



TUGAS AKHIR - TF 181801

**OPTIMISASI TEKNOEKONOMI RETROFIT  
REAKTOR DAN BOILER SUBKRITIKAL  
MENGUNAKAN *OXYFUEL* DAN *CARBON  
CAPTURE STORAGE* PADA PLTU PT. GREAT  
GIANT FOODS TERBANGGI BESAR LAMPUNG  
TENGAH**

SAMUEL DIAN PERMANA PUTRA  
NRP. 0231154000111

Dosen Pembimbing  
Totok Ruki Biyanto, Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





**FINAL PROJECT - TF181801**

**OPTIMIZATION OF TECHNOECONOMY  
REACTOR AND SUBCRITICAL BOILER  
RETROFIT BY USING OXYFUEL AND CARBON  
CAPTURE STORAGE IN POWER PLANT OF PT.  
GREAT GIANT FOODS TERBANGGI BESAR  
CENTRAL LAMPUNG**

*Samuel Dian Permana Putra  
NRP. 02311540000111*

*Supervisor  
Totok Ruki Biyanto, Ph.D*

*DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS  
Faculty of Industrial Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019*



## **PERNYATAAN BEBAS PLAGIASME**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Samuel Dian Permana Putra  
NRP : 02311540000111  
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Optimisasi Teknoekonomi Retrofit Reaktor dan Boiler Subkritikal Menggunakan *Oxyfuel* dan *Carbon Capture Storage* Pada PLTU PT. Great Giant Foods Terbanggi Besar Lampung Tengah” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 24 Juli 2019  
Yang membuat pernyataan,

Samuel Dian Permana Putra  
NRP. 02311540000111

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

**LEMBAR PENGESAHAN**

**TUGAS AKHIR**

**OPTIMISASI TEKNOEKONOMI RETROFIT REAKTOR  
DAN BOILER SUBKRITIKAL MENGGUNAKAN  
OXYFUEL DAN CARBON CAPTURE STORAGE PADA  
PLTU PT. GREAT GIANT FOODS TERBANGGI BESAR  
LAMPUNG TENGAH**

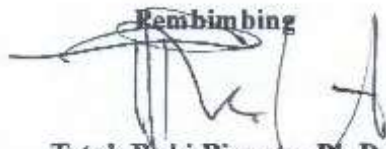
Oleh:

**Samuel Dian Permana Putra**  
NRP. 02311540000111

Surabaya, 24 Juli 2019

Menyetujui,

**Pembimbing**



**Totok Ruki Biyanto, Ph.D**  
NIPN. 19710702 199802 1 001

Mengetahui,  
**Kepala Departemen  
Teknik Fisika FTI-ITS**



**Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D**  
NIPN. 19780902 200312 1 002

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***



## LEMBAR PENGESAHAN

### OPTIMISASI TEKNOEKONOMI RETROFIT REAKTOR DAN BOILER SUBKRITIKAL MENGGUNAKAN OXYFUEL DAN CARBON CAPTURE STORAGE PADA PLTU PT. GREAT GIANT FOODS TERBANGGI BESAR LAMPUNG TENGAH





#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Samuel Dian Permana Putra**  
NRP. 02311540000111

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.......... (Pembimbing)
2. Hendra Cordova S.T., M.T. ......... (Ketua Penguji)
3. Ir. Zulkifli, M. Sc. ......... (Penguji 2)
4. Iwan Cony Setiadi, S.T., M.T. ......... (Penguji 3)

**SURABAYA**

**Juli, 2019**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

**OPTIMISASI TEKNOEKONOMI RETROFIT REAKTOR  
DAN BOILER SUBKRITIKAL MENGGUNAKAN  
OXYFUEL DAN CARBON CAPTURE STORAGE PADA  
PLTU PT. GREAT GIANT FOODS TERBANGGI BESAR  
LAMPUNG TENGAH**

**Nama Mahasiswa** : Samuel Dian Permana Putra  
**NRP** : 02311540000111  
**Departemen** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Totok Ruki Biyanto, PhD

**ABSTRAK**

PT. Great Giant Foods adalah salah satu perusahaan yang memproduksi nanas kaleng di Indonesia yang berdiri pada tahun 1970-an. Perusahaan tersebut memiliki PLTU sebagai penyedia suplai listrik, selain itu juga sebagai penyedia *steam* atau uap yang digunakan untuk proses produksi. PLTU yang ada di PT. Great Giant Foods memiliki kapasitas daya 7 MW dengan menggunakan bahan bakar batu bara dan biogas. Penerapan teknologi *Oxyfuel* dan CCS sangat potensial untuk diterapkan pada PLTU di PT. Great Giant Foods. Dengan adanya penambahan teknologi tersebut memungkinkan penghematan bahan bakar batubara dan biogas yang digunakan, serta diperoleh gas sisa yaitu berupa  $N_2$  dan gas  $CO_2$  yang selanjutnya dapat dijual sehingga mendapatkan keuntungan yang optimal. Pada tugas akhir ini dilakukan analisis terhadap teknologi *Oxyfuel* dan *Carbon Capture Storage* untuk diterapkan pada PLTU di PT. Great Giant Foods. Analisis dilakukan dengan menghitung jumlah massa produk dan reaktan pada pembangkit listrik dan besarnya nilai CAPEX dan OPEX. Hasil analisis memberikan bahwa keuntungan dari penghematan bahan bakar serta penjualan  $N_2$  dan  $CO_2$  dalam kurun waktu 10 tahun, diperoleh nilai maksimum NPV sebesar 152.381.552 USD dan IRR 100%.

**Kata kunci:** *Oxyfuel* dan CCS, CAPEX, OPEX, NPV, IRR

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

**OPTIMIZATION OF TECHNOECONOMY REACTOR AND  
SUBCRITICAL BOILER RETROFIT BY USING OXYFUEL  
AND CARBON CAPTURE STORAGE IN POWER PLANT OF  
PT. GREAT GIANT FOODS TERBANGGI BESAR CENTRAL  
LAMPUNG**

**Name** : Samuel Dian Permana Putra  
**NRP** : 0231154000111  
**Department** : Department of Engineering Physics  
**Supervisor** : Totok Ruki Biyanto, PhD

**ABSTRACT**

*PT. Great Giant Foods is an Indonesian company which produce canned pineapple and was built in 1970. The company has the PLTU for generating electricity, and also to preserve steam which will be used for production process. Power plant in PT. Great Giant Foods has capacity of 7MW with mix the fuel of coal and biogas. Implementing Oxyfuel and CCS technology is very potential for the power plant in PT. Great Giant Foods. It has the possibility to reduce the fuel consumption of coal and biogas, and can obtain the residual gas of  $N_2$  and  $CO_2$  which can be trade to obtain the maximum profit. In this thesis, I analyse the implementation of Oxyfuel and Carbon Capture Storage Technology in power plant of PT. Great Giant Foods. The analyse is done by calculate the mass of product and reactant of power plant and also CAPEX-OPEX value. The result gives that the profit than has taken from reducing the fuel consumption and trading the  $CO_2$  and  $N_2$  during 10 years period, obtained the maximum NPV of 152.381.552 USD and IRR 100%.*

**Keywords:** *Oxyfuel and CCS, CAPEX, OPEX, NPV, IRR*

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena kasih dan karunia-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir ini. Tidak lupa juga penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada keluarga dan para sahabat. Oleh karena dukungan mereka, penulis mampu menyusun laporan tugas akhir yang berjudul:

### **“Optimisasi Teknoekonomi Retrofit Reaktor dan Boiler Subkritikal Menggunakan *Oxyfuel* dan *Carbon Capture Storage* Pada PLTU PT. Great Giant Foods Terbanggi Besar Lampung Tengah”**

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi dalam Program Studi S-1 Teknik Fisika FTI-ITS. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa atas anugerah dan karunia-Nya kepada saya sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir dengan baik.
2. Segenap keluarga penulis yang telah memberikan dukungan penuh terhadap penyelesaian tugas akhir ini.
3. Totok Ruki Biyanto, Ph.D selaku dosen pembimbing tugas akhir ini, yang selalu memberikan semangat dan ide-ide baru.
4. Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS. Serta segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di Departemen Teknik Fisika - ITS.
5. Teman-teman seperjuangan wisudawan 120 ITS khususnya dari Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol yang menjadi teman diskusi selama penyelesaian tugas akhir ini.
6. Teman-teman baik di dalam maupun di luar kampus yang selalu memotivasi saya untuk menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa mungkin masih ada kekurangan dalam laporan ini, sehingga kritik dan saran penulis terima. Semoga laporan ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis dan pihak yang membacanya.

Surabaya, 24 Juli 2019

Penulis



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASME.....	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	6
1.3 Tujuan.....	6
1.4 Lingkup Kajian.....	7
BAB II DASAR TEORI.....	9
2.1 Bahan Bakar.....	9
2.2 Biogas.....	10
2.3 Karakteristik Biogas.....	11
2.4 Pemurnian Biogas dengan <i>Pressure Swing Adsorption</i> (PSA).....	11
2.5 Batubara.....	13
2.6 <i>Carbon Capture</i> .....	13
2.7 <i>Oxy-Combustion</i> .....	14
2.8 Viskositas.....	17
2.9 <i>Air Separation</i> menggunakan <i>Pressure Swing Adsorption</i> (PSA).....	17
2.10 Pemodelan PSA.....	19
2.11 Perumusan Fungsi Tujuan.....	24
2.12 <i>Genetic Algorithm (GA)</i> .....	25
2.13 <i>Particle Swarm Optimization (PSO)</i> .....	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	27
3.1 Pengumpulan Data Energi Pemakaian Listrik dan Bahan Bakar.....	28
3.2 Perhitungan Massa Produk dan Reaktan Pembakaran	29

3.3 Perancangan PSA .....	29
3.4 Optimisasi Desain Teknologi yang Digunakan untuk <i>Air Separation (Pressure Swing Adsorption)</i> dan <i>Carbon Capture</i> .....	31
3.5 Perhitungan CAPEX dan OPEX <i>Air Separation (Pressure Swing Adsorption)</i> dan <i>Carbon Capture</i> .....	36
3.6 Membuat Plot CAPEX dan OPEX terhadap Teknologi yang Digunakan .....	37
3.7 Menghitung NPV dan IRR .....	39
3.8 Menganalisis Hasil .....	40
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>41</b>
4.1 Analisis <i>Oxyfuel</i> .....	41
4.2 Analisis <i>Pressure Swing Adsorption (PSA)</i> .....	44
4.3 Tinjauan Ekonomi .....	47
4.4 Pemanfaatan Nitrogen dalam Kehidupan .....	56
4.5 Pemanfaatan Karbon Dioksida (CO <sub>2</sub> ) dalam Kehidupan.....	58
5.1 Kesimpulan .....	61
5.2 Saran .....	61
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>63</b>
<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>67</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Siklus pemurnian biogas dengan PSA [7] .....	12
<b>Gambar 2.2</b>	Proses <i>oxy-combustion</i> [19].....	15
<b>Gambar 2.3</b>	Diagram Blok Sederhana <i>Oxy- Combustion Power Plant</i> [20] .....	16
<b>Gambar 2.4</b>	<i>Pressure Swing Adsorption</i> untuk <i>Air Separation</i> [24] .....	18
<b>Gambar 2.5</b>	Model <i>Pressure Swing Adsorption</i> [25] .....	19
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram alir metodologi penelitian .....	27
<b>Gambar 3.2</b>	Skema Teknologi yang Akan Diterapkan .....	30
<b>Gambar 3.3</b>	<i>Flowchart Genetic Algorithm</i> [33] .....	33
<b>Gambar 3.4</b>	<i>Flowchart Particle Swarm Optimization</i> [34]. ....	35
<b>Gambar 4.1</b>	Diagram Batang Listrik yang Dihasilkan .....	42
<b>Gambar 4.2</b>	Diagram Batang Energi yang Dibutuhkan.....	43
<b>Gambar 4.3</b>	Diagram Batang Massa Gas yang Didapatkan .....	43
<b>Gambar 4.4</b>	Diagram Batang Pemakaian Bahan Bakar .....	44
<b>Gambar 4.5</b>	Perbandingan Harga Komponen PSA .....	46
<b>Gambar 4.6</b>	Perbandingan CAPEX (GA dan PSO).....	52
<b>Gambar 4.7</b>	Perbandingan OPEX (GA dan PSO) .....	52
<b>Gambar 4.8</b>	Hasil Analisis NPV(GA dan PSO) .....	55
<b>Gambar 4.9</b>	Hasil Analisis IRR (GA dan PSO) .....	56
<b>Gambar 4.10</b>	Proses Pembuatan Pupuk [44] .....	57
<b>Gambar 4.11</b>	Skema proses CO <sub>2</sub> - EOR [48] .....	60

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Nilai HHV dan LHV bahan bakar [12] .....	10
<b>Tabel 2.2</b>	Karakteristik biogas secara umum [14].....	11
<b>Tabel 2.3</b>	Data fisik <i>Adsorbent</i> yang Digunakan.....	20
<b>Tabel 2.4</b>	Karakteristik <i>Adsorbent</i> yang Digunakan [26].....	23
<b>Tabel 3.1</b>	Listrik Yang Dihasilkan dan Pemakaian Bahan Bakar .....	28
<b>Tabel 3.2</b>	Persentase Bahan Bakar dan Energi Listrik dari Bahan Bakar.....	29
<b>Tabel 3.3</b>	Produk dan Reaktan yang Dihasilkan <i>power plant</i> .....	29
<b>Tabel 3.4</b>	Perhitungan CAPEX .....	37
<b>Tabel 3.5</b>	Perhitungan OPEX.....	38
<b>Tabel 4.1</b>	Hasil Analisis Massa Produk dan Reaktan pada PLTU PT. Great Giant Foods .....	41
<b>Tabel 4.2</b>	Parameter Desain <i>Pressure Swing Adsorption</i> .....	45
<b>Tabel 4.3</b>	Total Harga Komponen PSA Setelah Optimisasi ...	46
<b>Tabel 4.4</b>	Hasil Perhitungan CAPEX ( <i>Capital Expenditures</i> ) dalam USD.....	48
<b>Tabel 4.5</b>	Hasil Perhitungan OPEX ( <i>Operational Expenditures</i> ) dalam USD.....	49
<b>Tabel 4.6</b>	Hasil Perhitungan CAPEX ( <i>Capital Expenditures</i> ) dalam USD.....	50
<b>Tabel 4.7</b>	Hasil Perhitungan OPEX ( <i>Operational Expenditures</i> ) dalam USD.....	51
<b>Tabel 4.8</b>	Keuntungan Yang Dihasilkan Setiap Tahun (dalam USD).....	53
<b>Tabel 4.9</b>	NPV dan IRR berdasarkan <i>Genetic Algorithm</i> .....	54
<b>Tabel 4.10</b>	NPV dan IRR berdasarkan <i>Particle Swarm Optimization</i> .....	54
<b>Tabel 4.11</b>	Permintaan Nitrogen Setiap Tahun [43] .....	57
<b>Tabel 4.12</b>	Prospek dan Jumlah Penggunaan CO <sub>2</sub> secara Akumulatif.....	59

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kemajuan teknologi di sektor industri memberikan dampak positif terhadap keberlangsungan kehidupan manusia akan segala kemudahan dan keuntungan yang diperoleh. Namun di sisi lain, kemajuan teknologi di sektor industri juga dapat memberikan dampak buruk terhadap lingkungan dan alam sekitar. Kebanyakan teknologi yang ada pada saat ini adalah menggunakan bahan bakar fosil, salah satu jenis bahan bakar fosil yang saat ini sangat banyak digunakan adalah batubara. Indonesia merupakan negara penghasil batu bara terbesar keempat di dunia, dengan jumlah produksi yang dihasilkan yakni sekitar 469,3 juta ton batubara. Adapun Indonesia juga merupakan negara pengekspor batubara termal terbesar di dunia [1]. Sebuah data statistik menyebutkan bahwa penggunaan batubara di Indonesia cenderung mengalami peningkatan hingga sebanyak 2.371.507 ton pada tahun 2015 [2]. Batubara biasa digunakan sebagai bahan bakar utama untuk menghasilkan listrik pada industri PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap). Batu bara digunakan sebagai bahan bakar untuk memanaskan air sampai pada temperatur *superheated*, dimana hasil pembakaran batubara tersebut menghasilkan gas buang yang mengandung gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Sementara CO<sub>2</sub> adalah salah satu gas yang dapat mengakibatkan pemanasan global serta terjadinya perubahan iklim [3]. Salah satu cara untuk mengurangi emisi gas CO<sub>2</sub> adalah dengan melakukan suatu teknik penangkapan dan penyimpanan gas CO<sub>2</sub> pada suatu tempat, yang dikenal dengan metode *Carbon Capture and Storage* (CCS) [4].

CCS pada prinsipnya adalah bertujuan untuk menangkap gas CO<sub>2</sub> dari hasil pembakaran kemudian menyimpannya pada suatu tempat sehingga gas CO<sub>2</sub> tidak terbuang dan mencemari lingkungan. Penerapan CCS terdiri dari beberapa tahapan yakni *capture*, *transport*, dan *storage*. Tahap *capture* adalah dimana gas CO<sub>2</sub> dipisahkan dari produk gas lainnya untuk diambil, kemudian *transport* merupakan tahapan dimana CO<sub>2</sub> disalurkan dengan

menggunakan pipa ke suatu tempat penyimpanan, dan terakhir yaitu *storage* merupakan sebuah tahapan untuk menyimpan CO<sub>2</sub> pada suatu tempat yang aman supaya gas CO<sub>2</sub> tidak sampai mencemari udara. Berdasarkan perbedaan pada tahap *capture* yang digunakan, CCS dibedakan menjadi 3 jenis yaitu *pre-combustion*, *oxy-combustion* atau *oxyfuel*, dan *post-combustion*. Pada *pre-combustion* tahap *capture* dilakukan sebelum terjadi pembakaran di *boiler*, dimana dilakukan proses pemisahan CO<sub>2</sub> terlebih dahulu pada bahan bakarnya. Kemudian pada *oxyfuel*, yaitu dimana gas O<sub>2</sub> murni hasil pemisahan digunakan untuk pembakaran pada *boiler* sehingga menyempurnakan proses pembakaran supaya dapat menghasilkan gas CO<sub>2</sub> dan uap air pada hasil pembakaran, sehingga lebih mudah untuk dilakukan penerapan CCS. Sementara pada *post-combustion*, dilakukan pemisahan dan pengumpulan CO<sub>2</sub> dari unsur gas buang lainnya setelah terjadi pembakaran [5].

Berdasarkan ketiga tipe tersebut, penelitian tugas akhir ini melakukan analisis pada penerapan teknik *oxyfuel*. *Oxy-combustion* atau sering juga disebut *oxyfuel* merupakan sebuah teknik penangkapan dan penyimpanan CO<sub>2</sub> yang menggunakan oksigen murni untuk proses pembakaran supaya menghasilkan CO<sub>2</sub> dan uap air setelah pembakaran sehingga CO<sub>2</sub> dapat dipisahkan secara mudah dari uap air untuk diambil dan disimpan. Metode CCS dengan *oxyfuel* sebenarnya diusulkan pertamakali oleh seorang peneliti dari *Argonne national laboratory* pada tahun 1981 [6]. Penggunaan *oxy-combustion* secara nyata juga akan memberikan keuntungan pada proses pembakaran *boiler*, dimana penggunaan O<sub>2</sub> murni sebagai komponen dalam *boiler*, akan meningkatkan efisiensi pembakaran dan tidak mengakibatkan pemborosan energi. Selain itu hasil dari CO<sub>2</sub> yang tersimpan pada CCS, dapat didistribusikan untuk dijual, sehingga dapat meningkatkan keuntungan.

Proses pembakaran memegang peranan penting dalam pembangkitan energi pada *power plant*. *Boiler* merupakan tempat yang mendukung terjadinya pembakaran tersebut. Syarat supaya terjadinya pembakaran yakni adanya bahan bakar yang cukup, temperatur yang mendukung, udara bahan bakar yang cukup, dan



adanya sumber pemantik api. *Boiler* PT. Great Giant Foods juga menggunakan biogas sebagai bahan bakar tambahan supaya menghemat jumlah pemakaian batu bara. Biogas mengandung unsur gas metana yang digunakan pada proses pembakaran, untuk dapat meningkatkan efisiensi boiler pada proses pembakaran perlu dimurnikan dahulu kandungan  $\text{CH}_4$  di dalamnya. Teknik pemurnian yang digunakan pada penelitian ini yakni menggunakan *Pressure Swing Adsorption* (PSA). Teknik pemisahan PSA menggunakan *adsorbent* untuk mengadsorp suatu unsur pada gas dan memerlukan tekanan yang cukup supaya dapat mengadsorpsi unsur yang tidak diperlukan pada proses pembakaran. Besarnya tekanan dikendalikan oleh suatu pompa dengan kapasitas daya yang perlu diperhitungkan. Teknik PSA banyak diterapkan pada industri-industri dikarenakan mudah dalam penggunaannya serta banyaknya peluang ke depan untuk dilakukan optimisasi.

