

**PENGARUH SISTEM PENYIMPANAN ENERGI  
TERHADAP PENJADWALAN EKONOMIS DAN EMISI  
PADA PEMBANGKIT TERMAL PADA SISTEM KELISTRIKAN**

***THE INFLUENCE OF ENERGY STORAGE SYSTEMS  
ON ECONOMIC EMISSION REDUCTION  
IN POWER THERMAL GENERATION SYSTEMS***



**BASIM THARIQ  
D032181027**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2021**

**PENGARUH SISTEM PENYIMPANAN ENERGI  
TERHADAP PENJADWALAN EKONOMIS DAN EMISI  
PADA PEMBANGKIT TERMAL PADA SISTEM KELISTRIKAN**

**TESIS**

**Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister**

**Program Studi  
Teknik Elektro**

**Disusun dan diajukan oleh**

**BASIM THARIQ**

**Kepada**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2021**

**LEMBAR PENGESAHAN TESIS**

**PENGARUH SISTEM PENYIMPANAN ENERGI TERHADAP  
PENJADWALAN EKONOMIS DAN EMISI PADA  
PEMBANGKIT TERMAL PADA SISTEM KELISTRIKAN**

Disusun dan diajukan oleh

**(BASIM THARIQ)**

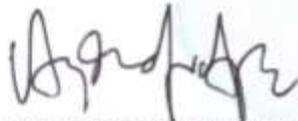
**(D032181027)**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 03 Februari 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



**Ardiaty Arief, ST, MTM, Ph.D**  
NIP. 19780424 200112 2 001



**Prof. DR. Ir. Ansar Suyuti, M.T**  
NIP. 19671231 199202 1 001

Ketua Program Studi,

Dekan Fakultas Teknik,



**Prof. Dr. Eng. Syafaruddin, S.T., M.Eng.**  
Nip. 197405301999031003



**Prof. Dr. Ir. Muh. Arsyad Thaha, M.T.**  
Nip. 196012311986091001

## LEMBAR PENGESAHAN

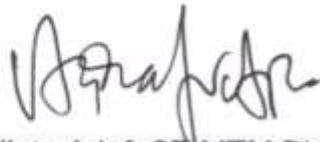
Judul Tesis : Pengaruh Sistem Penyimpanan Energi Terhadap  
Penjadwalan Ekonomis dan Emisi Pada Pembangkit  
Termal Pada Sistem Kelistrikan  
Nama : Basim Thariq  
NIM : D032181027  
Jurusan : Teknik Elektro  
Konsentrasi : Teknik Energi

Diajukan sebagai salah satu syarat akademik pada program  
Pascasarjana Universitas Hasanuddin Makassar.

### Menyetujui

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Ardiaty Arief, ST.MTM.Ph.D  
NIP.19780424 200112 2 001



Prof. DR. Ir. Ansar Suyuti, M.T  
NIP. 19671231 199202 1 001

### Ketua Program Studi



Prof. DR. Eng. Syafaruddin, S.T.,M.Eng  
NIP.19740530 199903 1 003

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Basim Thariq

Nim : D032181027

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulis saya yang berjudul

### **PENGARUH SISTEM PENYIMPANAN ENERGI TERHADAP PENJADWALAN EKONOMIS DAN EMISI PADA PEMBANGKIT TERMAL PADA SISTEM KELISTRIKAN**

Adalah karya tulis saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain. Bahwa Tesis yang saya tulis ini benar benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Tesis ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut

Makassar, 3 Februari 2021

Yang Menyatakan,



METERAI  
TUMPIL  
CM115AEF666275612  
6000  
ENAM RIBURUPIAH

**Basim Thariq**

## ABSTRAK

**BASIM THARIQ. D032181027. “Pengaruh sistem penyimpanan energi terhadap penjadwalan ekonomis dan Emisi pada pembangkit termal pada sistem kelistrikan”. (Pembimbing : Ardiaty Arief dan Ansar Suyuti).**

Pengaruh sistem penyimpanan energi atau *energy storage system* (ESS) terhadap penjadwalan ekonomis memiliki pengaruh ekonomis pada sistem kelistrikan. Tujuan utama sistem penyimpanan energi adalah menyimpan energi dan melepaskan energi pada saat tertentu sehingga dapat diketahui pengaruh ESS pada sistem juga pembangkit termal tidak bekerja lebih besar dan tetap memenuhi permintaan beban. Pada penelitian ini, penjadwalan ekonomis di terapkan pada pembangkit termal dan pada energi terbarukan berupa energi bayu (PLTB) dan ditambahkan sistem penyimpanan energi pada sistem kelistrikan Sulselbar, menggunakan metode *Ant Lion Optimizer* (ALO). Hasil menunjukkan bahwa metode ALO dapat digunakan untuk mendapatkan penjadwalan kerja pembangkit. Kapasitas minimum ESS dapat ditentukan berdasarkan hilangnya produksi energi saat kondisi *intermittent* dari PLTB. Untuk simulasi dengan adanya ESS dilakukan dengan merekayasa pengisian pada ESS dan mengeluarkan energi dari ESS ketika terjadi penurunan kerja dari PLTB. Dengan adanya ESS pada PLTB memberikan dampak terhadap penurunan jumlah emisi yang dihasilkan, juga berdampak pula pada meningkatnya biaya pembangkitan.

Kata Kunci – Penjadwalan Ekonomis, PLTB, Intermittent, Sistem penyimpanan Energi, Sistem pembangkit, ALO, Sistem Kelistrikan Sulselbar.

## ABSTRACT

**BASIM THARIQ. D032181027. “The Influence of Energy Storage Systems on Economic and Emission Reduction in Power thermal Generation Systems. (Pembimbing Ardiaty Arief dan Ansar Suyuti).**

The Influence of Energy Storage Systems on Economic has effect to reduce economic dispatch on electrical system. The main purpose of energy storage system to store energy and release energy at a certain moment and it can be seen the effect of ESS on the system so that the thermal generator does not work overload and still maintain the load demand. In this research, Economic and emission scheduling is applied to thermal plants and renewable energy such as Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) or wind power plants and integrated energy storage system (ESS) on South and West Sulawesi electrical system using Ant Lion Optimizer method (ALO). The result show Ant Lion Optimizer method (ALO) can be used for power generation and energy storage system (ESS) optimization. The minimum ESS capacity can be determined based on the loss of energy production during intermittent conditions of the PLTB. For simulation with ESS, with out carried charging ESS and release energy ESS when there is a decrease in the same power of PLTB. With the integration of ESS to PLTB generation, it has an impact on reducing the amount of emission produced, but also has an impact on increasing the cost of generation.

Keywords – Economic Dispatch, PLTB, intermittent, Energy storage system, Power generation system, ALO, Sulselbar power system

## KATA PENGANTAR

Segala puji selalu dipanjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala Yang Maha Kuasa yang telah memberikan Rahmat, Hidayah, Inayah dan pertolongan-Nya dalam menyelesaikan tesis ini, yang berjudul **“Pengaruh Sistem Penyimpanan Energi Terhadap Penjadwalan Ekonomis Dan Emisi Pada Pembangkit Termal Pada Sistem Kelistrikan”**. Tak lupa pula shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad Shollahu Alai'hi Wa Sallam yang telah menyinari dunia ini dengan keindahan ilmu dan akhlak yang diajarkan kepada seluruh umatnya.

