

SKRIPSI

**STUDI OPTIMASI PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK
SISTEM HIBRID DI PULAU BARRANG CADDI**

Disusun dan diajukan oleh:

**OWEN INNA
D041 20 1057**



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**STUDI OPTIMASI PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK
SISTEM HIBRID DI PULAU BARRANG CADDI**

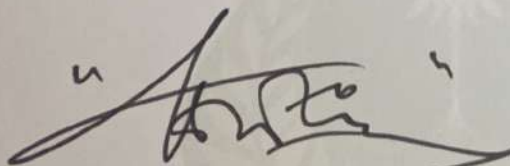
Disusun dan diajukan oleh

Owen Inna
D041201057

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam
rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik
Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 16 Oktober 2024
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

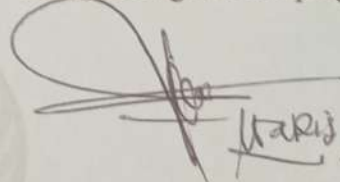
Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Prof. Ir. M Bachtiar Nappu, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D.
NIP. 197604062003121002

Pembimbing Pendamping



Ir. Tajuddin Waris, MT.
NIP. 196504241992031003

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Ing. Ir. Faizal A Samman, M.T., IPU., ASEAN.Eng. ACPE.
NIP. 197506052002121004

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Owen Inna
NIM : D041201057
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

STUDI OPTIMASI PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK SISTEM HIBRID DI PULAU BARRANG CADDI

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan 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, 16 Oktober 2024

Yang Menyatakan



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Studi Optimasi Perencanaan Pembangkit Listrik Hibrid di Pulau Barrang Caddi”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa dalam proses penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari berbagai hambatan dan tantangan yang penulis tempuh. Namun berkat kerja keras, ketekunan, dan penyertaan Tuhan, penulis dapat melalui setiap proses yang ada dengan lancar dan skripsi ini dapat terselesaikan. Dalam proses penyusunan skripsi ini, tak lupa juga penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak atas dukungan, doa, bantuan, dan bimbingan yang diberikan. Oleh karena itu, melalui kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-sebesarnya kepada:

1. Orang tua dan saudara penulis serta seluruh keluarga atas dukungan, doa, nasehat dan motivasi yang diberikan.
2. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT, selaku Ketua Departemen Teknik Elektro.
3. Bapak Prof. Ir. M. Bachtiar Nappu ST., MT., Mphil., Ph.D dan bapak Ir. Tajuddin Waris, M.T, selaku dosen pembimbing skripsi saya yang telah membantu dan memberikan bimbingan dalam penyusunan skripsi.
4. Ibu Prof. Ir. Ardiaty Arief, ST., MTM., Ph.D dan ibu Ir. Hasniaty A, ST., M.T., Ph.D selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun skripsi saya menjadi lebih baik.
5. Bapak/ibu dosen dan seluruh staff di lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin khususnya Departemen Teknik Elektro yang telah banyak membantu saya selama menjalani masa studi.
6. Kepada keluarga dari saudara Baim dan Talip yang telah mengakomodasi saya saat melakukan penelitian di tempat dan masyarakat di Barrang Caddi yang telah membantu saya.

7. Kepada teman-teman grup riset sistem tenaga dan pemasaran listrik yang telah membantu saya Anderson, Jorgio, Yoflin, Muflih, Ponno, Salsah, Febe, Rahel.
8. Kepada teman-teman PROCEZ20R terima kasih atas dukungan dan kebersamaannya.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini tidak luput dari adanya kesalahan dan penulis selalu terbuka untuk masukan dan saran yang membangun di masa mendatang.

Akhir kata, saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-sebesarannya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan selama proses penyusunan skripsi ini. Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca dan memberikan kontribusi bagi penelitian kedepannya.

Gowa, 12 Juli 2024

Penulis

ABSTRAK

OWEN INNA. *Studi Optimasi Perencanaan Pembangkit Listrik Sistem Hibrid di Pulau Barrang Caddi.* (dibimbing oleh M. Bachtiar Nappu dan Tajuddin Waris)

Pembangkit listrik sistem hibrid merupakan kombinasi dari pembangkit listrik sumber energi terbarukan dan non-terbarukan untuk memastikan pasokan energi yang lebih stabil, andal, ekonomis, dan lebih ramah lingkungan. Masyarakat di Pulau Barrang Caddi hingga saat ini masih bergantung sepenuhnya kepada sumber listrik dari genset diesel yang hanya aktif di malam hari saja. Pulau Barrang Caddi sendiri memiliki wilayah yang mendapat penyinaran matahari yang baik sepanjang tahun dengan rata-rata radiasi harian dalam setahun yaitu $5.87 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ dan karena letaknya yang berada di lepas pantai dimana angin bergerak relatif kencang dengan rata-rata kecepatan angin tahunan yaitu 4.84 m/s , menjadikan lokasi tersebut memiliki potensi yang baik untuk diterapkan sistem pembangkit listrik tenaga hibrid. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk melakukan simulasi optimasi sehingga didapatkan sistem yang optimal secara teknis dan ekonomis dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan. Hasil optimasi sistem hibrid menunjukkan hasil yang baik dimana konfigurasi sistem optimal menunjukkan persentase energi terbarukan yang besar dan dapat memenuhi permintaan beban secara kontinu tanpa terjadi pemadaman. Berdasarkan hasil penelitian, sistem dengan konfigurasi generator, panel surya, dan turbin angin menghasilkan kombinasi paling optimal dengan nilai *Net Present Cost* (NPC) dan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) terendah. Hasil perhitungan beberapa parameter ekonomi seperti NPV, IRR dan periode pengembalian menunjukkan bahwa sistem layak secara ekonomi dan dapat direalisasikan.