Adapun terdapat berbagai teknik pemisahan gas yang dapat digunakan, diantaranya *Pressure Swing Adsorption* (PSA), *Cryogenic Separation*, *Thermal Swing Adsorption* (TSA), *Membrane Separation*, *Water Scrubbing*, *Chemical Absorbtion*, maupun *Bio filter* [7]. Pada penelitian tugas akhir ini dipilih teknik PSA (*Pressure Swing Adsorption*) sebagai teknik adsorpsi gas yang digunakan pada pemisahan gas karbon dioksida untuk memurnikan biogas yang akan digunakan sebagai bahan bakar juga sebagai teknik *air separation* untuk proses *oxyfuel*. Pemisahan gas menggunakan PSA dilakukan dengan tekanan tertentu untuk memisahkan campuran gas berdasarkan karakteristik molekul dan afinitas material *adsorbent*. Alasan dipilihnya teknik pemisahan gas menggunakan PSA dikarenakan pengoperasiannya yang sederhana, kemampuan *sieve bed* molekuler untuk menahan degradasi mekanis, serta kemungkinan untuk mendehirasi gas dan membuang asam secara simultan. Secara spesifik, sistem PSA juga sesuai terhadap siklus yang cepat, membuat proses menjadi lebih terjamin dalam memperoleh keluaran besar dengan *bed adsorbent* yang kecil. Keuntungan utama dengan menggunakan teknik PSA adalah dengan biaya modal dan perawatan yang rendah dapat menghasilkan produk yang diinginkan dengan tingkat kemurnian

yang tinggi selain itu waktu *start-up* dan *shut down* cepat, tidak ada masalah korosi, tidak memerlukan sumber panas, tidak perlu insulasi pipa, dan tidak perlu operasi komparatif *straight forward* [8]. Untuk menggunakan PSA sebagai komponen pemisahan gas perlu dirancang model PSA secara tepat sehingga sesuai dengan *plant* yang digunakan.

Perancangan model PSA dimulai dengan menentukan jumlah *adsorbent* yang diperlukan, menghitung luas penampang kolom PSA, menghitung kemurnian karbon dioksida, menghitung panjang kolom PSA yang diperlukan yang berkaitan dengan waktu kontak antara gas dengan permukaan *adsorbent*, kemudian menghitung besarnya *pressure drop* menggunakan persamaan *Ergun* [9]. Sehingga dengan diketahuinya besar *pressure drop*, dapat dihitung daya motor yang diperlukan untuk mendorong gas melewati kolom.

Model PSA yang telah diperoleh, selanjutnya akan dioptimisasi menggunakan 2 jenis algoritma optimisasi. Algoritma yang akan digunakan adalah *Genetic Algorithm* (GA) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO). Optimisasi bertujuan untuk mendapatkan model PSA yang optimal, sehingga dapat meningkatkan keuntungan. Analisis teknoekonomi berkaitan erat dengan keuntungan jangka panjang dari suatu sistem. Adapun penelitian ini berisikan penelitian mendapatkan model PSA menggunakan data yang telah ada, kemudian berdasarkan model yang diperoleh didefinisikan fungsi tujuan serta fungsi kendala, untuk selanjutnya dilakukan optimisasi pada variabel dari model PSA. Model PSA sebelum optimisasi dan setelah optimisasi selanjutnya digunakan untuk menganalisis tekno-ekonomi retrofit. Adapun untuk optimisasi model PSA diperlukan *software Matlab* untuk menghitung nilai optimum dan variabel yang diperlukan pada desain PSA. Optimasi dilakukan menggunakan dua buah algoritma berbeda, untuk selanjutnya dicari tahu algoritma yang paling sesuai untuk mencari nilai optimum dari suatu fungsi objektif. Dengan demikian dapat diketahui desain optimum dari PSA serta keuntungan optimum yang dapat diperoleh.

Analisis terutama berfokus pada teknoekonomi untuk mendapatkan keuntungan maksimum. Besarnya biaya yang dikeluarkan dianalisis berdasarkan CAPEX dan OPEX. CAPEX (*Capital Expenditures*) didefinisikan sebagai besarnya biaya yang diperlukan untuk pengadaan alat dan komponen yang diinginkan. Sedangkan OPEX atau *Operational Expenditures* didefinisikan sebagai biaya yang dikeluarkan untuk dapat mengoperasikan komponen, misalnya biaya listrik yang dibutuhkan pada *blower* dan *compressor* [10]. Kemudian keuntungan akan diperoleh dari penghematan bahan bakar dan penjualan gas CO<sub>2</sub> dari biogas dan CCS. Perhitungan keuntungan yang diperoleh, dihitung menggunakan metode NPV dan IRR. NPV (*Net Present Value*) adalah besarnya keuntungan bersih yang akan didapatkan setelah penjualan pada saat itu. Sementara itu IRR (*Internal Rate Return*) didefinisikan sebagai metode yang digunakan untuk mengevaluasi investasi mana yang memberikan tingkat pengembalian yang relatif lebih baik [11].

Adapun PT. Great Giant Foods merupakan sebuah perusahaan raksasa yang terletak di Terbanggi Besar, Lampung Tengah. Perusahaan tersebut saat ini tengah menjadi produsen nanas kaleng terbesar di dunia dengan perkebunan dan pabrik produksinya yang terintegrasi dalam satu lokasi yang sama. Terdapat pembangkit listrik yang dimiliki oleh PT. Great Giant Foods terdiri dari 3 unit dengan kapasitas kurang-lebih sebesar 11 MW, dimana untuk produksi listrik sehari-hari adalah sebesar 7 MW. Selama ini *plant* PLTU PT. Great Giant Foods menggunakan batubara dan biogas sebagai bahan bakar untuk pembakaran di *boiler* namun oleh karena belum adanya PSA dan sistem *oxyfuel*, pembakaran yang terjadi masih kurang efisien. Kemudian oleh karena belum adanya teknologi CCS, dengan demikian PLTU PT. Great Giant Foods belum memanfaatkan gas buang hasil pembakaran. Dengan menggunakan teknologi PSA dan *oxyfuel* diharapkan dapat membuat pembakaran lebih efisien sehingga menghemat bahan bakar yang digunakan dan dengan teknologi CCS maka gas buang CO<sub>2</sub> dapat ditangkap, disimpan dan dimanfaatkan kembali untuk dijual. Sehingga berdasarkan

pemaparan sebelumnya penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk mendesain PSA, sistem *oxyfuel*, dan sistem *Carbon Capture and Storage (CCS)* yang akan diterapkan pada *plant* PLTU PT. Great Giant Foods, Terbanggi Besar, Lampung Tengah, dalam hubungannya supaya mendapatkan keuntungan yang optimal.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka permasalahan yang dapat diambil yaitu:

1. Bagaimana cara melakukan analisis stoikiometri untuk menghitung jumlah massa masing-masing komponen zat dalam pembakaran pada *power plant* PT. Great Giant Foods, Terbanggi Besar, Lampung Tengah?
2. Bagaimana menganalisis besarnya *capital expenditures (CAPEX)* dan *operational expenditures (OPEX)* yang diperlukan untuk mendesain *oxyfuel* dan CCS pada *power plant*?
3. Bagaimana besar keuntungan maksimum yang akan diperoleh dengan adanya penambahan desain *oxyfuel* dan CCS pada *boiler*?

## 1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan yang dapat diambil yaitu:

1. Melakukan analisis stoikiometri untuk menghitung jumlah massa masing-masing komponen zat dalam pembakaran pada *power plant* PT. Great Giant Foods, Terbanggi Besar, Lampung Tengah
2. Menganalisis besarnya *capital expenditures (CAPEX)* dan *operational expenditures (OPEX)* yang diperlukan untuk mendesain *oxyfuel* dan CCS pada *power plant* PT. Great Giant Foods, Terbanggi Besar, Lampung Tengah
3. Menghitung besar keuntungan maksimum yang didapatkan dengan adanya penambahan desain *oxyfuel* dan CCS pada *boiler*.

#### 1.4 Lingkup Kajian

Adapun lingkup kajian untuk penelitian pada tugas akhir ini adalah diantaranya pada tipe boiler yang digunakan, bahan bakar yang digunakan, dan software yang digunakan untuk melakukan optimisasi. Tipe *boiler* yang dianalisis adalah boiler dengan tipe *subcritical* yang ada di PT. Great Giant Foods. Kemudian bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar biogas dan batu bara, dimana batu bara setelah dilakukan pembakaran, unsur karbonnya akan dipisahkan dari uap air begitu pula dengan biogas yang akan dimurnikan dari unsur CO<sub>2</sub> menggunakan *Pressure Swing Adsorption*. Pada tahap akhir analisis dilakukan optimisasi model *Pressure Swing Adsorption* yang digunakan. Pemecahan masalah model dioptimisasi dengan menggunakan dua jenis *stochastic algorithm* yaitu *Genetic Algorithm* (GA) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO), sehingga diperlukan *software* bantu berupa *Matlab* dan *Microsoft Excel*. Oleh karena itu penelitian tugas akhir “Optimisasi Teknoekonomi Retrofit Reaktor Dan Boiler Pada PLTU PT. Great Giant Foods Terbanggi Besar Lampung Tengah” dilakukan dengan tujuan untuk membuat desain *Pressure Swing Adsorption* (PSA) untuk memurnikan kandungan metana pada biogas, membuat desain *oxyfuel*, dan juga membuat desain *Carbon Capture and Storage* (CCS) dalam kaitannya untuk mendapatkan keuntungan yang optimal.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## **BAB II**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 Bahan Bakar**

Pada pembangkit listrik tenaga uap diperlukan bahan bakar sebagai komponen utama untuk memulai proses. Tanpa adanya bahan bakar maka proses produksi tidak dapat berjalan. Bahan bakar merupakan material yang dapat diubah ke dalam suatu bentuk energi. Reaksi pembakaran yang terjadi pada bahan bakar merupakan reaksi redoks, di mana material tersebut akan melepaskan panas setelah direaksikan dengan oksigen di udara. Reaksi lain yang digunakan untuk memperoleh energi dari bahan bakar dapat berupa reaksi eksotermal maupun reaksi nuklir.

Proses pembakaran akan menghasilkan energi berupa panas, dengan jumlah energi yang dihasilkan bergantung pada kualitas dari bahan bakar yang digunakan. Nilai jumlah energi yang dihasilkan dari proses pembakaran oleh suatu bahan bakar dalam setiap satuan massa dinamakan *Heating Value* (nilai kalor). Dimana didefinisikan sebagai banyaknya jumlah energi yang dihasilkan sebagai panas ketika terjadi proses pembakaran sempurna dari bahan bakar dengan oksigen dalam kondisi standar. Dalam penelitian ini, bahan bakar yang digunakan tergolong ke dalam suatu senyawa hidrokarbon, sehingga hasil pembakaran sempurna senyawa hidrokarbon dengan oksigen akan menghasilkan karbon dioksida dan uap air [12]. Satuan yang digunakan untuk mengukur nilai kalor yang dihasilkan oleh bahan bakar biasanya berupa: kJ / kg, kJ / mol, kkal / kg, atau Btu / lb. Banyaknya kalor yang dihasilkan pada proses pembakaran dipengaruhi oleh nilai kalor dan massa bakar yang digunakan, dirumuskan sesuai persamaan 2.1.

$$Q = m \times HHV \text{ atau } Q = m \times LHV \quad (2.1)$$

Dimana  $Q$  menunjukkan kalor yang dihasilkan,  $m$  menunjukkan massa bahan bakar, dan HHV/LHV menunjukkan *Higher Heating Value / Lower Heating Value* untuk bahan bakar.

Adapun tabel nilai HHV dan LHV pada beberapa bahan bakar ditunjukkan pada tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Nilai HHV dan LHV bahan bakar [12].

Fuel	HHV MJ/kg	HHV BTU/lb	LHV MJ/kg	LHV BTU/lb
Hydrogen	142,18	61,127	120.21	51,682
Methane	55,50	23,900	47,14	20,267
Propane	50,23	21,597	46.3	19,904
Butane	49,21	21,157	45.27	19,466
Coal	23,96	10,304	20.00	9,773
Bituminous Coal	-	-	32.25	13,840

## 2.2 Biogas

Meningkatnya suhu bumi dan pemanasan global menuntut manusia untuk melakukan pengurangan pemakaian energi fosil. Hal tersebut dikarenakan penggunaan energi fosil menghasilkan gas buang dalam jumlah yang besar sehingga dapat mencemari lingkungan. Salah satu energi terbarukan yang potensial saat ini adalah biogas. Biogas adalah suatu jenis bahan bakar organik terbarukan yang dihasilkan dari proses fermentasi menggunakan bakteri anaerob. Bahan bakar biogas dapat dibuat secara sederhana menggunakan material dari limbah atau bahan sisa-sisa dari berbagai macam bahan organik seperti jerami, kotoran ternak, eceng gondok, dan sampah. Bahan kimia utama yang menjadi sumber dari pembakaran menggunakan biogas adalah metana. Sehingga semakin tinggi persentase jumlah metana dalam biogas maka semakin tinggi pula besarnya nilai kalor. Secara garis besar nilai kalor biogas adalah cukup tinggi, yaitu berkisar antara 4800 sampai 6700 kkal/m<sup>3</sup>. Hal tersebut tentu lebih kecil bila dibandingkan dengan gas metana murni (100%) mempunyai nilai kalor 8900 kkal/m<sup>3</sup> [13]. Sebagai bahan bakar, biogas memiliki keuntungan yakni, menghasilkan bahan bakar ramah lingkungan, tidak menimbulkan asap sehingga tidak menyebabkan polusi, dan efisiensinya tinggi. Di lain sisi biogas memiliki beberapa



kelemahan diantaranya, memerlukan lahan yang luas dan harga untuk membangun *plant* biogas cukup mahal.

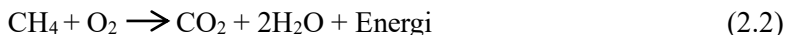
### 2.3 Karakteristik Biogas

Biogas dihasilkan oleh proses fermentasi dari material organik dengan bantuan bakteri anaerob. Biogas merupakan campuran gas mudah terbakar yang secara garis besar terdiri dari metana, karbon dioksida, dan beberapa zat lainnya [14]. Berikut ini adalah karakteristik biogas secara umum pada tabel 2.2.

**Tabel 2.2** Karakteristik biogas secara umum [14]

Composition	55 – 70% methane (CH <sub>4</sub> ) 30 – 45% carbon dioxide (CO <sub>2</sub> ) Trace of other gases
Energy Content	6,0- 6,5 kWh m <sup>-3</sup>
Fuel Equivalent	0,60 – 0,65 L.oil/m <sup>3</sup> biogas
Explosion limits	6 – 12% biogas in air
Ignition temperature	650 - 750°C
Critical pressure	75 = 89
Critical Temperature	82,5 °C
Normal Density	1,2 kg/m <sup>3</sup>
Smell	Bad eggs
Molar mass	16,043 Kg/mol

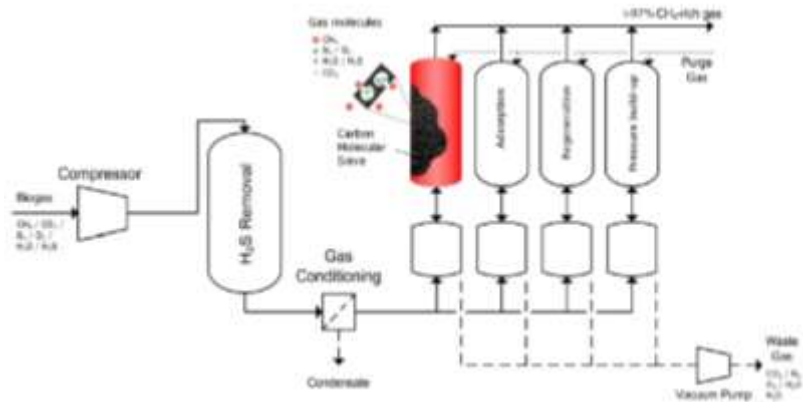
Persamaan reaksi pembakaran biogas merupakan reaksi pembakaran pada metana yang dituliskan berdasarkan persamaan reaksi sesuai persamaan 2.2.



### 2.4 Pemurnian Biogas dengan *Pressure Swing Adsorption* (PSA)

Bahan bakar biogas dapat dimurnikan untuk diambil sebagian besar kandungan gas metananya saja. Salah satu teknik pemurnian biogas adalah dengan menggunakan PSA, yang secara

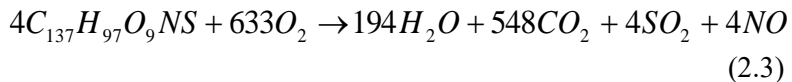
garis besar dimulai dari mengkompresi tekanan dari biogas, kemudian mengkondensasi kandungan air melalui sistem pertukaran suhu tinggi, dan terakhir yaitu dilakukan penyerapan unsur-unsur yang lebih halus seperti amonia dan hidrogen sulfida [15]. Tugas memisahkan gas menggunakan adsorpsi tergantung pada jenis bahan *adsorbent* yang digunakan saat mengalami peningkatan tekanan. Dalam proses PSA, biogas dikompresi menjadi tekanan antara 4-10 bar dan diumpungkan ke bejana (kolom) yang dihubungkan dengan suatu bahan (*adsorbent*) yang secara selektif menyimpan  $\text{CO}_2$ . Metana ( $\text{CH}_4$ ) yang dimurnikan dikumpulkan di bagian atas kolom dengan penurunan tekanan yang sangat kecil. Setelah beberapa saat, *adsorbent* tersaturasi dengan  $\text{CO}_2$ , dan kolom perlu diregenerasi dengan mengurangi tekanan (biasanya divakumkan untuk peningkatan biogas). Adsorpsi  $\text{H}_2\text{S}$  biasanya *irreversible* dalam *adsorbent* dan dengan demikian proses untuk menghilangkan gas ini seharusnya ditempatkan sebelum PSA. Salah satu sifat terpenting dari proses PSA adalah yang dapat disesuaikan dengan pemurnian biogas yang ada di seluruh di dunia karena tidak bergantung pada ketersediaan dingin atau panasnya sumber. Untuk lebih memahami proses PSA dapat dijelaskan dengan gambar 2.1 [7].



**Gambar 2.1** Siklus pemurnian biogas dengan PSA [7]

## 2.5 Batubara

Batubara merupakan bahan bakar yang berasal dari sisa organik makhluk hidup yang telah membatu dan terkubur selama jutaan tahun. Dibanding bahan bakar fosil lainnya, bahan bakar batubara adalah yang paling melimpah jumlahnya. Secara garis besar batubara mengandung sekitar 10-30% material anorganik terdiri dari mineral tanah liat, kuarsa, dan pasir [16]. Batu bara dibagi ke dalam empat kelas yakni *anthracite*, *bituminous*, *sub-bituminous*, dan *lignite*. *Anthracite* adalah jenis batubara yang keras, berwarna abu kehitaman, serta agak berkilau. *Anthracite* mengandung sekitar 86%-98% dari berat karbon, dimana apabila dibakar akan terbakar lambat dan mengeluarkan api berwarna biru. *Bituminous* merupakan batu bara lunak, mengandung sekitar 69%-86% massa karbon dan merupakan jenis batu bara yang paling melimpah. *Sub-bituminous* mengandung sedikit karbon dan kandungan air berlebih, sehingga kurang baik untuk pembakaran. *Lignite* adalah batu bara yang sangat lunak mengandung berat air sebanyak 70%. Berdasarkan teori, rumus kimia untuk batubara yang secara umum yaitu *bituminous* adalah  $C_{137}H_{97}O_9NS$  [17]. Sehingga apabila dilakukan reaksi pembakaran pada batu bara, diperoleh persamaan reaksi sesuai persamaan 2.3.



## 2.6 Carbon Capture

*Carbon capture* didefinisikan sebagai suatu proses untuk mengumpulkan limbah karbon dioksida dari suatu sumber pembuangan hasil proses industri, misalnya seperti pembangkit listrik berbahan bakar fosil, untuk dibawa ke suatu lokasi penyimpanan. Tujuan utamanya adalah untuk mencegah pelepasan karbon dioksida ke atmosfer dalam jumlah besar oleh karena penggunaan bahan bakar fosil di pembangkit listrik dan industri lainnya [18]. Strategi untuk mengurangi emisi karbon dioksida ini dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu dekarbonisasi pasca-pembakaran, dekarbonisasi pra-pembakaran, dan siklus *oxy-fuel*.

Pada dekarbonisasi pra-pembakaran atau *pre-combustion* terjadi penangkapan CO<sub>2</sub> sebelum masuk ke pembakaran, kemudian pada siklus *oxyfuel* dilakukan penangkapan nitrogen oleh *air separator* sehingga hanya oksigen murni yang masuk ke ruang bakar, sehingga meningkatkan jumlah gas buang CO<sub>2</sub> yang akan ditangkap setelah proses pembakaran, sementara pada siklus pasca pembakaran atau *post-combustion* dilakukan penangkapan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) setelah proses pembakaran. Pada penelitian tugas akhir ini digunakan siklus *oxyfuel* dengan tujuan untuk meningkatkan efektifitas pembakaran di *boiler*.

