

# TESIS

## STUDI OPTIMASI PENEMPATAN DAN UKURAN SISTEM PENYIMPANAN ENERGI BATERAI PADA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TERINTEGRASI TURBIN ANGIN MENGUNAKAN AI METAHEURISTIK

*Study of Optimal Allocation and Sizing of Battery Energy Storage  
Systems in Wind Turbine Integrated Power Generating Systems  
Using Metaheuristic AI*

SRI WAHYUNI  
D032221010



PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024



Optimized using  
trial version  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)

## **PENGAJUAN TESIS**

# **STUDI OPTIMASI PENEMPATAN DAN UKURAN SISTEM PENYIMPANAN ENERGI BATERAI PADA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TERINTEGRASI TURBIN ANGIN MENGUNAKAN AI METAHEURISTIK**

Tesis  
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister  
Program Studi Ilmu Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

**SRI WAHYUNI  
D032221010**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024**



# TESIS

## STUDI OPTIMASI PENEMPATAN DAN UKURAN SISTEM PENYIMPANAN ENERGI BATERAI PADA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TERINTEGRASI TURBIN ANGIN MENGUNAKAN AI METAHEURISTIK

**SRI WAHYUNI**  
**D032221010**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada Tanggal 18 September 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Prof. Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, ST., MT.  
NIP. 19731118 199803 1 001

Pembimbing Pendamping



Dr. Ir. Hj. Zaenab, MT.  
NIP. 19660201 199202 2 002

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



hammad Isran Ramli, ST., MT., IPM., ASEAN Eng.  
NIP. 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi S2  
Teknik Elektro



Dr. Eng. Ir. Wardi, ST., M. Eng.  
NIP. 19720828 199903 1 003



## KATA PENGANTAR

Segala puji kita panjatkan kehadirat Allah SWT atas berkah dan rahmat-Nya sehingga penelitian dengan judul **“Studi Optimasi Penempatan dan Ukuran Sistem Penyimpanan Energi Baterai pada Sistem Pembangkit Listrik Terintegrasi Turbin Angin Menggunakan AI Metaheuristik”** dapat diselesaikan.

Penulis menyadari bahwa banyak kendala yang dihadapi dalam menyelesaikan tesis ini, namun berkat dukungan, bimbingan dan bantuan berbagai pihak sehingga penyusunan tesis ini dapat terselesaikan dengan baik. Penyusunan tesis ini juga tidak terlepas dari bantuan, doa, dorongan, semangat serta bimbingan dari berbagai pihak. Tanpa menghilangkan rasa hormat, kami ucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tesis ini, antara lain:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, ST., MT. selaku dosen pembimbing I dan Ibu Dr. Ir. Hj. Zaenab Muslimin, MT. selaku dosen pembimbing II, terima kasih telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan, gagasan serta ide-ide dalam penyelesaian tesis ini
2. Bapak Dr. Ir. Yustinus Sombolayuk, MT. dan bapak Dr. Ir. Yusran, ST., MT. selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan kritik serta saran yang sifatnya membangun dalam penyusunan tesis ini.
3. Bapak Dr. Eng. Ir. Wardi, ST., M.Eng. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro dan selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan masukan serta kritik dan saran guna penyempurnaan tesis ini.
4. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT., IPM., ASEAN Eng. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.
5. Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc. selaku Rektor Universitas Hasanuddin Makassar.
6. Bapak H. Burhanuddin dan Ibu Hj. I Suara selaku kedua orang tua yang tak henti-hentinya mendoakan dan memberikan dukungan baik moral maupun materiil kepada penulis hingga tahap penyelesaian tesis ini.



7. Teman-teman seperjuangan IPMI Sidrap Cab. Tellu Limpoe yang penulis anggap sebagai saudara. Terima kasih atas kebersamaan, kerjasama, saran dan dukungan yang diberikan.

Walaupun dalam penyusunannya, penulis telah berusaha dengan maksimal, namun jika masih ada kekurangan dari segi pengetikan maupun dari segi isi mohon kritik dan saran, demi penyusunan selanjutnya agar lebih baik lagi. Semoga tesis ini dapat menjadi suatu kontribusi bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Gowa, 15 September 2024

Yang menyatakan,



Sri Wahyuni



## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Sri Wahyuni  
Nomor mahasiswa : D032221010  
Program studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Studi Optimasi Penempatan dan Ukuran Sistem Penyimpanan Energi Baterai pada Sistem Pembangkit Listrik Terintegrasi Turbin Angin Menggunakan AI Metaheuristik” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing ( Prof. Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, ST., MT. sebagai Pembimbing Utama dan Dr. Ir. Hj. Zaenab, MT. sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Prosiding 25th International Seminar on Intelligent Technology and its Application (ISITIA 2024) sebagai artikel dengan judul “Study of Optimal Allocation and Sizing of Battery Energy Storage Systems in Wind Turbine Integrated Power Generating Systems Using Metaheuristic AI”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 15 September 2024  
Yang menyatakan

  
METERAI TEMPEL  
Sri Wahyuni  
10000  
SEKELUH RIBU RUPIAH  
9E2ALX397179370



## ABSTRAK

**SRI WAHYUNI.** *Studi Optimasi Penempatan dan Ukuran Sistem Penyimpanan Energi Baterai pada Sistem Pembangkit Listrik Terintegrasi Turbin Angin Menggunakan AI Metaheuristik* (dibimbing oleh **Indar Chaerah Gunadin, Zaenab Muslimin**)

Daya keluar pembangkit listrik tenaga angin bersifat intermitten, menyebabkan fluktuasi yang dapat menimbulkan masalah dalam pengoperasian. Untuk mengatasi masalah ini, sistem penyimpanan energi baterai dipasang untuk menstabilkan pasokan daya ke jaringan. Namun, lokasi dan ukuran sistem penyimpanan energi harus direncanakan secara optimal untuk memaksimalkan manfaatnya. Untuk itu, digunakan metode *Galactic Swarm Optimization* (GSO) untuk menentukan lokasi dan ukuran sistem penyimpanan energi baterai yang optimal dalam sistem tenaga listrik, dengan tujuan meminimalkan total rugi-rugi daya. Simulasi dilakukan menggunakan program MATLAB dengan beberapa skenario pada sistem ketenagalistrikan Sulbagsel. Skenario pertama dengan daya keluaran pembangkit listrik tenaga angin di Sidrap 39,02 MW dan Jeneponto 75,6 MW, skenario kedua dengan daya keluaran pembangkit listrik tenaga angin di Sidrap 7,23 MW dan Jeneponto 30,6 MW, dan skenario ketiga dengan daya keluaran pembangkit listrik tenaga angin di Sidrap 24,3 MW dan Jeneponto 49,8 MW. Setiap skenario dilakukan dengan tiga simulasi yaitu menggunakan satu, dua, dan tiga sistem penyimpanan energi baterai. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengurangan rugi-rugi daya paling signifikan terjadi pada pemasangan tiga sistem penyimpanan energi baterai pada bus 2, 19 dan 60 dengan ukuran 9,6577 MWh, 8,3117 MWh, dan 9,7842 MWh yang dapat mereduksi rugi-rugi daya sebesar 0,0023% .

**Kata kunci** : Pembangkit listrik tenaga angin, sistem penyimpanan energi baterai, *galactic swarm optimization*, ukuran optimal, lokasi optimal.



## ABSTRACT

**SRI WAHYUNI.** *Study of Optimal Allocation and Sizing of Battery Energy Storage Systems in Wind Turbine Integrated Power Generating Systems Using Metaheuristic AI* (supervised by **Indar Chaerah Gunadin, Zaenab Muslimin**)

The output of intermittent wind turbine plants causes fluctuations that can create operational issues. To address this, battery energy storage systems are installed to stabilize the power supply to the grid. However, the location and size of the energy storage systems must be optimally planned to maximize their benefits. To achieve this, the Galactic Swarm Optimization (GSO) method is used to determine the optimal location and size of the battery energy storage systems in the power grid, with the aim of minimizing total power losses. Simulations were conducted using MATLAB with several scenarios on the Sulbagesel power system. The first scenario had output from Sidrap Wind Power Plant at 39.02 MW and Jeneponto at 75.6 MW, the second scenario had Sidrap at 7.23 MW and Jeneponto at 30.6 MW, and the third scenario had Sidrap at 24.3 MW and Jeneponto at 49.8 MW. Each scenario was tested with one, two, and three battery energy storage systems. The simulation results showed that the most significant reduction in power losses occurred with the installation of three battery storage systems at buses 2, 19, and 60 with sizes of 9.6577 MWh, 8.3117 MWh, and 9.7842 MWh, respectively, reducing power losses by 0.0023%.

**Keywords :** Wind turbine, Battery energy storage systems, Galactic swarm optimization, Optimal size, Optimal location.



## DAFTAR ISI

	HALAMAN
<b>SAMPUL TESIS .....</b>	<b>i</b>
<b>PENGAJUAN TESIS .....</b>	<b>ii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN .....</b>	<b>xiv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah .....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Sistem Tenaga Listrik .....	5
2.2 Sistem Pembangkit Tenaga Listrik .....	5
2.3 Energi Angin.....	6
2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Angin.....	9
2.5 Energi Mekanik.....	11
2.6 Analisis Aliran Daya.....	11
2.7 Sistem Penyimpanan Energi.....	13
2.8 Baterai.....	15
2.9 Metaheuristik .....	16
Algoritma <i>Galactic Swarm Optimization</i> (GSO) .....	17
Penelitian Terkait yang Terdahulu.....	22
Hubungan Antara Variabel Sebab dan Variabel Akibat.....	25



<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>31</b>
3.1 Jenis Penelitian.....	31
3.2 Alat dan Bahan.....	31
3.3 Data sistem Ketenagalistrikan Sulbagsel .....	31
3.4 Waktu dan Lokasi Penelitian .....	36
3.5 Diagram Alir .....	37
<b>BAB IV PEMBAHASAN .....</b>	<b>42</b>
4.1 Simulasi Aliran Daya.....	42
4.2 Penentuan Lokasi dan Ukuran Penyimpanan Energi Baterai .....	48
4.3 Simulasi Pemasangan Sistem Penyimpanan Energi Baterai .....	49
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>53</b>
5.1 Kesimpulan .....	53
5.2 Saran.....	53
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>54</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>57</b>



## DAFTAR GAMBAR

<b>Nomor</b>		<b>Halaman</b>
<b>Gambar 1</b>	Data rata-rata kecepatan angin perhari pada pembangkit listrik tenaga angin di Sidrap .....	10
<b>Gambar 2</b>	Data rata-rata kecepatan angin perhari pada pembangkit listrik tenaga angin di Jeneponto.....	10
<b>Gambar 3</b>	Diagram alir <i>Galactic Swarm Optimization (GSO)</i> .....	21
<b>Gambar 4</b>	Kerangka konsep .....	25
<b>Gambar 5</b>	Diagram alir penelitian .....	37
<b>Gambar 6</b>	Diagram alir penentuan lokasi sistem penyimpanan energi baterai yang optimal.....	38
<b>Gambar 7</b>	Diagram alir penentuan ukuran sistem penyimpanan energi baterai yang optimal.....	39
<b>Gambar 8</b>	Perbandingan tegangan sebelum dan setelah pemasangan sistem penyimpanan energi baterai .....	52



## DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
<b>Tabel 1</b> Kecepatan angin berdasarkan keadaan alam .....	6
<b>Tabel 2</b> Penelitian terkait yang terdahulu .....	22
<b>Tabel 3</b> Hubungan antar variabel pada penelitian terdahulu .....	29
<b>Tabel 4</b> Data bus sistem ketenagalistrikan Sulbagsel .....	32
<b>Tabel 5</b> Data line sistem ketenagalistrikan Sulbagsel.....	34
<b>Tabel 6</b> Hasil simulasi aliran daya sebelum pemasangan sistem penyimpanan energi baterai .....	42
<b>Tabel 7</b> Rugi-rugi daya pada sistem ketenagalistrikan Sulbagel sebelum pemasangan sistem penyimpanan energi baterai.....	45
<b>Tabel 8</b> Hasil simulasi optimasi lokasi dan ukuran sistem penyimpanan energi baterai yang optimal .....	48
<b>Tabel 9</b> Hasil simulasi optimasi penempatan sistem penyimpanan energi baterai skenario 1.....	49
<b>Tabel 10</b> Hasil simulasi optimasi penempatan sistem penyimpanan energi baterai skenario 2.....	50
<b>Tabel 11</b> Hasil simulasi optimasi penempatan sistem penyimpanan energi baterai skenario 3.....	51



## DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Halaman
<b>Lampiran 1</b> Data tegangan dan arus saluran transmisi sistem Sulbagsel .....	57
<b>Lampiran 2</b> Data impedansi saluran transmisi sistem Sulbagsel.....	50
<b>Lampiran 3</b> Instruksi program <i>Galactic Swarm Optimization</i> (GSO) pada Matlab.....	63



## DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang / Singkatan	Arti dan keterangan
GSO	= Galactic Swarm Optimization
BESS	= Battery Energy Storage System
ESS	= Energy Storage System
PLF	= Probabilistic Power Flow
MOPSO	= Multi Objective Hybrid Particle Swarm Optimization
NSGA	= Non dominated Sorting Genetic Algorithm
MW	= Megawatt
MWh	= Megawatt Hours
SCUC	= Stochastic Security Constrained Unit Commitment
kW	= Kilowatt
kV	= Kilovolt
PLTU	= Pembangkit Listrik Tenaga Uap
PLTGU	= Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap
PSO	= Particle Swarm Optimization
MATLAB	= Matrix Laboratory
PLTA	= Pembangkit Listrik Tenaga Air
PLTS	= Pembangkit Listrik Tenaga Surya
PLTD	= Pembangkit Listrik Tenaga Diesel
GA	= Genetic Algorithm
ACO	= Ant Colony Optimization
ABC	= Artificial Bee Colony
SSA	= Salp Swarm Algorithm
WOA	= Whale Optimization Algorithm
COA	= Coyote Optimization Algorithm
PV	= Fotovoltaik
WT	= Wind Turbin
ur	= Mega Volt Ampere Reaktif
ugsel	= Sulawesi Bagian Selatan
	= Firefly Algorithm



# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Konsumsi energi yang semakin hari meningkat, perubahan iklim global yang terkait dengan masalah pencemaran lingkungan dan pengurangan energi fosil, minat terhadap sumber energi terbarukan seperti tenaga angin telah meningkat (Ahmada, dkk., 2020). Sebagai sumber energi intermitten, tenaga angin merupakan sumber daya variabel yang berfluktuasi dengan kondisi cuaca saat ini. Oleh karena itu, tenaga angin yang berfluktuasi membawa serangkaian masalah dalam pengoperasiannya (Cao, dkk., 2020). Hal ini dapat menyebabkan kualitas daya listrik yang dihasilkan menurun. Penurunan kualitas daya listrik bisa disebabkan oleh frekuensi yang tidak stabil pada sistem tenaga listrik, yang terjadi akibat perubahan beban dan menyebabkan sistem beroperasi secara tidak stabil. Menurut data PT. PLN PERSERO bahwa dalam upaya memitigasi potensi frekuensi sistem yang tidak stabil akibat permintaan beban yang semakin meningkat dan juga yang menjadi tantangan pada kualitas daya adalah masuknya pembangkit intermitten dimana daya yang dihasilkan tidak konstan yang akan mempengaruhi kestabilan sistem. Oleh karena itu, sifat tenaga angin yang intermitten membutuhkan cadangan yang lebih tinggi dalam sistem tenaga untuk memuluskan fluktuasi daya yang tidak dapat diprediksi (Moghaddam, dkk., 2018).

Salah satu solusi terbaik untuk memfasilitasi integrasi tenaga angin adalah pemasangan sistem penyimpanan energi (Ahmada, dkk., 2020). Di antara berbagai jenis penyimpanan energi, *Battery energy storage system* (BESS) atau sistem penyimpanan energi baterai lebih tepat untuk menampung penetrasi tenaga angin yang tinggi baik dari segi kekuatan maupun densitas energinya (Bai, dkk., 2016). Sistem penyimpanan energi baterai dapat mencapai transfer energi spasial dan temporal, dan diharapkan dapat digunakan secara luas di ladang angin karena memiliki kecepatan respons yang lebih cepat (li, Dexin, dkk., 2020). Namun, lokasi dan ukuran sistem penyimpanan energi harus direncanakan secara optimal untuk manfaat maksimal (Al Ahmad, dkk., 2020).



Sistem penyimpanan energi baterai berfungsi untuk menstabilkan frekuensi, menjaga perubahan frekuensi akibat fluktuasi dari pembangkit energi terbarukan. Jika frekuensi diukur, frekuensi disemua sistem itu sama, sehingga dimana pun dipasang sistem penyimpanan energi baterai akan menimbulkan efek yang sama karena akan menyeimbangkan daya. Namun, pemasangan sistem penyimpanan energi baterai pada titik tertentu mempengaruhi *load flow*, yang berhubungan dengan rugi-rugi daya (*losses*). Penentuan lokasi dan ukuran optimal sistem penyimpanan energi baterai agar dampaknya terhadap sistem menguntungkan yang dapat mengurangi rugi-rugi daya, meskipun pengaruhnya terhadap frekuensi tetap sama. Tujuannya adalah mengurangi kerugian energi semaksimal mungkin berdasarkan penempatan dan ukuran sistem penyimpanan energi baterai.

Terdapat beberapa penelitian yang mengangkat tema optimasi penempatan dan ukuran sistem penyimpan energi baterai terintegrasi tenaga angin. Penulis di (Ahmada, dkk., 2020) telah mengusulkan model untuk penempatan optimal *Energy Storage System* (ESS) atau sistem penyimpana energi pada pembangkit listrik tenaga angin yang bertujuan peningkatan keandalan dan meminimalkan rugi-rugi daya, dengan menggabungkan metode *Probabilistic Power Flow* (PLF) baru dengan *Multi- Objective Hybrid Particle Swarm Optimization* (MOPSO) dan *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGAI) diperoleh hasil bahwa metode yang digunakan unggul dalam meminimalkan rugi-rugi daya, memperbaiki faktor daya dibandingkan dengan PLF MOFSO dan PLF NSGAI. Adapun dalam (Habibi, dkk., 2018) mengusulkan sebuah model berdasarkan masalah *Stochastic Security Constrained Unit Commitment* (SCUC) untuk menemukan lokasi dan ukuran unit sistem penyimpanan energi yang optimal. Hasilnya menunjukkan efektivitas kerangka kerja dan membuktikan bahwa sistem penyimpanan energi yang ditempatkan bekerja pada tingkat tinggi pada jam operasi yang berbeda.

Berdasarkan uraian tersebut mendorong peneliti untuk melakukan penelitian dengan judul “**Studi Optimasi Penempatan dan Ukuran Sistem Penyimpanan Energi Baterai pada Sistem Pembangkit Listrik Terintegrasi Turbin Angin** menggunakan AI Metaheuristik”.



*Galactic Swarm Optimization* (GSO) Adalah algoritma yang menarik inspirasi dari pergerakan bintang di dalam galaksi dan gerakan gugus dan super gugus galaksi. Metode *Galactic Swarm Optimization* (GSO) digunakan karena meningkatkan efisiensi dan kemanjuran dari algoritma tertanam dengan menyediakan beberapa siklus eksplorasi dan eksploitasi. (Muthiah-Nakarajan, dkk., 2015).

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

- a. Bagaimana menerapkan metode *Galactic Swarm Optimization* (GSO) untuk penempatan lokasi dan ukuran sistem penyimpanan energi baterai yang optimal ?
- b. Bagaimana mengoptimalkan penempatan lokasi dan ukuran sistem penyimpanan energi baterai untuk meminimalkan rugi-rugi daya dalam sistem pembangkit listrik tenaga angin dengan menggunakan metode *Galactic Swarm Optimization* (GSO) ?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian optimasi penentuan lokasi penempatan dan ukuran sistem penyimpanan energi baterai menggunakan *Galactic Swarm Optimization* :

- a. Untuk menentukan lokasi dan ukuran sistem penyimpanan energi baterai menggunakan metode *Galactic Swarm Optimization* (GSO).
- b. Mengoptimalkan penempatan lokasi dan ukuran sistem penyimpan energi baterai untuk meminimalkan rugi-rugi daya dalam sistem pembangkit listrik tenaga angin menggunakan metode *Galactic Swarm Optimization* (GSO).

## 1.4 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan masalah dalam penelitian ini, maka perlu diberi batasan-batasan sebagai berikut :

Fungsi objektif dari optimasi yang dilakukan adalah mencari lokasi dan ukuran yang optimal pada sistem penyimpanan energi baterai agar dapat meminimalkan rugi-rugi daya pada sistem pembangkit listrik.



- b. Metode yang digunakan adalah *Galactic Swarm Optimization* (GSO).
- c. Metode aliran daya yang digunakan pada penelitian ini adalah metode *Newton Raphson*.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut:

- a. Dapat menjadi pertimbangan bagi pihak pengembang sistem pembangkit listrik tenaga angin yang terhubung dengan sistem penyimpanan energi baterai untuk dapat menggunakan metode yang diusulkan dan digunakan baik dalam perencanaan maupun pengembangan sistem pembangkit listrik tenaga angin kedepan.
- b. Menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya yang berhubungan dengan optimasi penentuan penempatan dan ukuran sistem penyimpanan energi baterai pada sistem pembangkit listrik tenaga angin.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik terdiri dari tiga sub sistem, yaitu sistem pembangkit tenaga, sistem penyaluran dan instalasi pengguna listrik. Sistem pembangkit digunakan untuk menghasilkan energi listrik dengan mengubah energi primer seperti batu bara, bahan bakar minyak bumi, panas bumi, pembangkit listrik tenaga air, energi matahari, angin, dan lain-lain. Di dalam sistem tenaga listrik dengan kapasitas cukup besar sistem pembangkitannya adalah sistem pembangkitan dengan menggunakan generator sinkron. Sistem penyaluran berfungsi untuk meyalurkan tenaga listrik yang dibangkitkan dari sistem pembangkit ke sistem instalasi pengguna tenaga listrik. Sistem penyaluran dibagi menjadi dua, yaitu sistem transmisi dan distribusi (Hasanah, dkk., 2015).