Kata Kunci : Sistem hibrid, Pulau Barrang Caddi, HOMER.

ABSTRACT

OWEN INNA. *Optimization Study of Hybrid System Power Plant Planning on Barrang Caddi Island.* (supervised by M. Bachtiar Nappu and Tajuddin Waris)

Hybrid system power generation is a combination of renewable and non-renewable energy source power generation to ensure a more stable, reliable, economical, and more environmentally friendly energy supply. The community on Barrang Caddi Island still relies entirely on electricity from diesel generators that are only active at night. Barrang Caddi Island itself has an area that gets good sun exposure throughout the year with average daily radiation in a year of $5.87 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ and because of its location offshore where the wind moves relatively fast with an average annual wind speed of 4.84 m/s , making the location have a good potential to implement a hybrid power plant system. The purpose of this study is to conduct an optimization simulation so that a technically and economically optimal system is obtained by utilizing renewable energy sources. The results of the hybrid system optimization show good results where the optimal system configuration shows a large percentage of renewable energy and can meet load demand continuously without blackouts. Based on the research results, the system with the configuration of generators, solar panels, and wind turbines produces the most optimal combination with the lowest Net Present Cost (NPC) and Levelized Cost of Energy (LCOE) values. The results of the calculation of several economic parameters such as NPV, IRR and payback period indicate that the system is economically feasible and can be realized.

Keywords : Hybrid System, Barrang Caddi Island, HOMER.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya	5
2.2 Sel Surya.....	6
2.2.1 Prinsip Kerja Sel Surya	6
2.2.2 Karakteristik Sel Surya	8
2.3 Komponen PLTS	9
2.3.1 Panel surya	9
2.3.2 <i>Solar Charge Controller</i>	10
2.3.3 Baterai	11
2.3.4 Inverter	12
2.4 Konversi Intensitas Radiasi Matahari.....	13
2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu	14
2.6 Turbin Angin	15
2.6.1 Zona Operasi Turbin Angin	16
2.6.2 Mode Operasi Turbin Angin	17
2.6.3 Klasifikasi Turbin Angin.....	18

2.7	Konversi Energi Angin.....	21
2.8	Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid	23
2.9	HOMER.....	25
2.10	Analisis Kelayakan Ekonomi	28
2.10.1	<i>Net Present Value</i> (NPV).....	28
2.10.2	<i>Internal Rate OF Return</i> (IRR).....	29
2.10.3	<i>Payback Period</i> (PP).....	30
2.11	<i>State Of The Art</i>	30
BAB III METODE PENELITIAN.....		33
3.1	Alur Penelitian.....	33
3.2	Waktu dan Lokasi Penelitian.....	35
3.3	Alat dan Bahan	35
3.4	Metode Pengambilan Data	35
3.5	Desain Simulasi Sistem PLTH	36
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN		38
4.1	Pulau Barrang Caddi	38
4.2	Analisis Data	39
4.2.1	Data Beban Listrik	39
4.2.2	Data Radiasi Matahari.....	43
4.2.3	Data Kecepatan Angin	44
4.2.4	Data Temperatur.....	44
4.3	Komponen Sistem PLTH	45
4.3.1	Generator.....	46
4.3.2	PV.....	48
4.3.3	<i>Wind Turbine</i>	48
4.3.4	<i>Storage</i>	49
4.3.5	Konverter.....	49
4.4	Simulasi Beban Eksisting.....	50
4.4.1	Konfigurasi-1 (Genset).....	51
4.4.2	Konfigurasi-2 (PV, Turbin Angin, Baterai, Konverter).....	53
4.4.3	Konfigurasi-3 (PV, Genset, Baterai, Konverter).....	55
4.4.4	Konfigurasi-4 (Turbin Angin, Genset, Baterai, Konverter).....	57
4.4.5	Konfigurasi-5 (PV, Turbin Angin ,Genset, Baterai, Konverter).....	59
4.5	Simulasi dengan Prakiraan Beban	62

