

**TESIS**

**ANALISIS TEKNO-EKONOMI SISTEM PEMBANGKIT  
LISTRIK HIBRID FOTOVOLTAIK, TURBIN ANGIN, DAN  
DIESEL UNTUK SISTEM KELISTRIKAN *OFF-GRID*  
(STUDI KASUS: PULAU KARANRANG)**

*Techno-Economic Analysis of Photovoltaic, Wind Turbine, and  
Diesel Hybrid Power Generation System for Off-Grid Electricity  
System (Case Study: Karanrang Island)*

**RAYA PASANGKUNAN**

**D032212002**



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

**PENGAJUAN TESIS**

**ANALISIS TEKNO-EKONOMI SISTEM PEMBANGKIT  
LISTRIK HIBRID FOTOVOLTAIK, TURBIN ANGIN, DAN  
DIESEL UNTUK SISTEM KELISTRIKAN *OFF-GRID*  
(STUDI KASUS: PULAU KARANRANG)**

Tesis

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

Disusun dan diajukan oleh

**RAYA PASANGKUNAN  
D032212002**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA**

# TESIS

## ANALISIS TEKNO-EKONOMI SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK HIBRID FOTOVOLTAIK, TURBIN ANGIN, DAN DIESEL UNTUK SISTEM KELISTRIKAN *OFF-GRID* (STUDI KASUS: PULAU KARANRANG)

RAYA PASANGKUNAN

D032212002

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 25 November 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Dr. Ir. Yusran, ST., MT.  
NIP. 19750404 200012 1 001

Pembimbing Pendamping



Dr. Fitriyanti Mayasari, ST., MT.  
NIP. 19830714 200604 2 001

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad 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

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Raya Pasangkunan  
Nomor mahasiswa : D032212002  
Program studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul " Analisis Tekno-Ekonomi Sistem Pembangkit Listrik Hibrid Fotovoltaik, Turbin Angin, dan Diesel untuk Sistem Kelistrikan *Off-Grid* (Studi Kasus: Pulau Karanrang) " adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T., NIP. 19750404 200012 1 001 dan Dr. Fitriyanti Mayasari, S.T., M.T., NIP. 19830714 200604 2 001). 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 **The 4<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Electronic Engineering Intelligent System (ICE3IS)** sebagai artikel dengan judul "*Tecno-Economic Analysis of Hybrid Power Generation System for Off-grid Electricity System at Karanrang Island* ".

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

Gowa, 28 November 2024

Yang menyatakan

  
  
Raya Pasangkunan

## KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Kuasa karena atas kasih dan rahmat-Nya sehingga tesis dengan judul “**Analisis Tekno-Ekonomi Sistem Pembangkit Hibrid Fotovoltaik, Turbin Angin, dan Diesel untuk Sistem Kelistrikan *Off-Grid* (Studi Kasus: Pulau Karanrang)** dapat diselesaikan. Pelaksanaan penelitian dan penulisan tesis ini tidak sedikit mengalami kesulitan, namun berkat bantuan dari berbagai pihak akhirnya tesis ini dapat diselesaikan.

Kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T. dan Ibu Dr. Fitriyanti Mayasari, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan kepada penulis selama menyusun tesis ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Andani Achmad, M.T., Bapak Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, M.T., dan Bapak Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal Arya Samman, IPU, ACPE, APEC Eng selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan masukan dan saran demi menyempurnakan tesis ini.
3. Rektor Universitas Hasanuddin Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc. dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T. serta Ketua Program Studi S2 Teknik Elektro Universitas Hasanuddin Bapak Dr. Eng. Wardi, S.T., M.Eng. yang telah memfasilitasi penulis dalam menempuh program pascasarjana.
4. Segenap dosen dan staf Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan layanan administrasi selama masa studi penulis.
5. Kedua orang tua tercinta penulis mengucapkan terima kasih atas doa, pengorbanan, dan motivasi selama penulis menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga penulis sampaikan kepada saudara-saudara penulis atas motivasi dan dukungannya yang sangat berharga.
6. Teman-teman angkatan 2021 - genap yang telah memberikan dukungan dan semangat selama masa studi.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa tesis ini masih sangat jauh dari kesempurnaan, karena itu saran dan masukan sangat diharapkan demi menyempurnakan tesis ini. Akhir kata penulis berharap semoga tesis ini dapat memberikan manfaat dan menjadi referensi bagi proses penyelesaian ditingkat pendidikan sebagai insan terpelajar.

Gowa, 28 November 2024

Raya Pasangkunan

## ABSTRAK

**RAYA PASANGKUNAN.** *Analisis Tekno-Ekonomi Sistem Pembangkit Hibrid Fotovoltaik, Turbin Angin, dan Diesel untuk Sistem Kelistrikan Off-Grid (Studi Kasus: Pulau Karanrang)* (dibimbing oleh **Yusran, Fitriyanti Mayasari**)

Pemanfaatan energi terbarukan menjadi pilihan alternatif sebagai sumber energi listrik di wilayah yang tidak terhubung dengan jaringan pusat. Ketersediaan energi terbarukan yang tidak selalu ada, maka banyak peneliti mengusulkan sistem hibrid energi terbarukan dengan generator diesel. Pulau Karanrang telah menerapkan sistem pembangkit hibrid akan tetapi peningkatan kebutuhan energi listrik menjadi alasan sistem pembangkit menjadi tidak optimal dalam menyediakan energi listrik. Penelitian ini bertujuan untuk menunjukkan hasil konfigurasi sistem pembangkit hibrid yang optimal untuk wilayah Pulau Karanrang. Penelitian ini menggunakan *software* HOMER dalam melakukan simulasi sistem pembangkit hibrid. Enam puluh dua skenario disusun dalam penelitian ini untuk dilakukan simulasi yang terdiri dari generator diesel, beberapa jenis PV, turbin angin, dan baterai. Hasil simulasi semua skenario dari HOMER akan dianalisis dengan metode pengambilan keputusan atau *Multi Criteria Decision Making* (MCDM) untuk memperoleh konfigurasi terbaik. Penelitian ini menerapkan metode MCDM *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) dan *Evaluation based on Distance from Average Solution* (EDAS). Hasilnya menunjukkan metode MCDM-EDAS memberikan pilihan terbaik dibandingkan metode TOPSIS yang ditinjau dari parameter teknis dan ekonomi. Konfigurasi terbaik terdiri dari 200 kW PV eksisting, 1.400 kW PV tambahan, 360 kW generator diesel dan 371 unit baterai. Biaya yang dibutuhkan untuk sistem pembangkit hibrid yaitu, NPC sebesar Rp 29,2 miliar, biaya energi listrik /kWh (COE) sebesar Rp 2.191, *operation cost* sebesar Rp 1,6 miliar, dan *capital cost* sebesar Rp 8,8 miliar.

**Kata kunci:** energi terbarukan, pembangkit hibrid, HOMER, TOPSIS, EDAS

## ABSTRACT

**RAYA PASANGKUNAN.** *Techno-economic Analysis of Photovoltaic, Wind Turbine and Diesel Hybrid Generation System for Off-Grid Electricity System (Case Study: Karanrang Island)* (supervised by **Yusran, Fitriyanti Mayasari**)

The use of renewable energy is an alternative choice as a source of electrical energy in areas that are not connected to the central grid. The availability of renewable energy is not always available, so many researchers propose a hybrid system of renewable energy with diesel generators. Karanrang Island has implemented a hybrid generation system but the increasing demand for electrical energy is the reason the generation system is not optimal in providing electrical energy. This study aims to show the results of the optimal hybrid generation system configuration for the Karanrang Island area. This research uses HOMER software in simulating the hybrid generation system. Sixty-two scenarios were set up in this study to carry out simulations consisting of diesel generators, several types of PV, wind turbines, and batteries. The simulation results of all scenarios from HOMER will be analysed by Multi Criteria Decision Making (MCDM) method to obtain the best configuration. This research applies the MCDM methods Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) and Evaluation based on Distance from Average Solution (EDAS). The results show that the MCDM-EDAS method provides the best choice compared to the TOPSIS method in terms of technical and economic parameters. The best configuration consists of 200 kW of existing PV; 1,400 kW of additional PV; 360 kW of diesel generator and 371 battery units. The costs required for the hybrid generation systems are, NPC of IDR 29.2 billion; cost of electrical energy /kWh (COE) of IDR 2,191; operation cost of IDR 1.6 billion; and capital cost of IDR 8.8 billion.