### 2.2 Sistem Pembangkit Tenaga Listrik

Sistem pembangkit berfungsi untuk membangkitkan tenaga listrik dengan cara mengkonversi energi primer seperti batu bara, bahan bakar minyak, panas bumi, tenaga air, tenaga surya, tenaga angin, dan lain-lain. Dalam sistem tenaga listrik dengan kapasitas yang cukup besar sistem pembangkitnya merupakan sistem pembangkit dengan menggunakan generator sinkron. Sistem pembangkit ditinjau dari jenis energi primernya dapat digolongkan menjadi 2 yaitu :

- a. Pembangkit dengan energi primer tak terbarukan. Energi Primer tak terbarukan merupakan bahan bakar fosil. (*Non renewable*) seperti : Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU), Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), dan lain-lain.
- b. Pembangkit dengan energi primer terbarukan. (*Renewable*), seperti: Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), dan lain-lain. Sehubungan dengan bahan bakar fosil di Indonesia semakin menipis, untuk itu Pemerintah Indonesia merencanakan penggunaan energi primer terbarukan untuk meningkatkan penggunaan



energi primer yang terbarukan yang masih berpotensi untuk dikembangkan, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Thermal dengan menggunakan *biofuel*, PLTP, PLTS, PLTB, dan lain-lain (Hasanah, dkk., 2015).

### 2.3 Energi Angin

Angin merupakan fenomena alam yang timbul karena adanya perbedaan antara tekanan udara dari suatu wilayah ke wilayah lainnya. Perbedaan suhu udara dari tekanan udara ini juga berkaitan dengan panas matahari yang diterima oleh daerah tersebut. Keberadaan angin tidak dapat dihindari dalam kehidupan sehari-hari. Untuk itu, angin merupakan salah satu sumber energi yang dihasilkan dari sumber daya energi yang berkelanjutan jika diolah dengan baik dan dikategorikan masuk dalam sumber energi terbarukan. Sebagai energi terbarukan dengan waktu pengembangan dan aplikasi terlama dan kapasitas terpasang terbesar, tenaga angin telah menjadi objek pengembangan energi baru yang paling penting di dunia dan telah secara aktif dimasukkan ke dalam pemanfaatan komersial (Zhang, dkk., 2019). Syarat kecepatan angin menjadi faktor yang mempengaruhi putaran turbin sehingga kondisi angin sangat menentukan untuk bisa dikonversi menjadi energi listrik, kondisi angin dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1** Kecepatan angin berdasarkan keadaan alam (Habibie, dkk., 2011)  
**Tingkat kecepatan angin 10 meter di atas permukaan tanah**

Kelas	Kecepatan (m/s)	Kondisi
1	0,00 – 0,2	-
2	0,3 – 1,5	Angin lebih tenang, jika ada asap maka gerakannya lurus ke atas
3	1,6 – 3,3	Pergerakan asap mengikuti arah angin
4	3,4 – 5,4	Wajah dapat merasakan angin, daun-daun bergerak perlahan, alat penunjuk mata angin dapat bergerak
5	5,5 – 7,9	Debu dijalan dan kertas dapat beterbangan, ranting-ranting pohon bergerak
6	8,0 – 10,7	Bendera pada tiang dapat berkibar-kibar
7	10,8 – 13,8	Air yang terdapat pada kolam akan berombak kecil dan ranting pohon besar bisa bergoyang
8	13,9 – 17,1	Telinga akan merasakan hembusan angin, terjadi lengkungan pada ujung pohon
	17,2 – 20,7	Ranting pohon dapat patah dan ketika berjalan langkah menjadi berat ketika melawan arah angin
	20,8 – 24,4	Dapat merubuhkan rumah dan ranting pohon patah



Lanjutan Tabel 1

Tingkat kecepatan angin 10 meter di atas permukaan tanah		
Kelas	Kecepatan (m/s)	Kondisi
11	24,5 – 28,4	Pohon dapat tumbang dan dapat mengakibatkan kerusakan
12	28,5 – 32,6	Kerusakan parah dapat terjadi
13	32,7 – 36,9	Menghasilkan angin tornado

Berdasarkan Tabel 1 kita dapat melihat dampak dari kecepatan angin sehingga tidak semua kelas kecepatan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi pembangkit listrik. Dan sampai saat ini kecepatan angin yang dapat dimanfaatkan yaitu kelas no 3 sampai 8 (Habibie, dkk., 2011).

Pada umumnya kecepatan angin tertinggi ditemukan dipuncak bukit, pantai terbuka, dan di laut. Parameter kecepatan angin juga perlu diketahui antara lain kecepatan angin rata-rata, data arah, variasi rata-rata jangka pendek (hembusan), variasi harian, musiman dan tahunan, serta variasi ketinggian. Parameter ini sangat spesifik dan hanya dapat ditentukan dengan akurasi pengukuran di lokasi tertentu. Parameter-parameter ini digunakan untuk menilai kinerja dan ekonomi dari pembangkit listrik tenaga angin (J.F. Walker dan N. Jenkins, 1997).

Tenaga angin memiliki kelemahan intermitten, acak dan akurasi prediksi yang buruk dalam jangka menengah, akses tenaga angin skala besar juga akan mengurangi inersia sistem tenaga dan meningkatkan perbedaan puncak-lembah dari grid (li, Dexin, dkk., 2020). Oleh karena itu energi angin juga merupakan energi kinetik dari pergerakan massa udara. Persamaan energi kinetik pada suatu turbin sebagai berikut :

$$Ek = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Di mana :

Ek = Energi Kinetik (Joule)

m = Massa udara (kg)

v = Kecepatan angin (m/s)



Laju aliran massa diberikan oleh persamaan :

$$m = \rho Av \quad (2)$$

Di mana :

$\rho$  = Massa jenis angin ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ( Kecepatan  $\rho = 1,225 \text{ Kg}/\text{m}^3$ )

A = Luas penampang turbin ( $\text{m}^2$ ) bisa ditulis ( $A = \pi r^2$ ).

Dengan mengubah massa udara dengan persamaan 1 dengan persamaan 2, maka diperoleh persamaan daya total yang dihitung dari kecepatan angin sebagai berikut :

$$p_a = \frac{1}{2} \rho Av^3 \quad (3)$$

Di mana :

$p_a$  = Daya angin (Watt)

Proses konversi energi angin menjadi energi listrik melalui beberapa tahapan, yakni perubahan energi kinetik angin menjadi energi gerak rotor yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik. Dalam proses konversi energi angin, ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi besarnya energi listrik yang dapat dihasilkan, diantaranya :

- a. Rotor/kincir, yang memiliki variasi jenis yang berbeda. Variasi yang dimaksud contohnya seperti diameter kincir, yang akan berbanding lurus dengan energi listrik yang akan dihasilkan.
- b. Kecepatan angin, yang akan berpengaruh pada kecepatan putar rotor yang akan menggerakkan generator.
- c. Jenis generator, yang memiliki karakteristik yang berbeda sesuai dengan tipe generator yang digunakan.

Meskipun hingga saat ini pemanfaatan kincir angin masih dibawah kit listrik konvensional seperti Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), kit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan lainnya. Namun di Negara maju kincir



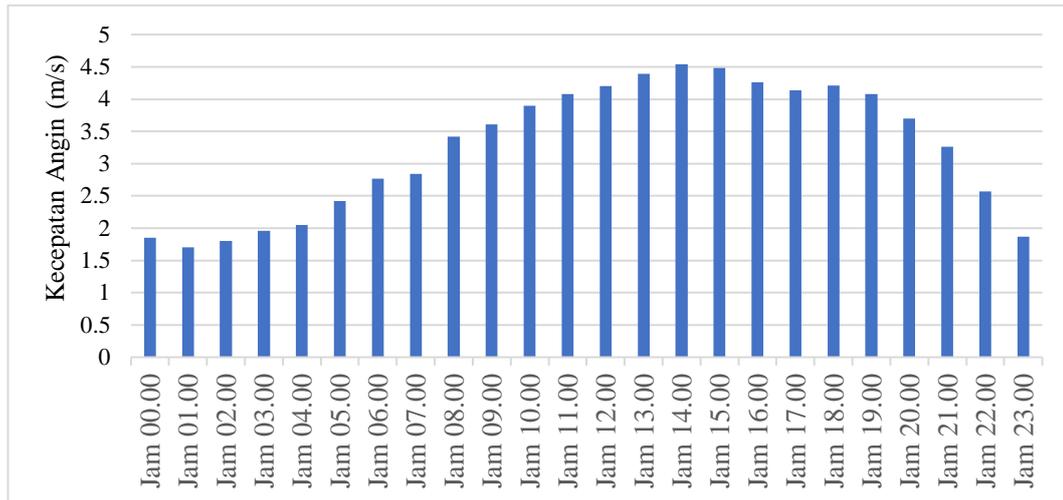
angin sementara dikembangkan oleh para ilmuwan dikarenakan pembangkit listrik saat ini yang bersumber dari sumber daya yang tidak dapat diperbaharui terus mengalami penurunan dan tidak menutup kemungkinan akan habis dalam waktu dekat. Prinsip kerja sederhana dari turbin angin adalah sebagai energi mekanis dari angin diubah menjadi energi yang akan memutar generator sehingga dapat menghasilkan listrik.

## 2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Angin

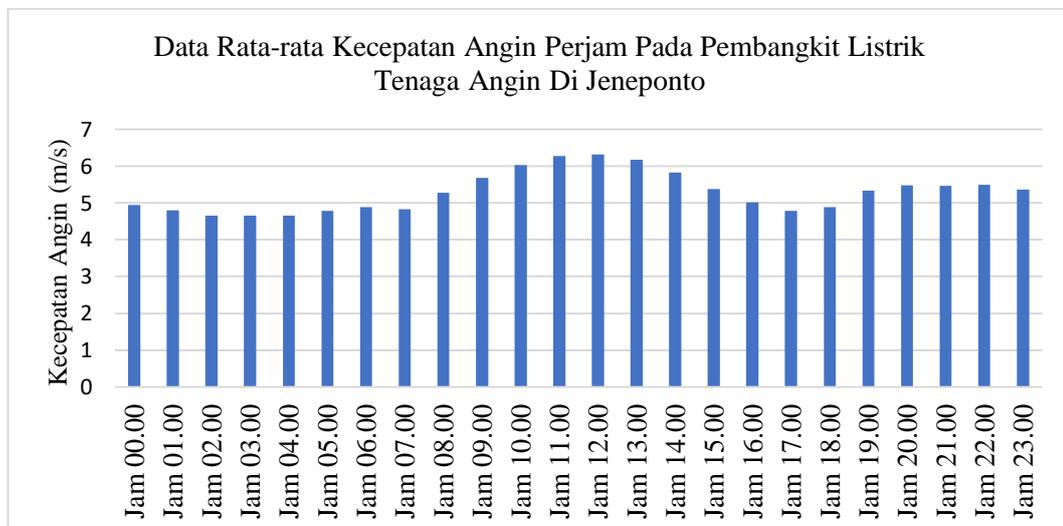
Pembangkit listrik tenaga angin merupakan suatu pembangkit listrik yang memanfaatkan angin sebagai sumber energi angin utama untuk dapat memproduksi energi listrik. Jika dibandingkan dengan pembangkit listrik terbarukan lainnya pembangkit listrik tenaga angin memiliki tingkat efisien yang lebih baik. Prinsip kerja pembangkit listrik tenaga angin yaitu angin masuk kedalam area efektif turbin dengan memanfaatkan energi kinetik angin baling-baling atau kincir angin akan berputar, sehingga energi yang dihasilkan dari perputaran selanjutnya diteruskan ke generator yang nantinya akan menghasilkan listrik.