## 2.7 *Oxy-Combustion*

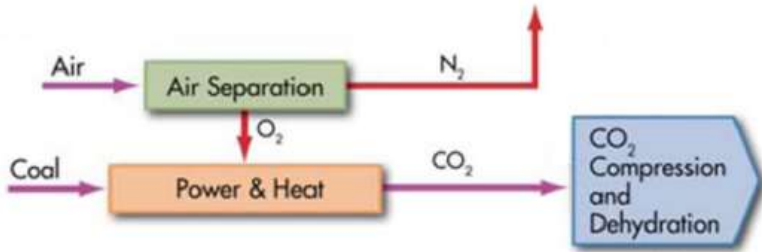
Teknologi *oxy-combustion*, juga dikenal dengan teknologi *oxyfuel* didefinisikan sebagai pembakaran bahan bakar fosil menggunakan oksigen murni. Sehingga meningkatkan konsentrasi CO<sub>2</sub> dalam gas buang dan mengurangi konsentrasi gas lain seperti nitrogen dan pada akhirnya memungkinkan penangkapan CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil.

Penggunaan *oxy-combustion* memiliki beberapa keuntungan diantaranya sebagai berikut [6].

- a. Penggunaan *oxyfuel* menggunakan sistem *boiler* konvensional sehingga mudah diterapkan pada *power plant*.
- b. Pembakaran yang bebas nitrogen sehingga meningkatkan efisiensi pembakaran, serta memperkecil biaya operasi.
- c. Emisi rendah, oleh karena gas keluaran CO<sub>2</sub> sebagian besar dapat ditangkap
- d. Berpotensi dalam penghematan biaya pengeluaran, oleh karena peningkatan efisiensi, penangkapan gas buang, dan oksigen yang dihasilkan.

Secara umum proses tersebut menghilangkan kandungan nitrogen dari udara untuk memperoleh gas oksigen murni. Dengan meningkatnya konsentrasi oksigen yang masuk ke dalam ruang bakar, maka konsentrasi CO<sub>2</sub> pada gas keluaran akan meningkat hingga 90% atau lebih, sehingga memudahkan penangkapan CO<sub>2</sub>

pada proses *carbon capture*. Proses *oxy-combustion* adalah dapat dijelaskan berdasarkan dengan gambar 2.2.



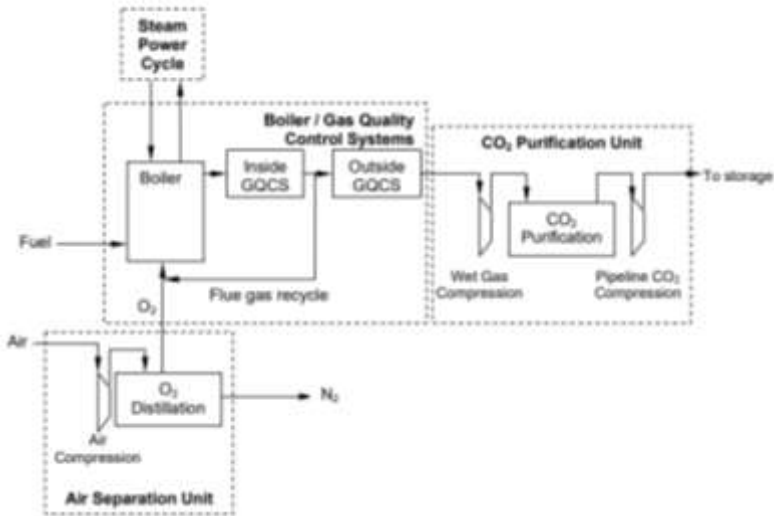
**Gambar 2.2** Proses *oxy-combustion* [19]

Komponen utama dalam *oxy-combustion* adalah sebagai berikut [20]

- a. *Air Separation Unit* (ASU): berfungsi memisahkan  $O_2$  dari udara menggunakan metode pemisahan tertentu.
- b. *Combustion/Heat Transfer/Gas Quality Control System* (GQCS): Pada komponen ini bahan bakar dibakar oleh campuran dari oksigen dan daur ulang *flue gas*. Hasil pembakaran kemudian didinginkan untuk mengembalikan panas dan bebas dari *fly ash*.
- c. *CO<sub>2</sub> Purification Unit* (CPU): CPU akan menyertakan sub-sistem pengeringan gas buang dan kompresor untuk mengirimkan produk  $CO_2$  ke pipa penerima atau situs penyimpanan geologi. Jika diperlukan, itu akan juga termasuk proses kondensasi parsial untuk memurnikan produk  $CO_2$  dan menghilangkan kotoran yang ditentukan tingkat.

Adapun pada penelitian ini pada *air separation unit* digunakan teknik pemisahan PSA (*Pressure Swing Adsorption*) untuk memisahkan oksigen dari nitrogen pada udara. Sehingga didapatkan oksigen murni yang diperlukan pada proses

pembakaran. Untuk mengetahui proses pada *oxyfuel* dapat dilihat blok diagram sederhana yang ditunjukkan oleh gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Diagram Blok Sederhana *Oxy-Combustion Power Plant* [20]

Berdasarkan diagram blok tersebut, pertama udara masuk ke dalam bagian *air separation unit*. Di dalamnya dilakukan pemisahan antara oksigen dan nitrogen, dimana selanjutnya oksigen akan digunakan untuk pembakaran, sementara nitrogen yang dipisahkan akan ditangkap untuk dimanfaatkan. Kemudian oksigen akan bertemu dengan bahan bakar pada proses pembakaran di boiler menghasilkan gas keluaran berupa  $CO_2$  serta beberapa campuran seperti  $SO_x$ ,  $NO_x$ , dan *fly ash*. Sebagian besar udara keluar dari boiler dimanfaatkan kembali oleh GQCS dikembalikan untuk mengendalikan temperatur pada sistem *oxy-combustion* sehingga tidak menghasilkan emisi gas buang. Sebagian gas keluaran lainnya yang kaya akan  $CO_2$  mengalir menuju *CO<sub>2</sub> purification* untuk ditangkap dan disimpan.

## 2.8. Viskositas

Aliran fluida sangat berpengaruh besar pada proses suatu sistem, terutama pada penentuan desain PSA. Aliran fluida sangat berkaitan erat terhadap salah satu sifat intrinsik fluida, yakni viskositas. Adapun viskositas didefinisikan sebagai ukuran hambatan yang terjadi pada aliran fluida yang dikarenakan adanya gesekan antar permukaan fluida. Yang mana dalam hal tersebut viskositas menunjukkan tingkat kekentalan atau ketebalan dari suatu fluida. Secara umum, viskositas terdiri dari viskositas kinematik dan viskositas dinamik. Viskositas kinematik merupakan ukuran resistansi aliran suatu fluida ketika tidak ada gaya luar selain gravitasi yang bekerja padanya, sementara viskositas dinamik adalah ukuran resistansi aliran fluida saat diberi gaya luar yang bekerja [21].

Pada pemisahan menggunakan PSA, setiap fluida merupakan campuran antara dua jenis fluida. Berdasarkan persamaan *Herning* dan *Zipperer*, viskositas dinamik antara campuran dua fluida adalah berhubungan dengan massa molar serta fraksi mol pada setiap komponen gas, adapun dapat dihitung menggunakan persamaan 2.4 [22].

$$\eta_{mix} = \frac{\sum(\eta_i x_i \sqrt{M_i})}{x_i \sqrt{M_i}} \quad (2.4)$$

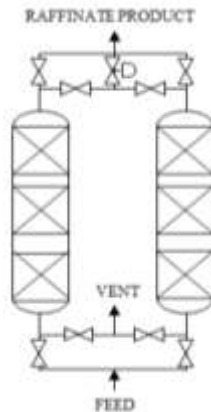
Dimana  $\eta_{mix}$  = viskositas campuran  
 $\eta_i$  = viskositas komponen gas i  
 $x_i$  = fraksi mol komponen gas i  
 $M_i$  = massa molar komponen gas i

## 2.9 Air Separation menggunakan Pressure Swing Adsorption (PSA)

PSA merupakan suatu teknik yang biasa digunakan untuk memurnikan suatu zat terhadap campurannya. Salah satu penggunaan PSA adalah pada teknik pemisahan oksigen dari campuran udara yang unsur utamanya adalah nitrogen. Metode tersebut dinamakan *air separation*. Terdapat banyak teknologi dalam *air separation*, diantaranya *cryogenic distillation*, *vacuum*

*pressure swing adsorption*, *supersonic separation*, dan lain sebagainya.

Penggunaan *pressure swing adsorption* dipilih dalam penelitian ini oleh karena biaya pembeliannya dan biaya operasionalnya yang lebih murah dibandingkan peralatan *air separation* lainnya serta juga dapat memberikan performa yang baik. PSA memiliki material padatan yang dinamakan *adsorbent*, material inilah yang berperan penting dalam menyerap suatu molekul unsur tertentu untuk memisahkan suatu molekul dari campurannya. PSA bekerja dengan berdasarkan prinsip adsorpsi dan desorpsi. Adsorpsi adalah keadaan ketika suatu molekul fluida terikat pada permukaan *adsorbent*. Selanjutnya terjadi proses desorpsi, yang merupakan keadaan dimana terjadi penurunan tekanan sehingga *adsorbent* akan mampu melepaskan molekul yang telah diserap. Dengan teknik pemisahan PSA, maka gas akan dipisahkan berdasarkan tingkat adsorpsi gas pada *adsorbent* dengan tekanan tertentu [23]. Adapun rancangan PSA sederhana yang digunakan ditunjukkan pada gambar 2.4



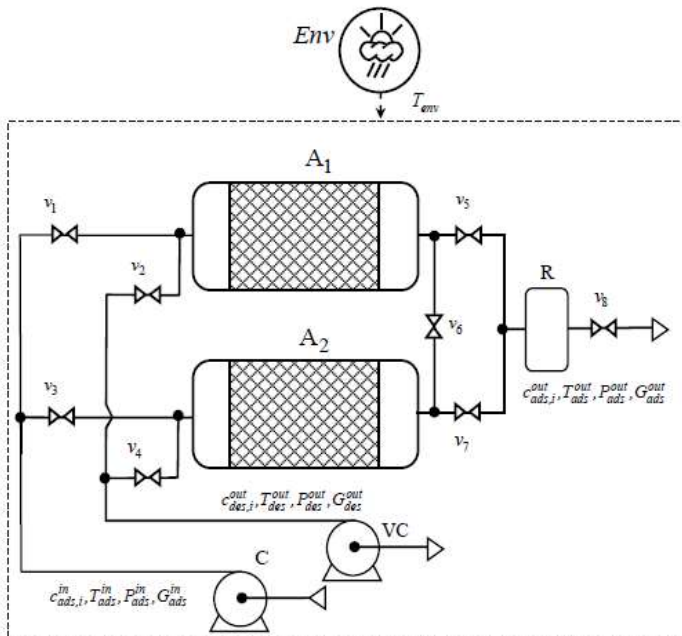
**Gambar 2.4** *Pressure Swing Adsorption* untuk *Air Separation*

[24]



## 2.10 Pemodelan PSA

Tahap berikutnya adalah memodelkan persamaan pada PSA. Hal ini dilakukan dengan menghitung jumlah massa *adsorbent*. Selanjutnya dihitung besarnya luas penampang kolom, menghitung panjang kolom PSA yang diperlukan yang berkaitan dengan waktu kontak antara gas dengan permukaan *adsorbent*, kemudian menghitung besarnya *pressure drop* menggunakan persamaan *Ergun*. Sehingga dengan diketahuinya besar *pressure drop*, dapat dihitung daya motor yang diperlukan untuk mendorong gas melewati kolom. Dalam penelitian ini akan dibuat dua buah desain PSA yang akan dilakukan analisis percobaan. Prinsip kerja PSA adalah berdasarkan proses adsorpsi dan desorpsi yang ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Model *Pressure Swing Adsorption* [25]

Dimana berdasarkan gambar 2.5 tersebut komponen PSA terdiri dari 1 tabung adsorpsi, 1 tabung desorpsi, *blower*, *compressor*, pompa, dan beberapa *valve*. Pada penelitian kali ini digunakan *pressure swing adsorption* untuk mengadsorpsi gas CO<sub>2</sub> dan gas nitrogen. Untuk dapat mengadsorpsi gas diperlukan adsorbent. Dalam penelitian ini digunakan *adsorbent zeolite* tipe 4A, 5A dan 13X dengan karakteristik sesuai dengan tabel 2.3.

**Tabel 2.3** Data fisik *Adsorbent* yang Digunakan [26]

Adsorbent	Diameter (mm)	Void	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Zeolite 4A	2	0.3	690
Zeolite 5A	2.7	0.4	695
Zeolite 13X	1.6	0.5	660

*Adsorbent* diletakkan pada kolom PSA sebagai material pengadsorb gas. Luas daerah penampang kolom yang ditempati *adsorbent* dinamakan *cross section area* (S). Yang mana dirumuskan berdasarkan persamaan 2.5 [27].

$$S_{tot} = \frac{F_{feed}}{u} (1 + \varphi) \quad (2.5)$$

Dimana:  $S_{tot}$  = *cross section area* keseluruhan (m<sup>2</sup>)

$F_{feed}$  = laju aliran feed (m<sup>3</sup>/s)

$u$  = kecepatan komponen gas (m/s)

$\varphi$  = ratio waktu desorpsi dan adsorpsi

Untuk menghitung kualitas hasil adsorpsi dari zat yang diserap maka perlu dihitung besarnya kemurnian yang diinginkan dengan mengatur besarnya nilai dari selang waktu adsorpsi dan selang waktu kontak. Yang mana selanjutnya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.6 [27].

$$pur = \frac{(1-C_A).t_A}{(1-C_A).t_A + (1-y).\varepsilon.t_C} \quad (2.6)$$

Dimana:  $C_A = 1 - \text{capture rate}$  komponen gas yang diadsorpsi  
 $y$  = fraksi mol zat yang diadsorpsi pada feed  
 $t_C$  = waktu kontak (s)  
 $t_A$  = waktu adsorpsi (s)  
 $\varepsilon$  = *bed void*

Adapun waktu kontak ( $t_C$ ) didefinisikan sebagai selang waktu komponen gas yang akan diadsorpsi saat mengalami kontak dengan *adsorbent*. Yang dirumuskan berdasarkan persamaan 2.7.

$$t_C = \frac{L}{u} \quad (2.7)$$

Dimana :  $L$  = panjang kolom (m)  
 $u$  = kecepatan komponen gas (m/s)

Banyaknya gas yang diadsorpsi dinyatakan dalam satuan mol. Sehingga jumlah mol gas yang diadsorpsi oleh *adsorbent* dalam selang waktu adsorpsi sebesar  $t_A$  adalah didefinisikan dengan persamaan 2.8 [27].

$$n_{gas} = y_{gas} \cdot F_{feed} \cdot \frac{p_A}{R \cdot T} \cdot t_A \cdot 0,9 \quad (2.8)$$

Dimana:

$n_{gas}$  = jumlah mol gas CO<sub>2</sub> atau N<sub>2</sub> yang diadsorpsi

$y_{gas}$  = fraksi mol gas CO<sub>2</sub> atau N<sub>2</sub> pada masukan kolom

$p_A$  = tekanan adsorpsi (bar)

$R$  = konstanta gas

$T$  = temperatur (K)

$t_A$  = waktu adsorpsi (s)

Harga modul dari *pressure swing adsorption* yang digunakan dapat ditentukan berdasarkan panjang dan diameter kolom desain PSA yang dibutuhkan, dengan menggunakan persamaan 2.9 [28].

$$BMC = 4,65 \times \frac{586}{397} \times M \times N \times PC \quad (2.9)$$

Dimana:

$BMC$  = harga modul *pressure swing adsorption* (USD)

$M$  = jumlah *pressure swing adsorption* yang digunakan

$N$  = jumlah kolom pada satu *pressure swing adsorption*

$$\log(PC) = 3,4974 + 0,4485 \log(Vol) + 0,1074[\log(Vol)]^2$$

Ketika aliran gas melalui kolom PSA, terjadi penurunan tekanan gas yang dipengaruhi panjang kolom PSA, hal tersebut dinamakan *pressure drop*. Hal tersebut dinyatakan dalam persamaan *Ergun* yang ditunjukkan oleh persamaan 2.10.

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150u\mu}{d_p^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + 1.75 \frac{\rho_g u^2}{d_p} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (2.10)$$

Dimana:  $\Delta p$  = *pressure drop* (Pa)

$L$  = panjang kolom (m)

$d_p$  = diameter partikel (m)

$u$  = kelajuan gas (m/s)

$\mu$  = viskositas fluida (Pa s)

$\rho_g$  = massa jenis gas ( $\text{kg/m}^3$ )

$\varepsilon$  = *bed void*

Berdasarkan definisi yang diperoleh menggunakan persamaan *Ergun*, bahwa kelajuan gas mempengaruhi besarnya *pressure drop* yang terjadi, dimana kelajuan gas yang terjadi dipengaruhi oleh panjang kolom dan waktu adsorpsi. Semakin tinggi kelajuan gas yang masuk maka semakin banyak  $\text{CO}_2$  yang diserap sehingga semakin banyak  $\text{CO}_2$  yang mengalami kontak dengan *adsorbent*, sehingga berdasarkan persamaan *Ergun* ini menunjukkan bahwa *pressure drop* dapat dipengaruhi oleh jumlah  $\text{CO}_2$  yang diserap oleh *adsorbent* dilihat dari pengaruh kecepatan terhadap jumlah  $\text{CO}_2$  yang diserap.

Dengan demikian perlu adanya *pressure* tambahan untuk mendorong gas. Besarnya daya yang dibutuhkan untuk mendorong gas akibat adanya *pressure drop* ketika gas melewati kolom dapat dirumuskan berdasarkan pada persamaan 2.11 [29]

$$P = \frac{p_1 \cdot Q \cdot k}{eff \cdot (k-1)} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] \quad (2.11)$$

Dimana :  $P$  = daya yang dibutuhkan untuk mendorong gas (watt)

$p_1 = p_2 + \Delta p$  (Pa)

$p_2$  = tekanan adsorpsi (Pa)

$Q$  = laju aliran fluida ( $m^3/s$ )

$k$  = *specific heat ratio*

$eff$  = efisiensi

Sebelumnya telah dilakukan penelitian oleh Ling J. dkk (2014) yang telah menjelaskan persamaan besarnya daya yang dibutuhkan untuk menaikkan tekanan, untuk proses adsorpsi yakni  $p_1$  adalah sebesar tekanan atmosfer, dan proses desorpsi yakni  $p_2$  adalah sebesar tekanan atmosfer [30]. Selain proses yang telah disebutkan, model *pressure swing adsorption* juga dipengaruhi oleh *adsorbent* yang digunakan. *Adsorbent* merupakan zat padat yang dapat menyerap komponen gas tertentu. Pada kasus ini *adsorbent* digunakan untuk penyerapan  $CO_2$  dan  $N_2$ . *Adsorbent* yang digunakan dalam tugas akhir ini dibagi menjadi tiga jenis yaitu *zeolite 13X*, *zeolite 5A*, dan *zeolite 4A*. Ketiga *adsorbent* tersebut umum digunakan dalam penyerapan  $CO_2$  maupun  $N_2$ . Parameter pada *adsorbent* yang digunakan yakni pada tabel 2.4.

**Tabel 2.4** Karakteristik *Adsorbent* yang Digunakan [26]

Tipe Adsorbent	Diameter Pori (nm)	Densitas ( $kg/m^3$ )	Porositas	Diameter partikel (mm)	Harga (USD / ton)
Zeolite 4A	0.4	690	0.3	2	1500
Zeolite 5A	0.5	695	0.4	2.7	2000
Zeolite 13X	0.8	660	0.5	1.6	1800

Masing-masing *adsorbent* memiliki kemampuan adsorpsi  $CO_2$  tertentu. Kemampuan adsorpsi ini dipengaruhi oleh tekanan pada saat proses adsorpsi pada *pressure swing adsorption*.

Berdasarkan penelitian kemampuan serap *adsorbent*, dapat diperoleh hubungan regresi antara tekanan (atm) dan kemampuan penyerapan gas CO<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub> (mol/kg) dari ketiga jenis *adsorbent* tersebut. Berikut persamaan regresi masing-masing *adsorbent* [31].