Kami sadari bahwa karya ini tidak mudah untuk diselesaikan tanpa bimbingan, dorongan, dan bantuan dari berbagai pihak. Olehnya, kami haturkan Jazakallah khairan Jaza, wa Barakallu fikum, kepada kedua orang tua, saudara, istri dan anak anak, atas segala bantuannya.

Ucapan terima kasih pun penulis haturkan kepada kepada seluruh pihak, khususnya para pembimbing, Ibu Ardiaty Arief, ST.MTM.Ph.D dan Bapak Prof. DR. Ir. Ansar Suyuti, M.T yang telah meluangkan waktunya kepada penulis untuk membimbing dan berkonsultasi langsung. Juga kepada para tim penguji, Bapak Prof. Dr. Ir H. Salama Manjang, MT., Bapak Dr. Ir. Ikhlas Kitta, ST., MT., dan Ibu Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said, MT., yang telah memberikan masukan masukan untuk kesempurnaan tulisan ini. Penulis pun mengucapkan terima kasih kepada seluruh rekan-rekan

seperjuang di Program Pasca Sarjana Teknik Elektro, terkhusus Teknik Energi angkatan 2018, Semoga keberkahan senantiasa tercerahkan kepada kita semua .

Penulis memohon maaf jika dalam tesis ini masih terdapat banyak kekurangan dan kesalahan. Dengan demikian, penulis tetap mengharapkan saran dan kritik dari para pembaca sekalian serta tetap mengharapkan semoga tulisan ini bisa memberikan manfaat kepada seluruh pihak.

Makassar, Februari 2021

Basim Thariq

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT .....	vii
KATA PENGANTAR .....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang .....	1
B. Rumusan Masalah.....	3
C. Tujuan Penelitian .....	4
D. Manfaat Penelitian.....	4
E. Batasan Penelitian.....	5
F. Sistematika Penulisan.....	5
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA .....	8
A. Sistem Tenaga Listrik .....	8
B. Studi Aliran Daya .....	8
C. Rugi rugi daya jaringan.....	11
D. Penjadwalan Ekonomis .....	12
E. Emisi Pembangkit.....	17
F. Sistem Penyimpanan Energi .....	18
G. Karakteristik Input-Output Pembangkit .....	20
H. Ant Lion Optimizer .....	21

I. Kerangka Pikir.....	26
J. Penelitian Terkait .....	26
BAB III. METODE PENELITIAN.....	29
A. Jenis Penelitian .....	29
B. Waktu dan Lokasi Penelitian .....	29
C. Teknik Pengumpulan Data .....	30
D. Artificial Intelligence <i>Ant Lion Optimizer</i> .....	32
E. Validasi Hasil.....	34
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
A. Hasil Penjadwalan Ekonomis dan Emisi menggunakan metode Ant Lion Optimizer .....	46
1. Penjadwalan menggunakan data IEEE 30 Bus .....	46
2. Hasil Penjadwalan Menggunakan sistem kelistrikan Selselbar .....	47
B. Mengintegrasikan ESS pada sistem Selselbar .....	49
1. Menentukan kapasitas ESS .....	49
2. Menentukan fungsi biaya pada ESS.....	51
C. Hasil Penjadwalan Ekonomis Menggunakan sistem kelistrikan Selselbar integrasi ESS.....	52
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN .....	58
A. KESIMPULAN .....	58
B. SARAN.....	59
DAFTAR PUSTAKA.....	60

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Sistem Tenaga Listrik [8] .....	8
<b>Gambar 2.2</b> Kurva Karakteristik Input-Output Pembangkit Termal .....	14
<b>Gambar 2.3</b> Kurva Kenaikan Input .....	15
<b>Gambar 2.4</b> Kurva Heat Rate Pembangkit Termal .....	15
<b>Gambar 2.5</b> Sistem kelistrikan dengan penyimpanan energi.....	18
<b>Gambar 2.6</b> Klasifikasi dari teknologi penyimpanan energi [7] .....	19
<b>Gambar 2.7</b> Lubang Perangkat semut singa .....	22
<b>Gambar 2.8</b> Model Perangkat semut singa .....	23
Gambar 2.9 Alur kerangka pikir .....	26
Gambar 3.10 Alur Penelitian.....	31
Gambar 3.11 Alur Ant Lion Optimizer .....	33
<b>Gambar 4.1</b> Single line diagram Sistem kelistrikan Sulselbar [1].....	38
<b>Gambar 4.2</b> Grafik Waktu pengisian dan Pelepasan ESS pada sistem ..	52
<b>Gambar 4.3</b> Grafik pengaruh ESS pada penjadwalan ekonomis pembangkit .....	56

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 State of Art Penelitian .....	26
Tabel 4.1 Data bus beban puncak .....	39
Tabel 4.2 Data Saluran transmisi .....	39
Tabel 4.3 Fungsi biaya pembangkit termal .....	40
Tabel 4.4 Data Persamaan Biaya .....	41
Tabel 4.5 Data Output data PLTB Sidrap.....	42
Tabel 4.6 Data batasan daya pembangkit termal.....	43
Tabel 4.7 Faktor Emisi CO2 dari jenis pembangkit tenaga listrik .....	44
Tabel 4.8 Hasil Penjadwalan ekonomis dan emisi pembangkit .....	47
Tabel 4.9 Hasil Penjadwalan ekonomis dan emisi pembangkit integrasi PLTB .....	48
Tabel 4.10 Hasil Penjadwalan ekonomis dan emisi pembangkit dengan ESS (ESS Charging) .....	52
Tabel 4.12 Hasil Penjadwalan ekonomis dan emisi pembangkit dengan ESS (ESS Release).....	52
Tabel 4.13 Hasil Penjadwalan ekonomis dan emisi pembangkit PLTB dan pembangkit termal .....	54
Tabel 4.14 Hasil Penjadwalan ekonomis dan emisi dengan pengaruh ESS pembangkit PLTB dan Pembangkit Termal .....	55

## BAB I

### PENDAHULUAN

#### A. Latar Belakang

Pembangkitan energi listrik sangat memegang peranan penting dalam kehidupan manusia dan berhubungan erat dengan pencemaran udara. Pertambahan penduduk memberikan efek domino yang menyebabkan tingginya permintaan energi listrik sehingga menyumbang bertambahnya kandungan karbon dioksida dari tahun ke tahun. Apabila jumlah pembangkit listrik termal yang pada umumnya berbahan bakar fosil seperti batubara, minyak dan gas bertambah maka emisi karbon dioksida yang terbang ke atmosfer semakin banyak mengakibatkan kerugian pada manusia dan lingkungan sekitarnya. Selain itu dapat menyebabkan *global warming* yang merupakan isu penting banyak negara di dunia yang disebabkan salah satunya oleh karbon dioksida [2]. Kondisi tersebut menyebabkan keharusan suatu pembangkit untuk mengatur penggunaan generator agar tetap ekonomis dan menghasilkan daya yang maksimal juga menghasilkan emisi buang seminimal mungkin sehingga tidak merusak lingkungan.