Pada daerah Sulbagsel terdiri dari dua pembangkit listrik tenaga angin yaitu di Sidrap dan di Jeneponto. Pembangkit listrik tenaga angin di Sidrap terletak di desa Mattirotasi, kabupaten Sidrap, Sulawesi Selatan. Pembangkit listrik tersebut memiliki kapasitas yang besar mencapai 75 MW yang terdiri dari 30 turbin angin yang tersebar di lahan seluas 100 hektar. Turbin angin di Sidrap memiliki diameter 57 m dengan kapasitas terbesar 2,5 MW. Sidrap berintegrasi dengan sistem Sulbagsel melalui jaringan transmisi 150 kV (Muhajir dan Sinaga, 2021). Sedangkan pembangkit listrik tenaga angin di Jeneponto terletak di kecamatan Binamu, kabupaten Jeneponto, Sulawesi Selatan. Pembangkit listrik ini memiliki kapasitas yang besar mencapai 72 MW yang terdiri dari 20 turbin angin dengan tinggi 133 meter dan panjang baling-baling 63 meter. Masing-masing generator memiliki daya 3,6 MW. Pada Gambar 1 ditunjukkan kondisi potensi angin dengan ketinggian 50 meter di lokasi pembangkit listrik tenaga angin di Sidrap pada hari sabtu tanggal 01 Juli 2024, dan pada Gambar 2 ditunjukkan potensi angin dengan ketinggian 50 meter di lokasi pembangkit listrik tenaga angin di Jeneponto pada hari sabtu tanggal 01 Juli 2024.





**Gambar 1** Data rata-rata kecepatan angin perhari pada pembangkit listrik tenaga angin di Sidrap (Nasa power)



**Gambar 2** Data rata-rata kecepatan angin perhari pada pembangkit listrik tenaga angin di Jeneponto (Nasa power)

Berdasarkan Gambar 1 dan Gambar 2 dapat disimpulkan bahwa kecepatan angin rata-rata harian di PLTB Tolo lebih tinggi dibandingkan PLTB Sidrap, yaitu 5,96 m/s di Tolo dan 3,26 m/s di Sidrap. Selain itu, daya yang dihasilkan oleh PLTB Tolo juga lebih besar, mencapai 30,6 MW, sedangkan PLTB Sidrap hanya menghasilkan 7,23 MW. Semakin besar daya yang dihasilkan, rugi-rugi daya yang dapat direduksi dalam sistem juga semakin besar. Oleh karena itu, PLTB Tolo lebih

dalam mengurangi rugi-rugi daya dibandingkan PLTB Sidrap.



## 2.5 Energi Mekanik

Energi mekanik pada turbin angin merupakan salah satu proses yang terjadi pada konversi energi. Koefisien daya pada turbin angin adalah ukuran efisiensi untuk mengubah daya angin menjadi daya mekanik dan nilai dari efisiensi tersebut tidak dapat melebihi 0,593 yang dikenal sebagai batas betz (C. Yang, dkk., 2018)

$$C_p = \frac{P_m}{P_a} \quad (4)$$

Di mana :

$P_m$  = Daya mekanik (watt)

$C_p$  = Koefisien daya pada turbin angin

Sehingga daya mekanik pada turbin angin dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (5)$$

## 2.6 Analisis Aliran Daya

Studi aliran daya (*load flow*) digunakan untuk menentukan tegangan, arus, daya aktif atau daya reaktif di berbagai macam titik/bus pada jaringan listrik dalam kondisi operasi normal (Stevenson, dkk., 1994). Selain dipergunakan untuk perencanaan pengembangan sistem listrik pada masa mendatang, juga dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi sistem kelistrikan yang sudah ada (*existing*) (Gupta, 1998).

Tujuan studi aliran daya adalah untuk mengetahui besar vektor tegangan pada tiap bus dan besar aliran daya pada tiap cabang suatu jaringan untuk suatu kondisi beban tertentu dalam kondisi normal. Hasil perhitungan dapat digunakan untuk menelaah berbagai persoalan yang berhubungan dengan jaringan tersebut, yaitu meliputi hal-hal yang berhubungan dengan operasi jaringan yaitu: (Saadat, 1999)

pengaturan tegangan (*voltage regulation*), perbaikan faktor daya (*power factor*) jaringan, kapasitas kawat penghantar, dan termasuk rugi-rugi daya.



- b. Perluasan atau pengembangan jaringan, yaitu menentukan lokasi yang tepat untuk penambahan bus beban baru dan unit pembangkitan atau gardu induk baru.
- c. Perencanaan jaringan, yaitu kondisi jaringan yang diinginkan pada masa mendatang untuk melayani pertumbuhan beban karena kenaikan terhadap kebutuhan tenaga listrik.

Dalam analisis aliran daya terdapat empat buah besaran pada masing-masing bus jaringan yang ditinjau dan memegang peranan yaitu (Saadaat, 1999) :

- a. Daya aktif P (*active power*).
- b. Daya reaktif Q (*reactive power*).
- c. Besar tegangan  $|V|$  (*magnitude*).
- d. Sudut fase tegangan  $\theta$  (*angle*).

Dua di antara empat besaran yang terdapat pada tiap bus tersebut sudah diketahui, sedangkan dua besaran lainnya merupakan yang akan dihitung melalui proses iterasi setiap bus (Kundur, 1993). Dalam sistem tenaga listrik dikelompokkan menjadi 3 (tiga) tipe bus, yaitu:

- a. Bus beban: variabel yang diketahui adalah daya aktif, daya reaktif. Kemudian akan dihitung besaran tegangan dan sudut fasa tegangan di setiap bus.
- b. Bus pembangkit: variabel yang diketahui adalah daya aktif dan besaran tegangan, sedangkan daya reaktif dan sudut fasa tegangan merupakan hasil perhitungan.
- c. Bus penyangga (bus *swing*): variabel yang diketahui adalah besaran tegangan dan sudut fasa tegangan yang merupakan sudut acuan. Sedangkan daya aktif dan daya reaktif yang harus dikompensasi merupakan hasil perhitungan.

Dalam penelitian ini penulis akan menggunakan metode *Newton-Raphson* karena metode ini lebih cepat mencapai nilai konvergen sehingga proses iterasi yang berlangsung lebih sedikit, tetapi setiap iterasinya memerlukan waktu yang relatif lebih lama, karena jumlah iterasinya sedikit, secara keseluruhan memerlukan ng lebih singkat dalam penyelesaian aliran daya (Saadaat, 1999).



## 2.7 Sistem Penyimpanan Energi

Sistem turbin angin yang sangat bergantung pada kecepatan angin yang menggerakkan turbin angin untuk dikonversi menjadi energi listrik. Integrasi tenaga angin dengan proporsi tinggi dalam sistem tenaga sangat diperlukan. Namun, hal itu menimbulkan masalah pada sistem tenaga yang tidak stabil, termasuk osilasi pada tegangan dan frekuensi, karena variabilitas alami dan ketidakpastiannya (Al Ahmad, dkk., 2020). Selain itu, dibutuhkan daya yang stabil untuk sesuai dengan beban (N.U. Abdul Motin, dkk., 2013). Untuk itu dibutuhkan sebuah mekanisme yang dapat bekerja sebagai penyeimbang daya saat terjadi daya yang berlebih ataupun kekurangan daya pada sistem agar daya yang dihasilkan sistem turbin menjadi konstan, hal inilah yang disebut sebagai penyeimbang daya atau *power smoothing* (Q.W. Haoran Zhao, dkk., 2014).

Penyimpan energi merupakan salah satu komponen alternatif yang dapat digunakan untuk bertindak sebagai penyeimbang daya atau *power smoothing* yang dihasilkan sistem konversi energi angin. Penyimpan energi mampu melakukan mekanis *charging*, saat daya yang dihasilkan turbin angin melebihi daya yang dibutuhkan beban dan dapat melakukan mekanisme *discharging* saat daya yang dibutuhkan beban melebihi daya yang mampu dihasilkan oleh turbin angin.

Sistem penyimpanan energi merupakan benda dengan suatu sistem yang dapat mengubah suatu energi listrik menjadi energi kimia. Energi kimia ini kemudian disimpan dalam larutan yang terdapat pada sistem penyimpanan energi untuk jangka waktu yang relatif lama. Suatu saat ketikan dibutuhkan energi tersebut mampu kembali diubah menjadi energi listrik untuk memenuhi kebutuhan listrik peralatan tertentu. Kapasitas sistem penyimpanan energi baterai bergantung pada banyak sel yang terpasang dan ukurannya, semakin besar ukurannya maka semakin besar kapasitasnya.

Sistem penyimpanan energi baterai telah mendapatkan popularitas di bidang tenaga listrik dalam beberapa tahun terakhir karena kemampuannya untuk meningkatkan stabilitas dan fleksibilitas sistem tenaga, energi serta memitigasi efek yang disebabkan oleh sumber energi terbarukan seperti matahari dan terlepas dari kelebihan sistem penyimpanan energi baterai, perencanaan



sistem penyimpanan energi baterai yang optimal, misalnya lokasi optimal dan ukuran optimal, sangat penting karena pemasangan sistem penyimpanan energi baterai di setiap tempat menimbulkan dampak yang berbeda-beda terhadap jaringan mikro dan pemasangan di setiap bus bukan merupakan pilihan ekonomis terutama dalam jaringan (Fernando, dkk., 2016).