**Keywords:** renewable energy, hybrid generation, HOMER, TOPSIS, EDAS

## DAFTAR ISI

PENGAJUAN TESIS.....	i
PERSETUJUAN TESIS.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....	ii
KATA PENGANTAR .....	iv
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	4
1.6 <i>State of The Art</i> .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1 Energi Terbarukan.....	9
2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya .....	9
2.3 Panel Surya.....	10
2.4 Baterai.....	12
2.5 Inverter .....	12
2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).....	13
2.7 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD).....	15
2.8 Pembangkit Listrik Hibrid (PLH).....	16
2.9 Kriteria Perencanaan Pembangkit Listrik.....	17
2.10 Gambaran Umum Kelistrikan Pulau Karanrang.....	19
2.11 Jaringan Saraf Tiruan (JST).....	20
2.12 <i>Hybrid Optimisation Model for Electric Renewable</i> (HOMER).....	23
2.13 <i>Multi Criteria Decision Making</i> (MCDM).....	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	26
3.1 Tahap Penelitian .....	26
3.2 Jenis Penelitian .....	30
3.3 Rancangan Penelitian .....	30
3.3.1 Pengambilan Data.....	30
3.3.2 Perancangan Skenario Sistem.....	31
3.3.3 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid .....	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	39
4.1 Hasil Penelitian.....	39
4.2 Pembahasan .....	44
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	53

5.1	Kesimpulan.....	53
5.2	Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA .....		54

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Panel surya .....	10
Gambar 2. Panel surya (a) terhubung seri (b) terhubung paralel .....	11
Gambar 3. Turbin angin sumbu vertikal dan horizontal .....	15
Gambar 4. Skema pembangkit listrik hibrid .....	17
Gambar 5. Blok <i>single line</i> diagram PLTS-PLTD Pulau Karanrang .....	19
Gambar 6. Prosedur jaringan saraf tiruan .....	21
Gambar 7. Arsitektur jaringan saraf tiruan .....	22
Gambar 8. Flowchart penelitian.....	26
Gambar 9. Tahapan NN tool.....	27
Gambar 10. Tahapan metode TOPSIS .....	29
Gambar 11. Tahapan metode EDAS.....	29
Gambar 12. Data radiasi matahari Pulau Karanrang .....	31
Gambar 13. Kecepatan angin Pulau Karanrang .....	31
Gambar 14. Skenario 1 PLTS ( <i>existing &amp; added</i> ) + PLTD.....	32
Gambar 15. Skenario 2 PLTS + PLTB + PLTD .....	32
Gambar 16. Skenario 3 PLTS ( <i>existing &amp; added</i> ) + PLTB + PLTD.....	32
Gambar 17. Profil beban harian .....	40
Gambar 18. Skema 1 PLTS ( <i>existing &amp; added</i> ) + PLTD .....	41
Gambar 19. Skema 2 PLTS ( <i>existing</i> ) + PLTB + PLTD .....	41
Gambar 20. Skema 3 PLTS ( <i>existing &amp; added</i> ) + PLTB + PLTD .....	41
Gambar 21. Produksi listrik .....	46
Gambar 22. Biaya sistem pembangkit .....	47

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. State of the art .....	5
Tabel 2. Kecepatan angin berdasarkan keadaan alam.....	14
Tabel 3. Jumlah konsumsi energi Pulau Karanrang tahun 2017-2022.....	20
Tabel 4. Total konsumsi energi Pulau Karanrang tahun 2017-2022.....	30
Tabel 5. Spesifikasi panel surya.....	33
Tabel 6. Plot kecepatan angin rata-rata.....	35
Tabel 7. Spesifikasi turbin angin.....	36
Tabel 8. Spesifikasi generator diesel.....	37
Tabel 9. Spesifikasi baterai .....	37
Tabel 10. Spesifikasi inverter.....	38
Tabel 11. Hasil perkiraan total kebutuhan energi listrik .....	39
Tabel 12. Hasil prediksi data sumber energi terbarukan tahun 2035 .....	40
Tabel 13. Hasil pengambilan keputusan .....	42
Tabel 14. Kapasitas sistem pembangkit optimal berdasarkan metode TOPSIS ...	43
Tabel 15. Kapasitas sistem pembangkit optimal berdasarkan metode EDAS .....	43
Tabel 16. Biaya sistem pembangkit optimal berdasarkan metode TOPSIS.....	44
Tabel 17. Biaya sistem pembangkit optimal berdasarkan metode EDAS .....	44
Tabel 18. Perbandingan hasil TOPSIS dan EDAS .....	45
Tabel 19. Perencanaan Pengadaan PV .....	46
Tabel 20. Emisi yang dihasilkan .....	48
Tabel 21. Akurasi hasil prediksi data beban .....	48
Tabel 22. Nilai MAPE.....	50
Tabel 23. Akurasi hasil prediksi data sumber energi terbarukan .....	50

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Secara geografis, Indonesia merupakan negara kepulauan sehingga sulit untuk menghubungkan setiap wilayah dengan sistem jaringan listrik terpusat. Hal ini mengakibatkan masih banyak wilayah yang menggunakan generator diesel sebagai sumber energi listrik. Generator diesel dalam hal ini adalah Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) menggunakan sumber energi berbasis energi fosil. Dalam mencapai kemandirian dan ketahanan energi untuk pemerataan dan percepatan pembangunan perekonomian daerah yang jauh dari pusat kota, sumber energi listrik pada daerah tersebut harus dapat dioptimalkan.

Penyediaan energi listrik bagi masyarakat wilayah kepulauan menjadi sangat penting karena perkembangan berbagai sektor dan kualitas hidup masyarakat yang bergantung pada ketersediaan energi listrik. Kebutuhan akan energi listrik saat ini semakin besar seiring dengan perkembangan penduduk, serta aktifitas manusia baik di pusat kota maupun di daerah terpencil seperti wilayah kepulauan. Peningkatan kebutuhan energi listrik ini menjadi salah satu energi yang perlu diperhatikan (Li, 2019).

Perkembangan infrastruktur ketenagalistrikan, terutama pembangkitan yang sebelumnya didasari oleh dua pilar, yaitu *affordability (least cost)* dan *security of supply* (keandalan), mengalami transisi dan beralih menjadi tiga pilar dengan menambahkan *acceptability (environmental consideration)*. *Affordability* berarti sistem pembangkit merupakan sistem dengan biaya paling rendah, *security of supply* berarti suplai listrik harus andal dan dapat memenuhi permintaan beban, sedangkan *acceptability* berarti pemilihan pembangkit harus mempertimbangkan masalah lingkungan. Dengan demikian, perencanaan pembangkit, selain harus dapat memenuhi permintaan beban dengan biaya minimum, juga harus ramah lingkungan (Ayu Kartika Sari et al., 2022).

Saat ini Indonesia sedang mengupayakan transisi dari sistem tenaga yang didominasi bahan bakar fosil ke sistem tenaga berbasis energi terbarukan (RE). Dampak lingkungan yang merugikan dari PLTD, fluktuasi biaya bahan bakar yang tinggi, dan risiko yang terkait dengan transportasi dan penyimpanan bahan bakar

menjadikan sumber daya energi terbarukan sebagai solusi alternatif untuk desain sistem tenaga, terutama untuk pasokan listrik *off-grid* (Javed et al., 2021). Sistem fotovoltaik (PV) dan turbin angin (WT) digunakan di seluruh dunia untuk berkontribusi dalam memenuhi permintaan daya listrik. Tantangan terpenting dari sistem energi terbarukan tunggal adalah ketergantungannya pada kondisi lingkungan (radiasi matahari dan kecepatan angin). Keuntungan dari penggunaan PV dan WT adalah skalabilitas dan kemudahan penggunaan karena parameter input bersifat meteorologis dan konstruktif (Puianu et al., 2017).

Sebagai solusinya, sumber energi terbarukan digabungkan satu sama lain (sistem hibrid) untuk menyediakan daya listrik yang lebih kontinyu. Oleh karena itu, sistem hibrid memiliki keandalan yang lebih tinggi daripada sistem energi terbarukan tunggal (Maleki & Askarzadeh, 2014). Sistem pembangkit hibrid merupakan salah satu alternatif sistem pembangkit yang tepat untuk diaplikasikan pada daerah yang sukar dijangkau oleh PLN.

Pulau Karanrang adalah salah satu pulau yang berada di Desa Mattiro Bulu, Kecamatan Liukang Tupabbiring Utara, Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan dengan titik koordinat  $4^{\circ}51'24.000''\text{LS}$ ,  $119^{\circ}23'5.000''\text{BT}$ . Potensi energi radiasi matahari berdasarkan data NASA adalah  $5,31 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$  dan potensi sumber energi angin yang mencapai kecepatan  $3,86 \text{ m/s}$ .

Sejak 2011 sistem kelistrikan pulau Karanrang disuplai dengan pembangkit listrik hibrid yaitu PLTD dengan 3 unit generator diesel yang berkapasitas masing-masing 130 kW, 100 kW, 130 kW dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpusat dengan kapasitas 200 kWp. Saat ini PLTD beroperasi selama 12 jam dari jam 18:00 sampai 06:00 dan PLTS beroperasi pada siang hari untuk menyuplai energi listrik ke sebagian pelanggan dikarenakan adanya peningkatan kebutuhan energi listrik sehingga kapasitas PLTS terpasang tidak lagi mencukupi dalam memenuhi seluruh permintaan pelanggan.