4.5.1	Pertumbuhan Beban 3%.....	62
4.5.2	Pertumbuhan Beban 5%.....	64
4.5.3	Pertumbuhan Beban 10%.....	66
4.6	Reduksi Konsumsi Bahan Bakar dan Emisi Karbon CO2	68
4.7	Analisa Kelayakan Ekonomi	71
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		77
V.1	Kesimpulan.....	77
V.1	Saran	78
DAFTAR PUSTAKA		79
LAMPIRAN.....		83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Efek Photovoltaik (Widiharsa, 2006).....	6
Gambar 2. PN <i>Junction</i> (http://icrfq.net)	7
Gambar 3. Rangkaian ekivalen sel tunggal (Sangwongwanich, 2014).....	8
Gambar 4. Kurva Karakteristik I-V (Iskandar, 2017)	9
Gambar 5. Zona operasi turbin angin (Yuhendri, 2011).....	16
Gambar 6. <i>Horizontal Axis Wind Turbine</i> (Wu Bin dkk, 2011)	19
Gambar 7. <i>Vertical Axis Wind Turbine</i> (Wu Bin dkk, 2011).....	20
Gambar 8. Skema PLTH Seri (Dedisukma, 2015).....	24
Gambar 9. Skema PLTH Paralel (Dedisukma, 2015)	24
Gambar 10. Skema PLTH <i>Switched</i> (Dedisukma, 2015).....	25
Gambar 11. Simulasi dan optimasi HOMER (Rauf, dkk, 2017)	27
Gambar 12. Diagram Alir Penelitian	33
Gambar 13. Pulau Barrang Caddi (http://maps.google.com).....	35
Gambar 14. Gambaran Pulau Barrang Caddi.....	39
Gambar 15. Data Beban Listrik Pulau Barrang Caddi	40
Gambar 16. Perkiraan Beban Listrik Harian Pulau Barrang Caddi	41
Gambar 17. Perkiraan Beban Listrik Tahun-15	43
Gambar 18. Grafik Indeks Radiasi Matahari (NASA, 2005).....	44
Gambar 19. Kecepatan Angin Rata-Rata (NASA, 2013)	44
Gambar 20. Temperatur Harian Rata-Rata (NASA, 2013).....	45
Gambar 21. Generator Cummins 240 kW	46
Gambar 22. Generator Cummins 160 kW	47
Gambar 23. Skematik Konfigurasi 1.....	51
Gambar 24. Produksi Energi Bulanan Konfigurasi-1	52
Gambar 25. Skematik Konfigurasi-2	53
Gambar 26. Produksi Energi Bulanan Konfigurasi-2	54
Gambar 27. Skematik Konfigurasi-3	55
Gambar 28. Produksi Energi Bulanan Konfigurasi-3	57
Gambar 29. Skematik Konfigurasi-4	58
Gambar 30. Produksi Energi Bulanan Konfigurasi-4	59
Gambar 31. Skematik Konfigurasi-5	60
Gambar 32. Produksi Energi Bulanan Konfigurasi-5	61
Gambar 33. Rincian Biaya Sistem Optimum pada Pertumbuhan Beban 3%	63
Gambar 34. Rincian Biaya Sistem Optimum pada Pertumbuhan Beban 5%	65
Gambar 35. Rincian Biaya Sistem Optimum pada Pertumbuhan Beban 10%	67
Gambar 36. Konsumsi Bahan Bakar	69
Gambar 37. Emisi Karbon CO ₂	69
Gambar 38. Biaya Kompensasi Reduksi Bahan Bakar	70
Gambar 39. Grafik Aliran Kas Tahunan Pertumbuhan Beban 3%	71
Gambar 40. Grafik Aliran Kas Tahunan Pertumbuhan Beban 5%	72
Gambar 41. Grafik Aliran Kas Tahunan Pertumbuhan Beban 10%	72

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Kondisi angin	15
Tabel 2. Nilai Z0	23
Tabel 3. <i>State of the art</i>	31
Tabel 4. Data Beban Listrik Pulau Barrang Caddi.....	40
Tabel 5. Prakiraan Data Beban Listrik di Pulau Barrang Caddi	41
Tabel 6. Perkiraan Beban Harian pada Tahun-15	42
Tabel 7. Spesifikasi Generator Cummins 240 kW (<i>Nameplate</i> VG300C-C/W) ..	47
Tabel 8. Spesifikasi Generator Cummins 160 kW (<i>Datasheet</i> C220D5E).....	47
Tabel 9. Spesifikasi Panel Surya (<i>Datasheet</i> CanadianSolar CS6X-325P)	48
Tabel 10. Spesifikasi Turbin Angin (Junus dkk, 2021)	48
Tabel 11. Spesifikasi Baterai (<i>Datasheet</i> Trojan SSIG 12 255)	49
Tabel 12. Spesifikasi Konverter (<i>Datasheet</i> ABB MGS100).....	49
Tabel 13. Komponen Konfigurasi-1	51
Tabel 14. Parameter Elektrik Konfigurasi-1	52
Tabel 15. Komponen Konfigurasi-2	53
Tabel 16. Parameter Elektrik Konfigurasi-2	54
Tabel 17. Komponen Konfigurasi-3	56
Tabel 18. Parameter Elektrik Konfigurasi-3	56
Tabel 19. Komponen Konfigurasi-4	58
Tabel 20. Parameter Elektrik Konfigurasi-4	58
Tabel 21. Komponen Konfigurasi-5	60
Tabel 22. Parameter Elektrik Konfigurasi-5	61
Tabel 23. Hasil Optimasi Kenaikan Beban 3%.....	62
Tabel 24. Parameter Elektrik Konfigurasi-5 dengan Kenaikan Beban 3%.....	63
Tabel 25. Hasil Optimasi Kenaikan Beban 5%.....	64
Tabel 26. Parameter Elektrik Konfigurasi-5 dengan Kenaikan Beban 5%.....	65
Tabel 27. Hasil Optimasi Kenaikan Beban 10%.....	66
Tabel 28. Parameter Elektrik Konfigurasi-5 dengan Kenaikan Beban 10%.....	67
Tabel 29. Data Konsumsi Bahan Bakar dan Emisi CO ₂	69
Tabel 30. Total Kompensasi Biaya Bahan Bakar	70
Tabel 31. Aliran Kas Kumulatif pada Pertumbuhan Beban 3%	73
Tabel 32. Aliran Kas Kumulatif pada Pertumbuhan Beban 5%	74
Tabel 33. Aliran Kas Kumulatif pada Pertumbuhan Beban 10%	75

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi Data Beban Listrik	84
Lampiran 2. Spesifikasi/Datasheet Komponen	86
Lampiran 3. Data Hasil Simulasi	99
Lampiran 4. Surat Pengambilan Data	139

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengertian energi terbarukan adalah energi yang berasal dari sumber energi terbarukan yang dapat digunakan tanpa batas waktu dan tidak akan pernah habis karena dapat dipulihkan dalam waktu relatif singkat. Menurut Undang-undang Nomor 30 Tahun tentang Energi, pengertian energi terbarukan tercantum pada pasal 1 ayat (6), yakni “sumber energi yang dihasilkan dari sumber daya energi yang berkelanjutan jika dikelola dengan baik, antara lain panas bumi, angin, bioenergi, sinar matahari, aliran dan terjunan air, serta gerakan dan perbedaan suhu lapisan laut.”