Adapun fungsi objektif yang dipertimbangkan yaitu mencari lokasi pemasangan sistem penyimpanan energi baterai yang optimal agar dapat memberikan lebih sedikit rugi-rugi daya dan menentukan ukuran sistem penyimpanan energi baterai yang optimal. Adapun persamaan sebagai berikut:

a. Lokasi Optimal

$$Obj F_{Place} = \min \sum_{ith=1}^{Nbranch} |R_{ith}| I_{ith}^2 \quad (6)$$

Di mana :

$F_{Place}$  = Lokasi optimal sistem penyimpanan energi baterai

$Nbranch$  = Jumlah total cabang dalam sistem

$I_{ith}$  = Besarnya arus pada cabang ke-i

$R_{ith}$  = Besarnya resistansi pada cabang ke-i

b. Ukuran Optimal

$$Obj E_{min}^{BESS_{Size}} = \sum_{nt}^n (P_{nt}^{Load} + P_{nt}^{Loss} - P_{nt}^{WT}) \Delta t \quad (7)$$

$$OptimalSize = \rho E_{min}^{BESS_{Size}} \quad (8)$$

Di mana :

$E_{min}^{BESS_{Size}}$  = Ukuran optimal sistem penyimpanan energi baterai

$P_{nt}^{Load}$  = Daya beban

$P_{nt}^{Loss}$  = Rugi-rugi daya

$\rho$  = Faktor keamanan untuk sistem tenaga

$P_{nt}^{WT}$  = Daya pada pembangkit listrik tenaga angin



Adapun batasannya (*constrains*) mengharuskan tegangan lebih besar dari atau sama dengan tegangan minimum yang diperbolehkan serta lebih kecil dari atau sama dengan tegangan maksimum dengan persamaan sebagai berikut :

$$V_{min} \leq V_k \leq V_{max} \quad (9)$$

Selain itu, daya pada sistem penyimpanan energi baterai harus dibatasi dalam rentang keamanan baterai saat status pengisian atau pengosongan yang disebut dengan Batasan baterai dengan persamaan berikut:

$$P_{BESS,min} \leq P_{BESS} \leq P_{BESS,max} \quad (10)$$

Di mana :

$V_k$  = Tegangan bus di bus k

$V_{min}$  = Tegangan minimum bus

$V_{max}$  = Tegangan maksimum bus

$P_{BESS,min}$  = Daya minimum sistem penyimpanan energi baterai

$P_{BESS}$  = Daya sistem penyimpanan energi baterai

$P_{BESS,max}$  = Daya maksimum sistem penyimpanan energi baterai

## 2.8 Baterai

Baterai merupakan salah satu komponen sistem penyimpanan energi yang dapat dipilih sebagai alternatif untuk memperoleh keseimbangan daya, antara daya yang dihasilkan oleh sistem turbin angin dan dengan daya yang dibutuhkan oleh grid melalui pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) dari dan atau ke sistem penyimpanana energi ini. Pada saat baterai diisi (*charging*), terjadilah penimbunan muatan listrik. Jumlah maksimum muatan listrik yang dapat ditampung oleh baterai disebut kapasitas baterai (Hamid, dkk., 2016)

Baterai merupakan salah satu teknologi penyimpan energi tertua dan paling banyak digunakan hingga sampai saat ini, karena cukup efektif untuk aplikasi dayaupun tinggi. Baterai terdiri dari dua atau lebih sel yang dihubungkan isunan seri atau paralel untuk mendapatkan kapasitas dan tegangan operasi



tertentu yang dibutuhkan. Baterai memiliki efisiensi pengisian dan pengosongan yang tinggi, masa pakai yang panjang, dan biaya yang relatif rendah. Baterai yang biasa digunakan untuk penyimpanan energi antara lain baterai timbal-asam, baterai natrium sulfur, baterai lithium ion, baterai timbal karbon, baterai aliran redoks vanadium dan sebagainya. Baterai dalam sistem penyimpanan energi dapat digunakan secara optimal untuk mencapai manfaat maksimal yaitu mengurangi fluktuasi, meningkatkan kontinuitas pasokan, yang meningkatkan keandalan dan kualitas daya, dan meminimalkan rugi-rugi daya (Ahmada, dkk., 2020).

Baterai memiliki karakteristik yang membuatnya ideal untuk digunakan sebagai pengatur energi dalam sistem jaringan listrik. Diantaranya :

- a. *Fast Acting* : baterai dapat mengalirkan daya dengan cepat sesuai permintaan
- b. *Bi-directional Energy Flow* : baterai dapat mengirimkan energy yang tersimpan lalu menyerap rugi-rugi energi dengan cepat dan menyerap kelebihan energi dengan cepat.
- c. *Scalable* : pemakaian baterai dapat dioptimalkan untuk pengiriman daya dan kapasitas penyimpanan dari baterai dapat ditingkatkan dari skala kecil menjadi skala besar

## 2.9 Metaheuristik

Metaheuristik adalah kerangka algoritma umum yang dapat diterapkan pada berbagai optimasi masalah dengan modifikasi yang relatif sedikit untuk dibuat mereka beradaptasi dengan masalah tertentu. Metode metaheuristik adalah metode optimisasi yang dilakukan dengan memperbaiki kandidat penyelesaian secara iteratif sesuai dengan fungsi objektifnya. Metode ini mampu menghasilkan penyelesaian yang baik dalam waktu yang cepat (*acceptable*), tetapi tidak menjamin bahwa penyelesaian yang dihasilkan merupakan penyelesaian terbaik (optimal). Metaheuristik ini menekankan pada proses eksplorasi (pencarian global) dan eksploitasi (pencarian lokal).

Metode metaheuristik pada masa modern ini sering diinspirasi dari kejadian-kejadian alami baik dari tingkah laku hewan, tumbuhan dan juga konsep evolusi.

metaheuristik yang menggunakan konsep evolusi diinspirasi dari hukum bahwa yang bertahan adalah yang paling kuat atau yang paling baik.



Teknik evolusi digunakan pada algoritma *Genetic Algorithm* (GA) dan *Differential Evolution* (DE) untuk membantu menemukan solusi optimal suatu permasalahan. Adapun algoritma yang didasarkan pada teknik *Swarm Intelligence* yaitu seperti halnya *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Ant Colony Optimization* (ACO), *Artificial Bee Colony* (ABC), *Chukoo Search Firefly*, *Galactic Swarm Optimization* (GSO) dan *Bat Algorithm*.

Metaheuristik memiliki beberapa karakteristik dasar yaitu:

- a. Metaheuristik adalah strategi yang memandu proses pencarian.
- b. Tujuan dari metaheuristik adalah untuk menjelajahi ruang pencarian secara *efficient* untuk menemukan solusi optimal.
- c. Teknik metaheuristik berkisar dari prosedur pencarian lokal yang sederhana sampai proses pembelajaran yang kompleks.
- d. Metaheuristik adalah metode pendekatan dan biasanya non-deterministik.
- e. Metaheuristik dapat terdiri dari penggabungan beberapa mekanisme supaya proses pencarian tidak terjebak dalam daerah terbatas di ruang pencarian.

## 2.10 Algoritma *Galactic Swarm Optimization* (GSO)

GSO adalah algoritma metaheuristik yang terinspirasi oleh pergerakan bintang, galaksi, dan supergugus di kosmos (Kaya, dkk., 2017). Bintang-bintang tidak terdistribusi secara seragam di kosmos tetapi berkelompok menjadi galaksi-galaksi yang pada gilirannya tidak terdistribusi secara merata. Pada skala yang cukup besar, masing-masing galaksi muncul sebagai massa titik. Daya tarik bintang di dalam galaksi ke massa besar dan galaksi itu sendiri ke massa besar lainnya ditiru dalam algoritma GSO sebagai berikut: Pertama, individu di setiap subpopulasi tertarik ke solusi yang lebih baik di subpopulasi menurut algoritme PSO. Kedua, setiap subpopulasi diasumsikan diwakili oleh solusi terbaik yang ditemukan oleh subpopulasi dan diperlakukan sebagai *subswarm*. Individu dalam *subswarm* yang terdiri dari solusi terbaik yang ditemukan oleh setiap subpopulasi juga bergerak sesuai dengan algoritma PSO. Pada skala yang lebih besar, masing-masing galaksi tampak sebagai massa titik dan dapat mengelompok dengan galaksi tetangga untuk uk superkluster galaksi.



Dalam algoritma GSO, *swarm* adalah himpunan  $X$  dari  $D$  tuple yang berisi elemen  $(x_j^{(i)} \in R^D)$  yang terdiri dari  $M$  partisi, yang disebut *subswarm*  $x_i$ , masing-masing berukuran  $N$ . Elemen-elemen dari  $X$  diinisialisasi secara acak di dalam ruang pencarian  $[X_{min}, X_{max}]^D$ .

$$x_i \subset X : i = 1, 2, \dots, M$$

$$X_j^{(i)} \in x_i ; j = 1, 2, \dots, N$$

$$x_i \cap x_j = \emptyset : \text{if } i \neq j$$

$$\bigcup_{i=1}^M x_i = X$$

$X_i$  adalah segerombolan ukuran  $N$ . Kecepatan dan personal terbaik yang terkait dengan setiap partikel  $x_j^{(i)}$  masing-masing diwakili oleh  $v_j^{(i)}$  dan  $p_j^{(i)}$ . Algoritma PSO dijalankan sebanyak  $M$  kali. Setiap *subswarm*  $x_i$  memiliki  $g^{(i)}$  terbaik terkait dan diperbarui jika ada yang  $p_j^{(i)}$  terbaik, kebetulan mengambil nilai fungsi yang lebih kecil dari  $g^{(i)}$ ,  $f(p_j^{(i)}) < f(g^{(i)})$ . Partikel di setiap *subswarm* tertarik secara stokastik ke solusi terbaik yang ditemukan oleh *subswarm* tersebut. Karena *gbest subswarm* biasanya terletak di sekitar minimum lokal, partikel di setiap *subswarm* secara stokastik tertarik ke minimum lokal itu. Juga *subswarm* tidak berbagi solusi yang baik seperti dalam pendekatan lain sehingga setiap kawan tertarik pada *subswarm* terbaiknya sendiri (minimum lokal) yang dalam beberapa kasus mungkin tumpang tindih.