Global Carbon Project (GCP) mengestimasi emisi karbon dioksida di Indonesia sebanyak 487 juta ton (MtCO<sub>2</sub>) per 2017, meningkat 4,7 persen dari tahun sebelumnya. Pada tahun yang sama, Indonesia menyumbang 1,34 persen dari total emisi CO<sub>2</sub> di dunia sebanyak 36.153

juta ton (MtCO<sub>2</sub>). Pada 2018, peneliti GCP menghitung kenaikan emisi CO<sub>2</sub> sebanyak 2 persen, dibandingkan tahun sebelumnya. Emisi karbon ini terdiri dari pembakaran minyak, produksi semen, dan perubahan tata guna lahan seperti kebakaran hutan atau penggundulan hutan [3].

Penyimpanan energi sekarang juga menjadi bagian penting dari semakin maraknya energi terbarukan. Dengan pertumbuhan besar-besaran sumber energi terbarukan, penyimpanan energi dapat memainkan peran penting dalam integrasi energi terbarukan. Ini bermanfaat terutama pada peningkatan kualitas daya listrik, serta ketergantungan dan stabilitas jaringan yang lebih baik. Dengan demikian, dapat membantu mengurangi bahaya emisi [4].

Salah satu strategi untuk mengurangi besarnya emisi yang dihasilkan pembangkit listrik adalah dengan *economic emission dispatch* (EED). EED merupakan cara untuk melakukan penjadwal pembangkit listrik yang optimal dari suatu unit pembangkit untuk memenuhi beban permintaan dan juga untuk meminimalkan emisi polutan yang dihasilkan oleh unit pembangkit tersebut [5]. Telah banyak penelitian yang dilakukan dalam bidang EED. Terlebih lagi, saat sekarang ini, pembangkit energi terbarukan dan sistem penyimpanan energi telah berkembang sehingga penulis tertarik untuk melakukan penelitian bidang *economic emission dispatch* pada sistem tenaga listrik dengan penyimpanan energi.

Adapun untuk memecahkan masalah *economic emission dispatch* akan di aplikasikan menggunakan algoritma *Ant Lion Optimizer*.

Berdasarkan penelitian terkait, belum ditemukan peneliti yang menggunakan metode ALO dalam membahas pengaruh penyimpanan energi terhadap penjadwalan ekonomis dan emisi pada pembangkit khususnya menggunakan sistem Suselbar. *Ant Lion Optimizer* adalah suatu metode optimasi yang awalnya diusulkan oleh Seyedali Mirjalili [6]. *Ant lions* merupakan keluarga dari *Myrmeleontidae* dan *Neuroptera* (serangga bersayap). Siklus hidup ant lions meliputi dua fase utama: fase larva dan fase dewasa. Umur pada ant lions bisa mencapai 3 tahun, yang sebagian besar terjadi pada larva dan hanya 3–5 minggu untuk fase dewasa. Ant lions mengalami metamorfosis pada kepompong untuk menjadi dewasa. Mereka kebanyakan berburu ketika masih larva dan ketika masa dewasa mereka gunakan untuk reproduksi [6]. Berdasarkan deskripsi diatas penulis tertarik meneliti mengenai pengaruh penyimpanan energi terhadap penjadwalan ekonomis dengan pengendalian emisi pada pembangkit termal menggunakan algoritma *Ant Lion Optimizer*.

## **B. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang ada, didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil penjadwalan ekonomis pembangkit termal dengan menggunakan algoritma *Ant Lion Optimizer*?
2. Bagaimana menentukan kapasitas dan biaya ESS ketika diintegrasikan pada sistem Suselbar ?

3. Bagaimana perbandingan hasil penjadwalan dengan adanya sistem penyimpanan energi pada pada sistem Suselbar ?

### **C. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan latar belakang yang ada, didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Melakukan penjadwalan ekonomis pembangkit termal dengan menggunakan algoritma Ant Lion Optimizer.
2. Menentukan kapasitas dan biaya ESS ketika di integrasikan pada sistem Suselbar
3. Menganalisa perbandingan hasil penjadwalan dengan adanya sistem ESS pada pada sistem Suselbar

### **D. Manfaat Penelitian**

Berdasarkan latar belakang yang ada, didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Memberikan masukan kepada akademisi dan praktisi tentang optimasi pembangkit termal yang diterintegrasikan dengan sistem penyimpanan energi menggunakan salah satu metode optimasi terbaru yang dapat diaplikasikan pada sistem kelistrikan.
2. Menjadi literatur dalam meningkatkan stabilitas dan keandalan sistem tenaga listrik.

3. Menjadi tambahan referensi bagi para mahasiswa yang ingin meneliti pada topik yang serupa

#### **E. Batasan Penelitian**

Adapun batasan-batasan dalam penelitian ini adalah:

1. Penjadwalan ekonomis dan emisi pada sistem kelistrikan yang dikaji pada sistem kelistrikan Sulselbar.
2. Emisi pembangkit yang diperhitungkan adalah Carbon Dioksida (CO<sub>2</sub>)
3. Sistem penyimpanan energi berupa baterai.
4. Metode optimasi yang digunakan adalah *Ant Lion Optimizer*.

#### **F. Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penulisan proposal penelitian ini adalah:

##### **I. PENDAHULUAN**

Bab ini berisi penjelasan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan dari tesis ini.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi terkait penjelasan tentang teori yang digunakan dalam penelitian berkaitan dengan penjadwalan ekonomis emisi pembangkit termal yang menggunakan sistem kelistrikan Sulselbar. Adapun sumber acuan yang digunakan dalam tinjauan pustaka ini adalah buku, jurnal, prosiding, artikel dan tulisan lainnya yang berhubungan dengan judul atau tema penelitian yang dilakukan. Dalam bab ini juga berisi kerangka pemikiran yang merupakan penjelasan tentang menyelesaikan masalah yang diteliti.

## III. METODE PENELITIAN

Bab ini berisi penjelasan tentang lokasi dan waktu penelitian, bagaimanametode pengerjaan tesis ini dilakukan serta langkah-langkah pengerjaan yang dilakukan.

## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi pembahsan dan hasil penelitian pengaruh sistem penyimpanan energi terhadap penjadwalan ekonomis dan emisi pada pembangkit termal pada sistem kelistrikan dimana sistem kelistrikan tersebut di integrasikan dengan PLTB dan ESS menggunakan metode Ant Lion Optimizer (ALO) dan PSO sebagai metode lain dalam komparasi hasil tersebut.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

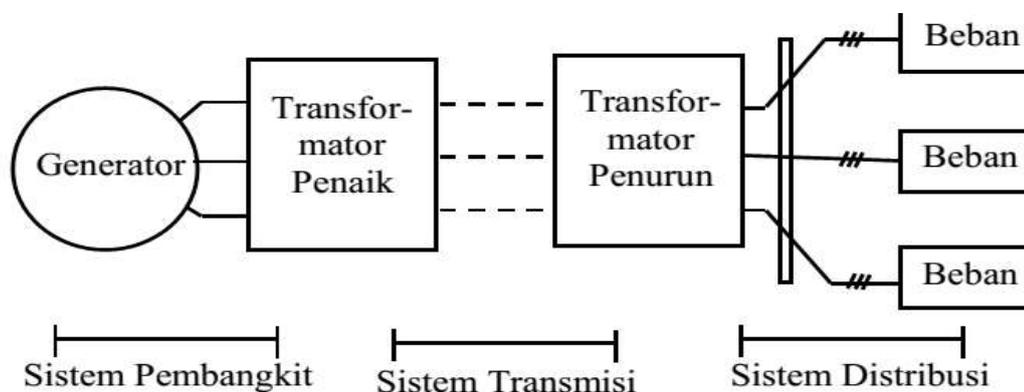
Bab ini berisi kesimpulan dari seluruh isi penelitian dan saran peneliti atas peneliti selanjutnya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### A. Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan sistem yang cukup kompleks dimana terdiri dari pusat pembangkit, saluran transmisi dan jaringan distribusi yang berfungsi untuk mendistribusikan daya listrik dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Untuk memenuhi tujuan operasi sistem tenaga listrik tersebut, ketiga bagian yaitu pembangkit, penyaluran dan distribusi tersebut satu dengan yang lainnya tidak dapat dipisahkan seperti terlihat pada Gambar 2.1 [7]



**Gambar 2.1** Sistem Tenaga Listrik [8]

#### B. Studi Aliran Daya

Studi aliran daya merupakan penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya aktif maupun daya reaktif yang terdapat pada berbagai titik jaringan listrik pada keadaan operasi normal, baik yang

sedang berjalan maupun yang diharapkan akan terjadi di masa yang akan datang [9]. ketika sistem bekerja dalam keadaan tunak (steady state). Studi aliran daya juga mengungkapkan informasi mengenai beban saluran transmisi di sistem, tegangan di setiap lokasi untuk evaluasi regulasi kinerja sistem tenaga dan bertujuan untuk menentukan besarnya daya nyata, daya reaktif diberbagai sistem daya yang dalam keadaan berlangsung atau diharapkan untuk beroperasi secara normal [10].

Studi aliran daya sangat diperlukan dalam perencanaan serta pengembangan sistem di masa-masa yang akan datang karena seiring dengan bertambah tingginya kebutuhan tenaga listrik, maka akan selalu terjadi perubahan beban, penambahan unit-unit pembangkit dan perubahan saluran transmisi [11].

Pada suatu sistem tenaga listrik, terdapat beberapa jenis bus, yaitu :

1. Bus beban. Setiap bus yang tidak memiliki generator disebut sebagai bus beban. Pada bus ini daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) diketahui sehingga sering disebut sebagai bus PQ. Daya aktif dan reaktif yang dicatu ke dalam sistem tenaga bernilai positif sementara daya aktif dan reaktif yang dikonsumsi bernilai negatif. Besaran yang dapat dihitung pada bus ini adalah tegangan (V) dan sudut beban.
2. Bus generator. Bus generator juga disebut sebagai voltage controlled bus karena tegangan pada bus ini selalu dibuat konstan dan bus dimana terdapat generator. Pembangkitan daya aktif dapat

dikendalikan dengan mengatur penggerak mula dan nilai tegangan dikendalikan dengan mengatur eksitasi generator. Sehingga bus ini juga biasa disebut sebagai bus PV. Besaran yang dapat dihitung pada bus ini adalah daya reaktif dan sudut beban.

3. Slack bus. Slack bus atau biasa disebut dengan swing bus. Besaran yang diketahui dari bus ini adalah tegangan dan sudut beban. Suatu sistem tenaga biasanya dirancang memiliki bus ini yang dijadikan sebagai referensi yaitu besaran sudut beban =  $0^{\circ}$ . Besaran yang dapat dihitung dari bus ini adalah daya aktif dan daya reaktif.

Berdasarkan arus kirchoff, maka besaran-besaran impedansi di ubah menjadi besaran admitansi [12]. Hubungan antara besaran tegangan bus dan arus dinyatakan dalam persamaan

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus} \quad (2.1)$$

Persamaan (2.1) dapat dinyatakan dalam bentuk matrik admitansi sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \dots \\ I_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1q} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2p} \\ Y_{31} & Y_{32} & \dots & Y_{3p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{p1} & Y_{p2} & \dots & Y_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \dots \\ V_q \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$Y_{pp}$  = elemen diagonal matrik Y bus pada bus p

$V_q$  = tegangan pada bus q

$I_p$  = arus pada bus p

Adapun persamaan umum arus yang mengalir menuju suatu bus adalah

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q \quad (2.3)$$

### C. Rugi rugi daya jaringan

Rugi-rugi daya adalah besarnya daya yang hilang pada suatu jaringan, yang besarnya sama dengan daya yang disalurkan dari sumber dikurangi besarnya daya yang diterima. Pemilihan jenis kabel yang akan digunakan pada jaringan distribusi merupakan faktor penting yang harus diperhatikan dalam perencanaan dari suatu sistem tenaga listrik. Jenis kabel dengan nilai resistansi yang kecil akan dapat memperkecil rugi-rugi daya [13].

Besar rugi-rugi daya pada jaringan distribusi dapat ditulis sebagai berikut :

$$\Delta P = I^2 \cdot R \quad (2.4)$$

Keterangan :

$\Delta P$  = Rugi daya pada jaringan (watt)

$I$  = Arus beban pada jaringan (amper)

$R$  = Tahanan (ohm)

Adapun rugi-rugi daya pada jaringan tiga fasa dinyatakan oleh persamaan:

$$\Delta P = \sqrt{3} \cdot I^2 \cdot R \quad (2.5)$$

Keterangan

$P$  = daya beban pada ujung penerima saluran

$V$  = tegangan

$\text{Cos } \varphi$  = factor daya beban

Dalam optimasi penjadwalan ekonomis, di butuhkan persamaan quadratic untuk membentuk koefisien rugi-rugi daya pada jaringan. Persamaan koefisien jaringan di persentasikan sebagai koefisien B sebagai berikut

$$P_L = \sum_{i=1}^n \beta_i + P_i \quad (2.6)$$

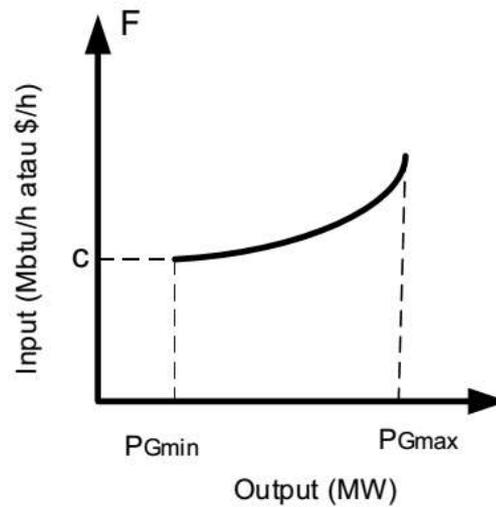
#### **D. Penjadwalan Ekonomis**

Untuk memproduksi tenaga listrik yang semurah mungkin pada suatu sistem tenaga yang semua pembangkitnya terdiri dari pembangkit termal (PLTU, PLTD, PLTG), dibutuhkan penjadwalan ekonomis. Rugi-rugi transmisi, merupakan komponen yang signifikan untuk diperhitungkan, karena mempengaruhi biaya produksi, terutama jika sistem memiliki transmisi yang panjang dengan daya penyaluran yang besar [14]. Pengoperasian pembangkit secara ekonomis dipengaruhi oleh karakteristik pembangkit, batas daya keluaran pembangkit, biaya bahan bakar untuk mengoperasikan pembangkit, dan rugi-rugi transmisi dari pembangkit ke beban.

