Simulasi Studi Kasus 1 Tanpa CCP.....	57
Tabel 4.17	Hasil Simulasi Studi Kasus 2 Dengan CCP.....	57
Tabel 4.18	Hasil Studi Kasus 3 Tanpa CCP Dengan WT.....	58
Tabel 4.19	Hasil Studi Kasus 4 Dengan CCP Dengan WT.....	60
Tabel 4.20	Daya Pembangkitan Generator, Beban, dan Karbon Kasus 3 Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 1	62
Tabel 4.21	Daya Pembangkitan dan Total Daya <i>Wind Turbine</i>	63
Tabel 4.22	Kenaikan atau Penurunan Daya Generator	65
Tabel 4.23	Daya Pembangkitan Generator, Beban, dan Karbon Kasus 3 Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 6	66

Tabel 4.24	Daya Pembangkitan dan Total Daya <i>Wind Turbine</i>	67
Tabel 4.25	Kenaikan atau Penurunan Daya Generator	69
Tabel 4.26	Daya Pembangkitan Generator, Beban, dan Karbon Kasus 3 Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 11.....	70
Tabel 4.27	Daya Pembangkitan dan Total Daya <i>Wind Turbine</i>	71
Tabel 4.28	Kenaikan atau Penurunan Daya Generator	73
Tabel 4.29	Daya Pembangkitan Generator, Beban, Karbon dan Daya CCP Kasus 4 Dengan CCP Dengan WT Percobaan 1	74
Tabel 4.30	Daya Pembangkitan dan Total Daya <i>Wind Turbine</i>	75
Tabel 4.31	Kenaikan atau Penurunan Daya Generator	77
Tabel 4.32	Daya Pembangkitan Generator, Beban, Karbon dan Daya CCP Kasus 4 Dengan CCP Dengan WT Percobaan 6	78
Tabel 4.33	Daya Pembangkitan dan Total Daya <i>Wind Turbine</i>	79
Tabel 4.34	Kenaikan atau Penurunan Daya Generator	81
Tabel 4.35	Daya Pembangkitan Generator, Beban, Karbon dan Daya CCP Kasus 4 Dengan CCP Dengan WT Percobaan 11	82
Tabel 4.36	Daya Pembangkitan dan Total Daya <i>Wind Turbine</i>	83
Tabel 4.37	Kenaikan atau Penurunan Daya Generator	85
Tabel 4.38	Hasil Simulasi Studi Kasus 3 Tanpa CCP Dengan WT	86
Tabel 4.39	Hasil Simulasi Studi Kasus 4 Dengan CCP Dengan WT	86
Tabel 4.40	Hasil Perbandingan 1	87
Tabel 4.41	Hasil Perbandingan 2	87

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkitan energi listrik sangat memegang peranan penting dalam kehidupan manusia dan berhubungan erat dengan pencemaran udara. Pertambahan penduduk memberikan efek domino yang menyebabkan tingginya permintaan energi listrik sehingga menyumbang bertambahnya kandungan karbon dioksida dari tahun ke tahun. Apabila jumlah pembangkit listrik termal yang pada umumnya berbahan bakar fosil seperti batubara, minyak dan gas bertambah maka emisi karbon dioksida yang terbuang ke atmosfer semakin banyak mengakibatkan kerugian pada manusia dan lingkungan sekitarnya selain itu dapat menyebabkan *global warming* yang merupakan isu penting banyak negara di dunia yang disebabkan salah satunya oleh karbon dioksida.

Sebagian besar energi yang dibutuhkan manusia modern disuplai dalam bentuk energi listrik. Untuk dapat menyuplai ketersediaan energi listrik dibutuhkan kapasitas pembangkit listrik yang lebih besar dengan jumlah unit pembangkit yang tidak sedikit. Selain itu beban yang harus secara kontinu disuplai oleh setiap unit pembangkit listrik selalu berubah setiap waktu, maka pertambahan beban akan mendorong bertambahnya jumlah konsumsi bahan bakar sehingga akan meningkatkan biaya pembangkitan dan jumlah karbon dioksida. Untuk melayani kebutuhan energi listrik tersebut, pembangkit listrik memerlukan suatu fungsi yang mampu meminimalisasi biaya bahan bakar seminimal mungkin dan dapat memproduksi daya listrik secara optimal dengan bersamaan dapat mempertimbangkan tingkat pencemaran emisi karbon dioksida yang diakibatkan oleh kebutuhan energi listrik yang terus meningkat.

ED (*economic dispatch*) merupakan salah satu metode optimisasi dalam pembangkitan sistem tenaga listrik. *Economic dispatch* memiliki fungsi utama dalam proses pembagian pembebanan pada pembangkit yang ada dalam sistem pada biaya pembangkitan paling minimal. Besar beban selalu berubah setiap periode waktu tertentu dengan memperhitungkan batasan *ramp rate* dari setiap unit pembangkit, maka dari itu untuk mensuplai beban secara ekonomis maka perhitungan *economic dispatch* dilakukan pada setiap besar beban tersebut. Selain itu perubahan daya setiap saat dalam periode waktu tertentu dengan mempertimbangkan tingkat karbon dioksida yang diakibatkan oleh pembangkitan daya listrik, dapat digunakan metode optimisasi dalam *economic dispatch* dan emisi karbon dioksida yang diakibatkan.

Economic dispatch dengan mempertimbangkan jumlah karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan adalah masalah yang sangat penting dalam proses pembangkitan sistem tenaga listrik. Untuk mengurangi jumlah emisi karbon dioksida yang dihasilkan oleh pembangkit listrik dibutuhkan teknologi CCP (*carbon capture plants*). *Carbon capture plants* adalah proses penangkapan (*capture*) dari sumber emisi gas buang yang merupakan salah satu teknologi interim untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dari sumber stasioner seperti pembangkit listrik.

Pada tugas akhir ini digunakan salah satu metode untuk menyelesaikan masalah *economic dispatch* dengan mempertimbangkan *carbon capture plants* yaitu metode FA (*firefly algorithm*) dengan metode pembobotan *weights sum*. Metode *weight sum* ini dapat mengoptimisasi lebih dari satu fungsi tujuan secara bersamaan. Selain itu akan ditambahkan juga turbin angin (*wind turbine*) untuk mengetahui pengaruh akibat pemasangan turbin angin ini terhadap daya keluaran pembangkit, biaya pembangkitan dan emisi karbon dioksida yang dihasilkan. Selanjutnya diharapkan tugas akhir ini dapat menjadi salah satu referensi dalam proses optimisasi pembangkit listrik dengan mempertimbangkan *carbon capture plants* dan salah satu referensi dalam upaya pengurangan emisi karbon dioksida.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang diselesaikan pada tugas akhir ini adalah *economic dispatch* dengan mempertimbangkan *carbon capture plants* pada sistem pembangkit listrik IEEE 30 bus menggunakan *firefly algorithm* dengan menggunakan batasan *equality constraints* dan *inequality constraints*. Kemudian menentukan daya keluaran setiap unit pembangkit agar biaya pembangkitan dan emisi karbon dioksida yang dihasilkan bisa minimal. Selain itu ditambahkan turbin angin (*wind turbine*) untuk mengetahui pengaruh akibat pemasangan turbin angin ini terhadap daya keluaran pembangkit, biaya pembangkitan dan emisi karbon dioksida yang dihasilkan

1.3 Batasan Masalah

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, permasalahan dibatasi sebagai berikut :

1. Hasil tugas akhir dalam bentuk analisis dan simulasi.
2. Sistem yang digunakan dalam simulasi multiobjektif adalah sistem IEEE 30 Bus.
3. Metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yaitu *firefly algorithm*.

4. Metode pembobotan menggunakan *weight sum method*.
5. Menggunakan persamaan *carbon capture plants* untuk menghitung emisi yang diakibatkan pembangkit.
6. *Ramp rate* diasumsikan sama untuk *ramp up* dan *ramp down*.
7. Perubahan beban dianggap persatuan jam selama 24 jam.
8. Penambahan 5 buah turbin angin berkapasitas 10 MW.
9. Kecepatan angin diambil dari referensi di daerah *Kahperusvaarat, Laponia* Finlandia.

1.4 Tujuan Penelitian

Tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh dari pemasangan plan *carbon capture plants* terhadap keluaran daya pembangkit dan total daya pembangkit yang dihasilkan.
2. Menerapkan metode *firefly algorithm* pada *economic dispatch* dengan mempertimbangkan pemasangan *carbon capture plants* dengan pembobotan menggunakan metode *weight sum*.
3. Menerapkan batasan yang digunakan *equality constraints* dan *inequality constraints* pada metode *firefly algorithm*.
4. Menentukan daya keluaran setiap unit pembangkit agar biaya dan jumlah emisi karbon dioksida yang dihasilkan minimal.
5. Mengetahui pengaruh pemasangan turbin angin (*wind turbine*) terhadap keluaran daya pembangkit dan total emisi karbon dioksida pembangkit yang dihasilkan.

1.5 Metodologi Penelitian

Dalam mengerjakan tugas akhir ini, pertama kali penulis melakukan pencarian dan mempelajari literatur, pengumpulan data, pembuatan dan simulasi program pada software Matlab 2016. Kemudian melakukan penulisan hasil analisis.

Pencarian dan mempelajari literatur dilakukan dengan mencari teori-teori pendukung metode *firefly algorithm*, *weight sum method*, penjelasan mengenai *carbon capture plants* dan data *wind turbine sea titan* 10 MW yang digunakan sebagai dasar pengerjaan. Kemudian pengumpulan data meliputi data pembangkitan generator, beban, data dari plan *carbon capture plants*, turbin angin dan kecepatan angin. Data generator yang digunakan meliputi kapasitas daya pembangkitan minimum dan maksimum, kapasitas *ramp up* dan *ramp down*, fungsi biaya pembangkitan, fungsi biaya emisi karbon dioksida.

Data dari *carbon capture plants* terdiri dari fungsi emisi karbon dioksida, rate karbon yang ditangkap, daya yang dikonsumsi plan *carbon capture plants* per ton tangkapan karbon. Data yang sudah terkumpul ini kemudian memasuki tahap melakukan pemrograman *economic dispatch* mempertimbangkan *carbon capture plants* menggunakan *firefly algorithm*, pembobotan dengan *weight sum method* dan batasan batasan yang digunakan. Kemudian ditambah turbin angin pada studi kasus masing-masing pembobotan.

Simulasi menggunakan *software* Matlab 2016 dengan menggunakan sistem IEEE 30 bus dengan penambahan *carbon capture plants* pada generator unit 1 dan penambahan *wind turbine sea titan* 10 MW sebanyak 5 unit dan dimodifikasi beban dinamik.

1.6 Sistematika Penulisan

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

1. BAB 1 merupakan pendahuluan yang berisi ini tentang latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian, metode penelitian, sistematika penulisan dan relevansi dari tugas akhir.
2. BAB 2 ini berisikan teori penunjang yang menjelaskan tentang sistem tenaga listrik, *wind turbine sea Titan* 10MW, *carbon capture plants* dan *firefly algorithm*.
3. BAB 3 berisi tentang uraian penerapan metode optimisasi menggunakan metode *firefly algorithm* mempertimbangkan *carbon capture plants* dengan pembobotan menggunakan metode *weight sum* dan penambahan *wind turbine sea titan* 10MW pada sistem IEEE 30 bus.
4. BAB 4 menjelaskan tentang simulasi dan analisis *economic dispatch* menggunakan metode optimisasi *firefly algorithm* dengan penambahan *carbon capture plants* dan *wind turbine* mempertimbangkan biaya dan emisi karbon dioksida dengan pembobotan metode *weight sum*.
5. BAB 5 bab ini menjelaskan tentang kesimpulan dan saran dari hasil simulasi dan analisis menggunakan metode *firefly algorithm* pada kasus *economic dispatch* mempertimbangkan *carbon capture plants*.

1.7 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 *economic dispatch* dengan mempertimbangkan *carbon capture plants* dan *wind turbine* pada pembangkit.
2. Dapat menjadi referensi untuk mengembangkan pembangkit listrik dengan penambahan *carbon capture plants* dan *wind turbine* yang merupakan salah satu alternatif pengurangan emisi gas rumah kaca terutama emisi karbon dioksida.
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil topik tugas akhir dengan permasalahan yang serupa.

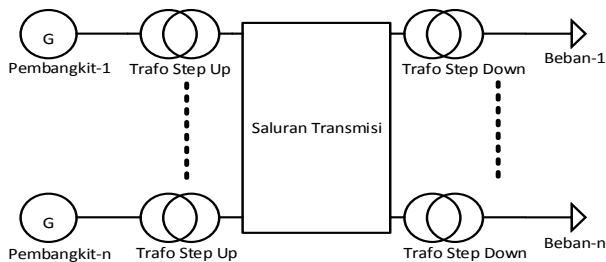
[halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 2

ECONOMIC DISPATCH DAN CARBON CAPTURE PLANTS DENGAN FIREFLY ALGORITHM

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik salah satu objek paling populer dalam keseluruhan lingkup energi, karena mudah di distribusikan dengan efisiensi tinggi dan harga yang masuk akal. Selain itu sistem tenaga listrik merupakan objek yang sangat penting untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dalam kehidupan manusia. Pada sistem tenaga listrik modern dibagi menjadi menjadi empat bagian yaitu, sistem pembangkitan, sistem transmisi, sistem distribusi dan beban tenaga listrik.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik Secara Umum

Penyaluran energi listrik dari pusat pembangkit sampai ke konsumen dapat dilihat pada Gambar 2.1. Pada gambar tersebut dijelaskan bahwa sistem transmisi digunakan sebagai penyaluran energi listrik dari generator atau pembangkit menuju sistem distribusi dengan tegangan tinggi, sedangkan untuk sistem distribusi menuju beban menggunakan tegangan rendah atau menengah.

2.1.1 Generator

Dalam sistem pembangkitan tenaga listrik, generator merupakan salah satu bagian terpenting dari proses pembangkitan itu sendiri, karena generator berfungsi membangkitkan energi listrik melalui berbagai macam pembangkit tenaga listrik.

Sumber – sumber energi dirubah oleh *primeover* menjadi energi mekanis, atau berasal dari energi mekanik turbin. Jenis turbin uap merupakan jenis turbin yang digerakan oleh energi atau uap yang dihasilkan dari pembakaran batubara atau gas selanjutnya energi mekanis dirubah menjadi energi listrik oleh generator.

2.1.2 Sistem Transmisi

Sistem transmisi berfungsi menyalurkan tenaga listrik dari pusat pembangkit ke pusat beban melalui saluran transmisi. Selain itu saluran transmisi juga bertujuan untuk menghubungkan peralatan selama sistem bekerja normal atau ketika terjadi gangguan pada suatu sistem tenaga listrik. Pada sistem transmisi tegangan yang digunakan adalah tegangan tinggi dengan alasan untuk mengurangi rugi-rugi yang disebabkan oleh arus yang mengalir pada kabel penghantar pada system.

2.1.3 Sistem Distribusi

Sistem distribusi adalah bagian penting yang menghubungkan gardu induk distribusi pada konsumen, seperti pabrik, industri, perumahan. Pada sistem distribusi biasanya merubah tegangan ekstra tinggi dari sistem transmisi tegangan tinggi menjadi tegangan menengah atau distribusi primer, dan untuk kebutuhan konsumen komersial dan perumahan, tegangan akan diturunkan menjadi tegangan distribusi sekunder. Distribusi sekunder menyuplai konsumen dengan tegangan 240/120V, 208/120V, dan 480/277V. Letak sistem distribusi ada 2 macam, yaitu *overhead* dan *underground* perbedaannya adalah jika *overhead* kabel distribusi listrik disalurkan diatas tanah dan *underground* disalurkan melalui bawah tanah.

2.1.4 Beban

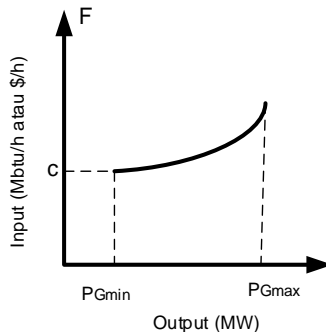
Pada dasarnya setiap sektor beban memiliki karakteristik yang berbeda – beda, mengingat berkaitan dengan pola konsumsi energi pada masing masing konsumen disetiap sekotr tersebut, seperti sektor perumahan, sektor industri, sektor komersial, dan sektor usaha. Karakteristik sektro perumahan akan terjadi fluktuasi dalam proses konsumsi energi listriknya dan lebih dominan terjadi dimalam hari. Berbeda dengan industri besar dan kecil, jika industri besar akan disuplai dari sistem transmisi secara langsung, dan untuk industri kecil akan di suplai oleh jaringan distribusi primer.

2.2 Karakteristik *Input – Output* Pembangkit *Thermal*

Pembangkit dengan karakteristik yang kurang flexible yaitu pembangkit yang tidak dapat ON atau OFF dalam waktu yang singkat. Selain itu bisa dikatakan lambat dalam proses menaikkan dan menurunkan pembebanan yang mengharuskan pembangkit untuk dioperasikan sepanjang pembangkit sudah *ready*.

Pada pembangkit termal, karakteristik *input-output* konsumsi bahan bakar pembangkit merupakan dasar penyusun dari fungsi biaya. Karakteristik *input-output* pembangkit termal berbentuk *Btu per hour input* ke unit generator (Mbtu/h). Biaya pembangkitan adalah perkalian dari biaya (\$) kalori yang terkandung dalam bahan bakar dengan kebutuhan kalori tiap jam dari generator (BTU/h). Daya yang dibangkitkan (P) direpresentasikan dengan (MW atau Mega Watt).

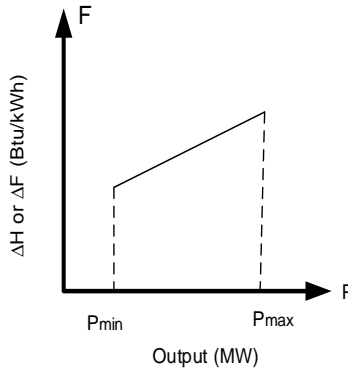
Karakteristik *input-output* ditulis dalam persamaan yang merupakan pendekatan atau linearisasi dari biaya bahan bakar yang masuk ke generator terhadap daya *output* generator. Persamaan karakteristik (orde dua) yang diperoleh disebut dengan biaya pembangkitan energi listrik dari sebuah pembangkit. Kurva karakteristik *input-output* dari pembangkit termal memiliki batas minimal dan maksimal dari daya *output* yang diproduksi dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2.2 Kurva Karakteristik *Input-Output* Pembangkit Termal

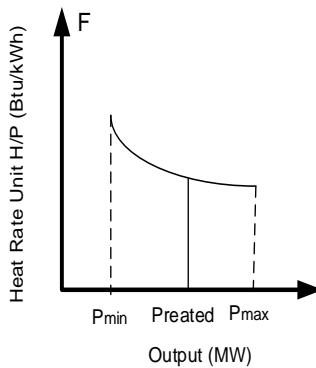
Biaya operasional \$ *per hour* suatu unit terdiri atas biaya operasional dan biaya pemeliharaan. Sehingga biaya pekerja akan dimasukkan sebagai bagian dari biaya operasi pembangkitan jika biaya ini dapat digambarkan secara langsung sebagai fungsi dari *output* unit.

Input unit dapat diterjemahkan dalam bentuk kebutuhan energi panas (Mbtu/h) atau dalam bentuk biaya total per jam (\$/h). Sedangkan *output* menunjukkan keluaran daya listrik dari unit tersebut. Karakteristik kenaikan panas dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut ini.



Gambar 2.3 Kurva Kenaikan *Input*

Heat rate dari suatu pembangkit tidak boleh melebihi dari kapasitas maksimum dari unit pembangkit (P_{max}) dan kapasitas minimum dari unit pembangkit (P_{min}). Jika melebihi dari batas P_{max} dan kurang dari P_{min} maka pembangkit tersebut sudah tidak beroperasi secara aman. Kurva heat rate pada Gambar 2.4 berikut ini.



Gambar 2.4 Kurva *Heat Rate* Pembangkit Termal

2.3 ED (*Economic Dispatch*)

Economic dispatch adalah pembagian pembebanan pada pembangkit-pembangkit yang terhubung dalam sistem dengan biaya operasi minimum, yang sesuai dengan tujuan dari *economic dispatch* adalah untuk meminimalkan biaya pembangkitan yang diperoleh dengan menentukan besarnya daya pembangkitan masing-masing generator. Dalam menentukan besarnya daya yang di bangkitkan tetap mempertimbangkan batas-batas teknis dan operasional, yaitu pembangkitan daya yang optimal dan pembangkitan daya sesuai dengan minimum dan maksimum setiap unit generator sesuai dengan permintaan beban. Dalam *economic dispatch* salah satu komponen yang paling penting dan dominan adalah biaya operasi. Dalam biaya operasi terdapat hal yang harus diperhatikan yaitu biaya bahan bakar atau *fuel cost*. Setiap unit pembangkit memiliki karakteristik fungsi biaya yang berbeda-beda sesuai dengan jenis bahan bakar dan jenis pembangkit. Bentuk persamaan biaya dari unit generator uni-i dimodelkan dengan persamaan sebagai berikut :

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2.1)$$

Keterangan :

F_i = Biaya pembangkitan pada pembangkit unit -i (\$)

P_i = Daya *output* dari pembangkit unit -i (MW)

Dimana variable a, b, dan c adalah koefisien input-output biaya dari pembangkit. Kombinasi daya output yang dibangkitkan oleh masing-masing generator pada sistem harus memenuhi kebutuhan beban dari sistem (*equality constraint*) dan memenuhi batas minimum dan maksimum dari daya yang dapat dibangkitkan oleh generator (*inequality constraint*). Dalam tugas akhir ini terdapat dua batasan, yaitu *equality constraint* dan *inequality constraints*. *Generating capacity constraint*, *power balance constrain*, dan *ramp rate constrain* ada pada persamaan 2.2 – 2.4 sebagai berikut :

$$P_i \min \leq P_i \leq P_i \max \quad (2.2)$$

$$\sum P_i = P_D + P_S \quad (2.3)$$

$$Ramp,i (down) \leq P_i (t+1) - P_i \leq Ramp,i (up) \quad (2.4)$$

Keterangan :

- $P_i \min, P_i \max$ = Batasan minimum dan maksimum daya pembangkit (MW)
 P_i = Daya *output* pembangkit (MW)
 P_D = Daya permintaan konsumen (MW)
 $Ramp,i (down - up)$ = Batas *ramp rate generator ke i* (MW)

2.4 CCP (*Carbon Capture Plants*)

Sumber utama penghasil emisi karbon dioksida (CO₂) adalah pembangkit listrik yang masih menggunakan bahan bakar fosil. Semakin banyaknya karbon dioksida yang dibuang ke atmosfer semakin banyak dan dapat menyebabkan *global warming* dan bumi menjadi rusak. Berikut adalah persamaan emisi karbon dioksida pembangkit.

$$C = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_g} (d_i P_{gi}^t) \right) \text{ Ton}/T \quad (2.5)$$

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

Oleh sebab itu, salah satu usaha untuk mengurangi emisi karbon dioksida adalah dengan teknologi *carbon capture plants*. Proses penangkapan (*capture*) dari sumber emisi gas buang. *Carbon capture plants* merupakan teknologi interim atau sementara untuk mengurangi emisi gas rumah kaca seperti karbon dioksida dari sumber stasioner seperti pembangkit listrik berbahan bakar fosil. Sistem penangkapan karbon ini merupakan salah satu bagian dari proses CCS (*carbon capture and storage*) yang dikembangkan untuk memasukan atau *inject* karbon dioksida atau *geological storage* menjadi karbonat organik. Proses penyimpanan ini dapat melalui kedalaman geologi seperti bekas pemakaian pengeboran minyak dan gas, *coal beds* atau dasar laut yang paling dalam (*ocean storage*).

Pemasangan *carbon capture plants* ini otomatis akan mengurangi daya keluaran generator yang dipasang sistem ini, karena sistem penangkapan karbon ini akan membebani generator. Jika disumsikan daya yang dikonsumsi oleh *carbon capture plants* adalah P_S dan daya yang diberikan ke sistem adalah P_G , maka daya yang dibangkitkan oleh generator dengan pemasangan *carbon capture plants* (P_E) pada persamaan 2-6 – 2.10. Pemasangan *carbon capture plants* akan mengkonsumsi daya dan dipengaruhi oleh jumlah karbon dioksida yang berhasil diserap dengan konsumsi daya tiap ton serapan.

$$P_E = P_G + P_S \quad (2.6)$$

Keterangan:

- P_E = Daya yang dibangkitkan oleh generator dengan pemasangan CCP
 P_G = Daya yang diberikan ke sistem
 P_S = Daya yang dikonsumsi CCP

Berikut adalah persamaan daya konsumsi pada pemasangan CCP (*carbon capture plants*).

$$C_E = d \times P_E \quad (2.7)$$

$$C_S = C_E \times n \quad (2.8)$$

$$P_S = \beta \times C_S \quad (2.9)$$

Keterangan:

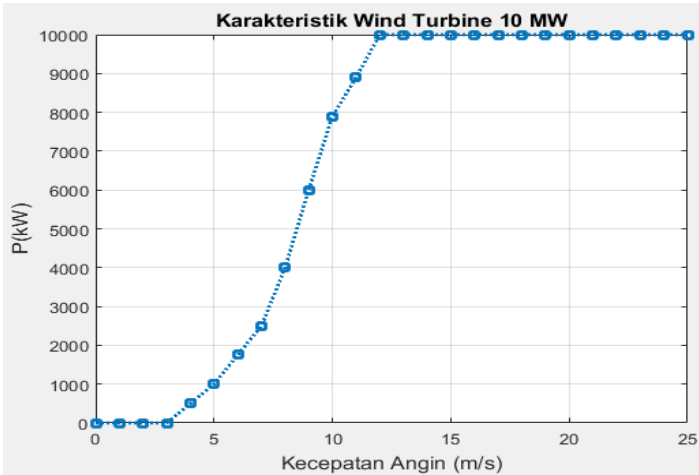
- C_E = Jumlah karbon dioksida yang dihasilkan pembangkit dengan pemasangan CCP
 C_S = Jumlah karbon dioksida yang diserap
 d = Koefisien karbon dioksida pembangkit
 n = Rate carbon yang dicapture
 β = Daya yang dikonsumsi CPP perton serapan

Dari persamaan diatas, daya pembangkitan generator dengan pemasangan CCP (P_E) dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$P_E = \frac{1}{1 - \beta n d} P_G \quad (2.10)$$

2.5 Penerapan Wind Turbine

Pada tugas akhir ini akan ditambahkan turbin angin untuk melihat pengaruhnya terhadap biaya pembangkitan dan emisi karbon dioksida yang dihasilkan. Jenis turbin angin yang digunakan adalah Sea Titan dengan jenis wt10000dd. Kurva daya dari turbin angin ini ada pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Kurva Daya Aktual dan Model wt10000dd

Dari kurva diatas, dapat diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$P_{wt} = 0 \quad V_{ac} < V_{ci} \quad (2.11)$$

$$P_{wt} = aV_{ac}^2 + bV_{ac} + c \quad V_{ci} \leq V_{ac} < V_r \quad (2.12)$$

$$P_{wt} = 10000 \quad V_r \leq V_{ac} < V_{co} \quad (2.13)$$

$$P_{wt,r} = J * P_{wt} \quad (2.14)$$

Keterangan :

P_{wt} = Daya keluaran dari turbin angin (W)

$P_{wt,r}$ = Rating daya (W)

J = Jumlah turbin angin yang terpasang

V_{ci} = Kecepatan *cut-in* (m/s)

V_{co} = Kecepatan *cut-out* (m/s)

V_r = Rating kecepatan angin (m/s)

V_{ac} = Kecepatan angin actual (m/s)

Untuk memodelkan performansi dari turbin angin, persamaan matematis dari kurva daya harus diperoleh. Berdasarkan kurva diatas didapatkan parameter-parameter turbin angin sebagai berikut :

$$\begin{aligned} a &= -29.3818681318682 \\ b &= 1234.39285714286 \\ c &= -2549.72527472529 \\ P_{wt, r} &= 10000 \\ V_{ci} &= 4 \\ V_{co} &= 30 \\ V_r &= 11.5 \end{aligned}$$

2.6 Algoritma Kunang-Kunang (*Firefly Algorithm*)

Algoritma kunang-kunang (*nature inspired metaheuristic algorithm*) adalah algoritma komputasi yang terinspirasi dari oleh perilaku alami berkedip kunang-kunang. Proses berkedip dari kunang-kunang ini merupakan hasil dari proses *bioluminescence*. Fungsi dasar dari perilaku berkedip kunang-kunang untuk menarik perhatian atau cara berkomunikasi pada pasangan kawin mereka, namun juga menarik calon mangsa. Pada umumnya kunang – kunang betina akan menanggapi pola yang unik dari kunang-kunang jantan dalam satu species yang sama. Sebagian besar kunang-kunang di daerah tropis dapat menyamakan kedipan mereka, sehingga akan terbentuk tingkah laku biologis dari species mereka. Pada algoritma kunag-kunang diketahui bahwa intensitas cahaya (i) akan menurun jika jarak (r) juga meningkat. Selanjutnya udara yang ada juga akan menyerap cahaya yang akan menjadikan cahaya semakin lemah diiringi dengan meningkatnya jarak.

Kedua faktor tersebut yang membuat kunang-kunang memiliki jarak batas terlihat, biasanya hanya beberapa meter di malam hari yang cukup baik bagi kunang – kunang untuk berkomunikasi. Algoritma kunang-kunang ini memiliki tiga buah peraturan dasar sebagai berikut :

1. Semua kunang - kunang berjenis kelamin satu sehingga seekor kunang - kunang akan tertarik pada kunang- kunang lain terlepas dari jenis kelamin.
2. Daya tarik sebanding dengan tingkat kecerahan cahaya kedip kunang-kunang. Oleh karena itu, untuk setiap dua kunang-kunang berkedip, satu diantara mereka akan bergerak menuju

kunang-kunang lain yang lebih terang. Kecerahan mereka menurun karena jarak antara kunang-kunang meningkat. Jika tidak ada yang paling terang dari populasi tersebut, semua kunang-kunang akan bergerak secara acak.

