

SKRIPSI

**PERENCANAAN SISTEM BERBASIS *HYBRID* PADA
PEMBANGKIT LISTRIK ENERGI TERBARUKAN
DI PULAU KAPOPOSANG**

Disusun dan diajukan oleh:

**JORGIO ZAFANYA
D041 20 1120**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**PERENCANAAN SISTEM BERBASIS *HYBRID* PADA PEMBANGKIT
LISTRIK ENERGI TERBARUKAN
DI PULAU KAPOPOSANG**

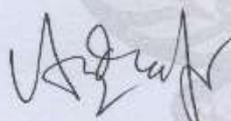
Disusun dan diajukan oleh

Jorgio Zafanya
D041201120

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 09 Oktober 2024
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

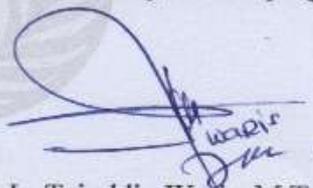
Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Prof. Ir. Ardiaty Arief, S.T., M.T.M., Ph.D.
NIP. 197804242001122001

Pembimbing Pendamping,



Ir. Tajuddin Waris, M.T.
NIP. 196504241992031003

Ketua Program Studi,



Prof. Dr.-Ing. Ir. Falzal Arya Samudra, ST, MT, IPU, AseanEng, ACPE
NIP. 197506052002121004

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Jorgio Zafanya

NIM : D041201120

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

PERENCANAAN SISTEM BERBASIS *HYBRID* PADA PEMBANGKIT LISTRIK ENERGI TERBARUKAN DI PULAU KAPOPOSANG

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilalihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

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

Gowa, 09 Oktober 2024

Yang Menyatakan




Jorgio Zafanya

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan limpahan rahmat, kesehatan, dan petunjuk sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul “PERENCANAAN SISTEM BERBASIS *HYBRID* PADA PEMBANGKIT LISTRIK ENERGI TERBARUKAN DI PULAU KAPOPOSANG”. Penyusunan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat kelulusan pada pendidikan Strata Satu (S1) di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin sehingga penulisan tugas akhir ini tidak terlepas sebagai pemenuhan penulis untuk menyelesaikan studi sarjana.

Dalam penyelesaian tugas akhir tidak lepas mendapat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Maka dari itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang terkait, yaitu:

1. Orang tua dan saudara-saudara tercinta, serta seluruh keluarga yang tak henti-hentinya memberikan semangat, bantuan, nasehat, doa, dan motivasinya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik
2. Ibu Prof. Ir. Ardiaty Arief, S.T., M.T.M., Ph.D. dan Bapak Ir. Tajuddin Waris, M.T. selaku dosen pembimbing penulis yang telah meluangkan waktunya untuk bertukar pikiran serta memberikan saran, masukan, maupun arahan yang sangat berguna dalam penyusunan tugas akhir penulis
3. Bapak Prof. Ir. M. Bachtiar Nappu, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D. dan Ibu Ir. Hasniaty A, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan kritik dan saran yang sangat berguna dalam penyelesaian tugas akhir penulis
4. Bapak/ibu dosen dan staff di lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin khususnya program studi Teknik Elektro atas bimbingan, didikan, kemudahan, dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis selama menjalani masa studi di Universitas Hasanuddin
5. Sahabat-sahabat Grup zzz, yaitu Gilbert, Rowen, Anderson, Rezky, Sandhi, Airell, Brandon, Willsen, dan Tope yang telah kebersamaian mendukung dan menjadi inspirasi bagi penulis, serta saling berbagi kisah hidup

6. Sahabat-sahabat IPA 3 yang telah kebersamai penulis dan menjadi wadah untuk berbagi wawasan, cerita, canda, dan tawa
7. Rekan-rekan kelompok belajar, yaitu Ponno, Anderson, Pa'ang, dan Shalih yang selalu belajar bersama dan berbagi cerita selama proses perkuliahan.
8. Teman-teman seperjuangan di Grup Riset *Power & Energy System* serta Grup Riset *Electricity Market & Power System*, yaitu Anderson, Ponno, Yoflin, Muflih, Owen, Febe, Dinda, dan Salsah
9. Seluruh masyarakat Desa Liukang Tupabbiring, Pulau Kapoposang, Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan. Khususnya keluarga Bapak Hasanuddin dan Bapak Safar atas sarana, prasarana, serta kebaikan yang telah diberikan kepada penulis dan teman-teman selama melaksanakan KKN.
10. Keluarga besar PROCEZ20R, terima kasih atas kebersamaan dan kekompakannya
11. Seluruh pihak yang telah memberi bantuan, dukungan, motivasi serta doa yang tidak dapat disebutkan.

Penulis menyadari bahwa terdapat kekurangan dalam penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik, saran, dan arahan yang dapat menjadi pengembangan ataupun perbaikan dari berbagai pihak, sehingga dapat dijadikan bahan untuk evaluasi kedepannya. Penulis berharap penelitian ini dapat memberi manfaat baik itu kepada penulis maupun pembaca.

Gowa, 09 Oktober 2024

Penulis

ABSTRAK

JORGIO ZAFANYA *Perencanaan Sistem Berbasis Hybrid Pada Pembangkit Listrik Energi Terbarukan di Pulau Kapoposang* (dibimbing oleh Ardiaty Arief dan Tajuddin Waris)

Pulau Kapoposang memiliki potensi alam yang sangat bagus untuk dilakukannya pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Karena kurangnya kapasitas pembangkit di pulau tersebut sehingga kebutuhan listrik tidak dapat terpenuhi secara 24 jam. Untuk mengatasi hal tersebut diperlukan sistem pembangkit yang lebih baik dan lebih ekonomis dengan menggunakan energi terbarukan mengingat potensi energi surya dan energi angin yang cukup bagus di Pulau Kapoposang. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan konfigurasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* yang paling optimal dalam melayani beban di Pulau Kapoposang dengan mempertimbangkan kenaikan beban hingga 8%. Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis kebutuhan beban, potensi radiasi matahari dan kecepatan angin di Pulau Kapoposang di mana perencanaan beban harian di Pulau Kapoposang sekitar 5,531.38 kWh/hari dengan acuan beban puncak setiap jamnya. Rata-rata radiasi matahari tahun 2023 yaitu 5.587 kWh/m²/hari, dan rata-rata kecepatan angin pada tahun 2023 yaitu 4.162 m/s. Selain itu pada penelitian ini juga dilakukan analisis ekonomi untuk mempertimbangkan konfigurasi sistem yang paling optimal untuk direalisasikan di mana konfigurasi sistem yang paling optimal, yaitu menggunakan konfigurasi 20% PLTS dan 80% PLTD dengan kapasitas pembangkit 1740,8 kW PLTS dan 6 buah generator berkapasitas 550 kVA yang bahkan sangat layak dijalankan hingga kenaikan beban sebesar 8%. Hal ini dikarenakan terdapat 2 jenis pembangkit yang saling *backup* jika pembangkit yang lain sedang mengalami gangguan. Konfigurasi sistem ini memiliki nilai NPV yang tinggi, yaitu sebesar \$2,256,367.27 atau keuntungan sekitar 126.07% dari investasi awal dan dapat dilakukan hingga suku bunga 15.9197%. Nilai NPV tersebut pun mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan beban hingga 8%, yaitu dengan NPV sebesar \$15,251,627.93.

Kata Kunci: Pulau Kapoposang, PLTH, Analisis Ekonomi, Optimal

ABSTRACT

JORGIO ZAFANYA *Hybrid Based System Planning in Renewable Energy Power Plants on Kapoposang Island (supervised by Ardiaty Arief and Tajuddin Waris)*

Kapoposang Island has very good natural potential for the construction of Solar Power Plants (PLTS) and Wind Power Plants (PLTB). Due to the lack of generating capacity on the island, electricity needs cannot be met 24 hours a day. To overcome this, a better and more economical generating system is needed using renewable energy considering the potential for solar energy and wind energy which is quite good on Kapoposang Island. The purpose of this study is to determine the most optimal configuration of the Hybrid Power Plant system in serving the load on Kapoposang Island by considering a load increase of up to 8%. This study was conducted by analyzing load requirements, potential solar radiation, and wind speed on Kapoposang Island where the daily load planning on Kapoposang Island is around 5,531.38 kWh/day with a reference to the peak load every hour. The average solar radiation in 2023 is 5,587 kWh/m²/day, and the average wind speed in 2023 is 4,162 m/s. In addition, this study also conducted an economic analysis to consider the most optimal system configuration to be realized where the most optimal system configuration, namely using a configuration of 20% Solar Power Plants (PLTS) and 80% Diesel Power Plants (PLTD) with a generating capacity of 1740.8 kW PLTS and 6 generators with a capacity of 550 kVA which is even very feasible to run up to an increase in load of 8%. This is because there are 2 types of generators that back each other up if the other generator is experiencing a disruption. This system configuration has a high NPV value, which is \$ 2,256,367.27 or a profit of around 126.07% of the initial investment and can be done up to an interest rate of 15.9197%. The NPV value also increases along with the increase in load of up to 8%, namely with an NPV of \$ 15,251,627.93.

Keywords: Kapoposang Island, Hybrid Power Plant, Economic Analysis, Optimal

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN KEASLIAN	Error! Bookmark not defined.
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Metode Penelitian	4
1.7 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya.....	6
2.1.1 Efek fotovoltaiik.....	7
2.1.2 Komponen PLTS.....	9
2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu.....	14
2.2.1 Turbin angin	15
2.2.2 Penyearah	20
2.2.3 Zona operasi turbin angin.....	20
2.3 <i>Software</i> HOMER Pro	22
2.4 Studi Aspek Ekonomi	25
2.4.1 <i>Capital cost</i>	25
2.4.2 Biaya operasional dan pemeliharaan (O&M)	25
2.4.3 Nilai sisa (<i>salvage</i>).....	26
2.4.4 <i>Life cycle cost</i> (LCC)	27
2.4.5 <i>Cost of energy</i> (COE).....	28
2.4.6 <i>Net present cost</i> (NPC)	29
2.5 Studi Aspek Kelayakan.....	29
2.5.1 <i>Payback period</i> (PBP).....	29
2.5.2 <i>Net present value</i> (NPV)	30
2.5.3 <i>Profitability index</i> (PI)	31
2.5.4 <i>Internal rate of return</i> (IRR).....	32
2.6 <i>State-of-the-art</i>	32
BAB III METODOLOGI PENDAHULUAN	37
3.1 Judul Penelitian	37
3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian	37
3.3 Pengambilan Data	37
3.4 Diagram Alir Penelitian	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Kondisi Awal	39

4.2	Analisis Data.....	41
4.2.1	Profil beban listrik.....	41
4.2.2	Intensitas radiasi matahari.....	46
4.2.3	Data <i>temperature</i>	47
4.2.4	Potensi angin.....	48
4.3	Komponen Pembangkit yang Digunakan.....	49
4.3.1	Panel surya.....	49
4.3.2	Turbin angin.....	50
4.3.3	<i>Converter</i>	51
4.3.4	Baterai.....	52
4.3.5	Generator.....	53
4.4	Skema Pembangkit Listrik Tenaga <i>Hybrid</i>	54
4.5	Simulasi Sistem.....	60
4.6	Analisa Hasil Simulasi.....	61
4.6.1	<i>Electrical production</i>	61
4.6.2	<i>Emissions</i>	64
4.6.3	<i>Capital cost</i>	65
4.6.4	<i>Fuel consumption</i>	66
4.6.5	<i>Operational & Maintenance (O&M)</i>	67
4.6.6	<i>Salvage</i>	69
4.6.7	<i>Cost of Energy (COE)</i>	70
4.6.8	<i>Net Present Cost (NPC)</i>	71
4.7	Analisa Kelayakan.....	72
4.7.1	<i>Payback Period (PBP)</i>	72
4.7.2	<i>Net Present Value (NPV)</i>	73
4.7.3	<i>Internal Rate of Return (IRR)</i>	74
4.7.4	<i>Profitability Index (PI)</i>	75
4.8	Konfigurasi Optimal dari PLTH.....	76
	BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	81
5.1	Kesimpulan.....	81
5.2	Saran.....	82
	DAFTAR PUSTAKA.....	83
	LAMPIRAN.....	87