Berdasarkan latar belakang di atas, penelitian ini akan mendesain dan menganalisis sistem pembangkit listrik hibrid yang optimal berbasis energi terbarukan (angin dan matahari) untuk sistem *off-grid*. Untuk merancang model pembangkit digunakan perangkat lunak komputer yaitu HOMER (*Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources*) untuk mendapatkan konfigurasi yang

optimal. Sistem pembangkit yang diusulkan yaitu hibrid PV, turbin angin, generator diesel dan baterai. Untuk menentukan sistem yang optimal digunakan metode pengambilan keputusan atau *Multi Criteria Decision Making (MCDM) Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)* dan *Evaluation based on Distance from Average Solution (EDAS)* dengan mempertimbangkan aspek teknis, ekonomis, dan lingkungan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana mendesain sistem pembangkit listrik hibrid baru untuk memenuhi peningkatan kebutuhan listrik di Pulau Karanrang?
2. Bagaimana menentukan konfigurasi pembangkit listrik hibrid yang optimal di Pulau Karanrang dengan metode *Multi Criteria Decision Making (MCDM) Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)* dan *Evaluation based on Distance from Average Solution (EDAS)* berdasarkan *Net Present Cost (NPC)*, *Cost of Energy (COE)*, *operation cost*, *initial capital cost*, *renewable fraction*, produksi energi listrik, penggunaan bahan bakar, dan emisi?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang akan dicapai pada penelitian ini:

1. Mendapatkan desain sistem pembangkit listrik hibrid baru untuk memenuhi peningkatan kebutuhan listrik di Pulau Karanrang.
2. Mendapatkan hasil analisis konfigurasi pembangkit listrik hibrid yang optimal di Pulau Karanrang dengan metode *Multi Criteria Decision Making (MCDM) Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)* dan *Evaluation based on Distance from Average Solution (EDAS)* berdasarkan *NPC*, *COE*, *operation cost*, *initial capital cost*, *renewable fraction*, produksi energi listrik, penggunaan bahan bakar, dan emisi.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian yang dilakukan yaitu:

1. Memaksimalkan penggunaan energi terbarukan dalam hal ini energi surya dan angin untuk meminimalkan penggunaan energi fosil dalam memenuhi permintaan listrik masyarakat di wilayah terpencil.
2. Bagi pusat pelayanan listrik Pulau Karanrang akan memperoleh referensi alternatif penyediaan energi cadangan dengan biaya operasi yang lebih rendah.

### **1.5 Batasan Masalah**

Batasan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Jenis pembangkit yang digunakan adalah pembangkit listrik tenaga surya, pembangkit listrik tenaga angin, dan pembangkit listrik tenaga diesel (Hibrid).
2. Data radiasi matahari dan data kecepatan angin diambil dari *website* NASA dan tidak didasarkan pada pengukuran data lapangan.
3. Studi kasus dalam penelitian ini adalah sistem kelistrikan *off-grid* di Pulau Karanrang.
4. Menggunakan *software* HOMER untuk mendapatkan konfigurasi sistem yang optimal berdasarkan NPC, COE, *operation cost*, *initial capital cost*, *renewable fraction*, produksi energi listrik, penggunaan bahan bakar, dan emisi.

### **1.6 State of The Art**

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian terkait sistem hibrid antara pembangkit listrik berbasis *renewable energy* dan berbasis energi fosil menggunakan *software* HOMER yang dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1. State of the art**

<b>(Nama Peneliti, Tahun)</b>	<b>Judul</b>	<b>Identifikasi Masalah</b>	<b>Metode</b>	<b>Hasil yang dicapai</b>
(Arabzadeh Saheli et al., 2019)	<i>Techno-economic feasibility of a standalone hybrid energy system for semi equatorial climates: a case study</i>	Pertumbuhan populasi di Pulau Kish Iran serta meningkatnya permintaan energi dan masalah lingkungan seperti pemanasan global dan polusi udara	Suatu sistem hibrida yang terdiri dari tiga jenis pembangkit yang diusulkan yaitu pv, wind, dan generator diesel. Hasil yang optimal berdasarkan NPC dan COE.	Sistem <i>wind</i> -generator diesel-baterai menjadi sistem paling hemat biaya dengan NPC dan COE sebesar 2.967.316 \$ dan 0,187\$/kWh, sementara sistem PV- <i>wind</i> -generator diesel-baterai menjadi sistem oaling andal yang terdiri dari 200 kW PV, 3 unit <i>wind</i> , 150 kW generator diesel, dan 86 unit baterai.
(Mubarok & Farid, 2019)	<i>Hybrid Power Plant System Analysis in Seruni Beach, Bantaeng District, South Sulawesi</i>	Pantai Seruni merupakan salah satu tempat wisata yang tentunya harus didukung oleh pasokan listrik yang memadai dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan untuk mengurangi pasokan dari PLN.	PV-turbin angin menjadi sistem yang diusulkan dengan indikator yang digunakan sebagai evaluasi ekonomi yaitu <i>payback period</i> (PP), <i>net present value</i> (NPV), dan <i>net present cost</i> (NPC).	Sistem optimal memiliki nilai NPC Rp 2.555.496.645, NPV positif sebesar Rp1.037.919.493 dan dari hasil perhitungan <i>payback period</i> adalah 5 tahun 10 bulan.
(Aisyah et al., 2020)	<i>Optimum hybrid renewable energy system design using HOMER: Case study Biaro Island, Indonesia</i>	Pulau Biaro merupakan pulau terpencil yang ada di Sulawesi Utara, dimana pulau ini tidak terkoneksi dengan sistem listrik PLN sehingga listrik dipasok dengan generator diesel yang beroperasi selama 12 jam.	Sistem hibrid PV-turbin angin-generator diesel-baterai diusulkan dengan hasil optimal ditinjau berdasarkan nilai COE.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem dengan komposisi PV-turbin angin-diesel-baterai dengan biaya COE sebesar 0.204 \$/kWh menjadi sistem terbaik.

Lanjutan Tabel 1.

<b>(Nama Peneliti, Tahun)</b>	<b>Judul</b>	<b>Identifikasi Masalah</b>	<b>Metode</b>	<b>Hasil yang dicapai</b>
(Mansur, 2021)	<i>Hybrid Electrical System Optimization of Remote Island Using HOMER</i>	Pulau Salemo merupakan salah satu daerah yang telah memanfaatkan PLTS sebagai salah satu sumber energi listrik, namun pengoperasiannya sudah tidak optimal seiring dengan bertambahnya beban.	Mengusulkan sistem pembangkit listrik hibrida PV-diesel-baterai dengan mengoptimalkan <i>Leveled Cost of Energy</i> (LCOE) dan <i>Net Present Cost</i> (NPC).	Hasil kajian menunjukkan bahwa dengan penambahan kapasitas PLTS sebesar 200 kWp dan penambahan baterai sebanyak 120 unit, diperoleh nilai LCOE optimal sebesar Rp 1.306/kWh dan biaya operasional sebesar Rp 450 juta dengan NPC Rp 8,4 miliar dan biaya modal Rp 3,2 miliar.
(Diyoke et al., 2023)	<i>Selection, Techno-Economic and Environmental Analysis of Off-Grid Power System for Application in a Nigerian University Building</i>	Buruknya pasokan energi listrik dalam melayani beban di institusi pendidikan Nigeria.	Sistem yang diusulkan adalah hibrida PV-Biogas-Turbin Angin-Diesel. Sistem yang optimal ditinjau dari segi NPC dan COE.	Hasil optimal terdiri dari PV berkapasitas 75kW, mesin biogas 40kW, dan baterai 1kWh sebanyak 30 buah yang beroperasi dengan konverter 33,6kW. COE dan NPC masing-masing adalah 0,253 \$/kWh dan \$175219,7
(Koffi et al., 2022)	<i>Study and Optimization of a Hybrid Power Generation System to Power Kalakala, a Remote Locality in Northern Cote d'Ivoire</i>	Kurang pasokan listrik di desa Kalakala, Afrika Barat dimana hanya 51% dari total populasi yang mendapatkan akses energi listrik sehingga menghambat aktivitas masyarakat.	Sistem hibrida PV-diesel-baterai diusulkan dengan menentukan hasil terbaik berdasarkan aspek teknis, ekonomi dan lingkungan.	Biaya pembangkitan listrik untuk sistem hibrida adalah €0,373/kWh dibandingkan dengan €0,466 dan €0,608/kWh, untuk sistem PV-Baterai dan diesel saja. Sistem hibrida dengan kinerja teknis, ekonomi dan lingkungan terbaik dapat menjadi alternatif yang baik untuk menghasilkan listrik di masyarakat terpencil.