Pembangkit dengan karakteristik yang kurang fleksibel yaitu pembangkit yang tidak dapat hidup atau padam dalam waktu yang singkat. Selain itu bisa dikatakan lambat dalam proses menaikkan dan menurunkan pembebanan yang mengharuskan pembangkit untuk dioperasikan sepanjang pembangkit sudah siap. Pada pembangkit termal, karakteristik input-output konsumsi bahan bakar pembangkit merupakan dasar penyusun dari fungsi biaya.

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

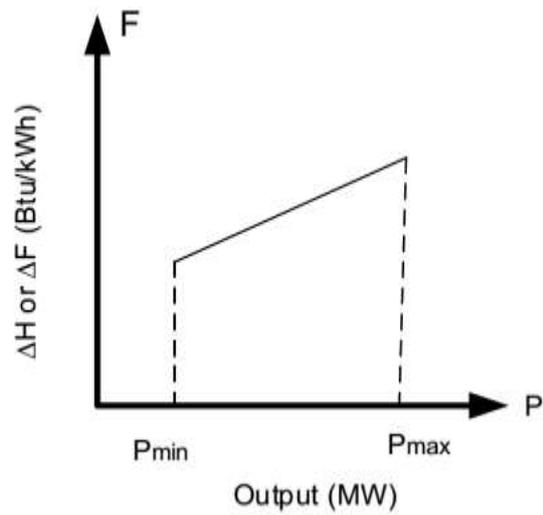
Karakteristik input-output ditulis dalam persamaan yang merupakan pendekatan atau linearisasi dari biaya bahan bakar yang masuk ke generator terhadap daya output generator. Persamaan karakteristik yang diperoleh disebut dengan biaya pembangkitan energi listrik dari sebuah pembangkit. Kurva karakteristik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



**Gambar 2.2** Kurva Karakteristik Input-Output Pembangkit Termal

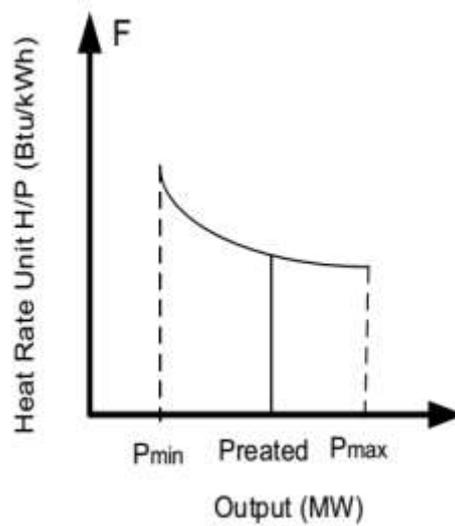
Biaya operasional \$ *per* jam suatu unit terdiri atas biaya operasional dan biaya pemeliharaan. Sehingga biaya pekerja akan dimasukkan sebagai bagian dari biaya operasi pembangkitan jika biaya ini dapat digambarkan secara langsung sebagai fungsi dari *output* unit. *Input* unit dapat diterjemahkan dalam bentuk kebutuhan energi panas (Mbtu/h) atau dalam bentuk biaya total per jam (\$/h).

Sedangkan *output* menunjukkan keluaran daya listrik dari unit tersebut. Karakteristik kenaikan panas dapat dilihat pada Gambar 2.3 *Heat rate* dari suatu pembangkit tidak boleh melebihi dari kapasitas maksimum dari unit pembangkit ( $P_{max}$ ) dan kapasitas minimum dari unit pembangkit ( $P_{min}$ ).



**Gambar 2.3** Kurva Kenaikan Input

Jika melebihi dari batas  $P_{max}$  dan kurang dari  $P_{min}$  maka pembangkit tersebut sudah tidak beroperasi secara aman. Kurva heat rate pada Gambar 2.4 berikut ini.



**Gambar 2.4** Kurva Heat Rate Pembangkit Termal

Setiap unit pembangkit memiliki karakteristik fungsi biaya yang berbeda-beda sesuai dengan jenis bahan bakar dan jenis pembangkit. Bentuk persamaan biaya dari unit generator unit dimodelkan dengan persamaan sebagai berikut [15]

$$C_i P_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (2.7)$$

Keterangan:

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

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

Kombinasi daya output yang dibangkitkan oleh masing-masing generator pada sistem harus memenuhi kebutuhan beban

$$P_i \min \leq P_i \leq P_i \max \quad (2.8)$$

$$\sum P_i = P_D + P_S \quad (2.9)$$

$$Ramp_{,i} (down) \leq P_i (t+1) - P_i \leq Ramp_{,i} (up) \quad (2.10)$$

Keterangan :

$P_i \min, P_i \max$  = Batasan minimum dan maksimum daya pembangkit (MW)

$P_i$	= Daya <i>output</i> pembangkit (MW)
$PD$	= Daya permintaan konsumen (MW)
$Ramp,i$ (down – up)	= Batas <i>ramp rate</i> generator ke $i$ (MW)

## E. Emisi Pembangkit

Batu bara, gas alam, minyak atau kombinasi bahan bakar tersebut digunakan untuk keperluan pembangkit listrik tenaga fosil yang menghasilkan beberapa polutan ke atmosfer yang kuantitasnya tergantung pada bahan bakar yang digunakan dan kualitas bahan bakar yang digunakan. Materit C partikulat seperti abu dan gas polutan karbon dioksida yang dihasilkan oleh pembakaran batu bara dan pada gas alam menghasilkan diantaranya Nitrogen Oksida, Karbon Monoksida, dan lain – lain [4].