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Proses konversi energi listrik pada panel surya	6
Gambar 2	Efek fotovoltaiik.....	8
Gambar 3	Zona operasi turbin angin.....	21
Gambar 4	<i>Input</i> dan <i>output</i> simulasi HOMER Pro	23
Gambar 5	Diagram alir penelitian.....	38
Gambar 6	Letak Pulau Kapoposang.....	39
Gambar 7	Pulau Kapoposang.....	40
Gambar 8	<i>Split cold room storage freezer</i> ASTS 245C	44
Gambar 9	Kurva beban listrik harian di Pulau Kapoposang.....	46
Gambar 10	Grafik rata-rata harian radiasi matahari	47
Gambar 11	Grafik <i>temperature</i> matahari.....	48
Gambar 12	Grafik kecepatan angin	49
Gambar 13	Panel Surya Canadian Solar MaxPower CS6U-340M.....	50
Gambar 14	<i>Converter</i> Sinexcel PWG-100.....	52
Gambar 15	Baterai Trojan SSIG 06 490.....	53
Gambar 16	Generator Caterpillar DE550E0.....	54
Gambar 17	Skematik 100% PLTS	55
Gambar 18	Skematik 100% PLTB	55
Gambar 19	Skematik 100% PLTD	56
Gambar 20	Skematik <i>hybrid</i> PLTS + PLTB.....	56
Gambar 21	Skematik <i>hybrid</i> PLTS + PLTD.....	57
Gambar 22	Skematik <i>hybrid</i> PLTB + PLTD	57
Gambar 23	Skematik <i>hybrid</i> PLTS+ PLTB + PLTD.....	58
Gambar 24	Grafik Emisi CO ₂	77
Gambar 25	Grafik <i>Net Present Cost</i> (NPC).....	78
Gambar 26	Grafik <i>Net Present Value</i> (NPV)	79
Gambar 27	Grafik <i>payback period</i>	80

DAFTAR TABEL

Tabel 1	<i>State-of-the-art</i>	33
Tabel 2	Estimasi kebutuhan daya listrik pada beban rumah tangga.....	42
Tabel 3	Estimasi kebutuhan daya listrik di sekolah.....	42
Tabel 4	Estimasi kebutuhan daya listrik di mushalla.....	43
Tabel 5	Spesifikasi <i>split cold room storage freezer</i> ASTS 245C.....	44
Tabel 6	Estimasi kebutuhan daya listrik harian di Pulau Kapoposang.....	45
Tabel 7	Spesifikasi Canadian Solar MaxPower CS6U-340M.....	50
Tabel 8	Spesifikasi turbin angin EOX M-21.....	51
Tabel 9	Spesifikasi <i>Converter</i> Sinexcel PWG-100.....	52
Tabel 10	Spesifikasi Baterai Trojan SSIG 06 490.....	53
Tabel 11	Spesifikasi Generator Caterpillar DE550E0.....	54
Tabel 12	Jumlah komponen sistem jika kenaikan beban 3%.....	59
Tabel 13	Jumlah komponen sistem jika kenaikan beban 5%.....	60
Tabel 14	Jumlah komponen sistem jika kenaikan beban 8%.....	60
Tabel 15	Produksi energi listrik jika kenaikan beban 3%.....	62
Tabel 16	Produksi energi listrik jika kenaikan beban 5%.....	63
Tabel 17	Produksi energi listrik jika kenaikan beban 8%.....	63
Tabel 18	Emisi sistem jika kenaikan beban 3%.....	64
Tabel 19	Emisi sistem jika kenaikan beban 5% dan 8%.....	65
Tabel 20	Biaya investasi awal.....	66
Tabel 21	Konsumsi bahan bakar.....	67
Tabel 22	Biaya penggantian komponen.....	68
Tabel 23	Biaya operasional dan pemeliharaan.....	69
Tabel 24	<i>Salvage</i> sistem.....	70
Tabel 25	<i>Cost of Energy</i> (COE) sistem.....	71
Tabel 26	<i>Net Present Cost</i> (NPC) sistem.....	72
Tabel 27	<i>Payback Period</i> (PBP) sistem.....	73
Tabel 28	<i>Net Present Value</i> (NPV) sistem.....	74
Tabel 29	<i>Internal Rate of Return</i> (IRR) sistem.....	75
Tabel 30	<i>Profitability Index</i> (PI) sistem.....	76

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peran energi sangat penting dalam peningkatan pembangunan ekonomi sehingga penggunaan sumber energi terbarukan merupakan hal yang sudah tak asing lagi dalam pengupayaan menuju energi yang lebih bersih. Sumber energi terbarukan merupakan suatu sumber energi yang berasal dari sumber daya alam di mana ketersediaan yang ditawarkan sangat melimpah dan mampu digunakan secara bebas tanpa perlu mengkhawatirkan ketersediaan sumber tersebut karena dapat diperbaharui secara terus-menerus.

Karena terletak di wilayah tropis membuat Indonesia memiliki keuntungan yang besar yaitu adanya energi matahari sepanjang tahun, tetapi pemanfaatan energi tersebut belum dipergunakan dengan baik. Selain itu, energi matahari dapat dimanfaatkan dengan bantuan peralatan lain, seperti radiasi matahari yang dapat diubah menjadi bentuk lain. Terdapat dua metode yang digunakan untuk mengubah radiasi matahari menjadi energi tambahan yaitu dengan melalui *solar cell* dan *collector*. Tidak diragukan lagi, energi surya adalah salah satu sumber energi yang paling ramah lingkungan dan sangat menjanjikan pada masa yang akan datang, karena energi surya merupakan salah satu energi terbarukan yang sangat bersih dan menjanjikan dikarenakan tidak adanya polusi yang dihasilkan serta sumber energinya yang melimpah (Ramadhan, 2016).

Pentingnya menggunakan sumber energi terbarukan ini adalah karena sumber energi fosil yang kita gunakan saat ini seperti minyak bumi dan gas alam semakin menipis. Ini dikarenakan sumber energi tersebut merupakan sumber energi *nonrenewable*. Selain itu, penggunaan sumber energi fosil juga berdampak negatif pada lingkungan, seperti polusi udara dan pemanasan global. Dengan menggunakan sumber energi terbarukan, kita bisa mengurangi ketergantungan kita pada sumber energi fosil dan mengurangi dampak negatifnya terhadap lingkungan. Selain itu, sumber energi terbarukan juga bersifat ramah lingkungan dan dapat diperbaharui secara terus-menerus.

Meskipun begitu, penggunaan sumber energi terbarukan juga memiliki tantangan tersendiri. Misalnya, infrastruktur yang diperlukan untuk menghasilkan energi terbarukan seperti panel surya atau turbin angin membutuhkan biaya yang cukup besar, serta ada juga perluasan jaringan listrik yang diperlukan untuk mendistribusikan energi terbarukan ke suatu wilayah. Selain itu, perubahan cuaca juga dapat menjadi salah satu perhitungan yang dapat menghambat pasokan energi listrik pada pembangkit bila hanya bergantung pada pembangkit sumber daya terbarukan.

Istilah sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* (PLTH), digunakan pada pembangkit listrik yang mengandung lebih dari satu generator yang biasanya gabungan antara generator konvensional (mesin diesel) dan energi terbarukan (PLTS, PLTB, atau PLTMH). Di seluruh dunia kini ada ribuan sistem PLTH beroperasi dan jumlahnya terus bertambah, mulai dari ukuran beberapa puluh watt hingga puluhan kilowatt. Beberapa keuntungan sistem PLTH adalah: (1) meningkatkan keandalan sistem dalam memenuhi beban, mengurangi emisi dan polusi, (2) menyediakan suplai listrik kontinu, (3) meningkatkan usia sistem, dan (4) mengurangi biaya-biaya dan meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik (Kunaifi, 2010).

Pulau Kapoposang merupakan suatu pulau yang berada di Sulawesi Selatan khususnya di wilayah Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan (Pangkep). Pulau Kapoposang memiliki potensi alam yang sangat bagus untuk dilakukannya pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dikarenakan pulau tersebut merupakan wilayah pantai yang di mana sinar matahari yang bersinar sangat terik dari pagi hingga sore hari, sedangkan angin yang berhembus pada malam hari cukup dingin yang membuat pulau tersebut juga berpotensi untuk dilakukannya pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).

Sebelumnya untuk memenuhi kebutuhan listrik maka sebagian besar masyarakat di Pulau Kapoposang hanya mengandalkan tenaga diesel untuk membangkitkan tenaga listrik yang di mana karena memakai tenaga diesel maka biaya yang diperlukan juga semakin besar. Akhirnya, pada tahun 2017 lalu pulau tersebut mendapatkan bantuan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terpusat dari Kementerian ESDM sebesar 50 kWp. Namun, hal ini nyatanya masih belum

cukup untuk memenuhi kebutuhan listrik di Pulau Kapoposang secara 24 jam karena daya dari PLTS tersebut masih terbilang kecil dan karena PLTS tersebut juga kualitasnya sudah mulai menurun sehingga penyaluran tenaga listriknya sudah kurang efisien.

Maka untuk mengatasi hal tersebut diperlukan sistem pembangkit yang lebih baik dan lebih ekonomis dengan menggunakan energi terbarukan mengingat potensi energi surya dan energi angin yang cukup bagus di Pulau Kapoposang. Sehingga penelitian ini bertujuan untuk melakukan optimasi perancangan Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* guna meminimalkan biaya ekonomi untuk pemenuhan kebutuhan listrik di Pulau Kapoposang.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan Latar Belakang di atas, dapat di rumuskan masalah :

1. Bagaimana menentukan skema dari Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* (PLTH) di Pulau Kapoposang?
2. Bagaimana simulasi dan optimasi Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* (PLTH) di Pulau Kapoposang menggunakan *software* HOMER Pro?
3. Bagaimana menentukan konfigurasi sistem yang paling optimal dalam melayani beban di Pulau Kapoposang?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Dapat menentukan skema dari Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* (PLTH) di Pulau Kapoposang
2. Mensimulasi dan Mengoptimasi Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* (PLTH) di Pulau Kapoposang menggunakan *software* HOMER Pro
3. Dapat menentukan konfigurasi sistem yang paling optimal dalam melayani beban di Pulau Kapoposang

1.4 Batasan Masalah

1. Simulasi serta optimasi sistem pembangkit tenaga listrik dengan menggunakan *software* HOMER Pro
2. Penentuan konfigurasi sistem yang optimal pada Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid*
3. Penelitian ini memperhitungkan analisis ekonomi dan analisis kelayakan
4. Mempertimbangkan jika kenaikan beban 10% dan kenaikan beban 20%
5. Penelitian hanya dilakukan pada Pulau Kapoposang

1.5 Manfaat Penelitian

1. Menjadi masukan serta referensi bagi kepala daerah setempat dalam pengambilan rencana untuk pengembangan energi terbarukan dengan pembangunan pembangkit energi listrik dengan menghibrid pembangkit listrik energi terbarukan dengan pembangkit listrik diesel
2. Memberikan kesadaran terhadap masyarakat setempat dalam pemanfaatan potensi energi terbarukan di lingkungan daerah mereka
3. Menjadi referensi bagi mahasiswa dan peneliti untuk memperdalam ilmu pengetahuan akan optimasi sistem pembangkit energi listrik dengan sistem *hybrid*

1.6 Metode Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Studi literatur yaitu dengan menggunakan buku, jurnal, dan artikel di internet untuk menunjang referensi penulis.
2. Pengambilan Data
Tujuan pengambilan data adalah untuk mendapatkan data sekunder yang akan digunakan dalam penelitian ini di mana dilakukan dengan metode wawancara, pengamatan dan studi literatur.

