

TESIS

**OPTIMASI PEMBANGKIT HIBRIDA (PV, BATERAI, DAN
GENERATOR) PADA DAERAH *OFF- GRID* DENGAN
PENDEKATAN *MULTI OBJECTIVE OPTIMIZATION***

*Optimization of Hybrid Generation (PVs, Batteries, and Generator) in an
Off-Grid Area Using a Multi-Objective Optimization Approach*

**DIANTI UTAMIDEWI
D032211024**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PENGAJUAN TESIS

**OPTIMASI PEMBANGKIT HYBRID (PV, BATERAI, DAN
GENERATOR) PADA DAERAH *OFF- GRID* DENGAN
PENDEKATAN *MULTI OBJECTIVE OPTIMIZATION***

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

Disusun dan diajukan oleh

**DIANTI UTAMIDEWI
D032211024**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

TESIS**OPTIMASI PEMBANGKIT HYBRID (PV, BATERAI,
DAN GENERATOR) PADA DAERAH *OFF- GRID*
DENGAN PENDEKATAN *MULTI OBJECTIVE
OPTIMIZATION*****DIANTI UTAMIDEWI****D032211024**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 6 Oktober 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



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

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, ST, M.Eng, IPU
NIP. 19740530 199903 1 003

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

Prof. Dr. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST, MT, IPM
NIP. 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi S2 Teknik Elektro



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

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Dianti Utamidewi

Nomor mahasiswa : D032211024

Program studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “OPTIMASI PEMBANGKIT HIBRIDA (PV, BATERAI, DAN GENERATOR) PADA DAERAH *OFF- GRID* DENGAN PENDEKATAN *MULTI OBJECTIVE OPTIMIZATION*” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr. Indar Chaerah Gunadin, ST, MT dan Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, ST, M. Eng, IPU). 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 2023 *International Conference on Artificial Intelligence Robotics, Signal, and Image Processing (AIRoSIP)* sebagai artikel dengan judul “*Optimization of Hybrid Generation (PVs, Batteries, and Generators) in an Off-Grid Area Using a Multi-Objective Optimization Approach*”. Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 29 September 2023

Yang menyatakan



Dianti Utamidewi

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan ke hadirat Allah SWT, yang telah memberikan segala berkat dan petunjuk-Nya selama perjalanan penyusunan tesis ini. Tanpa bimbingan, kasih sayang, dan rahmat-Nya, penulis tidak akan dapat menyelesaikan tesis yang berjudul *“Optimasi Pembangkit Hibrida (PV, Baterai, Dan Generator) pada Daerah Off- Grid dengan Pendekatan Multi Objective Optimization”* dengan baik. Engkau telah membuka pintu pengetahuan dan memberikan wawasan yang tak ternilai harganya. Segala hikmah dan pemahaman yang saya peroleh adalah berkat dari rahmat dan karunia-Mu.

Selanjutnya, saya ingin menyatakan terimakasih yang tulus atas semua sumbangan dan sumber daya yang telah diberikan sebagai aset berharga bagi tercapainya kesuksesan tesis dan tujuan akademik ini kepada:

1. Suami tercinta, Imam Ma’arief, tidak ada kata yang dapat cukup mengungkapkan rasa terima kasih atas dukungan dan cinta yang tak ternilai selama proses penyusunan tesis ini. Suamiku adalah sumber inspirasi dan kekuatan bagi saya yang selalu memberikan dukungan moril dan semangat, mendorong saya untuk terus maju.
2. Bapak dan mama tercinta, Prof. Dr-Ing. Ir. Wahyu H. Piarah, MSME dan Imas Rohaeti, atas doa, dukungan, dan cinta tanpa batas yang telah diberikan selama perjalanan ini. Semangat dari bapak, mama, dan adik-adik menjadi pendorong terbesar bagi kesuksesan dalam menyelesaikan tesis ini. Saya merasa sangat beruntung memiliki keluarga yang selalu ada di samping saya dalam setiap langkah perjalanan hidup ini.
3. Prof. Dr. Indar Chaerah Gunadin, ST, MT selaku pembimbing utama dan Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, ST, M. Eng, IPU selaku pembimbing kedua, beserta tim penguji atas bimbingan, dukungan, dan bantuan yang telah diberikan selama proses penyusunan tesis ini. Ilmu dan pengalaman yang diberikan sangat berharga bagi perjalanan akademik saya, serta akan membantu saya untuk mengembangkan pemahaman dan keterampilan penelitian yang lebih baik.

4. Rektor Universitas Hasanuddin, Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, dan Ketua Prodi Pascasarjana Teknik Elektro Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program magister serta para dosen dan staff di Departemen Teknik Elektro.
5. David Ellis beserta keluarga besar PT. Solar Power Indonesia yang telah bekerja sama dan memfasilitasi saya dalam pengambilan data penelitian.
6. Bapak, ibu, dan teman-teman seperjuangan Program Magister Teknik Elektro Universitas Hasanuddin angkatan 2021-1 dan 2020-2, khususnya Indry Artini, Maya Itasari, dan Martati, yang telah menjadi pendengar setia, teman sejati, dan sumber dukungan yang tak tergantikan selama perjalanan menyusun tesis ini. Terima kasih karena telah bersama-sama dalam suka dan duka, dan memberikan kehangatan persahabatan yang sangat berarti bagi saya.

Akhir kata, dengan segala kerendahan hati, saya ingin menyampaikan permohonan maaf yang tulus atas segala kekurangan dan kesalahan yang mungkin terdapat dalam tesis ini. Saya menyadari bahwa karya ini tidaklah sempurna dan masih memiliki ruang untuk perbaikan. Namun demikian, semoga karya saya dapat memberikan manfaat dan kontribusi positif di bidang energi terbarukan dan menjadi amal jariyah yang mendapat ridha dari Allah SWT. Aamiin.

Penulis

DIANTI UTAMIDEWI

ABSTRAK

DIANTI UTAMIDEWI. *Optimasi Pembangkit Hibrida (PV, Baterai, Dan Generator) pada Daerah Off- Grid dengan Pendekatan Multi Objective Optimization* (dibimbing oleh **Indar Chaerah Gunadin, Syafaruddin**)

Energi terbarukan menjadi solusi penyediaan listrik di daerah terpencil. Namun, karena sifatnya yang tidak selalu ada, banyak peneliti telah mengusulkan sistem hibrida menggunakan penyimpanan energi. Banyak penelitian telah dilakukan untuk menunjukkan optimasi pembangkitan hibrida dengan berbagai metode. Penelitian ini bertujuan untuk menunjukkan hasil optimasi pembangkit hibrida (PV, baterai, dan generator) pada daerah *off-grid* di Indonesia, yaitu *Borneo Orangutan Survival Foundation* (BOSF), Kalimantan. Penelitian ini menggabungkan dua metode untuk memperoleh hasil optimasi terbaik. Metode pertama adalah menganalisis merek PV dan baterai yang berbeda dan menentukan merek terbaik menggunakan metode optimasi *Multi Objective Optimization by Ratio Analysis* (MOORA), dengan mempertimbangkan *watt-peak* (Wp) dan harga dari PV dan kapasitas (Ah) dan harga dari baterai. Metode kedua adalah memperlihatkan sistem hybrid terbaik untuk lokasi ini menggunakan *Particle Swarm Optimization* (PSO) dengan mempertimbangkan daya keluaran, harga, dan emisi CO₂. Hasilnya menunjukkan bahwa untuk sistem pembangkit hibrida ini, PV terbaik adalah PV E 555 Wp dan baterai terbaik adalah *Battery B 600 Ah*. Selanjutnya, perhitungan PSO menunjukkan bahwa sistem pembangkit hibrida ini berjalan optimal dengan 681 PV, 195 baterai, dan 1 generator. Jika dibandingkan dengan data aktual, penelitian ini menunjukkan perbedaan biaya sebesar Rp. 2.284.210.246,16, atau penghematan biaya sebesar 31,75% dari biaya aktual. Selanjutnya, apabila dibandingkan dengan metode *Genetic Algorithm* (GA), maka metode PSO telah menghemat biaya sebesar Rp. 7.121.392.938,72, atau penghematan sebesar 31,08%

Kata kunci: fotovoltaik, baterai, pembangkit hibrida, optimasi, energi terbarukan

ABSTRACT

DIANTI UTAMIDEWI. *Optimization of Hybrid Generation (PVs, Batteries, and Generator) in an Off-Grid Area Using a Multi-Objective Optimization Approach* (supervised by **Indar Chaerah Gunadin, Syafaruddin**)

Renewable energy is a solution for providing electricity in remote areas. However, due to its non-existent nature, many researchers have proposed hybrid systems using energy storage. Many studies have been carried out to demonstrate the optimization of hybrid generation using various methods. This research aims to show the results of optimizing hybrid generators (PV, batteries, and generators) in off-grid areas in Indonesia, namely the Borneo Orangutan Survival Foundation (BOSF), Kalimantan. This research combines two methods to obtain the best optimization results. The first method is to analyze different PV and battery brands and determine the best brand using the Multi Objective Optimization by Ratio Analysis (MOORA) optimization method, taking into account the watt-peak (Wp) and price of the PV and the capacity (Ah) and price of the battery. The second method is to show the best hybrid system for this location using particle swarm optimization (PSO), considering output power, price, and CO2 emissions. The results show that for this hybrid generating system, the best PV is PV E 555 Wp, and the best battery is Battery B 600 Ah. Furthermore, PSO calculations show that this hybrid generating system runs optimally with 681 PV, 195 batteries, and 1 generator. When compared with actual data, this research shows a cost difference of Rp. 2,284,210,246.16, or a cost savings of 31.75% of actual costs. Furthermore, when compared with the Genetic Algorithm (GA) method, the PSO method has saved costs of Rp. 7,121,392,938.72, or savings of 31.08%.