Total emisi polutan atmosfer yang disebabkan oleh pengoperasian generator berbahan bakar fosil dapat dinyatakan sebagai berikut [15].

$$E_i P_i = \sum_{i=1}^n \delta_i + \varepsilon_i P_i + \zeta_i P_i^2 \quad (2.11)$$

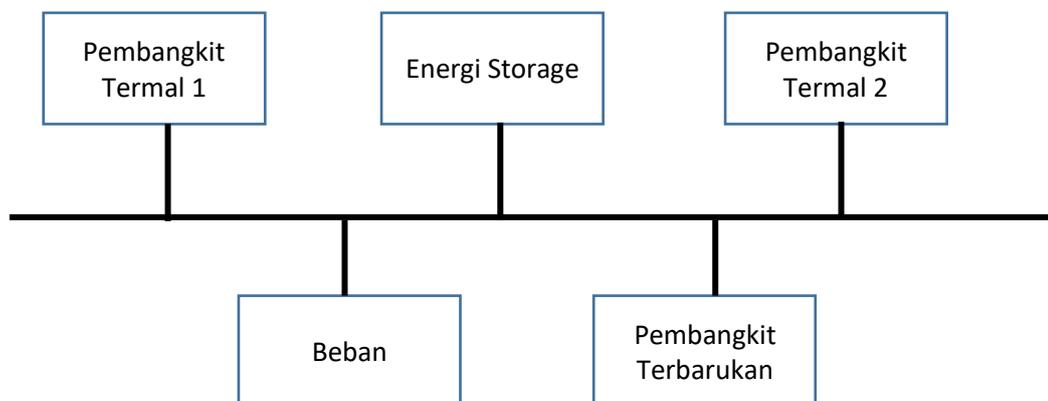
Di mana  $E_T$  adalah total biaya bahan bakar,  $n$  adalah jumlah generator,  $P_i$  adalah keluaran nyata dari generator. sedangkan  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $c$  adalah koefisien biaya dari generator. Oleh karena itu, masalah pengiriman emisi

ekonomi gabungan dirumuskan sebagai masalah optimisasi tunggal sebagai berikut:

$$E_i P_i = \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2) + (\delta_i + \varepsilon_i P_i + \zeta_i P_i^2) \quad (2.12)$$

## F. Sistem Penyimpanan Energi

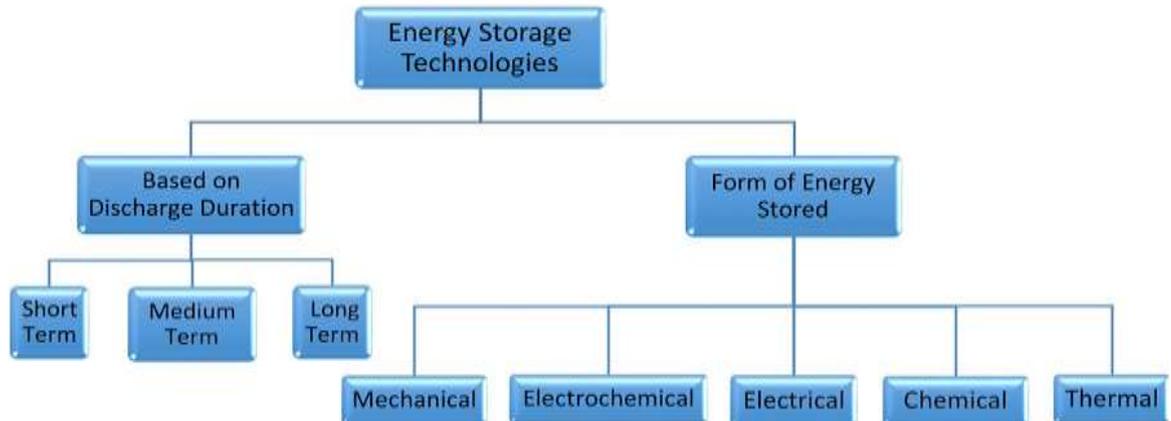
Sistem penyimpanan energi menggabungkan metode yang dengannya listrik yang diimpor dari jaringan listrik, diubah menjadi bentuk yang dapat disimpan, kemudian ketika biaya energi umumnya rendah atau di tengah surplus produksi, diubah kembali menjadi listrik pada permintaan puncak atau ketika dibutuhkan [8].



**Gambar 2.5** Sistem kelistrikan dengan penyimpanan energi

Ada beberapa teknologi yang tersedia untuk menyimpan energi. Teknologi ini sering diklasifikasikan sesuai dengan tujuan penyimpanan energi. Ada berbagai pendekatan yang digunakan untuk mengkategorikan

teknologi penyimpanan energi dengan bentuk penyimpanan energi dan waktu debit penyimpanan.



**Gambar 2.6** Klasifikasi dari teknologi penyimpanan energi [7]

Diantara material teknologi penyimpanan energi adalah Baterai dan kapasitor. Baterai merupakan salah satu piranti elektrokimia yang dapat mengkonversi secara langsung energi kimia menjadi energi listrik. Baterai terdiri dari dua jenis berdasarkan pemakaiannya yaitu baterai primer dan baterai sekunder. Baterai primer adalah baterai yang tidak dapat diisi ulang oleh listrik, sedangkan baterai sekunder adalah baterai dapat diisi ulang [16]. *Battery secondary*, atau baterai yang dapat diisi ulang merupakan bentuk perangkat elektrokimia yang dianggap sebagai yang tertua dalam hal penyimpanan energi listrik. Baterai memiliki ukuran yang telah dapat disesuaikan. Adapaun jenis material baterai di antaranya adalah Lead acid, Lithium ion, Nickel cadmium, Sodium sulphur dan lain-lain [17].

Baterai yang digunakan memiliki koefisien biaya 0.0043\$/kWh [18]. Dengan menggunakan kurs dollar-euro per tanggal 24 April 2016 maka didapatkan koefisien biaya baterai adalah 0.003831 €/kWh. Kapasitas maksimal yang dapat disimpan oleh baterai adalah 300 kWh [2-4, 18]. Baterai ini juga memiliki kapasitas maksimal daya yang dapat di charge discharge sebesar 30 kW. Baterai yang digunakan pada simulasi ini beroperasi pada kemampuan daya maksimal charge-discharge-nya yaitu 30 kW.

Ketika kondisi beban lebih kecil dari total pembangkitan oleh pembangkit energi terbarukan maka daya yang disimpan ke dalam baterai dimodelkan

$$P_{renew} = P_{pv} + P_{wt} \quad (2.13)$$

$$P_{batt} = P_{renew} - \text{Beban} \quad (2.14)$$

dimana  $P_{pv}$  dan  $P_{wt}$  adalah daya terbangkitkan turbin angin (kW),  $P_{renew}$  adalah total daya terbangkitkan oleh pembangkit energi terbarukan (kW), Beban adalah total kebutuhan daya sistem (kW),  $P_{batt}$  adalah daya yang disimpan dalam baterai (kW).

### **G. Karakteristik Input-Output Pembangkit**

Untuk menganalisis permasalahan mengenai operasi dalam sistem tenaga, khususnya masalah operasi ekonomis, diperlukan dasar tentang karakteristik input-ouput dari suatu unit pembangkit termal [19]. Karakteristik input output pembangkit termal adalah karakteristik yang

menggambarkan hubungan antara input bahan bakar (liter/jam) dan output yang dihasilkan oleh pembangkit (MW). Untuk masalah operasi ekonomis, biasanya kurva karakteristik input output pembangkit didekati dengan persamaan polynomial tingkat dua (kuadrat) persamaannya

$$H_i = \alpha_i \beta_i P T_i \gamma_i^2 \quad (2.15)$$

Dimana;

$H$  = biaya pemakaian bahan bakar ( dalam satuan Jam )

$P$  = Daya listrik yang di bangkitkan (MW)

$\alpha, \beta, \gamma$  = konstanta – konstanta

## H. Ant Lion Optimizer

Ant lions merupakan keluarga dari *Myrmeleontidae* dan *Neuroptera* (serangga bersayap). Siklus hidup ant lions meliputi dua fase utama: fase larva dan fase dewasa. Umur pada ant lions bisa mencapai 3 tahun, yang sebagian besar terjadi pada larva dan hanya 3–5 minggu untuk fase dewasa. Ant lions mengalami metamorfosis pada kepompong untuk menjadi dewasa. Mereka kebanyakan berburu ketika masih larva dan ketika masa dewasa mereka gunakan untuk reproduksi [6].