3. Analisis Data

Berdasarkan data yang telah dikumpulkan lalu diolah dengan menganalisis biaya sistem, kelistrikan, konsumsi bahan bakar dan emisi.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini berisi uraian tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini berisi penjelasan mengenai teori-teori materi penelitian yang digunakan sebagai pendukung dan penunjang untuk penelitian yang diperoleh dari sumber ilmiah.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi rancangan penelitian, waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan penelitian, pengumpulan data, dan langkah-langkah yang digunakan pada penelitian ini.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi hasil simulasi dari penelitian yang diperoleh serta pembahasan terkait penelitian yang dilakukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

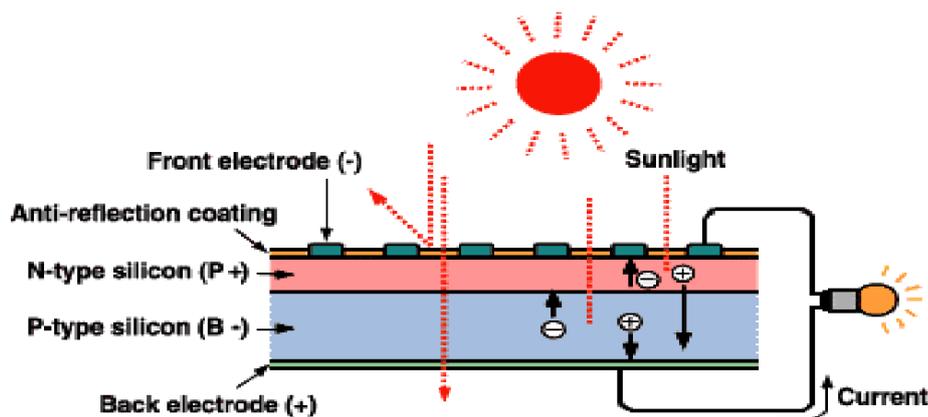
Pada bab ini membahas mengenai kesimpulan yang diperoleh dari penelitian serta saran-saran yang perlu dikaji lebih lanjut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) adalah teknologi pembangkit listrik yang menghasilkan listrik dengan mengkonversi energi foton dari matahari menjadi listrik. Ini dilakukan pada panel surya yang terdiri dari sel-sel fotovoltaik, yang terdiri dari lapisan tipis silikon (Si) murni atau bahan semikonduktor lainnya yang diproses sedemikian rupa sehingga ketika sel surya menerima energi foton maka akan mengeksitasi elektron-elektronnya menjadi elektron bebas yang kemudian akan menghasilkan tegangan listrik DC (*Direct Current*) di mana proses konversi energi listrik pada panel surya dapat dilihat pada Gambar 1 (Miharja, 2012).



Gambar 1 Proses konversi energi listrik pada panel surya

(Sumber: Harahap, 2020)

Sistem pembangkit listrik tenaga surya (PV) menghasilkan listrik dengan mengubah radiasi matahari melalui konversi sel fotovoltaik. Daya listrik yang dihasilkan oleh matahari sebanding dengan intensitas radiasinya di mana jumlah radiasi yang diterima dipermukaan bumi bergantung pada jarak matahari, karena radiasi adalah sinar dan gelombang elektromagnetik yang berasal dari proses termonuklir yang terjadi di matahari.

Salah satu cara untuk menghasilkan listrik secara langsung dari cahaya surya adalah dengan mengkonversi radiasi surya menjadi panas. Namun, ada juga perangkat yang disebut panel surya, yang terdiri dari kumpulan sel surya (juga dikenal sebagai sel surya atau sel fotovoltaik) yang dirangkai menjadi panel surya. Prinsip kerja panel surya adalah untuk mengubah energi matahari menjadi energi listrik menggunakan prinsip fotovoltaik. Setiap sel surya dapat menghasilkan listrik sekitar 0,5 Volt sehingga untuk menghasilkan energi listrik yang lebih besar maka dibutuhkan banyak sel surya (Marliani, 2023).

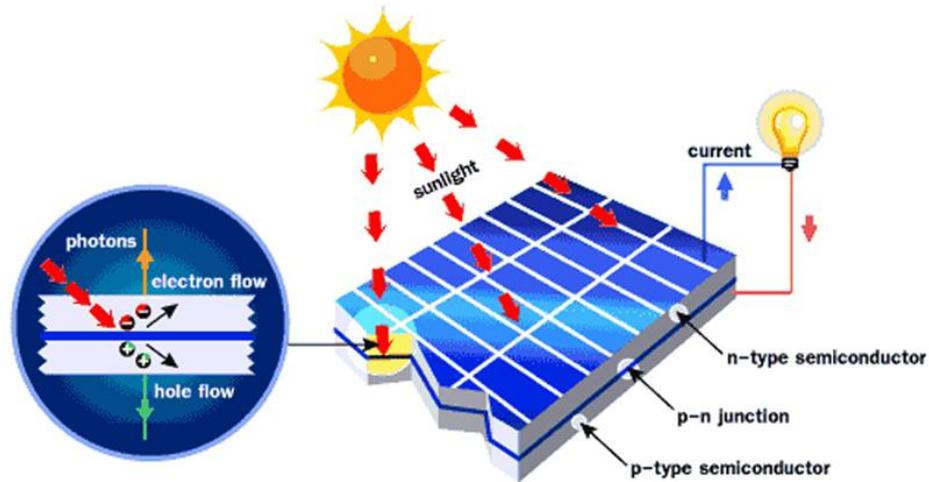
Proses fotovoltaik terjadi ketika modul surya menerima cahaya matahari pada siang hari dan kemudian mengubahnya menjadi energi listrik. Modul surya dapat menghasilkan listrik langsung ke beban atau disimpan dalam baterai sebelum digunakan. Pada malam hari, ketika tidak ada cahaya matahari modul surya tidak dapat menghasilkan listrik sehingga digunakan baterai yang sepenuhnya mencatu beban. Hal ini juga terjadi pada saat hari mendung ataupun hujan, ketika jumlah listrik yang dihasilkan oleh modul surya lebih rendah daripada saat matahari benderang. Sehingga kapasitas modul surya tertentu dapat menghasilkan jumlah listrik yang berbeda jika ditempatkan di tempat yang berbeda pula.

PLTS menggunakan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC (*Direct Current*), yang dapat diubah menjadi listrik AC (*Alternating Current*) saat diperlukan. PLTS adalah pencatu daya (alat yang menyediakan daya) di mana PLTS sendiri dirancang untuk mencatu kebutuhan listrik yang kecil hingga besar, baik secara mandiri maupun *hybrid* serta dapat menggunakan metode desentralisasi (satu rumah satu pembangkit) maupun sentralisasi (listrik didistribusikan melalui jaringan kabel) (Miharja, 2012).

2.1.1 Efek fotovoltaik

Dalam kondisi pencahayaan rendah, sel surya hanya merupakan diode PN *junction*. Efek fotovoltaik terlihat pada Gambar 2 di mana efek fotovoltaik memungkinkan sinar matahari untuk diubah menjadi listrik di mana sinar matahari ini terdiri dari foton-foton (kumpulan dari energi). Foton-foton ini membawa berbagai jumlah energi yang berkorelasi dengan panjang gelombang cahaya yang berbeda. Foton yang mengenai sel surya dapat terpantulkan, terserap, atau mengalir

melalui sel. Sehingga *Electron Hole Pairs* (EHP) terbentuk ketika sinar matahari diserap oleh diode *PN junction*.



Gambar 2 Efek fotovoltaiik

(Sumber: Rajput, 2017)

- a. *Electron Hole Pair* (EHP) terbangkitkan pada *depletion layer* di mana elektron akan dibatasi ke arah N karena adanya medan listrik dan *holes* dari EHP dibatasi ke arah P karena adanya bidang listrik.
- b. *Electron Hole Pair* (EHP) terbangkitkan di wilayah netral *quasi*. Pada wilayah ini, elektron dan *holes* dari *Electron Hole Pair* (EHP) akan menyebar di sekitaran wilayah secara acak. Tidak terdapat gaya listrik yang mengarahkan arah gerakannya.
- c. *Minority carrier* dari wilayah P dan N. *Minority carrier* di sekitaran wilayah deplesi juga akan terarahkan oleh medan listrik.

Pada keadaan ini akan terjadi kenaikan muatan positif pada sisi P dan kenaikan muatan negatif pada sisi N. kenaikan muatan positif dan negatif menyebabkan munculnya perbedaan potensial sepanjang *PN junction* seiring dengan cahaya yang menyinari sel surya. Pembangkitan tegangan ini dikenal dengan istilah efek fotovoltaiik (Rajput, 2017).

Energi surya yang diubah menjadi energi listrik disebut dengan energi fotovoltaiik. Pada awalnya teknologi sel surya hanya digunakan sebagai pembangkit listrik di daerah pedesaan terpencil. Tetapi, hal tersebut kemudian berkembang

menjadi lampu penerangan jalan berenergi surya, penyediaan listrik di tempat umum dan lainnya.

2.1.2 Komponen PLTS

a. Panel surya

Terlepas dari berbagai faktor yang mempengaruhi hasil produksi, PLTS ini berhasil menghasilkan energi listrik. Salah satu faktor yang mempengaruhi hasil produksi PLTS adalah radiasi matahari di mana jumlah energi yang dihasilkan modul surya dapat meningkat atau menurun tergantung pada tingkat radiasi matahari di lokasi pengukuran. *Shading* (bayangan) adalah benda-benda di sekitar PLTS yang menghalangi sinar matahari untuk masuk ke dalamnya, sehingga mengurangi jumlah radiasi yang ditangkap. Tingkat kebersihan panel surya juga dapat mempengaruhi jumlah energi yang dihasilkan oleh PLTS karena kotoran atau debu menghalangi sel surya untuk menerima sinar matahari. Selain itu, perlu diperhatikan sudut kemiringan dan orientasi pemasangan modul surya agar panel surya dapat berfungsi dengan baik. Terakhir yaitu jenis panel surya yang digunakan juga dapat mempengaruhi tingkat efisiensi dari PLTS (Wicaksana, dkk, 2019). Berikut jenis-jenis dari panel surya (Purwoto, dkk, 2019).

1. Monokristalin (*Mono-Crystalline*), Dengan teknologi terkini, monokristalin adalah panel paling efisien yang menghasilkan daya listrik persatuan luas yang paling tinggi. Monokristalin dibuat untuk digunakan di lingkungan dengan iklim ekstrim dan kondisi alam yang ganas. Panel jenis ini memiliki efisiensi sampai dengan 15%. Kelemahannya dari jenis panel ini yaitu tidak akan berfungsi dengan baik di tempat yang kurang cahaya matahari (teduh), dan panel jenis ini akan sangat kurang efisien dalam cuaca berawan.
2. Polikristalin (*Poly-Crystalline*). Merupakan panel surya yang memiliki susunan kristal acak. Jenis ini memiliki tingkat efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan panel monokristalin, tetapi juga memiliki harga yang cukup rendah. Tipe ini memerlukan luas permukaan yang lebih besar untuk menghasilkan daya listrik yang sama dengan jenis panel monokristalin.
3. *Thin Film Photovoltaic*. Merupakan Panel Surya (dua lapisan) yang memiliki struktur lapisan tipis mikrokrystal-*silicon* dan *amorphous* dengan efisiensi

modul hingga 8.5% yang berarti bahwa panel jenis ini memerlukan luas permukaan yang lebih besar per watt daya yang dihasilkan daripada panel surya monokristalin dan polikristalin. Inovasi terbaru adalah *Thin Film Triple Junction Photovoltaic* (dengan tiga lapisan) yang dapat berfungsi sangat efisien dalam udara yang sangat berawan dan dapat menghasilkan daya listrik sampai 45% lebih tinggi dari panel jenis lain dengan daya yang diterima setara.