Pergerakan *subswarm* di  $x_i$  adalah independen dan tidak memiliki pengaruh pada *subswarm*  $x_j$  lainnya untuk  $i \neq j$ , sehingga memungkinkan pencarian yang tidak terpengaruh dan menyeluruh. Untuk mengambil keuntungan penuh dari kemampuan eksplorasi beberapa *subswarm* yang baru ditemukan ini, galaksi terbaik didefinisikan  $g$  yang diperbarui setiap kali salah satu global terbaik  $g^{(i)}$  mengasumsikan nilai fungsi yang lebih rendah,  $f(p_j^{(i)}) < f(g^{(i)})$ . Algoritma GSO mencatat solusi terbaiknya dengan memperbarui  $g$ .



pada memiliki satu gerombolan yang menjelajah ke arah tertentu, ketika erombolan muncul, efek sinergis dapat diamati sehingga menghasilkan

eksplorasi yang jauh lebih baik. Setiap *subswarm* secara mandiri menjelajahi ruang pencarian dengan bebas sendiri. Iterasi dimulai dengan menghitung kecepatan dan posisi.

$$v_j^{(i)} \leftarrow w_1 v_{(i)} + c_1 r_1 (p_j^{(i)} - x_j^{(i)}) + c_2 r_2 (g^{(i)} - x_j^{(i)}) \quad (11)$$

$$x_j^{(i)} \leftarrow x_j^{(i)} + v_j^{(i)} \quad (12)$$

Di mana berat inersia  $w_1$ , dan bilangan acak  $r_1$  dan  $r_2$  diberikan oleh:

$$w_1 = 1 - \frac{k}{L_1 + 1} \quad (13)$$

$$r_i = U(-1, 1) \quad (14)$$

$k$  adalah bilangan iterasi bilangan bulat saat ini yang bervariasi dari 0 hingga  $L_1$ . Sedangkan  $r_i$  adalah bilangan acak yang dipilih dalam rentang antara -1 dan 1. Secara analog,  $Y$  *subswarm* baru dibuat dengan mengumpulkan global yang terbaik dari *subswarms*  $x_i$ .

$$Y^{(i)} \in Y; i = 1, 2, \dots, M \quad (15)$$

$$Y^{(i)} = g^{(i)} \quad (16)$$

Kecepatan  $v^{(i)}$  dan vektor posisi  $y^{(i)}$  diperbarui sesuai persamaan yang diberikan di bawah ini:

$$v^{(i)} \leftarrow w_2 v_{(i)} + c_3 r_3 (p^{(i)} - y^{(i)}) + c_4 r_4 (g - y^{(i)}) \quad (17)$$

$$y^{(i)} \leftarrow y^{(i)} + v^{(i)} \quad (18)$$

Di mana  $p^{(i)}$  adalah pribadi terbaik yang terkait dengan vektor  $y^{(i)}$ . Pada level ini  $g$  berfungsi sebagai contoh global terbaik dan tidak diperbarui kecuali jika pencarian menemukan titik yang lebih baik. *Subswarm* menggunakan solusi terbaik yang sudah dihitung oleh *subswarm* dan karenanya mengeksploitasi informasi yang sudah dihitung. Meskipun individu *subswarm* lebih tersebar dibandingkan dengan individu *subswarm*, *subswarm* tidak melakukan eksplorasi mandiri. Analogi berikut

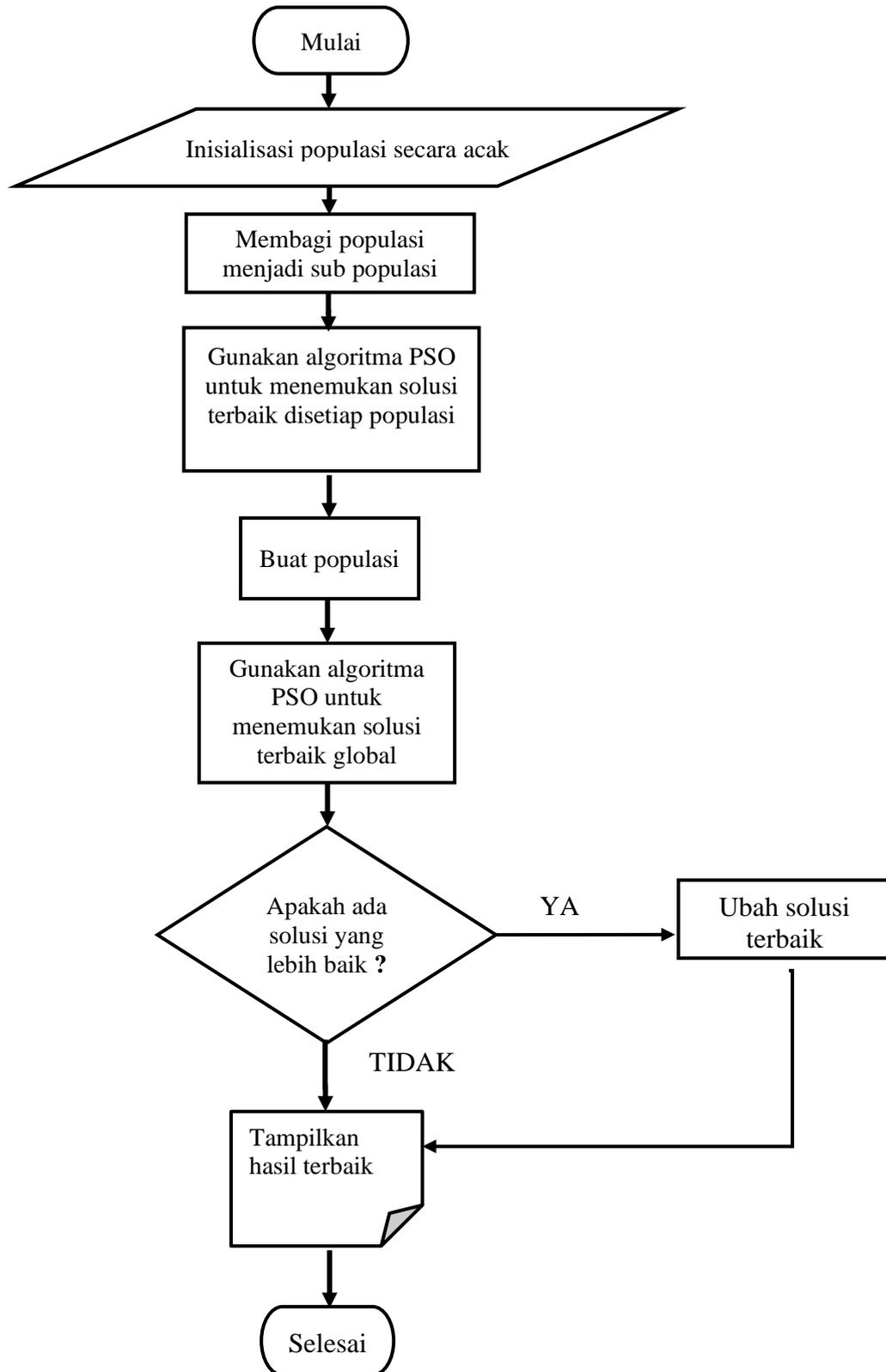


akan beberapa wawasan. Pertimbangkan pemimpin tim meringkas temuan timnya, pemimpin tidak datang dengan ide-ide independen atau eksplorasi solusi baru tetapi hanya mengeksploitasi informasi yang diberikan

kepadanya oleh anggota timnya. *Subswarm* global terbaik memengaruhi *subswarm*, tetapi tidak ada efek umpan balik atau aliran informasi dari *subswarm* ke *subswarm* untuk menjaga keragaman solusi. Menghindari umpan balik membantu strategi *Galactic Swarm Optimization* (GSO) untuk mempertahankan *subswarm* yang sangat beragam dan kemampuan pencarian global yang konstan setiap iterasi. Ketika iterasi berikutnya dimulai, pencarian dimulai dari tempat terakhirnya dan terus menjelajahi ruang angkasa lagi dengan ketelitian yang sama *subswarm* tidak dimulai ulang. Tingkat pertama dari algoritma GSO yang terdiri dari gerakan *subswarm* terutama merupakan fase eksplorasi dan tingkat kedua yang melibatkan *subswarm* terutama merupakan fase eksploitatif. Dengan demikian algoritma GSO mengubah fase antara fase eksplorasi dan eksploitatif. Oleh karena itu, algoritma GSO mendapat kesempatan untuk mencari lebih banyak minimum lokal, karena setiap minimum lokal berpotensi menjadi minimum global (Bernal, dkk., 2019). Berikut adalah penjelasan detail mengenai diagram alir Algoritma *Galactic Swarm Optimization* (GSO) pada Gambar 3 :

1. Mulai Algoritma *Galactic Swarm Optimization* (GSO).
2. Populasi diinisialisasi secara acak.
3. Populasi dibagi menjadi M subpopulasi.
4. Mulai tingkat 1  
 Mulai *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk setiap subpopulasi M, dan hitung posisi dan kecepatan partikel.  
 Level 1 selesai
5. Mulai tingkat 2  
 Inisialisasi *subswarm*  
 Mulai *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk setiap subpopulasi M, dan hitung posisi dan kecepatan partikel  
 Akhiri *Particle Swarm Optimization* (PSO)  
 Level 2 selesai.
6. Selanjutnya akan dilakukan seleksi apakah ada solusi terbaik daripada solusi terbaik yang ditemukan sejauh ini. Jika ada, maka ubah ke solusi terbaik.  
 Algoritma *Galactic Swarm Optimization* (GSO).





Gambar 3 Diagram alir *Galactic Swarm Optimization* (GSO)



## 2.11 Penelitian Terkait yang Terdahulu

Terdapat beberapa literatur dengan penelitian yang akan dilakukan. Berikut ini merupakan penelitian yang terkait dengan penentuan penempatan dan ukuran sistem penyimpanan baterai terintegrasi tenaga angin.

**Tabel 2** Penelitian terkait yang terdahulu

Tahun, Penulis	Judul	Masalah yang dibahas	Metode	Hasil
2020, Sirote Kunkitti, Punyawoot Boonluk, dan Apirat Siritaratiwa	<i>Optimal Location and Sizing of BESS for Performance Improvement of Distribution Systems with High DG Penetration</i> (Lokasi dan Ukuran BESS yang Optimal untuk Peningkatan Kinerja Sistem Distribusi dengan Penetrasi DG Tinggi)	Mengusulkan lokasi dan ukuran instalasi sistem penyimpanan energi baterai yang optimal untuk peningkatan kinerja sistem distribusi dengan tingkat penetrasi pembangkit terdistribusi yang tinggi.	Untuk menemukan lokasi dan ukuran BESS yang optimal. Metode <i>Genetic Algorithm</i> (GA), <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO), dan <i>Salp Swarm Algorithm</i> (SSA) diterapkan, dan kinerjanya dibandingkan	Metode <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO) memberikan biaya sistem terbaik dengan pengurangan 57,41% saat sistem penyimpanan energi dipasang pada bus 20 dengan ukuran baterai 6,7044 MWh dan jumlah total biaya operasi terbaik adalah \$894,48.
2018, Nitikorn Junhuathon dan Boonruang Marungsri	<i>Optimal Location and Size for the Battery Energy Storage System Installation in a Microgrid</i> (Lokasi dan Ukuran Optimal untuk Instalasi Sistem Penyimpanan Energi Baterai di Microgrid)	Pemasangan BESS di setiap tempat menimbulkan dampak yang berbeda-beda terhadap jaringan mikro. Tenaga angin dan tenaga surya merupakan sumber utama pembangkit listrik dalam penelitian ini	Lokasi optimal dan ukuran optimal ditentukan dengan metode <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO)	Lokasi optimal untuk memasang sistem penyimpanan energi baterai adalah bus 1. Pemasangan sistem penyimpanan energi baterai di bus 1 menyebabkan rugi daya sekitar 16,37 MW/hari. Ukuran optimal sistem penyimpanan energi baterai sebesar 57 MW.