3. Kecerahan atau intensitas cahaya dari seekor kunang-kunang dipengaruhi atau ditentukan oleh fungsi objektif.

Salah satu aplikasi *Firefly Algorithm* adalah pada permasalahan optimasi, yaitu mendapatkan nilai solusi optimal. Dalam proses penyelesaian masalah, kecerahan cahaya kunang-kunang adalah sebanding untuk nilai dari fungsi tujuan. Bentuk lain dari kecerahan dapat didefinisikan pada cara yang sama untuk fungsi fitness pada algoritma genetic. Berdasarkan pada *rule* diatas, langkah dasar dari algoritma kunang-kunang dapat dijelaskan pada *pseudo code* sebagai berikut ini :

Fungsi objektif $f(x)$, $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_d)^T$
 Inisialisasi populasi kunang-kunang x_i ($i = 1, 2, \dots, n$)
 Intensitas cahaya I_i dimana x_i ditentukan oleh $f(x_i)$
 Tentukan koefisien penyerapan cahaya γ

while ($t < \text{Max Generation}$)

for $i = 1 : n$ semua n kunang-kunang

for $j = 1 : i$ semua n kunang-kunang

 Intensitas cahaya pada I_j pada x_j ditentukan oleh $f(x_j)$

if ($I_j > I_i$)

 Pindahkan kunang-kunang i menuju j pada dimensi d

end if

 Ketertarikan populasi dengan jarak r pada $\exp [-\gamma r]$

 Evaluasi solusi baru dan perbarui intensitas cahaya

end for j

end for i

Urutkan peringkat kunang-kunang dan cari posisi terbaik baru

end while

Tampilkan hasil

2.6.1 Intensitas Cahaya dan Keatraktifan *Firefly*

Pada algoritma kunang-kunang, ada dua hal penting yang harus diperhatikan, yaitu variasi intensitas cahaya dan formulasi daya tarik kunang-kunang.

Dapat diasumsikan bahwa daya Tarik dari seekor kunang-kunang ditentukan oleh intensitas kecerahan yang bergantung pada formulasi fungsi tujuan. Pada contoh kasus, untuk masalah optimisasi maksimum, kecerahan i dari seekor kunang-kunang pada sebuah lokasi x tertentu dapat di formulasikan sebagai :

$$I(x) = f(x) \quad (2.15)$$

Nilai I merupakan tingkat intensitas cahaya pada x kunang-kunang yang sebanding dengan solusi dari fungsi objective permasalahan yang akan dicari $f(x)$.

Sedangkan untuk keatraktifan (β) memiliki nilai yang relatif, karena pada dasarnya intensitas cahaya yang harus dilihat dan dinilai oleh kunang-kunang lainnya. Sehingga, hasil penilaian akan berbeda tergantung dari jarak antara kunang-kunang satu dengan lainnya (r_{ij}). Selain itu ada faktor media salah satunya adalah udara (γ) yang akan mempengaruhi intensitas cahaya. Intensitas cahaya akan menurun dilihat dari sumbernya, karena akan terserap oleh udara, berikut adalah fungsi keatraktifan *firefly* :

$$B(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^m}, m \geq 1 \quad (2.16)$$

Adapun daya Tarik β adalah relative, itu dapat diperoleh dari penglihatan kunang-kunang lain. Daya Tarik akan bervariasi dengan jarak r_{ij} antara kunang-kunang i dengan kunang-kunang j . Selain itu, intensitas cahaya akan menurun seiring peningkatan jarak kunang-kunang dari sumber cahaya, selain itu cahaya juga akan diserap oleh lingkungan sekitar. Jadi kita dapat memvariasikan daya tarik terhadap derajat dari penyerapan γ .

Parameter γ memberikan ciri variasi daya tarik dan nilai γ sangat penting pada penentuan kecepatan konvergensi dan bagaimana perilaku algoritma *firefly algorithm*. Istilah selanjutnya adalah pengacakan dengan α sebagai parameter pengacakan dan ϵ_1 adalah sebuah vector dari nilai-nilai acak. Sebagai contoh bentuk paling sederhana dari ϵ_1

dapat dihasilkan dari random yang merupakan generator angka acak antara nilai 0 - 1.

2.6.2 Jarak Antara *Firefly*

Jarak antara dua kunang-kunang *i* dan *j* pada lokasi x_i dan x_j ditentukan pada saat peletakan titik dimana *firefly* tersebut disebar secara random dalam diagram Cartesian dengan persamaan sebagai berikut :

$$rij = \| x_i - x_j \| = \sqrt{(\sum_{k=1}^d (X_{i,k} - X_{j,k})^2)} \quad (2.17)$$

$$rij = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2.18)$$

Dimana selisih dari koordinat lokasi kunang-kunang *i* terhadap kunang-kunang *j* merupakan jarak diantara keduanya *rij*.

2.6.3 Pergerakan *Firefly*

Pergerakan kunang-kunang *i* akan bergerak menuju tingkat intensitas cahaya yang terbaik, dengan persamaan sebagai berikut :

$$x_i = x_j + \beta_0 e^{-\gamma_{ij}} (x_j^t - x_i^t) + \alpha \epsilon^t_i \quad (2.19)$$

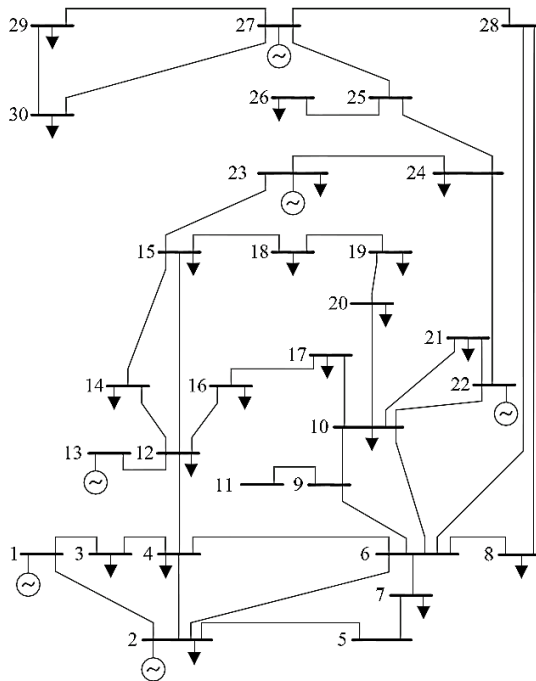
Pada persamaan diatas variable α adalah parameter pergerakan kunang-kunang secara acak yang menunjukkan adanya bilangan acak yang berkisar antara 0-1. Variabel awal x_i adalah menunjukkan posisi awal kunang-kunang pada lokasi x . Variabel $\beta_0 = 1$ merupakan nilai keaktratikfan awal pada kunang-kunang yang menentukan tingkat kecerahan, variabel *rij* merupakan selisih jarak awal antara kunang-kunang *i* dan *j*. Persamaan $x_j^t - x_i^t$ terdiri dari selisih nilai solusi pada kunang-kunang *i* terhadap kunang-kunang *j*. Variable $\gamma = 1.0$ merupakan nilai penyerapan pada lingkungan disekitar kunang-kunang, misalnya adalah udara.

BAB 3

ECONOMIC DISPATCH DENGAN MEMPERTIMBAGKAN CARBON CAPTURE PLANTS MENGGUNAKAN FIREFLY ALGORITHM

3.1 SISTEM IEEE 30 BUS

Pada tugas akhir ini, akan menggunakan uji sistem kelistrikan pembangkit IEEE 30 bus dengan penambahan pemasangan CCP (*carbon capture plants*) pada generator 1 beban dinamik dan penambahan turbin angin. Data-data pembangkit yang digunakan seperti batasan kemampuan pembangkit, fungsi biaya pembangkitan, fungsi emisi karbon dioksida (CO₂), data dari *carbon capture plants* dan data WT (*wind turbine*). Gambar 3.1 berikut adalah *single line diagram* IEEE 30 bus yang digunakan.



Gambar 3.1 Sistem IEEE 30 Bus

Data-data pembangkit yang digunakan seperti batasan kemampuan pembangkit, fungsi biaya pembangkitan, fungsi emisi karbon dioksida, beban dinamik, data dari *carbon capture plants* dan data *wind turbine* tersedia pada Tabel 3.1 – 3.5.

Tabel 3.1 Data 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 3.2 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 3.3 Fungsi Emisi CO2 Pembangkit Sistem IEEE 30 Bus

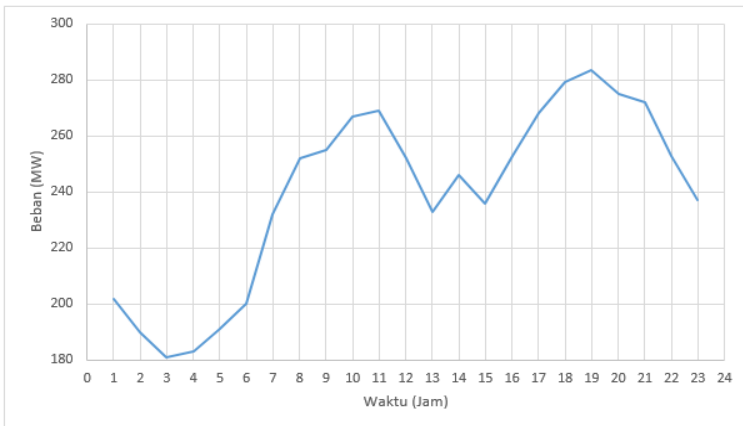
Pembangkit	Fungsi Emisi CO2 (Ton/Jam)
	d
1	1,186
2	1,186
3	1,186
4	0,434
5	0,434
6	0,78

Tabel 3.4 Data Plan *Carbon Capture Plants* (CCP)

Pemasangan	β (MW/Ton)	n (%)
Generator 1	0,23	85

Tabel 3.5 Beban Sistem IEEE 30 Bus

Jam	Total Beban (MW)	Jam	Total Beban (MW)
1	202	13	233
2	190	14	246
3	181	15	236
4	183	16	253
5	191	17	268
6	200	18	279
7	232	19	283,4
8	252	20	275
9	255	21	272
10	267	22	253
11	269	23	237
12	252	24	225



Gambar 3.2 Grafik Beban Dinamik

3.1.1 Fungsi Biaya

Karakteristik masing-masing generator yang beroperasi pada pembangkit sistem tenaga listrik Tabel 3.2 dapat dijabarkan dengan menggunakan persamaan fungsi biaya dalam satuan \$/h dengan daya yang dibangkitkan P_i dalam satuan MW dari masing-masing generator adalah sebagai berikut :

Fungsi biaya data 30 bus 6 generator :

$$F_1(P_1) = 0.00375 P_1^2 + 2P_1 + 0 \quad (3.1)$$

$$F_2(P_2) = 0.0175 P_2^2 + 1.75 P_2 + 0 \quad (3.2)$$

$$F_3(P_3) = 0.0625 P_3^2 + 1 P_3 + 0 \quad (3.3)$$

$$F_4(P_4) = 0.0083 P_4^2 + 3.25 P_4 + 0 \quad (3.4)$$

$$F_5(P) = 0.025 P_5^2 + 3 P_5 + 0 \quad (3.5)$$

$$F_6(P_6) = 0.025 P_5^2 + 3 P_5 + 0 \quad (3.6)$$

3.1.2 Kapasitas Pembangkit

Untuk kesetabilan operasional, daya aktif masing-masing pembangkit dibatasi oleh batasan atas pembangkitan dan batasan bawah pembangkitan :

Batas masing-masing generator data 30 bus 6 generator :

$$50 \text{ MW} \leq P_1 \leq 200 \text{ MW} \quad (3.7)$$

$$20 \text{ MW} \leq P_2 \leq 80 \text{ MW} \quad (3.8)$$

$$15 \text{ MW} \leq P_3 \leq 50 \text{ MW} \quad (3.9)$$

$$10 \text{ MW} \leq P_1 \leq 35 \text{ MW} \quad (3.10)$$

$$10 \text{ MW} \leq P_2 \leq 30 \text{ MW} \quad (3.11)$$

$$12 \text{ MW} \leq P_3 \leq 40 \text{ MW} \quad (3.12)$$

Persamaan dari masing-masing fungsi *economic dispatch* diatas yang merupakan karakteristik dari masing-masing unit pembangkit. Pengoperasian masing-masing unit pembangkit pada sistem tenaga listrik mempunyai batas operasi maksimal dan batas operasi minimal sesuai persamaan diatas.

3.1.3 Keseimbangan Daya

Daya total pembangkitan harus sesuai dengan daya total beban ditambah daya *carbon capture plants*, persamaannya sebagai berikut :

$$\Sigma P_i = P_D + P_s \quad (3.13)$$

Keterangan :

P_i = Daya keluaran pembangkit (MW)

P_D = Daya permintaan konsumen / total beban (MW)

3.1.4 Ramp Rate

Daya pembangkitan tidak boleh melebihi batas dari ramp limit dari masing masing generator.

Ketika pembangkitannya naik maka batasan *ramp up* dari pembangkit :

$$P_{i,t} - p_{i,t-1} \leq \text{ramp up} \quad (3.14)$$

Ketika pembangkitannya turun maka batasan *ramp down* dari pembangkit :

$$P_{i,t} - p_{i,t-1} \leq \text{ramp down} \quad (3.15)$$

Dengan adanya *ramp constraint* maka *capacity constraint* untuk pembangkitan diatas jam 1 akan berubah menjadi :

$$\max(P_i \text{ min}, P_{i,t-1} - \text{ramp down}) \leq P_{i,t} \leq \min(P_i \text{ max}, P_{i,t-1} + \text{ramp up}) \quad (3.16)$$

Keterangan :

$$P_i \text{ min} = \max(P_i \text{ min}, P_{i,t-1} - \text{ramp down}) \quad (3.17)$$

$$P_i \text{ max} = \min(P_i \text{ max}, P_{i,t-1} + \text{ramp up}) \quad (3.18)$$

3.2 Weight Sum Method

Multiobjective 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 *multiobjective optimization*.

Weight sum method merupakan metode yang menggabungkan beberapa fungsi objektif menjadi satu kesatuan fungsi tujuan, dengan cara perkalian masing-masing fungsi objektif dengan koefisien *weight*. Nilai *weight* dari masing-masing fungsi objektif merupakan nilai yang ditemukan dari proporsi relatif dari masing-masing fungsi objektif.

Metode ini sering kali digunakan karena kesederhanaan dan efisiensi dalam komputasi. Persamaan umum *weighted sum method* pada persamaan berikut.

$$f = w_c \cdot f_{ct} + w_t \cdot f_{ct} + \dots + w_n f_n \quad (3.19)$$

keterangan,

<i>fitness</i>	=	Fungsi tujuan
w_c	=	Bobot (<i>weight</i>) fungsi tujuan 1
f_{ct}	=	Fungsi tujuan 1
w_t	=	Bobot (<i>weight</i>) fungsi tujuan 2
f_{et}	=	Fungsi tujuan 2
w_n	=	Bobot (<i>weight</i>) fungsi tujuan ke-n
f_n	=	Fungsi tujuan ke-n

Pada tugas akhir ini menggunakan dua fungsi tujuan dalam proses penambahan sistem *carbon capture plants* pada uji pembangkit. Dalam hal ini, kita dapat melakukan pembobotan (*weight*) terhadap tujuan sebagai proses untuk meminimalkan biaya bahan bakar atau pembobotan dalam proses meminimalkan emisi karbon dioksida. Berikut adalah persamaan *multiobjective* yang digunakan.

$$\min (f) = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 \quad (3.20)$$

keterangan,

f	=	Fungsi tujuan
w_1	=	Bobot (<i>weight</i>) fungsi biaya pembangkitan
f_b	=	Fungsi tujuan biaya pembangkitan dalam sistem
w_2	=	Bobot (<i>weight</i>) fungsi emisi karbon dioksida
f_c	=	Fungsi tujuan emisi karbon dioksida

Nilai *weight* suatu tujuan yang lebih besar dari nilai *weight* tujuan yang lain menunjukkan bahwa secara relatif kita lebih memprioritaskan tujuan tersebut dari tujuan lain.

3.3 Pemasangan CCP (*Carbon Capture Plants*)

Pada tugas akhir ini, akan dipasang *carbon capture plants* yang akan menggunakan konsumsi energi yang dibebankan pada pembangkit yang dipasang oleh *carbon capture plants* atau untuk menangkap karbon dioksida, sehingga akan menyebabkan daya keluaran generator pada sistem akan mengalami pengurangan sekaligus emisi yang dihasilkan berupa emisi karbon dioksida pembangkit kan mengalami pengurangan. Data pemasangan *carbon capture plants* adalah sebagai berikut :

Pemasangan pada unit 1

$$n = 85\%$$

$$\beta = 0,23 \text{ MW/Ton}$$

Keterangan :

n = Rate carbon yang ditangkap (%)

β = Daya yang di bebankan pada pembangkit (MW/Ton)

Berikut adalah persamaan daya yang harus dipenuhi (*equality-constraints*) dan persamaan emisi yang dihasilkan pembangkit ketika dipasang plan *carbon capture plants* pada pembangkit unit 1 .

$$\sum_{t=1}^T [P_E^t + \sum_{i=2}^{N_g} P_{gi}^t] = \sum_{t=1}^T [P_D^t + P_S^t] \quad (3.21)$$

$$C = \sum_{t=1}^T [((1 - n)d_1 P_E^t) + (\sum_{i=2}^{N_g} (d_i P_{gi}^t))] \quad (3.22)$$

Keterangan,

P_E = Daya yang dibangkitkan pembangkit unit 1 dengan pemasangan plan CCP (*carbon capture plants*)

P_{gi} = Daya yang dibangkitkan setiap unit pembangkit dengan pemasangan plan CCP (*carbon capture plants*)

P_D = Total beban sistem

P_S = Daya yang diserap plan CCP (*carbon capture plants*)

C = Fungsi karbon dioksida yang dihasilkan pembangkitan

d_i = Koefisien karbon dioksida setiap unit pembangkit

n = Rate carbon yang dicaprute (0,85)

t = Periode waktu pembangkitan ke-t

N_g = Total pembangkit

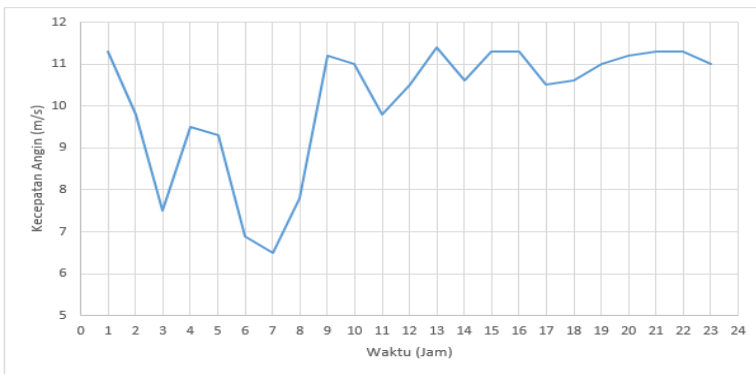
T = Total periode waktu pembangkitan

3.4 Data Turbin Angin (*Wind Turbine*)

Pada tugas akhir ini akan menggunakan turbin angin *Sea Titan* 10 MW berjumlah 5 unit. Dalam pembangkitan daya pada turbin angin, sangat berpengaruh terhadap kecepatan angin dan kurva daya yang dimiliki turbin angin tersebut. Data kecepatan angin ini mengikuti referensi data kecepatan angin di *Kahperusvaarat*, Laponia (Finland). Daya yang dihasilkan turbin angin *Sea Titan* 10 MW selama 24 jam tersedia pada Tabel. 3.6.

Tabel 3.6 Data Kecepatan Angin

Jam - ke	Kecepatan Angin (m/s)	Daya (MW)	Jam - ke	Kecepatan Angin (m/s)	Daya (MW)
1	11.3	7.65	13	11.4	7.70
2	9.8	6.73	14	10.6	7.23
3	7.5	5.06	15	11.3	7.65
4	9.5	6.53	16	11.3	7.65
5	9.3	6.39	17	10.5	7.17
6	6.9	4.57	18	10.6	7.23
7	6.5	4.23	19	11	7.47
8	7.8	5.29	20	11	7.59
9	11.2	7.59	21	11.2	7.65
10	11	7.47	22	11.3	7.65
11	9.8	6.73	23	11.3	7.65
12	10.5	7.17	24	11	7.47

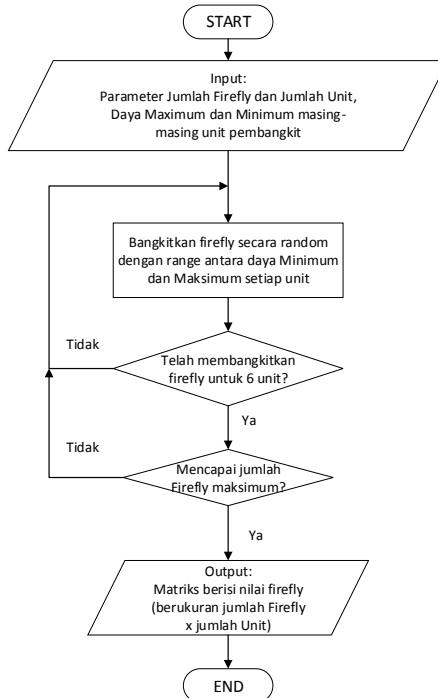


Gambar 3.3 Grafik Kecepatan Angin Dinamik

3.5 Penerapan *Firefly Algorithm*

Dalam bagian ini digunakan metode penyelesaian menggunakan *firefly algorithm* untuk mencari nilai *fitness* minimum dari 2 fungsi tujuan yaitu biaya pembangkitan dan emisi karbon dioksida dengan memperhatikan batasan-batasan yang digunakan. Berikut ini adalah penjelasan dari mekanisme metode *firefly algorithm* untuk menyelesaikan permasalahan *economic dispatch* dengan mempertimbangkan *carbon capture plants* dan efek dari pemasangan turbin angin (*wind turbine*) beserta penjelasannya. Diagram alir dari proses dengan metode *firefly algorithm* ada pada Gambar 3.6.

3.5.1 Inisialisasi Awal *Firefly*



Gambar 3.4 Proses Inisialisasi Awal Populasi

Pada proses inialisasi, pertama yang akan dilakukan adalah memuat system yang akan dioptimisasi. Pada tugas akhir ini mengusulkan system uji IEEE 30 bus dengan 6 generator. Data yang digunakan mengacu pada system yang diujikan pada paper yang disamakan agar memperoleh hasil biaya pembangkitan optimal.

Inialisasi populasi *firefly* dibangkitkan secara acak diantara batas atas dan batas bawah yang diijinkan. Fungsi objektif dari tugas akhir ini adalah mencari nilai *fitness* minimum dari dua buah fungsi tujuan yaitu biaya pembangkitan dan emisi karbon dioksida.

Pada permasalahan *economic dispatch* yang sederhana, populasi yang diangkatkan memiliki variable daya aktif (P). Cahaya dari setiap kunang-kunang yang disebar secara acak pada tugas akhir ini mewakili nilai *fitness* dari *firefly* yang dibangkitkan. Proses inialisasi pembuatan kunang-kunang sesuai dengan batasan bawah dan batas atas yang diberikan pada persamaan 3.23 - 3.25.

$$P_{ij}^k = P_{ij}^k, \min \quad (3.23)$$

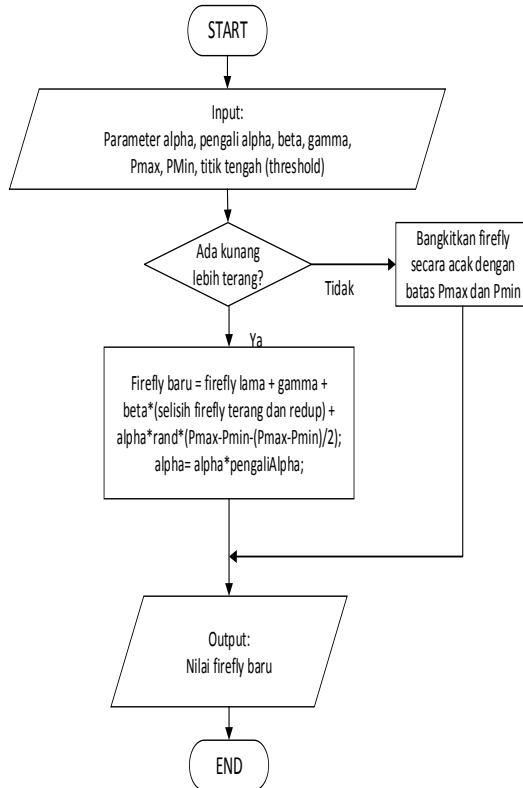
$$P_{ij}^k, \max \quad (3.24)$$

$$if P_{ij}^k, \min \leq x \leq P_{ij}^k, \max \quad (3.25)$$

Metode ini akan menghasilkan kunang-kunang yang memiliki wilayah yang memenuhi *equality constrain* dan *inequality constrain*.

3.5.2 Pergerakan *Firefly*

Setelah memperoleh nilai *fitness* atau total biaya pembangkitan, maka dilakukan perangkingan posisi kunang-kunang berdasarkan hasil fungsi objektif yang merupakan biaya pembangkitan total paling ekonomis. Nilai *fitness* yang paling kecil mewakili kunang – kunang yang memiliki nilai kedip cahaya paling terang. Dengan kunang – kunang yang memiliki kedip cahaya paling terang melambangkan kandidat solusi yang memiliki biaya total pembangkitan paling ekonomis. Diagram alir proses update nilai fitness pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Proses Update Nilai Fitness

Sesuai dengan aturan dari algoritma kunang-kunang atau *firefly algorithm* yang dikembangkan oleh Xin She Yang, kunang dengan kedip cahaya paling terang akan menarik kunang-kunang lain. Kemudian semua kunang-kunang akan digerakan menuju kunang-kunang yang mempunyai kedip cahaya paling terang atau memiliki hasil fungsi objektif yang paling kecil. Secara sederhana, intensitas cahaya kunang – kunang dirumuskan pada persamaan 3.26 – 3.30.

$$I(r) = \frac{Is}{r^2} \quad (3.26)$$

I_s adalah intensitas pada sumber, yaitu intensitas cahaya kunang-kunang yang paling terang. Untuk mencegah kunang-kunang terjebak dalam nilai optimum lokal, maka digunakan koefisien penyerapan cahaya atau *light absorption* (γ) pada persamaan $I(r)$.

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r} \quad (3.27)$$

Pada kunang-kunang yang berdekatan maka akan timbul daya tarik menarik yang dilambangkan dengan β yang dirumuskan pada persamaan berikut ini :

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (3.28)$$

β_0 adalah daya tarik pada $r = 0$, daya Tarik ini akan membuat kunang-kunang untuk bergerak menuju kunang – kunang yang memiliki intensitas cahaya paling terang. Persamaan jarak antara dua kunang-kunang dapat dirumuskan pada persamaan berikut :

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3.29)$$

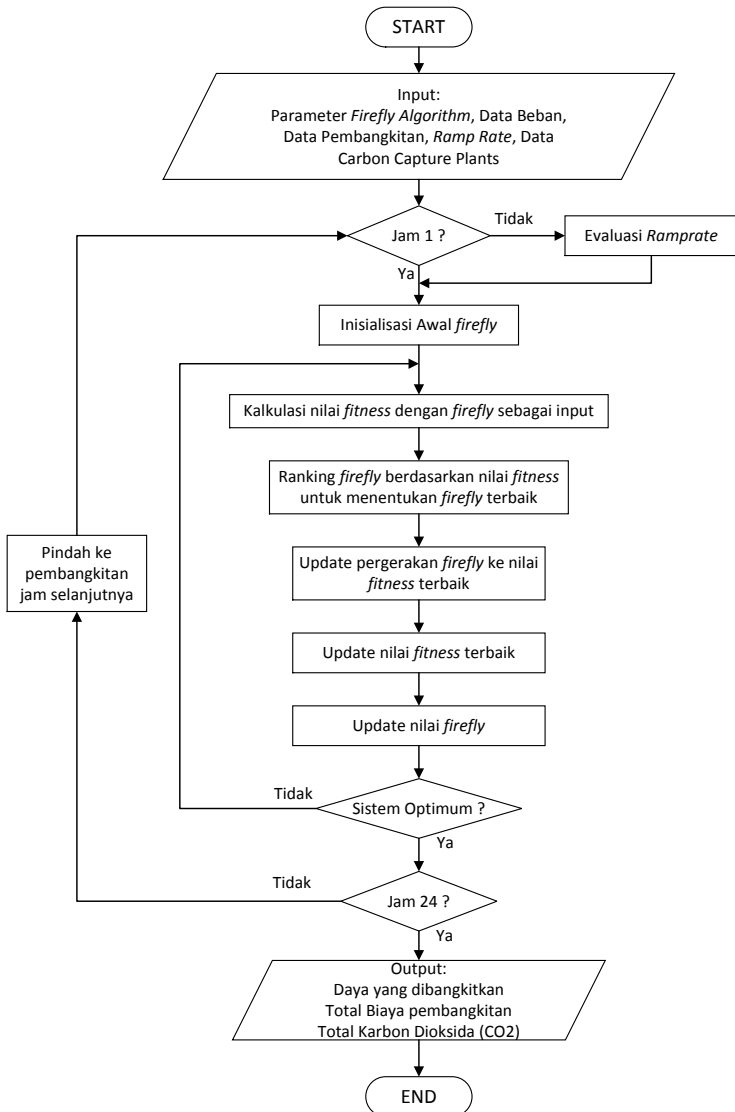
Sehingga pergerakan sebuah kunang-kunang i yang tertarik dengan kunang-kunang lain yang lebih terang ditentukan pada persamaan berikut :

$$x_i = x_{i+} + \beta_0 * \exp(-\gamma r_{ij}^2) * (x_j - x_i) + \alpha * (\text{rand} - \frac{1}{2}) \quad (3.30)$$

α adalah parameter acak dan rand adalah sebuah nilai acak yang diambil dan dibangkitkan seragam dengan nilai antara 0 sampai 1.