Panel *Photovoltaik* adalah kumpulan sel *photovoltaik* yang saling terhubung atau saling koneksi secara seri dalam sebuah tempat. Sel-sel tersebut dilapisi agar terhindar dari kontak langsung lingkungan maupun benda-benda mekanik yang dapat merusak sel *photovoltaik*. Karena sel photovoltaik berupa sel-sel tipis maka sel ini rentan akan terjadinya retak maka dari itu perlunya lapisan-lapisan yang membuat sel ini kuat. Kinerja dari sel fotovoltaik ini tergantung dari sinar radiasi matahari yang diubah menjadi listrik.

Pengaruh suhu mempengaruhi keluaran dari setiap panel surya di mana setiap kenaikan suhu pada panel surya 1°C (dari 25°C) mengalami penurunan daya sebesar 0.5% (Hajir, dkk, 2022).

$$P_{\Delta t} = 0.5\% \times P_{MPP} \times \Delta t(^{\circ}C) \quad (1)$$

Di mana,

$$\begin{aligned} P_{\Delta t} &= \text{Daya pada saat kenaikan suhu (Wp)} \\ P_{MPP} &= \text{Daya keluaran maksimal panel surya (Wp)} \\ \Delta t &= \text{Kenaikan suhu (^{\circ}C)} \end{aligned}$$

Kenaikan suhu tersebut mempengaruhi keluaran dari panel surya, dengan mengetahui Δt maka dapat mengetahui keluaran maksimal ketika menggunakan panel surya dengan ukuran Wp (*Wattpeak*) tertentu sehingga dapat pula diketahui nilai dari Faktor Koreksi Temperatur (F_{KT}) sebagai berikut.

$$P_t = P_{MPP} - P_{\Delta t} \quad (2)$$

$$F_{KT} = \frac{P_t}{P_{MPP}} \quad (3)$$

Selanjutnya untuk mengetahui kapasitas dari panel surya dapat ditentukan luas permukaan array surya terlebih dahulu sebagai berikut (Hajir, dkk, 2022).

$$Luas Array = \frac{E_L}{G_{av} \times \eta_{PV} \times \eta_{out} \times F_{KT}} \quad (4)$$

Di mana,

$Luas Array$ = Luas permukaan array surya (m^2)

E_L = Besar energi yang akan dibangkitkan (kWh/hari)

G_{av} = Intensitas radiasi matahari (kWh/ m^2 /hari)

η_{PV} = Efisiensi panel surya (%)

η_{out} = Efisiensi keluaran sistem (%)

F_{KT} = Faktor Koreksi Temperatur (%)

Setelah diketahui luas permukaan dari array surya, maka dapat ditentukan besaran daya yang bisa dibangkitkan oleh array surya tersebut dan jumlah panel yang bisa terpasang dengan persamaan berikut.

$$P_{wattpeak} = Luas Array \times P_{SI} \times \eta_{PV} \quad (5)$$

$$Jumlah Panel = \frac{P_{wattpeak}}{P_{MPP}} \quad (6)$$

Di mana,

$P_{wattpeak}$ = Daya yang akan dibangkitkan PLTS (Watt)

$Luas Array$ = Luas permukaan array surya (m^2)

P_{SI} = Peak Solar Insolation (100 W/ m^2)

η_{PV} = Efisiensi panel surya (%)

P_{MPP} = Daya keluaran maksimal panel surya (Wp)

b. Solar charge controller

Solar charge controller merupakan perangkat elektronik yang digunakan sebagai pengatur dalam pengisian arus listrik (DC) dari panel surya ke baterai dan dari baterai ke beban (peralatan listrik). *Solar charge controller* mempunyai

kemampuan untuk mendeteksi kapasitas baterai. Bila baterai sudah penuh terisi maka secara otomatis pengisian arus dari panel surya berhenti.

Fungsi dari *solar charge controller* yaitu saat tegangan pengisian di baterai telah mencapai keadaan penuh, maka *controller* akan menghentikan arus listrik yang masuk ke dalam baterai untuk mencegah pengisian yang berlebihan. Dan Saat tegangan di baterai hampir kosong, *controller* berfungsi untuk menghentikan beban dan peralatan listrik dari penyaluran arus dari baterai. Dalam kondisi tertentu, biasanya sekitar 10% sisa tegangan di baterai maka *controller* menghentikan arus beban. Hal ini bertujuan menjaga baterai dan mencegah kerusakan pada sel – sel baterai (Purwoto, dkk, 2018).

Charger controller memiliki fungsi untuk memastikan baterai agar tidak terjadi kelebihan pelepasan muatan (*over discharge*) atau kelebihan pengisian muatan (*over charger*) yang dapat menjadikan baterai tidak awet. *Charger controller* mampu menjaga tegangan atau arus keluar masuk baterai sesuai kondisi baterai. Untuk menentukan Kapasitas *solar charger controller* menggunakan persamaan berikut (Hajir, dkk, 2022).

$$C_{SCC} = \frac{Demand\ Watt \times Safety\ Factor}{V} \quad (7)$$

Di mana,

C_{SCC} = Kapasitas dari SCC (A)

Demand Watt = Permintaan daya (m^2)

Safety Factor = Faktor Keamanan (1.25)

V = Tegangan total dari array surya (V)

c. Baterai

Baterai merupakan komponen dari PLTS yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik dalam waktu tertentu dan jika sudah tidak ada energi yang dapat dikonversikan lagi menjadi energi listrik yaitu kurangnya cahaya matahari sehingga diperlukan baterai untuk memenuhi kebutuhan beban di mana energi yang tersimpan dalam baterai ini berupa energi listrik DC (Marliani, 2023).

Baterai digunakan dalam sistem PLTS sebagai *backup* energi cadangan dimana jika panel surya mendapatkan sedikit energi dari matahari maka baterai yang akan menyuplai inverter sebagai pengganti energi dari panel surya. Baterai digunakan hanya dalam sistem *off-grid* dalam sistem PLTS tetapi sekarang baterai juga bisa digunakan dalam sistem *hybrid*. Persamaan (6) dapat mengetahui kapasitas baterai yang dibutuhkan (Rahman, dkk, 2020).

$$C = \frac{E_L \times N}{V_s \times D_{oD} \times \eta_{out}} \quad (8)$$

Di mana,

- C = Kapasitas yang dibutuhkan baterai (Ah)
- N = Jumlah hari otonomi (Hari)
- E_L = Konsumsi energi harian (kWh/hari)
- V_s = Tegangan sistem (kWh/hari)
- η_{out} = Efisiensi keluaran sistem (%)
- D_{oD} = *Depth of Discharge* (%)

d. Inverter

Inverter adalah rangkaian yang mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC. Lebih tepatnya, inverter memindahkan tegangan dari sumber tegangan DC ke beban tegangan AC. Sumber tegangan DC yang dapat digunakan oleh inverter termasuk baterai, panel surya, dan sumber tegangan DC lainnya. Inverter dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori yaitu sebagai berikut (Purwoto, dkk, 2019).

1. *Square Wave*. Inverter ini merupakan jenis inverter paling dasar yang dapat menghasilkan tegangan 220V AC, 50 Hz, tetapi kualitasnya buruk sehingga hanya dapat digunakan pada beberapa alat listrik saja dikarenakan karakteristik output inverter ini memiliki level *Total Harmonic Distortion* (THD) yang tinggi.
2. *Modified Sine Wave*. Karena gelombangnya hampir sama dengan *Square Wave*, *modified sine wave* juga disebut *Modified Square Wave*. Namun, output pada *Modified Sine Wave* menyentuh titik nol untuk beberapa saat sebelum berubah menjadi positif atau negatif. Karena *harmonic* distorsinya

yang lebih sedikit daripada *Square Wave*, *Modified Sine Wave* dapat digunakan untuk beberapa alat listrik seperti komputer, TV, dan lampu. Namun, tidak dapat digunakan untuk beban yang lebih sensitif.

3. *Pure Sine Wave*, juga dikenal sebagai *True Sine Wave*, adalah gelombang inverter yang hampir mirip dengan gelombang sinusoida sempurna dan memiliki *Total Harmonic Distortion* (THD) yang hanya kurang dari 3% sehingga cocok untuk semua perangkat elektronik. Oleh karena itu, inverter ini juga disebut *Clean Power Supply* di mana teknologi yang digunakan oleh inverter ini dikenal sebagai *Pulse Width Modulation* (PWM) yang memiliki kemampuan untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC dengan bentuk gelombang yang hampir sama dengan gelombang sinusoida.

Pada penerapan PLTS sendiri juga harus diperhatikan dalam pemilihan inverter, adanya yang khusus *off-grid*, *on-grid* maupun *hybrid*. Pembagian inverter sendiri menurut fasanya ada dua yaitu inverter 1 fasa (L-N) dan 3 fasa (R-S-T). Menentukan kapasitas inverter dapat menggunakan persamaan berikut (Hajir, dkk, 2022).

$$C_{iv} = Demand\ Watt \times Safety\ Factor \quad (9)$$

Di mana,

C_{iv} = Kapasitas dari inverter (Watt)

Demand Watt = Permintaan daya/daya output (Watt)

Safety Factor = Faktor Keamanan (1.25)

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu/Angin (PLTB) menggunakan turbin angin atau kincir angin untuk mengubah energi angin menjadi listrik. Prinsip kerjanya cukup sederhana, yaitu energi angin yang memutar turbin angin diteruskan untuk memutar rotor pada generator di bagian belakang turbin angin, yang menghasilkan energi listrik. Sebelum dapat digunakan, energi ini biasanya akan disimpan dalam baterai (Bono, dkk, 2017).

Di tiap daerah keadaan temperatur dan kecepatan angin berbeda. Energi angin yang sebenarnya berlimpah di Indonesia ternyata belum sepenuhnya dimanfaatkan sebagai alternatif penghasil listrik, bahkan selama ini masih dipandang sebagai proses alam biasa yang kurang memiliki nilai ekonomis bagi kegiatan produktif masyarakat (DESDM, 2005).

Bahan bakar fosil seperti minyak solar untuk pembangkit listrik akan memiliki dampak ekonomi dan lingkungan. Energi angin, yang merupakan salah satu sumber energi terbarukan, memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai alternatif untuk energi bahan bakar fosil. Karena sifatnya yang terbarukan (*renewable*), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) jelas akan memberikan keuntungan karena angin tidak akan habis digunakan. Energi angin juga merupakan sumber energi yang ramah lingkungan karena penggunaannya tidak menyebabkan gas buang atau polusi lingkungan (Budiastara, dkk, 2009).

2.2.1 Turbin angin

Turbin angin adalah teknologi pembangkit listrik tenaga angin yang menghasilkan energi dengan memanfaatkan angin sebagai sumber daya yang akan dikonversikan menjadi energi listrik dengan menggunakan kincir angin sebagai medianya (Sumiati, dkk, 2013).