Lanjutan Tabel 2

Tahun, Penulis	Judul	Masalah yang dibahas	Metode	Hasil
2019, Ling Ai Wonga, Vigna K. Ramachandaram urthy,Sara L. Walkerc, Phil Taylorc , dan Mohammad Javad Sanjarid	<i>Optimal Placement and Sizing of battery Energy Storage System for Losses Reduction Using Whale Optimization Algorithm</i> (Penempatan dan ukuran sistem penyimpanan energi baterai yang optimal untuk pengurangan kerugian menggunakan algoritma optimasi paus)	Terlepas dari kelebihan sistem penyimpanan energi baterai, perencanaan sistem penyimpanan energi baterai yang optimal, misalnya lokasi optimal dan ukuran optimal sangat penting karena memasang BESS di setiap bus bukan merupakan pilihan ekonomis terutama dalam jaringan besar.	Menggunakan metode <i>Whale Optimization Algorithm</i> (WOA), untuk melakukan optimasi dalam menganalisis penentuan penempatan dan ukuran sistem pinyampanan energi baterai yang optimal dalam distribusi dengan tujuan meminimalkan total kerugian daya sistem.	Metode <i>Whale Optimization Algorithm</i> memiliki kinerja yang luar biasa dalam mencapai lokasi dan ukuran sistem penyimpanan energi baterai yang optimal di jaringan distribusi untuk pengurangan rugi daya dan penempatan beberapa BESS yang tersebar lebih efektif dalam mengurangi rugi-rugi dibandingkan memasang satu BESS.
2019, Bahman Khaki, dan Pritam Das	<i>Sizing and Placement of Battery Energy Storage Systems and Wind Turbines by Minimizing Costs and System Losses</i> (Ukuran dan penempatan sistem penyimpanan energi baterai dan turbin angin dengan meminimalkan biaya dan kerugian sistem )	Daya <i>output</i> turbin angin probabilistik dan intermitten adalah salah satu inkonsistensi utama. Sistem penyimpanan energi baterai adalah solusi yang cocok untuk mengurangi intermitten ini yang digunakan untuk memperlancar daya keluaran yang diinjeksikan ke jaringan oleh sumber intermitten ini.	Metode yang digunakan <i>Genetic Algorithm</i> (GA) untuk menganalisis penentuan penempatan dan ukuran sistem pinyampanan energi baterai (Baterai Litium-ion) yang optimal untuk dapat meminimalkan total kerugian sistem (kerugian aktif dan reaktif).	Hasil menunjukkan bahwa mempertimbangkan penempatan dan ukuran BESS dapat membantu dan mencakup daya aktif sistem (pencukuran puncak), dan juga kebutuhan daya reaktif, sekaligus menghasilkan profil tegangan beban yang lebih baik.



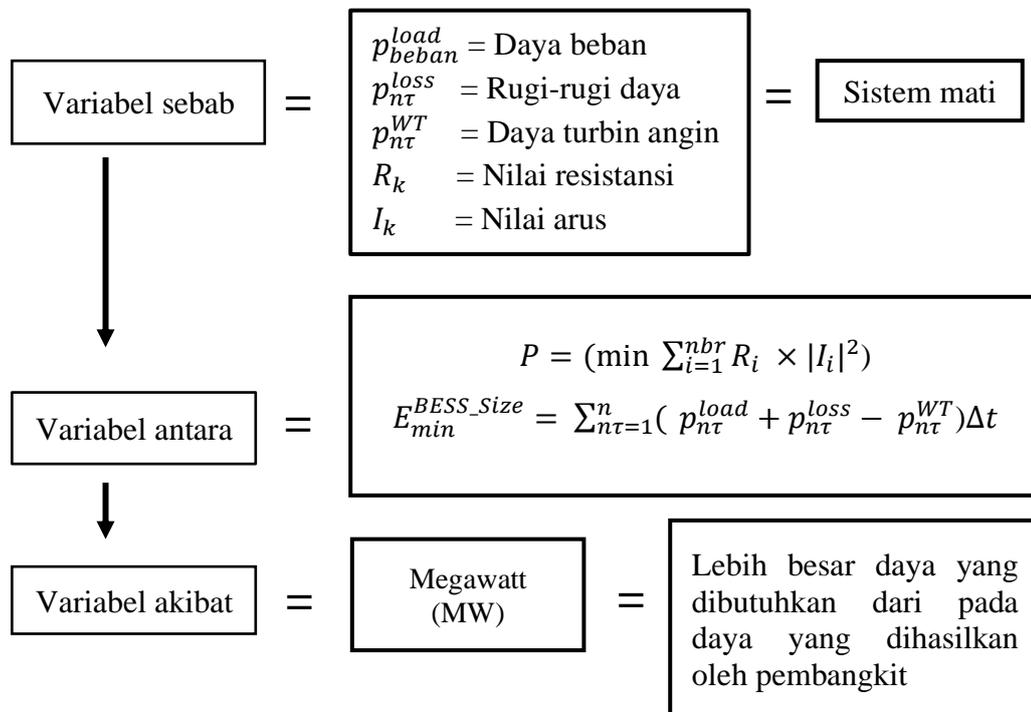
Lanjutan Tabel 2

Tahun, Penulis	Judul	Masalah yang dibahas	Metode	Hasil
2016, Yongxi Zhang, Ke Meng, Fengji Luo, Zhao Yang Dong, Kit Po Wong, dan Yu Zheng.	<i>Optimal Allocation of Battery Energy Storage Systems in Distribution Networks with High wind Power Penetration</i> (Alokasi optimal sistem penyimpanan energi baterai pada jaringan distribusi dengan penetrasi tenaga angin yang tinggi )	Analisis berbagai teknologi BESS untuk efisiensi biaya dan manajemen energi angin.	Menggunakan simulasi Monte-Carlo untuk perencanaan <i>Differential Evolution Algorithm</i> digunakan untuk menganalisis lokasi sistem penyimpanan energi baterai	Hasil yang diperoleh membuktikan metode yang diusulkan sangat memberikan efisiensi yang dimana jumlah total biaya operasi per hari dikurangi dari \$10018 (tanpa sistem penyimpanan energi) hingga \$9027 (L/A terpasang), sehingga menghasilkan hemat 10,98%.
2020, Zhi Yuana, Weiqing Wang, Haiyun Wang, Abdullah Yildizbasi	<i>A New Methodology for Optimal Location and Sizing of Battery Energy Storage System in Distribution Networks for Loss Reduction</i> (Metodologi baru untuk lokasi optimal dan ukuran sistem penyimpanan energi baterai di jaringan distribusi untuk mengurangi kerugian )	Penempatan dan ukuran optimal BESS dalam jaringan distribusi. Penggunaan sumber daya pembangkitan terdistribusi berpotensi mengurangi kebutuhan akan jaringan listrik tradisional. Salah satu teknologi populer untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan menggunakan sistem penyimpanan energi baterai	Menggunakan metode <i>Coyote Optimization Algorithm</i> (COA) untuk optimasi Sistem Penyimpanan Energi Baterai	Lokasi yang optimal pada bus 7 dan 18, dengan ukuran 0,65 MW dan 1,23 MW, dengan rugi daya 48,56 kW yang menunjukkan pengurangan 13 kW dan 82,64 kW. Alokasi dan ukuran optimal yang tepat menurun total kerugian sistem.



## 2.12 Hubungan Antara Variabel Sebab dan Variabel Akibat

Kerangka konsep pada penelitian ini dapat di lihat pada Gambar 4, dari gambar tersebut bisa dilihat bahwa integrasi pembangkit listrik yang terdiri dari turbin angin yang dihubungkan dengan sistem penyimpanan energi baterai dapat mengurangi dampak intermitten pembangkit terbarukan yang hasilnya memiliki dampak menurunkan rugi-rugi daya pada sistem.



**Gambar 4** Kerangka konsep

Pada penelitian terdahulu juga dapat disusun hubungan antar variabel penelitian seperti yang di tunjukan pada Tabel 2 di bawah ini.

- Penelitian yang dilakukan oleh Sirote Kunkitti, Punyawoot Boonluk, dan Apirat Siritaratiwat pada tahun 2020 yang menganalisis lokasi dan ukuran instalasi sistem penyimpanan energi baterai yang optimal untuk peningkatan kinerja sistem distribusi dengan tingkat penetrasi pembangkit terdistribusi yang tinggi di mana DG terdiri dari *fotovoltaik* (PV) dan *wind* turbin (WT). Yang dimana pemasangan sistem penyimpanan energi baterai ini arapkan dapat mengurangi biaya yang dikeluarkan dalam sistem. Jenis nasangan sistem penyimpanan energi baterai yang disimulasikan dalam



pekerjaan ini adalah baterai Li-ion. Studi simulasi ini dilakukan pada sistem distribusi radial 69 bus. Hasilnya diperoleh terlihat bahwa metode yang digunakan memberikan biaya sistem yang terbaik yang paling rendah daripada yang lain dengan pengurangan 57,41% saat sistem penyimpanan energi baterai dipasang pada bus 20 ukuran baterai 6,7044 MWh. Dan ditemukan jumlah total biaya operasi terbaik adalah \$894,48. Dengan demikian untuk meminimalkan biaya yang dikeluarkan dalam pekerjaan sistem dapat ditinjau dari variabel akibat sampai kembali pada variabel sebab. Variabel akibat dalam hal ini adalah masalah biayanya yaitu menggunakan dollar (\$).

- b. Penelitian yang dilakukan oleh Nitikorn Junhuathon dan Boonruang Marungsri pada Tahun 2018 yang menganalisa bahwa sumber energi terbarukan tidak dapat diandalkan karena sifatnya yang berfluktuasi dengan sendirinya sehingga menghasilkan *output* daya yang bersifat intermitten. Yang dimana masalah tersebut dapat diatasi dengan pemasangan *Battery Energy Storage System* (BESS). Tetapi agar sistem penyimpanan energi baterai ini dapat bekerja secara optimal maka ukuran dan penempatannya harus direncanakan sehingga nantinya dapat mengurangi rugi-rugi daya pada sistem. Metode *Newton Raphson* pada analisis aliran daya digunakan untuk menganalisis rugi-rugi daya, dan menggunakan teknik *Particle Swarm Optimization* untuk menganalisis penempatan dan ukuran sistem penyimpanan energi baterai yang optimal. Dengan demikian untuk meminimalkan rugi-rugi daya pada sistem dapat ditinjau dari variabel akibat sampai kembali pada variabel sebab. Variabel akibat dalam hal ini adalah MegaWatt. Penelitian ini diuji menggunakan IEEE 14 bus yang menunjukkan bahwa lokasi optimal untuk memasang sistem penyimpanan energi baterai adalah bus 1. Pemasangan BESS di bus 1 menyebabkan rugi daya sekitar 16,37 MW/hari yang lebih kecil dari yang lain. Ukuran optimal sistem penyimpanan energi baterai sebesar 57 MW.



elitian yang dilakukan oleh Ling Ai Wonga, Vigna K. nachandaramurthya, Sara L. Walkerc, Phil Taylorc, dan Mohammad

Javad Sanjarid pada tahun 2019 yang menganalisis bahwa sistem penyimpanan energi baterai memiliki kemampuan untuk meningkatkan stabilitas dan fleksibilitas sistem tenaga, Menggunakan metode *Whale Optimization Algorithm* dengan kemampuan eksplorasi dan eksploitasi yang tinggi, untuk melakukan optimasi dalam menganalisis penentuan penempatan dan ukuran sistem penyimpanan energi baterai yang optimal dalam distribusi untuk meminimalkan total kerugian daya sistem. Penelitian ini diuji menggunakan IEEE 48 bus yang menunjukkan bahwa lokasi optimal untuk memasang sistem penyimpanan energi baterai adalah bus 19 dan ukuran optimal adalah 1,74 MW dengan total kerugian sistem 62,58 kW. Ini menunjukkan pengurangan kerugian sebesar 68,26 kW. Dengan demikian untuk meminimalkan rugi-rugi daya pada sistem dapat ditinjau dari variabel akibat sampai kembali pada variabel sebab. Variabel akibat dalam hal ini adalah Kilowatt.