Persamaan regresi untuk *Zeolite* 4A adalah sesuai persamaan 2.12.

$$K_{gas} = 45,72 \cdot e^{(-0,08842 \cdot p_A)} - 45,81 \cdot e^{(-0,1048 \cdot p_A)} \quad (2.12)$$

Persamaan regresi untuk *Zeolite* 5A adalah sesuai persamaan 2.13.

$$K_{gas} = 3,108 \cdot e^{(0,01236 \cdot p_A)} - 4,486 \cdot e^{(-1,839 \cdot p_A)} \quad (2.13)$$

Persamaan regresi untuk *Zeolite* 13X adalah sesuai persamaan 2.14.

$$K_{gas} = 4,11 \cdot e^{(0,01706 \cdot p_A)} - 6,112 \cdot e^{(-1,891 \cdot p_A)} \quad (2.14)$$

Dimana:  $K_{gas}$  = kapasitas penyerapan CO<sub>2</sub> atau N<sub>2</sub> (mol/kg)  
 $p_A$  = tekanan adsorpsi (atm)

## 2.11 Perumusan Fungsi Tujuan

Fungsi tujuan atau *objective function* merupakan fungsi yang akan dilakukan optimisasi menggunakan suatu teknik optimisasi. Untuk dapat menemukan fungsi tujuan perlu dicari *variable* yang akan dioptimasi serta fungsi *constraint* dari suatu permasalahan yang ada. Adapun fungsi tujuan yang digunakan dirumuskan sebagai berikut.

$$J_{max} = n_{gas} \times \frac{31.536.000}{t_A} \times Mr_{gas} \cdot 10^{-6} \times C_{gas} - [BMC + (m_{ads} \times C_{ads}) + (P_B \times 8760 \times C_{electric}) + (P_A \times 8760 \times C_{electric}) + (P_D \times 8760 \times \varphi \times C_{electric})] \quad (2.15)$$

Dimana:

$C_{gas}$  = harga jual CO<sub>2</sub> atau N<sub>2</sub> (usd/ton karbon dioksida)

$C_{ads}$  = harga *adsorbent* (USD/kg)

$C_{electric}$  = harga listrik (USD/kwh)

$P_B$  = daya yang dibutuhkan blower

$P_A$  = daya kompresor saat adsorpsi

$P_D$  = daya pompa saat desorpsi

$\varphi$  = rasio waktu desorpsi dan adsorpsi

$n_{gas}$  = mol gas CO<sub>2</sub> atau N<sub>2</sub>

$Mr_{gas}$  = massa molekul relatif CO<sub>2</sub> atau N<sub>2</sub>

## 2.12 Genetic Algorithm (GA)

GA adalah suatu algoritma optimisasi yang prosesnya meniru sebuah proses pencarian berdasarkan teori evolusi seleksi alam yang pernah dikemukakan oleh Charles Darwin. Algoritma tersebut melakukan pencarian sebuah nilai secara acak dengan mengacu pada informasi yang sebelumnya telah didapatkan untuk memperoleh kriteria terbaik. Sebagai gambaran umum, GA menggunakan individu-individu dari beberapa generasi untuk dilakukan perkawinan maupun mutasi sehingga diperoleh DNA individu yang terbaik. Prosedur optimisasi menggunakan GA terdiri dari beberapa tahap, yaitu tahap seleksi individu, *crossover*, dan *mutation*.

Seleksi individu adalah tahap pemilihan gen terbaik dari setiap individu yang ada. Tahap ini menggunakan suatu metode yang dinamakan *roulette wheel*. Proses pemilihan pada metode tersebut didasarkan pada nilai *fitness* atau kecocokan dari setiap individu berdasarkan fungsi objektif dalam menentukan apakah individu tersebut sudah memiliki nilai yang mendekati nilai tujuan atau belum. Semakin tinggi nilai *fitness* yang dimiliki, maka akan semakin tinggi kemungkinan individu tersebut untuk terpilih. *Crossover* merupakan tahap untuk menghasilkan individu baru. Individu yang telah di seleksi selanjutnya akan masuk ke dalam tahap *crossover*. Adapun *crossover* didefinisikan sebagai perkawinan silang antara individu, hasil perkawinan tersebut akan memperoleh individu baru yang memiliki kombinasi gen dari kedua individu lama. Dari hasil *crossover* diharapkan untuk

mendapatkan individu yang lebih baik daripada individu sebelumnya.

*Mutation* merupakan tahapan yang dilakukan untuk menghindari berhentinya proses optimisasi algoritma pada lokal optimum, sehingga algoritma dapat terus berjalan hingga diperoleh nilai optimum global. *Mutation* berperan dalam melakukan proses pengacakan pada material genetik. Pada proses GA, terdapat juga proses *elitism*. Fungsi dari *elitism* adalah sebagai penggolongan dari setiap individu yang memiliki *fitness* yang paling baik pada generasinya. *Elitism* menyimpan individu dengan kromosom yang terbaik supaya tidak akan hilang ketika dilakukan mutasi. Dengan dilakukan penggolongan pada *elitism*, optimisasi GA akan menemukan nilai *fitness* yang semakin baik [9].

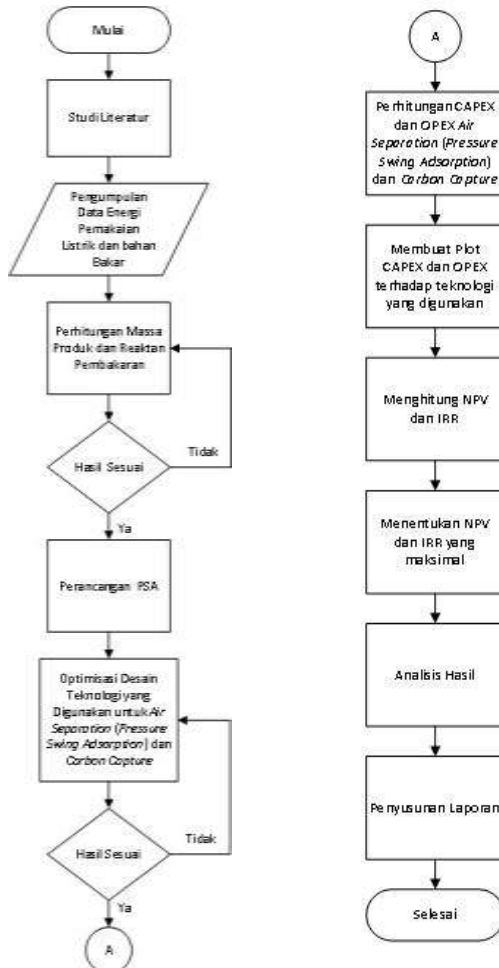
### **2.13 Particle Swarm Optimization (PSO)**

*Particle Swarm Optimization* (PSO) merupakan sebuah algoritma pencarian stokastik yang bekerja berdasarkan inspirasi dari kehidupan populasi burung *Eberhart, Kennedy, dan Shi* [32]. Pada PSO secara umum, menggunakan konsep kelakuan sosial yang dihasilkan pada sekumpulan agen yang tersebar sepanjang daerah *pixel*. Pada dasarnya PSO menggunakan dua strategi utama yaitu operasi kecepatan dan operasi posisi. Dalam beberapa generasi, setiap partikel akan dipercepat menuju posisi terbaik dari partikel sebelumnya. Dalam setiap pendekatan, nilai kelajuan terbaru untuk setiap partikel dihitung berdasarkan kelajuannya saat ini, jarak terhadap posisi terbaik sebelumnya, dan jarak terhadap posisi terbaik global. Nilai kecepatan baru digunakan untuk menghitung posisi berikutnya dari partikel dalam daerah pencarian. Begitu seterusnya iterasi dilakukan sebanyak mungkin, sampai nilai error minimum terpenuhi.



## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah berdasarkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir metodologi penelitian

### 3.1 Pengumpulan Data Energi Pemakaian Listrik dan Bahan Bakar

Pengumpulan data energi yang diperlukan berupa banyaknya konsumsi listrik per tahun pada perusahaan PT. GGF serta jumlah bahan bakar yang diperlukan. Adapun pada *power plant* di PT. GGF menggunakan bahan bakar campuran yang terdiri dari batubara dan biogas. Adapun untuk mengetahui besarnya energi listrik rata-rata yang dihasilkan oleh PT. GGF dan jumlah bahan bakar yang digunakan dalam kurun waktu satu tahun dapat dilihat pada tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Listrik yang Dihasilkan dan Pemakaian Bahan Bakar

Parameter	Jumlah	Satuan
Listrik yang Dihasilkan	55.864.419	Kwh
Massa Batu Bara	90.366.080	Kg
Volume Biogas	5.827.558	Nm <sup>3</sup>

Adapun bahan bakar biogas yang digunakan mengandung metana sebesar 66%. Sehingga dilakukan perhitungan besarnya massa metana yang digunakan untuk pembakaran. Hasil perhitungan stoikiometri memberikan massa metana rata-rata yang digunakan pada perusahaan adalah sejumlah 2.580.792,148 kg dalam kurun waktu satu tahun sehingga dengan mengetahui massa masing-masing bahan bakar yang digunakan dapat ditentukan besarnya persentase campuran dari setiap bahan bakar dengan membandingkan nilai kalor yang dihasilkan dari pembakaran. Dengan mengetahui perbandingan nilai kalor pembakaran batubara ( $Q_{\text{batubara}}$ ) terhadap kalor pembakaran metana ( $Q_{\text{metana}}$ ) maka persentase campuran bahan bakar dapat dihitung. Perhitungan persentase campuran bahan bakar dapat dilihat pada lampiran. Kemudian persentase bahan bakar campuran digunakan sebagai asumsi untuk menghitung besarnya energi listrik yang diberikan dari masing-masing bahan bakar seperti diberikan dalam tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Persentase Bahan Bakar dan Energi Listrik dari Bahan Bakar

Bahan Bakar Campuran		Energi Listrik dari Bahan Bakar (Kwh)
Batu Bara	93%	51.953.910
Biogas	7%	3.910.509

### 3.2 Perhitungan Massa Produk dan Reaktan Pembakaran

Prosedur berikutnya adalah untuk melakukan perhitungan jumlah produk dan jumlah reaktan pada suatu reaksi pembakaran menggunakan bahan bakar biogas dan batubara. Perhitungan dilakukan menggunakan konsep stoikiometri dengan berdasarkan analisis perbandingan jumlah mol sesuai perbandingan koefisien persamaan reaksi. Hasil perhitungan ditunjukkan oleh tabel 3.3.

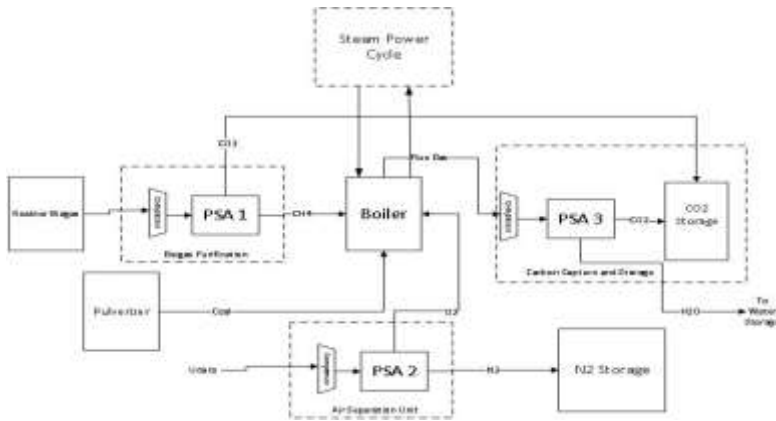
**Tabel 3.3** Produk dan Reaktan yang Dihasilkan *Power Plant*

Parameter	CCS dengan <i>Oxyfuel</i>	CCS tanpa <i>Oxyfuel</i>
Batu bara yang dibutuhkan	93.517.037,41 kg/tahun	95.612.664,88 kg/tahun
Biogas yang dibutuhkan	6.180.078,84 kg/tahun	6.256.290,23 kg/tahun
O <sub>2</sub> atau udara yang dibutuhkan	255.100.553,22 Kg/tahun	1.094.381.373,30 Kg/tahun
CO <sub>2</sub> yang dihasilkan	298.560.203,63 Kg/tahun	305.331.212,80 Kg/tahun
N <sub>2</sub> yang dihasilkan	-	839.280.820,08 Kg/tahun
Listrik yang dihasilkan	55.864.419 Kwh	55.864.419 Kwh

### 3.3 Perancangan PSA

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya penelitian ini berfokus pada penerapan teknologi *oxyfuel* dan *carbon capture* pada *plant* pembangkit PT GGF. Komponen utama yang

diperlukan untuk penerapan teknologi tersebut adalah *pressure swing adsorption* (PSA). Dengan diterapkannya teknologi tersebut diharapkan akan memperoleh keuntungan jangka panjang. Dimana keuntungan yang didapatkan adalah dari hasil penghematan batu bara serta penjualan karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan Nitrogen ( $\text{N}_2$ ). Skema teknologi *oxyfuel* dan *carbon capture* yang akan diterapkan pada pembangkit dapat dilihat pada gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Skema Teknologi yang Akan Diterapkan

Proses yang terjadi yakni dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada *power plant* yang ada di PT. GGF menggunakan bahan bakar campuran yang terdiri dari biogas dan batu bara. Berdasarkan skema pada gambar 3.2 bahan bakar biogas yang berasal dari reaktor dimurnikan terlebih dahulu kandungan metana ( $\text{CH}_4$ ) di dalamnya oleh komponen PSA 1 pada *biogas purification*. Dari hasil pemurnian tersebut didapatkan karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) yang selanjutnya akan dikondisikan lalu disalurkan menuju *CO<sub>2</sub> storage*, sementara metana ( $\text{CH}_4$ ) akan digunakan sebagai bahan bakar di dalam *boiler*. Kemudian udara pembakaran yang akan digunakan dimurnikan kandungan oksigen ( $\text{O}_2$ ) yang ada di dalamnya oleh komponen PSA 2 pada *air separation unit*. Hasil pemurnian didapatkan nitrogen ( $\text{N}_2$ ) yang telah dipisahkan yang selanjutnya disalurkan menuju *N<sub>2</sub> storage*. Sementara itu bahan

bakar batu bara disalurkan menuju *boiler*, sehingga pada *boiler* terjadi reaksi pembakaran sempurna antara batubara, metana, dan oksigen. Pembakaran sempurna dengan menggunakan oksigen akan menghasilkan gas buang berupa karbondoksida ( $\text{CO}_2$ ) dan uap air ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Oleh komponen PSA 3 yang terdapat pada *cabon capture and storage*, gas  $\text{CO}_2$  ditangkap kemudian disalurkan menuju *CO<sub>2</sub> storage*. Hasil dari  $\text{CO}_2$  dan  $\text{N}_2$  yang telah ditangkap dan disimpan selanjutnya akan dijual supaya memperoleh keuntungan yang maksimal.

Tahap perancangan PSA sama halnya dengan yang telah dijelaskan sebelumnya. Pada tahap awal dilakukan pemodelan komponen PSA yang digunakan, pemodelan *adsorbent*, kemudian dilanjutkan dengan menurunkan persamaan matematis dan fungsi objektif yang akan digunakan. PSA merupakan sebuah komponen yang aktif memisahkan gas oleh adanya *adsorbent*. Komponen PSA terdiri dari dua kolom dengan diameter kolom dan panjang tertentu. Kolom pertama bekerja dengan melakukan adsorpsi sementara kolom kedua adalah desorpsi pada penelitian ini akan dirancang tiga buah PSA untuk biogas, untuk *air separation*, dan untuk *carbon capture*. Tahap perancangan desain PSA diperlukan untuk menghitung besarnya spesifikasi yang diperlukan pada desain PSA yang digunakan yang meliputi luas permukaan *adsorbent* yang diperlukan, diameter dan panjang kolom yang diperlukan, daya pompa dan blower yang diperlukan untuk mengatur tekanan. Yang mana akan didapat persamaan model PSA lalu fungsi objektif yang digunakan untuk mengoptimisasi desain PSA. Dalam tahapan ini digunakan persamaan yang mengacu pada bab 2 sebelumnya, yang mana akan digunakan dalam simulasi optimisasi menggunakan *software Matlab*.

### **3.4 Optimisasi Desain Teknologi yang Digunakan untuk *Air Separation (Pressure Swing Adsorption)* dan *Carbon Capture***

Dilakukan optimisasi desain yang berkaitan dengan teknologi *Air Separation* dan *Carbon Capture* yang selanjutnya akan diterapkan pada PLTU. Komponen *Air Separation* yang

digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah *Pressure Swing Adsorption* (PSA). Juga komponen *Carbon Capture* yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah *Pressure Swing Adsorption*.

Pada optimisasi digunakan dua jenis algoritma stokastik yakni *genetic algorithm* (GA) dan *particle swarm optimization* (PSO). Adapun pada penelitian tugas akhir ini digunakan *software matlab* untuk mengoptimisasi desain PSA. Adapun parameter desain PSA yang akan dioptimisasi meliputi variabel berikut:

1. Harga komponen PSA
2. Waktu adsorpsi
3. Panjang kolom PSA
4. Tekanan yang diperlukan
5. Diameter kolom PSA

Optimisasi dilakukan berdasarkan fungsi objektif yang telah dijelaskan sebelumnya. Adapun banyaknya iterasi yang dilakukan adalah sebanyak 500 iterasi.

Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan persamaan-persamaan matematis yang akan digunakan untuk melakukan optimisasi PSA. Semua persamaan model PSA tersebut digunakan pada *source code* matlab untuk mengoptimisasi desain dari PSA. Adapun tingkat kemurnian zat yang diinginkan adalah 99% kemudian nilai laju aliran gas juga digunakan untuk menghitung jumlah *adsorbent* yang diperlukan. Besarnya nilai laju aliran gas didapatkan berdasarkan hasil perhitungan stoikiometri. Untuk mengoptimisasi digunakan *software Matlab* dengan *source code* yang dapat dilihat pada bagian lampiran dari laporan.

### 3.4.1 Optimisasi dengan *Genetic Algorithm*

Pada optimisasi desain PSA salah satunya adalah dengan menggunakan GA berdasarkan *source code* Matlab yang terdapat pada bagian lampiran. Adapun proses optimisasi dengan *genetic algorithm* dapat dijelaskan berdasarkan *flowchart* yang ditunjukkan pada gambar 3.3. Pada optimisasi dengan GA mula-mula dilakukan inisiasi populasi awal dari 4 variabel yang akan dioptimisasi. Variabel tersebut meliputi waktu adsorpsi, panjang kolom PSA,

tekanan yang diperlukan, dan diameter kolom PSA. Variabel-variabel yang telah diinisiasi tersebut dievaluasi untuk mengetahui nilai *fitness* dari tiap individu.



**Gambar 3.3** Flowchart Genetic Algorithm [33]

Kemudian seleksi dilakukan untuk mendapatkan solusi terbaik dari generasi pada saat itu. Selanjutnya individu-individu yang terbaik akan melakukan rekombinasi dengan melakukan *crossover* atau kawin silang dengan individu yang lainnya sehingga terbentuk individu baru dengan kemungkinan nilai *fitness* yang lebih baik. Rekombinasi dari banyak kromosom menyebabkan terjadinya mutasi yang menimbulkan terbentuknya generasi dengan sifat baru. Nilai *fitness* yang didapat dari seleksi, rekombinasi, dan mutasi akan menggantikan populasi induk. Hal ini akan berlangsung terus menerus hingga generasi terakhir dengan nilai *fitness* terbaik.

Terdapat tiga jenis PSA yang akan dioptimisasi yakni meliputi PSA 1 sebagai komponen untuk menangkap CO<sub>2</sub> pada biogas, kemudian PSA 2 sebagai komponen untuk *air separation*, dan PSA 3 sebagai komponen untuk menangkap CO<sub>2</sub> pada gas buang. Dalam mengoptimisasi desain PSA digunakan persamaan regresi dari ketiga jenis *adsorbent* yakni *adsorbent* zeolite 4A, 5A, dan 13X. Sehingga dapat diketahui *adsorbent* yang paling cocok untuk digunakan. Hasil optimisasi akan memperoleh 4 variabel desain optimal dari PSA meliputi waktu adsorpsi, panjang kolom PSA, tekanan yang diperlukan, dan diameter kolom PSA. Yang mana keempat variabel tersebut dimasukkan kembali ke dalam *source code* pada *software matlab* lalu di *run* untuk mendapatkan besar harga PSA dan konsumsi listrik yang dibutuhkan. Hasil optimisasi akhir adalah komponen PSA dengan spesifikasi optimal dan harga komponen yang minimum, juga dengan pemakaian kebutuhan konsumsi energi listrik yang minimum.

### 3.4.2 Optimisasi dengan *Particle Swarm Optimization*

Optimisasi dengan menggunakan algoritma *particle swarm optimization* menggunakan *source code* yang agak sedikit berbeda dengan GA. Proses optimisasi dengan *particle swarm optimization* dapat dijelaskan berdasarkan *flowchart* yang ditunjukkan pada gambar 3.4. Pada optimisasi menggunakan algoritma PSO variabel yang akan dioptimisasi dinyatakan dalam besaran posisi dan kecepatan awal. Dalam optimisasi ini setiap partikel dianggap



bergerak dalam suatu ruang dan mengingat posisi terbaik yang pernah dilalui terhadap nilai fungsi objektif.



**Gambar 3.4** Flowchart Particle Swarm Optimization [34]

Dalam hal ini parameter desain PSA yang meliputi tekanan, waktu kontak, diameter, serta panjang kolom PSA memiliki nilai posisinya masing-masing, kemudian iterasi terus dilakukan sampai diperoleh nilai posisi yang optimal dengan fitness seminimum mungkin. Berbeda dengan optimisasi GA yang memberikan nilai *fitness* maksimum, optimisasi PSO memberikan nilai *fitness* yang minimum. Sama halnya dengan GA, pada PSO optimisasi dilakukan terhadap tiga jenis PSA. Kemudian selanjutnya hasil optimisasi dari kedua algoritma tersebut akan dibandingkan untuk dicari hasil optimisasi terbaik. PSO berbeda dengan GA, pada PSO iterasi terus menerus dilakukan sampai didapatkan nilai seminimum mungkin terhadap fungsi objektif, sementara GA adalah sebaliknya iterasi dilakukan untuk mendapatkan nilai maksimum. Oleh karena itu dibuat *source code* yang berbeda antara GA dengan PSO.

Adapun juga terdapat tiga jenis PSA yang akan dioptimisasi dengan menggunakan tiga jenis *adsorbent* yakni *zeolite 4A*, *zeolite 5A*, dan *zeolite 13X*. Hasil optimisasi kemudian menghasilkan 4 nilai parameter desain PSA. Kemudian nilai tersebut dikembalikan ke dalam *source code* lalu di *run* kembali sehingga didapatkan harga PSA dan juga biaya listrik yang diperlukan.