Melalui dokumen Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Nomor Keputusan Menteri ESDM Nomor 143K/20/MEM/2019 tentang Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional Tahun 2019 sampai dengan tahun 2038, ESDM memproyeksikan rata-rata pertumbuhan kebutuhan energi listrik nasional sebesar 6,9% per tahun. Komposisi kebutuhan tenaga listrik Nasional tahun 2019-2035 diperkirakan akan didominasi oleh sektor industri, kemudian diikuti oleh sektor rumah tangga, bisnis, publik, dan transportasi. Mulai tahun 2036 kebutuhan tenaga listrik sektor transportasi diperkirakan akan lebih besar daripada sektor publik (KESDM, 2019).

Penggunaan energi fosil secara terus-menerus akan menyebabkan kelangkaan dan menipisnya cadangan energi tersebut. Sementara di sisi lain kebutuhan penggunaan energi terus mengalami peningkatan. Dalam menghadapi tantangan akan kelangkaan energi ini dan dampak lingkungan yang buruk oleh pemakaian bahan bakar fosil maka penggunaan sumber energi terbarukan dapat menjadi alternatif yang tepat ditengah krisis energi dan mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil.

Sistem hibrid merupakan pembangkit listrik yang menggabungkan berbagai sumber energi baik yang bersifat *renewable* dan *non-renewable energy* dengan tujuan untuk memaksimalkan efisiensi energi. Dengan penggunaan sistem hibrid dapat mengoptimalkan permintaan-penawaran energi yang semakin meningkat dan meminimalkan dampak lingkungan. Khususnya di daerah terpencil dan *off-*

grid penerapan sistem hibrid sangat layak secara ekonomi. Meskipun sistem hibrid memiliki beberapa tantangan seperti sistem yang rumit, mahal, kurang dapat diandalkan dan kurang efisien, namun keberadaanya tetap relevan dalam menyediakan akses listrik yang lebih baik dan berkelanjutan di wilayah yang terisolasi.

Pulau Barrang Caddi yaitu pulau yang terletak di pesisir barat Pantai Losari masih belum terdapat akses listrik dengan baik selama 24 jam. Sistem kelistrikan *off-grid* di pulau tersebut berasal dari suplai genset diesel dan pengelolaannya masih dilakukan oleh swadaya. Aliran listrik hanya tersedia selama 7 jam saja dalam sehari pada malam hari. Kondisi kelistrikan yang terbatas membuat aktivitas masyarakat di siang hari menjadi terkendala. Oleh karena itu, melalui penelitian ini penulis akan melakukan perancangan sistem pembangkit listrik dengan pembangkit energi terbarukan yang di-hibrid dengan pembangkit eksisting sehingga nantinya dengan sistem hybrid ini dapat mengurangi penggunaan solar sehingga dapat menghemat biaya bahan bakar dan dapat mengurangi polusi udara untuk mengurangi pemanasan global dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan Latar Belakang di atas, dapat di rumuskan masalah :

1. Bagaimana merancang konfigurasi pembangkit sistem hibrid pada suatu wilayah dengan memanfaatkan potensi sumber daya yang ada.
2. Bagaimana melakukan optimasi pembangkit sistem hibrid untuk mendapatkan konfigurasi yang optimal.
3. Bagaimana analisis dari pembangkit listrik sistem hibrid yang optimal secara teknis dan ekonomis.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Dapat merancang pilihan konfigurasi sistem dengan memanfaatkan potensi sumber daya yang ada.
2. Dapat melakukan simulasi untuk optimasi pembangkit hibrid untuk mendapatkan konfigurasi optimal.

3. Menganalisis sistem hybrid optimal berdasarkan aspek teknis dan ekonomi sistem hibrid.

1.4 Batasan Masalah

1. Pembangkit listrik yang akan di-hibrid dengan pembangkit eksisting yaitu PLTS dan PLTB.
2. Data beban listrik diperoleh di Pulau Barrang Caddi.
3. Data potensi sumber daya energi terbarukan diperoleh dari database NASA.
4. Simulasi optimasi pembangkit tenaga listrik hybrid dilakukan dengan menggunakan aplikasi HOMER.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Memberikan masukan kepada pemerintah daerah setempat dalam pengambilan rencana untuk pengembangan energi terbarukan.
2. Sebagai referensi bagi pemerintah daerah setempat dalam pengambilan rencana untuk pengembangan sumber energi terbarukan.
3. Memberikan kesadaran terhadap masyarakat setempat dalam pemanfaatan potensi energi terbarukan di lingkungan sekitar mereka.
4. Menjadi referensi bagi mahasiswa dan peneliti untuk memperdalam ilmu pengetahuan akan optimasi sistem pembangkit energi listrik dengan sistem hibrid.

1.6 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 METODE 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 pembahasan dan analisis hasil simulasi yang diperoleh pada penelitian ini.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi kesimpulan dari hasil dan pembahasan dan saran untuk penelitian kedepannya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