- d. Penelitian yang dilakukan Bahman Khaki, dan Pritam Das pada tahun 2019 menganalisis bahwa daya *output* WT probabilistik dan intermitten adalah salah satu inkonsistensi utama WT. Sistem penyimpanan energi baterai adalah solusi yang cocok untuk mengurangi intermitten yang digunakan untuk memperlancar daya keluaran yang diinjeksikan ke jaringan oleh sumber intermitten. Formulasi optimasi menggunakan algoritma genetika untuk menganalisis penentuan penempatan dan ukuran sistem penyimpanan energi baterai (Baterai Litium-ion) yang optimal untuk dengan meminimalkan total kerugian sistem (kerugian daya aktif dan daya reaktif). Hasil simulasi yang telah dilakukan dengan menggunakan IEEE 33 bus menunjukkan bahwa lokasi yang optimal untuk pemasangan sistem penyimpanan energi baterai yaitu bus 31, ukuran optimalnya yaitu  $178.98+j0.2933$  dan meminimalkan rugi-rugi daya sampai 73% dan total rugi-rugi dayanya yaitu 65,79 kW. Dengan demikian untuk meminimalkan rugi-rugi daya pada sistem dapat ditinjau dari variabel akibat sampai kembali ke variabel sebab. Variabel akibat dalam hal ini adalah Kilowatt.



- e. Penelitian yang dilakukan Yongxi Zhang, Ke Meng, Fengji Luo, Zhao Yang Dong, Kit Po Wong, dan Yu Zheng pada tahun 2016 yang menganalisis bahwa sistem penyimpanan energi baterai dianggap sebagai solusi yang menjanjikan untuk mengurangi intermitten pembangkit listrik terbarukan. Perencanaan stokastik untuk sistem penyimpanan energi baterai dalam distribusi jaringan dengan penetrasi tenaga angin yang tinggi, bertujuan untuk memaksimalkan pemanfaatan tenaga angin sambil meminimalkan investasi dan biaya operasi. Dalam kerangka yang diusulkan, ketidakpastian keluaran tenaga angin dan beban sistem dimodelkan oleh simulasi *Monte-Carlo*, dan model optimisasi stokastik yang dibatasi peluang diformulasikan untuk menganalisis secara optimal lokasi dan kapasitas sistem penyimpanan energi baterai sambil memastikan tingkat pemanfaatan tenaga angin. Kemudian, simulasi *Monte-Carlo* disematkan algoritma diferensial evolusi digunakan untuk menganalisis kapasitas sistem penyimpanan energi baterai. Dengan demikian untuk meminimalkan biaya yang dikeluarkan dalam pekerjaan sistem dapat ditinjau dari variabel akibat sampai kembali pada variabel sebab. Variabel akibat dalam hal ini adalah masalah biayanya yang menggunakan dollar (\$).
- f. Penelitian yang dilakukan Zhi Yuana, Weiqing Wang, Haiyun Wang, dan Abdullah Yildizbasi pada tahun 2020 yang menganalisis bahwa penggunaan sumber daya pembangkitan terdistribusi berpotensi mengurangi kebutuhan akan jaringan listrik tradisional, mengendalikan sejumlah besar sumber daya bersama dengan beban yang dapat dikendalikan telah menciptakan tantangan baru dalam mengendalikan dan mengoperasikan jaringan listrik yang aman dan ekonomis. Salah satu teknologi populer untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan menggunakan sistem penyimpanan energi baterai. Proses optimasi diterapkan menggunakan jenis *Coyote Optimization Algorithm* untuk menganalisis alokasi dan ukuran optimal sistem penyimpanan energi baterai dalam IEEE 48 bus jaringan distribusi dengan tegangan ninal 11 kV untuk meminimalkan kerugian sistem secara keseluruhan. sil menunjukkan bahwa lokasi yang optimal diperoleh pada bus 7 dan 18,



sedangkan untuk ukuran optimalnya yaitu dicapai sebesar 0,65 MW dan 1,23 MW, masing-masing dengan rugi daya 48,56 kW yang menunjukkan pengurangan 13 kW dan 82,64 kW. Alokasi dan ukuran optimal yang tepat menurun total kerugian sistem. Pengurangan ini telah meningkat dengan peningkatan nomor sistem penyimpanan energi baterai. Hal ini karena dengan meningkatkan jumlah sistem penyimpanan energi baterai, kebutuhan untuk sejumlah besar daya yang ditransmisikan telah berkurang dan akibatnya, total kerugian sistem pada catu daya lokal berkurang. Dengan demikian untuk meminimalkan rugi-rugi daya pada sistem dapat ditinjau dari variabel akibat sampai kembali pada variabel sebab. Variabel akibat dalam hal ini adalah Kilowatt.

**Tabel 3** Hubungan antara variabel pada penelitian terdahulu

No	Variabel sebab	Variabel antara	Variabel akibat
1	$g_k$ = Konduktansi cabang k $V_i$ = Tegangan bus i $V_j$ = Tegangan bus j $r_{loss}$ = Tingkah biaya kerugian $P_{max}$ = Daya maksimum $\Delta t$ = Perubahan waktu $r_{pp}$ = Tingkah biaya penganturan tegangan $V_r$ = Tegangan bus r $r_{vr}$ = Tingkah biaya permintaan puncak	$c_{loss} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_L} g_k (v_i^2 + v_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_{ij})) \cdot r_{loss}$ $c_{pp} = P_{max} \cdot \Delta t \cdot r_{pp}$ $c_{vr} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N  V_i - V_r  \cdot r_{vr}$ $C_{system} = c_{loss} + c_{pp} + c_{vr}$	Dollar (\$)
2	$I_l$ = Nilai Arus $R_l$ = Nilai Resistansi $p_{nt}^{load}$ = Daya Beban $p_{nt}^{loss}$ = Rugi-rugi daya $p_{nt}^{WT}$ = Daya turbin angin $\Delta t$ = Perubahan waktu	$P = (\min \sum_{i=1}^{nbr} R_i \times  I_i ^2)$ $E_{min}^{BESS\_Size} = \sum_{nt=1}^n (p_{nt}^{load} + p_{nt}^{loss} - p_{nt}^{WT}) \Delta t$	Megawatt (MW)
3	$I_l$ = Nilai Arus $R_l$ = Nilai Resistansi	$P = (\min \sum_{i=1}^{nbr} R_i \times  I_i ^2)$	Kilowatt (kW)
4	$I_l$ = Nilai Arus $R_l$ = Nilai Resistansi	$P_L = RI_L^2$ $Q_L = XI_L^2$ $s_L = P_L + jQ_L$	Kilowatt (kW)



Lanjutan Tabel 3

No	Variabel sebab	Variabel antara	Variabel akibat
5	<p><math>C_E</math> = Biaya modal sistem penyimpanan energi baterai per unit</p> <p><math>C_{Bat\ max}</math> = Kapasitas energi terukur pada sistem penyimpanan energi baterai</p> <p><math>C_0</math> = Biaya operasi dan pemeliharaan tetap per unit</p> <p><math>a_i, b_i</math> = Tingkat kepercayaan dari Batasan peluang</p> <p><math>P_{Gi,t}^\xi</math> = Output daya dari unit turbin mikro ke-i pada waktu t untuk scenario <math>\xi</math></p> <p><math>\eta_{loss}</math> = Biaya rugi daya per unit</p> <p><math>P_{loss,t}^\xi</math> = Rugi daya pada waktu t untuk skenario <math>\xi</math></p> <p><math>P_{cur,t}^\xi</math> = Kurtailment tenaga angin pada waktu t untuk scenario <math>\xi</math></p> <p><math>c_{cur}</math> = Biaya pengurangan tenaga angin per unit</p> <p><math>c_{buy}</math> = Biaya untuk membeli daya dari gardu induk per unit</p> <p><math>p_{buy,t}^\xi</math> = Daya yang dipasok oleh gardu pada waktu t untuk scenario <math>\xi</math></p> <p><math>p_{ch.v}</math> = Pengisian daya sistem penyimpanan energi baterai pada waktu t untuk scenario <math>\xi</math></p> <p><math>p_{dis.t}</math> = Pengisian daya sistem penyimpanan energi baterai pada waktu t untuk scenario <math>\xi</math></p> <p><math>\delta</math> = Koefisien biaya depresi seumur hidup sistem penyimpanan energi baterai</p> <p><math>CO_2</math> = Karbon dioksida</p> <p><math>NO_x</math> = Nitrogen Oksida</p> <p><math>SO_2</math> = Belerang dioksida</p>	<p><math>\text{Min}\{(C_{inv} + C_{opm}) + Q_{op}\}</math></p> <p><math>C_{inv} = \frac{A}{365} C_E C_{Bat\ max}</math></p> <p><math>C_{opm} = \sum C_{Bat\ max} C_0</math></p> <p><math>A = \frac{d(1+d)^n}{d(1+d)^{nr+1} - 1}</math></p> <p><math>Q_{op} = EXP \sum (C_{gen}^\xi + c_{loss}^\xi + c_{pen}^\xi + c_{grid}^\xi + c_{emi}^\xi)</math></p> <p><math>C_{gen}^\xi = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M (a_i P_{Gi,t}^\xi + b_i)</math></p> <p><math>c_{loss}^\xi = \sum_{t=1}^T \eta_{loss} P_{loss,t}^\xi</math></p> <p><math>c_{pen}^\xi = \sum_{t=1}^T C_{cur} P_{cur,t}^\xi</math></p> <p><math>c_{grid}^\xi = \sum_{t=1}^T C_{buy} p_{buy,t}^\xi</math></p> <p><math>c_{depre}^\xi = \sum_{t=1}^T P_{ch.v}  p_{dis.t}  \delta</math></p> <p><math>\delta = \frac{CAP}{C_{Bat.Max.Lifecycle}}</math></p> <p><math>c_{emi}^\xi = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M (CO_2(P_{Gi,t}^\xi) + NO_2(P_{Gi,t}^\xi) + SO_2(P_{Gi,t}^\xi))</math></p>	Dollar (\$)
6	<p><math>V_k^i</math> = Tegangan pada bus K</p> <p><math>R_k</math> = Nilai Resistansi pada bus</p> <p><math>I_k</math> = Nilai arus pada bus K</p> <p><math>jO_k</math> = Daya reaktif pada bus K</p> <p><math>p_k</math> = Daya aktif pada bus K</p>	<p><math>I_k^i = \frac{1}{V_k^i} (p_k + jO_k)</math></p> <p><math>P = (\min \sum_{k=1}^m R_k \times  I_k ^2)</math></p>	Kilowatt (kW)