Keterangan :

- r = Jarak kunang-kunang
- r_{ij} = Jarak antara kunang-kunang i dan j
- α = Koefisien random / acak
- $\beta(r)$ = Koefisien pergerakan kunang-kunang
- β_0 = Koefisien pergerakan kunang-kunang pada $r = 0$
- γ = Koefisien penyerapan cahaya
- x_i = Koordinasi kunang-kunang ke i
- x_j = Koordinasi kunang-kunang ke j



Gambar 3.6 Diagram Alir *Firefly Algorithm*

[halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab ini akan diperlihatkan perhitungan ED (*economic dispatch*) dengan mempertimbangkan CCP (*carbon capture plants*) menggunakan FA (*firefly algorithm*). Hasil perhitungan yang akan diberikan berupa tabel data hasil dari simulasi meliputi daya keluaran pembangkitan, daya yang dibutuhkan *carbon capture plants*, emisi karbon dioksida, dan juga biaya total pembangkitan. Hasil dari simulasi ini akan memberikan perbandingan dari dampak pemasangan *carbon capture plants* dan turbin angin terhadap daya total pembangkitan, biaya pembangkitan dan emisi karbon yang di hasilkan dengan menggunakan metode *firefly algorithm*. Dalam tugas akhir ini, data yang diberikan berupa asumsi dari refrensi jurnal yang digunakan sebagai dasar pengambilan data.

4.1 Data Spesifikasi CPU

Model : HP Pavilion 14 – V040TX
Processor : Intel ® Core™ i5-4210U
Speed Processing : 1.7 GHz
Installed Memory (RAM) : 4 GB 1600 MHz DDR3L
System Type : 64-bit Operating System Windows 7

4.2 Validasi Program *Firefly Algorithm* dengan Menggunakan Refrensi Allan J. Wood

Program optimasi yang telah dibuat dalam proses pengerjaan tugas akhir ini melewati proses validasi yaitu dengan menggunakan contoh permasalahan *economic dispatch example 3A* pada buku Allan J. Wood untuk kemudian hasil optimasi menggunakan iterasi lambda yang sudah diberikan pada refrensi tersebut akan dibandingkan dengan metode yang akan digunakan yaitu *firefly algorithm*.

Tabel 4.1 Data Pembangkit *Example 3A*

Pembangkit	Daya (MW)	
	Minimum	Maksimum
1	150	600
2	100	400
3	50	200

Fungsi biaya untuk setiap unit pembangkit yang digunakan pada kasus ini adalah :

$$F_1(P_1) = (561 + 7.92 P_1 + 0.001562 P_1^2)$$

$$F_2(P_2) = (310 + 7.85 P_1 + 0.00194 P_1^2)$$

$$F_3(P_3) = (78 + 7.97 P_1 + 0.00482 P_1^2)$$

Beban yang di gunakan dalam *example 3A* ini sebesar 850 MW. Sesuai dengan contoh buku Allan J. Wood dengan iterasi lambda, daya yang di bangkitkan setiap unit pembangkit adalah sebagai berikut :

$$\text{Pembangkit 1} = 392.2 \text{ MW}$$

$$\text{Pembangkit 2} = 334.6 \text{ MW}$$

$$\text{Pembangkit 3} = 122.2 \text{ MW}$$

Nilai daya hasil pembangkitan tiap pembangkit ini kemudian dimasukan dalam fungsi biaya masing-masing pembangkit maka akan didapatkan biaya operasi total dari setiap pembangkit sebagai berikut :

$$F_1(392.2) = (561 + 7.92 * 392.2 + 0.001562 * 392.2^2) \text{ \$/h}$$

$$= 3916.6389 \text{ \$/h}$$

$$F_2(334.6) = (310 + 7.85 * 334.6 + 0.00194 * 334.6^2) \text{ \$/h}$$

$$= 3135.8068 \text{ \$/h}$$

$$F_3(122.2) = (78 + 7.97 * 122.2 + 0.00482 * 122.2^2) \text{ \$/h}$$

$$= 1123.9102 \text{ \$/h}$$

Sehingga biaya total dari ketiga pembangkit sebesar 8194.3561 \\$/h. Sedangkan jika menggunakan metode *firefly algorithm* didapatkan nilai daya keluaran yang dibangkitkan setiap unit pembangkit adalah sebagai berikut :

$$\text{Pembangkit 1} = 393.2345 \text{ MW}$$

$$\text{Pembangkit 2} = 334.4159 \text{ MW}$$

$$\text{Pembangkit 3} = 122.1481 \text{ MW}$$

Nilai daya hasil pembangkitan tiap pembangkit ini kemudian dimasukan dalam fungsi biaya masing-masing pembangkit maka akan didapatkan biaya operasi total dari setiap pembangkit adalah sebagai berikut :

$$F_1(393.2345) = (561 + 7.92 * 393.2345 + 0.001562 * 393.2345^2) \text{ \$/h}$$

$$= 3916.3630 \text{ \$/h}$$

$$F_2(334.4159) = (310 + 7.85 * 334.4159 + 0.00194 * 334.4159^2) \text{ \$/h}$$

$$= 3135.8412 \text{ \$/h}$$

$$F_3(122.1481) = (78 + 7.97 * 122.1481 + 0.00482 * 122.1481^2) \$/h$$

$$= 1124.1519 \$/h$$

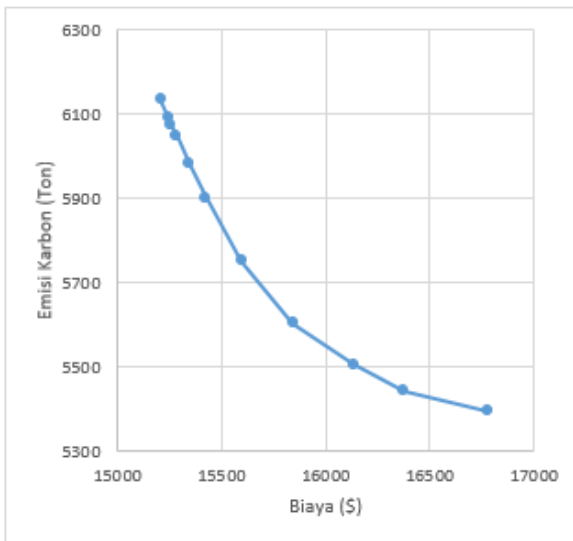
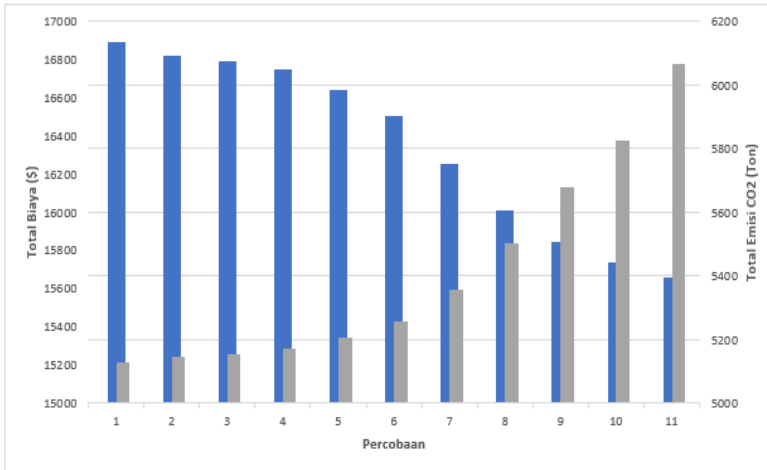
Total biaya dari ketiga pembangkit sebesar 8194.3563 \$/h. Penerapan metode *firefly algorithm* pada permasalahan *economic dispatch example 3A* buku Allan J. Wood, jika dibandingkan hasilnya dengan contoh permasalahan *example 3A* menggunakan iterasi *lambda* yang sudah diberikan pada buku, menunjukkan perbedaan hasil total biaya operasi dari ketiga unit pembangkit yang tidak signifikan. Dapat disimpulkan bahwa metode *firefly algorithm* yang akan digunakan pada penelitian ini dapat digunakan dalam permasalahan *economic dispatch*.

4.3 *Economic Dispatch Mempertimbangkan Carbon Capture Plants Menggunakan Firefly Algorithm*

Dalam pengujian dan pengambilan data tugas akhir ini akan dibagi menjadi dua contoh studi kasus utama yaitu studi kasus 1 *economic dispatch* tanpa mempertimbangkan pemasangan *carbon capture plants*, studi kasus 2 *economic dispatch* dengan mempertimbangkan pemasangan *carbon capture plants*. Selanjutnya akan dilakukan juga pengujian dengan menambahkan *wind turbine* pada masing – masing kasus utama yaitu studi kasus 3 dan 4. Pada kasus utama akan dilakukan 11 pembobotan yang berbeda - beda. Hasil percobaan kasus 1 dan 2 akan ditunjukkan pada Tabel 4.2 – 4.3.

Tabel 4.2 Hasil Studi Kasus 1 Tanpa CCP

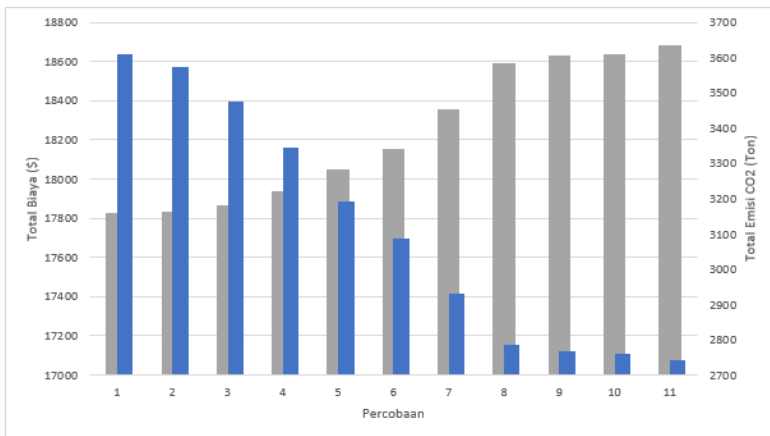
Percobaan	Bobot 1 (Biaya)	Bobot 2 (Emisi Karbon)	Total Biaya (\$)	Total Emisi CO ₂ (Ton)
1	1.0	0.0	15210.65	6135.51
2	0.9	0.1	15245.42	6094.19
3	0.8	0.2	15255.92	6072.99
4	0.7	0.3	15283.30	6050.81
5	0.6	0.4	15345.65	5983.47
6	0.5	0.5	15425.24	5902.97
7	0.4	0.6	15594.24	5752.19
8	0.3	0.7	15841.04	5604.36
9	0.2	0.8	16132.13	5505.56
10	0.1	0.9	16375.16	5442.43
11	0.0	1.0	16779.02	5395.76



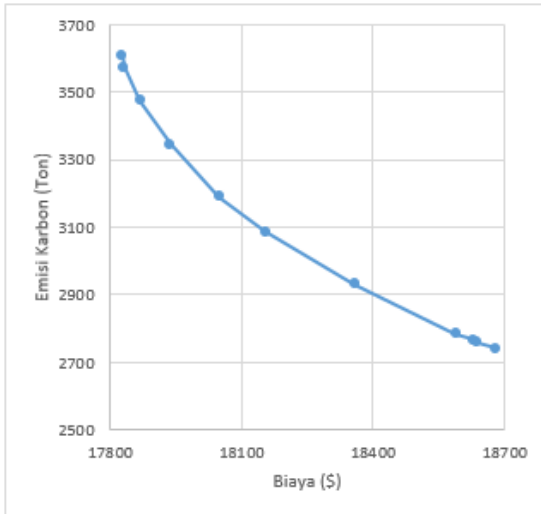
Gambar 4.2 Kurva Biaya dan Emisi CO₂ Tanpa CCP

Tabel 4.3 Hasil Studi Kasus 2 Dengan CCP

Percobaan	Bobot 1 (Biaya)	Bobot 2 (Emisi Karbon)	Total Biaya (\$)	Total Emisi CO ₂ (Ton)
1	1.0	0.0	17827.84	3609.57
2	0.9	0.1	17831.72	3573.62
3	0.8	0.2	17868.27	3473.96
4	0.7	0.3	17937.40	3345.76
5	0.6	0.4	18049.83	3191.59
6	0.5	0.5	18153.71	3086.49
7	0.4	0.6	18357.77	2931.92
8	0.3	0.7	18588.40	2784.34
9	0.2	0.8	18630.26	2766.29
10	0.1	0.9	18638.74	2759.80
11	0.0	1.0	18680.81	2741.18



Gambar 4.3 Diagram Biaya dan Emisi CO₂ Dengan CCP



Gambar 4.4 Kurva Biaya dan Emisi CO₂ Dengan CCP

Berdasarkan data hasil percobaan Tabel 4.2 – 4.3 diatas, pada sistem uji pembangkit IEEE 30 bus jika ditambah dengan pemasangan *carbon capture plants* akan menaikkan biaya pembangkitan total, tapi jumlah emisi karbon dioksida yang di hasilkan pembangkit berkurang dibandingkan jika tanpa pemasangan *carbon capture plants*.

Dalam hal ini variasi pembobotan akan sangat berpengaruh terhadap biaya pembangkitan dan emisi karbon yang dihasilkan. Semakin besar nilai bobot yang digunakan pada pembobotan biaya pembangkitan dan emisi karbon dioksida maka akan semakin kecil biaya pembangkitan atau semakin kecil nilai emisi karbon dioksida yang dihasilkan. Sebaliknya untuk nilai bobot yang digunakan semakin kecil pada pembobotan biaya pembangkitan atau emisi karbon dioksida, maka akan semakin besar biaya pembangkitan atau semakin besar nilai emisi karbon dioksida yang dihasilkan.

Berikut ini akan diberikan beberapa data hasil simulasi dan analisa tiap studi kasus dalam percobaan, berupa daya pembangkitan generator tiap jam, batas *ramp rate*, perubahan beban tiap jam dan emisi karbon dioksida yang dihasilkan. Data diatas kemudian dianalisa, apakah sesuai dan sudah memenuhi batasan-batasan yang digunakan.

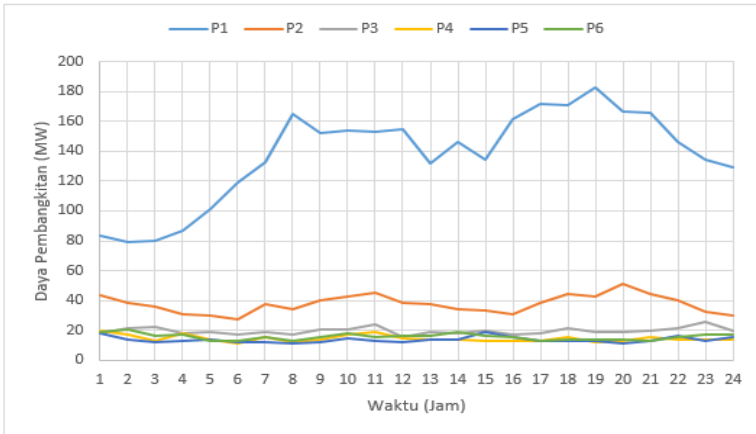
4.4 Studi Kasus 1 : Tanpa CCP Percobaan 1

Pada studi kasus 1 percobaan 1 memperlihatkan hasil *economic dispatch* dengan metode *firefly algorithm* tanpa pemasangan *carbon capture plants*. Bobot yang digunakan bobotBiaya = 1 untuk biaya pembangkitan dan bobotCarbon = 0 untuk emisi karbon dioksida. Daya pembangkitan generator, beban dan karbon ada pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Daya Pembangkitan Generator, Beban dan Karbon

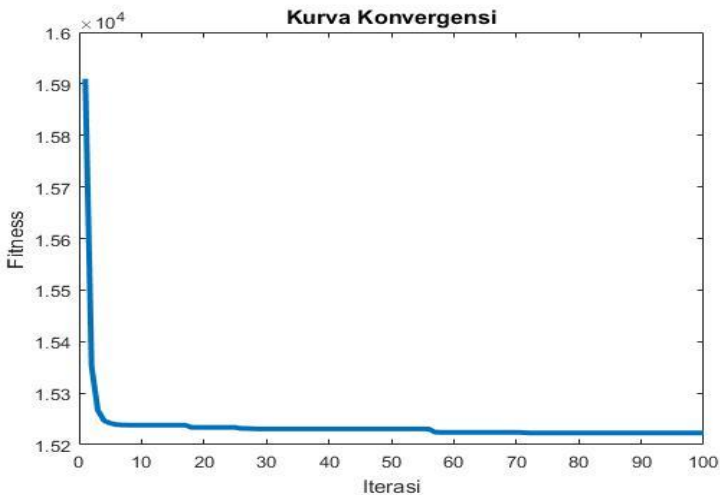
Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)						Beban (MW)	Karbon (Ton)
	1	2	3	4	5	6		
1	83.41	43.62	18.03	20.16	17.98	18.80	202	203.26
2	79.27	38.26	21.22	16.85	14.13	20.29	190	193.81
3	80.40	35.73	22.52	13.29	12.22	16.84	181	188.65
4	86.91	30.51	17.83	17.87	12.78	17.08	183	187.05
5	101.15	30.25	18.69	13.78	13.95	13.16	191	200.32
6	118.87	27.33	16.91	10.93	12.57	13.38	200	214.09
7	132.39	37.86	18.77	15.32	12.46	15.21	232	248.09
8	164.92	33.93	16.92	12.08	11.34	12.81	252	276.06
9	151.85	40.15	20.70	14.01	12.31	15.98	255	276.15
10	153.58	42.75	20.82	17.30	14.42	18.13	267	285.45
11	152.66	45.33	23.64	19.06	13.03	15.28	269	288.70
12	154.78	38.16	15.82	14.56	12.54	16.14	252	271.94
13	131.95	37.51	18.68	13.98	14.04	16.84	233	248.43
14	146.61	34.29	18.46	13.46	14.04	19.13	246	263.31
15	134.03	33.79	19.75	12.87	19.20	16.35	236	249.14
16	161.05	30.44	17.48	13.10	15.54	15.39	253	272.27
17	171.78	38.85	18.27	13.34	12.86	12.89	268	292.91
18	170.63	44.02	21.93	15.32	12.81	14.28	279	303.94
19	183.01	43.02	18.61	11.86	13.30	13.60	283.4	311.67
20	166.27	51.13	19.33	12.87	11.63	13.77	275	302.13
21	165.74	44.50	19.95	15.85	13.16	12.80	272	295.58
22	146.32	39.75	21.44	13.93	16.41	15.15	253	271.09
23	133.91	32.95	25.54	13.82	13.25	17.52	237	253.61
24	128.88	30.16	19.45	13.96	15.21	17.34	225	237.88

Kurva daya pembangkitan dari simulasi tiap jam ditunjukkan dengan Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Kurva Daya Pembangkitan Tanpa CCP Percobaan 1

Dari kurva daya pembangkitan tiap jam, generator dengan biaya pembangkitan paling murah dioperasikan mendekati pembangkitan maksimal (P_{max}) selain itu hal ini di sebabkan oleh pembobotan yang lebih besar pada biaya pembangkitan. Kurva konvergensi dari simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Kurva Konvergensi Kasus 1 Tanpa CCP Percobaan 1

Data hasil simulasi kenaikan dan penurunan daya pembangkitan generator dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Kenaikan atau Penurunan Daya Generator

Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)					
	1	2	3	4	5	6
1-2	4.14	5.36	-3.19	3.31	3.85	-1.49
2-3	-1.13	2.53	-1.3	3.56	1.91	3.45
3-4	-6.51	5.22	4.69	-4.58	-0.56	-0.24
4-5	-14.24	0.26	-0.86	4.09	-1.17	3.92
5-6	-17.72	2.92	1.78	2.85	1.38	-0.22
6-7	-13.52	-10.53	-1.86	-4.39	0.11	-1.83
7-8	-32.53	3.93	1.85	3.24	1.12	2.4
8-9	13.07	-6.22	-3.78	-1.93	-0.97	-3.17
9-10	-1.73	-2.6	-0.12	-3.29	-2.11	-2.15
10-11	0.92	-2.58	-2.82	-1.76	1.39	2.85
11-12	-2.12	7.17	7.82	4.5	0.49	-0.86
12-13	22.83	0.65	-2.86	0.58	-1.5	-0.7
13-14	-14.66	3.22	0.22	0.52	0	-2.29
14-15	12.58	0.5	-1.29	0.59	-5.16	2.78
15-16	-27.02	3.35	2.27	-0.23	3.66	0.96
16-17	-10.73	-8.41	-0.79	-0.24	2.68	2.5
17-18	1.15	-5.17	-3.66	-1.98	0.05	-1.39
18-19	-12.38	1	3.32	3.46	-0.49	0.68
19-20	16.74	-8.11	-0.72	-1.01	1.67	-0.17
20-21	0.53	6.63	-0.62	-2.98	-1.53	0.97
21-22	19.42	4.75	-1.49	1.92	-3.25	-2.35
22-23	12.41	6.8	-4.1	0.11	3.16	-2.37
23-24	5.03	2.79	6.09	-0.14	-1.96	0.18

Dari data Tabel 4.4 - 4.5 dapat diketahui bahwa daya yang dibangkitkan generator adalah sama dengan daya total beban yang dibutuhkan. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi sudah memenuhi batasan – batasan yang digunakan, seperti *equality constraint* ($P_d = P_g$), *inequality constraint* (P_{min} dan P_{max}) dan *ramp rate* generator.

4.5 Studi Kasus 1 : Tanpa CCP Percobaan 6

Pada studi kasus 1 percobaan 6 memperlihatkan hasil *economic dispatch* dengan metode *firefly algorithm* tanpa pemasangan *carbon capture plants*. Bobot yang digunakan bobotBiaya = 0.5 untuk biaya pembangkitan dan bobotCarbon = 0.5 untuk emisi karbon dioksida. Daya pembangkitan generator, beban dan karbon ada pada Tabel 4.6.

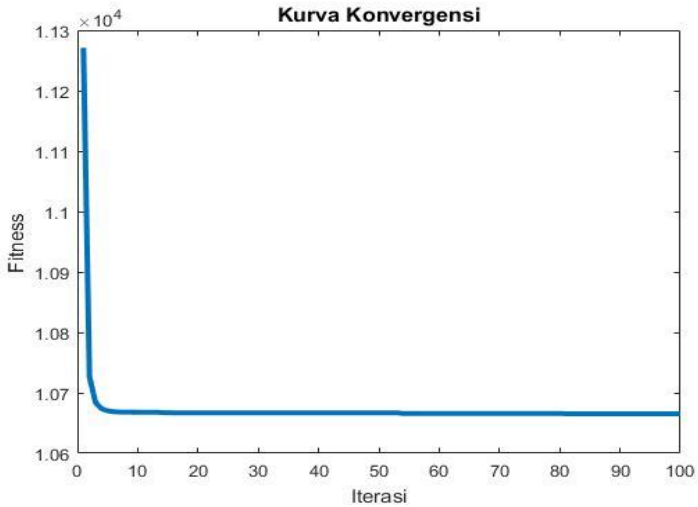
Tabel 4.6 Daya Pembangkitan Generator, Beban dan Karbon

Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)						Beban (MW)	Karbon (Ton)
	1	2	3	4	5	6		
1	76.14	34.11	25.67	25.51	17.14	23.41	202	197.99
2	76.64	34.45	19.06	20.90	17.82	21.13	190	187.65
3	74.11	30.79	22.94	17.47	17.43	18.25	181	181.01
4	81.53	33.71	18.90	16.75	16.03	16.08	183	185.86
5	95.16	30.05	18.48	18.68	13.90	14.73	191	196.05
6	91.10	38.62	20.07	16.68	15.05	18.48	200	205.84
7	122.69	35.49	23.87	23.96	12.67	13.33	232	242.20
8	142.67	32.07	19.37	24.49	16.53	16.87	252	261.18
9	138.32	38.49	21.33	23.35	14.19	19.31	255	266.36
10	151.11	38.26	19.50	22.05	18.52	17.56	267	279.03
11	153.56	39.24	20.55	19.11	17.11	19.43	269	283.91
12	139.42	34.64	23.79	17.58	17.96	18.62	252	264.59
13	125.01	42.34	17.75	16.66	14.68	16.55	233	246.05
14	133.14	37.04	21.87	16.99	17.82	19.14	246	257.81
15	124.69	35.60	20.29	21.79	18.13	15.49	236	243.59
16	132.00	39.87	23.66	22.12	19.36	15.99	253	262.38
17	144.20	40.68	24.01	20.18	23.45	15.48	268	278.76
18	150.91	42.70	22.40	23.85	23.53	15.61	279	288.92
19	162.45	34.29	19.30	30.53	20.10	16.72	283.4	291.24
20	148.09	42.00	20.55	29.13	19.08	16.15	275	283.34
21	142.31	41.35	22.83	29.96	19.36	16.19	272	278.93
22	130.69	36.83	20.72	29.14	20.04	15.58	253	256.75
23	124.31	30.75	19.67	27.13	17.39	17.74	237	240.40
24	104.04	37.29	18.13	31.12	18.24	16.17	225	223.16

Kurva daya pembangkitan dari simulasi tiap jam ditunjukkan dengan Gambar 4.7 dan kurva konvergensi dari simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.8.



Gambar 4.7 Kurva Daya Pembangkitan Tanpa CCP Percobaan 6



Gambar 4.8 Kurva Konvergensi Kasus 1 Tanpa CCP Percobaan 6

Data hasil simulasi kenaikan dan penurunan daya pembangkitan generator dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Kenaikan atau Penurunan Daya Generator

Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)					
	1	2	3	4	5	6
1-2	-0.5	-0.34	6.61	4.61	-0.68	2.28
2-3	2.53	3.66	-3.88	3.43	0.39	2.88
3-4	-7.42	-2.92	4.04	0.72	1.4	2.17
4-5	-13.63	3.66	0.42	-1.93	2.13	1.35
5-6	4.06	-8.57	-1.59	2	-1.15	-3.75
6-7	-31.59	3.13	-3.8	-7.28	2.38	5.15
7-8	-19.98	3.42	4.5	-0.53	-3.86	-3.54
8-9	4.35	-6.42	-1.96	1.14	2.34	-2.44
9-10	-12.79	0.23	1.83	1.3	-4.33	1.75
10-11	-2.45	-0.98	-1.05	2.94	1.41	-1.87
11-12	14.14	4.6	-3.24	1.53	-0.85	0.81
12-13	14.41	-7.7	6.04	0.92	3.28	2.07
13-14	-8.13	5.3	-4.12	-0.33	-3.14	-2.59
14-15	8.45	1.44	1.58	-4.8	-0.31	3.65
15-16	-7.31	-4.27	-3.37	-0.33	-1.23	-0.5
16-17	-12.2	-0.81	-0.35	1.94	-4.09	0.51
17-18	-6.71	-2.02	1.61	-3.67	-0.08	-0.13
18-19	-11.54	8.41	3.1	-6.68	3.43	-1.11
19-20	14.36	-7.71	-1.25	1.4	1.02	0.57
20-21	5.78	0.65	-2.28	-0.83	-0.28	-0.04
21-22	11.62	4.52	2.11	0.82	-0.68	0.61
22-23	6.38	6.08	1.05	2.01	2.65	-2.16
23-24	20.27	-6.54	1.54	-3.99	-0.85	1.57

Dari data Tabel 4.6 - 4.7 dapat diketahui bahwa daya yang dibangkitkan generator adalah sama dengan daya total beban yang dibutuhkan. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi sudah memenuhi batasan – batasan yang digunakan, seperti *equality constraint* ($P_d = P_g$), *inequality constraint* (P_{min} dan P_{max}) dan *ramp rate* generator.

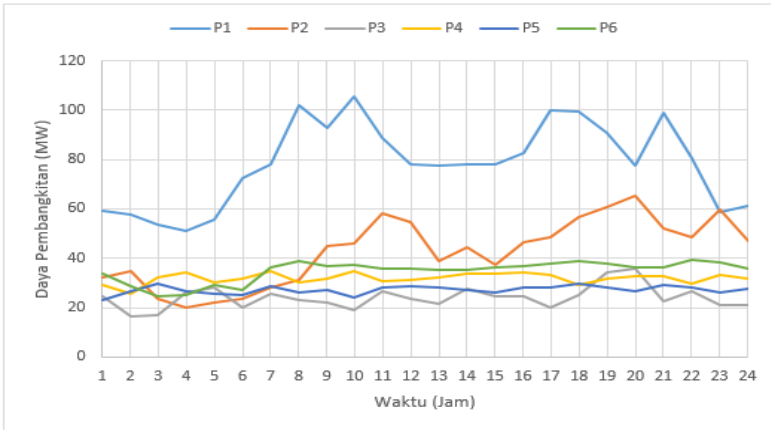
4.6 Studi Kasus 1 : Tanpa CCP Percobaan 11

Pada studi kasus 1 percobaan 11 memperlihatkan hasil *economic dispatch* dengan metode *firefly algorithm* tanpa pemasangan *carbon capture plants*. Bobot yang digunakan bobotBiaya = 0 untuk biaya pembangkitan dan bobotCarbon = 1 untuk emisi karbon dioksida. Daya pembangkitan generator, beban dan karbon ada pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Daya Pembangkitan Generator, Beban dan Karbon

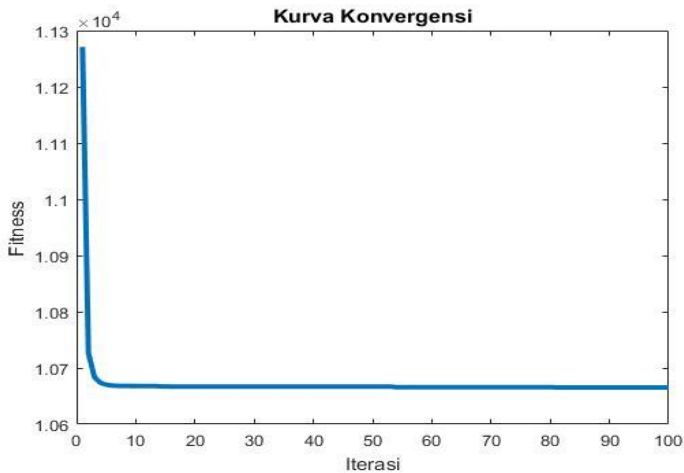
Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)						Beban (MW)	Karbon (Ton)
	1	2	3	4	5	6		
1	59.41	32.34	24.42	29.18	22.93	33.72	202	186.7
2	57.54	34.88	16.48	25.84	26.73	28.53	190	174.23
3	53.73	23.46	16.96	32.44	29.62	24.77	181	157.93
4	50.97	20.08	26.28	34.03	26.73	24.90	183	161.23
5	55.60	22.17	28.34	30.15	25.51	29.23	191	172.80
6	72.40	23.64	20.20	31.55	25.06	27.15	200	183.61
7	78.18	28.29	25.45	34.88	28.66	36.53	232	212.53
8	102.21	31.44	23.21	30.17	26.26	38.70	252	240.72
9	92.72	44.81	21.95	31.54	27.35	36.63	255	243.28
10	105.48	46.13	18.93	34.77	24.29	37.39	267	257.06
11	88.91	58.37	26.70	30.96	28.03	36.03	269	260.05
12	78.12	54.59	23.60	31.37	28.45	35.86	252	239.33
13	77.41	38.80	21.68	32.02	27.94	35.16	233	216.97
14	77.94	44.39	27.49	33.67	27.36	35.14	246	231.59
15	77.84	37.37	24.57	33.54	26.33	36.36	236	220.12
16	82.86	46.27	24.56	34.38	28.23	36.70	253	238.07
17	100.06	48.57	20.26	33.11	28.29	37.71	268	256.36
18	99.55	56.51	25.33	29.14	29.86	38.62	279	270.85
19	90.89	60.56	34.47	31.61	27.98	37.91	283.4	275.92
20	77.78	65.29	35.76	32.75	26.90	36.52	275	266.47
21	98.83	52.22	22.59	32.73	29.44	36.18	272	261.15
22	80.36	48.58	26.88	29.53	28.16	39.48	253	240.64
23	58.52	59.62	20.99	33.17	26.35	38.36	237	220.75
24	61.03	47.25	21.09	31.96	27.67	35.99	225	207.39

Kurva daya pembangkitan dari simulasi tiap jam ditunjukkan dengan Gambar 4.9 .