### **3.5 Perhitungan CAPEX dan OPEX *Air Separation (Pressure Swing Adsorption)* dan *Carbon Capture***

Dilakukan perhitungan besarnya *Capital Expenditures* (CAPEX) dan *Operational Expenditures* (OPEX) pada kombinasi teknologi *Air Separation* dan *Carbon Capture* yang digunakan. *Capital Expenditures* merupakan biaya yang diperlukan untuk investasi awal dan pengadaan teknologi, sedangkan *Operational Expenditures* merupakan biaya yang dikeluarkan untuk operasional per tahun. Perhitungan CAPEX dan OPEX dilakukan dengan menggunakan *microsoft excel*. Untuk menghitung CAPEX diawali dengan menghitung harga pembelian komponen PSA yang selanjutnya akan dijadikan patokan dalam menghitung harga CAPEX. Sementara OPEX dihitung berdasarkan pemakaian energi

listrik untuk operasional per tahun. Dengan demikian besarnya harga CAPEX dan OPEX bergantung pada hasil optimisasi desain PSA. Oleh karena digunakan dua jenis algoritma optimisasi maka terdapat dua jenis perhitungan CAPEX dan OPEX berdasarkan optimisasi GA dan PSO.

### 3.6 Membuat Plot CAPEX dan OPEX terhadap Teknologi yang Digunakan

Berikut adalah besarnya CAPEX dan OPEX yang diperoleh.

**Tabel 3.4** Perhitungan CAPEX [35]

1	Purchased Equipment	= Harga beli komponen PSA
2	Installation	
3	Instrumentation and control	
4	Building and Service	= 10% Harga beli komponen PSA
5	Yard Improvement	=10% harga beli komponen PSA
6	Land	= 5% harga beli komponen PSA
7	Total Direct Cost	=Jumlah no. 1 s/d no. 6
<b>8</b>	<b>Indirect Cost</b>	
9	Engineering	=10% Total Direct Cost
10	Construction Expense	=10% Total Direct Cost
11	Contractor Fee	=5% Total Direct Cost
12	Total Indirect Cost	=Jumlah no.9 s/d no.10
13	Fixed Capital Investment	= Total direct cost + Total indirect cost
14	Working Investment	= 25% Fixed Capital Investment
15	Start-Up Cost	= 10% Fixed Capital Investment
16	Total Capital Cost (CAPEX)	= jumlah no. 13 s/d no.15

**Tabel 3.5** Perhitungan OPEX [35]

1	Energy for Electric	= Konsumsi listrik 1 tahun
2	Other cost	= 2% Fixed Capital Investment
3	Insurance	= 1% CAPEX
<b>4</b>	<b>Direct Cost</b>	
5	Raw Material	=Harga Adsorben/tahun
6	Maintenance	= 4% Fixed Capital Investment
7	Operating Labour	50,000
8	Supervision and Support Labour	= 30% Operating Labour
9	Laboratory Charges	= 10% Operating Labour
10	Operating Supplies	= 15 % Maintenance
11	Plant Overhead Cost	= 60 % x ( jumlah no 7 s/d no.9)
12	Total Direct Cost	= Jumlah no 5 s/d no 11
<b>13</b>	<b>General Expense</b>	
14	Administrative Cost	= 15% Supervision and Support Labour
15	Total Manufacturing Cost (OPEX)	= Jumlah no. 1, 2, 3,12, dan 14

Selanjutnya penulis akan menyajikan tabel perhitungan untuk memudahkan dalam membaca laporan tugas akhir ini. Grafik dan tabel yang dibuat adalah berupa analisis CAPEX dan OPEX pada teknologi dari *Air Separation* dan *Carbon Capture* yang digunakan. Selain itu, grafik dan tabel ini mempermudah dalam menentukan CAPEX dan OPEX untuk meminimalkan biaya pada kombinasi teknologi *Air Separation* dan *Carbon Capture* yang digunakan. Tabel 3.4 dan 3.5 berikut secara berturut-turut menjelaskan perhitungan CAPEX dan OPEX yang dilakukan.

Adapun perhitungan biaya CAPEX merupakan biaya berlaku 1 kali saja hingga beberapa tahun ke depan sampai jangka waktu proyek berakhir. Sementara perhitungan biaya OPEX berlaku setiap tahun selama *plant* masih beroperasi.

### 3.7 Menghitung NPV dan IRR

Setelah membuat plot analisis CAPEX dan OPEX, selanjutnya penulis melakukan perhitungan yang berhubungan dengan NPV dan IRR dengan teknologi *Air Separation* dan *Carbon Capture*. Dilakukannya perhitungan bertujuan untuk menentukan kombinasi teknologi yang layak digunakan dan memberikan keuntungan maksimal pada jangka waktu proyek yang telah ditetapkan.

NPV (*Net Present Value*) adalah besarnya keuntungan bersih yang akan didapatkan setelah penjualan pada saat itu. Secara umum untuk menghitung NPV adalah menggunakan persamaan 3.1 [36].  

$$NPV = \text{Cash Inflow} - \text{Cash Outflow} \quad (3.1)$$

Adapun secara spesifik dirumuskan berdasarkan persamaan 3.2.

$$NPV = \frac{C_t}{(1+r)^t} + C_0 \quad (3.2)$$

Dimana:

$C_t$  = net cash flow at period  $t$

$t$  = waktu (tahun)

$r$  = discount rates

$C_0$  = initial cash outflow

IRR (*Internal Rate Return*) didefinisikan sebagai metode yang digunakan untuk mengevaluasi investasi mana yang memberikan tingkat pengembalian yang relatif lebih baik.

Untuk menghitung IRR digunakan persamaan 3.3 [37].

$$IRR = \left( \frac{FV}{PV} \right)^{\frac{1}{N}} - 1 \quad (3.3)$$

Dimana:

$FV$  = Future net cash flow

$PV$  = Present value

$N$  = periode (tahun)

### **3.8 Menganalisis Hasil**

Tahap terakhir adalah dilakukan analisis hasil, dalam hal ini untuk mengetahui seberapa besar pengaruh penerapan teknologi *oxyfuel* dan *carbon capture storage* terhadap *power plant*. Analisis hasil dilakukan dengan menganalisis besarnya nilai CAPEX dan OPEX yang diperoleh, besarnya keuntungan yang didapatkan dari penjualan dan penghematan bahan bakar, dan nilai NPV dan IRR yang diperoleh hingga jangka waktu 10 tahun ke depan. Untuk membuktikan kelayakan investasi teknologi yang akan diterapkan.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Analisis *Oxyfuel*

Pada hasil pengolahan data awal memberikan bahwa *power plant* PT. Great Giant Foods menggunakan bahan bakar campuran metana dari biogas dan batu bara dengan persentase 93% energi dari batu bara dan 7% energi dari pembakaran biogas. Berdasarkan perbandingan tersebut analisis stoikiometri dilakukan terpisah antara bahan bakar biogas dan batu bara untuk mendapatkan massa masing-masing produk dan reaktan dari pembakaran. Telah dilakukan perhitungan stoikiometri pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap di PT. Great Giant Foods. Perhitungan dilakukan untuk menganalisis massa produk dan reaktan. Dimana perhitungan tersebut mengacu pada persamaan reaksi pembakaran biogas dan batubara yang sebelumnya telah diulas pada Bab II. Sehingga didapatkan hasil perhitungan massa produk dan reaktan pada PLTU dengan berdasarkan persamaan stoikiometri yang ditunjukkan pada tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Hasil Analisis Massa Produk dan Reaktan pada PLTU PT. Great Giant Foods

<b>Parameter (per tahun)</b>	<b>Tanpa <i>Oxyfuel</i></b>	<b>Dengan <i>Oxyfuel</i></b>
Listrik yang Dihasilkan (Kwh)	55.864.419	55.864.419
Energi yang Dibutuhkan (KJ)	2.011.119.084.000	2.011.119.084.000
Massa Batu bara (kg/tahun)	95.612.664,88	93.517.037,41
Massa Biogas (kg/tahun)	6.256.290,23	6.180.078,84
Massa O <sub>2</sub> (kg/tahun)	260.842.256,63	255.100.553,22

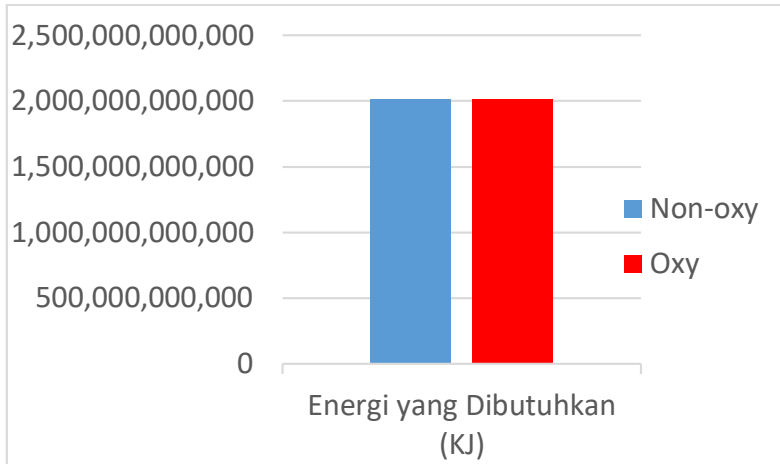
Parameter (per tahun)	Tanpa Oxyfuel	Dengan Oxyfuel
Massa CO <sub>2</sub> (kg/tahun)	305.331.212,80	298.560.203,63
Massa H <sub>2</sub> O (kg/tahun)	48.974.988,76	47.935.737,39
Massa N <sub>2</sub> (kg/tahun)	839.280.820,08	-

Untuk lebih mempermudah pembaca dalam membandingkan hasil perhitungan stoikiometri antara *plant* yang menggunakan *oxyfuel* dan tidak menggunakan *oxyfuel*, maka disajikan diagram batang. Adapun gambar 4.1 merupakan diagram yang menjelaskan energi listrik yang dihasilkan setiap tahun dalam KWh (*kilowatt-hour*) dan gambar 4.2 merupakan diagram batang yang menjelaskan besarnya energi yang dibutuhkan pada pembangkit setiap tahunnya dalam KJ (*kilojoule*). Sementara itu perbandingan massa gas O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>O disajikan dalam diagram batang pada gambar 4.3, dan perbandingan pemakaian bahan bakar batubara dan biogas disajikan dalam diagram batang pada gambar 4.4.

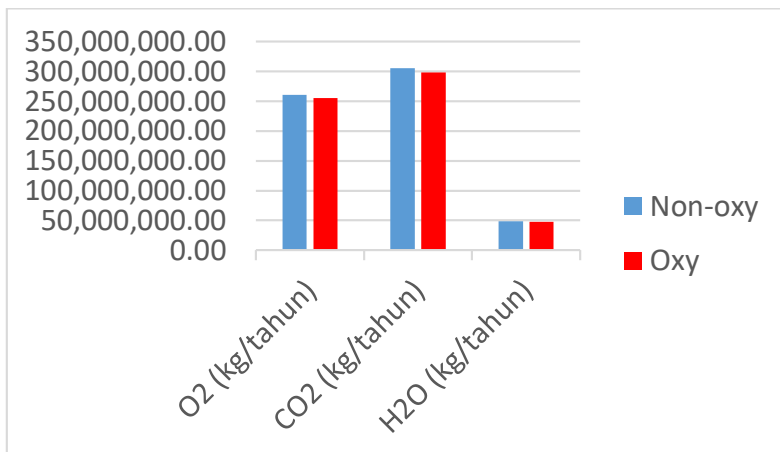


**Gambar 4.1** Diagram Batang Listrik yang Dihasilkan



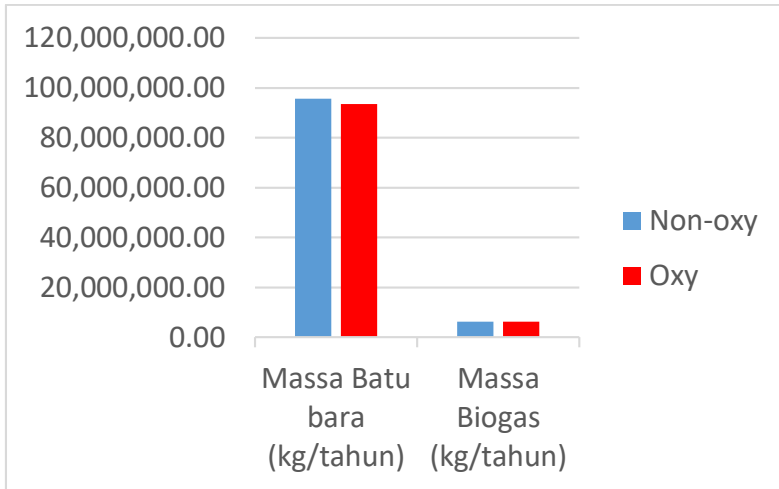


**Gambar 4.2** Diagram Batang Energi yang Dibutuhkan



**Gambar 4.3** Diagram Batang Massa Gas yang Didapatkan

Adapun pada gambar 4.3 terlihat bahwa dengan penggunaan teknologi *oxyfuel* didapatkan besar massa gas buang CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O lebih sedikit dibandingkan dengan tanpa penggunaan teknologi *oxyfuel*. Selain itu penggunaan *oxyfuel* juga mengurangi jumlah udara bakar O<sub>2</sub> yang diperlukan pada reaksi pembakaran.



**Gambar 4.4** Diagram Batang Pemakaian Bahan Bakar

Sementara pada gambar 4.4 menunjukkan bahwa penerapan teknologi *oxyfuel* akan mengurangi jumlah pemakaian bahan bakar batubara dan biogas. Hal tersebut dapat dilihat dimana grafik penggunaan batubara dan biogas pada *oxyfuel* yang lebih rendah.

#### 4.2 Analisis *Pressure Swing Adsorption* (PSA)

Pada penelitian ini digunakan komponen *Pressure Swing Adsorption* sebagai alat untuk mengadsorpsi suatu komponen zat dari suatu molekul yang tidak diinginkan. Optimisasi dilakukan dengan menggunakan *Genetic Algorithm* (GA) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO). Dengan dilakukannya optimisasi dapat ditentukan ukuran desain PSA dengan harga yang seminimum mungkin dan kualitas komponen yang optimal sehingga akan mengoptimalkan keuntungan yang diperoleh. Adapun secara garis besar, rancangan model *Pressure Swing Adsorption* (PSA) telah dijelaskan sebelumnya pada BAB II dalam laporan penelitian ini.

Berdasarkan rancangan tersebut, desain PSA yang digunakan terdiri dari dua kolom dengan panjang dan diameter tertentu. Variabel yang dioptimisasi yakni meliputi *adsorption time*

atau waktu adsorpsi, panjang kolom PSA, tekanan adsorpsi, dan diameter kolom dalam tujuannya untuk memperoleh harga PSA yang minimum. Selanjutnya dengan menggunakan algoritma optimisasi diperoleh kriteria komponen PSA yang digunakan. Algoritma yang digunakan yaitu *genetic algorithm* (GA) dan *particle swarm optimization* (PSO). Adapun pada penelitian ini digunakan 3 buah PSA dengan desain yang bervariasi. Dimana PSA 1 sebagai komponen untuk menangkap CO<sub>2</sub> pada biogas, kemudian PSA 2 sebagai komponen untuk *air separation*, dan PSA 3 sebagai komponen untuk menangkap CO<sub>2</sub> pada gas buang. Parameter desain ketiga PSA yang digunakan adalah seperti yang dapat dilihat pada tabel 4.2.

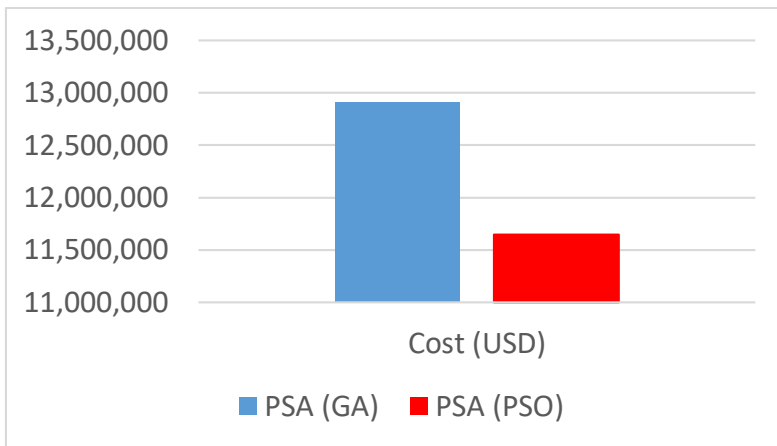
**Tabel 4.2** Parameter Desain *Pressure Swing Adsorption*

PSA	Variabel	GA	PSO
PSA 1	Cost (USD)	62.993	41.283
	Adsorption time (s)	32,186	30
	Length (m)	0,903	1,212
	Pressure (atm)	1,574	1,396
	Diameter (m)	0,778	1
	<i>Adsorbent</i>	Zeolite 5A	Zeolite 13X
PSA 2	Cost (USD)	7.282.828	8.708.728
	Adsorption time (s)	44,977	30,901
	Length	1,709	1,405
	Pressure	1,378	1,163
	Diameter	0,931	0,886
	<i>Adsorbent</i>	Zeolite 13X	Zeolite 13X
PSA 3	Cost (USD)	5.571.321	2.930.300
	Adsorption time (s)	49,752	30
	Length	1,405	1,691
	Pressure	1,882	1,402
	Diameter	0,748	1
	<i>Adsorbent</i>	Zeolite 5A	Zeolite 5A

Adapun spesifikasi komponen PSA hasil optimisasi telah disajikan secara lengkap dan dapat dilihat pada bagian lampiran dalam tabel 4. Berdasarkan hasil parameter desain dari ketiga jenis PSA hasil optimisasi dengan menggunakan kedua tipe algoritma, maka dapat diperoleh harga total pembelian PSA dengan menggunakan kedua jenis algoritma seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.3. Dan untuk lebih memudahkan pembaca maka ditampilkan hasil perbandingan harga komponen PSA dengan menggunakan diagram batang yang ditunjukkan pada gambar 4.5.

**Tabel 4. 3** Total Harga Komponen PSA Setelah Optimisasi

	GA	PSO
Cost (USD)	12.917.143	11.648.949



**Gambar 4.5** Perbandingan Harga Komponen PSA

Berdasarkan hasil perhitungan total harga komponen PSA yang telah diperoleh didapatkan harga komponen PSA berdasarkan hasil simulasi optimisasi dari algoritma GA dan PSO. Berdasarkan hasil optimisasi yang diperoleh pada tabel, menunjukkan bahwa dengan menggunakan algoritma PSO didapatkan nilai adsorption time yang sangat berdekatan antara PSA 1, 2, dan 3. Kemudian

hasil optimisasi dengan algoritma PSO memberikan harga komponen PSA sebesar 11.648.949 USD sementara GA adalah sebesar 12.917.143 USD. Dengan demikian harga komponen PSA minimum diperoleh berdasarkan hasil optimisasi menggunakan algoritma PSO. Harga yang diberikan oleh PSO lebih kecil dibandingkan GA dikarenakan optimisasi PSO yang bertujuan untuk meminimumkan fungsi objektif lebih sesuai dalam meminimumkan harga PSA.

### **4.3 Tinjauan Ekonomi**

Aspek tinjauan ekonomi dimulai dengan menghitung biaya CAPEX dan OPEX yang diperlukan untuk penerapan teknologi *oxyfuel* dan *carbon capture storage* pada PLTU PT. Great Giant Foods dengan adanya penggunaan komponen PSA berdasarkan optimisasi harga yang didapatkan. Kemudian dilanjutkan dengan analisis keuntungan yang diperoleh menggunakan metode NPV dan IRR.

#### **4.3.1 Perhitungan CAPEX dan OPEX**

Perhitungan keseluruhan biaya yang perlu dipersiapkan dilakukan dengan menghitung besarnya CAPEX dan OPEX pada teknologi yang akan digunakan pada PLTU PT. Great Giant Foods dengan menggunakan *Pressure Swing Adsorption*. Adapun perhitungan CAPEX mengacu pada hasil optimisasi harga PSA hasil optimisasi menggunakan tiga algoritma berbeda. Adapun hasil analisis CAPEX dan OPEX berdasarkan optimisasi desain PSA dengan *Genetic Algorithm* dan *Particle Swarm Optimization* adalah sebagai berikut.

##### **4.3.1.1 Hasil Analisis CAPEX-OPEX dengan *Genetic Algorithm***

Harga CAPEX bergantung pada besarnya total harga pembelian komponen PSA. Setelah berhasil mendapatkan total harga PSA yang dibutuhkan dengan *genetic algorithm*, maka dapat digunakan untuk mencari harga CAPEX untuk merancang *oxyfuel*

dan CCS sesuai dengan cara perhitungan CAPEX yang telah dijelaskan sebelumnya, yakni hasilnya dapat dilihat pada tabel 4.4.