Keywords: photovoltaic, battery, hybrid generation, optimization, renewable energy

DAFTAR ISI

	<u>Halaman</u>
HALAMAN JUDUL.....	i
PENGAJUAN TESIS	ii
PERSETUJUAN TESIS	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
DAFTAR ISTILAH & SINGKATAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Ruang Lingkup	4
BAB II LANDASAN TEORI	5
2.1 Konsep dan Komponen Sistem Pembangkit Hibrida.....	5
2.1.1 PV	6
2.1.2 Penyimpanan Energi.....	12
2.1.3 Generator Diesel	17
2.2 Penerapan Sistem Pembangkit Hibrida di Berbagai Negara	18
2.2.1 Keuntungan Sistem Pembangkit Hibrida.....	19
2.2.2 Tantangan dan Kendala	19
2.3 Optimasi Pembangkit Hibrida Energi Terbarukan	19
2.3.1 <i>Multi-objective Optimization on the basis of Ratio Analysis</i>	22
2.3.2 <i>Particle Swarm Optimization</i>	23
BAB III METODE PENELITIAN	25
3.1 Tahapan Penelitian	25
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	27

3.3 Jenis Penelitian	27
3.4 Rancangan Penelitian	27
3.4.1 Pengambilan Data	27
3.4.2 Konfigurasi dan Komponen Sistem	29
3.4.3 Simulasi <i>Multi-objective Optimization</i>	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1 Algoritme MOORA untuk Peringkat PV dan Baterai	34
4.2 Hasil MOORA untuk Peringkat PV dan Baterai	36
4.3 Algoritme dan Hasil PSO	37
4.4 Validasi Manual	42
4.5 Pembahasan	42
4.5.1 Perbandingan Jumlah dan Harga Komponen dengan Data Aktual	42
4.5.2 Perbandingan Jumlah dan Harga Komponen dengan <i>Genetic Algorithm</i>	43
4.5.3 Analisis Emisi Karbon Dioksida	45
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	47
5.1 Kesimpulan	47
5.2 Saran	48
DAFTAR PUSTAKA	49
LAMPIRAN	53

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1 Data profil beban.....	28
Tabel 2 Daftar panel surya (PV).....	31
Tabel 3 Daftar baterai.....	31
Tabel 4 Spesifikasi inverter.....	32
Tabel 5 Hasil peringkat PV menggunakan MOORA.....	36
Tabel 6 Hasil peringkat baterai menggunakan MOORA.....	37
Tabel 7 Hasil optimasi pembangkit hibrida menggunakan PSO.....	40
Tabel 8 Perbandingan data aktual dan riset.....	43
Tabel 9 Hasil optimasi pembangkit hibrida menggunakan GA.....	44
Tabel 10 Perbandingan PSO dan GA.....	45
Tabel 11 Konsumsi solar dan emisi CO ₂	46
Tabel 12 Perbandingan keluaran PV.....	53

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1 Prinsip kerja PV	8
Gambar 2 Panel surya (Sel, Modul, Array) (AbdElAziz, et al., 2018)	9
Gambar 3 Jenis-jenis PV (Dulaimi, 2017)	9
Gambar 4 Jenis-jenis masalah optimasi (Thirunavukkarasu, et al., 2023).....	20
Gambar 5 Klasifikasi teknik optimasi (Thirunavukkarasu, et al., 2023).....	21
Gambar 6 Flowchart penelitian	26
Gambar 7 Lokasi Borneo Orang Utan Foundation.....	27
Gambar 8 Grafik profil beban	28
Gambar 9 PoA direct dan diffuse	29
Gambar 10 Sistem pembangkit hibrida PV, baterai, dan generator	30
Gambar 11 Flowchart metode MOORA	35
Gambar 12 Flowchart metode PSO	38
Gambar 13 Hasil PSO pada vscode.....	40

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Perbandingan keluaran PV	53
Lampiran 2 Algoritme MOORA untuk peringkat PV	54
Lampiran 3 Algoritme MOORA untuk peringkat baterai	56
Lampiran 4 Algoritme PSO pembangkit sistem hibrida	58
Lampiran 5 Algoritme GA pembangkit sistem hibrida.....	60
Lampiran 6 Datasheet PV	63
Lampiran 7 Datasheet baterai.....	69
Lampiran 8 Datasheet inverter	75

DAFTAR ISTILAH & SINGKATAN

Istilah / Singkatan	Arti / Penjelasan
PV	Photovoltaic
Off-grid	Daerah terpencil yang tidak dialiri arus listrik pusat
MOORA	Multi-objective Optimization by Ratio Analysis
Wp	Watt-peak
Ah	Ampere hour
PSO	Particle Swarm Optimization
CO ₂	Karbon dioksida
On-grid	Jaringan listrik pusat
GA	Genetic Algorithm
ACO	Ant Colony Optimization
BOSF	Borneo Orangutan Survival Foundation
Python	Bahasa pemrograman untuk mengoptimasikan data
Intermittent	Terputus-putus, tidak selalu ada
a-Si	Amorphous silicon thin film
CdTe	Cadmium telluride
CIGS	Copper indium gallium di-selenide
Lead-Acid	Timbal-Asam
DoD	Depth of Discharge
η_{batt}	Efisiensi Baterai
l	Liter
kW	Kilo-watt
DG	Diesel Generator

Istilah / Singkatan	Arti / Penjelasan
WT	Wind turbine
NPC	Net Present Cost
COE	Cost of the Electricity
AI	Artificial Intelligence
MCDM	Multi-criteria Decision Making
GRK	Gas Rumah Kaca
EDAS	Evaluation based on Distance from Average Solution
PEL	Power Energy Logger
PoA	Plane of Array
AC	Alternating Current
GA	Genetic Algorithm

BAB I

PENDAHULUAN

Bagian ini berupa pendahuluan yang akan menyajikan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan ruang lingkup mengenai judul tesis ini.

1.1 Latar Belakang

Dalam *landscape* global yang terus berkembang, permintaan energi terus meningkat karena aktivitas manusia dan kemajuan teknologi sangat bergantung pada listrik. Akses ke sumber energi yang andal dan berkelanjutan sangat penting untuk pembangunan ekonomi, kemajuan sosial, dan standar hidup yang lebih baik. Meskipun demikian, sebagian besar penduduk dunia, terutama di daerah terpencil, masih kekurangan akses listrik. Menurut *International Energy Agency* (IEA), sekitar 770 juta orang di seluruh dunia kekurangan akses listrik pada tahun 2020, dengan mayoritas tinggal di pedesaan dan daerah terpencil (IEA, 2021).

Daerah terpencil, yang ditandai dengan isolasi geografis dan infrastruktur yang terbatas, menghadapi tantangan dalam memperoleh listrik yang andal dari jaringan listrik pusat (*on-grid*). Perluasan jaringan *on-grid* ke lokasi terpencil ini seringkali tidak layak secara ekonomi karena biaya pemasangan dan pemeliharaan yang tinggi (Mohammed, et al., 2014). Akibatnya, jutaan orang dibiarkan tanpa akses ke layanan energi modern, yang menyebabkan berbagai kesenjangan sosial-ekonomi.