Lanjutan Tabel 1

<b>(Nama Peneliti, Tahun)</b>	<b>Judul</b>	<b>Identifikasi Masalah</b>	<b>Metode</b>	<b>Hasil yang dicapai</b>
(Farhadi & Iqbal, 2024)	<i>Optimal Sizing and Techno-Economic Analysis of a Hybrid Power System for Postville</i>	Postville merupakan wilayah yang kebutuhan listriknya dipasok dengan tiga generator diesel dikarenakan tidak terhubung dengan jaringan listrik. Penggunaan generator diesel menyerap biaya yang banyak untuk penyediaan bahan bakar.	Sistem yang diusulkan adalah hibrid PV-turbin angin-generator diesel-baterai. Sistem optimal ditinjau dari NPC terendah	Sistem optimal terdiri dari 435 kW PV, 500 kW turbin angin, 455 kW generator diesel, dan 815 kWh baterai dengan NPC \$5,57 juta.
(Ayed et al., 2024)	<i>Optimal Design and Techno-Economic Analysis of Hybrid Renewable Energy Systems: A Case Study of Thala City, Tunisia</i>	Kekurangan pasokan energi listrik, tingginya tagihan listrik penduduk, emisi gas rumah kaca menjadi masalah elektrifikasi di Kota Thala, Tunisia.	Sistem yang diusulkan adalah hibrid grid-turbin angin-biogas-penyimpanan energi dengan meminimalkan NPC, LCOE, dan emisi	Gri-turbin angin-penyimpanan energi <i>hydro pump</i> menjadi sistem terbaik dengan LCOE 0,042 US\$/kWh dan NPC 501.540 US\$.
(Subekti et al., 2024)	<i>Tecno-Economic Analysis for Raja Ampat Off-Grid System</i>	Pasokan energi listrik di daerah terpencil sangat bergantung pada bahan bakar diesel. Ketergantungan terhadap bahan bakar diesel tidak hanya merusak lingkungan karena emisinya, tetapi juga membutuhkan biaya pembangkitan listrik yang tinggi.	Sistem yang diusulkan generator diesel-turbin angin-PV-Baterai dan memilih sistem dengan NPC dan COE terkecil.	Sistem optimal terdiri dari 160 kW generator diesel, 70,1 kW PV, 80 kWh baterai dengan NPC \$0,87 juta dan COE \$0.280/kWh

Lanjutan Tabel 1

<b>(Nama Peneliti, Tahun)</b>	<b>Judul</b>	<b>Identifikasi Masalah</b>	<b>Metode</b>	<b>Hasil yang dicapai</b>
(Raya Pasangkunan, 2024)	Analisis Tekno-Ekonomi Sistem Pembangkit Listrik Hibrid untuk Sistem Kelistrikan <i>Off-Grid</i> (Studi Kasus: Pulau Karanrang)	Peningkatan permintaan energi listrik di Pulau Karanrang menyebabkan sistem pembangkit terpasang menjadi tidak optimal	Sistem yang diusulkan PV-turbin angin-generator diesel-baterai dengan memilih sistem optimal menggunakan metode pengambilan TOPSIS dan EDAS berdasarkan nilai NPC, COE, <i>operation cost</i> , <i>initial capital cost</i> , <i>renewable fraction</i> , produksi energi listrik, penggunaan bahan bakar, dan emisi.	Sistem optimal dihasilkan dari metode pengambilan keputusan EDAS yang terdiri dari 200 kW PV <i>existing</i> , 1400 kW PV tambahan, 360 kW generator diesel dan 371 unit baterai. Nilai NPC, COE, <i>operation cost</i> , <i>initial capital cost</i> , <i>renewable fraction</i> , produksi energi listrik, penggunaan bahan bakar, dan emisi masing-masing Rp 29,2 miliar, Rp 2.191/kWh, Rp 1,6 miliar, Rp 8,8 miliar, 94,3%, 2.485.320 kWh/tahun, dan 53.813 kg/tahun

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Energi Terbarukan**

Energi terbarukan adalah energi yang berasal dari alam di sekitar kita, beberapa contoh energi terbarukan yang dapat dikelola adalah angin, terjunan air, sinar matahari, panas bumi, bioenergi, serta gerakan dan perbedaan suhu lapisan laut (PT PLN (Persero), 2018). Disebut energi terbarukan karena energi tersebut dapat memengaruhi energi itu sendiri dalam kurun waktu yang singkat tidak seperti energi fosil yang memerlukan waktu bertahun-tahun agar terbentuk energi lagi. Manfaat lain sumber energi berbasis energi terbarukan adalah emisi yang dihasilkan kecil bahkan tidak ada, sehingga menjadi sebuah tren baru untuk teknologi pembangkit listrik. Selain itu, energi terbarukan mampu mengurangi kebutuhan untuk mengimpor gas atau batubara karena tidak ada penggunaan bahan bakar fosil pada pembangkit energi terbarukan (Sumathi et al., 2015).

Berdasarkan Kebijakan Energi Nasional serta Peraturan Menteri ESDM Nomor 50 tahun 2017 Tentang Pemanfaatan Sumber Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik bahwa Indonesia saat ini merencanakan pengembangan EBT dengan sasaran peran energi baru dan energi terbarukan paling sedikit 23% untuk memenuhi pasokan listrik di Indonesia, minyak bumi kurang dari 25%. Batubara minimal 30%, dan gas bumi minimal 22% pada tahun 2025 (PT PLN (Persero), 2018).

#### **2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya**

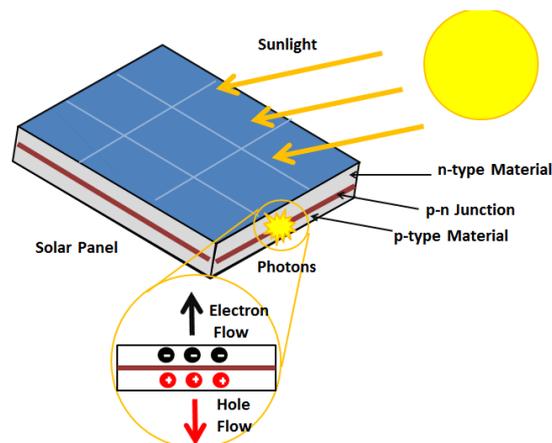
Matahari merupakan sumber energi utama yang memancarkan energi yang luar biasa besarnya ke permukaan bumi. Energi surya telah banyak dimanfaatkan di Indonesia untuk menyediakan listrik di pedesaan atau daerah yang sulit diakses.

Berdasarkan sejarah, tenaga listrik dari cahaya matahari pertama kali ditemukan oleh Alexandre Edmund Becquerel yang merupakan seorang ahli fisika Perancis pada tahun 1839. Dengan potensinya yang sangat besar, energi surya diyakini dapat menjadi sumber energi utama di masa depan dengan beberapa keunggulan yaitu sumber energi yang tidak terbatas dan ramah lingkungan (Suhendar, 2022).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya merupakan pembangkit yang mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Konversi ini terjadi pada panel surya yang terdiri dari sel-sel surya. Prinsip kerja sel surya didasarkan pada efek fotovoltaiik, yaitu dengan menimbulkan perbedaan potensial pada *junction* radiasi elektromagnetik dimana elektron dialirkan karena material semikonduktor menyerap cahaya dengan frekuensi diatas frekuensi ambang batas material. Energi cahaya tersebut dinamakan foton. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), diperlukan beberapa komponen yang saling berkesinambungan agar PLTS dapat beroperasi secara maksimal sesuai dengan potensi energi matahari pada lokasi tersebut. Komponen tersebut diantaranya: panel surya, baterai, dan inverter.

### 2.3 Panel Surya

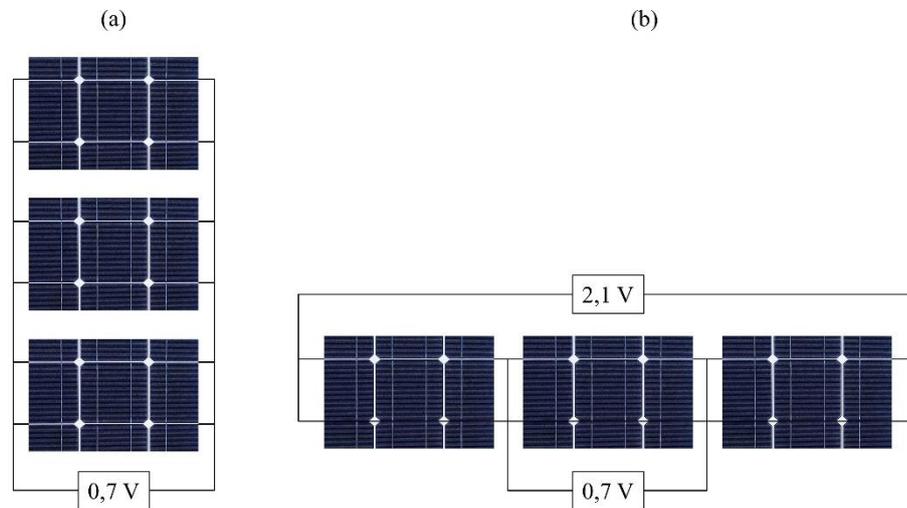
Panel surya atau fotovoltaiik merupakan komponen utama yang ada pada sistem PLTS. Fungsi panel surya adalah untuk mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Panel surya terdiri dari susunan sel-sel fotovoltaiik. Sel fotovoltaiik adalah perangkat semikonduktor yang mengubah energi cahaya menjadi listrik. Begitu cahaya jatuh pada sel-sel ini dalam kondisi *reverse bias*, sel sel ini mulai menghasilkan listrik (Prashanth et al., 2018).