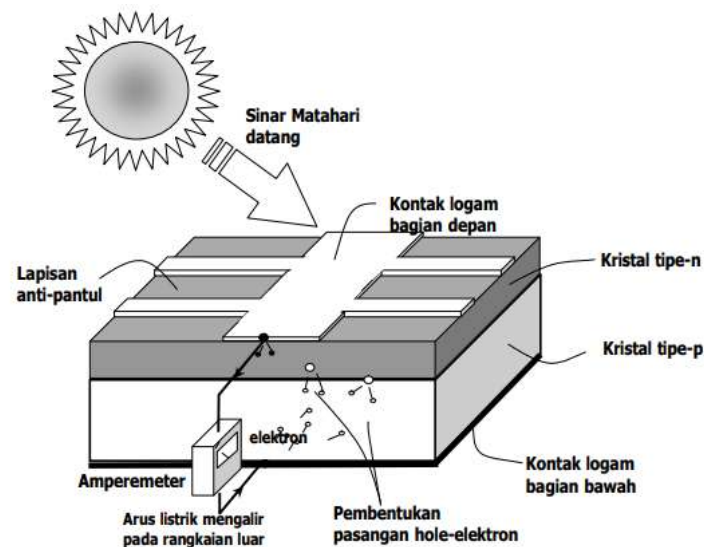
Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) pada saat ini sedang banyak dimanfaatkan karena dapat digunakan untuk berbagai keperluan sehari-hari dalam memenuhi kebutuhan energi listrik. Memanfaatkan energi dari matahari, panel surya kemudian mengonversinya menjadi energi listrik. Kebutuhan akan energi listrik terus meningkat setiap tahun, untuk mengatasi hal tersebut perlu mencari sumber energi alternatif, salah satunya pembangkit listrik tenaga surya (Santoso dkk, 2021).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya atau PLTS adalah sebuah sistem yang digunakan untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip efek photovoltaic. *Photovoltaic* sendiri merupakan fenomena fisika yang terjadi pada permukaan sel surya (*solar cell*) ketika menerima cahaya matahari. Selanjutnya, cahaya yang diterima diubah menjadi energi listrik. Hal ini disebabkan karena adanya energi foton cahaya yang membebaskan elektron – elektron sehingga mengalir dalam sambungan semikonduktor tipe n dan p yang pada akhirnya menimbulkan arus listrik. Sistem energi listrik yang menggunakan PLTS ini menjadi sumber energi yang ramah lingkungan. Sistem PLTS ini banyak diminati karena sinar matahari mudah didapatkan di Indonesia yang merupakan negara tropis di mana matahari menyinari wilayah Indonesia hampir sepanjang tahun (Nurjaman, 2022).

Energi surya juga dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi cadangan untuk mencukupi kebutuhan akan energi listrik, dan dapat diterapkan di Indonesia karena Indonesia merupakan salah satu negara tropis yang setiap tahun mendapatkan sinar matahari sangat baik. Selain itu, kondisi alam di Indonesia yang sangat sulit dijangkau dan berbentuk kepulauan, sehingga penerapan energi surya sangatlah tepat untuk menjangkau daerah tertinggal, terpencil, dan terluar (Gunawan, 2020).

2.2 Sel Surya

Sel surya atau *solar cell* adalah sebuah elemen aktif yang memanfaatkan efek fotovoltaiik tersebut untuk merubah energi surya menjadi energi listrik. Elemen aktif yang dimaksud di sini adalah bahan semikonduktor. Ketika cahaya surya mengenai permukaan aktif sel surya, foton yang terbentuk dalam cahaya menyalurkan energinya pada elektron valensi yang terdapat bahan semikonduktor, sebagai reaksi terhadap intensitas dan distribusi spektral cahaya. Pada saat energi semakin besar sampai pada level tertentu dapat terjadi beda potensial yang memungkinkan terjadinya arus listrik (Widiharsa, 2006).



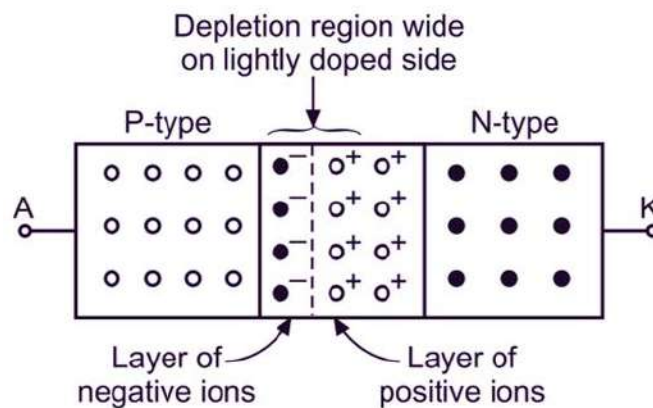
Gambar 1. Efek Photovoltaiik (Widiharsa, 2006)

2.2.1 Prinsip Kerja Sel Surya

Sel surya bekerja berdasarkan efek fotoelektrik pada material semikonduktor untuk mengubah energi cahaya menjadi energi listrik. Berdasarkan teori Maxwell tentang radiasi elektromagnet, cahaya dapat dianggap sebagai spektrum gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang yang berbeda.

Prinsip kerja semikonduktor sebagai sel surya mirip dengan dioda sebagai pn-junction. PN-junction adalah gabungan/lapisan semikonduktor jenis P dan N yang diperoleh dengan cara doping pada silikon murni. Pada semikonduktor jenis P, terbentuk *hole* (pembawa muatan listrik positif) yang jumlahnya lebih banyak dibandingkan jumlah elektronnya, sehingga *hole* merupakan pembawa muatan

mayoritas, sedangkan elektron merupakan pembawa muatan minoritas. Demikian pula sebaliknya dengan semikonduktor jenis N. Bila bagian P dari *pn-junction* dihubungkan dengan kutub positif baterai dan bagian N dihubungkan dengan kutub negatif baterai, maka arus dapat mengalir melewati *pn-junction*. Kondisi ini disebut sebagai panjar maju. Bila hal sebaliknya dilakukan (panjar mundur), yaitu bagian N dari *pn-junction* dihubungkan dengan kutub positif baterai dan bagian P dihubungkan dengan kutub negatif baterai, maka arus tidak dapat mengalir melewati *pn-junction*. Akan tetapi, masih ada arus dalam ukuran sangat kecil yang masih dapat mengalir (dalam ukuran mikroamper) yang disebut dengan arus bocor (Diputra, 2008).