Untuk mengatasi kebutuhan energi di daerah terpencil sambil memastikan kelestarian lingkungan, sumber energi terbarukan telah muncul sebagai solusi yang menjanjikan. Di antara berbagai teknologi energi terbarukan, sistem fotovoltaik (PV) menonjol karena skalabilitas, modularitas, dan ketersediaan sinar matahari yang melimpah di daerah terpencil (Feron, 2016). Laporan *Renewables in Cities 2021 Global Status* oleh REN21 menunjukkan bahwa teknologi fotovoltaik (PV) menyumbang 27% dari penambahan kapasitas energi terbarukan global pada tahun 2020 (REN21, 2021). Beberapa penelitian oleh (Feron, 2016;

Wassie & Ahlgren, 2023; Hassane, et al., 2022) menunjukkan bahwa teknologi PV menawarkan alternatif yang layak untuk pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan mengurangi dampak perubahan iklim. Selain itu, sistem PV dapat digunakan dalam skala kecil, sehingga menjadikannya cocok untuk sistem *off-grid* dan sistem energi terdistribusi di daerah terpencil (Hassane, et al., 2022)

Sementara sistem PV secara efisien memanfaatkan energi matahari pada siang hari, solusi penyimpanan energi yang andal dan efisien sangat penting untuk mengoptimalkan dan mengendalikan manajemen energi (Mitali, et al., 2022), terutama pada malam hari atau saat radiasi matahari rendah. Berdasarkan evolusi sistem penyimpanan energi yang dijelaskan oleh (Mitali, et al., 2022), baterai memainkan peran penting sebagai sistem penyimpanan energi. Baterai dapat menyimpan kelebihan energi yang dihasilkan oleh PV untuk dan melepaskan energi ketika dibutuhkan (Sayed, et al., 2023). Dengan menggabungkan sistem PV dengan penyimpanan baterai, daerah terpencil dapat mencapai otonomi energi yang lebih besar, mengurangi ketergantungan pada generator diesel tradisional, dan meningkatkan ketahanan energi (Rekioua, 2023).

Mengoptimalkan pengoperasian sistem pembangkit listrik hibrida PV-baterai-generator sangat penting untuk memaksimalkan efisiensi energi, meminimalkan biaya, dan mengurangi dampak lingkungan (Rosyadi, et al., 2021). Sistem ini melibatkan interaksi kompleks antara berbagai komponen dan faktor dinamis, seperti radiasi matahari, permintaan beban, dan kondisi cuaca. Menurut (Rosyadi, et al., 2021), kontrol dan pengoperasian sistem PV-baterai-generator yang tepat di *microgrid* sangat penting untuk memastikan pasokan energi yang stabil dan andal. Penerapan metode pengoptimalan, seperti *genetic algorithms* (GA), *particle swarm optimization* (PSO), *ant colony optimization* (ACO), atau kombinasi dari berbagai metode kecerdasan buatan, menawarkan metode ampuh untuk menentukan ukuran dan strategi kontrol yang optimal untuk sistem energi terbarukan terintegrasi (Kanase-Patil, et al., 2020).

Dengan demikian, kebutuhan energi listrik di daerah terpencil menghadirkan tantangan signifikan yang membutuhkan solusi berkelanjutan dan

inovatif. Dengan memanfaatkan potensi energi terbarukan, khususnya teknologi PV dan menggabungkan solusi penyimpanan energi seperti baterai, maka daerah terpencil dapat membuka jalan menuju akses energi, pembangunan ekonomi, dan pelestarian lingkungan. Penerapan metode optimasi dalam merancang dan mengelola sistem pembangkit listrik tenaga surya hibrida sangat penting untuk memastikan pasokan energi yang efisien dan andal di wilayah yang kurang terisolasi ini.

Karena kondisi Indonesia sebagai negara kepulauan, maka elektrifikasinya tidak merata. Borneo Orangutan Survival Foundation (BOSF) merupakan salah satu area *off-grid* di Kalimantan, Indonesia. BOSF memiliki klinik untuk merawat orangutan dan kantor tempat karyawan bekerja. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengusulkan optimasi pembangkitan hibrida (PV, baterai, dan generator) di BOSF dengan menggunakan pendekatan *multi-objective optimization*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana penerapan metode *Multi-objective Optimization by Ratio Analysis* (MOORA) dalam pemilihan komponen terbaik dari PV dan baterai?
2. Bagaimana penerapan *Particle Swarm Optimization* (PSO) dalam memperlihatkan optimasi sistem hibrida PV-baterai-generator?

1.3 Tujuan Penelitian

Dari rumusan masalah maka dapat dirumuskan tujuan penelitian ini sebagai berikut:

1. Mendapatkan hasil peringkat PV dan baterai terbaik dari penerapan *Multi-objective Optimization by Ratio Analysis* (MOORA) dengan mempertimbangkan harga, *watt-peak* (Wp), dan efisiensi untuk PV dan harga, kapasitas (Ah), dan jangka hidup (lifespan) untuk baterai.

2. Memperoleh hasil optimasi sistem hibrida PV-baterai-generator dari penerapan *Particle Swarm Optimization* (PSO) berupa jumlah PV, baterai, dan generator yang digunakan dengan mempertimbangkan daya keluaran, harga, dan emisi CO₂.

1.4 Manfaat Penelitian

Sesuai dengan rumusan masalah dan tujuan dari penelitian di atas, maka diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan solusi optimal bagi pembangkit listrik hibrida PV-baterai-genset di lokasi manapun dan dapat menjadi referensi atau acuan bagi peneliti lain dalam mengembangkan metode penelitian yang sama maupun berbeda.

1.5 Ruang Lingkup

Untuk membatasi kajian agar lebih spesifik dan terarah, maka analisis ini dibatasi pada pembahasan sebagai berikut:

1. Penelitian ini bersifat simulasi dimana implementasi program menggunakan *Python* pada *software* VSCode.
2. Data PV dan baterai yang digunakan dalam penelitian ini adalah data aktual yang dimiliki oleh PT Solar Power Indonesia.
3. Untuk metode MOORA, hanya diperhitungkan tiga *objective*, dimana untuk PV adalah *watt-peak* (Wp), harga, dan efisiensi dan untuk baterai adalah kapasitas (Ah), harga, dan jangka hidup (*lifespan*).
4. Untuk metode PSO, yang menjadi *objective* penilaian sistem hibrida PV-baterai-generator adalah daya keluaran, harga, dan emisi CO₂ dengan memperlihatkan jumlah PV, baterai, dan generator guna tercapainya kondisi sistem hibrida yang optimal.

BAB II

LANDASAN TEORI

Sistem pembangkit hibrida adalah solusi inovatif yang menggabungkan berbagai sumber energi untuk memenuhi kebutuhan listrik. Bagian ini akan menyajikan literatur studi dari berbagai referensi yang relevan dan akurat mengenai sistem pembangkit hibrida, PV, baterai, generator, dan *multi-objective optimization*.

2.1 Konsep dan Komponen Sistem Pembangkit Hibrida

Dalam upaya untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil yang semakin langka dan berkontribusi pada perubahan iklim, sistem pembangkit hibrida telah menjadi pilihan yang semakin populer. Konsepnya adalah mengintegrasikan beberapa jenis sumber energi untuk menciptakan sistem yang lebih andal, efisien, dan berkelanjutan. Dalam sistem pembangkit hibrida, sumber energi terbarukan seperti surya, angin, atau hidro digabungkan dengan sumber energi konvensional seperti pembangkit listrik berbahan bakar fosil atau pembangkit listrik nuklir. Melalui penggabungan ini, sistem dapat mencapai kestabilan pasokan energi, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

Salah satu tantangan utama yang dihadapi negara-negara berkembang untuk memastikan akses listrik secara merata adalah investasi modal besar-besaran yang diperlukan untuk mengembangkan dan memperluas infrastruktur jaringan ke daerah pedesaan dan terpencil (*off-grid*) (Wassie & Ahlgren, 2023). Penggunaan sistem pembangkit hibrida telah terbukti menjadi pendekatan alternatif yang hemat biaya pada daerah terpencil (Olabode, et al., 2021).

Konsep dasar di balik sistem pembangkit hibrida adalah diversifikasi sumber energi. Dengan menggabungkan berbagai jenis sumber energi, sistem ini dapat mengatasi fluktuasi produksi yang sering kali terjadi pada sumber energi terbarukan. Misalnya, ketika cuaca buruk mengurangi produksi surya atau angin, sumber energi konvensional dapat mengambil alih untuk menjaga pasokan energi

yang stabil. Konsep ini memanfaatkan kelebihan masing-masing sumber energi dan menyediakan solusi untuk mengatasi kekurangan dan fluktuasi yang mungkin terjadi pada sumber energi tunggal (*stand-alone*) (Mohammed, et al., 2014).