**Gambar 1.** Panel surya (Julisman et al., 2017)

Dalam sistem PLTS terdapat jenis koneksi sel surya untuk memperoleh spesifikasi yang diinginkan. Pertama, adalah koneksi seri seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 (a). Pada panel surya yang terhubung seri, tegangan rangkaian bertambah untuk tiap sel suryanya. Sedangkan arus rangkaian panel yang terhubung seri tidak bertambah. Arus total dalam rangkaian modul surya sama dengan arus

terkecil yang dihasilkan oleh satu sel surya. Selain hubung seri terdapat koneksi sel surya secara paralel seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2 (b). Jika sel dihubungkan secara paralel, tegangannya sama di semua sel surya, sedangkan arus sel surya bertambah.



**Gambar 2.** Panel surya (a) terhubung seri (b) terhubung paralel (Julisman et al., 2017)

Untuk menghitung kapasitas PLTS yang dibutuhkan, berikut merupakan persamaan yang dapat digunakan (Kahar, 2016):

$$P = \frac{E_{load} \times I_o \times k}{H_o \times \eta_b \times \eta_{inv}} \quad (1)$$

Kemudian dalam menentukan jumlah panel yang dibutuhkan dapat digunakan persamaan (Kahar, 2016):

$$N_{PV} = \frac{P}{P_{max-out}} \quad (2)$$

Dimana:

- $P$  : Kapasitas total modul (kWp)
- $E_{Load}$  : Total beban yang harus dipenuhi (kWh)
- $I_o$  : Tingkat radaisi standar =  $1\text{kW/m}^2$
- $K$  : Faktor penyesuaian = 1.1
- $H_o$  : Tingkat radiasi terendah harian ( $\text{kWh/m}^2/\text{hari}$ )
- $\eta_b$  : Efisiensi baterai
- $\eta_{inv}$  : Efisiensi Inverter
- $N_{Pv}$  : Jumlah panel
- $P_{max-out}$  : Kapasitas panel yang digunakan (kWp)

## 2.4 Baterai

Baterai berfungsi sebagai penyimpan energi matahari yang dihasilkan pada siang hari sehingga energinya bisa digunakan baik pada siang hari maupun pada malam hari. Baterai terdiri dari dua atau lebih sel elektrokimia yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Setiap baterai terdiri dari terminal positif (katoda) dan terminal negatif (anoda), serta elektrolit yang berfungsi sebagai penghantar. Output arus listrik dari baterai adalah arus searah atau DC (*Direct Current*) (Gumintang et al., 2020).

Baterai merupakan komponen penting sebagai sistem penyimpanan energi baik pada skala kecil maupun besar untuk mengatasi terputusnya sumber energi terbarukan. Ada beberapa jenis material kimia yang digunakan dalam teknologi baterai, yaitu *liquid lead-acid*, *nickel-iron* (NiFe), *nickel-cadmium* (NiCad), *alkaline*, *gel-cell*, dan *lithium-ion* (Gumintang et al., 2020).

Persamaan (3) merupakan persamaan matematis yang digunakan untuk menghitung kapasitas baterai pada sistem pembangkit listrik.

$$C_{bat} = \frac{E_{Load\ 24\ jam} - E_{PV-Load}}{\eta_{Batt} \times DOD} \quad (3)$$

Setelah menentukan kapasitas penyimpanan, untuk menghitung jumlah baterai yang dibutuhkan digunakan Persamaan (4).

$$N_{bat} = \frac{Kapasitas\ Baterai\ (kWh)}{Kapasitas\ Nominal\ Baterai\ (kWh)} \quad (4)$$

Dimana:

$C_{bat}$  : Kapasitas total modul (kWh)

$E_{Load\ 24\ jam}$  : Total beban yang harus dipenuhi (kWh)

$E_{PV-Load}$  : Energi yang langsung disalurkan ke beban (kWh)

$DOD$  : *Depth of Discharge* atau jumlah energi yang digunakan dari baterai (%)

$N_{bat}$  : Jumlah baterai yang diperlukan

## 2.5 Inverter

Inverter mengubah keluaran panel surya dan baterai (DC) menjadi daya 60 atau 50 Hz. Inverter tersedia dalam berbagai *rating* daya dengan efisiensi mulai dari 85 hingga 95%. PLTS berkapasitas besar pada umumnya menggunakan inverter PV terpusat, sementara pembangkit listrik yang lebih kecil beroperasi inverter PV

tersebar (*string*) karena fleksibilitas dan keandalannya. Saat ini sebagian besar peralatan dirancang untuk jaringan AC standar, maka dari itu sebagian besar sistem PV diperlukan inverter (Gumintang et al., 2020).

Untuk menentukan kapasitas inverter pada suatu sistem kelistrikan dapat digunakan Persamaan (5).

$$P_{inv} = \frac{P_{Peak Load} \times 120\%}{\eta_{inv}} \quad (5)$$

Setelah menentukan kapasitas penyimpanan, untuk menghitung jumlah baterai yang dibutuhkan digunakan Persamaan (6).

$$N_{inv} = \frac{P_{inv}}{Daya Nominal Inverter} \quad (6)$$

Dimana:

$P_{Peak Load}$  : Beban puncak harian (kW)

120% : Faktor penambahan beban

$\eta_{inv}$  : Efisiensi inverter

Daya Nominal Inverter : Daya inverter yang digunakan

## 2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Pembangkit listrik tenaga bayu atau angin merupakan suatu pembangkit listrik yang menggunakan angin sebagai sumber untuk menghasilkan energi listrik. Angin adalah udara yang bergerak akibat adanya perbedaan tekanan udara dengan arah aliran angin dari tempat yang memiliki tekanan tinggi ke tempat yang bertekanan rendah atau sebaliknya. Dalam realitas, tenaga angin adalah bentuk tenaga surya yang dikonversi. Hal tersebut karena proses terjadinya angin dimulai karena adanya perbedaan penyinaran matahari di berbagai tempat dengan kecepatan yang berbeda pada siang dan malam hari. Pembangkit ini mengkonversi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin.

Pada umumnya kecepatan angin tertinggi ditemukan di puncak 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. 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 2 berikut.

**Tabel 2.** Kecepatan angin berdasarkan keadaan alam

<b>Tingkat kecepatan Angin 10 meter di atas permukaan tanah</b>		
<b>Kelas</b>	<b>Kecepatan (m/s)</b>	<b>Kondisi</b>
1	0,00 – 0,2	-
2	0,3 – 1,5	Angin lebih tenang, jika ada asa 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
9	17,2 – 20,7	Ranting pohon dapat patah dan ketika berjalan langkah menjadi berat ketika melawan arah angin
10	20,8 – 24,4	Dapat merubuhkan rumah dan ranting pohon patah
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

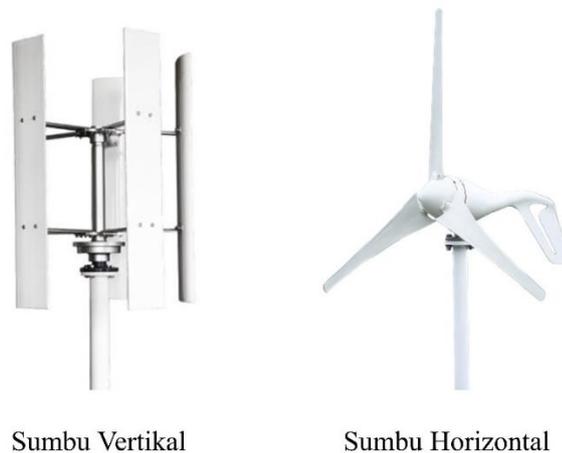
Sumber: Habibie et al., 2011

Berdasarkan Tabel 2, 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 3 - 8 (Habibie et al., 2011).