**Tabel 4.4** Hasil Perhitungan CAPEX (*Capital Expenditures*) dalam USD

<b>Direct Cost</b>	
Purchased Equipment	
Installation	12.917.143
Instrumentation and control	
Building and Service	1.291.714
Yard Improvement	1.291.714
Land	645.857
Total Direct Cost	16.146.428
<b>Indirect Cost</b>	
Engineering	1.614.643
Construction Expense	1.614.643
Contractor Fee	807.321
Total Indirect Cost	4.036.607
Fixed Capital Investment	20.183.035
Working Investment	5.045.759
Start-Up Cost	2.018.304
<b>Total Capital Cost (CAPEX)</b>	<b>27.247.097</b>

Sehingga total nilai CAPEX yang didapatkan adalah sebesar 27.247.097 USD. Harga CAPEX tersebut merupakan biaya yang diperlukan untuk merancang dan membangun teknologi *oxyfuel* dan *carbon capture storage* sesuai dengan jangka waktu proyek yang telah ditetapkan selama beberapa tahun ke depan. Selanjutnya dihitung besarnya harga OPEX sehingga diperoleh hasil yang dapat dilihat berdasarkan pada tabel 4.5.

**Tabel 4. 5** Hasil Perhitungan OPEX (*Operational Expenditures*) dalam USD

Energy for Electric	6.970.628
Other Cost	403.661
Insurance	272.471
<b>Direct Cost</b>	
Raw Material	271.983
Maintenance	807.321
Operating Labour	50.000
Supervision and Support Labour	15.000
Laboratory Charges	5.000
Operating Supplies	121.098
Plant Overhead Cost	523.393
Total Direct Cost	1.793.796
<b>General Expense</b>	
Administrative Cost	2.250
<b>Total Manufacturing Cost (OPEX)</b>	<b>9.442.805</b>

Berdasarkan tabel tersebut didapatkan harga OPEX adalah sebesar 9.442.805 USD yang merupakan biaya operasional yang diperlukan setiap tahunnya.

#### 4.3.1.2 Hasil Analisis CAPEX-OPEX dengan *Particle Swarm Optimization*

Harga PSA juga dapat dicari dengan algoritma optimisasi *particle swarm optimization*. Setelah berhasil mendapatkan total harga PSA yang dibutuhkan dengan algoritma tersebut, maka dapat digunakan untuk mencari harga CAPEX yang diperlukan untuk merancang *oxyfuel* dan CCS dengan hasil yang ditunjukkan pada tabel 4.6.

**Tabel 4.6** Hasil Perhitungan CAPEX (*Capital Expenditures*) dalam USD

<b>Direct Cost</b>	
Purchased Equipment	11.684.949
Installation	
Instrumentation and control	
Building and Service	1.168.495
Yard Improvement	1.168.495
Land	584.247
<b>Total Direct Cost</b>	<b>14.606.186</b>
<b>Indirect Cost</b>	
Engineering	1.460.619
Construction Expense	1.460.619
Contractor Fee	730.309
<b>Total Indirect Cost</b>	<b>3.651.546</b>
Fixed Capital Investment	18.257.732
Working Investment	4.564.433
Start-Up Cost	1.825.773
<b>Total Capital Cost (CAPEX)</b>	<b>24.647.938</b>

Pada optimisasi harga komponen PSA sebelumnya didapatkan bahwa berdasarkan hasil optimisasi menggunakan PSO diperoleh harga komponen PSA yang lebih kecil dibandingkan dengan GA. Oleh karena nilai CAPEX dipengaruhi oleh harga komponen PSA, maka nilai CAPEX hasil analisa menggunakan PSO akan lebih kecil dibandingkan dengan GA. Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan PSO didapatkan nilai CAPEX yang agak lebih kecil bila dibandingkan dengan GA yakni sebesar 24.647.938 USD dimana hasilnya berbeda secara signifikan. Kemudian dapat dicari nilai OPEX yang diperlukan sehingga didapatkan hasil yang ditunjukkan oleh tabel 4.7.

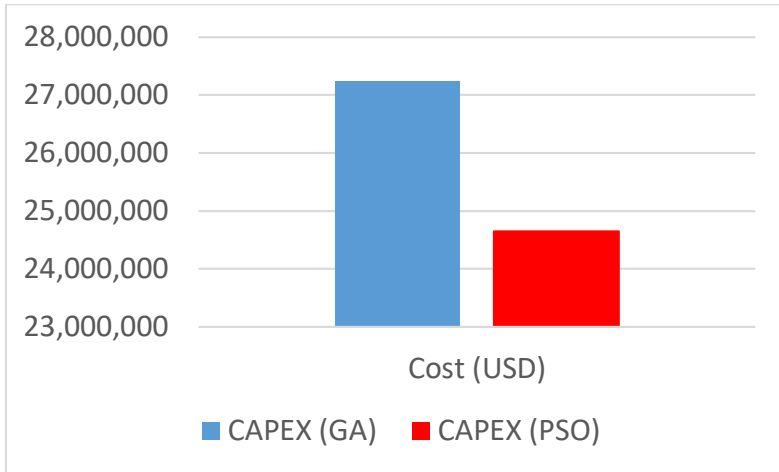


**Tabel 4.7** Hasil Perhitungan OPEX (*Operational Expenditures*) dalam USD

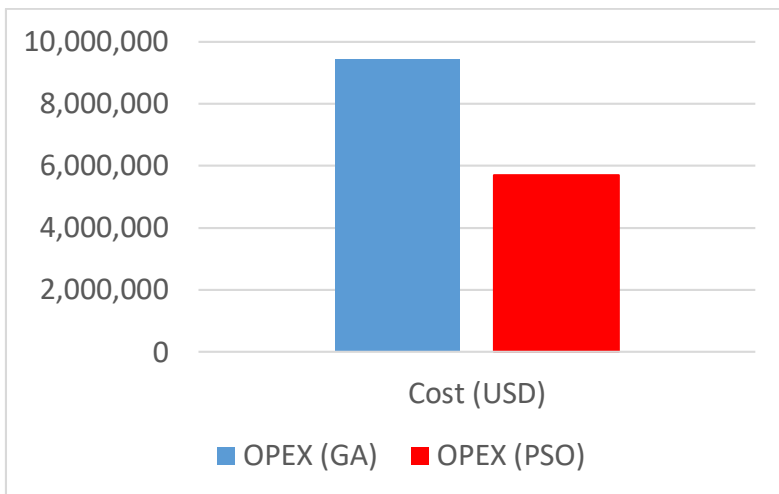
Energy for Electric	3.431.733
Other Cost	365.155
Insurance	246.479
<b>Direct Cost</b>	
Raw Material	271.983
Maintenance	730.309
Operating Labour	50.000
Supervision and Support Labour	15.000
Laboratory Charges	5.000
Operating Supplies	109.546
Plant Overhead Cost	477.186
<b>Total Direct Cost</b>	<b>1.659.025</b>
<b>General Expense</b>	
Administrative Cost	2.250
<b>Total Manufacturing Cost (OPEX)</b>	<b>5.704.642</b>

Sehingga didapatkan harga OPEX adalah sebesar 5.704.642 USD. Berdasarkan hasil perhitungan OPEX, diperoleh bahwa nilai OPEX berdasarkan optimisasi dengan PSO adalah lebih kecil bila dibandingkan dengan hasil optimisasi menggunakan GA. Perbedaan nilai yang jauh tersebut dikarenakan pada perhitungan harga listrik berdasarkan optimisasi desain menggunakan algoritma PSO adalah jauh lebih kecil dari harga pemakainya listrik berdasarkan optimisasi desain menggunakan GA. Begitu juga dengan perbandingan hasil perhitungan nilai CAPEX, dimana hasil perhitungan CAPEX berdasarkan optimisasi PSO adalah lebih kecil. Hal ini dikarenakan nilai CAPEX dan OPEX yang dibutuhkan dipengaruhi oleh harga PSA hasil optimisasi. Sehingga optimisasi terbaik adalah dengan menggunakan algoritma PSO. Hasil perhitungan CAPEX dan OPEX berdasarkan algoritma GA

dan PSO dirangkum pada diagram batang yang ditunjukkan pada gambar 4.6 dan gambar 4.7.



**Gambar 4.6** Perbandingan CAPEX (GA dan PSO)



**Gambar 4.7** Perbandingan OPEX (GA dan PSO)

#### 4.3.2 Perhitungan NPV dan IRR

Untuk menghitung besarnya NPV (*Net Present Value*) dan IRR (*Internal Rate Return*) dimulai dengan menganalisis hasil penghematan bahan bakar dan penjualan per tahun. Adapun dengan menggunakan teknologi oxyfuel dan CCS diperoleh gas N<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> hasil pemisahan menggunakan Pressure Swing Adsorption (PSA). N<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> yang telah dipisahkan tersebut selanjutnya akan dijual. Adapun hasil penghematan bahan bakar dan penjualan per tahun ditunjukkan pada tabel 4.8.

**Tabel 4.8** Keuntungan Yang Dihasilkan Setiap Tahun (dalam USD)

Kriteria	dalam Kg	dalam USD
Penghematan Batu Bara	2.095.627,48	147.007
Penghematan Biogas	76.211,40	0
Penjualan CO <sub>2</sub>	302.203.735	9.066.112
Penjualan N <sub>2</sub>	839.280.820	25.178.425

Adapun pada analisis tersebut digunakan perkiraan harga bahan bakar batu bara sebesar 70 USD/ton [38]. Harga perkiraan penjualan CO<sub>2</sub> adalah sebesar 30 USD/ton [39]. Sementara harga perkiraan penjualan N<sub>2</sub> adalah sebesar 30 USD/ton [40]. Adapun harga bahan bakar biogas diasumsikan sebagai 0, hal tersebut dikarenakan bahan bakar biogas dihasilkan dari limbah industri sehingga didapatkan secara gratis. Lamanya jangka waktu proyek yang diharapkan adalah 10 tahun.

Perhitungan metode NPV dan IRR telah dijelaskan pada bab sebelumnya, adapun nilai *interest* yang digunakan pada perhitungan adalah sebesar 4%. Adapun perhitungan NPV dan IRR adalah mengacu pada hasil optimisasi menggunakan GA dan PSO. Berdasarkan optimisasi desain PSA dengan menggunakan *Genetic Algorithm* maka diperoleh NPV dan IRR dalam jangka waktu 10 tahun seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.9. Sementara dengan optimisasi menggunakan *Particle Swarm Optimization* didapatkan

nilai NPV dan IRR selama 10 tahun yang dapat dilihat berdasarkan pada tabel 4.10. Sehingga dari kedua hasil yang didapat selanjutnya dapat diperoleh optimisasi terbaik dan keuntungan maksimum yang didapatkan.

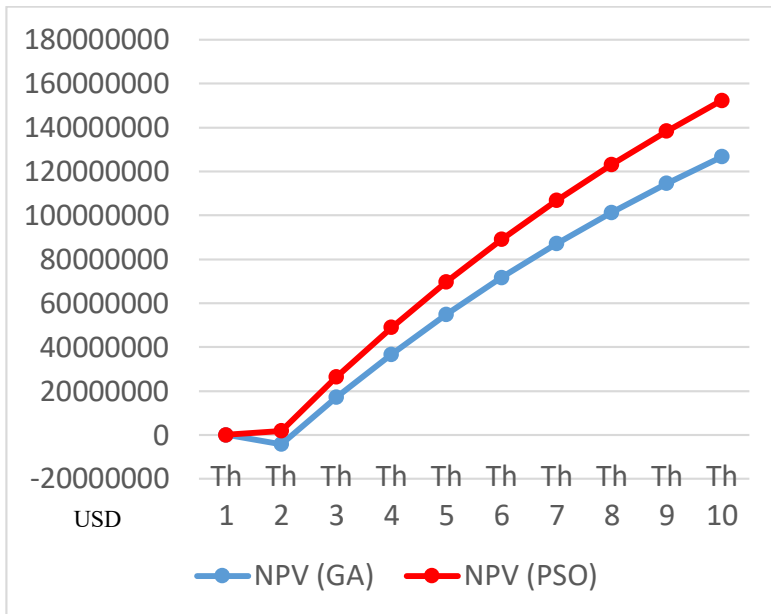
**Tabel 4.9** NPV dan IRR berdasarkan *Genetic Algorithm*

No	NPV	IRR
1	-	
2	-4.180.586	-
3	17.111.578	-15%
4	36.765.883	40%
5	54.908.319	61%
6	71.655.182	70%
7	87.113.826	73%
8	101.383.343	75%
9	114.555.205	76%
10	126.713.846	76%

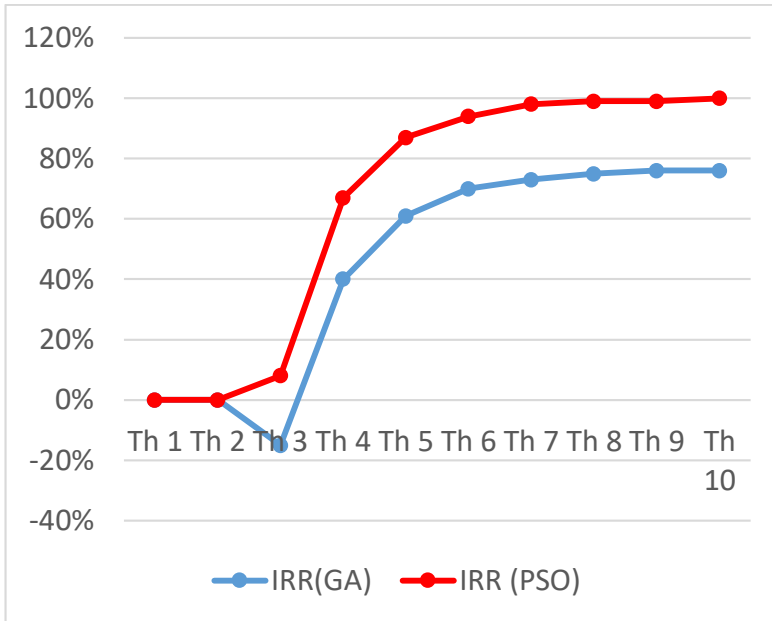
**Tabel 4.10** NPV dan IRR berdasarkan *Particle Swarm Optimization*

No	NPV	IRR
1	-	
2	1.874.715	-
3	26.357.164	8%
4	48.956.347	67%
5	69.817.132	87%
6	89.073.241	94%
7	106.848.111	98%
8	123.255.684	99%
9	138.401.135	99%
10	152.381.552	100%

Adapun untuk memudahkan pembaca, maka dibuat plot diagram garis yang menunjukkan perbandingan nilai NPV dan IRR berdasarkan GA dan PSO yang ditunjukkan oleh gambar 4.8 dan gambar 4.9. Berdasarkan hasil perhitungan NPV dan IRR, didapatkan nilai NPV dan IRR berdasarkan GA pada tahun kesepuluh dengan NPV sebesar 126.713.846 USD dan IRR 76%. Kemudian dengan berdasarkan PSO didapatkan NPV sebesar 152.381.552 USD dan IRR 100%. Sehingga berdasarkan hasil analisis keuntungan dengan menggunakan metode NPV dan IRR, didapatkan NPV dan IRR terbesar dimiliki oleh analisis berdasarkan *Particle Swarm Optimization*. Adapun berdasarkan hasil perhitungan NPV dan IRR, didapatkan besar nilai yang positif dan terbilang tinggi sehingga investasi teknologi *oxyfuel* dan *carbon capture storage* adalah layak digunakan pada PLTU di PT. Great Giant Foods Terbanggi Besar, Lampung Tengah.



**Gambar 4.8** Hasil Analisis NPV(GA dan PSO)



**Gambar 4.9** Hasil Analisis IRR (GA dan PSO)

#### 4.4 Pemanfaatan Nitrogen dalam Kehidupan

Nitrogen merupakan unsur yang banyak ditemukan dalam kehidupan sehari-hari. Hampir semua benda padat, cair, dan gas mengandung unsur nitrogen. Pada penelitian ini telah dilakukan analisa penggunaan teknologi PSA dan *oxyfuel* dalam memisahkan oksigen ( $O_2$ ) dari nitrogen ( $N_2$ ), dimana nitrogen yang telah dipisahkan dapat dimanfaatkan kembali untuk berbagai aspek kebutuhan. Nitrogen banyak diaplikasikan dalam berbagai kebutuhan diantaranya dalam pembuatan lampu bohlam, pengemasan produk makanan, bahan baku pupuk, bahan pembuatan komponen elektronik, juga digunakan sebagai bahan untuk produksi obat-obatan [41]. Adapun dari sekian banyak pemanfaatan nitrogen akan dibahas mengenai pemanfaatan nitrogen yang paling banyak digunakan yakni sebagai bahan baku pupuk.

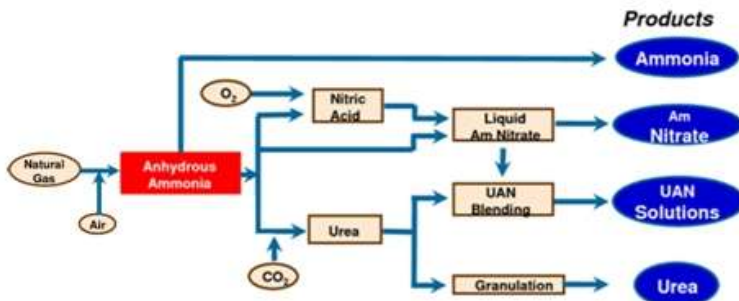
#### 4.4.1 Nitrogen Sebagai Bahan Baku Pupuk

Unsur nitrogen merupakan unsur zat hara utama yang diperlukan oleh tumbuhan. Dengan pemberian pupuk nitrogen maka tingkat kesuburan tanah meningkat sehingga mempercepat pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Molekul-molekul dengan kandungan nitrogen yang biasanya terdapat dalam kadar sedikit di tanah seperti  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ , dan  $\text{NO}_3^-$  meski kadarnya hanya sekitar 5% tetapi merupakan elemen paling diperlukan oleh tanaman [42]. Akhir-akhir ini penggunaan nitrogen semakin meningkat diiringi dengan permintaan nitrogen yang semakin bertambah khususnya sebagai bahan baku pembuatan pupuk. Meningkatnya permintaan nitrogen dunia sebagai bahan baku pupuk berdasarkan data yang diperoleh dari organisasi pangan dunia (FAO) dapat dilihat pada tabel 4.11.

**Tabel 4.11** Permintaan Nitrogen Setiap Tahun [43]

Tahun	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Ton $\text{N}_2$	110	111.6	113.6	115.4	117.1	118.8

Dengan diterapkannya penggunaan teknologi *oxyfuel* untuk memperoleh nitrogen maka hal tersebut akan sangat membantu dalam menjamin ketersediaan nitrogen di dunia khususnya dalam pembuatan pupuk. Adapun secara garis besar proses pembuatan pupuk dengan nitrogen sebagai bahan utamanya adalah dijelaskan berdasarkan pada gambar 4.1.



**Gambar 4.10** Proses Pembuatan Pupuk [44]

Pupuk nitrogen berperan besar dalam pertanian dunia yang produksinya hingga mencapai ratusan juta ribu ton per tahun. Terdapat banyak jenis pupuk nitrogen, tiga diantaranya adalah *ammonia*, *ammonium nitrate*, dan *urea*. Amonia dihasilkan dengan mereaksikan nitrogen dari udara dengan gas alam pada tekanan dan temperatur tertentu dengan menggunakan proses *Haber* yakni pada tekanan berkisar 200-300 bar dan temperatur sekitar 450 °C. *Anhydrous ammonia* disimpan dalam bentuk cairan yang didinginkan sehingga dapat diubah ke berbagai jenis pupuk. Adapun *nitric acid* dihasilkan dengan mencampurkan ammonia dan oksigen pada suatu tangki diikuti dengan terjadinya adsorpsi *nitric oxide* di dalam air. Kemudian asam nitrit dan gas ammonia selanjutnya bercampur dan terjadi reaksi netralisasi pada rentang temperatur 100-180°C. Kemudian *urea* dihasilkan dari reaksi ammonia dengan karbon dioksida pada tekanan tinggi. Selain itu proses lainnya dengan mencampur *urea* dengan *ammonium nitrate* akan menghasilkan cairan *urea ammonium nitrate* (UAN).

#### 4.5 Pemanfaatan Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>) dalam Kehidupan

Karbon dioksida merupakan unsur yang banyak digunakan dalam industri baik industri kimia, industri makanan maupun industri *oil and gas*. Dewasa ini hasil analisa menunjukkan penggunaan bahan bakar karbon di dunia menghasilkan 19,6 giga ton CO<sub>2</sub> atau sama dengan menghasilkan karbon sebanyak 5 giga ton C. Ditambah dengan efek kebakaran hutan yang terjadi secara sengaja maupun tidak sengaja maka total didapatkan 7 giga ton C setiap tahunnya [45]. Sehingga perlu dilakukannya pemanfaatan CO<sub>2</sub> secara berkala guna mengurangi tingginya kadar emisi CO<sub>2</sub> ke atmosfer. Adapun penggunaan CO dalam kehidupan sangat banyak diantaranya pada *Enhanced Oil Recovery* (EOR), pembuatan minuman soda, pembuatan *wine, food processing and packaging*, pembuatan baja, pembuatan komponen elektronik, dan lain sebagainya. Berdasarkan sebuah data penelitian, diperoleh data mengenai prospek dan jumlah penggunaan CO<sub>2</sub> secara akumulatif dari tahun 2011 hingga tahun 2020 kedepannya yakni ditunjukkan berdasarkan tabel 4.12 Berdasarkan hasil penelitian dalam tabel



tersebut didapatkan bahwa pemanfaatan CO<sub>2</sub> sebagai bahan injeksi untuk proses *Enhanced Oil Recovery* (EOR) memiliki prospek terbesar bagi kebutuhan dunia saat ini. Dengan teknologi EOR akan memudahkan manusia dalam memperoleh sumber minyak bumi yang sangat diperlukan oleh manusia.