Dalam sistem pembangkit hibrida, sumber energi yang biasanya digunakan merupakan kombinasi sumber energi terbarukan (seperti tenaga surya, angin, hidro, atau biomassa) dengan penyimpanan energi (seperti baterai) atau sumber energi konvensional (seperti generator) (Tsai, et al., 2020). Tujuan utama dari sistem pembangkit hibrida adalah meningkatkan efisiensi energi, mengurangi biaya operasional, dan mengurangi emisi gas rumah kaca dan dampak negatif lingkungan lainnya (Mohammed, et al., 2014; Olabode, et al., 2021). Dengan memasukkan sumber energi terbarukan yang bersih seperti surya dan angin, sistem ini dapat mengurangi ketergantungan pada pembangkit listrik berbahan bakar fosil yang menghasilkan emisi gas rumah kaca berbahaya.

Terkhususnya pada daerah pedesaan atau terpencil (*off-grid*), sistem pembangkit hibrida terdiri dari beberapa komponen penting yang bekerja bersama untuk menghasilkan dan mengatur pasokan listrik. Pengelolaan energi yang terintegrasi adalah bagian penting dari sistem pembangkit hibrida (Olabode, et al., 2021). Ini mencakup perangkat lunak dan sistem kontrol yang canggih yang memantau produksi energi dari berbagai sumber, memprediksi permintaan energi, dan memutuskan bagaimana mengalokasikan sumber energi secara optimal. Pengelolaan yang baik dapat meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem secara keseluruhan. Berikut adalah penjelasan mengenai beberapa komponen utama dalam sistem pembangkit hibrida yang digunakan pada penelitian ini.

2.1.1 PV

Energi matahari adalah sumber energi utama bagi planet kita. Matahari menghasilkan lebih dari cukup energi setiap hari untuk memenuhi kebutuhan seluruh populasi dunia selama bertahun-tahun. Namun, sebagian besar potensi energi matahari ini belum dimanfaatkan dengan baik. Selama ribuan tahun, manusia telah menggunakan matahari untuk pemanasan dan penerangan, tetapi baru dalam beberapa dekade terakhir manusia mulai memahami potensi besar yang dapat dihasilkan oleh energi matahari dalam bentuk listrik.

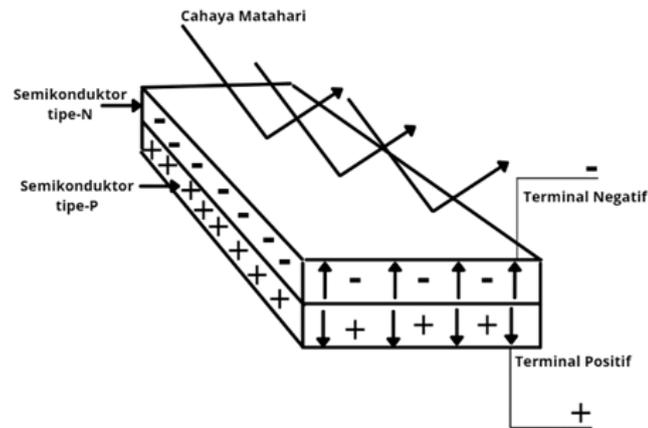
Secara etimologi, istilah fotovoltaik atau dalam bahasa Inggris disebut *photovoltaic*, berasal dari kata *photo* yang berarti cahaya dan kata *volt* yang merupakan nama satuan gaya gerak listrik (gaya yang menyebabkan gerakan elektron) (Boyle, 2004). Sehingga, dapat dikatakan bahwa sel surya atau yang biasa disebut juga sel fotovoltaik (PV) pada dasarnya adalah teknologi yang mengubah sinar matahari (foton) langsung menjadi listrik (tegangan dan arus listrik). Hal ini dapat diperoleh melalui efek fotovoltaik, proses di mana dua bahan yang berbeda dalam kontak dekat menghasilkan tegangan listrik ketika terkena cahaya atau energi radiasi lainnya (Guerra, et al., 2018). Dengan adanya PV, manusia dapat memenuhi kebutuhan energi tanpa perlu mengandalkan bahan bakar fosil yang terbatas dan merusak lingkungan. PV telah menjadi simbol revolusi energi terbarukan, dan pertumbuhannya yang pesat telah membentuk lanskap energi global.

Pemanasan global dan peningkatan polusi di dunia telah menyadarkan akan pentingnya beralih ke sumber energi yang lebih bersih, berkelanjutan, dan ramah lingkungan. Dalam beberapa dekade terakhir, fotovoltaik (PV) telah menjadi fokus utama sebagai teknologi sumber energi terbarukan yang menjanjikan (Durganjali, et al., 2019). Teknologi ini menawarkan potensi yang besar untuk memenuhi kebutuhan listrik di daerah terpencil di Indonesia, di mana akses ke jaringan listrik nasional seringkali terbatas.

Bagian berikutnya akan memberikan penjelasan prinsip kerja dari PV, perkembangan teknologi PV, ukuran pemilihan PV, dan aplikasi PV oleh peneliti di beberapa negara.

2.1.1.1 Prinsip Kerja

Energi matahari adalah salah satu sumber energi terbarukan yang paling berlimpah di bumi. Penggunaan teknologi fotovoltaik (PV) memungkinkan kita untuk mengkonversi sinar matahari langsung menjadi listrik. Sistem fotovoltaik menghasilkan jumlah energi tahunan yang bergantung pada berbagai kondisi, salah satunya adalah jumlah total radiasi matahari tahunan yang tersedia di lokasi (Boyle, 2004). Prinsip kerja sel surya diilustrasikan pada Gambar 1.



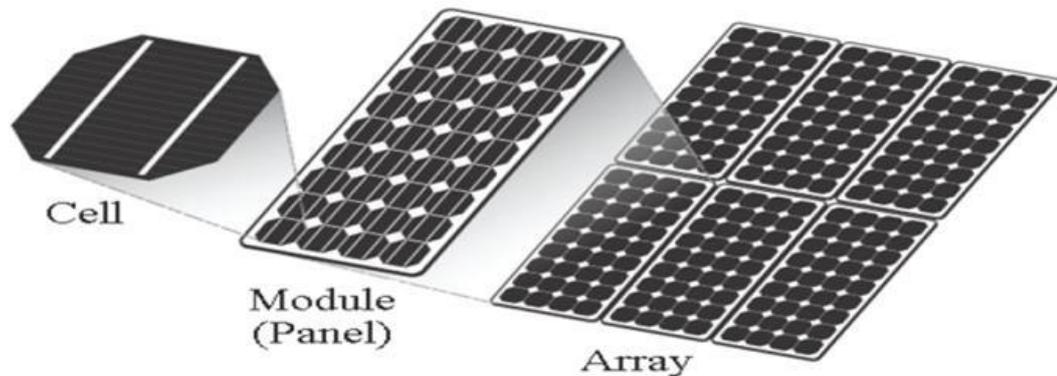
Gambar 1 Prinsip kerja PV

Panel surya terdiri dari lapisan material semikonduktor yang dirancang untuk menyerap cahaya matahari. Cahaya matahari yang sangat kecil disebut foton. Ketika sinar matahari mengenai panel, foton cahaya diserap oleh material semikonduktor. Foton yang mengenai atom semikonduktor sel surya ini, akan menimbulkan energi yang besar untuk memisahkan elektron dari struktur atom. Elektron yang terpisah dan bermuatan negatif akan bebas bergerak pada daerah pita konduksi dari material semikonduktor tersebut sehingga akan ada yang disebut *hole* atau kekosongan pada struktur muatan positif (Guerra, et al., 2018). Semakin banyak foton yang diserap, semakin banyak pasangan ini yang terbentuk.

Area semikonduktor dengan elektron bebas negatif bertindak sebagai donor elektron atau disebut dengan semikonduktor tipe N. Sebaliknya, area semikonduktor *hole* sebagai penerima elektron disebut semikonduktor tipe P. Persimpangan antara daerah positif dan negatif menimbulkan energi yang mendorong elektron dan *hole* bergerak ke arah berlawanan (Guerra, et al., 2018). Pergerakan ini menghasilkan arus listrik DC yang dapat digunakan untuk memberi daya peralatan atau disimpan dalam baterai.

Secara sederhana, ketika sel surya menyerap cahaya matahari, maka akan tercipta pergerakan antar elektron dalam semikonduktor yang menghasilkan arus listrik. Alhasil, arus listrik ini dapat digunakan sebagai sumber energi bagi perangkat listrik yang disambungkan.

Untuk meningkatkan daya keluaran, beberapa sel surya disusun dalam panel surya yang lebih besar. Panel-panel ini kemudian dapat dikombinasikan menjadi array surya yang lebih besar. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Panel surya (Sel, Modul, Array) (*AbdElAziz, et al., 2018*)

2.1.1.2 Perkembangan Teknologi PV

Awal mula perkembangan teknologi PV bermula pada penemuan efek fotovoltaiik oleh Alexandre-Edmond Becquerel pada tahun 1839 (El-Shimy & Abdo, 2015). Pada saat itu, efek ini hanya merupakan penemuan ilmiah tanpa aplikasi praktis. Namun, penemuan ini membuka jalan bagi perkembangan sel surya pada masa mendatang.