Gambar 4.9 Kurva Daya Pembangkitan Tanpa CCP Percobaan 11

Dari kurva daya pembangkitan tiap jam, generator dengan emisi karbon dioksida sedikit untuk tiap MW pembangkitannya dioperasikan mendekati pembangkitan maksimal (P_{max}) selain itu hal ini di sebabkan oleh pembobotan yang lebih besar pada emisi karbon dioksida. Kurva konvergensi dari simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Kurva Konvergensi Kasus 1 Tanpa CCP Percobaan 11

Data hasil simulasi kenaikan dan penurunan daya pembangkitan generator dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Kenaikan atau Penurunan Daya Generator

Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)					
	1	2	3	4	5	6
1-2	1.87	-2.54	7.94	3.34	-3.8	5.19
2-3	3.81	11.42	-0.48	-6.6	-2.89	3.76
3-4	2.76	3.38	-9.32	-1.59	2.89	-0.13
4-5	-4.63	-2.09	-2.06	3.88	1.22	-4.33
5-6	-16.8	-1.47	8.14	-1.4	0.45	2.08
6-7	-5.78	-4.65	-5.25	-3.33	-3.6	-9.38
7-8	-24.03	-3.15	2.24	4.71	2.4	-2.17
8-9	9.49	-13.37	1.26	-1.37	-1.09	2.07
9-10	-12.76	-1.32	3.02	-3.23	3.06	-0.76
10-11	16.57	-12.24	-7.77	3.81	-3.74	1.36
11-12	10.79	3.78	3.1	-0.41	-0.42	0.17
12-13	0.71	15.79	1.92	-0.65	0.51	0.7
13-14	-0.53	-5.59	-5.81	-1.65	0.58	0.02
14-15	0.1	7.02	2.92	0.13	1.03	-1.22
15-16	-5.02	-8.9	0.01	-0.84	-1.9	-0.34
16-17	-17.2	-2.3	4.3	1.27	-0.06	-1.01
17-18	0.51	-7.94	-5.07	3.97	-1.57	-0.91
18-19	8.66	-4.05	-9.14	-2.47	1.88	0.71
19-20	13.11	-4.73	-1.29	-1.14	1.08	1.39
20-21	-21.05	13.07	13.17	0.02	-2.54	0.34
21-22	18.47	3.64	-4.29	3.2	1.28	-3.3
22-23	21.84	-11.04	5.89	-3.64	1.81	1.12
23-24	-2.51	12.37	-0.1	1.21	-1.32	2.37

Dari data Tabel 4.8 - 4.9 dapat diketahui bahwa daya yang dibangkitkan generator adalah sama dengan daya total beban yang dibutuhkan. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi sudah memenuhi batasan – batasan yang digunakan, seperti *equality constraint* ($P_d = P_g$), *inequality constraint* (P_{\min} dan P_{\max}) dan *ramp rate* generator.

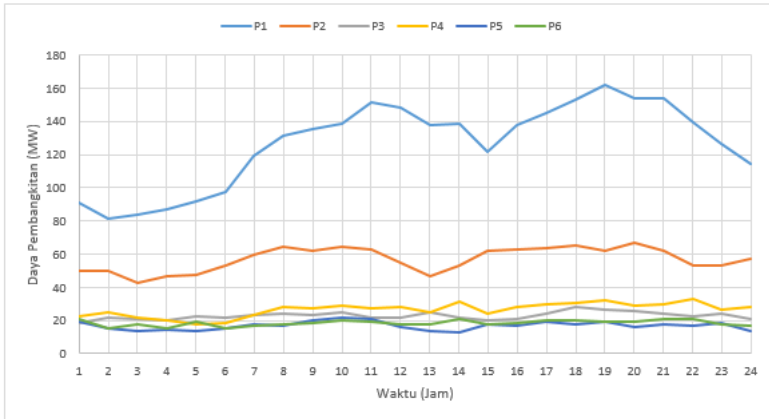
4.7 Studi Kasus 2 : Dengan CCP Percobaan 1

Pada studi kasus 2 percobaan 1 memperlihatkan hasil *economic dispatch* dengan metode *firefly algorithm* dengan pemasangan *carbon capture plants*. Bobot yang digunakan bobotBiaya = 1 untuk biaya pembangkitan dan bobotCarbon = 0 untuk emisi karbon dioksida. Daya pembangkitan generator, CCP, beban dan karbon ada pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Daya Pembangkitan Generator, Beban, Karbon dan CCP

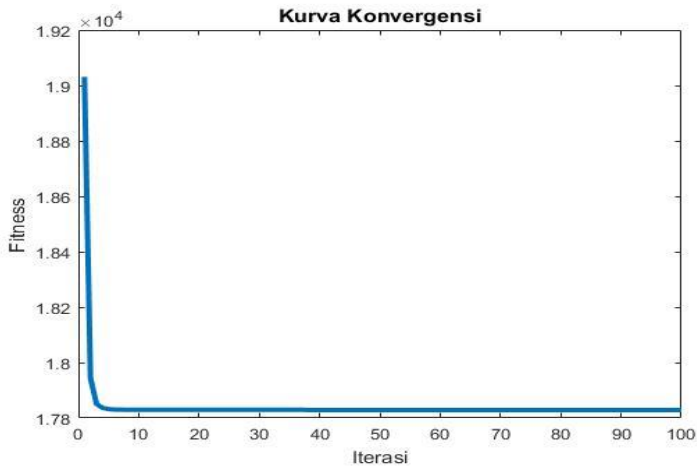
Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)						Beban (MW)	Karbon (Ton)	CCP (MW)
	1	2	3	4	5	6			
1	91.28	49.82	18.83	22.78	19.32	21.14	202	132.41	21.16
2	81.37	49.57	21.74	25.09	15.46	15.63	190	128.84	18.87
3	83.49	42.88	21.02	21.52	13.98	17.47	181	119.67	19.36
4	86.66	47.00	20.36	19.80	14.20	15.06	183	121.82	20.09
5	91.47	47.54	22.44	17.49	13.77	19.50	191	128.05	21.21
6	97.83	53.29	22.05	18.19	15.67	15.65	200	133.66	22.68
7	119.15	59.50	23.45	23.37	17.35	16.81	232	150.36	27.63
8	131.12	64.26	24.44	27.97	17.13	17.49	252	161.74	30.40
9	135.05	62.31	23.18	27.09	20.04	18.64	255	160.41	31.31
10	138.54	64.16	25.02	29.15	21.87	20.39	267	168.45	32.12
11	151.81	62.83	21.51	27.54	21.08	19.42	269	163.29	35.20
12	148.07	54.60	21.68	28.40	15.94	17.63	252	149.82	34.33
13	137.70	46.44	24.86	24.94	13.68	17.31	233	139.32	31.93
14	138.66	52.81	21.89	31.05	13.12	20.61	246	148.52	32.15
15	121.82	62.19	20.37	24.09	17.83	17.94	236	151.78	28.25
16	137.72	62.60	20.90	28.43	16.69	18.59	253	157.62	31.93
17	145.29	63.53	23.80	29.55	19.60	19.92	268	166.29	33.69
18	153.09	65.65	27.94	30.36	17.49	19.97	279	174.58	35.50
19	161.78	61.92	26.96	32.09	19.03	19.14	283.4	171.30	37.51
20	153.85	66.94	25.51	28.79	15.94	19.66	275	171.75	35.67
21	153.69	61.87	24.13	29.63	17.44	20.88	272	166.05	35.63
22	139.57	52.92	22.58	32.77	16.59	20.93	253	152.13	32.36
23	126.74	52.81	23.80	26.58	18.58	17.89	237	146.95	29.39
24	114.14	57.58	20.90	27.89	14.02	16.93	225	144.78	26.47

Kurva daya pembangkitan dari simulasi tiap jam ditunjukkan dengan Gambar 4.11 .



Gambar 4.11 Kurva Daya Pembangkitan Dengan CCP Percobaan 1

Dari kurva daya pembangkitan tiap jam, generator dengan biaya pembangkitan paling murah dioperasikan mendekati pembangkitan maksimal (P_{max}) selain itu hal ini di sebabkan oleh pembobotan yang lebih besar pada biaya pembangkitan. Kurva konvergensi dari simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Kurva Konvergensi Kasus 2 Dengan CCP Percobaan 1

Data hasil simulasi kenaikan dan penurunan daya pembangkitan generator dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Kenaikan atau Penurunan Daya Generator

Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)					
	1	2	3	4	5	6
1-2	9.91	0.25	-2.91	-2.31	3.86	5.51
2-3	-2.12	6.69	0.72	3.57	1.48	-1.84
3-4	-3.17	-4.12	0.66	1.72	-0.22	2.41
4-5	-4.81	-0.54	-2.08	2.31	0.43	-4.44
5-6	-6.36	-5.75	0.39	-0.7	-1.9	3.85
6-7	-21.32	-6.21	-1.4	-5.18	-1.68	-1.16
7-8	-11.97	-4.76	-0.99	-4.6	0.22	-0.68
8-9	-3.93	1.95	1.26	0.88	-2.91	-1.15
9-10	-3.49	-1.85	-1.84	-2.06	-1.83	-1.75
10-11	-13.27	1.33	3.51	1.61	0.79	0.97
11-12	3.74	8.23	-0.17	-0.86	5.14	1.79
12-13	10.37	8.16	-3.18	3.46	2.26	0.32
13-14	-0.96	-6.37	2.97	-6.11	0.56	-3.3
14-15	16.84	-9.38	1.52	6.96	-4.71	2.67
15-16	-15.9	-0.41	-0.53	-4.34	1.14	-0.65
16-17	-7.57	-0.93	-2.9	-1.12	-2.91	-1.33
17-18	-7.8	-2.12	-4.14	-0.81	2.11	-0.05
18-19	-8.69	3.73	0.98	-1.73	-1.54	0.83
19-20	7.93	-5.02	1.45	3.3	3.09	-0.52
20-21	0.16	5.07	1.38	-0.84	-1.5	-1.22
21-22	14.12	8.95	1.55	-3.14	0.85	-0.05
22-23	12.83	0.11	-1.22	6.19	-1.99	3.04
23-24	12.6	-4.77	2.9	-1.31	4.56	0.96

Dari data Tabel 4.10 - 4.11 dapat diketahui bahwa daya yang dibangkitkan generator adalah sama dengan daya total beban yang dibutuhkan ditambah daya yang dibutuhkan plan *carbon capture plants*. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi sudah memenuhi batasan – batasan yang digunakan, seperti *equality constraint* ($P_d = P_g + P_s$) dan *inequality constraint* (P_{min} dan P_{max}) dan *ramp rate* generator.

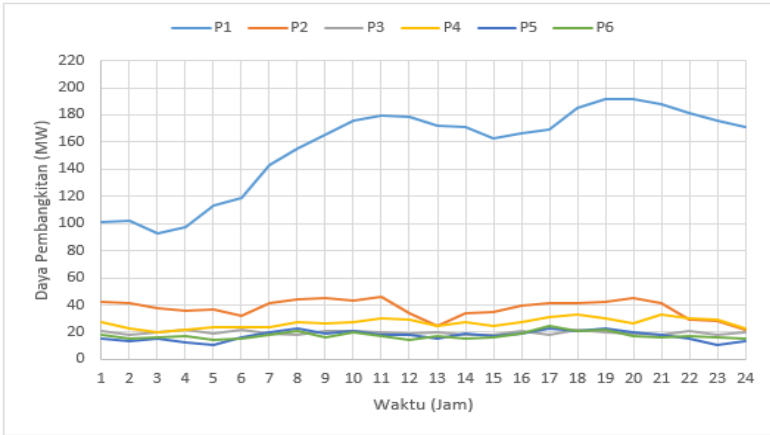
4.8 Studi Kasus 2 : Dengan CCP Percobaan 6

Pada studi kasus percobaan 6 memperlihatkan hasil *economic dispatch* dengan metode *firefly algorithm* dengan pemasangan *carbon capture plants*. Bobot yang digunakan bobotBiaya = 0.5 untuk biaya pembangkitan dan bobotCarbon =0.5 untuk emisi karbon dioksida. Daya pembangkitan generator, beban dan karbon ada pada Tabel 4.12.

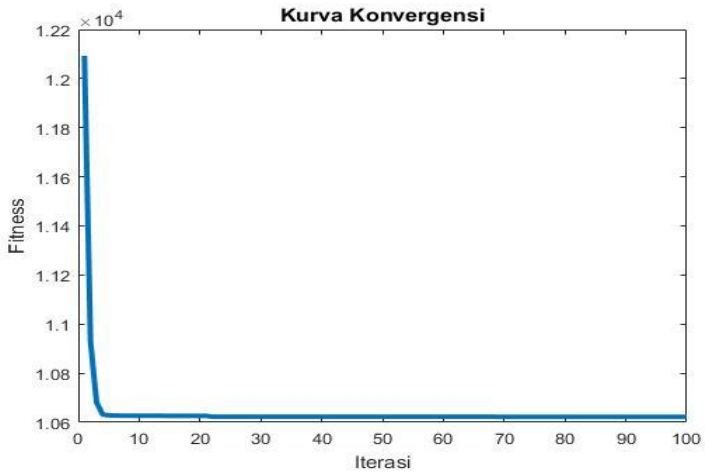
Tabel 4.12 Daya Pembangkitan Generator, Beban dan Karbon

Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)						Beban (MW)	Karbon (Ton)	CCP (MW)
	1	2	3	4	5	6			
1	101.54	42.63	21.08	26.98	15.44	17.87	202	125.97	23.54
2	101.98	41.8	18.35	22.63	13.28	15.60	190	117.24	23.65
3	92.49	37.91	20.33	19.71	15.48	16.52	181	113.69	21.45
4	97.29	35.41	21.38	21.83	12.08	17.56	183	113.08	22.56
5	112.92	36.54	18.62	23.98	10.34	14.79	191	111.93	26.18
6	119.28	31.85	21.50	23.68	16.40	14.95	200	113.55	27.66
7	142.98	41.73	19.38	23.56	19.85	17.66	232	130.52	33.15
8	155.46	44.39	18.06	27.11	22.42	20.60	252	139.29	36.05
9	165.06	44.69	21.29	26.47	19.17	16.59	255	140.36	38.27
10	175.29	43.26	20.47	27.85	20.93	19.84	267	143.42	40.64
11	179.21	45.88	20.36	30.65	17.74	16.72	269	144.48	41.55
12	178.88	34.21	18.67	28.88	18.11	14.73	252	126.42	41.48
13	172.43	24.57	19.80	24.36	14.96	16.85	233	113.51	39.98
14	170.73	34.29	18.43	27.13	19.29	15.72	246	125.30	39.59
15	162.84	34.43	17.97	25.02	17.14	16.36	236	122.17	37.76
16	166.02	39.94	20.42	26.96	19.36	18.80	253	135.89	38.49
17	168.93	41.60	18.21	31.43	22.42	24.58	268	143.53	39.17
18	184.62	41.06	21.90	32.91	20.50	20.83	279	146.93	42.81
19	191.47	41.91	19.95	30.20	22.26	22.00	283.4	147.36	44.40
20	191.70	44.78	18.56	26.76	20.39	17.27	275	143.15	44.45
21	188.32	41.48	18.17	32.58	18.49	16.63	272	139.38	43.66
22	181.72	29.56	20.87	30.51	14.94	17.55	253	125.54	42.13
23	175.66	27.96	17.77	29.30	11.01	16.03	237	115.48	40.73
24	170.72	21.96	20.38	23.10	12.94	15.49	225	108.30	39.58

Kurva daya pembangkitan dari simulasi tiap jam ditunjukkan dengan Gambar 4.13 dan kurva konvergensi dari simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.14.



Gambar 4.13 Kurva Daya Pembangkitan Dengan CCP Percobaan 6



Gambar 4.14 Kurva Konvergensi Kasus 2 Dengan CCP Percobaan 6

Data hasil simulasi kenaikan dan penurunan daya pembangkitan generator dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Kenaikan atau Penurunan Daya Generator

Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)					
	1	2	3	4	5	6
1-2	-0.44	0.83	2.73	4.35	2.16	2.27
2-3	9.49	3.89	-1.98	2.92	-2.2	-0.92
3-4	-4.8	2.5	-1.05	-2.12	3.4	-1.04
4-5	-15.63	-1.13	2.76	-2.15	1.74	2.77
5-6	-6.36	4.69	-2.88	0.3	-6.06	-0.16
6-7	-23.7	-9.88	2.12	0.12	-3.45	-2.71
7-8	-12.48	-2.66	1.32	-3.55	-2.57	-2.94
8-9	-9.6	-0.3	-3.23	0.64	3.25	4.01
9-10	-10.23	1.43	0.82	-1.38	-1.76	-3.25
10-11	-3.92	-2.62	0.11	-2.8	3.19	3.12
11-12	0.33	11.67	1.69	1.77	-0.37	1.99
12-13	6.45	9.64	-1.13	4.52	3.15	-2.12
13-14	1.7	-9.72	1.37	-2.77	-4.33	1.13
14-15	7.89	-0.14	0.46	2.11	2.15	-0.64
15-16	-3.18	-5.51	-2.45	-1.94	-2.22	-2.44
16-17	-2.91	-1.66	2.21	-4.47	-3.06	-5.78
17-18	-15.69	0.54	-3.69	-1.48	1.92	3.75
18-19	-6.85	-0.85	1.95	2.71	-1.76	-1.17
19-20	-0.23	-2.87	1.39	3.44	1.87	4.73
20-21	3.38	3.3	0.39	-5.82	1.9	0.64
21-22	6.6	11.92	-2.7	2.07	3.55	-0.92
22-23	6.06	1.6	3.1	1.21	3.93	1.52
23-24	4.94	6	-2.61	6.2	-1.93	0.54

Dari data Tabel 4.12 - 4.13 dapat diketahui bahwa daya yang dibangkitkan generator adalah sama dengan daya total beban yang dibutuhkan ditambah daya yang dibutuhkan plan *carbon capture plants*. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi sudah memenuhi batasan – batasan yang digunakan, seperti *equality constraint* ($P_d = P_g + P_s$) dan *inequality constraint* (P_{\min} dan P_{\max}) dan *ramp rate* generator.

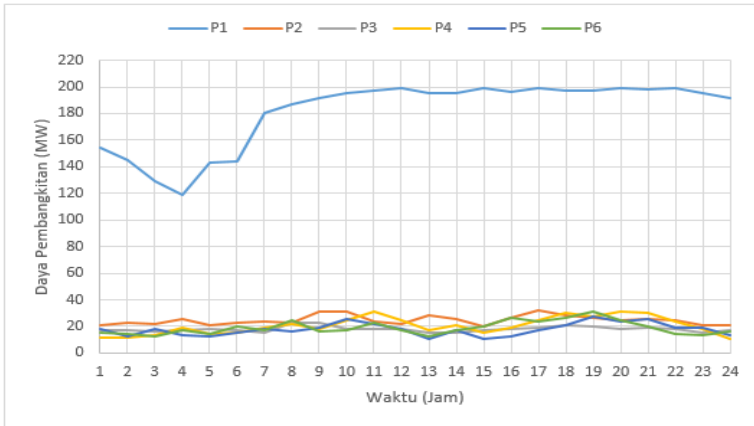
4.9 Studi Kasus 2 : Dengan CCP Percobaan 11

Pada studi kasus percobaan 11 memperlihatkan hasil *economic dispatch* dengan metode *firefly algorithm* dengan pemasangan *carbon capture plants*. Bobot yang digunakan bobotBiaya = 0 untuk biaya pembangkitan dan bobotCarbon = 1 untuk emisi karbon dioksida. Daya pembangkitan generator, beban dan karbon ada pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Daya Pembangkitan Generator, Beban dan Karbon

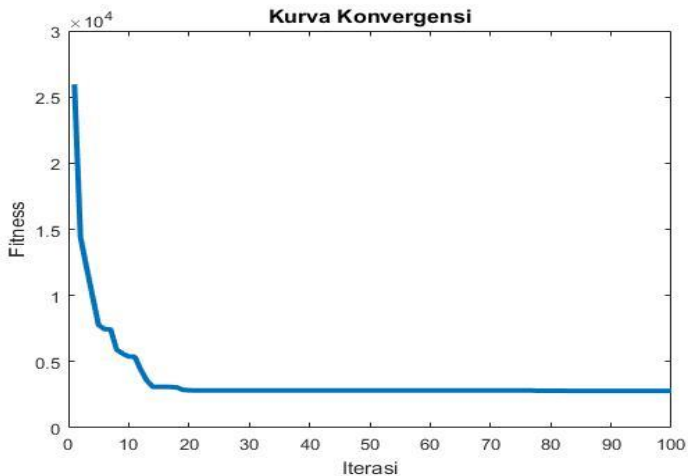
Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)						Beban (MW)	Karbon (Ton)	CCP (MW)
	1	2	3	4	5	6			
1	154.06	21.07	17.16	11.8	18.37	15.25	202	97.74	35.72
2	145.13	23.01	17.12	11.68	12.32	14.39	190	95.05	33.65
3	129.03	21.73	16.13	13.58	17.96	12.49	181	91.28	29.92
4	118.53	25.18	17.55	19.00	13.36	16.86	183	98.96	27.48
5	143.20	21.32	18.03	14.51	12.36	14.78	191	95.34	33.20
6	143.59	22.93	17.04	14.92	15.08	19.73	200	101.36	33.29
7	180.43	23.97	15.44	19.37	17.96	16.67	232	108.04	41.84
8	187.38	23.03	22.73	22.14	16.03	24.13	252	123.00	43.45
9	191.57	31.32	22.60	18.51	18.97	16.45	255	127.13	44.42
10	195.71	31.09	17.83	25.04	25.69	17.02	267	128.12	45.38
11	196.81	23.51	18.48	31.12	22.21	22.50	269	125.51	45.63
12	199.24	21.90	18.27	24.16	17.97	16.66	252	114.37	46.20
13	194.99	28.25	15.41	16.73	10.32	12.56	233	108.00	45.21
14	195.80	25.68	15.31	20.69	16.87	17.05	246	113.04	45.40
15	198.74	20.23	17.35	15.22	10.82	19.72	236	106.61	46.08
16	196.12	26.17	18.32	19.20	12.50	26.15	253	121.82	45.47
17	199.34	32.17	18.61	24.13	16.75	23.21	268	131.54	46.22
18	196.86	28.46	21.22	30.27	21.28	26.55	279	137.03	45.65
19	197.07	26.02	20.27	27.45	27.03	31.25	283.4	137.98	45.69
20	198.99	25.02	17.88	30.90	23.67	24.68	275	129.21	46.14
21	197.73	25.25	18.99	30.14	25.85	19.88	272	127.46	45.85
22	198.97	24.84	18.28	23.50	19.26	14.28	253	116.23	46.13
23	195.22	20.93	15.44	18.17	19.03	13.47	237	104.52	45.26
24	191.36	20.42	17.34	10.95	13.25	16.05	225	101.85	44.37

Kurva daya pembangkitan dari simulasi tiap jam ditunjukkan dengan Gambar 4.15 .



Gambar 4.15 Kurva Daya Pembangkitan Dengan CCP Percobaan 11

Dari kurva daya pembangkitan tiap jam, generator dengan emisi karbon dioksida sedikit untuk tiap MW pembangkitannya dioperasikan mendekati pembangkitan maksimal (P_{max}) selain itu hal ini di sebabkan oleh pembobotan yang lebih besar pada emisi karbon dioksida. Kurva konvergensi dari simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Kurva Konvergensi Kasus 2 Dengan CCP Percobaan 11

Data hasil simulasi kenaikan dan penurunan daya pembangkitan generator dapat dilihat pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Kenaikan atau Penurunan Daya Generator

Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)					
	1	2	3	4	5	6
1-2	8.93	-1.94	0.04	0.12	6.05	0.86
2-3	16.1	1.28	0.99	-1.9	-5.64	1.9
3-4	10.5	-3.45	-1.42	-5.42	4.6	-4.37
4-5	-24.67	3.86	-0.48	4.49	1	2.08
5-6	-0.39	-1.61	0.99	-0.41	-2.72	-4.95
6-7	-36.84	-1.04	1.6	-4.45	-2.88	3.06
7-8	-6.95	0.94	-7.29	-2.77	1.93	-7.46
8-9	-4.19	-8.29	0.13	3.63	-2.94	7.68
9-10	-4.14	0.23	4.77	-6.53	-6.72	-0.57
10-11	-1.1	7.58	-0.65	-6.08	3.48	-5.48
11-12	-2.43	1.61	0.21	6.96	4.24	5.84
12-13	4.25	-6.35	2.86	7.43	7.65	4.1
13-14	-0.81	2.57	0.1	-3.96	-6.55	-4.49
14-15	-2.94	5.45	-2.04	5.47	6.05	-2.67
15-16	2.62	-5.94	-0.97	-3.98	-1.68	-6.43
16-17	-3.22	-6	-0.29	-4.93	-4.25	2.94
17-18	2.48	3.71	-2.61	-6.14	-4.53	-3.34
18-19	-0.21	2.44	0.95	2.82	-5.75	-4.7
19-20	-1.92	1	2.39	-3.45	3.36	6.57
20-21	1.26	-0.23	-1.11	0.76	-2.18	4.8
21-22	-1.24	0.41	0.71	6.64	6.59	5.6
22-23	3.75	3.91	2.84	5.33	0.23	0.81
23-24	3.86	0.51	-1.9	7.22	5.78	-2.58

Dari data Tabel 4.14 - 4.15 dapat diketahui bahwa daya yang dibangkitkan generator adalah sama dengan daya total beban yang dibutuhkan ditambah daya yang dibutuhkan plan *carbon capture plants*. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi sudah memenuhi batasan – batasan yang digunakan, seperti *equality constraint* ($P_d = P_g + P_s$) dan *inequality constraint* (P_{min} dan P_{max}) dan *ramp rate* generator.

Analisa dan data dari studi kasus 1 tanpa CCP dan studi kasus 2 dengan CCP terdapat pada Tabel 4.16 dan Tabel 4.17.

Tabel 4.16 Hasil Simulasi Studi Kasus 1 Tanpa CCP

Percobaan	Bobot 1 (Biaya)	Bobot 2 (Emisi Karbon)	Total Biaya (\$)	Total Emisi CO ₂ (Ton)
1	1.0	0.0	15210.65	6135.51
6	0.5	0.5	15425.24	5902.97
11	0.0	1.0	16779.02	5395.76

Tabel 4.17 Hasil Simulasi Studi Kasus 2 Dengan CCP

Percobaan	Bobot 1 (Biaya)	Bobot 2 (Emisi Karbon)	Total Biaya (\$)	Total Emisi CO ₂ (Ton)
1	1.0	0.0	17827.84	3609.57
6	0.5	0.5	18153.71	3086.49
11	0.0	1.0	18680.81	2741.18

Studi kasus 1, unit pembangkit tanpa *carbon capture plants* pada percobaan 1 dengan bobotBiaya = 1 dan bobotCarbon = 0, didapatkan biaya pembangkitan sebesar 15210.65\$ dengan emisi karbon dioksida yang dihasilkan sebesar 6135.51 Ton. Studi kasus 2, unit pembangkit dengan *carbon capture plants* pada percobaan 1 dengan bobotBiaya = 1 dan bobotCarbon = 0, didapatkan biaya pembangkitan sebesar 17827.84\$ dengan emisi karbon dioksida yang dihasilkan sebesar 3609.57 Ton.

Studi kasus 1, unit pembangkit tanpa *carbon capture plants* pada percobaan 6 dengan bobotBiaya = 0.5 dan bobotCarbon = 0.5, didapatkan biaya pembangkitan sebesar 15425.24\$ dengan emisi karbon dioksida yang dihasilkan sebesar 5902.97 Ton. Studi kasus 2, unit pembangkit dengan *carbon capture plants* pada percobaan 6 dengan bobotBiaya = 0.5 dan bobotCarbon = 0.5, didapatkan biaya pembangkitan sebesar 18153.71\$ dengan emisi karbon dioksida yang dihasilkan sebesar 3086.49 Ton.