**Tabel 4.12** Prospek dan Jumlah Penggunaan CO<sub>2</sub> secara Akumulatif

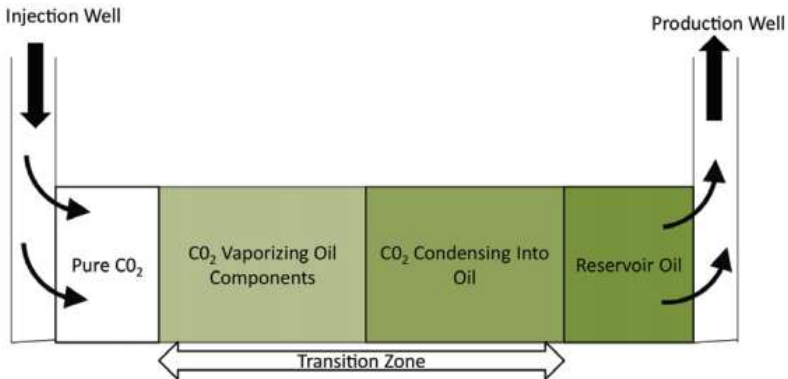
Cumulative Demand to 2020	Gross Revenue to 2020	Technology/Application
> 500 juta ton	>7500 juta USD	EOR
20-100 juta ton	<1500 juta USD	Pembuatan pupuk, minuman soda, ECBM
5-20 juta ton	< 300 juta USD	Polimer, methanol, budidaya alga, pembuatan bauksit, obat-obatan
< 5 juta ton	<75 juta USD	Asam formit, dan EGS

#### 4.5.1 Penggunaan CO<sub>2</sub> dalam Proses EOR

EOR (*Enhanced Oil Recovery*) adalah sebuah metode yang dilakukan untuk meningkatkan produksi minyak pada suatu reservoir. Teknologi tersebut sebenarnya pertamakali diterapkan di Indonesia pada tahun 1985 namun hingga saat ini masih belum terlalu banyak digunakan [46]. Indonesia merupakan salah satu Negara yang berpeluang besar untuk meningkatkan produksi minyaknya menggunakan teknologi ini dengan prospek produksi hingga 49,5 miliar barel per harinya [47]. Dalam hal ini CO<sub>2</sub> merupakan komponen utama yang berperan penting dalam proses EOR. Adapun pemanfaatan CO<sub>2</sub> dalam proses EOR yakni ditunjukkan pada gambar 4.2.

Proses CO<sub>2</sub>-EOR pada dasarnya adalah sebuah fungsi yang menggambarkan bagaimana kemampuan CO<sub>2</sub> untuk berinteraksi dengan minyak dan bercampur menjadi satu. Adapun air dan minyak tidak dapat bercampur menjadi satu, sementara CO<sub>2</sub> pada kondisi tekanan dan temperatur tertentu dapat bercampur menjadi

satu. Kemampuan  $\text{CO}_2$  untuk bercampur dengan minyak tersebut dinamakan sebagai *miscibility*. Syarat supaya *miscibility* terjadi adalah apabila tekanan yang digunakan telah melewati batas MMP (*Minimum Miscibility Pressure*). Ketika tekanan telah melewati MMP maka  $\text{CO}_2$  dan minyak akan bercampur. Selanjutnya molekul hidrokarbon yang besar dan telah dipanaskan akan menguap dan masuk ke dalam  $\text{CO}_2$ . Sementara  $\text{CO}_2$  akan terkondensasi dan larut dalam minyak. Pertukaran massa tersebut akan menyebabkan kedua komponen bercampur dan membentuk formasi campuran dengan minyak di depan dan  $\text{CO}_2$  mendorong di belakangnya sehingga pada akhirnya minyak dapat keluar dari reservoir [48].



**Gambar 4.11** Skema proses  $\text{CO}_2$ - EOR [48]

Pemanfaatan  $\text{CO}_2$  pada proses EOR adalah dengan menginjeksi  $\text{CO}_2$  ke dalam lapisan tanah untuk melakukan proses *oil recovery*, hal tersebut serupa dengan yang dilakukan pada proses CCS (*Carbon Capture Storage*) dimana  $\text{CO}_2$  juga diinjeksikan ke dalam tanah akan tetapi untuk disimpan. Dengan demikian  $\text{CO}_2$  yang akan disimpan pada proses CCS dapat dimanfaatkan secara langsung dengan menyalurkan  $\text{CO}_2$  yang telah ditangkap dan diproses untuk proses *Enhanced Oil Recovery*.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang diperoleh didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil analisis dengan menggunakan pendekatan stoikiometri berhasil memperoleh jumlah massa produk dan reaktan komponen zat dalam pembakaran.
2. Berdasarkan analisis dari optimisasi menggunakan *Genetic Algorithm* dan *Particle Swarm Optimization*, besarnya nilai CAPEX minimum yang diperlukan untuk merancang *oxyfuel* dan CCS pada *power plant* PT. GGF adalah sebesar 24.647.938 USD dan besarnya nilai OPEX minimum untuk biaya operasional setiap tahunnya adalah sebesar 5.704.642 USD/tahun.
3. Dengan berjalannya proyek *oxyfuel* dan CCS di PT Great Giant Foods selama 10 tahun diharapkan akan memperoleh nilai keuntungan maksimum dengan NPV sebesar 152.381.552 USD dan IRR sebesar 100%.

### 5.2 Saran

Saran penulis untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Dilakukan analisis teknoekonomi dengan menggunakan teknik *air separation* yang berbeda dengan *power plant* yang kapasitasnya lebih besar.
2. Dilakukan analisis untuk merancang *power plant* yang sepenuhnya menggunakan *renewable energy* seperti biogas.
3. Perlu dianalisis tentang pemanfaatan CO<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub> secara lebih luas dan mendetail.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jaringan Advokasi Tambang (JATAM), HUNGRY COAL: Pertambangan Batubara dan Dampaknya Terhadap Ketahanan Pangan Indonesia, Jakarta: Waterkeeper Alliance, 2017, pp. 1-45.
- [2] BPS-Statistics Indonesia, "Statistik Pertambangan Non Minyak dan Gas Bumi," BPS-Statistics Indonesia, Jakarta, 2016.
- [3] J. Hong, "TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF PRESSURIZED OXYFUEL COMBUSTION POWER CYCLE FOR CO<sub>2</sub> CAPTURE," Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2009.
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change, "IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage," Cambridge University Press, New York, 2005.
- [5] Y. Mirfendereski, "Techno-Economic Assessment of Carbon Capture and Sequestration Technologies in the Fossil Fuel-based Power Sector of the Global Energy-Economy System," Technische Universität Berlin, Berlin, 2008.
- [6] A. B. Rao, E. S. Rubin, Berkenpas and M. B., "OXYFUEL COMBUSTION BASED CO<sub>2</sub> CAPTURE SYSTEMS IN PULVERIZED COAL PLANTS," IECM-CS, Pittsburgh, 2005.
- [7] Q. Zhao, E. Leonhardt, C. MacConnell, C. Frear and S. Chen, "Purification Technologies for Biogas Generated by Anaerobic Digestion," Climate Friendly Farming, Pacific Northwest, 2010.
- [8] Biruh Shimekit and Hilmi Mukhtar, Natural Gas Purification Technologies – Major Advances for CO<sub>2</sub> Separation and Future Directions, 9th ed., E. R. Grant, Ed., Kuala Lumpur: InTech, 2012, pp. 1-37.
- [9] K. S. Gunawan, "Optimisasi Desain Pressure Swing Adsorption Sebagai Carbon Capture Pada Studi Kasus PLTU Paiton dan PLTG Muara Tawar," Surabaya, 2017.
- [10] A. Damodaran, "Implications for Profitability Measurement and Valuation," Stern School of Business, New York, 2013.
- [11] A. ARSHAD, "Net Present Value is better than Internal Rate of Return," *INTERDISCIPLINARY JOURNAL OF CONTEMPORARY RESEARCH IN BUSINESS*, vol. 4, no. 8, pp. 1-9, 2012.
- [12] I. Glassman and R. A. Yetter, Combustion, Oxford: Elsevier, 2008.
- [13] T. N. Bethiana, "Pemodelan Jaringan Syaraf Tiruan Methane Reaktor di Biogas Plant PT. Great Giant Pineapple," Surabaya, 2018.
- [14] B. I. Kipyegon, "Biogas Use In Power Generation," 2011.
- [15] Maizirwan Mel, Muhammed Mubeen Ahamed Ibrahim, and Roy Hendroko Setyobudi, "Preliminary Study of Biogas Upgrading and Purification by Pressure Swing Adsorption," in *AIP Conference Proceedings*, Jakarta, 2016.
- [16] "Review of the latest research on coal, environment, and clean technologies," Zagreb, 2018.

- [17] "Chemed Edu," [Online]. Available: <http://chemed.chem.purdue.edu/genchem/topicreview/bp/1organic/coal.html>. [Accessed 25 11 2018].
- [18] U. Singh, "Carbon capture and storage: an effective way to mitigate global warming," *Research Gate Journal*, pp. 914-922, 2013.
- [19] R. M. F. Fernandes, "Simulation of a Subcritical Power Plant using a Boiler Control Sequence," 2012.
- [20] Global CCS Institute, "OXY COMBUSTION WITH CO<sub>2</sub> CAPTURE," January 2012.
- [21] D. S. Viswanath, T. K. Ghosh and D. H. L. Prasad, *Viscosity of Liquid*, Dordrecht: Springer, 2007.
- [22] T. A. Davidson, "A Simple and Accurate Method for Calculating Viscosity of Gaseous Mixtures," Bureau of Mines, Washington, 1993.
- [23] D. Ko, R. Siriwardane and L. T. Biegler, "Optimization of Pressure Swing Adsorption and Fractionated Vacuum Pressure Swing Adsorption Processes for CO<sub>2</sub> Capture," *Industrial Engineering Chemistry*, vol. 2005, no. 44, pp. 8084-8094, 2005.
- [24] S. N. Prajapati and P. N. M. Patel, "A Novel Technique to Solve Mathematical Model of Pressure Swing Adsorption System for Oxygen Separation from Air," *International Journal for Scientific Research & Development*, vol. I, no. 2, pp. 331-335, 2013.
- [25] S A Skvortsov, E I Akulinin, O O Golubyatnikov, D S Dvoretzky, S I Dvoretzky, "Mathematical modelling of cyclic pressure swing adsorption processes," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1015, p. 8, 22 May 2018.
- [26] J. Wilcox, *Carbon Capture*, New York: Springer Science, 2012.
- [27] G. D. Pirngruber and D. Leinekugel-le-Cocq, "Design of a Pressure Swing Adsorption Process for Postcombustion CO<sub>2</sub> Capture," *Industrial Engineering and Chemistry Research*, no. 52, pp. 5985-5996, 2013.
- [28] N. Susarla, R. Haghpanah, I. Karimi, S. Farooq, A. Rajendran, L. S. C. Tan and J. S. T. Lim, "Energy and cost estimates for capturing CO<sub>2</sub> from adry flue gas using pressure/vacuum swing adsorption," *Chemical Engineering Research and Design*, no. 102, pp. 354-367, 2015.
- [29] P. Seferlis and A. I. Papadopoulos, *Process System and Materials for CO<sub>2</sub> Capture*, Greece: John Wiley & Sons, 2017.
- [30] J. Ling, A. Ntiamoah, P. Xiao, D. Xu, P. A. Webley and Y. Zhai, "Overview of CO<sub>2</sub> Capture from Flue Gas Streams by Vacuum Pressure Swing Adsorption Technology," *Austin Chemical Engineering*, 2014.
- [31] A. I. Sarker, "Equilibrium and Mass Transfer Behaviour of CO<sub>2</sub> Adsorption," University of Regina, Regina, Saskatchewan, 2012.
- [32] "Particle Swarm Optimization," in *Advances in Metaheuristic Algorithms for Optimal Design of Structures*, 2017, Springer International Publishing AG , 2017, pp. 11-39.
- [33] W.-J. Shyr, "Parameters Determination for Optimum Design by Evolutionary Algorithm," *Convergence and Hybrid Information Technologies*, vol. I, no. 2, pp. 11-20, 2010.

- [34] Q. Yu and K. Wang, "A Hybrid Point Cloud Alignment Method Combining Particle Swarm Optimization and Iterative Closest Point Method," *Advances in Manufacturing*, vol. II, no. 1, pp. 32-38, 2014.
- [35] E. S. Rubin, A. B. Rao and M. B. Berkenpas, "Technical Documentation: Oxygen-based Combustion Systems (Oxyfuels) with Carbon Capture and Storage (CCS)," Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2007.
- [36] Dictio Corporation, "Dictio," Dictio company, 17 January 2017. [Online]. Available: <https://www.dictio.id/t/apakah-yang-dimaksud-dengan-net-present-value-npv/3434>. [Accessed 4 March 2019].
- [37] Columbia Business School, "Pre MBA Finance," Pre MBA Finance company, 2003. [Online]. Available: [http://ci.columbia.edu/ci/premba\\_test/c0332/s5/s5\\_5.html](http://ci.columbia.edu/ci/premba_test/c0332/s5/s5_5.html). [Accessed 4 March 2019].
- [38] A. T. Billy, "Tribun Bisnis," 9 March 2018. [Online]. Available: <http://www.tribunnews.com/bisnis/2018/03/09/kementerian-esdm-tetapkan-harga-batu-bara-untuk-pltu-70-dolar-as-per-ton>. [Accessed 2019 January 17].
- [39] P. Luckow, E. A. Stanton, S. Fields, B. Biewald, S. Jackson, J. Fisher and R. Wilson, "2015 Carbon Dioxide Price," Synapse, Cambridge, 2015.
- [40] C. Styles, "Purity," 21 August 2017. [Online]. Available: <https://puritygas.ca/nitrogen-gas-costs/>. [Accessed 2019 January 17].
- [41] World of Chemicals Corporation, "World of Chemicals," Data Research Analyst, Worldofchemicals.com, 2019. [Online]. Available: <https://www.worldofchemicals.com/436/chemistry-articles/interesting-facts-about-nitrogen-element.html>. [Accessed 19 02 2019].
- [42] "Effects of Nitrogen Fertilizers on the Growth and Nitrate Content of Lettuce (*Lactuca sativa* L.)," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. I, no. 11, 2014.
- [43] Food and Agriculture Organization of the United Nations, "World Fertilizer Trends and Outlook to 2020," Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, 2017.
- [44] Guichon Valves Corporation, "Guichon Valves," Guichon Valves production, 2018. [Online]. Available: <http://guichon-valves.com/faqs/nitrogen-fertilizers-manufacturing-process-of-nitrogen-fertilizers/>. [Accessed 2 February 2019].
- [45] E. Q. I. T. Michele Arresta, "Carbon Dioxide Utilization in the Chemical Industry," 1996.
- [46] M. Abdurrahman, W. Bae, A. Novriansyah and I. Khalid, "ENHANCED OIL RECOVERY (EOR) CHALLENGES AND ITS FUTURE IN INDONESIA," 2016.
- [47] M. Abdurrahman, "Chemical Enhanced Oil Recovery Activities in Indonesia: How it's Future," 2016.
- [48] M. K. Verma, "Fundamentals of Carbon Dioxide-Enhanced Oil Recovery (CO<sub>2</sub>-EOR)—A Supporting Document of the Assessment Methodology for Hydrocarbon Recovery Using CO<sub>2</sub>-EOR Associated with Carbon Sequestration," U.S. Geological Survey, Virginia, 2015.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***



## LAMPIRAN

### 1. Perhitungan Massa Metana (CH<sub>4</sub>) dalam biogas

Volume biogas awal ( $V_{\text{biogas}}$ ) = 5.827.558 Nm<sup>3</sup>

$$\text{Sehingga volume } 66\% \text{ CH}_4 = \frac{66}{100} \times 5.827.558 \text{ Nm}^3 \\ = 3.846.188 \text{ Nm}^3$$

Dikonversikan ke dalam (kg) maka,

$$\text{massa CH}_4 = 2.580.792,15 \text{ kg}$$

### 2. Perbandingan energi batubara ( $Q_{\text{coal}}$ ) terhadap Energi metana ( $Q_{\text{met}}$ )

Berdasarkan tabel 2.1 diperoleh

$$\text{HHV}_{\text{coal}} = 20.000 \text{ Kj/kg}$$

$$\text{HHV}_{\text{met}} = 55.500 \text{ Kj/kg}$$

Adapun massa masing-masing adalah sebagai berikut.

$$m_{\text{coal}} = 90.366.080 \text{ kg}$$

$$m_{\text{met}} = 2.580792,148 \text{ kg}$$

Sehingga dihitung nilai  $Q_{\text{coal}}$  dan  $Q_{\text{met}}$  menggunakan persamaan 2.1

$$Q_{\text{coal}} = m_{\text{coal}} \times \text{HHV}_{\text{coal}} = 1,8 \times 10^{12} \text{ Kj}$$

$$Q_{\text{met}} = m_{\text{met}} \times \text{HHV}_{\text{met}} = 1,4 \times 10^{11} \text{ Kj}$$

Kemudian diperoleh perbandingan bahwa  $Q_{\text{coal}} : Q_{\text{met}}$  adalah 93% : 7%. Dengan demikian daya listrik yang dihasilkan adalah 93% dari bahan bakar batubara dan 7% dari bahan bakar biogas.

**Tabel 1. CO<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub> yang didapatkan**

ton CO <sub>2</sub> /hr	kg CO <sub>2</sub> /hr	SCFM	NM <sub>3</sub> /hr
34,50	34.498,14	11.128,43	17.511,75
ton N <sub>2</sub> /hr	kg N <sub>2</sub> /hr	SFCM	Nm <sub>3</sub> /hr
95,81	95,81	48.574,81	20.383,94

**Tabel 2. Perhitungan NPV dan IRR (GA)**

	P		NPV	IRR
1	-	-27.247.097	-	
2	24.948.738	23.066.511	- 4.180.586	#NUM!
3	23.950.789	21.292.164	17.111.578	-15%
4	22.992.757	19.654.305	36.765.883	40%
5	22.073.047	18.142.436	54.908.319	61%
6	21.190.125	16.746.864	71.655.182	70%
7	20.342.520	15.458.643	87.113.826	73%
8	19.528.819	14.269.517	101.383.343	75%
9	18.747.667	13.171.862	114.555.205	76%
10	17.997.760	12.158.642	126.713.846	76%
11	17.277.850	11.223.362	137.937.208	77%
12	16.586.736	10.360.026	148.297.234	77%
13	15.923.266	9.563.101	157.860.335	77%
14	15.286.335	8.827.478	166.687.813	77%
15	14.674.882	8.148.441	174.836.254	77%
16	14.087.887	7.521.638	182.357.892	77%
17	13.524.371	6.943.050	189.300.942	77%
18	12.983.396	6.408.970	195.709.912	77%
19	12.464.061	5.915.972	201.625.884	77%
20	11.965.498	5.460.897	207.086.781	77%
21	11.486.878	5.040.828	212.127.609	77%

	P		NPV	IRR
22	11.027.403	4.653.072	216.780.681	77%
23	10.586.307	4.295.144	221.075.825	77%
24	10.162.855	3.964.748	225.040.573	77%
25	9.756.341	3.659.767	228.700.340	77%

**Tabel 3. Perhitungan NPV dan IRR (PSO)**

	P		NPV	IRR
1	-	-24.647.938	-	
2	28.686.902	26.522.653	1.874.715	#NUM!
3	27.539.425	24.482.449	26.357.164	8%
4	26.437.848	22.599.184	48.956.347	67%
5	25.380.335	20.860.785	69.817.132	87%
6	24.365.121	19.256.109	89.073.241	94%
7	23.390.516	17.774.870	106.848.111	98%
8	22.454.896	16.407.572	123.255.684	99%
9	21.556.700	15.145.451	138.401.135	99%
10	20.694.432	13.980.417	152.381.552	100%
11	19.866.655	12.905.000	165.286.552	100%
12	19.071.988	11.912.308	177.198.859	100%
13	18.309.109	10.995.976	188.194.836	100%
14	17.576.744	10.150.132	198.344.968	100%
15	16.873.675	9.369.353	207.714.320	100%
16	16.198.728	8.648.633	216.362.953	100%
17	15.550.779	7.983.354	224.346.307	100%
18	14.928.747	7.369.250	231.715.557	100%
19	14.331.598	6.802.384	238.517.941	100%
20	13.758.334	6.279.124	244.797.065	100%

	P		NPV	IRR
21	13.208.000	5.796.114	250.593.179	100%
22	12.679.680	5.350.259	255.943.439	100%
23	12.172.493	4.938.701	260.882.140	100%
24	11.685.593	4.558.801	265.440.940	100%
25	11.218.170	4.208.124	269.649.064	100%