Gambar 3 Jenis-jenis PV (*Dulaimi, 2017*)

Seiring berkembangnya teknologi, berbagai jenis bahan dan teknologi semikonduktor tersedia untuk merancang sel PV dengan biaya lebih murah serta efisiensi konversi yang tinggi. (Durganjali, et al., 2019) menjabarkan beberapa jenis PV dari beberapa generasi, namun yang umumnya dikenal diantaranya

adalah *monocrystalline silicon solar cell*, *polycrystalline silicon solar cell*, dan *thin film solar cell* (lihat Gambar 2).

Terdapat tiga generasi sel surya berbeda dalam teknologi fotovoltaik yang dipaparkan oleh (Durganjali, et al., 2019). Generasi pertama adalah sel surya berbasis wafer silikon, yang terdiri dari dua sub-kelompok: sel surya silikon mono/kristal tunggal (*monocrystalline*) dan poli/kristal ganda (*polycrystalline*). Teknologi PV generasi pertama terbuat dari struktur kristal yang menggunakan Si untuk menghasilkan sel surya. Sel-sel ini dihubungkan bersama untuk membuat modul PV (El-Shimy & Abdo, 2015).

Selanjutnya, generasi kedua dari teknologi ini terdiri dari sel surya film tipis (*thin film*) yang lebih ekonomis dibandingkan dengan generasi pertama. Hal ini mencakup sel surya silikon amor (*amorphous silicon thin film*, a-Si), sel surya kadmium telluride (*cadmium telluride*, CdTe), dan sel surya tembaga indium galium di-selenida (*copper indium gallium di-selenide*, CIGS). Jika dibandingkan dengan teknologi generasi pertama, teknologi film tipis ini memperlihatkan pengurangan biaya material dan produksi tanpa mempengaruhi masa pakai sel, serta bahayanya terhadap lingkungan. Tidak seperti PV kristalin, di mana potongan semikonduktor diapit di antara panel kaca untuk membuat modul, panel film tipis dibuat dengan menempatkan lapisan tipis bahan tertentu pada substrat kaca atau baja tahan karat (El-Shimy & Abdo, 2015).

Yang terakhir adalah generasi ketiga yang diiming-imingi menjadi teknologi yang menjanjikan, namun belum diinvestigasi secara komersial dan mendetail. Beberapa tipe sel surya generasi ketiga yang dikembangkan adalah sel surya berbasis nanokristal, sel surya berbasis polimer, sel surya sensitif pewarna, dan sel surya terkonsentrasi (Durganjali, et al., 2019).

Selanjutnya, untuk beberapa tahun terakhir ini, terdapat sekitar sembilan teknologi untuk pembuatan sel surya transparan, dimana titik fokus penelitian saat ini karena permintaan pasar dan potensi aplikasi sel surya transparan (TSC). Pusat penelitian yang melaporkan beberapa keberhasilan dengan TSC berada di Jepang, Jerman, Amerika Serikat, dan India (Durganjali, et al., 2019).

2.1.1.3 Ukuran dan Pemilihan Sistem PV pada Daerah *Off-Grid*

Daerah *off-grid*, yang sering kali terletak di pedalaman atau di wilayah yang sulit dijangkau, memiliki tantangan unik dalam memenuhi kebutuhan energi. Dalam banyak kasus, infrastruktur listrik konvensional tidak tersedia, sehingga energi harus dihasilkan secara mandiri. Salah satu solusi yang paling efektif dan berkelanjutan adalah menggunakan sistem fotovoltaik (PV) atau panel surya. Pentingnya pemilihan sistem PV yang tepat dan pemahaman tentang berbagai ukuran sistem menjadi faktor utama dalam menjalankan operasi *off-grid* yang efisien.

Dalam menentukan ukuran sebuah sistem PV, hal utama yang perlu diketahui adalah lokasi yang ingin dipasang PV beserta daya beban. Selanjutnya, pemilihan jenis PV dapat dilakukan dengan mempertimbangkan kapasitas, harga, dan efisiensi daripada PV tersebut (Dulaimi, 2017). Apabila semua telah diketahui, maka rumus sistem PV pada daerah *off-grid* dapat dikalkulasikan sebagai berikut:

$$\text{Kapasitas Sistem PV (kWp)} = \frac{\text{Daya bulanan (kWh)}}{\text{Jam puncak matahari (h)}} \quad (1)$$

$$\text{Hasil Sistem PV (kWh/kWp)} = \frac{\text{Daya maksimum tahunan (kWh)}}{\text{Kapasitas sistem PV (kWp)}} \quad (2)$$

$$\text{Jumlah modul PV yang dibutuhkan} = \frac{\text{Kapasitas Sistem PV (kWp)}}{\text{Nilai Daya Modul PV (W)}} \quad (3)$$

Penentuan lokasi yang ingin dipasang PV harus memperhatikan potensi radiasi matahari karena merupakan sumber dari pembangkit listrik ini. Dengan berkembangnya teknologi, radiasi matahari sudah dapat diperoleh dengan mudah melalui website seperti NASA. Hal yang perlu diketahui adalah titik latitude dan longitude daripada lokasi tersebut lalu nilai radiasi matahari akan muncul. Pada penelitian ini, data radiasi matahari langsung diperoleh pada library Python berupa nilai PoA yang akan dijelaskan pada Bab III.

Selanjutnya, perhitungan kebutuhan energi pada daerah *off-grid* dapat mencakup beberapa aspek seperti:

1. Konsumsi rumah tangga, yaitu listrik yang digunakan untuk kebutuhan rumah tangga.
2. Kebutuhan bisnis, yaitu listrik yang diperlukan agar operasional, produksi, dan pelayanan bisnis dapat berjalan lancar.
3. Kebutuhan transportasi, yaitu kebutuhan pengisian daya untuk kendaraan listrik.

2.1.2 Penyimpanan Energi

Penyimpanan energi merupakan proses menangkap energi yang dihasilkan dari sumber yang berlimpah dan menyimpannya untuk digunakan saat diperlukan. Teknologi ini adalah elemen penting dalam sistem energi modern karena memungkinkan integrasi sumber energi yang fluktuatif, seperti energi surya dan angin, dan mengoptimalkan penggunaan energi. Dalam konteks energi terbarukan, penyimpanan energi memainkan peran krusial dalam mengatasi tantangan keterbatasan pasokan energi saat matahari tidak bersinar atau angin tidak bertiup. Sehingga dapat dikatakan bahwa tujuan utama dari penyimpanan energi adalah untuk mengimbangi permintaan dan pasokan energi (Rekioua, 2023). Selain itu, penyimpanan energi juga dapat berperan dalam meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem kelistrikan, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan memberikan akses energi yang lebih luas dan terjangkau (Mitali, et al., 2022).

2.1.2.1 Jenis-jenis Penyimpanan Energi

Terdapat beberapa teknologi penyimpanan energi yang telah dikembangkan dengan karakteristik dan keunggulan yang berbeda-beda. Beberapa jenis penyimpanan energi yang umum dijelaskan oleh (Rekioua, 2023; Ter-Gazarian, 2020) meliputi:

1. Penyimpanan Elektrokimia: Penyimpanan elektrokimia merujuk pada jenis sistem penyimpanan energi yang melibatkan konversi energi kimia menjadi energi listrik dan sebaliknya melalui reaksi elektrokimia. Beberapa contoh diantaranya adalah baterai dan sel bahan bakar (*fuel cell*). Baterai adalah penyimpanan energi elektrokimia yang paling dikenal dan umum. Baterai bekerja berdasarkan reaksi elektrokimia antara dua

elektroda yang terendapkan dalam elektrolit (Rekioua, 2023). Ketika baterai diisi, energi listrik diubah menjadi energi kimia dengan menggerakkan ion-ion di antara elektroda dan elektrolit. Saat baterai diperlukan untuk menyediakan daya, energi kimia ini diubah kembali menjadi energi listrik. Selanjutnya, sel bahan bakar adalah jenis penyimpanan energi elektrokimia yang berbeda. Mereka menghasilkan listrik dengan mengoksidasi bahan bakar, seperti hidrogen atau metanol, di dalam sel bahan bakar untuk menghasilkan energi listrik dan produk sampingan yang umumnya berupa air atau karbon dioksida (Rekioua, 2023). Sel bahan bakar sering digunakan dalam aplikasi yang memerlukan daya tahan dan efisiensi tinggi, seperti kendaraan listrik dan peralatan berat.