Studi kasus 1, unit pembangkit tanpa *carbon capture plants* pada percobaan 11 dengan bobotBiaya = 0 dan bobotCarbon = 1, didapatkan biaya pembangkitan sebesar 16779.02\$ dengan emisi karbon dioksida yang dihasilkan sebesar 5395.76 Ton. Untuk unit pembangkit dengan *carbon capture plants* pada percobaan 11 dengan bobotBiaya = 0 dan

bobotCarbon = 1, didapatkan biaya pembangkitan sebesar 18680.81\$ dengan emisi karbon dioksida yang dihasilkan sebesar 2741.18 Ton.

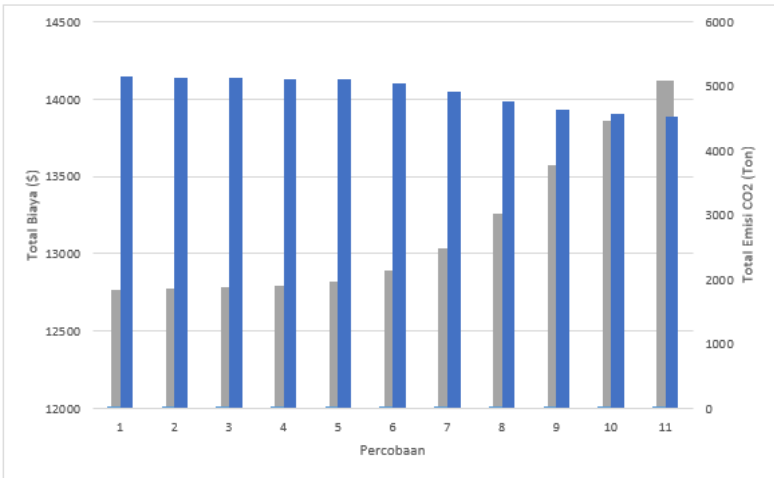
Pada kasus 1 percobaan 1, 6 dan 11 dengan kasus 2 percobaan 1, 6 dan 11, jika system pembangkit dipasang dengan *carbon capture plants* maka akan menaikkan biaya pembangkitan total tetapi juga akan mengurangi jumlah emisi karbon dioksida yang dihasilkan oleh pembangkit. Dengan menggunakan *carbon capture plants* maka unit pembangkit yang digunakan untuk menangkap karbon akan menanggung daya yang dibutuhkan untuk proses penangkapan karbon.

4.10 Studi Kasus Dengan Penambahan *Wind Turbine*

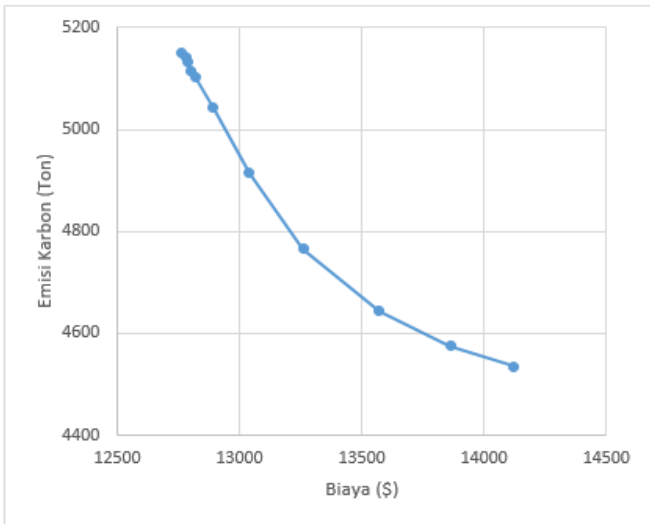
Dalam pengujian dan pengambilan data tugas akhir ini ditambahkan WT (*wind turbine*) pada masing – masing kasus utama yaitu studi kasus 3 dan 4. Pada kasus utama akan dilakukan 11 pembobotan yang berbeda - beda. Hasil percobaan kasus 3 dan 4 akan ditunjukkan pada table 4.18 – 4.19. Diagram dan kurva biaya dan emisi karbon dioksida yang dihasilkan dari data yang diuji ditunjukkan pada Gambar 4.17 – 4.20.

Tabel 4.18 Hasil Studi Kasus 3 Tanpa CCP Dengan WT

Percobaan	Bobot 1 (Biaya)	Bobot 2 (Emisi Karbon)	Total Biaya (\$)	Total Emisi CO ₂ (Ton)
1	1.0	0.0	12762.46	5149.84
2	0.9	0.1	12778.49	5141.27
3	0.8	0.2	12784.79	5132.84
4	0.7	0.3	12796.73	5115.80
5	0.6	0.4	12817.20	5103.10
6	0.5	0.5	12889.97	5042.63
7	0.4	0.6	13037.18	4913.89
8	0.3	0.7	13260.38	4765.60
9	0.2	0.8	13569.77	4643.11
10	0.1	0.9	13861.73	4575.44
11	0.0	1.0	14121.94	4535.46



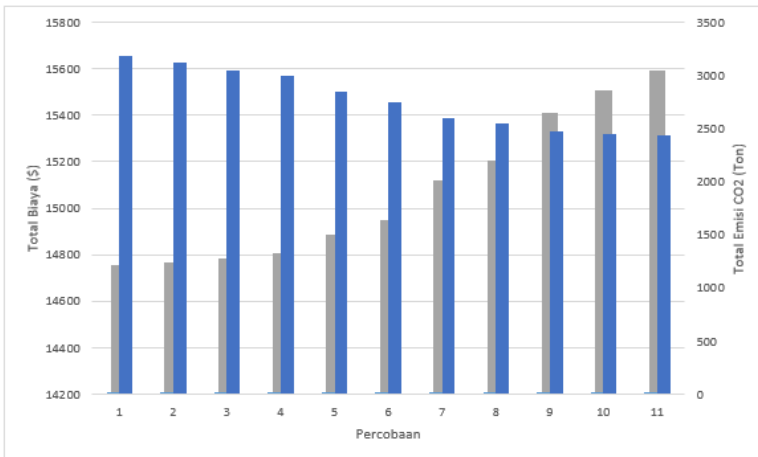
Gambar 4.17 Diagram Biaya dan Emisi CO₂ Tanpa CCP Dengan WT



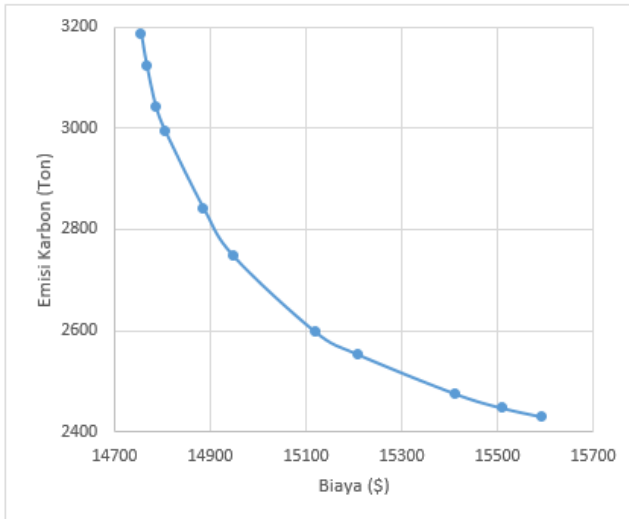
Gambar 4.18 Kurva Biaya dan Emisi CO₂ Tanpa CCP Dengan WT

Tabel 4.19 Hasil Studi Kasus 4 Dengan CCP Dengan WT

Percobaan	Bobot 1 (Biaya)	Bobot 2 (Emisi Karbon)	Total Biaya (\$)	Total Emisi CO ₂ (Ton)
1	1.0	0.0	14754.62	3187.23
2	0.9	0.1	14766.33	3124.27
3	0.8	0.2	14785.20	3043.22
4	0.7	0.3	14805.34	2993.56
5	0.6	0.4	14884.73	2842.95
6	0.5	0.5	14947.26	2748.06
7	0.4	0.6	15118.00	2598.55
8	0.3	0.7	15206.80	2553.91
9	0.2	0.8	15410.20	2476.29
10	0.1	0.9	15509.06	2447.94
11	0.0	1.0	15592.76	2430.56



Gambar 4.19 Diagram Biaya dan Emisi CO₂ Dengan CCP Dengan WT



Gambar 4.20 Kurva Biaya dan Emisi CO₂ Dengan CCP Dengan WT

Berdasarkan data hasil studi kasus 1 dan 2 Tabel 4.2 – 4.3 diatas, pada sistem uji pembangkit IEEE 30 bus jika ditambah dengan pemasangan *carbon capture plants* akan menaikkan biaya pembangkitan total, tapi jumlah emisi karbon dioksida yang di hasilkan pembangkit berkurang dibandingkan jika tanpa pemasangan *carbon capture plants*. Jika dengan menambahkan *wind turbine* pada studi kasus 1 dan 2, pasti akan menurunkan biaya pembangkitan dan emisi karbon dioksida yang dihasilkan oleh pembangkit.

Data hasil studi kasus 1 dengan penambahan *wind turbine* terdapat pada Tabel 4.18 dengan nama studi kasus 3, dan data untuk studi kasus 2 dengan penambahan *wind turbine* terdapat pada Tabel 4.19 dengan nama studi kasus 4.

Berikut ini akan diberikan beberapa data hasil simulasi dan analisa tiap studi kasus dalam percobaan dengan penambahan *wind turbine*, berupa daya pembangkitan generator tiap jam, daya yang dibutuhkan *carbon capture plants*, batas *ramp rate*, perubahan beban tiap jam, emisi karbon dioksida yang dihasilkan dan daya *wind turbine* yang dihasilkan. Data diatas kemudian dianalisa, apakah sesuai dan sudah memenuhi batasan-batasan yang digunakan.

4.11 Studi Kasus 3 : Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 1

Pada studi kasus 3 percobaan 1 tanpa pemasangan *carbon capture plants* dengan penambahan turbin angin (*wind turbine*). Turbin angin yang digunakan adalah Sea Titan wt10000dd 10MW sebanyak 5 unit. Dengan kecepatan rata-rata angin sebesar 11.5 m/s maka satu turbin angin mampu menghasilkan daya sebesar 10 MW, jika menggunakan 5 buah turbin angin, maka total akan menghasilkan daya sebesar 50 MW. Bobot yang digunakan bobotBiaya = 1 untuk biaya pembangkitan dan bobotCarbon = 0 untuk emisi karbon dioksida. Daya pembangkitan generator, beban dan karbon ada pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Daya Pembangkitan Generator, Beban dan Karbon

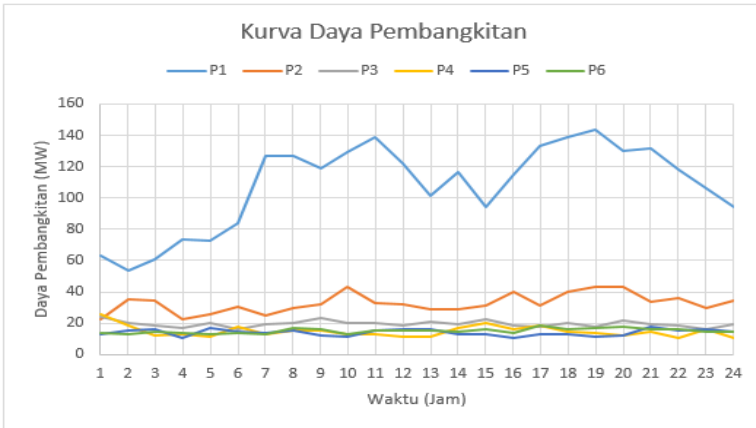
Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)						Beban (MW)	Karbon (Ton)
	1	2	3	4	5	6		
1	63.39	22.74	24.16	26.06	13.26	14.15	202	158.91
2	53.62	35.51	19.82	18.47	15.68	13.27	190	154.39
3	60.64	34.44	18.31	12.22	15.87	14.24	181	157.78
4	73.13	22.60	16.76	13.23	10.78	13.87	183	154.66
5	72.86	25.52	20.05	11.11	16.63	12.89	191	162.55
6	83.60	30.73	16.32	18.17	14.24	14.09	200	180.01
7	127.08	24.90	19.10	12.80	13.81	13.14	232	224.71
8	126.74	29.99	20.50	15.75	15.33	17.23	252	237.13
9	118.96	31.85	23.40	15.03	11.88	15.94	255	230.71
10	128.93	43.29	20.21	13.33	11.07	12.82	267	248.80
11	138.57	32.82	20.01	12.88	15.53	15.56	269	251.47
12	122.45	31.80	18.45	11.82	16.52	15.10	252	228.90
13	101.11	29.03	21.09	11.26	16.30	15.70	233	203.56
14	116.49	28.92	19.34	17.13	12.94	15.00	246	220.16
15	94.14	31.12	22.86	20.20	13.20	16.24	236	202.84
16	114.85	40.29	18.71	16.42	10.63	13.86	253	228.74
17	133.17	31.33	18.00	18.42	12.83	18.38	268	244.35
18	138.62	40.25	19.94	14.29	13.41	16.33	279	260.54
19	143.18	43.05	17.98	13.68	11.22	16.93	283.4	266.20
20	130.03	43.01	21.60	11.89	12.35	18.18	275	255.54
21	132.01	33.98	19.10	14.25	18.18	16.25	272	246.26
22	117.85	36.35	18.40	10.92	15.43	15.81	253	228.47
23	106.12	29.69	15.90	16.21	16.37	14.47	237	205.36
24	94.28	34.27	19.66	10.91	14.27	14.23	225	197.81

Daya pembangkitan dan total daya turbin angin (*wind turbine*) T1-T5 tiap jam ada pada Tabel 4.21.

Tabel 4.21 Daya Pembangkitan dan Total Daya *Wind Turbine*

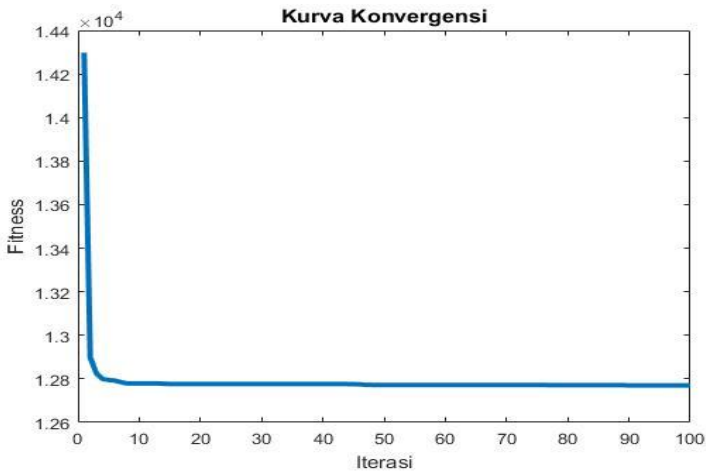
Jam	Daya Pembangkitan Turbin Angin (MW)					Total Daya (MW)
	T1	T2	T3	T4	T5	
1	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
2	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	33.65
3	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	25.30
4	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	32.65
5	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	31.95
6	4.57	4.57	4.57	4.57	4.57	22.85
7	4.23	4.23	4.23	4.23	4.23	21.15
8	5.29	5.29	5.29	5.29	5.29	26.45
9	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	37.95
10	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35
11	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	33.65
12	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17	35.85
13	7.70	7.70	7.70	7.70	7.70	38.50
14	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	36.15
15	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
16	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
17	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17	35.85
18	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	36.15
19	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35
20	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	37.95
21	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
22	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
23	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
24	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35

Kurva daya pembangkitan dari simulasi tiap jam ditunjukkan dengan Gambar 4.21.



Gambar 4.21 Kurva Daya Pembangkitan Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 1

Dari kurva daya pembangkitan tiap jam, generator dengan biaya pembangkitan paling murah dioperasikan mendekati pembangkitan maksimal (P_{max}) selain itu hal ini di sebabkan oleh pembobotan yang lebih besar pada biaya pembangkitan. Kurva konvergensi dari simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Kurva Konvergensi Kasus 3 Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 1

Data hasil simulasi kenaikan dan penurunan daya pembangkitan generator dapat dilihat pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22 Kenaikan atau Penurunan Daya Generator

Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)					
	1	2	3	4	5	6
1-2	9.77	-12.77	4.34	7.59	-2.42	0.88
2-3	-7.02	1.07	1.51	6.25	-0.19	-0.97
3-4	-12.49	11.84	1.55	-1.01	5.09	0.37
4-5	0.27	-2.92	-3.29	2.12	-5.85	0.98
5-6	-10.74	-5.21	3.73	-7.06	2.39	-1.2
6-7	-43.48	5.83	-2.78	5.37	0.43	0.95
7-8	0.34	-5.09	-1.4	-2.95	-1.52	-4.09
8-9	7.78	-1.86	-2.9	0.72	3.45	1.29
9-10	-9.97	-11.44	3.19	1.7	0.81	3.12
10-11	-9.64	10.47	0.2	0.45	-4.46	-2.74
11-12	16.12	1.02	1.56	1.06	-0.99	0.46
12-13	21.34	2.77	-2.64	0.56	0.22	-0.6
13-14	-15.38	0.11	1.75	-5.87	3.36	0.7
14-15	22.35	-2.2	-3.52	-3.07	-0.26	-1.24
15-16	-20.71	-9.17	4.15	3.78	2.57	2.38
16-17	-18.32	8.96	0.71	-2	-2.2	-4.52
17-18	-5.45	-8.92	-1.94	4.13	-0.58	2.5
18-19	-4.56	-2.8	1.96	0.61	2.19	-0.6
19-20	13.15	0.04	-3.62	1.79	-1.13	-1.25
20-21	-1.98	9.03	2.5	-2.36	-5.83	1.93
21-22	14.16	-2.37	0.7	3.33	2.75	0.44
22-23	11.73	6.66	2.5	-5.29	-0.94	1.34
23-24	11.84	-4.58	-3.76	5.3	2.1	0.24

Dari data Tabel 4.20 – 4.22, penggunaan *wind turbine* dimaksimalkan terlebih dahulu, kemudian pembangkit *thermal* baru bekerja untuk sisa beban yang akan dibangkitkan. Selain itu dapat diketahui daya yang dibangkitkan generator pembangkit *thermal* dan *wind turbine* adalah sama dengan daya total beban yang dibutuhkan. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi sudah memenuhi batasan – batasan yang digunakan, seperti *equality constraint* ($P_d = P_g$) dan *inequality constraint* (P_{min} dan P_{max}) dan *ramp rate* generator.

4.12 Studi Kasus 3 : Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 6

Pada studi kasus 3 percobaan 6 tanpa pemasangan *carbon capture plants* dengan penambahan turbin angin (*wind turbine*). Turbin angin yang digunakan adalah Sea Titan wt10000dd 10MW sebanyak 5 unit. Dengan kecepatan rata-rata angin sebesar 11.5 m/s maka satu turbin angin mampu menghasilkan daya sebesar 10 MW, jika menggunakan 5 buah turbin angin, maka total akan menghasilkan daya sebesar 50 MW. Bobot yang digunakan bobotBiaya = 0.5 untuk biaya pembangkitan dan bobotCarbon = 0.5 untuk emisi karbon dioksida. Daya pembangkitan generator, beban dan karbon ada pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Daya Pembangkitan Generator, Beban dan Karbon

Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)						Beban (MW)	Karbon (Ton)
	1	2	3	4	5	6		
1	59.13	24.57	25.78	25.15	12.81	16.33	202	159.05
2	58.89	27.83	18.51	22.17	12.91	16.07	190	152.55
3	64.36	24.88	20.83	19.31	11.98	14.36	181	155.33
4	59.13	24.41	17.54	15.89	16.22	17.19	183	147.22
5	74.31	29.75	18.47	10.20	14.09	12.24	191	165.40
6	89.66	25.29	18.59	15.25	14.15	14.22	200	182.22
7	113.78	31.29	18.06	18.01	14.54	15.15	232	219.42
8	131.96	30.60	17.53	15.28	16.95	13.24	252	237.89
9	108.85	33.23	21.04	21.92	17.43	14.58	255	221.92
10	120.78	38.54	18.56	20.18	16.89	14.69	267	238.50
11	124.22	37.82	20.00	19.57	18.85	14.91	269	244.21
12	102.49	41.16	19.06	17.31	17.70	18.42	252	222.53
13	89.12	36.93	21.78	13.84	15.58	17.23	233	201.53
14	103.85	35.12	21.26	13.05	18.47	18.07	246	217.82
15	96.88	26.49	22.59	12.71	22.09	17.01	236	201.47
16	119.58	28.42	18.40	13.53	18.14	16.70	253	224.12
17	128.34	32.25	18.64	17.65	15.55	19.70	268	242.35
18	131.12	41.06	18.57	17.20	17.31	17.57	279	254.92
19	141.12	38.29	17.11	16.86	12.58	20.07	283.4	261.50
20	133.67	32.28	21.13	20.11	13.49	16.37	275	249.23
21	121.99	34.42	20.15	23.12	16.69	17.40	272	240.24
22	110.38	28.50	19.32	25.46	13.60	17.50	253	218.23
23	90.84	32.86	21.98	22.10	14.15	16.84	237	201.64
24	76.32	29.52	22.54	26.47	17.33	15.45	225	183.33

Daya pembangkitan dan total daya turbin angin (*wind turbine*) T1-T5 tiap jam ada pada Tabel 4.24.

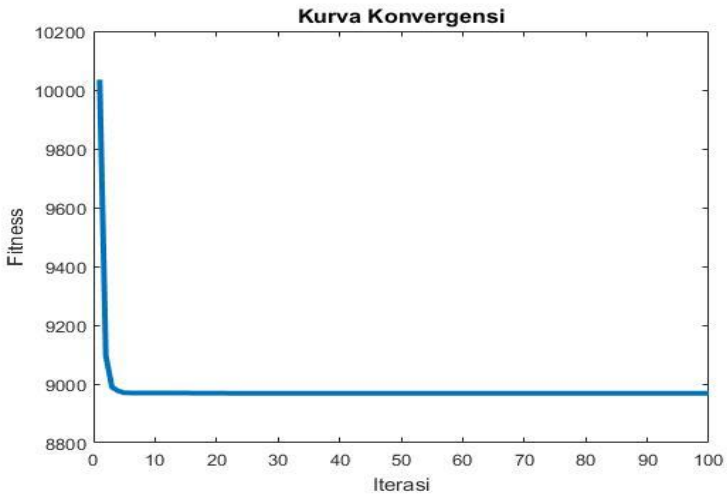
Tabel 4.24 Daya Pembangkitan dan Total Daya *Wind Turbine*

Jam	Daya Pembangkitan Turbin Angin (MW)					Total Daya (MW)
	T1	T2	T3	T4	T5	
1	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
2	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	33.65
3	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	25.30
4	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	32.65
5	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	31.95
6	4.57	4.57	4.57	4.57	4.57	22.85
7	4.23	4.23	4.23	4.23	4.23	21.15
8	5.29	5.29	5.29	5.29	5.29	26.45
9	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	37.95
10	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35
11	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	33.65
12	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17	35.85
13	7.70	7.70	7.70	7.70	7.70	38.50
14	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	36.15
15	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
16	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
17	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17	35.85
18	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	36.15
19	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35
20	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	37.95
21	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
22	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
23	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
24	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35

Kurva daya pembangkitan dari simulasi tiap jam ditunjukkan dengan Gambar 4.23 dan kurva konvergensi dari simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.24



Gambar 4.23 Kurva Daya Pembangkitan Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 6



Gambar 4.24 Kurva Konvergensi Kasus 3 Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 6

Data hasil simulasi kenaikan dan penurunan daya pembangkitan generator dapat dilihat pada Tabel 4.25.

Tabel 4.25 Kenaikan atau Penurunan Daya Generator

Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)					
	1	2	3	4	5	6
1-2	0.24	-3.26	7.27	2.98	-0.1	0.26
2-3	-5.47	2.95	-2.32	2.86	0.93	1.71
3-4	5.23	0.47	3.29	3.42	-4.24	-2.83
4-5	-15.18	-5.34	-0.93	5.69	2.13	4.95
5-6	-15.35	4.46	-0.12	-5.05	-0.06	-1.98
6-7	-24.12	-6	0.53	-2.76	-0.39	-0.93
7-8	-18.18	0.69	0.53	2.73	-2.41	1.91
8-9	23.11	-2.63	-3.51	-6.64	-0.48	-1.34
9-10	-11.93	-5.31	2.48	1.74	0.54	-0.11
10-11	-3.44	0.72	-1.44	0.61	-1.96	-0.22
11-12	21.73	-3.34	0.94	2.26	1.15	-3.51
12-13	13.37	4.23	-2.72	3.47	2.12	1.19
13-14	-14.73	1.81	0.52	0.79	-2.89	-0.84
14-15	6.97	8.63	-1.33	0.34	-3.62	1.06
15-16	-22.7	-1.93	4.19	-0.82	3.95	0.31
16-17	-8.76	-3.83	-0.24	-4.12	2.59	-3
17-18	-2.78	-8.81	0.07	0.45	-1.76	2.13
18-19	-10	2.77	1.46	0.34	4.73	-2.5
19-20	7.45	6.01	-4.02	-3.25	-0.91	3.7
20-21	11.68	-2.14	0.98	-3.01	-3.2	-1.03
21-22	11.61	5.92	0.83	-2.34	3.09	-0.1
22-23	19.54	-4.36	-2.66	3.36	-0.55	0.66
23-24	14.52	3.34	-0.56	-4.37	-3.18	1.39

Dari data Tabel 4.23 – 4.25, penggunaan *wind turbine* dimaksimalkan terlebih dahulu, kemudian pembangkit *thermal* baru bekerja untuk sisa beban yang akan dibangkitkan. Selain itu dapat diketahui daya yang dibangkitkan generator pembangkit *thermal* dan *wind turbine* adalah sama dengan daya total beban yang dibutuhkan. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi sudah memenuhi batasan – batasan yang digunakan, seperti *equality constraint* ($P_d = P_g$) dan *inequality constraint* (P_{min} dan P_{max}) dan *ramp rate* generator.

4.13 Studi Kasus 3 : Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 11

Pada studi kasus 3 percobaan 11 tanpa pemasangan *carbon capture plants* dengan penambahan turbin angin (*wind turbine*). Turbin angin yang digunakan adalah Sea Titan wt10000dd 10MW sebanyak 5 unit. Dengan kecepatan rata-rata angin sebesar 11.5 m/s maka satu turbin angin mampu menghasilkan daya sebesar 10 MW, jika menggunakan 5 buah turbin angin, maka total akan menghasilkan daya sebesar 50 MW. Bobot yang digunakan bobotBiaya = 0 untuk biaya pembangkitan dan bobotCarbon = 1 untuk emisi karbon dioksida. Daya pembangkitan generator, beban dan karbon ada pada Tabel 4.26.

Tabel 4.26 Daya Pembangkitan Generator, Beban dan Karbon

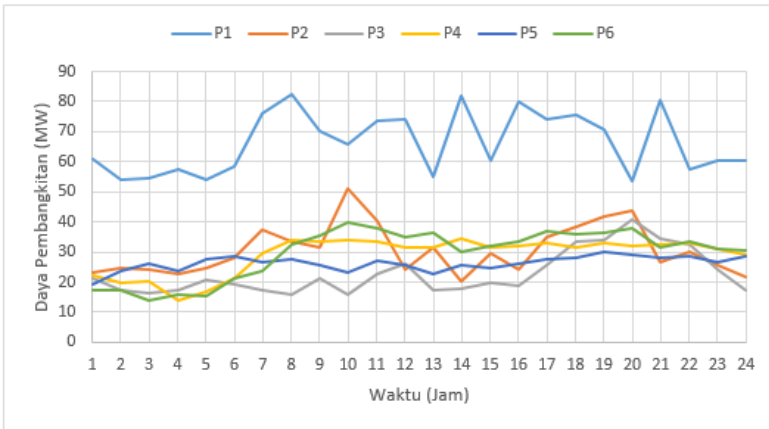
Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)						Beban (MW)	Karbon (Ton)
	1	2	3	4	5	6		
1	60.77	23.22	21.08	22.17	19.13	17.40	202	156.11
2	53.90	24.79	17.30	19.64	23.59	17.14	190	145.99
3	54.64	24.31	16.50	20.26	26.32	13.70	181	144.10
4	57.42	22.47	17.30	13.68	23.83	15.67	183	143.77
5	53.85	24.80	20.77	16.88	27.64	15.12	191	149.02
6	58.61	27.94	19.40	21.13	28.68	21.41	200	163.96
7	76.24	37.40	17.48	29.54	26.74	23.44	232	198.21
8	82.28	33.48	15.72	33.90	27.79	32.38	252	207.97
9	69.99	31.59	21.10	33.51	25.59	35.28	255	198.66
10	65.81	50.93	15.63	34.18	23.23	39.86	267	213.00
11	73.75	40.50	22.63	33.50	26.96	38.03	269	218.25
12	73.93	24.16	26.13	31.58	25.49	34.85	252	199.27
13	55.23	31.68	17.29	31.50	22.53	36.25	233	175.31
14	81.75	20.29	17.71	34.49	25.62	29.99	246	191.48
15	60.64	29.45	19.66	31.28	24.51	32.23	236	179.51
16	80.22	24.23	18.69	32.17	25.99	33.46	253	197.39
17	74.33	34.91	25.48	32.95	27.74	36.73	268	214.77
18	75.48	38.60	33.32	31.65	280	35.78	279	228.61
19	70.76	42.04	33.99	33.03	29.82	36.40	283.4	229.76
20	53.46	43.82	40.83	32.14	29.13	37.66	275	219.77
21	80.45	26.77	34.55	32.60	27.92	31.47	272	218.95
22	57.41	30.01	32.43	32.94	28.58	33.39	253	194.90
23	60.38	25.67	24.18	30.82	26.74	30.98	237	179.87
24	60.32	21.80	17.46	29.05	28.63	30.37	225	166.83

Daya pembangkitan dan total daya turbin angin (*wind turbine*) T1-T5 tiap jam ada pada Tabel 4.27.