## Source Code Optimisasi Menggunakan GA

```

clear all
close all
%Pembangkitan Populasi dan Parameter
Npop      = 200;                %populasi
Maxit     = 500;                %iterasi
el        = 0.90;               %elatism
Pc        = 0.8;
%probabilitas crossover
Pm        = 0.01;
%probabilitas mutasi
Nvar      = 4;                  %jumlah
variabel desain yang dioptimasi
Nbit      = 20;                 %jumlah bit
%Constrain

rb        = [30 0.5 0.1 0.1];    %batas
bawah cari constraint x4 x5 DICARI!!!!
ra        = [600 2 2 1];        %batas atas cari
constraint x4 x5 DICARI!!!!

eBangkit  = [];
Individu  = [];
eIndividu = [];
david    = [];
Dadatfit = [];
Datfit   = [];
summary  = [];
eDadatfit = [];
efitnessmax = [];
eIndividuMax = [];

Bangkit = round(rand(Npop,Nbit*Nvar));
popsize = size(Bangkit,1);

for i = 1:Nvar
    batas(i) = ra(i)-rb(i);
end
for i =1:Npop

```

```

    for j = 1:Nvar
        Desimal(i,j) =
bi2de(Bangkit(i, ((j*Nbit)-(Nbit-
1)): (j*Nbit)), 'left-msb');
        Individu(i,j) =
(Desimal(i,j)*batas(:,j)-
batas(:,j)+rb(:,j)*(2^Nbit-1))/(2^Nbit-1);
    end
end

Datfit = [] ;
variabel = [];
for i = 1:size(Individu,1)
    fitness = function_obj(Individu(i,:));
    Datfit = [Datfit;fitness];
    [fitemax,nmax]= max(Datfit);
end

Dadatfit = [];
for generasi=1:Maxit
    disp('GA processing')
    clear command windows
    clear command history
    clear memory

    if generasi > 1
        sort_fit = sortrows(sort,Nbit*Nvar+1);
        Individu1 = sort_fit(round((1-
el)*Npop+1):Npop,:);
        remain =
sort_fit(round(el*Npop)+1:Npop,:);

        X = Individu1;
        M = size(X,1);

        sumfitness = sum(Datfit);
        for i=1:M
            Prob(i) = Datfit(i)/sumfitness;
        end
    end
end

```

```

for i=2:M
    Prob(i) = Prob(i)+Prob(i-1);
end
for i=1:M
    n=rand;
    k=1;
    for j=1:M-1
        if (n>Prob(j))
            k=j+1;
        end
    end
    Xparents(i,:) = X(k,:);
end

%Crossover
[M,d] = size(Xparents);
Xcrossed = Xparents;
for i=1:2:M-1
    c=rand;
    if (c<=Pc)
        p=ceil((d-1)*rand);
        Xcrossed(i,:) = [Xparents(i,1:p)
Xparents(i+1,p+1:d)];
        Xcrossed(i+1,:) =
[Xparents(i+1,1:p) Xparents(i,p+1:d)];
    end
end
if (M/2~=floor(M/2))
    c=rand;
    if (c<=Pc)
        p=ceil((d-1)*rand);
        str=ceil((M-1)*rand);
        Xcrossed(M,:) = [Xparents(M,1:p)
Xparents(str,p+1:d)]; %the first child is chosen
    end
end

%Mutasi
[M,d] = size(Xcrossed);
Xnew=Xcrossed;

```

```

    for i=1:M
        for j=1:d
            p=rand;
            if (p<=Pm)
                Xnew(i,j)=1-Xcrossed(i,j);
            end
        end
    end

    disp('New fitness calculation');

    Bangkit =
[Xnew(:,1:Nbit*Nvar);remain(:,1:Nbit*Nvar)];
    end
    eBangkit = [eBangkit; Bangkit];

    for i =1:Npop
        for j = 1:Nvar;
            Desimal(i,j) =
bi2de(Bangkit(i,((j*Nbit)-(Nbit-
1)):j*Nbit)), 'left-msb');
            Individu(i,j) =
(Desimal(i,j)*batas(:,j)-
batas(:,j)+rb(:,j)*(2^Nbit-1))/(2^Nbit-1);
        end
    end

    Datfit = [];
    for i = 1:Npop
        fitness = function_obj(Individu(i,:));
        Datfit = [Datfit;fitness];
        [fitemax,nmax] = max(Datfit);
    end

    Dadatfit = Datfit;
    eDadatfit = [eDadatfit;Dadatfit];
    eIndividu = [eIndividu;Individu];
    [fitnessmax,nmax] = max(eDadatfit);
    efitnessmax = [efitnessmax;fitnessmax];

```



```

    BangkitMax = eBangkit(nmax,:);
    IndividuMax = eIndividu(nmax,:);
    eIndividuMax = [eIndividuMax;IndividuMax];
    BangkitMaxlast = BangkitMax;
    schedmax = BangkitMax;
    sort = [Bangkit Dadatfit];
    summary = [summary; sort];
    david = [david; Dadatfit];

clc
max_variable_design=eIndividuMax(1,:)
max_objective_function=fitness(1,:)
figure(gcf)
title('Grafik Nilai Maksimum GA','color','b')
xlabel('Jumlah Iterasi')
ylabel('Nilai Fungsi Obyektif')
hold on
plot(efitnessmax, 'DisplayName', 'efitnessmax',
'YDataSource', 'efitnessmax');
hold on
end

```

### Source Code Fungsi Objektif GA

```

function Jtot=function_obj(x)
    t= x(1) ; %time
    L= x(2) ; %length
    pa= x(3); %tekanan adsorbsi
    d= x(4) ; %luasan

    th=3; %tahun produksi

    %hargakolom
    pur=0.99;
    cap=0.9;

    %f=volumetric flowrate
    effb=0.75;
    %efisiensi blower
    effc=0.75;
    %efisiensi compressor

```

```

ce=0.00010395;
%electric cost usd per watt hour (idr 1467/kwh)
y=0.693;
%fraksi co2
r=1;
%rasio waktu adsorbsi dan desorbsi
T=333;

pd=0.36;
%pressure desorbsi in atm
b=0.5;
%void particle
dp=0.0016;
%diameter partikel DICARI!!!!

% rhog=1.537;
%rho gas campuran CO2 dan N2

MC=0.044; % Carbon dioksida
MN=0.018;% uap air
R=8.314;
CpC=0.87; %kJ/kg K
CpN=1.87;

vN=0.00048; %Pa s
vC=0.00001898;

rhoC=MC*pa*101325/(R*T)
rhoN=MN*pa*101325/(R*T)
rhog=(rhoC*y)+(rhoN*(1-y))

massfC=9.58; %massflowcarbon
massfN=1.55;%massflowwater

f=(massfC/rhoC)+(massfN/rhoN);

myN=MN*1000*(1-y);
myC=MC*1000*y;
%MC dan MN dibuat kg/kmol

```

```

myt=myN+myC;
mfN=myN/myt;
mfC=myC/myt;

Rm=R/myt;

Cptot=CpC*mfC+CpN*mfN
Cvtot=Cptot-Rm
k=Cptot/Cvtot

% k=1.38;
%heat ratio

v=((vC*(y)*MC^(0.5))+(vN*(1-
y)*MN^(0.5)))/(((y)*vC^(0.5))+((1-y)*MN^(0.5)))

% v=0.0000193742;
%viskositas

x=pur*b*(y-1)/(pur*(cap)-cap); %x=ta/tc
u=x*L/t;
s=f*(1+r)/u
A=(22/7*((d/2)^2));

pc=10^(3.974+0.4485*(log10(A*L))+0.1074*(log10(A
*L))^2);
c1=4.65*(586/397)*2*(s/A)*pc

%power blower
pdr=(150*v*u*((1-
b)^2))/((dp^2)*(b^3))+1.75*rhog*u^2*(1-
b)/(dp*b^3)*L;
pow((((pa*101325)*f*k)/(effb*(k-
1)))*(((pa*101325+pdr)/(pa*101325))^(k-1)-
1)
c3=pow*th*365*24*ce

%power vacumpump dan compressor
%
```

```

%hargajualCO2
mol=y*f*(pa*101325/(8.314*333))*t

yc=4.11*exp(0.01706*pa)-6.112*exp(-
1.891*pa);
mass=mol/(yc)
c2=mass*1.8

mold=(mass*yc)-(mass*0.92)
c6=2*mold*31536000*0.000044*30*th/(t*(1+r))
%31536000 detik dalam setahun

%vacumpump
rhoc=pd*101325*0.044/(8.314*T); %densitas
co2
fc=0.044*mold/(rhoc*t) %flow co2
kd=1.28; %heat ratio desorbsi

%daya yang dibutuhkan untuk menurunkan
tekanan dari tekanan adsorbsi ke
%desorbsi
pow2=(-((pa*101325)*fc*kd)/(effc*(kd-
1)))*(((pd/pa)^((kd-1)/kd))-1)
c5=pow2*th*365*24*ce

u1=fc*(1+r)/s
pdr1=(150*vC*u1*((1-
b)^2))/((dp^2)*(b^3))+1.75*rhoc*u1^2*(1-
b)/(dp*b^3)*L;
pow1=((pd*101325*cap)*fc*kd)/(effc*(kd-
1))*(((101325+pdr1)/(pd*101325))^((kd-1)/kd))-
1)
c4=pow1*th*r*365*24*ce

if c1<0
    c6=0
    c1=-c1
end

```

```

if c2<0
    c6=0
    c2=-c2
end
if c3<0
    c6=0
    c3=-c3
end
if c4<0
    c6=0
    c4=-c4
end
if c5<0
    c6=0
    c5=-c5
end
%Sehingga
Jtot=(c6-c1-c2-c3-c4-c5);
End

```

## Source Code Optimisasi Menggunakan PSO

```

%PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

clc;
clear;
close all;

%% Problem Definition

CostFunction=@(x) (function_objmin(x)); %
Cost Function

nVar=4; % Number of Decision
Variables

VarSize=[1 nVar]; % Size of Decision Variables
Matrix

```

```

VarMin=[30 0.5 0.1 0.1];      % Lower Bound of
Variables
VarMax=[600 2 2 1];        % Upper Bound of
Variables

%% PSO Parameters

MaxIt=500;                  % Maximum Number of Iterations

nPop=200;                   % Population Size (Swarm Size)

% PSO Parameters
w=1;                        % Inertia Weight
wdamp=0.99;                 % Inertia Weight Damping Ratio
c1=1.5;                     % Personal Learning Coefficient
c2=2.0;                     % Global Learning Coefficient

% If you would like to use Constriction
Coefficients for PSO,
% uncomment the following block and comment the
above set of parameters.

% % Constriction Coefficients
% phi1=2.05;
% phi2=2.05;
% phi=phi1+phi2;
% chi=2/(phi-2+sqrt(phi^2-4*phi));
% w=chi;                    % Inertia Weight
% wdamp=1;                  % Inertia Weight Damping Ratio
% c1=chi*phi1;              % Personal Learning
Coefficient
% c2=chi*phi2;              % Global Learning Coefficient

% Velocity Limits
VelMax=0.1*(VarMax-VarMin);
VelMin=-VelMax;

```

```
%% Initialization

empty_particle.Position=[];
empty_particle.Cost=[];
empty_particle.Velocity=[];
empty_particle.Best.Position=[];
empty_particle.Best.Cost=[];

particle= repmat(empty_particle, nPop, 1);

GlobalBest.Cost=inf;

for i=1:nPop

    % Initialize Position

    particle(i).Position=unifrnd(VarMin, VarMax, VarSize);

    % Initialize Velocity
    particle(i).Velocity=zeros(VarSize);

    % Evaluation

    particle(i).Cost=CostFunction(particle(i).Position);

    % Update Personal Best

    particle(i).Best.Position=particle(i).Position;
    particle(i).Best.Cost=particle(i).Cost;

    % Update Global Best
    if particle(i).Best.Cost<GlobalBest.Cost

        GlobalBest=particle(i).Best;
```

```

        end

    end

    BestCost=zeros (MaxIt,1);

    %% PSO Main Loop

    for it=1:MaxIt

        for i=1:nPop

            % Update Velocity
            particle(i).Velocity =
w*particle(i).Velocity ...

+c1*rand(VarSize).* (particle(i).Best.Position-
particle(i).Position) ...

+c2*rand(VarSize).* (GlobalBest.Position-
particle(i).Position);

            % Apply Velocity Limits
            particle(i).Velocity =
max (particle(i).Velocity, VelMin);
            particle(i).Velocity =
min (particle(i).Velocity, VelMax);

            % Update Position
            particle(i).Position =
particle(i).Position + particle(i).Velocity;

            % Velocity Mirror Effect
            IsOutside=(particle(i).Position<VarMin |
particle(i).Position>VarMax);
            particle(i).Velocity(IsOutside)=-
particle(i).Velocity(IsOutside);

```



```

        % Apply Position Limits
        particle(i).Position =
max(particle(i).Position,VarMin);
        particle(i).Position =
min(particle(i).Position,VarMax);

        % Evaluation
        particle(i).Cost =
CostFunction(particle(i).Position);

        % Update Personal Best
        if
particle(i).Cost<particle(i).Best.Cost

particle(i).Best.Position=particle(i).Position;
particle(i).Best.Cost=particle(i).Cost;

        % Update Global Best
        if
particle(i).Best.Cost<GlobalBest.Cost

                GlobalBest=particle(i).Best;

        end

    end

end

BestCost(it)=GlobalBest.Cost;

disp(['Iteration ' num2str(it) ': Best Cost
= ' num2str(BestCost(it))]);

w=w*wdamp;

```

```
end
```

```
BestSol = GlobalBest;
```

```
%% Results
```

```
figure;
plot(BestCost, 'LineWidth', 2);
semilogy(BestCost, 'LineWidth', 2);
xlabel('Iteration');
ylabel('Best Cost');
grid on;
save ('PSOalone.mat')
```

### Source Code Fungsi Objektif PSO

```
function fit=function_objmin(x)
    %Fungsi Obyektif
    t= x(1);%time
    L= x(2); %length
    pa= x(3); %tekanan adsorbsi
    d= x(4); %luasan

    th=3; %tahun produksi

    %hargakolom
    pur=0.99;
    cap=0.9;
    %f=545.65;
    %f=volumetric flowrate
    effb=0.75;
    %efisiensi blower
    effc=0.75;
    %efisiensi compressor
    ce=0.00010395;
    %electric cost usd per watt hour (idr 1026/kwh)
    y=0.694;
    %fraksi co2
```

```

r=1;
%rasio waktu adsorpsi dan desorpsi
T=333;

pd=0.36;
%pressure desorpsi in atm
b=0.5;
%void particle
dp=0.0016;
%diameter partikel DICARI!!!!

% rhog=1.537;
%rho gas campuran CO2 dan N2

MC=0.044;
MN=0.018;
R=8.314;

CpC=0.87; %kJ/kg K
CpN=1.875;

vN=0.00048; %Pa s
vC=0.00001898;

rhoC=MC*pa*101325/(R*T)
rhoN=MN*pa*101325/(R*T)
rhog=(rhoC*y)+(rhoN*(1-y))

massfC=9.58; %massflowcarbon
massfN=1.553;

f=(massfC/rhoC)+(massfN/rhoN);

myN=MN*1000*(1-y);
myC=MC*1000*y;
%MC dan MN dibuat kg/kmol
myt=myN+myC;
mfN=myN/myt;
mfC=myC/myt;

```

```

Rm=R/myt;

Cptot=CpC*mfC+CpN*mfN
Cvtot=Cptot-Rm
k=Cptot/Cvtot

% k=1.38;
%heat ratio

v= ((vC*(y)*MC^(0.5))+(vN*(1-
y)*MN^(0.5)))/(((y)*vC^(0.5))+((1-y)*MN^(0.5)))

% v=0.0000193742;
%viskositas

x=pur*b*(y-1)/(pur*(cap)-cap); %x=ta/tc
u=x*L/t;
s=f*(1+r)/u
A=(22/7*((d/2)^2));

pc=10^(3.974+0.4485*(log10(A*L))+0.1074*(log10(A
*L))^2);
c1=4.65*(586/397)*2*(s/A)*pc

%power blower
pdr=(150*v*u*((1-
b)^2))/((dp^2)*(b^3))+1.75*rhog*u^2*(1-
b)/(dp*b^3)*L
pow=(((pa*101325)*f*k)/(effb*(k-
1)))*(((pa*101325+pdr)/(pa*101325))^((k-1)/k))-
1)
c3=pow*th*365*24*ce

%power vacumpump dan compressor
%
%hargajualCO2
mol=y*f*(pa*101325/(8.314*333))*t;

```

```

yc=4.11*exp(0.01706*pa)-6.112*exp(-
1.891*pa);
mass=mol/(yc)
c2=mass*1.8

mold=(mass*yc)-(mass*0.92)
c6=2*mold*31536000*0.000044*30*th/(t*(1+r))

rhoc=pd*101325*0.044/(8.314*T); %densitas
co2
fc=0.044*mold/(rhoc*t) %flow co2
kd=1.28; %heat ratio desorbsi
%daya yang dibutuhkan untuk menurunkan
tekanan dari tekanan adsorbsi ke
%desorbsi
pow2=(-((pa*101325)*fc*kd)/(effc*(kd-
1)))*(((pd/pa)^(kd-1)/kd)-1)
c5=pow2*th*365*24*ce

u1=fc*(1+r)/s
pdr1=(150*vC*u1*((1-
b)^2))/((dp^2)*(b^3))+1.75*rhoc*u1^2*(1-
b)/(dp*b^3)*L
pow1=(((pd*101325*cap)*fc*kd)/(effc*(kd-
1)))*(((101325+pdr1)/(pd*101325))^(kd-1)/kd)-
1)
c4=pow1*th*r*365*24*ce
    if c1<0
        c6=0
        c1=-c1
    end
    if c2<0
        c6=0
        c2=-c2
    end
    if c3<0
        c6=0
        c3=-c3
    end
end

```

```
if c4<0
    c6=0
    c4=-c4
end
if c5<0
    c6=0
    c5=-c5
end
%Sehingga
Jtot=(c6-c1-c2-c3-c4-c5);
if Jtot <= 0
    Jtot=1
end
fit=1/Jtot
end
```

**Tabel 4.** Data Desain *Pressure Swing Adsorption* Hasil Optimisasi

	<i>Genetic Algorithm</i>			<i>Particle Swarm Optimization</i>		
	PSA I	PSA II	PSA III	PSA I	PSA II	PSA III
<i>PSA Purchase Cost (USD)</i>	62.934	7.276.000,000	5.564.200	41.226	8.701.000	2.930.300
<i>Adsorbent Cost (USD)</i>	59,6	6.827,700	7.121,200	57,6529	7.728,3000	4.636,6000
<i>Electricity cost (USD)</i>	22.781	4.514.130	2.433.716	20.653	1.605.750	1.805.330
<i>Compressor Power (watt)</i>	1.380,4	67.645	142.890	3.229,4	74.000	385.450
<i>Blower Power (watt)</i>	4.202,6	959.300	355.590,000	4.180,0000	462.610	355.220
<i>Pump Power (Watt)</i>	19.434	3.930.400	2.174.200	15.271	1.226.800	1.241.900
<i>Surface Area (m<sup>2</sup>)</i>	0,327	3.793,100	3.560,600	28,8265	3.864,2000	2.318,3
<i>Adsorbent Mass (kg)</i>	29,802	67.645	142.890	3.229,4	74.000	385.450
<i>Pressure (atm)</i>	1,574	1,378	1,882	1,3955	1,1630	1,4019

<i>Adsorption Time (s)</i>	32,186	44,977	49,752	30,0000	30,901	30,0000
<i>Length (m)</i>	0,903	1,709	1,405	1,2120	1,4053	1,6905
<i>Diameter (m)</i>	0,778	0,931	0,748	1,0000	0,8862	1,0000



## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Samuel Dian Permana Putra, yang lebih akrab disapa Sammy. Penulis merupakan anak ketiga dari empat bersaudara. Lahir di kota Bandar Jaya pada tanggal 29 Januari 1997 dari ayah bernama Edi Sukamto dan ibu bernama Nengah Suwartini. Adapun penulis menempuh pendidikan tingkat dasar di SD Xaverius Terbanggi Besar pada tahun 2003, kemudian lulus pada tahun 2009. Setelah itu penulis menempuh Pendidikan di SMP Xaverius Terbanggi Besar dan lulus pada tahun 2012, lalu melanjutkan pendidikan di SMA Katolik Santo Albertus Malang dan lulus pada tahun 2015. Pada tahun yang sama penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Departemen Teknik Fisika ITS. Selama aktif menjadi mahasiswa penulis bergabung menjadi anggota Laboratorium Rekayasa Bahan Departemen Teknik Fisika ITS periode 2016-2019. Selain itu penulis juga aktif dalam bidang keilmiah, penulis bergabung dengan Trainer Keilmiah Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika atau disebut “Idjo Creative Crew” periode 2016/2017. Selain aktif dalam kegiatan akademis, penulis juga aktif dalam bidang non akademis dengan mengembangkan minat dalam bidang olahraga dan bergabung dalam keanggotaan UKM Bola Basket ITS sejak tahun 2015 sampai tahun 2019. Penulis juga berperan sebagai Koordinator Pengembangan Atlit di UKM Bola Basket ITS. Penulis mempunyai pengalaman kerja praktik di PT. PJB Paiton selama 2 bulan dan kerja praktik di PT. Great Giant Foods Terbanggi Besar Lampung Tengah selama 1 bulan. Dimana penulis banyak mempelajari mengenai instrumentasi, kontrol dan proses di industri Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi penulis melalui *email*: [samueldianpermanaputra@gmail.com](mailto:samueldianpermanaputra@gmail.com).