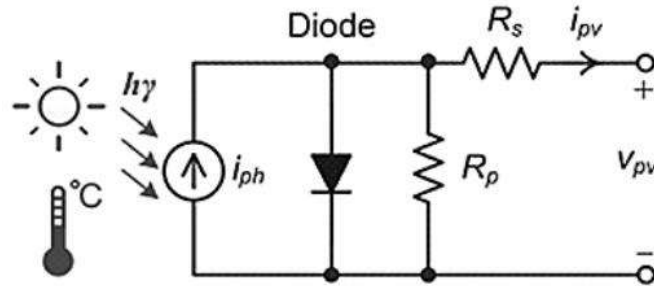


Gambar 2. PN Junction (<http://icrfq.net>)

Ada dua hal yang menarik dalam kondisi panjar mundur tersebut, yaitu efek fotokonduktif dan *photovoltaic*. Fotokonduktif adalah gejala di mana apabila suhu dinaikkan, maka arus bocor pada panjar mundur juga meningkat. Kenaikan suhu yang dapat dianggap sebagai penambahan energi dapat juga diganti dengan cahaya sebagai salah satu bentuk energi. Penyerapan energi cahaya pada kondisi panjar mundur sehingga menghasilkan arus listrik pada *pn junction* ini disebut dengan efek *photovoltaic*. Jadi, sel surya pada dasarnya adalah sebuah fotodiode yang dirancang dengan mengacu pada efek *photovoltaic* sedemikian rupa, sehingga dapat mengubah energi cahaya seefisien mungkin menjadi energi listrik (Diputra, 2008).

2.2.2 Karakteristik Sel Surya

Pada Gambar 3 dibawah merupakan rangkaian ekivalen yang menunjukkan hubungan karakteristik sel surya dengan melihat beberapa parameter dalam kurva I-V seperti arus hubung singkat (I_{sc}), rangkaian tegangan terbuka (V_{oc}) dan beberapa faktor lain yang mempengaruhi karakteristik sel surya.



Gambar 3. Rangkaian ekivalen sel tunggal (Sangwongwanich, 2014)

Seperti halnya sebuah dioda sel surya ini tersusun atas p-n *junction*. *Junction* ini menyerap energi photon dari cahaya matahari dan menghasilkan pasangan *electron-hole* yang menyebarkan ke sebagian atau seluruh bagian *junction*. Peristiwa ini menghasilkan medan listrik yang melewati *junction* dan menyebabkan aliran arus listrik, dengan demikian merubah energi matahari ke energi listrik. Arus keluaran yang dihasilkan oleh panel surya dapat dituliskan pada persamaan (1) berikut. menunjukkan i_{pv} dan v_{pv} merupakan arus dan tegangan keluaran dari sel surya, i_{ph} merupakan arus yang dihasilkan dari proses penyerapan energi photon (Sangwongwanich, 2014).

$$i_{pv} = i_{ph} - i_o \left[\exp \left(\frac{v_{pv} + i_{pv} R_s}{n K_B T / q} \right) - 1 \right] - \frac{v_{pv} + i_{pv} R_s}{R_p} \quad (1)$$

Keterangan:

i_{pv} = arus keluaran sel surya (A)

i_{ph} = arus yang dihasilkan dari proses penyerapan energi photon (A)

i_o = arus saturasi dioda (A)

v_{pv} = tegangan keluaran sel surya (V)

R_s = tahanan seri (ohm)

R_p = tahanan shunt (ohm)

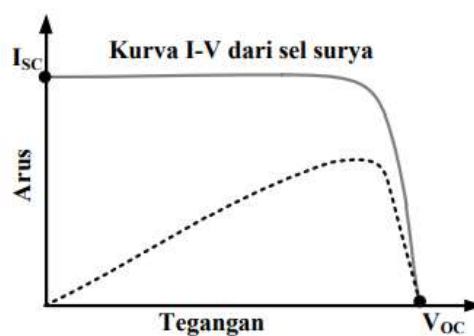
n = faktor idealitas dioda

K_B = konstanta Boltzman ($1.3805 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)

T = temperature panel surya (K)

q = muatan dari elektron (C)

Sel surya merupakan salah satu sumber energi listrik terbarukan, parameter dari sel surya dapat diperoleh karakteristik arus tegangan antara lain adalah arus hubung singkat I_{sc} , tegangan rangkaian terbuka V_{oc} , daya maksimum dan nilai *fill factor*. Sel surya dapat dimodelkan sebagai sumber arus yang diparalelkan dengan dioda berdasarkan dioda *shockley*.



Gambar 4. Kurva Karakteristik I-V (Iskandar, 2017)

Dengan menggunakan sumber radiasi matahari maka akan diperoleh karakteristik bila dibandingkan dengan hasil pemodelan maka perbedaan dan kesamaannya akan adanya analisis lebih lanjut, faktor yang mempengaruhi karakteristik ini adalah tingkat radiasi matahari dan temperatur pada sel surya yang ditunjukkan dalam Gambar 4. Titik I_{sc} memberikan arus maksimum ketika hubung singkat dan nilai tegangan berangsur turun menuju nol (Iskandar, 2017).

2.3 Komponen PLTS

2.3.1 Panel surya

Panel surya adalah alat yang terdiri dari suatu sel yang terbuat dari bahan semikonduktor yang dapat melepas elektron. Sel surya diartikan sebagai teknologi yang membangkitkan suatu daya listrik DC, diukur dalam satuan Watt (W) atau kiloWatt (kW), yang berasal dari suatu bahan semikonduktor ketika dipaparkan oleh cahaya. Selama cahaya menyinari bahan semikonduktor tersebut maka sel surya akan menghasilkan energi listrik, dan ketika cahaya berhenti menyinari, sel surya berhenti menghasilkan listrik (Hegedeus & Luque, 2003).