Nama mereka berasal dari perilaku berburu mereka yang unik dan memangsa mangsa. Larva antlion menggali lubang berbentuk kerucut di pasir dengan bergerak di sepanjang jalan melingkar dan membuang pasir

di tepi yang masif. Gambar 2.6 menunjukkan beberapa lubang berbentuk kerucut dengan ukuran berbeda.

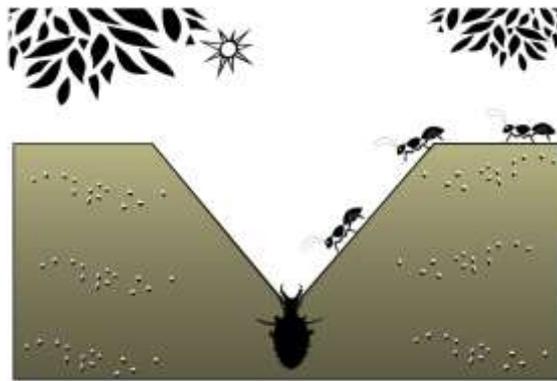
Setelah menggali perangkap, larva bersembunyi di bagian bawah kerucut (sebagai predator duduk dan menunggu) dan menunggu serangga (lebih disukai semut) terperangkap di dalam lubang sebagai diilustrasikan pada Gambar. 2.7. Tepi kerucut cukup terjal sehingga serangga mudah jatuh ke dasar perangkap. Begitu antlion menyadari bahwa mangsa ada dalam perangkap, ia mencoba menangkapnya.

Namun, serangga biasanya tidak langsung ditangkap dan berusaha melarikan diri dari jebakan. Dalam hal ini, antlion dengan cerdas melempar pasir ke arah tepi lubang untuk menggeser mangsa ke bagian bawah lubang. Ketika sebuah mangsa ditangkap ke dalam tepi, ia ditarik ke bawah tanah dan dikonsumsi. Setelah memakan mangsanya, antlion membuang sisa makanan di luar pit dan mengubah pit untuk berburu selanjutnya.



**Gambar 2.7** Lubang Perangkap semut singa

Perilaku menarik lainnya yang telah diamati dalam kehidupan gaya antlions adalah relevansi dengan ukuran perangkap dan ada dua bentuk perangkap; berdasarkan tingkat kelaparan dan bentuk bulan. Antlions cenderung menggali perangkap yang lebih besar karena mereka menjadi lebih lapar dan / atau kapan bulan penuh.



**Gambar 2.8** Model Perangkap semut singa

Mereka telah berevolusi dan beradaptasi dengan cara ini untuk meningkatkan peluang mereka untuk bertahan hidup. Juga telah ditemukan pula sebuah antlion dengan tidak secara langsung mengamati bentuk bulan untuk memutuskan tentang ukuran perangkap, tetapi memiliki jam lunar internal untuk membuat keputusan seperti itu. Inspirasi utama dari algoritma ALO berasal dari perilaku mencari makan larva antlion. Berdasarkan perilaku maka kehidupan antlion dimodelkan secara

matematis. Algoritma optimasi kemudian diusulkan berdasarkan pada model matematika .

Optimasi tersebut digambarkan sebagai berikut:

1. Semut bergerak di sekitar ruang pencarian menggunakan jalan acak yang berbeda beda
2. Jalan-jalan acak diterapkan pada semua dimensi semut
3. Jalan-jalan acak dipengaruhi oleh perangkat antlion
4. Antlions dapat membangun lubang yang proporsional dengan kebugarannya (semakin tinggi kebugaran, lubang yang lebih besar)
5. Antlions dengan lubang yang lebih besar memiliki probabilitas lebih tinggi untuk ditangkap semut
6. Setiap semut dapat ditangkap oleh antlion di setiap iterasi dan elite (antlion terkuat)
7. Rentang berjalan acak dikurangi secara adaptif untuk disimulasikan sliding semut menuju antlions
8. jika seekor semut menjadi lebih bugar dari pada sebuah antlion, ini berarti memang demikian ditangkap dan ditarik di bawah pasir oleh antlion
9. Seekor antlion memindahkan dirinya ke mangsa dan tubuh yang tertangkap terakhir
10. lubang untuk meningkatkan perubahan menangkap mangsa lain setelah masing-masing berburu

## 1. Jalan Acak Pada Semut

Berjalan Acak dari Semut Algoritma ALO meniru interaksi antara semut singa dan semut dalam perangkat. Untuk model interaksi seperti itu, semut diharuskan untuk pindah ruang pencarian dan antlion diizinkan untuk memburu mereka dan menjadi bugar menggunakan perangkat. Karena semut bergerak secara stokastik di alam ketika mencari makanan, maka dibuatkan pemodelan gerakan semut sebagai berikut:

$$X(t) = [0, \text{cums}(2r(t_1) - 1), \text{cums}(2r(t_2) - 1), \dots, \text{cums}(2r(t_n) - 1)] \quad (2.7)$$

Dimana *cums* perhitungan dari penjumlahan cumulatif dan  $r(t)$  didefinisikan sebagai berikut:

$$r(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } rand > 0.5 \\ 0, & \text{if } rand \leq 0.5 \end{cases} \quad (2.16)$$