Tabel 4.27 Daya Pembangkitan dan Total Daya *Wind Turbine*

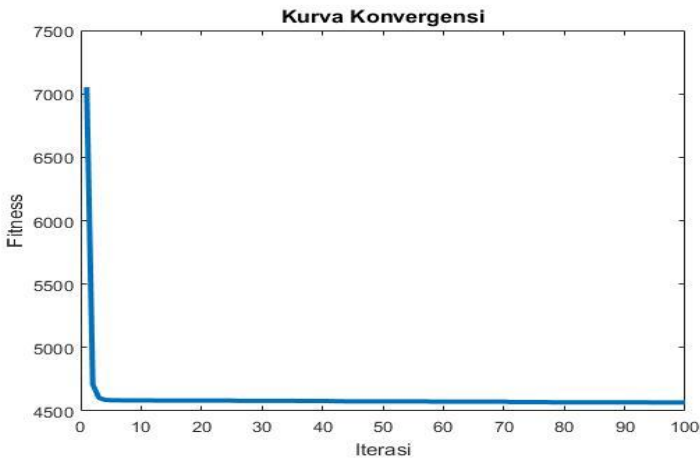
Jam	Daya Pembangkitan Turbin Angin (MW)					Total Daya (MW)
	T1	T2	T3	T4	T5	
1	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
2	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	33.65
3	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	25.30
4	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	32.65
5	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	31.95
6	4.57	4.57	4.57	4.57	4.57	22.85
7	4.23	4.23	4.23	4.23	4.23	21.15
8	5.29	5.29	5.29	5.29	5.29	26.45
9	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	37.95
10	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35
11	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	33.65
12	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17	35.85
13	7.70	7.70	7.70	7.70	7.70	38.50
14	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	36.15
15	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
16	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
17	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17	35.85
18	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	36.15
19	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35
20	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	37.95
21	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
22	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
23	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
24	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35

Kurva daya pembangkitan dari simulasi tiap jam ditunjukkan dengan Gambar 4.25.



Gambar 4.25 Kurva Daya Pembangkitan Tanpa CCP Dengan WT Percobaan 11

Dari kurva daya pembangkitan tiap jam, generator dengan emisi karbon dioksida sedikit untuk tiap MW pembangkitannya dioperasikan mendekati pembangkitan maksimal (P_{max}) selain itu hal ini di sebabkan oleh pembobotan yang lebih besar pada emisi karbon dioksida. Kurva konvergensi dari simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.26.



Gambar 4.26 Kurva Konvergensi Kasus 3 Tanpa CCP Dengan WT Perc. 11

Data hasil simulasi kenaikan dan penurunan daya pembangkitan generator dapat dilihat pada Tabel 4.28.

Tabel 4.28 Kenaikan atau Penurunan Daya Generator

Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)					
	1	2	3	4	5	6
1-2	6.87	-1.57	3.78	2.53	-4.46	0.26
2-3	-0.74	0.48	0.8	-0.62	-2.73	3.44
3-4	-2.78	1.84	-0.8	6.58	2.49	-1.97
4-5	3.57	-2.33	-3.47	-3.2	-3.81	0.55
5-6	-4.76	-3.14	1.37	-4.25	-1.04	-6.29
6-7	-17.63	-9.46	1.92	-8.41	1.94	-2.03
7-8	-6.04	3.92	1.76	-4.36	-1.05	-8.94
8-9	12.29	1.89	-5.38	0.39	2.2	-2.9
9-10	4.18	-19.34	5.47	-0.67	2.36	-4.58
10-11	-7.94	10.43	-7	0.68	-3.73	1.83
11-12	-0.18	16.34	-3.5	1.92	1.47	3.18
12-13	18.7	-7.52	8.84	0.08	2.96	-1.4
13-14	-26.52	11.39	-0.42	-2.99	-3.09	6.26
14-15	21.11	-9.16	-1.95	3.21	1.11	-2.24
15-16	-19.58	5.22	0.97	-0.89	-1.48	-1.23
16-17	5.89	-10.68	-6.79	-0.78	-1.75	-3.27
17-18	-1.15	-3.69	-7.84	1.3	-0.26	0.95
18-19	4.72	-3.44	-0.67	-1.38	-1.82	-0.62
19-20	17.3	-1.78	-6.84	0.89	0.69	-1.26
20-21	-26.99	17.05	6.28	-0.46	1.21	6.19
21-22	23.04	-3.24	2.12	-0.34	-0.66	-1.92
22-23	-2.97	4.34	8.25	2.12	1.84	2.41
23-24	0.06	3.87	6.72	1.77	-1.89	0.61

Dari data Tabel 4.26 – 4.28, penggunaan *wind turbine* dimaksimalkan terlebih dahulu, kemudian pembangkit *thermal* baru bekerja untuk sisa beban yang akan dibangkitkan. Selain itu dapat diketahui daya yang dibangkitkan generator pembangkit *thermal* dan *wind turbine* adalah sama dengan daya total beban yang dibutuhkan. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi sudah memenuhi batasan – batasan yang digunakan, seperti *equality constraint* ($P_d = P_g$) dan *inequality constraint* (P_{min} dan P_{max}) dan *ramp rate* generator.

4.14 Studi Kasus 4 : Dengan CCP Dengan WT Percobaan 1

Pada studi kasus 4 percobaan 1 dengan pemasangan *carbon capture plants* dengan penambahan turbin angin (*wind turbine*). Turbin angin yang digunakan adalah Sea Titan wt10000dd 10MW sebanyak 5 unit. Dengan kecepatan rata-rata angin sebesar 11.5 m/s maka satu turbin angin mampu menghasilkan daya sebesar 10 MW, jika menggunakan 5 buah turbin angin, maka total akan menghasilkan daya sebesar 50 MW. Bobot yang digunakan bobotBiaya = 1 untuk biaya pembangkitan dan bobotCarbon = 0 untuk emisi karbon dioksida. Daya pembangkitan generator, CPP, beban dan karbon ada pada Tabel 4.29.

Tabel 4.29 Daya Pembangkitan Generator, Beban, Karbon dan CCP

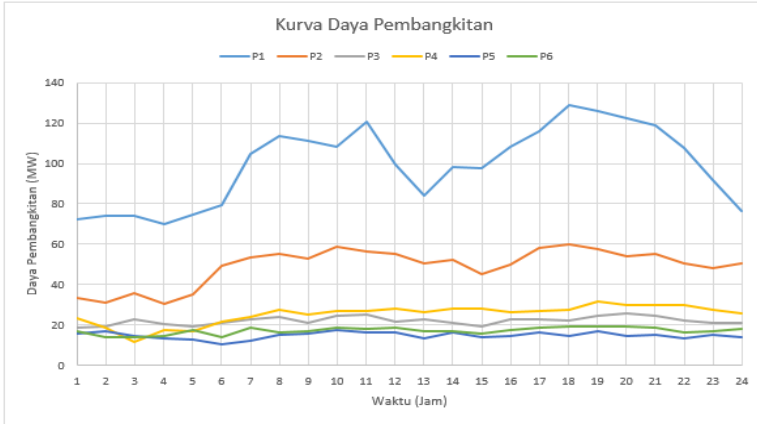
Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)						Beban (MW)	Karbon (Ton)	CCP (MW)
	1	2	3	4	5	6			
1	72.48	33.55	18.83	23.29	15.50	16.92	202	105.05	16.81
2	74.17	31.15	19.03	18.53	16.73	13.96	190	98.90	17.20
3	74.05	35.66	22.99	11.59	14.70	13.90	181	104.98	17.17
4	69.86	30.61	20.42	17.21	13.65	14.82	183	97.910	16.20
5	74.64	35.45	19.47	16.62	12.49	17.70	191	104.85	17.31
6	79.22	49.45	20.89	21.36	10.59	14.01	200	122.31	18.37
7	104.66	53.29	22.52	23.97	12.21	18.46	232	138.63	24.27
8	113.68	55.01	24.13	27.62	15.09	16.38	252	145.40	26.36
9	111.04	53.11	21.23	25.15	15.47	16.79	255	138.65	25.75
10	108.52	59.02	24.37	26.73	17.61	18.54	267	151.91	25.16
11	120.71	56.69	25.01	26.91	16.16	17.88	269	151.01	27.99
12	99.27	55.41	21.56	28.16	16.11	18.64	252	142.70	23.02
13	84.06	50.78	22.65	26.31	13.49	16.68	233	132.33	19.49
14	98.11	52.01	21.32	27.82	16.48	16.84	246	136.79	22.75
15	97.96	45.35	19.35	27.98	14.05	15.78	236	124.72	22.71
16	108.31	49.67	23.05	26.61	14.76	17.48	253	137.10	25.11
17	116.16	58.25	22.54	27.21	16.30	18.62	268	149.88	26.93
18	129.20	60.14	22.20	27.48	14.70	19.07	279	153.82	29.96
19	125.94	57.60	24.36	31.42	16.68	19.24	283.4	155.48	29.20
20	122.50	54.13	25.65	29.79	14.38	19.02	275	150.40	28.40
21	118.86	54.98	24.30	29.82	14.97	18.39	272	148.95	27.56
22	107.47	50.52	22.14	29.97	13.56	16.03	253	136.68	24.92
23	91.96	47.87	20.79	27.62	15.16	16.69	237	129.37	21.32
24	76.50	50.27	21.07	25.52	14.05	17.97	225	129.40	17.74

Daya pembangkitan turbin angin (*wind turbine*) T1-T5 tiap jam ada pada Tabel 4.30.

Tabel 4.30 Daya Pembangkitan Generator, Beban dan Carbon

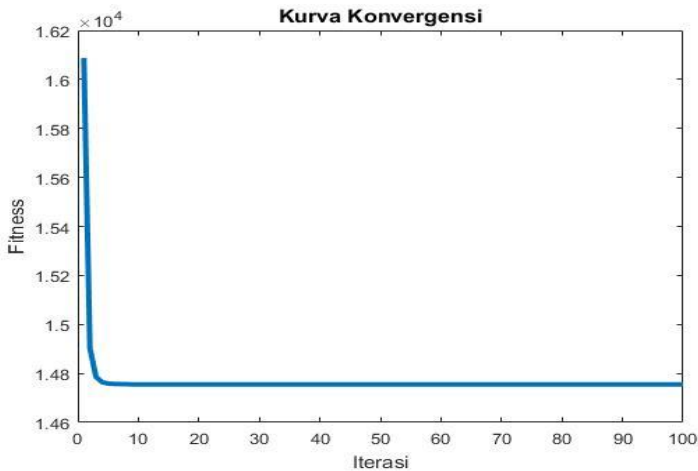
Jam	Daya Pembangkitan Turbin Angin (MW)					Total Daya (MW)
	T1	T2	T3	T1	T2	
1	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
2	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	33.65
3	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	25.30
4	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	32.65
5	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	31.95
6	4.57	4.57	4.57	4.57	4.57	22.85
7	4.23	4.23	4.23	4.23	4.23	21.15
8	5.29	5.29	5.29	5.29	5.29	26.45
9	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	37.95
10	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35
11	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	33.65
12	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17	35.85
13	7.70	7.70	7.70	7.70	7.70	38.50
14	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	36.15
15	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
16	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
17	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17	35.85
18	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	36.15
19	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35
20	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	37.95
21	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
22	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
23	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
24	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35

Kurva daya pembangkitan dari simulasi tiap jam ditunjukkan dengan Gambar 4.27 .



Gambar 4.27 Kurva Daya Pembangkitan Dengan CCP Dengan WT Perc. 1

Dari kurva daya pembangkitan tiap jam, generator dengan biaya pembangkitan paling murah dioperasikan mendekati pembangkitan maksimal (P_{max}) selain itu hal ini di sebabkan oleh pembobotan yang lebih besar pada biaya pembangkitan. Kurva konvergensi dari simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.28.



Gambar 4.28 Kurva Konvergensi Kasus 4 Dengan CCP Dengan WT Perc. 1

Data hasil simulasi kenaikan dan penurunan daya pembangkitan generator dapat dilihat pada Tabel 4.31.

Tabel 4.31 Kenaikan atau Penurunan Daya Generator

Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)					
	1	2	3	4	5	6
1-2	-1.69	2.4	-0.2	4.76	-1.23	2.96
2-3	0.12	-4.51	-3.96	6.94	2.03	0.06
3-4	4.19	5.05	2.57	-5.62	1.05	-0.92
4-5	-4.78	-4.84	0.95	0.59	1.16	-2.88
5-6	-4.58	-14	-1.42	-4.74	1.9	3.69
6-7	-25.44	-3.84	-1.63	-2.61	-1.62	-4.45
7-8	-9.02	-1.72	-1.61	-3.65	-2.88	2.08
8-9	2.64	1.9	2.9	2.47	-0.38	-0.41
9-10	2.52	-5.91	-3.14	-1.58	-2.14	-1.75
10-11	-12.19	2.33	-0.64	-0.18	1.45	0.66
11-12	21.44	1.28	3.45	-1.25	0.05	-0.76
12-13	15.21	4.63	-1.09	1.85	2.62	1.96
13-14	-14.05	-1.23	1.33	-1.51	-2.99	-0.16
14-15	0.15	6.66	1.97	-0.16	2.43	1.06
15-16	-10.35	-4.32	-3.7	1.37	-0.71	-1.7
16-17	-7.85	-8.58	0.51	-0.6	-1.54	-1.14
17-18	-13.04	-1.89	0.34	-0.27	1.6	-0.45
18-19	3.26	2.54	-2.16	-3.94	-1.98	-0.17
19-20	3.44	3.47	-1.29	1.63	2.3	0.22
20-21	3.64	-0.85	1.35	-0.03	-0.59	0.63
21-22	11.39	4.46	2.16	-0.15	1.41	2.36
22-23	15.51	2.65	1.35	2.35	-1.6	-0.66
23-24	15.46	-2.4	-0.28	2.1	1.11	-1.28

Dari data Tabel 4.29 - 4.31, penggunaan *wind turbine* dimaksimalkan terlebih dahulu, kemudian pembangkit *thermal* baru bekerja untuk sisa beban yang akan dibangkitkan. Selain itu dapat diketahui daya yang dibangkitkan generator adalah sama dengan daya total beban yang dibutuhkan ditambah daya *carbon capture plants*. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi sudah memenuhi batasan – batasan yang digunakan, seperti *equality constraint* ($P_d = P_g + P_s$) dan *inequality constraint* (P_{min} dan P_{max}) dan *ramp rate* generator.

4.15 Studi Kasus 4 : Dengan CCP Dengan WT Percobaan 6

Pada studi kasus 4 percobaan 6 dengan pemasangan *carbon capture plants* dengan penambahan turbin angin (*wind turbine*). Turbin angin yang digunakan adalah Sea Titan wt10000dd 10MW sebanyak 5 unit. Dengan kecepatan rata-rata angin sebesar 11.5 m/s maka satu turbin angin mampu menghasilkan daya sebesar 10 MW, jika menggunakan 5 buah turbin angin, maka total akan menghasilkan daya sebesar 50 MW. Bobot yang digunakan bobotBiaya = 1 untuk biaya pembangkitan dan bobotCarbon = 0 untuk emisi karbon dioksida. Daya pembangkitan generator, CPP, beban dan karbon ada pada Tabel 4.32.

Tabel 4.32 Daya Pembangkitan Generator, Beban, Karbon dan CCP

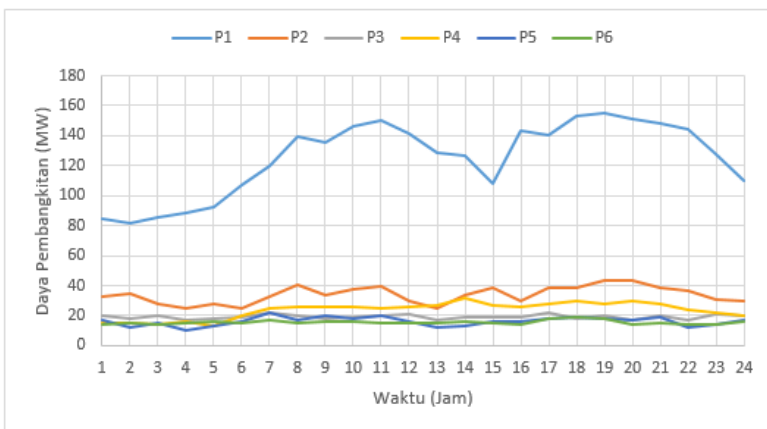
Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)						Beban (MW)	Karbon (Ton)	CCP (MW)
	1	2	3	4	5	6			
1	84.97	32.23	19.75	14.74	17.45	14.33	202	101.91	19.70
2	81.57	34.67	17.59	14.83	11.67	14.96	190	99.66	18.91
3	85.14	27.33	20.32	13.99	14.72	13.96	181	95.01	19.74
4	88.17	24.45	16.87	15.72	10.10	15.51	183	87.99	20.44
5	92.74	28.06	17.99	12.88	13.13	15.76	191	94.70	21.50
6	106.73	25.16	18.63	19.81	16.42	15.16	200	98.47	24.75
7	119.84	33.08	22.28	24.72	22.18	16.53	232	120.22	27.79
8	139.08	40.81	19.95	25.41	17.30	15.25	252	127.23	32.25
9	135.29	33.27	17.76	26.26	20.27	15.58	255	116.93	31.37
10	146.40	37.91	19.37	25.61	18.25	16.02	267	125.52	33.94
11	150.28	39.87	19.50	25.19	20.38	15.01	269	128.62	34.84
12	141.58	29.99	20.70	25.79	16.17	14.73	252	115.01	32.83
13	128.30	25.32	17.37	26.56	12.08	14.61	233	101.61	29.75
14	126.64	33.34	19.04	31.22	12.95	16.00	246	116.30	29.36
15	107.64	38.22	19.35	26.55	16.03	14.95	236	117.55	24.96
16	143.20	29.31	19.04	26.02	16.06	14.33	253	112.26	33.20
17	140.80	38.34	22.22	27.56	17.96	17.90	268	130.60	32.65
18	153.34	38.82	18.34	30.04	18.97	18.87	279	131.06	35.55
19	154.63	43.51	19.68	27.59	18.40	18.08	283.4	136.51	35.85
20	150.98	43.91	16.75	29.35	16.64	14.44	275	130.02	35.01
21	147.78	38.69	19.62	27.71	18.78	15.45	272	127.67	34.27
22	143.96	36.91	17.30	23.64	12.40	13.92	253	116.41	33.38
23	127.96	30.29	20.46	21.84	14.24	13.65	237	109.25	29.67
24	109.92	30.01	20.14	20.42	16.81	15.81	225	107.53	25.49

Daya pembangkitan turbin angin (*wind turbine*) T1-T5 tiap jam ada pada Tabel 4.33.

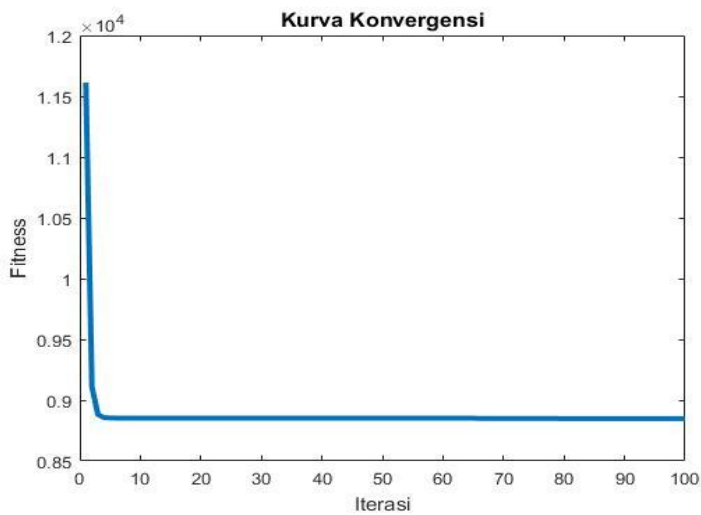
Tabel 4.33 Daya Pembangkitan Generator, Beban dan Carbon

Jam	Daya Pembangkitan Turbin Angin (MW)					Total Daya (MW)
	T1	T2	T3	T1	T2	
1	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
2	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	33.65
3	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	25.30
4	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	32.65
5	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	31.95
6	4.57	4.57	4.57	4.57	4.57	22.85
7	4.23	4.23	4.23	4.23	4.23	21.15
8	5.29	5.29	5.29	5.29	5.29	26.45
9	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	37.95
10	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35
11	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	33.65
12	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17	35.85
13	7.70	7.70	7.70	7.70	7.70	38.50
14	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	36.15
15	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
16	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
17	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17	35.85
18	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	36.15
19	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35
20	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	37.95
21	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
22	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
23	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
24	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35

Kurva daya pembangkitan dari simulasi tiap jam ditunjukkan dengan Gambar 4.29 dan kurva konvergensi dari simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.30.



Gambar 4.29 Kurva Daya Pembangkitan Dengan CCP Dengan WT Perc. 6



Gambar 4.30 Kurva Konvergensi Kasus 4 Dengan CCP Dengan WT Perc. 6

Data hasil simulasi kenaikan dan penurunan daya pembangkitan generator dapat dilihat pada Tabel 4.34.

Tabel 4.34 Kenaikan atau Penurunan Daya Generator

Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)					
	1	2	3	4	5	6
1-2	3.4	-2.44	2.16	-0.09	5.78	-0.63
2-3	-3.57	7.34	-2.73	0.84	-3.05	1
3-4	-3.03	2.88	3.45	-1.73	4.62	-1.55
4-5	-4.57	-3.61	-1.12	2.84	-3.03	-0.25
5-6	-13.99	2.9	-0.64	-6.93	-3.29	0.6
6-7	-13.11	-7.92	-3.65	-4.91	-5.76	-1.37
7-8	-19.24	-7.73	2.33	-0.69	4.88	1.28
8-9	3.79	7.54	2.19	-0.85	-2.97	-0.33
9-10	-11.11	-4.64	-1.61	0.65	2.02	-0.44
10-11	-3.88	-1.96	-0.13	0.42	-2.13	1.01
11-12	8.7	9.88	-1.2	-0.6	4.21	0.28
12-13	13.28	4.67	3.33	-0.77	4.09	0.12
13-14	1.66	-8.02	-1.67	-4.66	-0.87	-1.39
14-15	19	-4.88	-0.31	4.67	-3.08	1.05
15-16	-35.56	8.91	0.31	0.53	-0.03	0.62
16-17	2.4	-9.03	-3.18	-1.54	-1.9	-3.57
17-18	-12.54	-0.48	3.88	-2.48	-1.01	-0.97
18-19	-1.29	-4.69	-1.34	2.45	0.57	0.79
19-20	3.65	-0.4	2.93	-1.76	1.76	3.64
20-21	3.2	5.22	-2.87	1.64	-2.14	-1.01
21-22	3.82	1.78	2.32	4.07	6.38	1.53
22-23	16	6.62	-3.16	1.8	-1.84	0.27
23-24	18.04	0.28	0.32	1.42	-2.57	-2.16

Dari data Tabel 4.32 - 4.34, penggunaan *wind turbine* dimaksimalkan terlebih dahulu, kemudian pembangkit *thermal* baru bekerja untuk sisa beban yang akan dibangkitkan. Selain itu dapat diketahui daya yang dibangkitkan generator adalah sama dengan daya total beban yang dibutuhkan ditambah daya *carbon capture plants*. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi sudah memenuhi batasan – batasan yang digunakan, seperti *equality constraint* ($P_d = P_g + P_s$) dan *inequality constraint* (P_{min} dan P_{max}) dan *ramp rate* generator.

4.16 Studi Kasus 4 : Dengan CCP Dengan WT Percobaan 11

Pada studi kasus 4 percobaan 11 dengan pemasangan *carbon capture plants* dengan penambahan turbin angin (*wind turbine*). Turbin angin yang digunakan adalah Sea Titan wt10000dd 10MW sebanyak 5 unit. Dengan kecepatan rata-rata angin sebesar 11.5 m/s maka satu turbin angin mampu menghasilkan daya sebesar 10 MW, jika menggunakan 5 buah turbin angin, maka total akan menghasilkan daya sebesar 50 MW. Bobot yang digunakan bobotBiaya = 1 untuk biaya pembangkitan dan bobotCarbon = 0 untuk emisi karbon dioksida. Daya pembangkitan generator, CPP, beban dan karbon ada pada Tabel 4.35.

Tabel 4.35 Daya Pembangkitan Generator, Beban, Karbon dan CCP

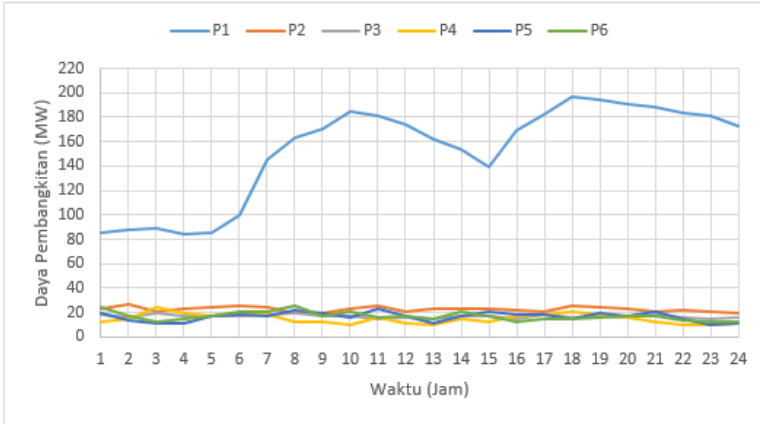
Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)						Beban (MW)	Karbon (Ton)	CCP (MW)
	1	2	3	4	5	6			
1	85.41	23.63	18.17	11.90	19.71	24.74	202	97.79	19.80
2	87.99	26.72	15.61	15.23	13.47	17.75	190	92.16	20.40
3	89.05	21.34	19.03	24.00	10.83	12.12	181	88.29	20.65
4	84.57	22.73	17.75	19.18	11.34	14.41	183	87.54	19.61
5	85.64	24.39	17.69	17.72	16.63	16.83	191	93.18	19.86
6	99.57	26.01	16.74	19.28	18.42	20.22	200	100.55	23.09
7	145.54	24.73	18.43	17.96	17.72	20.20	232	108.33	33.75
8	163.79	20.03	19.31	12.25	22.36	25.79	252	110.93	37.98
9	170.42	20.09	17.24	12.18	20.04	16.59	255	101.52	39.51
10	184.81	23.75	17.00	10.26	16.27	20.40	267	108.63	42.85
11	181.53	25.83	15.11	15.51	23.71	15.77	269	110.18	42.09
12	174.36	21.07	15.69	11.06	17.54	16.85	252	100.17	40.43
13	162.45	23.00	15.13	10.08	10.62	14.80	233	94.65	37.67
14	153.80	23.31	16.59	14.89	16.61	20.29	246	104.19	35.66
15	138.87	23.54	16.68	12.40	20.96	17.53	236	100.55	32.20
16	169.23	21.62	15.25	17.17	17.88	12.87	253	99.07	39.24
17	182.77	21.22	18.75	18.86	18.51	14.41	268	107.37	42.38
18	196.53	25.53	15.40	21.15	14.72	15.08	279	110.83	45.57
19	194.90	24.77	17.62	18.16	19.86	15.92	283.4	113.86	45.19
20	190.91	23.08	16.17	16.02	17.60	17.54	275	108.78	44.27
21	188.45	21.03	17.86	12.42	20.75	16.95	272	107.26	43.69
22	183.91	21.46	15.74	10.55	14.73	13.26	253	98.15	42.64
23	181.53	20.37	15.29	10.13	10.08	12.92	237	93.43	42.09
24	173.01	20.08	16.01	11.44	11.27	12.45	225	93.15	40.12

Daya pembangkitan turbin angin (*wind turbine*) T1-T5 tiap jam ada pada Tabel 4.36.

Tabel 4.36 Daya Pembangkitan Generator, Beban dan Carbon

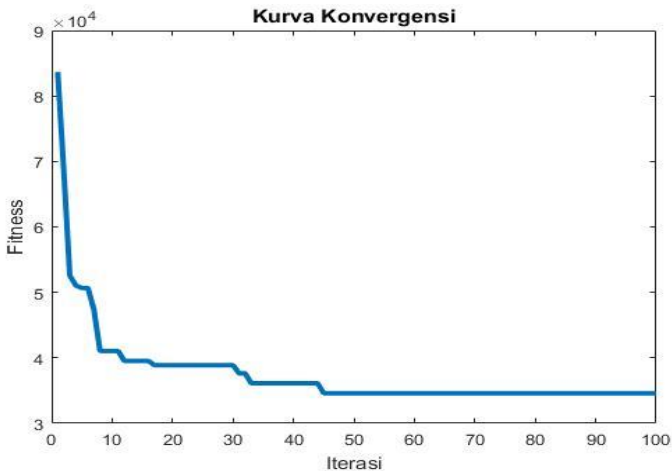
Jam	Daya Pembangkitan Turbin Angin (MW)					Total Daya (MW)
	T1	T2	T3	T1	T2	
1	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
2	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	33.65
3	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	25.30
4	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	32.65
5	6.39	6.39	6.39	6.39	6.39	31.95
6	4.57	4.57	4.57	4.57	4.57	22.85
7	4.23	4.23	4.23	4.23	4.23	21.15
8	5.29	5.29	5.29	5.29	5.29	26.45
9	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	37.95
10	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35
11	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	33.65
12	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17	35.85
13	7.70	7.70	7.70	7.70	7.70	38.50
14	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	36.15
15	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
16	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
17	7.17	7.17	7.17	7.17	7.17	35.85
18	7.23	7.23	7.23	7.23	7.23	36.15
19	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35
20	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59	37.95
21	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
22	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
23	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	38.25
24	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47	37.35

Kurva daya pembangkitan dari simulasi tiap jam ditunjukkan dengan Gambar 4.31.



Gambar 4.31 Kurva Daya Pembangkitan Dengan CCP Dengan WT Perc.11

Dari kurva daya pembangkitan tiap jam, generator dengan emisi karbon dioksida sedikit untuk tiap MW pembangkitannya dioperasikan mendekati pembangkitan maksimal (P_{max}) selain itu hal ini di sebabkan oleh pembobotan yang lebih besar pada emisi karbon dioksida. Kurva konvergensi dari simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.32.