Jenis - jenis Panel Surya (Purwoto, 2019) :

- 1) Monokristal (*Mono-crystalline*) merupakan panel yang paling efisien yang dihasilkan dengan teknologi terkini & menghasilkan daya listrik persatuan luas yang paling tinggi. Monokristal dirancang untuk penggunaan yang memerlukan konsumsi listrik besar pada tempat-tempat yang beriklim ekstrim dan dengan kondisi alam yang sangat ganas. Memiliki efisiensi sampai dengan 15%. Kelemahan dari panel jenis ini adalah tidak akan berfungsi baik ditempat yang cahaya mataharianya kurang (teduh), efisiensinya akan turun drastis dalam cuaca berawan.
- 2) Polikristal (*Poly-Crystalline*) merupakan Panel Surya yang memiliki susunan kristal acak karena dipabrikan dengan proses pengecoran. Tipe ini memerlukan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan jenis monokristal untuk menghasilkan daya listrik yang sama. Panel suraya jenis ini memiliki efisiensi lebih rendah dibandingkan tipe monokristal, sehingga memiliki harga yang cenderung lebih rendah.
- 3) *Thin Film Photovoltaic* merupakan Panel Surya (dua lapisan) dengan struktur lapisan tipis mikrokristalsilicon dan amorphous dengan efisiensi modul hingga 8.5% sehingga untuk luas permukaan yang diperlukan per watt daya yang dihasilkan lebih besar daripada monokristal & polykristal. Inovasi terbaru adalah *Thin Film Triple Junction Photovoltaic* (dengan tiga lapisan) 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 ditera setara.

2.3.2 *Solar Charge Controller*

Solar Charge Controller adalah peralatan elektronik yang digunakan untuk mengatur arus searah yang diisi ke baterai dan diambil dari baterai ke beban. Solar charge controller mengatur overcharging (kelebihan pengisian - karena baterai sudah 'penuh') dan kelebihan tegangan dari panel surya / *solar cell*. Kelebihan tegangan dan pengisian akan mengurangi umur baterai (Sukmajati, 2015).

Ada dua jenis teknologi yang umum digunakan oleh solar charge controller (Sukmajati, 2015):

1. PWM (*Pulse Wide Modulation*), seperti namanya menggunakan 'lebar' pulse dari on dan off elektrik, sehingga menciptakan seakan-akan sine wave electrical form.
2. MPPT (*Maximun Power Point Tracker*), yang lebih efisien konversi DC to DC (Direct Current). MPPT dapat mengambil maximum daya dari PV. MPPT charge controller dapat menyimpan kelebihan daya yang tidak digunakan oleh beban ke dalam baterai, dan apabila daya yang dibutuhkan beban lebih besar dari daya yang dihasilkan oleh PV, maka daya dapat diambil dari baterai.

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, 2019).

2.3.3 Baterai

Mengingat PLTS sangat tergantung pada kecukupan energi matahari yang diterima panel surya, maka diperlukan media penyimpanan energi sementara bila sewaktu-waktu panel tidak mendapatkan cukup sinar matahari atau untuk penggunaan listrik malam hari. Baterai harus ada pada sistem PLTS terutama tipe *Off Grid*.

Beberapa teknologi baterai yang umum dikenal adalah *lead acid*, alkalin, NiFe, Ni-Cad dan Li-ion. Masing-masing jenis baterai memiliki kelemahan dan kelebihan baik dari segi teknis maupun ekonomi (harga). Baterai *lead acid* dinilai lebih unggul dari jenis lain jika mempertimbangkan kedua aspek tersebut. Baterai *lead acid* untuk sistem PLTS berbeda dengan baterai lead acid untuk operasi starting mesin-mesin seperti baterai mobil. Pada PLTS, baterai yang berfungsi untuk penyimpanan (*storage*) juga berbeda dari baterai untuk buffer atau stabilitas. Baterai untuk pemakaian PLTS lazim dikenal dan menggunakan *deep*

cycle lead acid, artinya muatan baterai jenis ini dapat dikeluarkan (*discharge*) secara terus menerus secara maksimal mencapai kapasitas nominal. Baterai adalah komponen utama PLTS yang membutuhkan biaya investasi awal terbesar setelah panel surya dan inverter. Namun, pengoperasian dan pemeliharaan yang kurang tepat dapat menyebabkan umur baterai berkurang lebih cepat dari yang direncanakan, sehingga meningkatkan biaya operasi dan pemeliharaan. Atau dampak yang paling minimal adalah baterai tidak dapat dioperasikan sesuai kapasitasnya (Sianipar, 2014).

2.3.4 Inverter

Inverter berfungsi mengubah arus searah (DC) yang dihasilkan oleh panel surya menjadi arus bolak balik (AC). Tegangan DC dari panel surya cenderung tidak konstan sesuai dengan tingkat radiasi matahari. Tegangan masukan DC yang tidak konstan ini akan diubah oleh inverter menjadi tegangan AC yang konstan yang siap digunakan atau disambungkan pada sistem yang ada, misalnya jaringan PLN. Parameter tegangan dan arus pada keluaran inverter pada umumnya sudah disesuaikan dengan standar baku nasional/internasional. Pemilihan jenis inverter untuk PLTS disesuaikan dengan jenis sistem PLTS. Inverter untuk sistem *On Grid* (*On Grid Inverter*) harus memiliki kemampuan melepaskan hubungan (*islanding system*) saat grid kehilangan tegangan. Inverter untuk sistem PLTS hibrid harus mampu mengubah arus dari kedua arah yaitu dari DC ke AC dan sebaliknya dari AC ke DC. Oleh karena itu inverter ini lebih populer disebut *bi-directional inverter* (Sianipar, 2014). Inverter dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori yaitu (Purwoto, dkk, 2019):

- a. *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.
- b. *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.