Dengan kecepatan angin yang cukup besar di Indonesia yang jika dimanfaatkan dan diolah dengan tepat yaitu dengan mengkonversi energi angin menjadi energi listrik, sehingga turbin angin dapat digunakan sebagai sumber pembangkit tenaga listrik. Prinsip kerja turbin angin adalah mengubah energi angin yang dapat menggerakkan baling-baling pada turbin untuk menghasilkan energi listrik. Baling-baling tersebut kemudian berputar pada porosnya, sehingga dapat mengubah energi kinetik putar menjadi energi listrik. Berdasarkan pengaruh kecepatan angin terhadap putaran turbin, yang kemudian disalurkan ke generator sehingga dapat menghasilkan arus dan tegangan (Febrielviyanti, dkk, 2015).

Konversi energi merupakan penggunaan energi yang efektif dan rasional tanpa mengurangi jumlah energi yang benar-benar diperlukan. Upaya konservasi energi mencakup seluruh proses pemanfaatan, mulai dari pemanfaatan sumber daya hingga pemanfaatan akhir, dengan penggunaan teknologi yang efisien dan

penerapan pola hemat energi melalui penggunaan energi yang dapat diperbaharui, khususnya energi angin. Prinsip kerja sistem konversi energi angin menggunakan putaran kumparan generator untuk mengubah energi kinetik angin menjadi listrik. Proses konversi energi angin juga menghasilkan energi mekanik untuk turbin angin. (Padmika, dkk, 2017).

Elemen utama turbin angin adalah rotor, karena pada rotor inilah blade turbin *diassembly*. Dan apabila luas penampang dengan mengasumsi $A = 1.5 d^2$ maka dapat dirumuskan dengan persamaan berikut (Maulana, dkk, 2021).

$$A = 1.5 \times d^2 \quad (10)$$

Di mana,

$$A = \text{Luas Rotor (m}^2\text{)}$$

$$d^2 = \text{Diameter Turbin (m)}$$

Adapun tenaga total aliran angin yang mengalir adalah sama dengan laju energi kinetik aliran yang datang dapat dirumuskan dengan persamaan berikut (Fadila, dkk, 2019).

$$P_{total} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (11)$$

Di mana,

$$P_{total} = \text{Daya total angin (Watt)}$$

$$\rho = \text{Massa jenis angin (1.225 kg/m}^3\text{)}$$

$$A = \text{Luas Rotor (m}^2\text{)}$$

$$v = \text{Kecepatan angin (m/s)}$$

Turbin tidak dapat mengekstraksi 100% energi angin karena beberapa energi angin digunakan dalam perubahan tekanan terjadi di seluruh bilah turbin. Daya turbin angin adalah daya yang dibangkitkan oleh rotor turbin angin akibat mendapatkan daya dari hembusan angin. Daya turbin angin tidak sama dengan daya angin dikarenakan daya turbin angin terpengaruh oleh koefisien daya. Koefisien daya adalah prosentase daya yang terdapat pada angin yang diubah ke dalam bentuk

energi mekanik. Secara teori, kemungkinan koefisien daya rotor maksimum diberikan oleh Batas Betz, $CP = 16/27 = 0,593$. Tenaga mekanik (P) yang didapat dari angin dengan turbin ideal, yang dapat dirumuskan sebagai berikut (Maulana, dkk, 2021).

$$P_m = \frac{1}{2} \times \rho \times \left(\frac{16}{27} \times A \times v^3 \right) \quad (12)$$

Di mana,

$$P_m = \text{Daya mekanik (Watt)}$$

Perbandingan daya angin yang mampu diekstrak blade turbin merupakan koefisien daya (C_p) yang diukur dari besarnya energy listrik yang dihasilkan generator dengan daya angin teoritis dan koefisien daya dikenal juga sebagai keefektifan rotor turbin dalam memanfaatkan energi kinetik angin (Fadila, dkk, 2019).

$$C_p = \frac{P_{total}}{\frac{1}{2} \times \rho \times A \times v} \quad (13)$$

Di mana,

$$C_p = \text{Koefisien Daya}$$

$$P_{total} = \text{Daya total angin (kg/m}^3\text{)}$$

Dari rumus mencari daya mekanik dapat digunakan untuk mencari kecepatan sudut dan nilai *tip speed ratio*, sehingga persamaannya adalah (Maulana, dkk, 2021).

$$\omega = \frac{2 \times \pi \times N_1}{60} \quad (14)$$

$$\lambda = \frac{\omega \times r}{v} \quad (15)$$

Di mana,

$$\omega = \text{Kecepatan sudut (rad/s)}$$

$$N_1 = \text{Putaran turbin (rpm)}$$

- λ = Tip speed ratio
 r = Jari-jari rotor (m)
 v = Kecepatan angin (m/s)

Kecepatan angin rancangan dan diameter secara langsung mempengaruhi besarnya putaran rotor (rpm). Dan untuk kecepatan putar yang sama, semakin besar torsi yang diberikan sudu, maka akan semakin besar daya yang diserap, demikian juga sebaliknya. Sehingga torsi dan besar putaran rotor (rpm) dapat dirumuskan dengan persamaan berikut.

$$rpm = 60 \times \frac{\lambda \times v}{\pi \times D} \quad (16)$$

$$T = \frac{60 \times P_{total}}{2 \times \pi \times rpm} \quad (17)$$

Di mana,

- rpm = Putaran turbin (rpm)
 T = Torsi (N)
 P_{total} = Daya total angin (Watt)
 λ = Tip speed ratio
 D = Diameter rotor (m)
 v = Kecepatan angin (m/s)

a. Jenis turbin angin berdasarkan bentuk rotor

Desain dari kincir/turbin angin sangat banyak macam jenisnya, berdasarkan bentuk rotor, kincir angin dibagi menjadi dua tipe, yaitu turbin angin sumbu mendatar (*horizontal axis wind turbine*) dan turbin angin sumbu vertikal (*vertical axis wind turbine*) (Daryanto, 2007).

1. *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT), merupakan turbin yang poros utamanya berputar menyesuaikan arah angin. Agar rotor dapat berputar dengan baik, arah angin harus sejajar dengan poros turbin dan tegak lurus terhadap arah putaran rotor. Biasanya turbin jenis ini memiliki *blade* berbentuk *airfoil* seperti bentuk sayap pada pesawat. Secara umum semakin banyak jumlah *blade*, semakin tinggi putaran turbin. Setiap desain rotor

mempunyai kelebihan dan kekurangan. Kelebihan turbin jenis ini, yaitu memiliki efisiensi yang tinggi, dan *cut-in wind speed* rendah. Kekurangannya, yaitu turbin jenis ini memiliki desain yang lebih rumit karena rotor hanya dapat menangkap angin dari satu arah sehingga dibutuhkan pengarah angin.

2. *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT), merupakan turbin angin sumbu tegak yang gerakan poros dan rotor sejajar dengan arah angin, sehingga rotor dapat berputar pada semua arah angin. Ada tiga tipe rotor pada turbin angin jenis ini, yaitu: Savonius, Darrieus, dan H rotor. Turbin Savonius memanfaatkan gaya *drag* sedangkan Darrieus dan H rotor memanfaatkan gaya lift. Sama halnya seperti HAWT, VAWT juga mempunyai beberapa kelebihan dan kekurangan. Kelebihannya, yaitu memiliki torsi tinggi sehingga dapat berputar pada kecepatan angin rendah, dinamo atau generator dapat ditempatkan di bagian bawah turbin sehingga mempermudah perawatan, tidak bising, dan kerja turbin tidak dipengaruhi arah angin. Kekurangannya yaitu kecepatan angin di bagian bawah sangat rendah sehingga apabila tidak memakai tower akan menghasilkan putaran yang rendah, dan efisiensi lebih rendah dibandingkan HAWT. VAWT awalnya lebih berkembang untuk konversi energi mekanik, tetapi seiring dengan perkembangan desain, turbin tipe ini banyak digunakan untuk konversi energi listrik skala kecil. Gambar 4 menunjukkan macam-macam desain kincir angin VAWT.

b. Jenis turbin angin berdasarkan kecepatan rotasi

Berdasarkan kecepatan rotasi, turbin angin dibagi menjadi dua yaitu kecepatan tetap (*fixed speed wind turbine*) dan kecepatan berubah (*variable speed wind turbine*) (Wu Bin, dkk, 2011).

1. *Fixed speed wind turbine* (FSWT), disebut juga dengan konsep Danish yang sangat populer pada tahun 1980-an. Keuntungan FSWT adalah sistem yang sederhana dan banyak digunakan karena biaya perawatan yang rendah dengan mengurangi penggunaan rangkaian elektronika daya yang mahal seperti inverter dan konverter. Namun, dengan kecepatan konstan, turbin tidak dapat mencapai efisiensi puncak dengan kecepatan angin yang berubah, sehingga menghasilkan jumlah energi yang kecil. FSWT menghasilkan

fluktuasi daya keluaran yang tinggi ke *grid*, yang menyebabkan gangguan ke sistem daya. Untuk dapat menyerap tekanan mekanik yang tinggi, turbin jenis ini membutuhkan desain mekanik yang kuat dan mahal.

2. *Variable speed wind turbine* (VSWT) dapat mencapai efisiensi konversi energi angin maksimum pada jangkauan kecepatan angin yang lebar. Untuk mencapai efisiensi konversi daya maksimum pada kecepatan angin berbeda yaitu dengan mempertahankan *tip speed ratio* (TSR) pada kondisi optimal. Generator turbin angin pada VSWT dihubungkan ke *grid* melalui sistem konverter daya. Sistem konverter mengaktifkan kontrol kecepatan generator yang secara mekanik dikopel pada rotor turbin angin. Keuntungan utama VSWT yaitu meliputi peningkatan keluaran energi angin, meningkatkan kualitas daya dan mengurangi stress mekanik. Dibandingkan sistem FSWT, sistem VSWT dapat menangkap energi angin 5% lebih besar dan daya aktif dan reaktif yang dihasilkan dapat dengan mudah dikontrol. Kekurangan sistem ini yaitu biaya yang lebih tinggi karena penggunaan konverter daya sehingga meningkatkan rugi rugi daya dan kompleksitas pengontrolan.

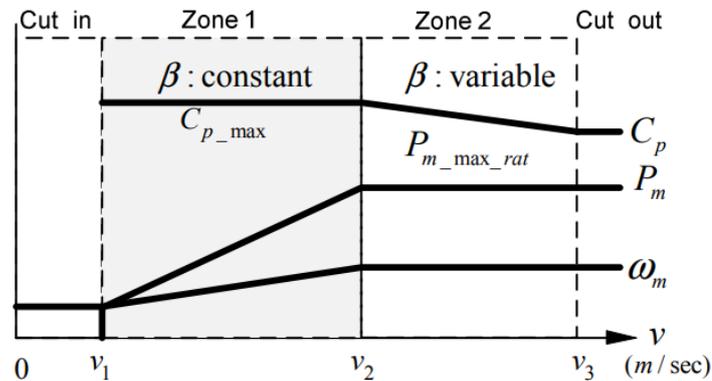
2.2.2 Penyearah

Penyearah atau *rectifier* sangat penting untuk sistem turbin angin karena frekuensi listrik AC keluaran sistem sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin. Akibatnya, penyearah digunakan untuk mengubah listrik AC ke listrik DC, yang kemudian disalurkan ke beban atau diubah kembali menjadi listrik AC. Listrik DC yang diubah kembali ke AC dapat diatur frekuensinya dengan bantuan inverter sesuai kebutuhan. Kemudian listrik AC keluaran dari turbin akan disearahkan oleh penyearah dengan sistem jembatan yang terdiri dari enam dioda sehingga akan memungkinkan penyearah dioda gelombang penuh tiga fase untuk menyearahkan listrik AC (Mubarok & Whiancaka, 2020).