Turbin angin merupakan alat konversi energi angin menjadi energi mekanik yang nantinya akan memutar generator sehingga menghasilkan listrik. Pada abad ke 19 turbin angin pertama kali dibuat oleh Pour La Cour di Denmark yang digunakan sebagai pembangkit listrik di daerah terpencil. Prinsip kerja dari turbin

angin ini yaitu menangkap angin menggunakan bilah turbin yang didesain seperti sayap pesawat terbang. Ketika angin bertiup melalui bilah tersebut, maka akan timbul udara bertekanan rendah pada bagian bawah bilah, tekanan udara yang rendah akan menarik bilah untuk bergerak ke area tersebut sehingga menghasilkan putaran pada porosnya. Putaran dari poros inilah yang diteruskan ke generator dan menggerakkannya sehingga menghasilkan listrik.

Berdasarkan arah putarannya, turbin angin dapat digolongkan menjadi dua yaitu Turbin Angin Sumbu Horizontal yaitu turbin angin dengan poros rotor utama dan generator listrik yang terletak di puncak Menara dan diarahkan ke arah datangnya angin untuk memperoleh energi angin. Turbin ini memiliki rotor yang rotasinya paralel dengan permukaan tanah. Selanjutnya Turbin Angin Sumbu Vertikal yakni turbin angin yang sumbu rotornya memiliki rotasi lurus dengan permukaan tanah. Turbin ini memiliki keunggulan diantaranya posisinya tidak memerlukan mekanisme tambahan jika arah angin berubah, struktur menaranya tidak perlu besar, model turbin anginnya sederhana, kemungkinan untuk menyimpan komponen mekanik dan elektronik bisa disimpan di dekat permukaan tanah karena turbin ini bisa ditaruh dekat dengan permukaan tanah. Gambar 3 menunjukkan gambar turbin angin horizontal dan vertikal.



**Gambar 3.** Turbin angin sumbu vertikal dan horizontal (Raja Mohamed, 2017)

## 2.7 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

Untuk masyarakat dan industri terpencil, pasokan listrik kebanyakan disediakan melalui generator diesel. Selama permintaan beban puncak atau dalam

keadaan penipisan baterai generator diesel digunakan sebagai sumber energi sekunder. Generator diesel memiliki biaya modal yang rendah namun demikian, pengoperasian dan pemeliharaannya mahal dan hanya menyediakan listrik untuk beberapa jam sehari. Oleh karena itu dengan menggabungkan energi terbarukan dengan generator diesel dalam sistem hibrid dapat menghemat bahan bakar.

Secara umum generator adalah sebuah mesin yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Biasanya generator disebut juga “Genset” yang berarti generator set. Generator set merupakan satu set peralatan gabungan dari dua perangkat berbeda yaitu *engine* dan generator atau alternator sebagai perangkat pembangkit listrik. Pada generator listrik memproduksi energi listrik dari energi mekanik menggunakan induksi elektromagnetik. Pada pembangkit listrik, gerak dari generator didapatkan dari proses pembakaran bahan bakar diesel atau yang biasa disebut solar.

Daya output dari generator diesel dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 7 (Kahar, 2016):

$$P_{diesel}(t) = \frac{E_{diesel}(t)}{\eta_{diesel}} \times 120 \quad (7)$$

Jika efisiensi dari generator diabaikan maka persamaan dapat menjadi:

$$P_{diesel}(t) = E_{diesel}(t) \times 120\% \quad (8)$$

Dimana:

$P_{diesel}(t)$  : Kapasitas daya generator diesel (kW)

$E_{diesel}(t)$  : Energi beban puncak yang harus dipenuhi (kWh)

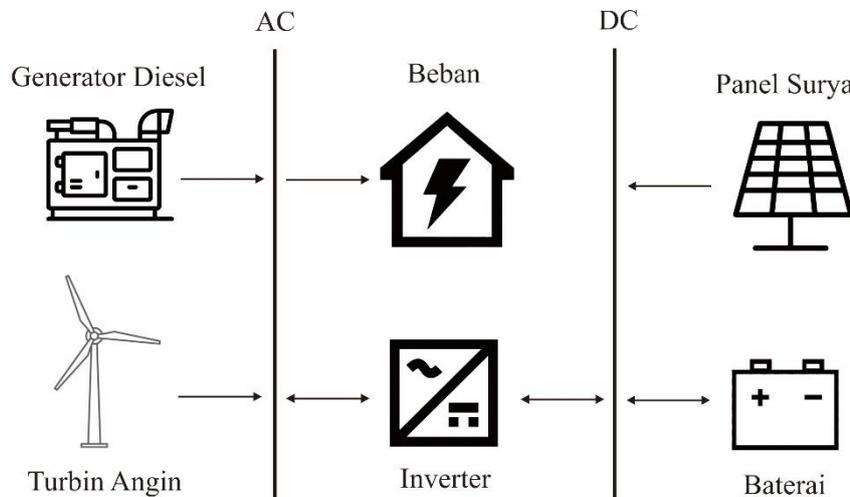
$\eta_{diesel}(t)$  : Efisiensi generator diesel

120% : Kompensasi

## 2.8 Pembangkit Listrik Hibrid (PLH)

Pengertian pembangkit listrik hibrid adalah penggunaan dua atau lebih pembangkit listrik dengan sumber energi yang berbeda, baik itu dari energi terbarukan maupun yang tidak terbarukan. Sistem ini merupakan alternatif sistem pembangkit listrik paling tepat untuk daerah-daerah yang sulit dijangkau oleh sistem pembangkit besar dengan kapasitas besar seperti jaringan PLN. Sistem pembangkit ini memanfaatkan energi baru terbarukan sebagai sumber energi listrik utama (primer) yang dikombinasikan dengan genset atau lainnya yang berfungsi sebagai sumber energi sekunder.

Untuk mengatasi permasalahan beban yang tidak sama sepanjang hari maka kombinasi sumber energi antara Panel Surya (PV), Turbin Angin dan Generator Diesel adalah salah satu solusi paling sesuai untuk sistem pembangkit yang terisolir dengan jaringan yang lebih besar seperti jaringan PLN (Kahar, 2016).



**Gambar 4.** Skema pembangkit listrik hibrid (Raja Mohamed, 2017)

## 2.9 Kriteria Perencanaan Pembangkit Listrik

Berikut beberapa kriteria yang perlu dipertimbangkan dalam melakukan perencanaan sistem pembangkit:

### 1. *Net Present Cost* (NPC)

Total *Net Present Cost* (NPC) adalah nilai dari seluruh biaya yang dikeluarkan selama masa pakai, dikurangi nilai sekarang dari semua pendapatan diperoleh selama masa pakai. Biaya meliputi biaya modal, biaya penggantian, biaya O & M, biaya bahan bakar, denda emisi, dan biaya pembelian daya dari jaringan listrik. Sedangkan yang termasuk pendapatan adalah nilai sisa dan pendapatan dari penjualan daya ke jaringan listrik. Homer menghitung NPC dengan menggunakan Persamaan (9) dan (10).

$$NPC = \frac{C_{ann.tot}}{CRF(I, R_{proj})} \quad (9)$$

$$NPC = C_{rep} - C_{o\&m} + C_s \quad (10)$$

Dimana:

- $C_{ann,tot}$  : Total biaya tahunan (Rp/tahun)
- $CRF()$  : Faktor pemulihan modal
- $I$  : Tingkat bunga (%)
- $R_{proj}$  : Masa manfaat proyek (Tahun)
- $C_{rep}$  : Biaya total penggantian
- $C_{o\&m}$  : Biaya total operasi dan perawatan
- $C_s$  : Nilai sisa diakhir proyek (*salvage*)

## 2. *Cost of Energy* (COE)

Ketika sistem telah menghasilkan listrik maka ada biaya yang akan dikeluarkan per kWhnya, biaya inilah yang disebut dengan *COE* atau *Cost of Energy*. *CEO* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 11 (Syahputra & Soesanti, 2021).

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{C_{serv}} \quad (11)$$

Dimana:

- $C_{ann,tot}$  : Total biaya tahunan (Rp/Tahun)
- $C_{serv}$  : Total pemakaian listrik tahunan (kWh/Tahun)

## 3. *Operation Cost*

Biaya operasi didefinisikan sebagai nilai tahunan dari semua biaya dan pendapatan selain biaya modal awal. Biaya operasi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$C_{operating} = C_{ann,tot} - C_{ann,cap} \quad (12)$$

Dimana:

- $C_{ann,tot}$  : Total biaya tahunan (Rp/Tahun)
- $C_{ann,cap}$  : Total biaya modal tahunan (Rp/Tahun)

## 4. *Initial Capital Cost*

Biaya modal awal adalah total biaya pemasangan komponen pembangkit pada awal proyek.