2. Penyimpanan Mekanikal: Jenis penyimpanan ini melibatkan pemanfaatan energi mekanikal untuk menyimpan dan mengeluarkan energi. Contoh dari teknologi ini adalah pompa hidro, *flywheel*, gravitasi, dan kompresi udara. *Flywheel* adalah perangkat berbentuk cakram yang dapat berputar dengan kecepatan tinggi untuk menyimpan energi kinetik (Ter-Gazarian, 2020). Ketika listrik digunakan untuk memutar *flywheel*, energi listrik diubah menjadi energi kinetik, yang kemudian disimpan dalam putaran *flywheel*. Saat energi diperlukan, *flywheel* memperlambat putarannya, mengubah kembali energi kinetik menjadi energi listrik. Keuntungan *flywheel* adalah bahwa mereka memiliki umur layanan yang panjang dan waktu tanggapan yang cepat. Selanjutnya, penyimpanan energi gravitasi melibatkan pengangkatan massa berat ke ketinggian tertentu untuk menyimpan energi potensial gravitasi (Ter-Gazarian, 2020). Saat energi diperlukan, massa tersebut dilepaskan, dan energi potensialnya diubah menjadi energi kinetik yang digunakan untuk menghasilkan listrik. Teknologi penyimpanan energi gravitasi umumnya digunakan dalam skala besar dan memerlukan struktur berat yang kuat. Berikut adalah penyimpanan tekanan udara yang melibatkan kompresi udara menjadi energi listrik dan penyimpanannya dalam tangki tekanan tinggi (Ter-Gazarian, 2020). Saat energi diperlukan, udara yang dikompresi dilepaskan, dan energi mekanis yang dihasilkan

digunakan untuk menggerakkan generator listrik. Teknologi penyimpanan tekanan udara memiliki keunggulan dalam skala besar dan kemampuan untuk menyimpan energi dalam jumlah besar.

3. Penyimpanan Listrik: Proses penyimpanan energi listrik melibatkan pengubahan energi listrik menjadi bentuk kimia, potensial, kinetik, atau magnetik, yang dapat dilepaskan kembali sebagai energi listrik saat diperlukan. Contoh penyimpanan ini adalah kapasitor super, kapasitor elektrolit padat, dan termal. Superkapasitor, atau ultrakapasitor, adalah jenis penyimpanan listrik yang berbeda dari baterai konvensional. Mereka menyimpan energi dalam bentuk elektroda dan elektrolit, yang memungkinkan mereka untuk mengisi dan mengosongkan energi secara jauh lebih cepat daripada baterai (Ter-Gazarian, 2020). Hal ini membuat kapasitor jenis ini sangat sesuai untuk aplikasi yang memerlukan pengecasan dan pelepasan energi yang cepat, seperti sistem pengereman regeneratif dalam kendaraan listrik. Selain itu, terdapat juga penyimpanan yang disebut kapasitor elektrolit padat. Kapasitor elektrolit padat adalah perkembangan terbaru dalam teknologi penyimpanan listrik. Mereka menggunakan elektrolit padat sebagai pengganti elektrolit cair dalam kapasitor konvensional, meningkatkan keamanan dan kemampuan penyimpanan energi (Ter-Gazarian, 2020). Kapasitor elektrolit padat memiliki potensi untuk menggantikan beberapa aplikasi baterai dalam jangka panjang karena memiliki umur layanan yang lebih lama, waktu tanggapan yang cepat, dan kemampuan untuk menangani banyak siklus pengisian dan pengosongan. Kemudian, penyimpanan energi termal melibatkan penyimpanan panas yang dihasilkan dari berbagai sumber energi, seperti matahari atau proses industri, dalam bentuk energi panas yang dapat digunakan saat diperlukan (Ter-Gazarian, 2020). Hal ini merupakan cara efisien untuk menghasilkan listrik dengan menggunakan panas yang dihasilkan selama siang hari atau dalam produksi energi berlebih, dan kemudian mengonsumsinya saat permintaan energi tinggi.

2.1.2.2 Baterai sebagai Solusi Penyimpanan Energi

Baterai adalah hasil dari perkembangan ilmiah yang telah berlangsung selama berabad-abad. Dari penemuan inilah dapat disimpulkan sebuah definisi daripada baterai dimana baterai adalah perangkat yang dapat menyimpan energi dalam bentuk kimia dan mengubahnya menjadi listrik saat diperlukan (Linden & Reddy, 2002). Baterai telah menjadi solusi yang semakin penting dalam penyimpanan energi karena kemampuannya untuk menyimpan energi dalam jumlah besar dan mengeluarkannya secara efisien. Oleh karena itu, banyak jenis baterai yang telah dikembangkan, dari baterai timbal-asam pertama hingga baterai lithium-ion modern yang digunakan dalam ponsel pintar dan kendaraan listrik.

Baterai sering diklasifikasikan sebagai baterai primer atau sekunder (Heth, 2019; Ter-Gazarian, 2020). Dalam kedua klasifikasi tersebut, energi potensial kimia diubah menjadi energi listrik. Untuk baterai primer, juga dikenal sebagai baterai *non-rechargeable* atau baterai sekali pakai, dirancang untuk digunakan sekali dan kemudian dibuang setelah habis. Mereka tidak dapat diisi ulang dan harus digantikan dengan baterai baru setelah kapasitas mereka habis. Beberapa karakteristik utama dari baterai primer adalah:

1. Tidak dapat diisi ulang: Baterai primer tidak dirancang untuk diisi ulang. Setelah energi mereka habis, mereka harus dibuang dan diganti.
2. Kapasitas Terbatas: Kapasitas penyimpanan energi baterai primer umumnya lebih rendah dibandingkan dengan baterai sekunder. Hal ini membuat mereka cocok untuk aplikasi yang membutuhkan daya tahan jangka pendek.
3. Ringan dan Portabel: Baterai primer sering memiliki berat yang lebih ringan dan ukuran yang lebih kompak dibandingkan baterai sekunder, membuat mereka cocok untuk perangkat elektronik portabel.

Adapun jenis-jenis baterai primer yang umum digunakan adalah:

1. Baterai Timbal-Asam: Baterai ini umum digunakan dalam kendaraan bermotor konvensional, peralatan elektronik, dan sistem cadangan daya.

2. Baterai Alkali: Baterai alkali adalah jenis baterai primer yang umum digunakan dalam perangkat elektronik konsumen seperti *remote control*, mainan, dan jam dinding.
3. Baterai Seng-Karbon: Jenis baterai ini sering digunakan dalam perangkat sederhana seperti jam tangan dan peralatan elektronik rendah daya.

Selanjutnya, baterai sekunder, juga dikenal sebagai baterai *rechargeable* atau baterai isi ulang, adalah baterai yang dapat diisi ulang setelah energi mereka habis. Mereka dirancang untuk digunakan berulang kali dan memiliki kapasitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan baterai primer. Beberapa karakteristik utama dari baterai sekunder adalah:

1. Dapat Diisi Ulang: Baterai sekunder dapat diisi ulang dengan menghubungkannya ke sumber daya listrik, seperti pengisi daya atau charger.
2. Kapasitas Tinggi: Baterai sekunder memiliki kapasitas penyimpanan energi yang lebih tinggi daripada baterai primer, menjadikannya pilihan yang baik untuk perangkat yang memerlukan daya tahan jangka panjang.
3. Berat dan Ukuran Lebih Besar: Baterai sekunder cenderung lebih berat dan lebih besar daripada baterai primer dengan kapasitas yang setara. Hal ini kadang-kadang membatasi penggunaan mereka dalam perangkat portabel.
4. Ekonomis dan Ramah Lingkungan: Meskipun biaya awalnya lebih tinggi daripada baterai primer, baterai sekunder dapat menghemat uang dalam jangka panjang karena mereka dapat diisi ulang dan digunakan kembali. Ini juga mengurangi limbah baterai.

Adapun beberapa jenis baterai sekunder yang umum digunakan adalah:

1. Baterai Timbal-Asam (*Lead-Acid*): Baterai ini telah digunakan secara luas dalam aplikasi seperti sistem tenaga cadangan, kendaraan listrik, dan pembangkit listrik tenaga surya. Meskipun merupakan teknologi lama, baterai timbal-asam masih relevan karena harganya yang relatif rendah dan dapat diandalkan.

2. Baterai Ion Litium: Baterai ion litium telah menjadi pilihan populer untuk aplikasi portabel, seperti ponsel pintar dan laptop, serta kendaraan listrik. Baterai jenis ini memiliki energi yang tinggi, bobot yang ringan, dan umur siklus yang panjang, sehingga ideal untuk penggunaan sehari-hari.
3. Baterai Natrium-Ion: Baterai ini adalah alternatif yang sedang dikembangkan untuk baterai ion litium. Natrium merupakan bahan baku yang lebih melimpah dan lebih terjangkau daripada litium, sehingga diharapkan dapat mengurangi biaya produksi baterai.