## 2. Pit Jebakan Semut Singa

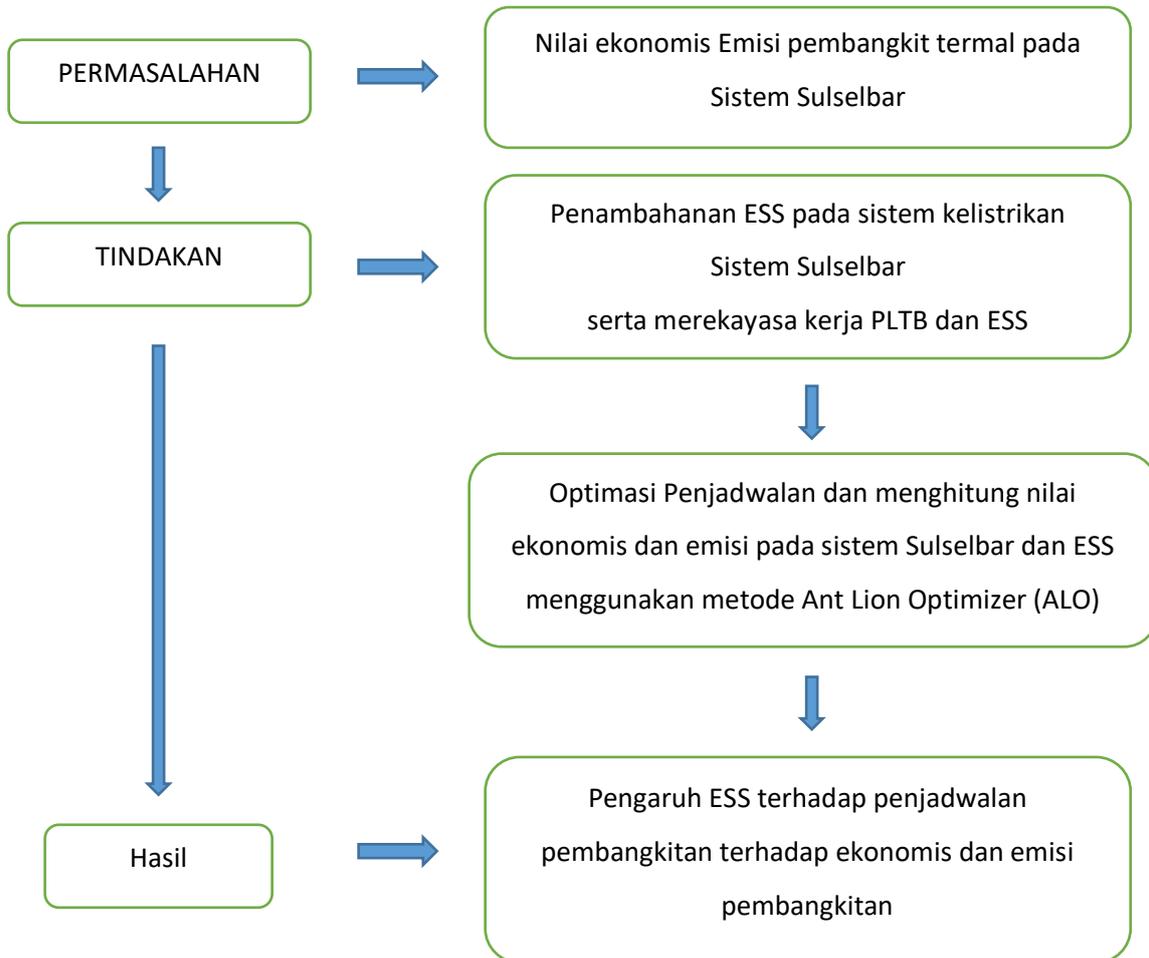
Perhitungan berikut digunakan untuk mempresentasikan model jebakan semut singa

$$c_i^t = Antlion_j^t + c^t \quad (2.17)$$

$$d_i^t = Antlion_j^t + d \quad (2.18)$$

Dimana  $c^t$  adalah variable minimum t,  $d^t$  merupakan vector dari variable maksimum t iterasi. Sedangkan  $c_i^t$  adalah variable minimum I,  $d_i^t$  variable minimum.

## I. Kerangka Pikir



**Gambar 2.9** Alur kerangka pikir

## J. Penelitian Terkait

Adapun peneliti yang terkait dengan penelitian penulis adalah  
Sebagai berikut

**Tabel 2.1** State of Art Penelitian

No	Peneliti	Judul Penelitian	Tahun	Metode	Implementasi	Kesimpulan
1	Basim Thariq	Pengaruh Sistem Penyimpanan Energi Terhadap Penjadwalan Ekonomis Dan Emisi Pada Pembangkit Termal Pada Sistem Kelistrikan	2019	Ant Lion Optimizer (ALO)		
3	Arunachalam Sundaram [20]	solusi dari permasalahan kombinasi ekonomi emisi dengan Valve-point Effect menggunakan Hybrid NSGA IIMOPSO	2018	Hybrid Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II and Multi-objective Particle Swarm Optimization (NSGA II-MOPSO)	Untuk meminimalkan biaya bahan bakar secara simultan dan emisi dari pembangkit listrik untuk memenuhi permintaan daya pada sistem linier dan nonlinier	Pendekatan Hybrid NSGA II-MOPSO lebih efisien fuel cost 1.004% dan pengeluaran emisi yang sama dengan MOPSO
4	Milena Jevtić, Nenad Jovanović, Jordan Radosavljević. [21]	Solving a combined economic emission dispatch problem using adaptive wind driven optimization	2018	the adaptive wind driven optimization (AWDO)	Perubahan dari AWDO mempertunjukkan pada sistem uji IEEE 30-bus standar dengan 6 unit pembangkit dan dengan berbagai sifat kurva biaya	memiliki kinerja yang lebih baik dari pada algoritma lainnya (MSA, PSO, GSA, dan FA) yang disajikan dalam literatur yang sudah ada dalam memecahkan masalah CEED
5	E.S. Ali S.M. Abd Elazim A. Y. Abdelaziz [22]	Ant Lion Optimization Algorithm for optimal location and sizing of renewable distributed generations	2017	Ant Lion Optimizer (ALO)	33 bus dan 66 bus test sistem with Power conservation, Voltage, DG limit constrain	ALO telah berhasil diimplementasikan dengan LSF untuk optimalisasi lokasi dan ukuran sumber energi terbarukan berbasis DG di berbagai sistem distribusi
6	Michael Ross Chad Abbey Francois Bouffard [23]	Microgrid Economic Dispatch with Energi	2016	algoritma backcasting untuk memperkirakan	untuk menentukan pengiriman daya yang sesuai dari	Hasil menunjukkan bahwa algoritma backcasting

		Storage Systems		nilai energi tersimpan bersih, terhadap biaya energi saat ini dibandingkan untuk menentukan bagaimana sistem penyimpanan harus digunakan.	sistem penyimpanan energi, dari energi yang tersedia tergantung pada pola pengisian / pemakaian dari periode waktu sebelumnya.	mampu untuk mengurangi biaya energi rata-rata sebesar 8,14% dan dapat mengurangi biaya energi rata-rata hingga 72,3% dari pengurangan ideal,
7	Faseela C. K. H. Vennila [24]	Economic and Emission Dispatch using Whale Optimization Algorithm (WOA)	2018	Whale Optimization Algorithm (WOA)	Algoritma yang diusulkan menghasilkan hasil optimal atau mendekati solusi yang optimal. Biaya bahan bakar dan biaya emisi dipertimbangkan bersama untuk menjadi lebih baik.	WOA dan memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan PSO.
8	Navpreet Singh Tung Sandeep Chakravorty [25]	Ant Lion Optimizer based Approach for Optimal Scheduling of Termal Units for Small Scale Electrical Economic Power Dispatch Problem	2016	Ant Lion Optimizer (ALO)	Studi kasus ini diuji dengan menggunakan 3 pembangkit dan 6 pembangkit termal.	Hasil pengujian menyimpulkan dapat meminimalisir biaya operasional Metode telah di uji dengan teknik lain yang disajikan dalam literatur. Teknik ini lebih unggul dari pada teknik lain yang disajikan dalam