Gambar 4.32 Kurva Konvergensi Kasus 4 Dengan CCP Dengan WT Perc. 11

Data hasil simulasi kenaikan dan penurunan daya pembangkitan generator dapat dilihat pada Tabel 4.37.

Tabel 4.37 Kenaikan atau Penurunan Daya Generator

Jam	Daya Pembangkitan Generator (MW)					
	1	2	3	4	5	6
1-2	-2.58	-3.09	2.56	-3.33	6.24	6.99
2-3	-1.06	5.38	-3.42	-8.77	2.64	5.63
3-4	4.48	-1.39	1.28	4.82	-0.51	-2.29
4-5	-1.07	-1.66	0.06	1.46	-5.29	-2.42
5-6	-13.93	-1.62	0.95	-1.56	-1.79	-3.39
6-7	-45.97	1.28	-1.69	1.32	0.7	0.02
7-8	-18.25	4.7	-0.88	5.71	-4.64	-5.59
8-9	-6.63	-0.06	2.07	0.07	2.32	9.2
9-10	-14.39	-3.66	0.24	1.92	3.77	-3.81
10-11	3.28	-2.08	1.89	-5.25	-7.44	4.63
11-12	7.17	4.76	-0.58	4.45	6.17	-1.08
12-13	11.91	-1.93	0.56	0.98	6.92	2.05
13-14	8.65	-0.31	-1.46	-4.81	-5.99	-5.49
14-15	14.93	-0.23	-0.09	2.49	-4.35	2.76
15-16	-30.36	1.92	1.43	-4.77	3.08	4.66
16-17	-13.54	0.4	-3.5	-1.69	-0.63	-1.54
17-18	-13.76	-4.31	3.35	-2.29	3.79	-0.67
18-19	1.63	0.76	-2.22	2.99	-5.14	-0.84
19-20	3.99	1.69	1.45	2.14	2.26	-1.62
20-21	2.46	2.05	-1.69	3.6	-3.15	0.59
21-22	4.54	-0.43	2.12	1.87	6.02	3.69
22-23	2.38	1.09	0.45	0.42	4.65	0.34
23-24	8.52	0.29	-0.72	-1.31	-1.19	0.47

Dari data Tabel 4.35 - 4.37, penggunaan *wind turbine* dimaksimalkan terlebih dahulu, kemudian pembangkit *thermal* baru bekerja untuk sisa beban yang akan dibangkitkan. Selain itu dapat diketahui daya yang dibangkitkan generator adalah sama dengan daya total beban yang dibutuhkan ditambah daya *carbon capture plants*. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi sudah memenuhi batasan – batasan yang digunakan, seperti *equality constraint* ($P_d = P_g + P_s$) dan *inequality constraint* (P_{min} dan P_{max}) dan *ramp rate* generator.

Analisa dan data dari studi kasus 3 tanpa CCP dengan WT dan studi kasus 4 dengan CCP dengan WT terdapat pada Tabel 4.38 - 4.39.

Tabel 4.38 Hasil Simulasi Studi Kasus 3 Tanpa CCP Dengan WT

Percobaan	Bobot 1 (Biaya)	Bobot 2 (Emisi Karbon)	Total Biaya (\$)	Total Emisi CO ₂ (Ton)
1	1.0	0.0	12762.46	5149.84
6	0.5	0.5	12889.97	5042.63
11	0.0	1.0	14121.94	4535.46

Tabel 4.39 Hasil Simulasi Studi Kasus 4 Dengan CCP Dengan WT

Percobaan	Bobot 1 (Biaya)	Bobot 2 (Emisi Karbon)	Total Biaya (\$)	Total Emisi CO ₂ (Ton)
1	1.0	0.0	14754.62	3187.23
6	0.5	0.5	14947.26	2748.06
11	0.0	1.0	15592.76	2430.46

Studi kasus 3, unit pembangkit tanpa *carbon capture plants* dengan *wind turbine* pada percobaan 1 (bobotBiaya = 1 dan bobotCarbon = 0) didapatkan biaya pembangkitan sebesar 12762.46\$ dengan emisi karbon dioksida yang dihasilkan sebesar 5149.84 Ton. Untuk studi kasus 4, unit pembangkit dengan *carbon capture plants* dengan *wind turbine* pada percobaan 1 (bobotBiaya = 1 dan bobotCarbon = 0) didapatkan biaya pembangkitan sebesar 14754.62\$ dengan emisi karbon dioksida yang dihasilkan sebesar 3187.23Ton.

Studi kasus 3, unit pembangkit tanpa *carbon capture plants* dengan *wind turbine* pada percobaan 6 (bobotBiaya = 0.5 dan bobotCarbon = 0.5) didapatkan biaya pembangkitan sebesar 12889.97\$ dengan emisi karbon dioksida yang dihasilkan sebesar 5042.63 Ton. Untuk studi kasus 4, unit pembangkit dengan *carbon capture plants* pada percobaan 6 (bobotBiaya = 0.5 dan bobotCarbon = 0.5) didapatkan biaya pembangkitan sebesar 14947.26\$ dengan emisi karbon dioksida yang dihasilkan sebesar 2748.06 Ton.

Studi kasus 3, unit pembangkit tanpa *carbon capture plants* dengan *wind turbine* pada percobaan 11 (bobotBiaya = 0 dan bobotCarbon = 1) didapatkan biaya pembangkitan sebesar 15592.76\$ dengan emisi karbon dioksida yang dihasilkan sebesar 2430.46 Ton. Untuk studi kasus 4, unit pembangkit dengan *carbon capture plants* dengan *wind turbine* pada percobaan 11 (bobotBiaya = 0 dan bobotCarbon = 1) didapatkan biaya

pembangkitan sebesar 15592.76\$ dengan emisi karbon dioksida sebesar 2430.46 Ton. Perbandingan studi kasus pada Tabel 4.40 - 4.41.

Tabel 4.40 Hasil Perbandingan 1

Perc.	Total Biaya (\$)		Selisih Biaya (\$)	Total Karbon(Ton)		Selisih Emisi (Ton)
	Kasus 1	Kasus 3		Kasus 1	Kasus 3	
1	15210.65	12762.46	2448.19	6135.51	5149.84	985.67
6	15425.24	12889.97	2535.27	5902.97	5042.63	860.34
11	16779.02	14121.94	2657.08	5395.76	4535.46	860.30

Pada studi kasus 1 tanpa *carbon capture plants* (bobotBiaya = 1 dan bobotCarbon = 0) didapatkan total biaya pembangkitan 15210.65\$ dan total emisi yang dihasilkan sebesar 6135.51 Ton. Sedangkan jika ditambah dengan pemasangan *wind turbine* pada studi kasus 3 dengan bobot sama, didapatkan total biaya pembangkitan 12762.46 \$ dan total emisi yang dihasilkan sebesar 5149.84. Selisih total biaya sebesar 2448.19\$ dan selisih karbon yang dihasilkan sebesar 985.67 Ton.

Tabel 4.41 Hasil Perbandingan 2

Perc.	Total Biaya (\$)		Selisih Biaya (\$)	Total Karbon(Ton)		Selisih Emisi (Ton)
	Kasus 2	Kasus 4		Kasus 2	Kasus 4	
1	17827.84	14754.62	3073.22	3609.57	3187.23	422.34
6	18153.71	14947.26	3206.45	3086.49	2748.06	338.43
11	18680.81	15592.76	3088.05	2741.18	2430.46	310.72

Pada studi kasus 2 dengan *carbon capture plants* (bobotBiaya = 1 dan bobotCarbon = 0) didapatkan total biaya pembangkitan 17827.84\$ dan total emisi yang dihasilkan sebesar 3609.57 Ton. Sedangkan jika ditambah dengan pemasangan *wind turbine* pada studi kasus 4 dengan bobot sama, didapatkan total biaya pembangkitan 14754.62\$ dan total emisi yang dihasilkan sebesar 3187.23. Selisih total biaya sebesar 2448.19\$ dan selisih karbon yang dihasilkan sebesar 985.67 Ton.

Hasil perbandingan setiap studi kasus selanjutnya tersedia pada Tabel di lampiran 9 (hasil perbandingan studi kasus). Emisi karbon dioksida yang dihasilkan merupakan emisi yang berasal dari pembangkit termal dan bukan dari turbin angin. Karena turbin angin tidak menghasilkan emisi pada system pembangkitannya.

[halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 5 PENUTUP

Dalam bab ini disajikan beberapa kesimpulan dari tugas akhir ini beserta saran untuk kelengkapan dan kelanjutan penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode *firefly algorithm* mampu menyelesaikan masalah *economic dispatch* dengan mempertimbangkan *carbon capture plants* dengan menjaga batasan – batasan *equality* dan *inequality constraint*.
2. Hasil simulasi menunjukkan dengan pemasangan *carbon capture plants*, biaya pembangkitan total akan membesar namun jumlah karbon dioksida yang dihasilkan kecil atau dapat mengurangi emisi karbon dioksida yang dihasilkan oleh pembangkit.
3. Hasil biaya pembangkitan dan emisi karbon dioksida yang dihasilkan, dipengaruhi oleh pembobotan. Semakin besar nilai (bobotBiaya = 1) untuk biaya pembangkitan, maka biaya pembangkitan akan semakin kecil atau murah yaitu sebesar 17827.84\$, sebaliknya semakin kecil nilai yang diberikan (bobotBiaya = 0) untuk biaya pembangkitan, maka biaya pembangkitan akan semakin besar atau mahal yaitu sebesar 18680.81\$ (contoh studi kasus 2).
4. Semakin besar nilai (bobotCarbon = 1) untuk emisi karbon dioksida, maka emisi karbon dioksida yang dihasilkan akan semakin kecil yaitu sebesar 2741.18 Ton, sebaliknya semakin kecil nilai yang diberikan (bobotCarbon = 0) untuk emisi karbon dioksida, maka emisi karbon dioksida yang dihasilkan akan semakin besar yaitu sebesar 3609.57 Ton (contoh studi kasus 2).
5. Penambahan *wind turbin* berjumlah 5 unit sangat mempengaruhi biaya pembangkitan dan emisi karbon dioksida yang dihasilkan. Dari simulasi yang dilakukan dengan penambahan *wind turbine* pada studi kasus yang sama, biaya total pembangkitan dan emisi karbon dioksida yang dihasilkan menjadi lebih kecil.

6. Perbandingan antara studi kasus 2 dengan *carbon capture plants* tanpa *wind turbine* (bobotBiaya = 1) dan (bobotcarbon = 0) biaya pembangkitannya sebesar 17827.84\$. Sedangkan studi kasus 4 dengan *carbon capture plants* dan dengan penambahan *wind turbine* biaya pembangkitan pada (bobotBiaya = 1) dan (bobotCarbon = 0) adalah sebesar 14754.62\$.
7. Total emisi karbon yang di hasilkan pada pembobotan seperti point (6) tanpa *wind turbine* sebesar 3609.57 Ton, sedangkan dengan *wind turbine* sebesar 3187.23 Ton.
8. Emisi yang dihasilkan dari studi kasus 3 dan 4 dengan penambahan *wind turbine* bukan berasal dari turbin angin yang digunakan, melainkan berasal dari pembangkit *thermal*.
9. Besar nilai iterasi mempengaruhi hasil simulasi pada tugas akhir yang dikerjakan. Untuk data pembangkit yang digunakan, pada iterasi ke 100 sudah dapat mencapai nilai konvergen.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk perkembangan penelitian selanjutnya adalah:

1. Menambahkan *carbon trading kyoto protocol* dalam proses pengurangan emisi karbon dioksida yang dihasilkan. Dimana perdagangan karbon dapat memberikan nilai ekonomis lebih pada total biaya yang dihasilkan.
2. Dapat menerapkan pada system uji pembangkit yang sebenarnya, sehingga proses perhitungan *carbon trading kyoto protocol* akan lebih mudah dilakukan dan lebih kongkrit sebagai penyelesaian masalah pengurangan emisi karbon dioksida.
3. Menyelesaikan permasalahan *economic dispatch* dengan mempertimbangkan *carbon capture plants* menggunakan metode selain *firefly algorithm*, seperti *particle swarm optimization*, *differensial evolution*, *genetic algorithm*, *ant colony algorithm*, *bee colony algorithm* dan metode lainnya sebagai pengembangan dan perbandingan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Saadat, Hadi, “*Power System Analysis 2nd Edition*”, McGrawHill, Ch.1, 1999.
- [2] Wood, A. J, Wollenberg, B. F, “*Power Generation Operation and Control*”, John Willey & Sons Inc, America, 1996
- [3] Nag, P. K, “*Power Plant Engineering 2nd Edition*”, McGrawHill, International Edition, 2002.
- [4] Rackley, S. A, “*Carbon Capture And Storage*”, Elsevier Inc, America, 2010.
- [5] Stolten, Detlef, “*Efficient Carbon Capture for Coal Power Plants*”, WILEY-VCH verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim Germany, 2011.
- [6] Imam Robandi, “*Desain Sistem Tenaga Modern*”, Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2006.
- [7] Imam Robandi, “*Becoming The Winner*”, Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2008.
- [8] Mukhtasor, “*IN OCEAN*”, Indonesian Energy Association, 2011.
- [9] ESDM, dkk, “*Kajian Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Energi*”, Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral, Desember. 2013.
- [10] 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.
- [11] Yang, H.T., Yang, P.c., Huang, c.L.: ‘*Evolutionary Programming Based Economic Dispatch for Units with Non-Smooth Fuel Cost Functions*’, IEEE Trans. Power Syst., 1996.
- [12] Wang, C., Shahidehpour, S.M.: ‘*Effects of ramp-rate limits on unit commitment and economic-dispatch*’, IEEE Trans. Power Syst., 1993.
- [13] Lu. Siyu, Lou. Suhua, Wu. Yaowu, Yin. Xianggen, “*Power System Economic Dispatch Under Low – Carbon Economy With Carbon Capture Plants Considered*”. IET Generation. Transmission. Distribution. 2013.

- [14] Eleanor Denny, Mark O'Malley, "Wind Generation, Power System Operation And Emissions Reduction", IEEE Transactions on Power System, Vol. 21, No. 1, February 2006.
- [15] X. S. Yang, "NATURE-INSPIRED METAHEURISTICS," dalam *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms Second Edition*, University of Cambridge, United Kingdom, University of Cambridge, United Kingdom, 2010.
- [16] X. S. Yang, dalam *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms Second Edition*, University of Cambridge, United Kingdom, Luniver Press, 2010.
- [17] Kencana, Elsa, "Report : Assessment Wind Energy Potential at Samas Beach Yogyakarta Indonesia Using Weibull Distribution", Marine and Offshore Engineering, Liverpool John Moores University, 2016.
- [18] Sulistijono, Primaditya, "Emission and Economic Dispatch of Micro Grid Using Multiobjective Genetic Algorithm Optimization", Elektro ITS Surabaya, 2014.
- [19] Santoso, Mikael Vidi, "Using of Random Drift Particle Swarm Optimization (RDPSO) Algorithm on Economic Dispatch Considering Wind Electrical Power For Emission Reduction", Elektro ITS Surabaya, 2016.
- [20] Arindra, M, "Unit Commitment in Wind Turbine Generation System to Reduce Emission Using Particle Swarm Optimization", Elektro ITS Surabaya, 2016.
- [21] Mahaputra, Yauri, "Dynamic Optimal Power Flow Considering Carbon Capture And Storage Plants Using Multiobjective Particle Swarm Optimization Method", Elektro ITS Surabaya, 2016.
- [22] Wicaksono, Nugroho, "Economic Dispatch for Microgrid Electrical System with Energy Storage Based on Adaptive Particle Swarm Optimization", Elektro ITS Surabaya, 2016.
- [23] Sea Titan wt10000dd, WindTec Solution.

LAMPIRAN

Lampiran 1

Listing program Economic Dispatch Dengan Mempertimbangkan Carbon Capture Plants Menggunakan Firefly Algorithm

```
%RUDY ARIF PRASOJO - 2214105050
%ECONOMIC DISPATCH
%CARBON CAPTURE PLANT
%FIREFLY ALGORITHM

format bank;
clc;
clear;

%% OPTION TAMPILAN PROGRAM

siklusPembangkitan = 10; % jumlah siklus x 24 jam

jamAwal           = 1;
jamAkhir          = 24;
kurvaON           = 1; % tampilkan kurva

displayPerIterasiON = 0; % tampilkan iterasi per jam
displayPerJamON    = 1; % tampilkan per jam

denganCCP = 1; % dengan CCP = 1, tidak CCP = 0
denganTurbin = 0; % dengan WT = 1, tidak WT = 0
turbinON = 5; % jumlah turbin angin yang digunakan

% Data Cost Function IEEE 30 Bus
%      u1    u2    u3    u4    u5    u6
c      = [ 0     0     0     0     0     0     0     0 ]; % gamma
b      = [ 2     1.75 1     3.25 3     3     ]; % beta*(P)
a      = [ 0.00375 0.0175 0.0625 0.0083 0.025 0.025 ]; % alpha*(P^2)

PMax   = [ 200    80    50    35    30    40 ]; % pmaks
PMin   = [ 50     20    15    10    10    12 ]; % pmin
rampRate = [ 50     20    14     9     8     10 ]; % rampRate
beban   = [ 202    190    181    183    191    200 ...
```

232	252	255	267	269	252 ...
233	246	236	253	268	279 ...
283.4	275	272	253	237	225]; % beban 24 jam

```
jumlahUnit = 6; % jumlah unit pembangkit
jumlahTurbin = 5; % jumlah turbin angin
```

```
% Parameter firefly_pembangkit Algorithm (FFA)
jumlahFirefly = 40;
jumlahIterasi = 100;
threshold = 0.5; % batas antara dua kubu firefly_pembangkit
pengaliPelanggaran = 1000;
alpha = 0.5;
pengaliAlpha = 0.999999;
betamin = 0.2;
gamma = 1;
```

```
% Parameter Carbon Capture Plant (CCP)
% intensitas carbon tiap unit pembangkit (ton/MWh)
CI = [ 1.186 1.186 1.186 0.434 0.434 0.780 ];
% carbon capture rate (85%)
CCR = 0.85;
% daya yang dikonsumsi ccp (0.23 MWh/ton)
Beta = 0.23;
```

```
% Parameter Pembobotan Nilai Fitness
bobotBiaya = 1;
bobotCarbon = 1 - bobotBiaya;
% Parameter Wind Turbine
kecepatan = [ 11.3 9.8 7.5 9.5 9.3 6.9 ...
              6.5 7.8 11.2 11.0 9.8 10.5 ...
              11.4 10.6 11.3 11.3 10.5 10.6 ...
              11.0 11.2 11.3 11.3 11.3 11.0 ...];
```

```
akumulasiBiaya = 0;
akumulasiCarbon = 0;
pelanggaran1 = 0;
pelanggaran2 = 0;
biayaPembangkitan = 0;
carbon = 0;
```

```

dataBiaya = zeros(24, jumlahIterasi);
dataCarbon = zeros(24, jumlahIterasi);
dataFitness = zeros(24, jumlahIterasi);
kurvaBiaya = zeros(jumlahIterasi);
kurvaCarbon = zeros(jumlahIterasi);
kurvaFitness = zeros(jumlahIterasi);

firefly_prev = zeros(jumlahUnit);

% -----
columns = { 'P1', ' P2', ' P3', ...
            ' P4', ' P5', ' P6', ...
            ' T1', ' T2', ' T3', ...
            ' T4', ' T5', ...
            ' Beban', ' CCP', ' Rugi', ...
            ' Biaya-P1', ' Biaya-P2', ' Biaya-P3', ...
            ' Biaya-P4', ' Biaya-P5', ' Biaya-P6', ...
            ' Carbon-P1', ' Carbon-P2', ' Carbon-P3', ...
            ' Carbon-P4', ' Carbon-P5', ' Carbon-P6', ' Biaya', ' Carbon', ' Fitness' };

fprintf('%s ', columns{1:end});
fprintf('\n');

% Siklus pembangkitan tiap 24 jam
for siklus = 1 : siklusPembangkitan

    totalBiaya = 0;
    totalCarbon = 0;
    fprintf('Siklus ke-%d ', siklus);
    fprintf('\n');

    % Perhitungan dilakukan untuk setiap jam, dari ke-1 sampai ke-24
    for jam = jamAwal : jamAkhir % ubah jam

        %% VARIABEL ARRAY firefly_pembangkit DAN FITNESS AWAL
        firefly_pembangkit = zeros(jumlahFirefly, jumlahUnit);
        biaya_pembangkit = zeros(jumlahUnit);
        carbon_unit = zeros(jumlahUnit);
        firefly_turbin = zeros(jumlahFirefly, jumlahTurbin);
        fitness = zeros(jumlahFirefly, 19);

```

```

%% EVALUASI RAMP RATE
PMax1 = PMax;
PMin1 = PMin;
TMax = WindTurbine(kecepatan(jam),1);
TMin = TMax;
if jam > jamAwal

%% DAYA PEMBANGKITAN GENERATOR DENGAN PEMASANGAN PLAN CCS
(UNIT 1)
% PE : ( 1/(1-B*CCR*CI))*PG
% PE : daya dibangkitkan generator + pemasangan ccp (MW)
% B : daya yang dikonsumsi ccp (0.23 MWh/ton)
% CCR : carbon capture rate (85%)
% CI : intensitas carbon tiap unit pembangkit (ton/MWh)
% PG : daya output generator (data firefly_pembangkit)
PE = ( 1 / ( 1 - Beta * CCR * CI(1) ) ) * firefly_prev(1);

% PMax
if denganCCP == 1 % MENGGUNAKAN CCP
    PMax1(1) = min([PMax(1) PE+rampRate(1)]);
else
    PMax1(1) = min([PMax(1) firefly_prev(1)+rampRate(1)]); % u1
end
PMax1(2) = min([PMax(2) firefly_prev(2)+rampRate(2)]); % u2
PMax1(3) = min([PMax(3) firefly_prev(3)+rampRate(3)]); % u3
PMax1(4) = min([PMax(4) firefly_prev(4)+rampRate(4)]); % u4
PMax1(5) = min([PMax(5) firefly_prev(5)+rampRate(5)]); % u5
PMax1(6) = min([PMax(6) firefly_prev(6)+rampRate(6)]); % u6

% PMin
if denganCCP == 1
    PMin1(1) = max([PMin(1) PE-rampRate(1)]);
else
    PMin1(1) = max([PMin(1) firefly_prev(1)-rampRate(1)]); % u1
end
PMin1(2) = max([PMin(2) firefly_prev(2)-rampRate(2)]); % u2
PMin1(3) = max([PMin(3) firefly_prev(3)-rampRate(3)]); % u3
PMin1(4) = max([PMin(4) firefly_prev(4)-rampRate(4)]); % u4
PMin1(5) = max([PMin(5) firefly_prev(5)-rampRate(5)]); % u5
PMin1(6) = max([PMin(6) firefly_prev(6)-rampRate(6)]); % u6
end

```

```

%% MEMBANGKITKAN POPULASI firefly_pembangkit AWAL
for i = 1 : jumlahFirefly
    for j = 1 : jumlahUnit
        firefly_pembangkit(i,j) = rand*(PMax1(j)-PMin1(j)) +
PMin1(j);
    end
    if denganTurbin == 1
        for j = 1 : turbinON
            firefly_turbin(i,j) = WindTurbine(kecepatan(jam),1);
        end
    end
end

%% MENGHITUNG NILAI FITNESS SETIAP firefly_pembangkit AWAL
for i = 1 : jumlahFirefly

%% DAYA PEMBANGKITAN GENERATOR DENGAN PEMASANGAN PLAN CCS
(UNIT 1)
    PE = ( 1 / ( 1 - Beta * CCR * CI(1) ) ) * firefly_pembangkit(i,1);

%% MENGHITUNG PELANGGARAN TERHADAP BEBAN AWAL
    % Selisih antara beban dan akumulasi firefly_pembangkit 6 unit
    pelanggaran1 = abs(beban(jam)-sum(firefly_pembangkit(i,:))- ...
        sum(firefly_turbin(i,:))) * pengaliPelanggaran;

%% MENGHITUNG PELANGGARAN TERHADAP PMAX DAN PMIN AWAL
    % Akumulasi pelanggaran terhadap PMax dan PMin dari setiap unit
    % Unit 1
    if denganCCP == 1
        pelanggaran2 = (max(0,PE-PMax1(1))+max(0,PMin1(1)-PE)) * ...
            pengaliPelanggaran;
    else
        pelanggaran2 = (max(0,firefly_pembangkit(i,1)-
PMMax1(1))+max(0,PMin1(1)- firefly_pembangkit(i,1))) *
pengaliPelanggaran;
    end
    % Unit 2 - 6
    for j = 2 : jumlahUnit
        pelanggaran2 = pelanggaran2 +
(max(0,firefly_pembangkit(i,j)-PMax1(j))+max(0,PMin1(j)-
firefly_pembangkit(i,j))) * pengaliPelanggaran;
    end
end

```

```

end
if denganTurbin == 1
    % Turbin 1 - 5
    for j = 1 : turbinON
        pelanggaran2 = pelanggaran2 + (max(0,firefly_turbin(i,j)-
TMax)+max(0,TMin-firefly_turbin(i,j))) * pengaliPelanggaran;
    end
end

%% MENGHITUNG BIAYA PEMBANGKITAN AWAL
% Unit 1
if denganCCP == 1
    biaya_pembangkit(1) = c(1) + b(1)*PE + a(1)*(PE^2);
else
    biaya_pembangkit(1) = c(1) + b(1)*firefly_pembangkit(i,1) +
a(1)*(firefly_pembangkit(i,1)^2);
end
biayaPembangkitan = biaya_pembangkit(1);
% Unit 2 - 6
for j = 2 : jumlahUnit
    biaya_pembangkit(j) = c(j) + b(j)*firefly_pembangkit(i,j) + ...
a(j)*(firefly_pembangkit(i,j)^2);
    biayaPembangkitan = biayaPembangkitan +
biaya_pembangkit(j);
end

%% MENGHITUNG NILAI CARBON AWAL
% Unit 1
if denganCCP == 1
    carbon_unit(1) = CI(1) * PE * (1-CCR);
else
    carbon_unit(1) = CI(1) * firefly_pembangkit(i,1);
end
carbon = carbon_unit(1);

% Unit 2 - 6
for j = 2 : 6
    carbon_unit(j) = CI(j)*firefly_pembangkit(i,j);
    carbon = carbon + carbon_unit(j);
end

```

```

%% MENGHITUNG DAYA CCS
    % PS = Beta * carbon;
    if denganCCP == 1
        P1 = PE;
        PS = PE - firefly_pembangkit(i,1);
    else
        P1 = firefly_pembangkit(i,1);
        PS = 0;
    end

%% MENGHITUNG NILAI TOTAL FITNESS AWAL
    totalFitness = pelanggaran1 + pelanggaran2 +
    (bobotBiaya*biayaPembangkitan) + (bobotCarbon*carbon);

%% TABEL DATA FITNESS AWAL
    fitness(i,:) = [
        totalFitness ...
        pelanggaran1 ...
        pelanggaran2 ...
        biaya_pembangkit(1:6) ...
        carbon_unit(1:6) ...
        biayaPembangkitan ...
        carbon ...
        PS ...
        P1
    ];

%% SORTING BERDASARKAN NILAI TOTAL FITNESS (kolom 1 tabel fitness)
    fitnessAndFirefly = sortrows([fitness firefly_pembangkit
    firefly_turbin], 1);

    end

%% MENAMPILKAN firefly_pembangkit AWAL TERBAIK (DISPLAY
    firefly_pembangkit AWAL)
    if displayPerIterasiON == 1
        fprintf('%3d\t\t', 0);
        disp(num2str([fitnessAndFirefly(1,19)
    fitnessAndFirefly(1,21:30) ...
        beban(jam) fitnessAndFirefly(1,18) ...