2.2.3 Zona operasi turbin angin

Dalam perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) daya output yang dihasilkan turbin angin sangat ditentukan oleh rating turbin atau kemampuan turbin tersebut. Oleh karena itu sangat perlu untuk mengetahui batas daerah operasi

suatu turbin atau batas kecepatan angin yang bisa membuat turbin untuk dapat beroperasi pada kecepatan angin yang berbeda-beda. Pada gambar dibawah diperlihatkan zona operasi suatu turbin angin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Zona operasi turbin angin

(Sumber: Yuhendri, 2011)

Daya output turbin angin dapat diatur dengan mengendalikan kecepatan generator dan sudut *pitch* turbin angin. Ketika kecepatan angin di bawah *rating* turbin, daya output generator dapat maksimum dengan mengendalikan kecepatan generator pada titik koefisien daya maksimum. Ketika kecepatan angin di atas *rating* turbin, daya output turbin akan melebihi *rating* daya generator.

Daerah *Cut In* yaitu pada kecepatan angin ($0 \leq v \leq v_1$). Pada zona ini, kecepatan angin masih sangat rendah dan menghasilkan daya mekanik yang belum cukup untuk memutar generator sehingga pada zona ini turbin tidak dapat dioperasikan .

Pengoperasian turbin angin dapat dibagi menjadi dua wilayah pengoperasian yang berbeda. Wilayah pertama menggambarkan pengoperasian turbin angin pada saat kecepatan angin berada di bawah *rating* kecepatan angin. Di wilayah ini, tenaga angin lebih rendah dibandingkan daya keluaran generator turbin angin. Wilayah operasi kedua menggambarkan pengoperasian turbin angin pada kecepatan angin di atas *rating* kecepatan angin. Di wilayah ini tenaga angin lebih besar dari keluaran daya pengenal generator turbin angin.

Pada zona 1, kecepatan angin lebih rendah dari kecepatan angin yang dinilai ($v_1 \leq v \leq v_2$). Pada zona ini, kecepatan generator ω_m dikontrol pada koefisien daya maksimum C_p_{max} dengan sudut *pitch* β konstan, sehingga daya keluaran maksimum dapat diperoleh pada setiap variasi kecepatan angin.

Pada zona 2 kecepatan angin berada di atas peringkat kecepatan angin turbin angin ($v_2 \leq v \leq v_3$). Pada zona ini, kecepatan generator ω_m dijaga konstan, dan sudut *pitch* β dikontrol untuk menurunkan koefisien daya sehingga daya keluaran turbin angin sesuai dengan *rating* daya maksimum generator.

Pada zona *Cut Out* yaitu pada kecepatan angin diatas nilai v_3 , di mana pada zona ini kecepatan angin menghasilkan putaran yang melampaui batas kemampuan generator. Jika mencapai daerah kecepatan angin ini turbin angin akan dimatikan agar terlindung dari kerusakan mekanik (Yuhendri, 2011).

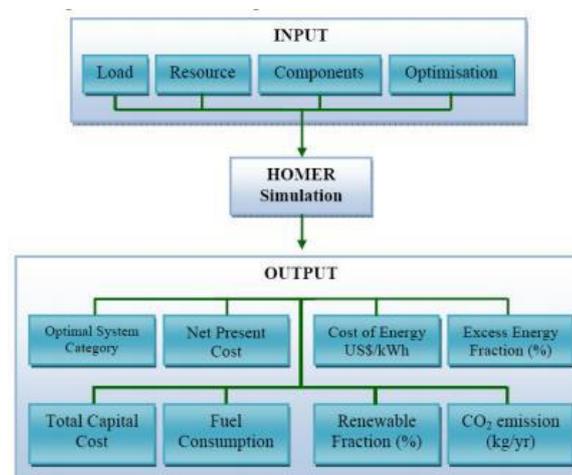
2.3 Software HOMER Pro

HOMER atau *Hybrid Optimization Model for Energy Renewable* adalah sebuah perangkat lunak yang berfungsi untuk pengoptimalan sebuah sistem dari suatu pembangkit tenaga listrik yang terdiri dari kombinasi antara PLTS, PLTB, baterai serta kombinasi lainnya yang berfungsi untuk melayani beban listrik maupun beban termal. HOMER sendiri sudah berkembang di USA dan bekerja sama dengan perusahaan lain yaitu *Mistaya Engineering*, dan hak ciptanya dilindungi oleh *Midwest Research Institute* dan digunakan oleh Departemen Energi Amerika Serikat dan dikembangkan oleh sebuah perusahaan *The National Renewable Energy Laboratory* (NREL) (Prayogi, 2018).

Software ini mempermudah evaluasi desain sistem pembangkit listrik untuk berbagai jenis pembangkit listrik baik yang tersambung ke jaringan listrik atau pun tidak. Perangkat lunak ini melakukan perhitungan keseimbangan energi untuk setiap konfigurasi sistem yang akan dipertimbangkan. Kemudian menentukan konfigurasi yang layak, apakah dapat memenuhi kebutuhan listrik di bawah kondisi yang ditentukan, perkiraan biaya modal, penggantian, operasi dan pemeliharaan, bahan bakar, dan bunga. Kelebihan perangkat lunak ini adalah penggunaannya mudah, bisa mensimulasi, mengoptimasi suatu model kemudian secara otomatis bisa menemukan konfigurasi system optimum yang bisa mensuplai beban dengan

biaya sekarang (NPC) terendah, dan bisa menggunakan parameter sensitivitas untuk hasil yang lebih bagus dan akurat (Chamdareno, dkk, 2019).

Dalam analisis teknis, *software* ini dapat menganalisis efisiensi sistem produksi energi dan jumlah energi yang dihasilkan oleh sistem tersebut. Dari segi ekonomi, *software* ini dapat menentukan NPC berdasarkan nilai uang yang digunakan selama umur proyek, serta COE selama seumur hidup proyek. Hasil simulasi dari perangkat lunak ini mendukung penggunaan peralatan yang paling efisien dalam sistem pembangkit listrik, baik dari segi teknis maupun ekonomis di mana Gambar 4 menunjukkan *input* dan *output* dari HOMER Pro (Navies, 2021).



Gambar 4 *Input* dan *output* simulasi HOMER Pro

(Sumber: Navies, 2021)

Dalam melakukan simulasi sistem perlu memasukkan terlebih dahulu data *input* sebagai parameter untuk HOMER Pro untuk mengkalkulasikan data-data tersebut. Data *input* yang diperlukan untuk simulasi HOMER Pro adalah sebagai berikut (Rijal, dkk, 2023).

a. *Input Load/Beban*

Beban terbagi menjadi dua jenis, yaitu beban termal dan beban listrik. Beban listrik dan beban termal akan dijelaskan dalam bentuk jam per hari, bulanan, yang disesuaikan dengan profil beban di lokasi studi, serta diagram profil beban akan ditampilkan langsung pada input. Untuk beban listrik, pada parameter input juga terdapat pilihan *electrical bus* sesuai dengan beban listrik di lokasi penelitian.

b. *Input* Komponen

Input komponen mencakup semua komponen yang digunakan, komponen tersebut antara lain baterai, panel surya, turbin angin, konverter, boiler, generator, tangki hidrogen dan lain-lain. Pemilihan bahan daur ulang dan spesifikasi bahan tersebut dari sudut pandang teknis dan ekonomis. Aspek teknis meliputi kapasitas maksimal peralatan dan kinerja sistem, sedangkan aspek ekonomis meliputi biaya peralatan, biaya penggantian, dan biaya pemeliharaan dan pengoperasian peralatan tersebut.

c. *Input Resources*

Input ini mencakup berbagai sumber daya energi seperti tenaga angin, bensin, tenaga air, biomassa, surya, termal, hidrogen, dan sejenisnya. Data input dapat dimasukkan secara manual di luar perangkat lunak HOMER Pro, termasuk bahan bakar minyak atau gas yang nilainya dapat ditentukan oleh *Lower Heating Value* (LHV) sesuai spesifikasi. Selain itu, HOMER Pro juga menggunakan data dari *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) seperti data temperatur, *Global Horizontal Irradiation* (GHI), *Direct Normal Irradiation* (DNI), dan kecepatan angin.

d. *Input* Ekonomi

Parameter input ini mencakup semua parameter ekonomi yang bukan merupakan bagian dari sistem. Rasio ini mencakup inflasi, suku bunga, dan biaya bagian lain dari sistem produksi energi.

Sedangkan output dari simulasi HOMER Pro menunjukkan kinerja dari *software* tersebut di mana merupakan hasil yang telah dilakukan setelah memasukkan data-data *input*. Adapun data *output* yang dihasilkan dari simulasi HOMER Pro adalah sebagai berikut (Rijal, dkk, 2023).

a. Simulasi

Simulasi menentukan ekonomi kekuasaan berdasarkan COE, NPC, *capital cost*, *replacement*, O&M, *salvage*, serta biaya bahan bakar. Prinsip-prinsip ini dianalisis dalam data input seperti peralatan, bahan, dan biaya. Di sisi ekonomi, tingkat inflasi di dalam negeri juga penting, tingkat diskonto dan aspek ekonomi lainnya.

b. Optimalisasi

Hasil simulasi akan menentukan konfigurasi sistem terbaik, yang merupakan konfigurasi dengan nilai NPC dan COE terendah. HOMER Pro akan mempertimbangkan dan memilih konfigurasi berdasarkan sistem terbaik tersebut..

c. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas adalah parameter yang dapat menunjukkan hasil dari suatu masukan yang berbeda terhadap variabel yang sama. Misalnya, pengguna dapat menetapkan harga yang berbeda untuk sumber daya, sehingga mereka dapat mengetahui hasil dalam kondisi perubahan yang berbeda.

2.4 Studi Aspek Ekonomi

2.4.1 *Capital cost*

Capital cost atau biaya investasi merupakan biaya awal yang perlu disiapkan dalam membangun suatu proyek di mana biaya tersebut dapat meliputi biaya pembebasan tanah, biaya konstruksi infrastruktur fisik (gedung, jalan, fasilitas listrik dan air, dll), biaya mesin dan peralatan pendukung, biaya pemasangan mesin dan biaya pembelian peralatan perusahaan. Dalam Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* (PLTH) yang merupakan *hybrid* antara PLTS, PLTB, dan PLTD, biaya investasi merupakan penjumlahan dari biaya panel surya, turbin angin, SCC, baterai, inverter, generator, pondasi, konstruksi, dan peralatan listrik lainnya (Rijal, dkk, 2023).

Dalam pengerjaan proyek ini terdapat biaya modal dan biaya operasi yang perlu ditanggung oleh suatu perusahaan. Biaya modal adalah biaya di muka untuk membangun dan pekerjaan pemeliharaan besar yang perlu dilakukan selama umur proyek setelah itu. Biaya operasi mencakup operasi, pemeliharaan dan, bila sesuai, biaya bahan bakar. (Bagaskoro, dkk, 2019).

2.4.2 **Biaya operasional dan pemeliharaan (O&M)**

Biaya O&M adalah biaya operasional dan perawatan yang dikeluarkan ketika pembangunan proyek sudah selesai dan dikeluarkan secara periodik dengan jumlah yang pada umumnya sama setiap tahunnya. Contoh dari biaya O&M seperti

mencakup biaya *day-to-day* yang diperlukan untuk menjalankan dan mengoperasikan sistem atau peralatan, termasuk biaya bahan bakar, pemeriksaan rutin, perbaikan, dan penggantian komponen (Navies, 2021). Biaya O&M dalam pengelolaan aset proyek yaitu untuk memahami total biaya yang terkait dengan operasi dan pemeliharaan dalam jangka waktu tertentu sehingga memungkinkan dalam perencanaan anggaran yang lebih baik serta dapat mengambil keputusan dengan lebih efisien.