2.1.2.3 Ukuran dan Pemilihan Penyimpanan Energi

Ukuran baterai dalam sistem PV dan angin membutuhkan pertimbangan cermat terhadap permintaan energi, produksi energi, kapasitas baterai, kedalaman pelepasan baterai, efisiensi baterai, otonomi, voltase sistem, dan faktor lingkungan. Oleh karena itu, hal pertama yang perlu dipikirkan dalam menentukan ukuran baterai adalah seberapa banyak penyimpanan yang diinginkan dalam sistem PV *off-grid* ini (Dulaimi, 2017). Ukuran baterai yang tepat memastikan bahwa sistem dapat secara efisien menyimpan dan memanfaatkan kelebihan energi yang dihasilkan oleh sistem energi terbarukan dan menyediakan daya yang andal selama sumber utama tidak dapat menghasilkan energi atau hanya sedikit (Rekioua, 2023).

Adapun untuk perhitungan kapasitas baterai dapat dilihat pada rumus di bawah:

$$C_{batt} = \frac{E \cdot Aut}{V_{batt} \cdot DoD \cdot Aut \cdot \eta_{batt}} \quad (4)$$

dimana E adalah energi beban, Aut adalah hari-hari otonomi, V_{batt} adalah tegangan baterai, DoD adalah *Depth of Discharge*, dan η_{batt} adalah efisiensi baterai.

2.1.3 Generator Diesel

Generator diesel merupakan pembangkit yang menggunakan mesin pembakaran internal yang berbahan bakar solar/diesel untuk menghasilkan daya listrik. Pembangkit ini banyak digunakan sebagai cadangan energi di negara-

negara dengan frekuensi kekurangan listrik baik pada sektor perumahan maupun komersial (Mobarra, et al., 2022). Keunggulan dari generator diesel adalah stabilitas, keandalan, dan kemudahan produksinya, sehingga sangat populer digunakan di daerah terpencil untuk menghasilkan daya dalam jumlah besar (Hidalgo-Leon, et al., 2022). Meskipun demikian, generator diesel ini memiliki beberapa kelemahan, seperti biaya dan emisi CO₂ yang tinggi (Rodríguez-Gallegos, et al., 2018).

Studi sistem hibrida PV-baterai dilakukan oleh (Mulenga, et al., 2022) untuk memenuhi elektrifikasi di Zambia. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pengoperasian generator diesel yang berdiri sendiri (*stand alone*) tidak berkelanjutan secara ekonomi dan memiliki LCoE yang tinggi. Oleh karena itu, sistem hibrida biasanya ingin mencapai pemenuhan kebutuhan beban dengan memaksimalkan pemanfaatan sumber energi terbarukan dengan penyimpanan energi dan generator hanya sebagai cadangan darurat.

Untuk menghitung total emisi CO₂ tahunan dari sebuah generator diesel dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Total Emisi CO}_2 \text{ Tahunan} &= \text{Konsumsi solar tahunan (L)} \times \\ &\text{Berat jenis solar (kg/L)} \times \text{Faktor emisi CO}_2 \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 Penerapan Sistem Pembangkit Hibrida di Berbagai Negara

Sebagai negara kepulauan dengan beragam potensi sumber energi terbarukan, Indonesia telah melihat pengembangan sistem pembangkit hibrida. (Rosyadi, et al., 2021) memperlihatkan hasil peningkatan kendalan sistem dari hibrida PV-baterai-genset yang dianalisis menggunakan MATLAB/Simulink dan Homer Pro dengan *Cycle Charging Strategy*. Selanjutnya, penelitian di negara tetangga, Malaysia, yang dilakukan oleh (See, et al., 2022) membandingkan analisis tekno-ekonomi dari beberapa skenario sistem pembangkit hibrida DG, PV/WT/Baterai/DG, PV/Baterai/DG/ dan PV/WT/Baterai. Hasil menunjukkan bahwa hibrida PV/WT/Baterai/DG meruokan skenario optimal dengan *Net Present Cost* (NPC) sebesar \$188.814 dan *Cost of the Electricity* (COE) adalah sebesar \$0,198/kWh. Adapula penelitian analisis tekno ekonomi terhadap

beberapa sistem hibrida di Taiwan yang dilakukan oleh (Tsai, et al., 2020) memperlihatkan bahwa COE dari PV/DG/penyimpanan energi tinggi namun total emisi CO₂ tahunan berkurang sebesar 31,63% yang memiliki manfaat besar bagi lingkungan.

2.2.1 Keuntungan Sistem Pembangkit Hibrida

Penelitian yang dilakukan oleh (Mohammed, et al., 2014; Das, et al., 2021), menerangkan bahwa penerapan sistem generasi hibrida menawarkan berbagai keuntungan bagi dunia dan lingkungan. Pertama, kombinasi sumber daya terbarukan dapat meningkatkan keandalan pasokan listrik dan mengurangi ketergantungan pada sumber daya fosil. Kedua, sistem ini dapat membantu dalam mengurangi emisi gas rumah kaca, sehingga berkontribusi pada upaya global untuk mengatasi perubahan iklim. Yang ketiga, sistem generasi hibrida juga dapat membuka peluang ekonomi baru dalam industri energi terbarukan.

2.2.2 Tantangan dan Kendala

Meskipun sistem pembangkit hibrida menawarkan berbagai keuntungan yang disebutkan sebelumnya, namun penerapannya juga dihadapkan pada beberapa tantangan dan kendala yang disebutkan pada penelitian yang dilakukan oleh (Mohammed, et al., 2014; Das, et al., 2021). Diantaranya adalah biaya investasi awal yang tinggi, kebutuhan akan infrastruktur yang memadai, dan peraturan yang mendukung. Selain itu, integrasi beberapa sumber energi dapat menyulitkan sistem kontrol dan manajemen energi, yang memerlukan penelitian lebih lanjut untuk mencapai kinerja optimal.

2.3 Optimasi Pembangkit Hibrida Energi Terbarukan

Optimasi pembangkit hibrida energi terbarukan merupakan suatu pendekatan yang digunakan untuk merancang dan mengatur sistem pembangkit energi yang terdiri dari beberapa sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya, angin, hidro, biomassa, dan lainnya. Tujuan dari optimasi ini adalah untuk mencapai kombinasi sumber energi yang optimal sehingga dapat menghasilkan energi dengan efisien, berkelanjutan, dan mengurangi emisi CO₂ (Thirunavukkarasu, et al., 2023).

Dalam studi yang dilakukan oleh (Thirunavukkarasu, et al., 2023), terdapat 7 jenis masalah optimasi yang disingkatnya diperlihatkan oleh Gambar 3.

Kendala	Variabel	Struktur Masalah	Sifat Persamaan	Nilai yang Diizinkan dari Variabel Desain	Keterpisahan Fungsi	Jumlah Tujuan Fungsi
<ul style="list-style-type: none"> • Ada kendala • Tanpa kendala 	<ul style="list-style-type: none"> • Statis • Dinamis 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimal • Tidak optimal 	<ul style="list-style-type: none"> • Linear • Non Linear • Geometris • Kuadratis 	<ul style="list-style-type: none"> • Bilangan Bulat • Bilangan Nyata 	<ul style="list-style-type: none"> • Dapat dipisahkan • Tidak dapat dipisahkan 	<ul style="list-style-type: none"> • Tujuan tunggal (<i>single objective</i>) • Tujuan multi (<i>multi objectives</i>)

Gambar 4 Jenis-jenis masalah optimasi (Thirunavukkarasu, et al., 2023)

Untuk memecahkan masalah teknik dalam keadaan dan kendala tertentu, proses optimisasi telah diperkenalkan pada aplikasi yang berbeda. Untuk masalah tertentu, optimasi matematis dapat didefinisikan sebagai proses untuk mendapatkan strategi terbaik atau menentukan kondisi untuk memaksimalkan faktor yang diinginkan atau meminimalkan faktor yang tidak diinginkan, yang disebut fungsi tujuan. Keterkaitan matematis antara tujuan, kendala, dan variabel keputusan mencoba untuk menentukan algoritme yang tepat dan menunjukkan betapa sulitnya mendapatkan solusi optimal untuk masalah optimisasi. Jenis masalah optimasi diklasifikasikan dalam hal jumlah tujuan, jenis variabel, jenis kendala, sifat optimasi, sifat persamaan, dan struktur masalah.