## 5. *Renewable Fraction*

Fraksi terbarukan didefinisikan sebagai persentase beban yang dipasok oleh sistem energi terbarukan, yang dapat dihitung dengan Persamaan (13).

$$f_{ren} = 1 - \frac{E_{nonren} - H_{nonren}}{E_{served} + H_{served}} \quad (13)$$

Dimana:

$E_{nonren}$  : Produksi listrik yang tidak terbarukan

$H_{nonren}$  : Produksi termal yang tidak terbarukan

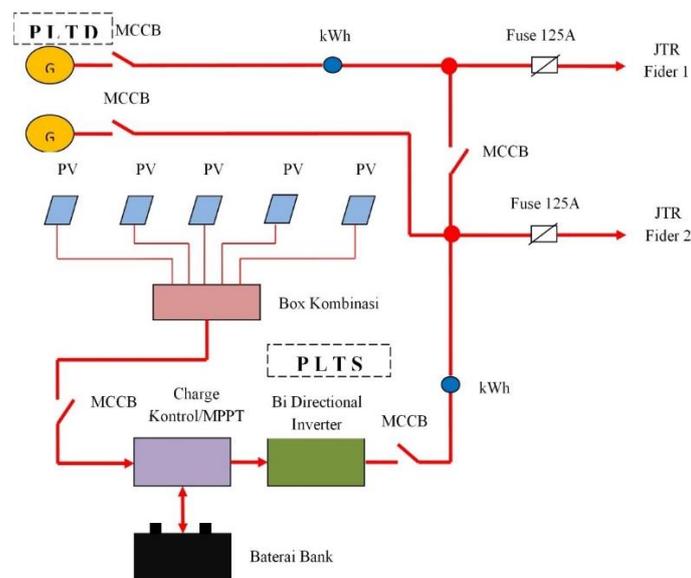
$E_{served}$  : Total beban listrik yang dilayani

$H_{served}$  : Total beban termal yang dilayani

## 2.10 Gambaran Umum Kelistrikan Pulau Karanrang

Pulau Karanrang adalah salah satu pulau yang berada di Desa Mattiro Bulu, Kecamatan Liukang Tupabbiring Utara, Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan Pulau karanrang memiliki wilayah seluas 3 km<sup>2</sup>. Secara astronomis, pulau ini terletak di titik koordinat 4°51'24.000"LS, 119°23'5.000"BT. Jarak tempuh dari Kota Makassar yaitu 2 jam dan 1,5 jam dari Kota Pangkep yang ditempuh melalui jalur laut. Pulau Karanrang dihuni dengan total jumlah penduduk 3.336 jiwa (Sayam et al., 2022).

Sistem kelistrikan pulau Karanrang di *supply* dengan PLTD dengan 3 unit generator diesel yang berkapasitas masing-masing 130 kW, 100 kW, 130 kW dan PLTS dengan kapasitas 200 kWp untuk melayani total 534 pelanggan dimana terdapat 150 pelanggan prabayar dan 384 pelanggan pascabayar. Gambar 5 memperlihatkan blok *single line diagram* PLTS-PLTD Pulau Karanrang.



**Gambar 5.** Blok *single line diagram* PLTS-PLTD Pulau Karanrang (PT. PLN UP3 Makassar Utara, 2023)

Konsumsi energi listrik Pulau Karanrang pada tahun 2017 sampai 2022 dapat dilihat pada tabel berikut:

**Tabel 3.** Jumlah konsumsi energi Pulau Karanrang tahun 2017-2022

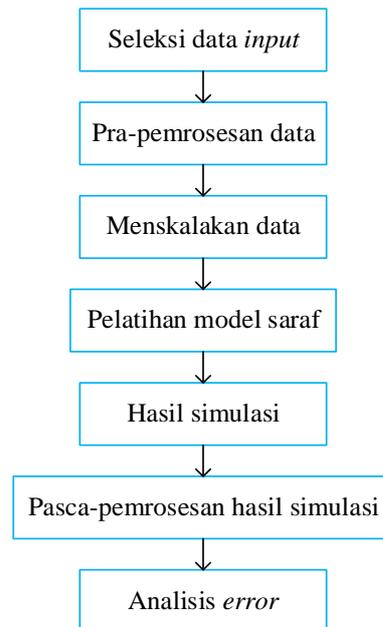
Bulan	Konsumsi Energi (kWh)					
	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Januari	48.758	49.442	50.969	57.392	54.695	57.770
Februari	46.228	44.897	49.295	53.255	51.649	53.275
Maret	52.888	50.935	54.908	59.740	61.195	62.485
April	52.040	48.440	54.908	57.913	64.467	68.468
Mei	55.843	58.880	67.171	67.803	67.022	65.870
Juni	58.045	58.880	58.958	61.355	62.701	60.101
Juli	56.342	57.138	59.256	62.068	63.380	62.966
Agustus	56.166	57.997	45.760	63.692	64.608	63.634
September	54.473	48.554	51.545	62.874	62.105	64.467
Oktober	45.954	59.322	59.042	63.912	66.695	64.134
November	52.191	53.980	59.009	61.276	60.970	61.455
Desember	43.645	50.653	59.488	54.512	58.875	59.014
<b>TOTAL</b>	<b>622.572</b>	<b>639.116</b>	<b>670.308</b>	<b>725.790</b>	<b>738.358</b>	<b>743.637</b>

Sumber: (PT PLN UP3 Makassar Utara, 2023)

Berdasarkan data yang diperoleh dapat dilihat adanya peningkatan konsumsi energi listrik di Pulau Karanrang setiap tahun dengan rata-rata peningkatan sebesar 4%.

## 2.11 Jaringan Saraf Tiruan (JST)

Jaringan syaraf tiruan (JST) atau *Neural Network* adalah algoritma penyelesaian masalah komputasi dimana prinsip kerjanya mereplikasi jaringan syaraf manusia (Al-Ani & Erkanb, 2022). JST merupakan topik yang banyak digunakan dalam dasawarsa terakhir. Hal ini disebabkan karena kemampuan JST untuk meniru sifat sistem yang diinputkan. Berdasarkan masukan target yang diberikan, JST mampu mengadaptasikan dirinya sehingga memberikan keluaran yang tepat apabila nantinya diberikan masukan lain yang serupa. Salah satu penerapan JST dalam dunia nyata yaitu pada bidang peramalan (*forecast*). Berikut prosedur jaringan syaraf tiruan dalam melakukan *forecasting*.



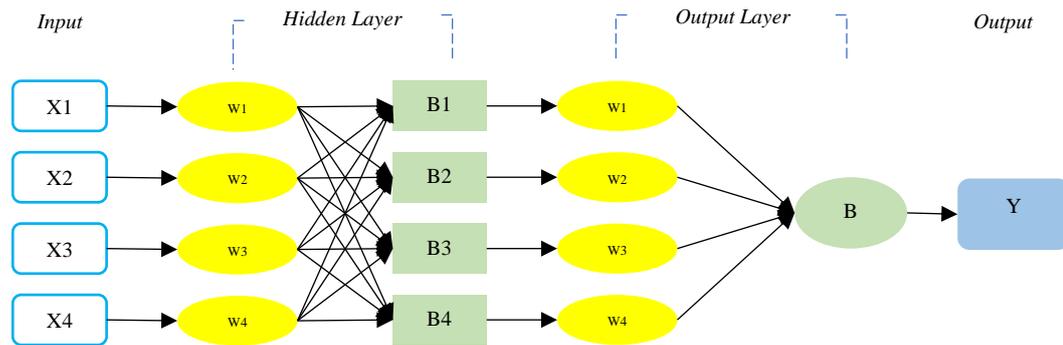
**Gambar 6.** Prosedur jaringan saraf tiruan (Ray et al., 2016)

JST dibentuk sebagai generalisasi model matematika dari jaringan syaraf biologi, dengan asumsi bahwa:

1. Pemrosesan informasi terjadi pada banyak elemen sederhana (neuron).
2. Sinyal dikirimkan diantara neuron-neuron melalui penghubung-penghubung.
3. Penghubung antar neuron memiliki bobot yang akan memperkuat atau memperlemah sinyal.
4. Untuk menentukan *output*, setiap neuron menggunakan fungsi aktivasi (biasanya bukan fungsi linier) yang dikarenakan pada jumlah *input* yang diterima. Besarnya *output* ini selanjutnya dibandingkan dengan suatu batas ambang.

Jaringan Syaraf Tiruan ditentukan oleh 3 hal:

1. Pola hubungan antar neuron yang disebut arsitektur jaringan
2. Metode untuk menentukan bobot penghubung yang disebut metode *training/learning/algorithm*.
3. Fungsi aktivasi.



**Gambar 7.** Arsitektur jaringan saraf tiruan (Alhendi et al., 2023)

Keterangan:

$X$  = *Input*  
 $W$  = *Weight*  
 $B$  = *Bias*  
 $Y$  = *Output*

Arsitektur jaringan syaraf tiruan dapat dilihat pada Gambar 7 diatas. Adapun lapisan pada JST terdiri dari tiga bagian utama yakni *input*, *hidden layer*, dan *output layer*. Pada bagian *input*, lapisan ini menerima masukan berupa data yang ingin diproses oleh jaringan. Lapisan tersebut atau *hidden layer* menjembatani lapisan *input* dan *output*. Dari bagian input data dapat melewati satu atau lebih *hidden layer*.