Biaya pemeliharaan dan operasional tahunan untuk PLTH umumnya digunakan sebesar 1% sampai 2% dari biaya investasi awal. Biaya pemeliharaan dan operasional tahunan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Chandra, 2016).

$$O\&M = 1\% \times I_a \quad (18)$$

Di mana,

O&M = Biaya Operasional dan Pemeliharaan (\$)

I_a = Biaya Investasi Awal (\$)

2.4.3 Nilai sisa (*salvage*)

Nilai sisa (*salvage*) adalah nilai yang tersisa dalam komponen sistem daya pada akhir masa proyek. Di mana nilai penyelamatan suatu komponen berbanding lurus dengan sisa hidupnya. Hal ini juga mengasumsikan bahwa nilai penyelamatan tergantung pada biaya penggantian daripada biaya modal awal. Pada *software* HOMER Pro menghitung nilai sisa menggunakan persamaan berikut (Reza, 2021).

$$S = C_{rep} \frac{R_{rem}}{R_{comp}} \quad (19)$$

$$R_{rem} = R_{comp} - (R_{proj} - R_{rep}) \quad (20)$$

$$R_{rep} = R_{comp} \cdot INT \left(\frac{R_{proj}}{R_{comp}} \right) \quad (21)$$

Di mana,

S = Nilai Sisa (\$)

C_{rep} = Biaya Penggantian (\$)

R_{rem} = Sisa Umur Komponen pada Akhir Masa Proyek (Tahun)

R_{comp} = Umur Komponen (Tahun)

R_{proj} = Umur Proyek (Tahun)

R_{rep} = Durasi Biaya Penggantian (Tahun)

2.4.4 Life cycle cost (LCC)

Biaya siklus hidup suatu sistem adalah semua biaya yang dikeluarkan oleh suatu sistem selama kehidupannya. Pada sistem PLTH, biaya siklus hidup (LCC) ditentukan oleh nilai sekarang dan biaya total sistem PLTH yang terdiri dari biaya investasi awal, lahan, biaya jangka panjang untuk pemeliharaan dan operasional serta biaya penggantian komponen (Sitohang, 2019).

LCC merupakan konsep analisis biaya yang melibatkan perhitungan total biaya suatu produk, sistem, atau proyek dari tahap awal pembelian hingga tahap pemeliharaan. Tujuan dari analisis LCC ini adalah untuk mengidentifikasi opsi yang paling efisien secara finansial dengan mempertimbangkan keseluruhan biaya selama masa pakai sistem tersebut (Rijal, dkk, 2023).

Biaya siklus hidup (LCC) diperhitungkan dengan persamaan sebagai berikut (Sitohang, 2019).

$$L_{CC} = I_a + M_{PW} + R_{PW} \quad (22)$$

$$M_{PW} = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (23)$$

$$R_{PW} = B \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (24)$$

Di mana,

L_{CC} = Life Cycle Cost (\$)

I_a = Investasi Awal (\$)

M_{PW} = Nilai Sekarang Biaya Tahunan Selama Umur Proyek Untuk Total O&M (\$)

R_{PW} = Nilai Sekarang Biaya Tahunan Selama Umur Proyek Untuk Penggantian Komponen (\$)

A = Biaya Tahunan (%)

- i = Suku Bunga (%)
 n = Umur Proyek (Tahun)
 B = Biaya Penggantian Komponen (\$)

2.4.5 *Cost of energy (COE)*

Cost of energy dapat diartikan sebagai biaya rata-rata per kWh dari produksi energi listrik yang terpakai oleh sistem. Pada simulasi Homer, COE dihitung dengan cara membagi biaya produksi energi listrik tahunan dengan total energi listrik terpakai yang diproduksi. Dalam Homer, satuan COE yang digunakan adalah \$/kWh sehingga dengan mengetahui COE, dapat diketahui tarif listrik dan pendapatan yang dihasilkan dari penjualan energi. Dengan mengetahui nilai COE, maka dapat diketahui pendapatan yang diperoleh dalam waktu setahun dengan cara melakukan perkalian COE dengan total energi listrik yang dipakai dalam waktu setahun (Bagaskoro, dkk, 2019).

Perhitungan biaya energi suatu PLTS ditentukan oleh *Life Cycle Cost (LCC)*, *Capital Recovery Factor (CRF)* dan produksi energi tahunan PLTH. Faktor Pemulihan Modal (*Capital Recovery Factor*) adalah faktor yang dipergunakan untuk mengkonversikan semua arus kas *Life Cycle Cost (LCC)* menjadi serangkaian pembayaran atau biaya tahunan dengan jumlah yang sama. Faktor pemulihan modal dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Sitohang, 2019).

$$C_{RF} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (25)$$

Di mana,

- C_{RF} = *Capital Recovery Factor*
 i = Suku Bunga (%)
 n = Umur Proyek (Tahun)

Sehingga berdasarkan persamaan di atas dapat ditentukan nilai dari *Cost Of Energy (COE)* sebagai berikut (Sitohang, 2019).

$$COE = \frac{L_{CC} \times C_{RF}}{P} \quad (26)$$

Di mana,

COE = *Cost of Energy* (\$/kWh)

L_{CC} = *Life Cycle Cost* (\$)

C_{RF} = *Capital Recovery Factor*

P = Total Energi Tahunan Beban (kWh/tahun)

2.4.6 *Net present cost (NPC)*

Net Present Cost (NPC) merupakan semua biaya keseluruhan yang digunakan dalam pembangunan komponen baik dalam pemasangan maupun pengoperasian suatu proyek. NPC mempertimbangkan biaya awal proyek, biaya operasional, biaya pemeliharaan, biaya penggantian, dan semua penerimaan yang diharapkan dari proyek, termasuk pendapatan, penghematan, atau manfaat lain yang mungkin terjadi selama periode waktu proyek berlangsung. *Net Present Cost (NPC)* dapat diketahui dengan persamaan berikut (Prayogi, 2018).

$$NPC = Capital Cost + Replacement Cost + O\&M Cost + Fuel Cost + Salvage \quad (27)$$

Di mana,

Capital Cost = Biaya Investasi (\$)

Replacement Cost = Biaya Penggantian Komponen (\$)

O&M Cost = Biaya Operasional dan Pemeliharaan (\$)

Fuel Cost = Biaya Bahan Bakar (\$)

Salvage = Nilai Sisa (\$)

2.5 **Studi Aspek Kelayakan**

2.5.1 *Payback period (PBP)*

Payback Period (PBP) adalah jumlah tahun yang digunakan untuk menghitung lama waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan investasi awal. Investasi yang di rencanakan untuk pembangunan pembangkit listrik tenaga *hybrid*

akan kembali di waktu tertentu. PBP menggambarkan periode waktu di mana aliran kas positif mengimbangi biaya investasi awal, dan proyek dianggap berhasil ketika *payback period* mencapai batas waktu yang telah ditentukan sebelumnya. Dengan persamaan (28) ini maka dapat ditentukan tahun berapa investasi akan kembali (Chandra, 2016).

2.5.2 *Net present value (NPV)*

Net present value (NPV) adalah selisih antara pengeluaran dan pemasukan selama masa pakai proyek atau investasi dengan menggunakan *cost of capital* sebagai diskon faktor (Chandra, 2016). NPV ini merupakan suatu metode analisis keuangan untuk mengevaluasi kelayakan suatu investasi atau proyek. Dengan kata lain merupakan arus kas yang diperkirakan pada masa yang akan datang. Dalam perhitungannya, aliran kas di masa depan dikonversi menjadi nilai uang pada saat ini dengan menggunakan Discount Factor (DF) yang sesuai. Untuk menghitung nilai NPV dapat menggunakan persamaan berikut (Rijal, dkk, 2023).

$$NPV = \sum_{t=1}^n (NCF_t \times D_F) - I_a \quad (28)$$

$$D_F = \frac{1}{(1 + i)^t} \quad (29)$$

Di mana,

NPV = *Net Present Value* (\$)

NCF_t = *Net Cash Flow* periode tahun ke-t sampai tahun ke-n (\$)

D_F = Discount Factor

I_a = Investasi Awal (\$)

i = Suku Bunga (%)

t = Tahun yang Akan Dihitung (Tahun)

n = Umur Investasi (Tahun)

Syarat untuk memutuskan apakah investasi dapat diterima atau ditolak adalah sebagai berikut (Chandra, 2016).

- a. Jika nilai NPV adalah positif maka proyek layak dilaksanakan karena hal itu mengindikasikan bahwa perhitungan investasi proyek mampu memberi keuntungan sampai periode yang diperhitungkan
- b. Jika nilai NPV adalah negatif maka proyek tidak layak dilaksanakan karena hal itu mengindikasikan bahwa perhitungan investasi proyek belum mampu memberi keuntungan sampai periode yang diperhitungkan
- c. Jika nilai NPV adalah 0 maka itu berarti dalam sepanjang periode perhitungan investasi yang dilakukan maka proyek tersebut telah memberikan hasil yang sebanding dengan nilai investasi yang dikeluarkan.

2.5.3 Profitability index (PI)

Profitability Index (PI) adalah metode analisis keuangan yang digunakan untuk menilai kelayakan suatu proyek atau investasi dengan membandingkan nilai sekarang dari aliran kas positif dengan nilai sekarang dari biaya investasi awal. Dalam perhitungannya, aliran kas positif dihitung sebagai jumlah pendapatan bersih yang dihasilkan oleh proyek setiap tahun, dikurangi dengan biaya operasional dan biaya lain yang terkait, dengan referensi nilai *payback period* yang diinginkan. PI dihitung dengan membagi nilai sekarang dari aliran kas positif dengan biaya investasi awal. Sistem PI dihitung menggunakan persamaan berikut (Chandra, 2016).

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t(1+i)^{-t}}{I_a} \quad (30)$$

Di mana,

PI = Profitability Index

NCF_t = Net Cash Flow periode tahun ke-t sampai tahun ke-n (\$)

I_a = Investasi Awal (\$)

i = Suku Bunga (%)

t = Tahun yang Akan Dihitung (Tahun)

n = Umur Investasi (Tahun)

Nilai dari PI memiliki pengertian sebagai berikut (Yonata, 2017).

- a. Nilai PI bernilai 1, maka biaya investasi akan diperoleh kembali secara penuh.
- b. Nilai PI bernilai lebih dari 1, maka penghematan akan lebih besar daripada investasi.
- c. Nilai PI bernilai kurang dari 1, maka biaya investasi akan lebih besar daripada penghematan sistem.