Dalam beberapa tahun terakhir, sejumlah besar variabel kontrol harus dioptimalkan sesuai dengan batasan dalam berbagai masalah pengoptimalan dunia nyata. Optimasi desain dievaluasi berdasarkan jumlah parameter objektif sebagai pendekatan tunggal atau multi-tujuan. Pendekatan tujuan tunggal (*single objective*) berurusan dengan hanya satu fungsi tujuan tetapi tidak memenuhi beberapa set tujuan secara bersamaan. Sulit untuk mempertahankan keragaman yang tepat dalam algoritme evolusioner untuk fungsi tujuan tunggal. Pendekatan multi-tujuan (*multi-objective*) secara bersamaan akan memperlakukan beberapa tujuan. Untuk mengoptimalkan fungsi tujuan, diperlukan variabel pengoptimalan yang sesuai, yang akan bervariasi dalam batas atas dan bawahnya dalam persamaan pengoptimalan.

Teknik optimasi sangat penting untuk mencapai sistem manajemen dan penyimpanan energi yang efisien dan andal. Teknik-teknik ini terdiri dari merancang strategi yang tepat untuk menyeimbangkan pembangkit listrik dan

permintaan beban, bahkan ketika sumber daya terbarukan yang tidak pasti digunakan. Hal ini dicapai melalui penggunaan algoritme kontrol yang dapat memprediksi ketersediaan energi terbarukan dan menyesuaikan bebannya (Gómez, et al., 2023).

Selanjutnya, klasifikasi teknik optimasi yang diperlihatkan pada Gambar 4 juga dijelaskan pada studi yang dilakukan oleh (Thirunavukkarasu, et al., 2023). Untuk melakukan optimasi ada hal yang perlu diminimalkan dan ada pula hal yang perlu dimaksimalkan. Cara atau teknik untuk melakukan optimasi adalah secara klasikal, kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), dan teknik hibrida. Metode klasik merupakan perhitungan kalkulus diferensial sementara kecerdasan buatan mendekati proses pembelajaran dan pelatihan otak tanpa memerlukan pemodelan matematika apa pun. Teknik kecerdasan buatan adalah prosedur tingkat tinggi yang menggunakan alat perangkat lunak didasarkan pada sekumpulan program komputer.



Gambar 5 Klasifikasi teknik optimasi (Thirunavukkarasu, et al., 2023)

Metode kecerdasan buatan mencakup berbagai teknik seperti *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Tabu Search* (TS), *Simulated Annealing* (SA), *Harmonic Search* (HS), dan lainnya. Di sisi lain, metode iteratif dapat mencakup antara lain *Electric Bee Colony System* (ESCA), *Power PA Algorithm* (POPA), dll (Gómez, et al., 2023). Selain itu, terdapat juga alat perangkat lunak seperti *Transient Energy Systems Simulator* (TRNSYS) dan *Hybrid Optimization Model for Electric Renewable Energy* (HOMER).

2.3.1 *Multi-objective Optimization on the basis of Ratio Analysis*

Salah satu metode yang memiliki tingkat selektivitas yang baik karena kemampuan menentukan tujuan dari kriteria yang saling bertentangan adalah metode *Multi-objective Optimization on the basis of Ratio Analysis* (MOORA), dimana kriteria dapat dikategorikan sebagai manfaat atau biaya. Metode ini diperkenalkan oleh Brauers dan Zavadskas pada tahun 1982 (Brauers & Zavadskas, 2006) dalam pengambilan keputusan dengan *Multi-criteria Decision Making* (MCDM). Metode ini menggabungkan prinsip analisis rasio dengan konsep metode penjumlahan tertimbang, yang memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih akurat dalam kondisi multi-tujuan.

Adapun langkah-langkah metode MOORA yang dipaparkan oleh adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi atribut atau kriteria
2. Menentukan apakah atribut atau kriteria termasuk manfaat atau biaya
3. Membuat matriks keputusan
4. Menghitung nilai *multi-objective optimization*
5. Menentukan peringkat alternatif

Selanjutnya, untuk menghitung kriteria terbobot dari metode MOORA digunakan rumus (Chakraborty, et al., 2023):

$$y_i^* = \sum_{i=1}^{i=g} x_{ij}^* \times w_j - \sum_{i=g+1}^{i=n} x_{ij}^* \times w_j \quad (6)$$

dimana,

y_i^* adalah nilai pengoptimalan untuk alternatif ke- i ,

$i = 1, 2, 3, \dots, g$ dimana g adalah kriteria manfaat atau status maksimal

$i = g + 1, g + 2, \dots, n$ dimana n adalah kriteria biaya atau status diminimalkan

x_{ij}^* adalah nilai yang dinormalisasi dalam alternatif ke- i , kriteria ke- j

w_j adalah bobot untuk setiap kriteria

Studi yang dilakukan oleh (Sitorus & Brito-Parada, 2022), memperlihatkan bahwa MCDM hibrida mampu mengatasi masalah pemilihan teknologi energi terbarukan dengan mempertimbangkan data kuantitatif dan kualitatif dalam lingkungan probabilistik dalam konteks pengambilan keputusan kelompok. Dimana tiga alternatif teknologi terbarukan, yaitu angin, tenaga surya terkonsentrasi, dan fotovoltaik, dinilai dengan mempertimbangkan pertimbangan subjektif dan informasi objektif sehubungan dengan lima kriteria keberlanjutan, yakni potensi total pembangkit listrik, emisi GRK, kebutuhan area, biaya energi yang diratakan, dan penciptaan lapangan kerja prospektif. Penelitian serupa juga diperlihatkan oleh (Ali, et al., 2019) di Bangladesh. Perbedaannya adalah penelitian ini mengintegrasikan model *Entropy-EDAS (Evaluation based on Distance from Average Solution)*. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa sistem energi hibrida PV-angin-baterai adalah pilihan terbaik.

2.3.2 Particle Swarm Optimization

Particle Swarm Optimization (PSO) adalah algoritme optimisasi yang terinspirasi oleh perilaku sosial dari kelompok burung atau serangga, di mana setiap individu (partikel) dalam populasi bergerak dalam ruang pencarian untuk mencari solusi yang optimal (Bai, 2010). Pada dasarnya, PSO ini dikembangkan dari kecerdasan gerombolan atau kelompok perilaku pergerakan kawanan burung dan ikan. Saat mencari makan, burung-burung menyebar atau pergi bersama sebelum menemukan tempat makanan. Saat burung mencari makan dari satu tempat ke tempat lain, selalu ada burung yang dapat mencium bau makanan dengan sangat baik. Karena mereka menyebarkan informasi, terutama informasi yang baik setiap saat sambil mencari makanan dari satu tempat ke tempat lain, dengan adanya informasi yang baik, burung akhirnya akan berbondong-bondong ke tempat di mana makanan dapat ditemukan. Sehingga ditemukanlah solusi yang paling optimal yang dapat dikerjakan oleh algoritme *particle swarm optimization* dengan kerja sama dari masing-masing individu.

PSO telah digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam pengoptimalan sistem pembangkit hibrida seperti PV-baterai-generator. Contoh penelitian diperlihatkan oleh (Mohamed, et al., 2016) di Arab Saudi yang

menggunakan PSO guna memaksimalkan produksi energi sistem hibrida PV/angin/baterai dan memenuhi permintaan beban dengan biaya minimum dan keandalan tertinggi. Hasil simulasi menegaskan bahwa PSO adalah teknik optimisasi yang menjanjikan karena kemampuannya untuk mencapai optimum global dengan relatif sederhana dan kemampuan komputasi dibandingkan dengan teknik optimasi biasa.

Langkah-langkah dasar dalam menerapkan PSO untuk optimasi sistem pembangkit hibrida yang dipaparkan pada penelitian (Sharafi & ELMekawy, 2014) adalah sebagai berikut:

- Inisialisasi Partikel: Setiap partikel dalam populasi diinisialisasi dengan posisi dan kecepatan acak dalam ruang pencarian yang sesuai dengan batas yang ditentukan untuk variabel-variabel optimasi. Variabel-variabel ini mungkin termasuk pembagian daya antara sumber-sumber energi, status pengisian baterai, atau pengaturan operasi genset.
- Evaluasi Fitness: Setiap partikel dievaluasi kinerjanya berdasarkan suatu fungsi objektif yang mencerminkan tujuan optimasi. Fungsi objektif ini harus memperhitungkan kriteria seperti efisiensi penggunaan energi, biaya operasional, dan emisi gas buang.
- Pembaruan Kecepatan dan Posisi: Partikel memperbarui kecepatan dan posisinya berdasarkan pengalaman pribadi dan pengalaman kelompok (*neighboring particles*). Hal ini menggambarkan pergerakan partikel menuju solusi yang lebih baik.
- Iterasi: Langkah kedua dan ketiga diulang dalam beberapa iterasi hingga kriteria konvergensi atau batas iterasi terpenuhi.
- Solusi Optimal: Partikel dengan nilai fungsi objektif terbaik di akhir iterasi dianggap sebagai solusi optimal atau solusi terdekat dengan solusi optimal.