Tugas *hidden layer* adalah mengubah *input* menjadi sesuatu yang dapat digunakan unit *output*. Selain itu, lapisan ini melakukan semua perhitungan untuk menemukan fitur dan pola tersembunyi. Mayoritas jaringan syaraf tiruan sepenuhnya terhubung dari satu lapisan ke lapisan lainnya. Koneksi ini diberi bobot, semakin tinggi angkanya semakin besar pengaruh satu unit terhadap unit lain. Saat data melewati setiap unit, jaringan belajar lebih banyak tentang data.

Masukan atau *input* melewati serangkaian transformasi menggunakan *hidden layer*, pada akhirnya menghasilkan *output*. Jaringan syaraf tiruan mengambil *input* dan menghitung bobot dari *input* dan bias. Perhitungan ini direpresentasikan dalam bentuk fungsi transfer.

$$\sum_{i=1}^n W_i \times x_i + b \quad (14)$$

Salah satu dari jenis metode ini adalah *Backpropagation Neural Network*. Seperti halnya model JST lain, *backpropagation* melatih jaringan untuk

mendapatkan keseimbangan antara kemampuan jaringan untuk mengenali pola yang digunakan selama pelatihan serta kemampuan jaringan untuk memberikan respon yang benar terhadap pola masukan yang serupa tapi tidak sama dengan pola yang digunakan selama pelatihan.

Masalah utama yang dihadapi dalam *backpropagation* adalah lamanya iterasi yang harus dilakukan. *Backpropagation* tidak dapat memberikan kepastian tentang berapa *epoch* yang harus dilalui untuk mencapai kondisi yang diinginkan. Oleh karena itu orang berusaha meneliti parameter-parameter jaringan yang dibuat sehingga menghasilkan jumlah iterasi yang relatif lebih sedikit.

### **2.12 Hybrid Optimisation Model for Electric Renewable (HOMER)**

HOMER merupakan salah satu *tool* populer untuk desain sistem pembangkit listrik hibrid energi terbarukan dan bahan bakar. HOMER, model pengoptimalan daya mikro yang dapat digunakan untuk mendesain sistem *off-grid* dan *grid-connected*. HOMER memodelkan sistem tenaga mikro dengan sumber daya tunggal atau ganda seperti fotovoltaik, turbin angin, biomassa, mikro hidro, mesin diesel dan mesin bolak-balik lainnya, mikroturbin, baterai, *grid*, sel bahan bakar, dan elektroliser. Penggunaan HOMER dapat membantu melakukan analisis untuk mengeksplorasi berbagai pertanyaan desain seperti teknologi mana yang paling hemat biaya, berapa ukuran komponen yang seharusnya, apa yang terjadi pada keekonomian proyek jika biaya atau beban berubah, dan apakah sumber daya terbarukan memadai.

HOMER menemukan kombinasi komponen dengan biaya paling rendah yang memenuhi beban listrik dan termal. HOMER mensimulasikan ribuan konfigurasi sistem, mengoptimalkan *lifecycle cost*, dan menghasilkan hasil analisis sensitivitas. HOMER mensimulasikan pengoperasian sistem dengan membuat perhitungan keseimbangan energi untuk setiap 8.760 jam dalam setahun. Untuk setiap jam, HOMER membandingkan beban listrik pada jam tersebut dengan energi yang dapat disuplai oleh sistem pada jam tersebut. Untuk sistem yang menggunakan baterai atau generator bertenaga bahan bakar, HOMER juga memutuskan untuk setiap jam bagaimana mengoperasikan generator dan apakah akan mengisi atau mengosongkan baterai. Jika sistem memenuhi beban sepanjang tahun, HOMER

memperkirakan *lifecycle cost* sistem, memperhitungkan modal, penggantian, operasi dan pemeliharaan, bahan bakar, dan biaya bunga. Kita dapat melihat aliran energi per jam untuk setiap komponen serta ringkasan biaya dan kinerja tahunan.

Setelah mensimulasikan semua konfigurasi sistem yang memungkinkan, HOMER menampilkan daftar sistem yang layak, diurutkan berdasarkan *lifecycle cost*. Kita dapat dengan mudah menemukan sistem dengan biaya paling rendah di bagian atas daftar, atau kita dapat memindai daftar untuk sistem lain yang layak.

### **2.13 Multi Criteria Decision Making (MCDM)**

Konsep *Multi Criteria Decision Making* atau Sistem Pendukung Keputusan (SPK) pertama kali diungkap oleh Michael Scoot Morton pada tahun 1971. MCDM telah menjadi salah satu subbidang yang paling penting dan paling cepat berkembang dalam riset operasi/ilmu manajemen. MCDM berarti proses penentuan solusi terbaik yang layak menurut kriteria yang telah ditetapkan dan masalah yang umum terjadi dalam kehidupan sehari-hari. Masalah-masalah praktis sering kali dicirikan oleh beberapa kriteria yang tidak dapat dibandingkan dan saling bertentangan (bersaing), dan mungkin tidak ada solusi yang memenuhi semua kriteria secara bersamaan (Jahan et al., 2016).

Hasil dari sebuah sistem pendukung keputusan yaitu berupa keputusan strategi atau Tindakan pemecah masalah yang diyakini dapat memberikan solusi terbaik dan dapat dijadikan sebagai tolak ukur sebuah kebijakan dari sebuah masalah. Dalam sistem pendukung keputusan terdapat beberapa metode yang dapat dijadikan sebagai solusi untuk pemecahan masalah seperti metode *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) dan metode *Evaluation based on Distance from Average Solution* (EDAS).

TOPSIS dikenal sebagai metode MCDM yang efektif karena karakteristik khusus dari teknik ini yang membuatnya menjadi metode yang sangat konsisten dengan sedikit usaha untuk komputasi. Pada dasarnya, nilai multi-respon digabungkan dalam pendekatan ini untuk memberikan nilai respon kinerja tunggal. Dalam teknik TOPSIS, tujuannya adalah untuk mendapatkan urutan preferensi yang mirip dengan solusi ideal yang merupakan solusi hipotetis dengan manfaat maksimum dan biaya minimum atribut atau alternatif. Di sisi lain, solusi fiktif yang dikenal sebagai solusi ideal negatif akan meningkatkan biaya atribut atau kriteria

sambil meminimalkan manfaatnya. Dengan demikian, alternatif terbaik, yang juga merupakan solusi dari permasalahan, adalah yang paling dekat dengan solusi ideal positif dan paling jauh dari solusi ideal negatif. Kesamaan atau perbedaan ini digambarkan oleh Jarak Euclidean/Jarak Geometris dan solusi ideal, dan solusi ideal negatif diperiksa berdasarkan nilai maksimum/minimum dari database. Dalam metode ini, dengan bentuk pemodelan yang lebih realistis, pertukaran (*trade-off*) dimungkinkan di antara kriteria karena memungkinkan untuk mengabaikan hasil yang buruk dengan mempertimbangkan satu kriteria dengan hasil yang baik di kriteria lain (Madanchian & Taherdoost, 2023).

Metode *Evaluation based on Distance from Average Solution* (EDAS) dikembangkan oleh Keshavars Ghorabae dkk pada tahun 2015 untuk klasifikasi inventaris multi-kriteria. Metode ini sangat berguna ketika kita memiliki beberapa kriteria yang saling bertentangan. Dalam metode MCDM seperti TOPSIS, alternatif terbaik diperoleh dengan menghitung jarak dari solusi ideal positif dan solusi ideal negatif. Alternatif yang diinginkan memiliki jarak yang lebih rendah dari solusi ideal positif dan jarak yang lebih tinggi dari solusi ideal negatif pada metode MCDM tersebut. Namun, alternatif terbaik dalam metode EDAS terkait dengan jarak dari solusi rata-rata (AV). Kita tidak perlu menghitung solusi ideal positif dan solusi ideal negatif dalam metode ini. Dalam metode ini, kita memiliki dua ukuran yang berhubungan dengan kelayakan alternatif. Ukuran pertama adalah jarak positif dari rata-rata (PDA), dan ukuran kedua adalah jarak negatif dari rata-rata (NDA). Kedua ukuran ini dapat menunjukkan perbedaan antara setiap solusi (alternatif) dengan solusi rata-rata. Evaluasi alternatif dibuat berdasarkan nilai PDA yang lebih tinggi dan nilai NDA yang lebih rendah. Nilai PDA yang lebih tinggi dan/atau nilai NDA yang lebih rendah menunjukkan bahwa solusi (alternatif) tersebut lebih baik daripada solusi rata-rata (Ghorabae et al., 2015).