2.5.4 *Internal rate of return (IRR)*

Internal Rate of Return (IRR) adalah metode perhitungan investasi dengan menghitung tingkat bunga yang menyamakan nilai sekarang dari penerimaan yang diterima dengan nilai sekarang dari pengeluaran untuk investasi. Semakin tinggi nilai IRR, semakin menguntungkan proyek tersebut, dan umumnya, proyek yang memiliki IRR lebih besar dari tingkat diskonto yang digunakan dianggap layak untuk dijalankan. IRR adalah indikator dalam pengambilan keputusan investasi karena membantu dalam menilai tingkat pengembalian yang diharapkan dari proyek dan membandingkan alternatif proyek untuk menentukan pilihan terbaik. Rumus untuk menghitung IRR adalah sebagai berikut (Yonata, 2017).

$$IRR = i_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} (i_2 - i_1) \quad (31)$$

Di mana,

IRR = *Internal Rate of Return* (%)

NPV_1 = NPV dengan suku bunga rendah (\$)

NPV_2 = NPV dengan suku bunga tinggi (\$)

i_1 = Suku Bunga Rendah (%)

i_2 = Suku Bunga Tinggi (%)

2.6 *State-of-the-art*

Tabel 1 *State-of-the-art*

Nama Peneliti	Judul	Identifikasi Masalah	Tujuan	Metode	Hasil yang Dicapai
Andi Dwiki Yulianto	Perencanaan Pembangkit Listrik Berbasis Energi Terbarukan Untuk Lahan Perkebunan: Studi Kasus di Kecamatan Bupon di Kabupaten Luwu.	Kabupaten Luwu yang memiliki komoditi unggulan yaitu pada sektor perkebunan & pertaniannya terutama pada komoditi kakao yang sangat dipengaruhi oleh pemenuhan kebutuhan air agar tanaman tidak mengalami defisit air. Hal ini yang membuat petani setempat menggunakan pompa diesel untuk mengatasi masalah tersebut di mana pompa diesel ini masih memiliki banyak kekurangan sehingga diperlukan cara yang lebih efisien baik dari segi keberlangsungan sumber energi maupun segi ekonomisnya.	Penelitian ini bertujuan untuk menentukan konfigurasi sistem yang paling optimal untuk melayani beban perkebunan berdasarkan biaya investasi awal, produksi energi, dan ketersediaan sumber energi terbarukan.	Mensimulasi dan mengoptimasi pembangkit listrik tenaga <i>hybrid</i> menggunakan perangkat lunak HOMER.	Konfigurasi sistem yang digunakan untuk memenuhi beban perkebunan adalah <i>hybrid</i> PLTS dan generator diesel dengan konfigurasi sistem yang paling optimal yaitu Genset 0,75 kW, PV 0,960 kW, baterai 1 kW sebanyak 7 unit, serta <i>converter</i> 2 kW di mana sistem ini dapat dikatakan layak direalisasikan karena parameter-parameter yang diuji melebihi batas yang ditentukan.
Bimo Bagaskoro, Jaka Windarta, dan Denis	Perancangan dan Analisis Ekonomi Teknik Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sistem <i>Offgrid</i> Menggunakan Perangkat Lunak HOMER di Kawasan Wisata Pantai Pulau Cemara	Pulau Cemara merupakan kawasan wisata pantai yang belum teraliri energi listrik dari PLN. Hal ini menjadi kendala bagi warga setempat untuk menggunakan layanan energi listrik, dengan dampak tidak adanya fasilitas berupa instalasi penerangan dan instalasi kelistrikan sehingga tidak optimalnya aktivitas wisata pantai dan alam wilayah tersebut.	Penelitian ini bertujuan untuk membantu masyarakat di Pulau Cemara dalam memenuhi kebutuhan listrik secara 24 jam dengan menggunakan PLTS	Simulasi sistem <i>hybrid</i> dengan menggunakan HOMER Pro di mana menggunakan dua buah skenario analisis ekonomi guna mengetahui pengaruh bunga terhadap nilai NPC, COE dan BEP. Selain itu perancangan sistem instalasi listrik di warung dan design PLTS juga diperhitungkan guna mengetahui unjuk kerja PLTS dalam memproduksi energi listrik tiap bulan dan tahun secara periodik	Pada analisis ekonomi PLTS skenario 1 dengan suku bunga 6%, didapat hasil simulasi dengan nilai NPC sebesar \$6354 atau Rp 89.173.433,- dan COE \$1,06/kWh atau Rp 14.890,- /kWh. Dengan mengetahui nilai COE, maka dapat diketahui pendapatan yang diperoleh per tahunnya yaitu sebesar \$497,14/tahun atau Rp 6.976.972,-. (Kurs Dollar = Rp 14.034,22). Pada analisis ekonomi PLTS skenario 2 tanpa suku bunga, didapat hasil simulasi dengan nilai NPC sebesar \$8,848 atau setara dengan Rp 124.174.779,- dan COE \$0,755 per kWh atau setara dengan Rp 10.595,8,-/kWh.

					Dengan mengetahui nilai COE, maka dapat diketahui pendapatan yang diperoleh per tahunnya yaitu sebesar \$354,1 /tahun atau Rp 4.969.517,-/tahun. (Kurs Dollar = Rp 14.034,22).
Marliani	Optimasi Pembangkit <i>Hybrid</i> Energi Terbarukan Pada Kampus Vokasi ATS Menggunakan Metode <i>Wild Horse Optimization</i> (WHO).	Kampus ATS (Akademi Teknik Soroako) belum memiliki sumber energi alternatif untuk keperluan praktikumnya yang merupakan rencana energi masa depan. Dalam perjalanannya pun ATS memperoleh dukungan penuh dari PT. Vale untuk mendorong kemandirian ATS termasuk untuk penyediaan energinya.	Penelitian ini bertujuan untuk merancang model optimasi sistem <i>hybrid</i> dengan menggunakan metode WHO (<i>Wild Horse Optimization</i>) sebagai sumber alternatif yang belum ada untuk praktikum pada kampus ATS (Akademi Teknik Soroako).	Merancang PLTH dengan menggunakan metode <i>Wild Horse Optimization</i> (WHO).	Dengan menggunakan metode WHO didapatkan hasil terbaik pada kombinasi ke-3 yaitu PV-WT-baterai dan setelah dibandingkan dengan hasil PSO tidak jauh berbeda, namun pada metode WHO memperoleh hasil keluaran yang lebih stabil. Dari hasil simulasi dan perhitungan juga diperoleh nilai COE (<i>Cost Of Energy</i>) terbaik pada kombinasi PV-Grid sebesar \$0,0150.
Muh. Akbar Sardar	Analisis Nilai Ekonomis Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid Energi Biogas dan Energi Surya di Desa Leppang Kecamatan Patampanua Kabupaten Pinrang.	Desa Leppang memiliki potensi alam yang sangat bagus untuk peternakan di mana populasi ternak pada lokasi tersebut sangat banyak sehingga dapat menghasilkan sumber energi biogas yang melimpah dan juga jika dilihat dari keadaan alam yang sangat memungkinkan untuk menjadi lokasi PLTS, maka hal tersebut membuat penulis tertarik untuk menganalisa PLTH dari energi biogas dan energi surya.	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis seberapa besar nilai ekonomis dan daya yang dihasilkan dari PLT Biogas, PLTS, dan PLTH.	Mensimulasi besar energi yang dihasilkan oleh PLT Biogas, PLTS, dan PLTH dengan menggunakan <i>software</i> HOMER serta menghitung nilai ekonomis pembangkit menggunakan Ms. Excel.	Besarnya potensi daya yang dapat dihasilkan oleh PLTH adalah sebesar 784,984 MWh/tahun dengan daya rata-rata per hari 2,15 MWh/hari dan investasi dengan jangka waktu 20 tahun untuk perancangan PLTH dari segi ekonomis layak dilaksanakan untuk suku bunga 8% sampai 20%.
Prian Gagani Chamdareno, Eko Nuryanto, dan Erwin Dermawan	Perencanaan Sistem Pembangkit Listrik <i>Hybrid</i> (Panel Surya dan Diesel Generator) Pada Kapal KM Kelud	Penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi saat ini masih menjadi prioritas utama. Akibatnya, kondisi ketersediaan bahan bakar fosil didalam perut bumi akan menjadi semakin cepat menipis. bakar fosil merupakan salah	Penelitian ini bertujuan untuk merencanakan pembangkit listrik dengan sistem <i>hybrid</i> pada kapal KM Kelud	Mensimulasi sistem <i>hybrid</i> dengan menggunakan <i>Software</i> HOMER Pro dengan tiga tipe sistem <i>hybrid</i> , yaitu	Hasil analisis yang telah dilakukan pada <i>software</i> HOMER, dapat diambil kesimpulan bahwa total produksi listrik yang dihasilkan pada sistem <i>hybrid</i>

		satu penyebab <i>global warming</i> dan hujan asam akibat emisi gas yang dihasilkan dan dibuang ke lingkungan.		Seri, Paralel, dan Seri-Paralel.	PLTD-PLTS pertahun yaitu sebesar 1,711,297 kWh/tahun. Dimana kontribusi PLTS terhadap sistem PLTH sebesar 69.0 % atau 1,181,637 kWh/tahun. Sedangkan PLTD 31.0 % atau 529,660 kWh/tahun. Kelebihan energinya selama setahun sebesar 14.771 kWh/tahun.
Renaldy Rahman, Saiful Karim, dan Irfan	Analisis Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya <i>Offgrid</i> Untuk Rumah Tinggal di Kota Banjarbaru.	Kondisi persediaan energi yang ada saat ini sudah mulai berkurang. Jika tak segera ditangani, kemungkinan tak terhindarkan adanya krisis energi. Untuk itu inovasi tentang energi alternatif, terutama dari sumber daya yang tak terbatas sangatlah diperlukan, untuk memenuhi kebutuhan energi masyarakat di masa yang akan datang di mana energi yang diterapkan adalah inovasi pemanfaatan sel surya.	Penelitian ini bertujuan untuk membantu masyarakat mengetahui perencanaan dalam pembangunan PLTS <i>Offgrid</i> untuk rumah tinggal tipe 45 dari segi kebutuhan komponen, luas area panel surya, dan nominal biaya yang diperlukan serta renewable energy.	Metode penelitian menggunakan metode analisis kuantitatif, dengan menggunakan teknik pengumpulan data literatur dan pengukuran yang selanjutnya diperhitungkan dengan rumus.	kebutuhan energi harian rumah tipe 45 sebesar 8.108 watt per hari dengan daya yang dibangkitkan sebesar 2.500 watt, dengan panel surya yang digunakan tipe <i>Monocrystalline</i> 300 Wp sebanyak 8 Unit, Solar Charge Controller MPPT 48 V dengan arus 60 A dan daya 3200 watt sebanyak 1 buah, Inverter 48 V (220Vac) dengan arus 60 A dan daya 4000 W sebanyak 1 buah, Baterai VRLA 12 V dengan daya 200 Ah sebanyak 16 buah dengan luas area array 8 buah panel surya adalah sebesar 12,98 m ² , Dan total Biaya yang dikeluarkan Rp. 448.248.750 dengan biaya energi per kWh sebesar Rp. 16.680 dan per bulan sebesar Rp. 4.053.240.
Sul Sandy A.K. dan Syamsul Bahri T	Perancangan Modul Hibrid Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dengan Pembangkit Listrik	Pulau Lae-Lae merupakan sebuah pulau kecil yang masih belum mendapatkan pasokan listrik dari PLN pada saat itu sehingga untuk memenuhi kebutuhan listrik tersebut hanya	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui mensimulasikan konfigurasi dari PLTH berdasarkan kebutuhan	Mensimulasi sistem hibrid dengan menggunakan HOMER baik pada konfigurasi seri,	Persentase energi terbarukan sebesar 50% - 60% dengan beban 1,889 Mw/hari, biaya operasi maupun pembangkitan relatif tidak

Tenaga Surya (PLTS).	menggunakan tenaga diesel di mana biaya yang diperlukan besar dan tidak maksimal. Oleh karena itu, diperlukan sistem pembangkitan yang lebih baik dan ekonomis serta menggunakan energi terbarukan.	daya dan nilai ekonomisnya.	paralel, ataupun konfigurasi <i>switched</i> .	mengalami kenaikan yang signifikan yaitu \$0,482 per kWh. Namun, ketika persentase energi terbarukan dinaikkan menjadi 70% atau 80% terjadi kenaikan menjadi signifikan yaitu 0,487 dan 0,611 per kWh.
----------------------	---	-----------------------------	--	--