```

```

        beban(jam) - ( fitnessAndFirefly(1,19)-
fitnessAndFirefly(1,18)+sum(fitnessAndFirefly(1,21:30)) )
fitnessAndFirefly(1,4:17) fitnessAndFirefly(1,1)], '%-10.2f');
    end

%% PROSES ALGORITMA firefly_pembangkit
    for iterasi = 1 : jumlahIterasi
        n = 1;

%% VARIABEL ARRAY firefly_pembangkit DAN FITNESS BARU
        firefly_pembangkit1 = zeros(jumlahFirefly*jumlahFirefly,
jumlahUnit);
        biaya_pembangkit1 = zeros(jumlahUnit);
        carbon_unit1 = zeros(jumlahUnit);
        firefly_turbin1 = zeros(jumlahFirefly*jumlahFirefly,
jumlahTurbin);
        fitness1 = zeros(jumlahFirefly*jumlahFirefly, 19);

%% MEMBANGKITKAN firefly_pembangkit BARU
        for i = 1 : jumlahFirefly
            for j = 1 : jumlahFirefly

                % Klasifikasi firefly_pembangkit berdasarkan intensitas
                % Salah satu bergerak ke yang lebih terang
                if (rand < threshold)
                    firefly_pembangkit1(n,:) = firefly_pembangkit(i,:) +
gamma*betamin*(firefly_pembangkit(j,:)-firefly_pembangkit(i,:));
                    for k = 1 : jumlahUnit
                        firefly_pembangkit1(n,k) = firefly_pembangkit1(n,k) +
alpha*(rand*(PMax1(k)-PMin1(k))-(PMax1(k)-PMin1(k)/2));
                        alpha = alpha*pengaliAlpha;
                    end
                % Bergerak secara acak apabila tidak ada yang paling terang
                else
                    for k = 1 : jumlahUnit
                        firefly_pembangkit1(n,k) = rand*(PMax1(k)-
PMin1(k))+PMin1(k);
                    end
                end
            end
        end
    end

```



```

if denganTurbin == 1
    for k = 1 : turbinON
        firefly_turbin1(n,k) = WindTurbine(kecepatan(jam),1);
    end
end

%% MENGHITUNG NILAI FITNESS firefly_pembangkit BARU
%% Daya pembangkitan generator dengan pemasangan CCP (Unit 1)
    PE = ( 1 / (1 - Beta * CCR * CI(1)) ) * firefly_pembangkit1(n,1);

%% MENGHITUNG PELANGGARAN TERHADAP BEBAN BARU
    % Selisih antara beban dan akumulasi firefly_pembangkit 6 unit
        pelanggaran1 = abs(beban(jam)-
sum(firefly_pembangkit1(n,:))- sum(firefly_turbin1(n,:))) *
pengaliPelanggaran;

%% MENGHITUNG PELANGGARAN TERHADAP PMAX DAN PMIN BARU
    % Akumulasi pelanggaran terhadap PMax dan PMin dari setiap unit
    % Unit 1
        if denganCCP == 1
            pelanggaran2 = (max(0,PE-PMax1(1))+max(0,PMin1(1)-
PE)) * pengaliPelanggaran;
        else
            pelanggaran2 = (max(0,firefly_pembangkit1(n,1)-
PMax1(1))+ max(0,PMin1(1)-firefly_pembangkit1(n,1))) *
pengaliPelanggaran;
        end
        % Unit 2 - 6
        for k = 2 : jumlahUnit
            pelanggaran2 = pelanggaran2 +
(max(0,firefly_pembangkit1(n,k)-PMax1(k))+ max(0,PMin1(k)-
firefly_pembangkit1(n,k))) * pengaliPelanggaran;
        end
        if denganTurbin == 1
            % Turbin 1 - 5
            for k = 1 : turbinON
                pelanggaran2 = pelanggaran2 +
(max(0,firefly_turbin1(n,k)-TMax)+max(0,TMin-firefly_turbin1(n,k)))
* pengaliPelanggaran;
            end
        end
end

```

```

%% MENGHITUNG BIAYA PEMBANGKITAN BARU
    % Unit 1
    if denganCCP == 1
        biaya_pembangkit1(1) = c(1) + b(1)*PE + a(1)*(PE^2);
    else
        biaya_pembangkit1(1) = c(1) +
b(1)*firefly_pembangkit1(n,1) + a(1)*(firefly_pembangkit1(n,1)^2);
    end
    biayaPembangkitan = biaya_pembangkit1(1);
    % Unit 2 - 6
    for k = 2 : jumlahUnit
        biaya_pembangkit1(k) = c(k) +
b(k)*firefly_pembangkit1(n,k) + a(k)*(firefly_pembangkit1(n,k)^2);
        biayaPembangkitan = biayaPembangkitan +
biaya_pembangkit1(k);
    end

%% MENGHITUNG NILAI CARBON BARU
    % Unit 1
    if denganCCP == 1
        carbon_unit1(1) = CI(1) * PE * (1-CCR);
    else
        carbon_unit1(1) = CI(1) * firefly_pembangkit1(n,1);
    end
    carbon = carbon_unit1(1);

    % Unit 2 - 6
    for k = 2 : 6
        carbon_unit1(k) = CI(k) * firefly_pembangkit1(n,k);
        carbon = carbon + carbon_unit1(k);
    end

%% MENGHITUNG DAYA CCS
    % PS = Beta * carbon;
    if denganCCP == 1
        P1 = PE;
        PS = PE - firefly_pembangkit1(n,1);
    else
        P1 = firefly_pembangkit1(n,1);
        PS = 0;
    end
end

```

```

%% MENGHITUNG NILAI TOTAL FITNESS BARU
totalFitness = pelanggaran1 + pelanggaran2 +
(bobotBiaya*biayaPembangkitan) + (bobotCarbon*carbon);

%% TABEL DATA FITNESS BARU
fitness1(n,:) = [totalFitness pelanggaran1pelanggaran2
biaya_pembangkit1(1:6) carbon_unit1(1:6) biayaPembangkitan carbon
PS P1];
n = n + 1;
end
end

%% SORTING BERDASARKAN NILAI TOTAL FITNESS
fitnessAndFirefly = sortrows([ fitness firefly_pembangkit
firefly_turbin; fitness1 firefly_pembangkit1 firefly_turbin1], 1);
fitness = fitnessAndFirefly(1:jumlahFirefly, 1:19);
firefly_pembangkit = fitnessAndFirefly(1:jumlahFirefly, 20:25);
firefly_turbin = fitnessAndFirefly(1:jumlahFirefly, 26:30);

%% SIMPAN DATA KURVA
dataFitness(jam,iterasi) = fitness(1,1);
dataBiaya(jam,iterasi) = fitness(1,16);
dataCarbon(jam,iterasi) = fitness(1,17);

%% MENAMPILKAN firefly_pembangkit TERBAIK (DISPLAY TIAP ITERASI)
if displayPerIterasiON == 1
    fprintf('%3d\t\t', iterasi);
    disp(num2str([fitness(1,19) firefly_pembangkit(1,2:6)
firefly_turbin(1,1:5) beban(jam) fitness(1,18) beban(jam) -
(fitness (1,19)-fitness(1,18) + sum(firefly_pembangkit(1,2:6)) +
sum(firefly_turbin(1,1:5)) ) fitness(1,4:17) fitness(1,1)], '%-
10.2f'));
end
end

%% MENAMPILKAN firefly_pembangkit TERBAIK (DISPLAY TIAP JAM)
if displayPerJamON == 1
    fprintf('%3d\t\t', jam);
    disp(num2str([fitness(1,19) firefly_pembangkit(1,2:6)
firefly_turbin(1,1:5) beban(jam) fitness(1,18)

```

```

        beban(jam) - ( fitness(1,19)-fitness(1,18)+ ...
        sum(firefly_pembangkit(1,2:6))+sum(firefly_turbin(1,1:5)) )
fitness(1,4:17) fitness(1,1)], '%-10.2f'));
    end

    totalBiaya = totalBiaya + fitness(1,16);
    totalCarbon = totalCarbon + fitness(1,17);
    firefly_prev = firefly_pembangkit(1,:);
end

fprintf('Siklus ke-%d\n', siklus);
fprintf('Biaya ($) = %.2f\n', totalBiaya);
fprintf('CO2 (Ton) = %.2f\n', totalCarbon);

akumulasiBiaya = akumulasiBiaya + totalBiaya;
akumulasiCarbon = akumulasiCarbon + totalCarbon;

%% Kurva
for i = 1:100
    kurvaFitness(i) = sum(dataFitness(jamAwal:jamAkhir,i));
    kurvaBiaya(i) = sum(dataBiaya(jamAwal:jamAkhir,i));
    kurvaCarbon(i) = sum(dataCarbon(jamAwal:jamAkhir,i));
end

if kurvaON == 1
    x = 1:1:100;

    figure

    plot(x,kurvaFitness(x),'LineWidth',3)
    ylabel('Fitness') % y-axis label
    xlabel('Iterasi') % x-axis label
    title('Kurva Konvergeni','FontSize',12)
end
end

fprintf('%d Siklus\n', siklus);
fprintf('Akumulasi Biaya ($) = %.2f\n', akumulasiBiaya);
fprintf('Akumulasi CO2 (Ton) = %.2f\n', akumulasiCarbon);

```

LAMPIRAN

Lampiran 2

Listing Program Pemodelan Kurva Daya Wind Turbine wt1000dd

```
%=====
% Rudy Arif Prasajo
% 2214105050
% Kurva Daya Wind Turbine wt1000dd
%=====

clc;
clear;
clear all;
format longG;

turbinangin = [0 0
1 0
2 0
3 0
4 500
5 1000
6 1750
7 2500
8 4000
9 6000
10 7900
11 8900
12 10000
13 10000
14 10000
15 10000
16 10000
```

```
17 10000
18 10000
19 10000
20 10000
21 10000
22 10000
23 10000
24 10000
25 10000];
```

```
outputc=turbinangin(:,1);
inputc= turbinangin(:,2);
pc=polyfit(outputc,inputc,2)
ppc=polyval(pc,outputc)
plot(outputc,inputc,'s','LineWidth',2)
title('Karakteristik Wind Turbine 10 MW','FontSize',12)
hold on
ylabel('P(kW)','FontSize',12)
xlabel('Kecepatan Angin (m/s)','FontSize',12),grid
```

LAMPIRAN

Lampiran 3

Listing Program Pemodelan Kurva Daya Wind Turbine wt1000dd

```
%=====
% Rudy Arif Prasajo
% 2214105050
% Memodelkan Wind Turbine wt1000dd
%=====

function Pwt = WindTurbine(v,J) % Pembangkitan WT dalam MW

Vac = v;
Vci = 4;      % Kecepatan angin cut in dalam m/s
Vr = 11.5;   % Kecepatan angin rating dalam m/s
Vco = 30;

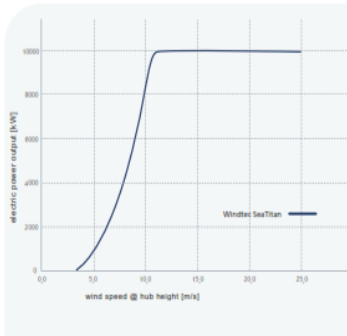
% Kecepatan angin cut out dalam m/s

if Vco > Vr
    if Vac < Vci,
        Pwt = 0;
    end
    if Vac >= Vci,
        if Vac < Vr,
            Pwt = (((-29.3818681318681 *(Vac^2)) +
(1234.39285714286*Vac) + (-2549.72527472528))/1000)*J;
        else
            Pwt = (10000/1000)*J;
        end
    end
end
end
end
```

LAMPIRAN

Lampiran 4

Datasheet Wind Turbine Sea Titan wt1000dd



TECHNICAL DATA

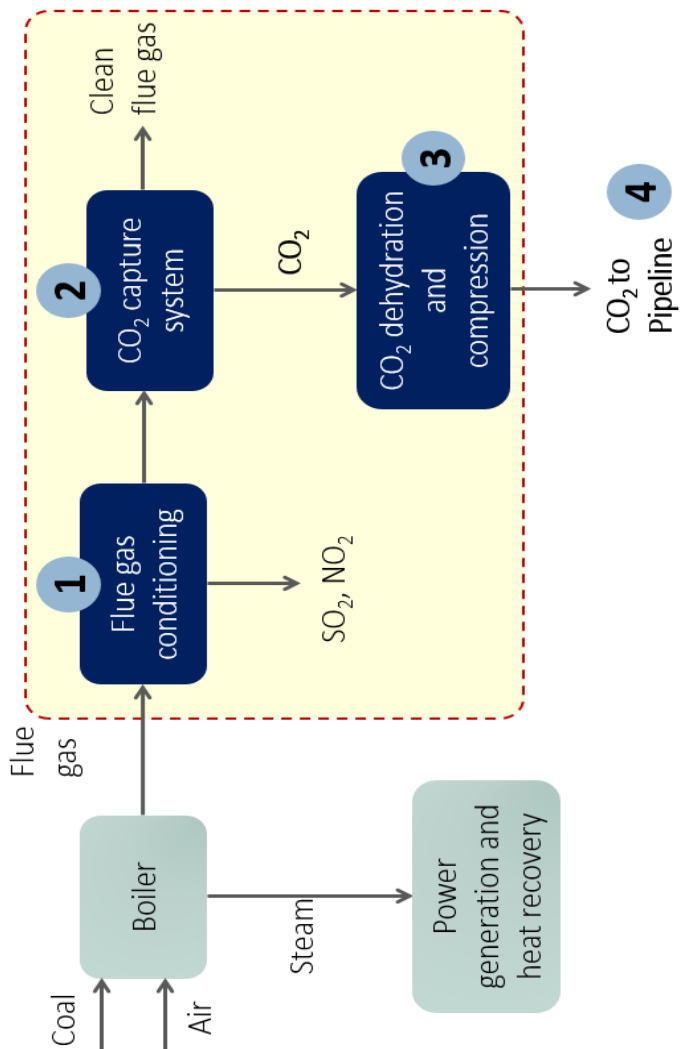
Type:	wt1000dd
Grid frequency:	50 Hz / 60 Hz
Tilt angle rotor axis:	5°
Hub height:	125 m
Hub type / material:	cast iron
Mainframe type:	cast iron
Type of tower construction:	conical tubular steel tower
Rotor diameter:	190 m
Lightning conductor:	integrated

OPERATING DATA

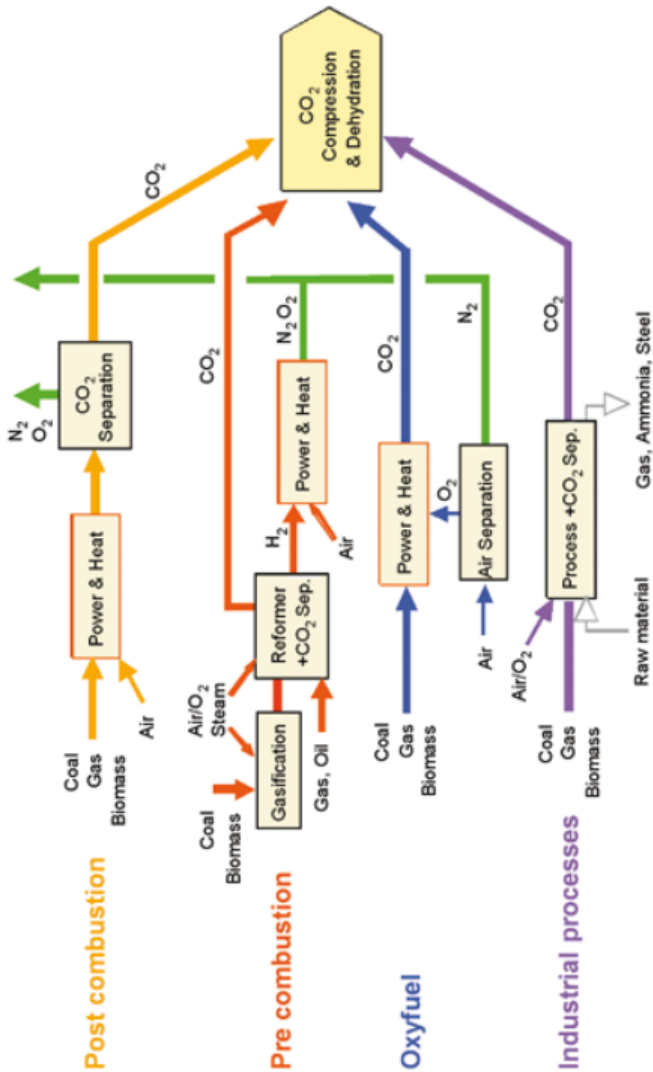
Cut-in wind speed:	4 m/s
Rated wind speed:	11.5 m/s
Cut-out wind speed:	30 m/s

LAMPIRAN

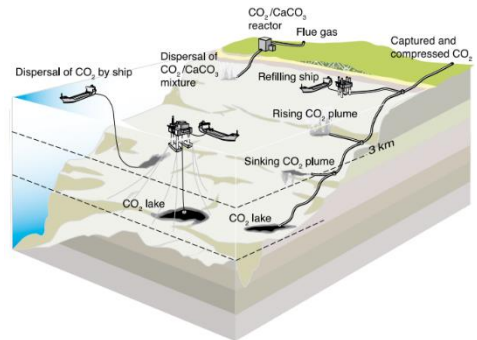
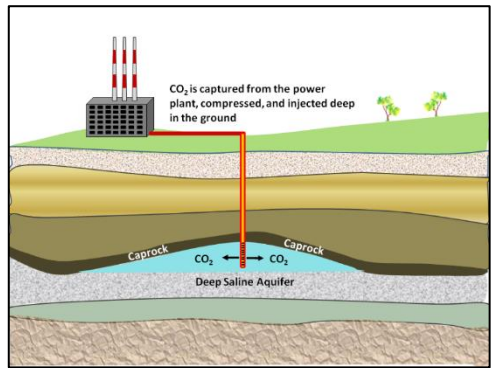
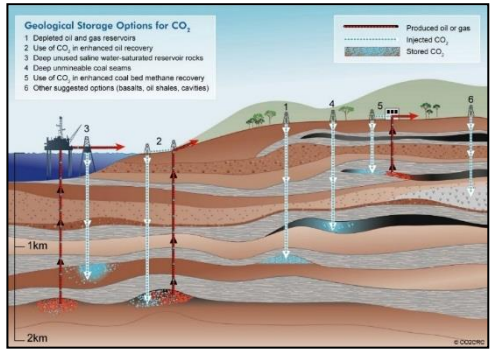
Lampiran 5



Gambar Proses *Capture* dan Pemisahan Emisi Karbon Dioksida



Gambar Proses *Capture* dan Pemisahan Emisi Karbon Dioksida Pembangkit Listrik dan Industri

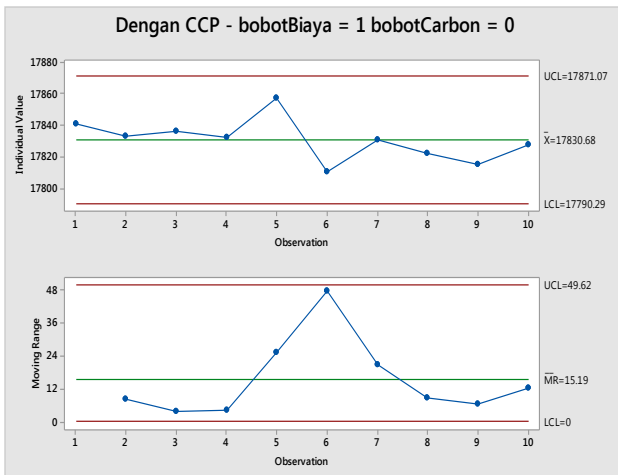
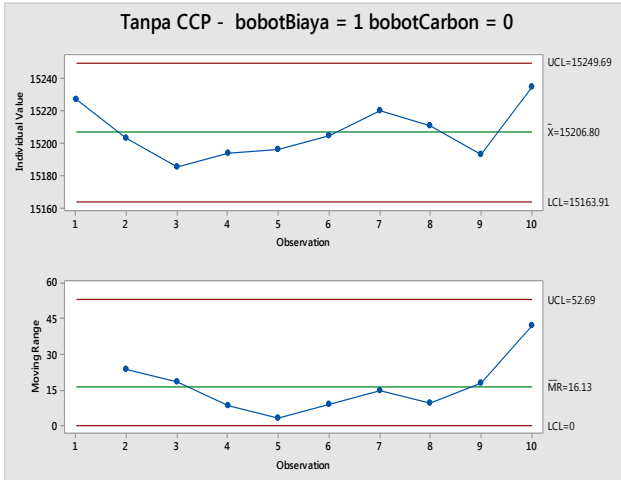


Gambar Penyimpanan Emisi Karbon Dioksida (a,b) *Geological Storage* (c) *Deep Sea Storage*

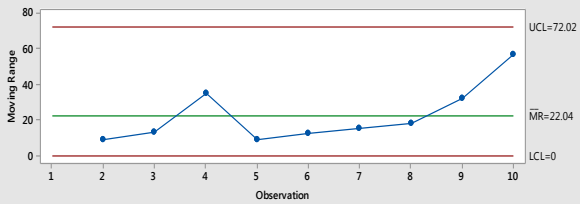
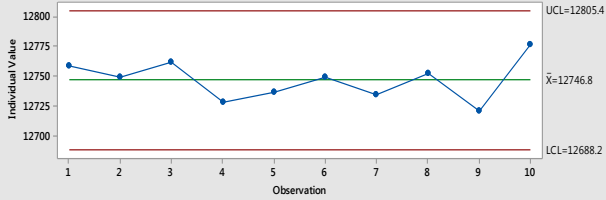
LAMPIRAN

Lampiran 6

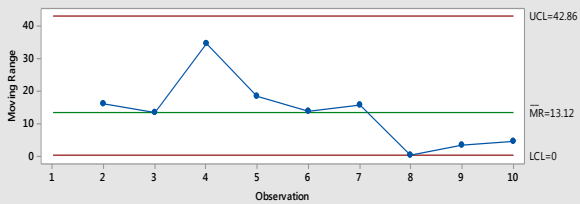
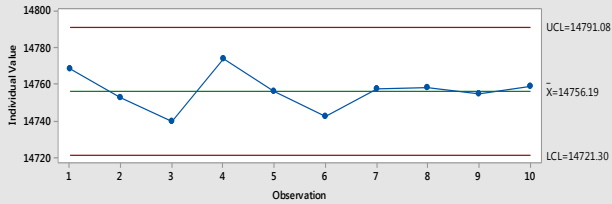
Validasi Data Minitab



Tanpa CCP Dengan WT - bobotBiaya = 1 bobotCarbon = 0



Dengan CCP Dengan WT - bobotBiaya = 1 bobotCarbon = 0



$$UCL = \bar{x} + 3 \frac{\overline{MR}}{d_2}$$

$$UCL_r = D_4 \overline{MR}$$

$$LCL = \bar{x} - 3 \frac{\overline{MR}}{d_2}$$

$$LCL_r = D_3 \overline{MR}$$

LAMPIRAN

Lampiran 7

Validasi Data Example 3A Buku Allan J. Wood.

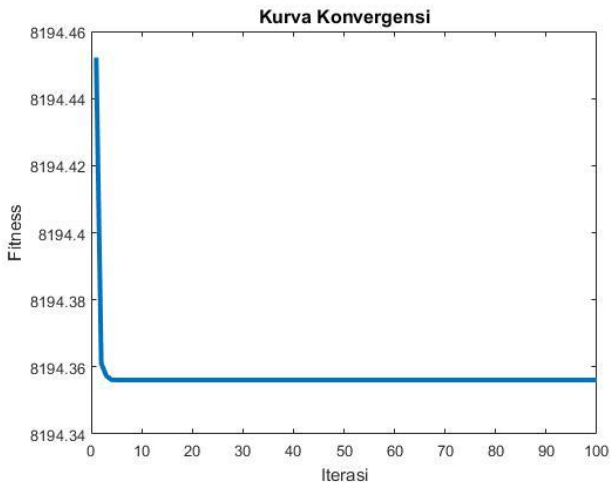
Dengan *Firefly Algorithm* :

- **Daya Pembangkitan** = 393.2345 334.4159 122.1481
- **Total Pembangkitan** = 850
- **Total Biaya** = 8194.3563

Hasil :

- **P1** = 393.2345 MW
- **P2** = 334.4159 MW
- **P3** = 122.1481 MW
- **Total Pembangkitan** = 850 MW
- **Total Biaya** = 8194.3563 \$/h

Kurva Konvergensi

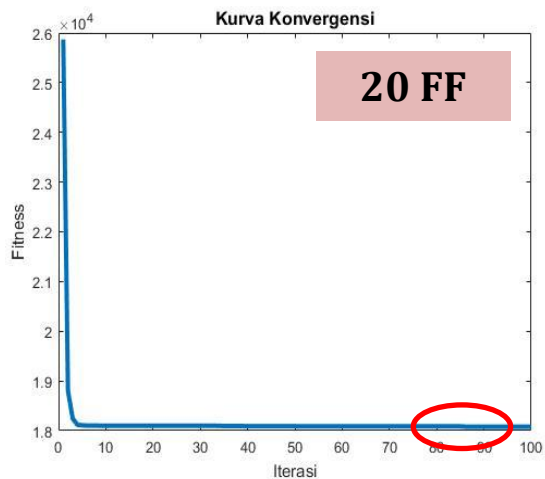


LAMPIRAN

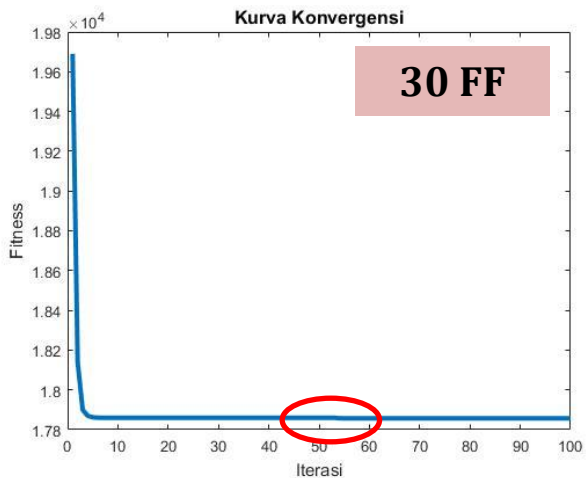
Lampiran 8

Pengujian Jumlah Populasi *Firefly*

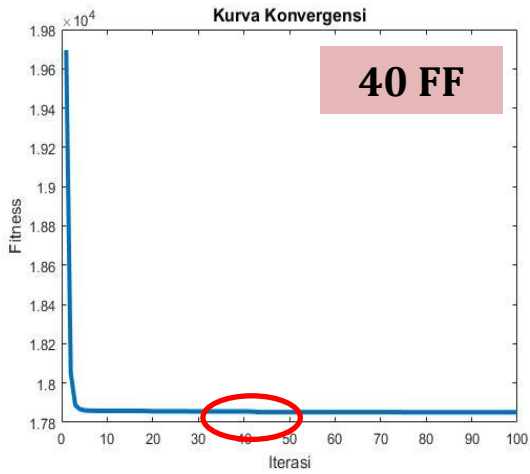
- jumlahPopulasi = 20



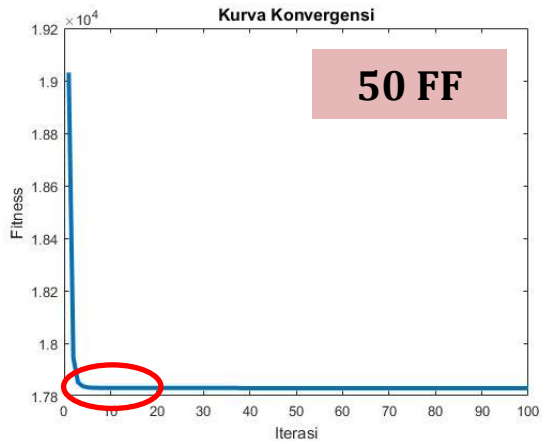
- jumlahPopulasi = 30



- **jumlahPopulasi = 40**



- **jumlahPopulasi = 50**



LAMPIRAN

Lampiran 9

Hasil Perbandingan Studi Kasus

Studi Kasus 1 : Tanpa CCP

Perc.	Total Biaya (\$)		Selisih Biaya (\$)	Total Karbon(Ton)		Selisih Emisi (Ton)
	Kasus 1	Kasus 3		Kasus 1	Kasus 3	
1	15210.65	12762.46	2448.19	6135.51	5149.84	985.67
2	15245.42	12778.49	2466.93	6094.19	5141.27	952.92
3	15255.92	12784.79	2471.13	6072.99	5132.84	940.15
4	15283.30	12796.73	2486.57	6050.81	5115.80	935.01
5	15345.65	12817.20	2528.45	5983.47	5103.10	880.37
6	15425.24	12889.97	2535.27	5902.97	5042.63	860.34
7	15594.24	13037.18	2557.06	5752.19	4913.89	838.30
8	15841.04	13260.38	2580.66	5604.36	4765.60	838.76
9	16132.13	13569.77	2562.36	5505.56	4643.11	862.45
10	16375.16	13861.73	2513.43	5442.43	4575.44	866.99
11	16779.02	14121.94	2657.08	5395.76	4535.46	860.30

Studi Kasus 3 : Tanpa CCP Dengan Wind Turbine

Studi Kasus 2 : Dengan CCP

Perc.	Total Biaya (\$)		Selisih Biaya (\$)	Total Karbon(Ton)		Selisih Emisi (Ton)
	Kasus 2	Kasus 4		Kasus 2	Kasus 4	
1	17827.84	14754.62	3073.22	3609.57	3187.23	422.34
2	17831.72	14766.33	3065.39	3573.62	3124.27	449.35
3	17868.27	14785.20	3083.07	3473.96	3043.22	430.74
4	17937.40	14805.34	3132.06	3345.76	2993.56	352.20
5	18049.83	14884.73	3165.10	3191.59	2842.95	348.64
6	18153.71	14947.26	3206.45	3086.49	2748.06	338.43
7	18357.77	15118.00	3239.77	2931.92	2598.55	333.37
8	18588.40	15206.80	3381.60	2784.34	2553.91	230.43
9	18630.26	15410.20	3220.06	2766.29	2476.29	290.00
10	18638.74	15509.06	3129.68	2759.80	2447.94	311.86
11	18680.81	15592.76	3088.05	2741.18	2430.56	310.62

Studi Kasus 4 : Dengan CCP Dengan Wind Turbine

[halaman ini sengaja dikosongkan]

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Rudy Arif Prasajo lahir di Pekalongan, Jawa Tengah pada tanggal 19 Februari 1993. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN Medono 07 Pekalongan, SMPN 02 Pekalongan, dan SMAN 1 Pekalongan. Penulis pernah menempuh jenjang pendidikan diploma tiga Teknik Elektro ITS bidang studi Computer Control, kemudian melanjutkan jenjang sarjana Teknik Elektro ITS bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis yang akrab disapa Sojo ini juga aktif dalam mengikuti organisasi dan komunitas, seperti (HMGC - Pekalongan) Honda Mega Pro Club Pekalongan dan menjadi Ketua I OSIS sewaktu SMA. Selama masa studi di ITS, penulis aktif pada kegiatan kemahasiswaan seperti menjadi Kepala Departemen Dalam Negeri HIMAD3TEKTRO ITS, Staf Kementrian Sosial Politik Dirjen Agitasi dan Propaganda periode BEM ITS Transformation dan BEM ITS Mahakarya KM ITS, Lembaga Pers Mahasiswa Satu Kosong (LPM 1.0 ITS), Komunitas AKU Peduli CAK! (APC) dan Ketua Paguyuban Arek Pekalongan di Surabaya. Beberapa prestasi yang pernah diraih penulis yaitu Program Kreativitas Mahasiswa (didanai) PKM – Karsa Cipta dan PKM – Pengabdian Kepada Masyarakat. Penulis yang memiliki hobi bermain basket, bersepeda, modifikasi motor, membaca buku dan berdiskusi ini bercita-cita untuk memiliki sekolah mandiri untuk anak-anak di Indonesia yang kurang beruntung atau memiliki keterbatasan (*difabel*), karena penulis meyakini bahwasannya pendidikan merupakan hal utama dan merupakan hak semua anak-anak di negeri ini.

"I'm Just Lucky"

contact person

e-mail: ruddyprasajo@gmail.com / +6281226050700