- c. *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.

2.4 Konversi Intensitas Radiasi Matahari

Untuk melakukan konversi intensitas radiasi matahari dengan menggunakan panel surya dengan posisi tetap harus diketahui terlebih dahulu mengenai luas array panel surya yang terpasang, sudut kemiringan dari panel surya berdasarkan garis lintang, besar radiasi matahari, efisiensi panel surya, dan efisiensi inverter yang digunakan. Untuk mendapatkan daya keluaran panel surya setelah dikonversi dan diubah menjadi tegangan AC, dapat digunakan rumus berikut (Hayu dkk, 2018).

$$P_{out} = I \cdot A \cdot E_p \cdot E_i \quad (2)$$

Keterangan :

P_{out} = Daya keluaran PV setelah dikonversi (Watt)

I = Radiasi matahari (W/m^2)

A = Luas daerah pemasangan array sel surya (m^2)

E_p = Efisiensi panel surya

E_i = Efisiensi inverter

Jika *operating temperature* lebih besar dari suhu nominal sel surya beroperasi (NOCT) yaitu 25 °C maka akan mengurangi daya keluaran modul sel surya, akan tetapi jika *operating temperature* lebih kecil dari NOCT maka akan menambah daya keluaran modul sel surya. Untuk mendapatkan besar suhu

permukaan modul sel surya saat beroperasi (*operating temperature*) dapat menggunakan persamaan berikut ini (Hayu dkk, 2018):

$$T_{cell} = T_{air} \frac{NOCT - 20}{80} S \quad (3)$$

Keterangan :

T_{cell} = Suhu permukaan modul sel surya (°C)

T_{air} = Suhu lingkungan (°C)

NOCT = suhu nominal sel surya beroperasi (°C)

S = radiasi matahari (mW/cm^2)

2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

Salah satu energi terbarukan yang berkembang pesat di dunia saat ini adalah energi angin. Energi angin merupakan energi terbarukan yang sangat fleksibel. Energi angin dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan misalnya pemompaan air untuk irigasi, pembangkit listrik, pengering atau pencacah hasil panen, aerasi tambak ikan/udang, pendingin ikan pada perahu-perahu nelayan dan lain-lain. Selain itu, pemanfaatan energi angin dapat dilakukan di mana-mana, baik di daerah landai maupun dataran tinggi, bahkan dapat di terapkan di laut, berbeda halnya dengan energi air. Pemanfaatan energi angin ini, selain dapat mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil, diharapkan juga dapat meningkatkan efektifitas dan efisiensi sistem pertanian, yang pada gilirannya akan meningkatkan produktifitas masyarakat pertanian (Daryanto, 2007).

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu/Angin (PLTB) mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin atau kincir angin. Prinsip kerja Pembangkit Listrik Tenaga Bayu cukup sederhana, yaitu energi angin yang memutar turbin angin, diteruskan untuk memutar rotor pada generator dibagian belakang turbin angin, sehingga akan menghasilkan energi listrik. Energi Listrik ini biasanya akan disimpan kedalam baterai sebelum dapat dimanfaatkan (Bono dkk, 2017).

2.6 Turbin Angin

Turbin angin atau kincir angin merupakan suatu alat yang menggunakan tenaga angin atau energi angin untuk membangkitkan energi mekanik, angin digunakan untuk memutar *blade* yang mana ketika *blade* tersebut berputar maka akan menghasilkan energi yang dapat membantu kelangsungan hidup manusia. (Naitio dkk, 2021).

Pada dasarnya suatu turbin angin dapat dipasang di mana saja, namun pengkajian potensi angin tetap harus dilakukan untuk mendapatkan suatu sistem konversi energi angin yang tepat. Pengkajian potensi energi angin di suatu tempat dilakukan dengan mengukur dan menganalisis kecepatan dan arah angin. (Daryanto, 2007). Pada umumnya kecepatan angin yang dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin angin dibatasi dengan syarat-syarat tertentu. Sedangkan syarat-syarat dan kondisi angin yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 berikut (Bono dkk, 2017).

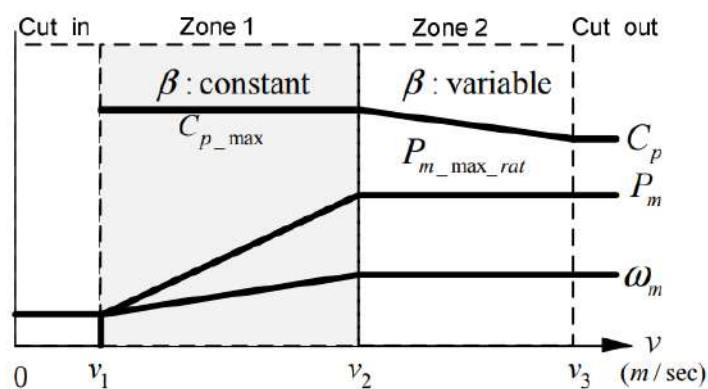
Tabel 1. Kondisi angin

Tabel Kondisi Angin			
Kelas Angin	Kecepatan Angin (m/d)	Kecepatan Angin (km/jam)	Kecepatan Angin (knot/jam)
1	0.3 ~ 1.5	1 ~ 5.4	0.58 ~ 2.92
2	1.6 ~ 3.3	5.5 ~ 11.9	3.11 ~ 6.42
3	3.4 ~ 5.4	12.0 ~ 19.5	6.61 ~ 10.5
4	5.5 ~ 7.9	19.6 ~ 28.5	10.7 ~ 15.4
5	8.0 ~ 10.7	28.6 ~ 38.5	15.5 ~ 20.8
6	10.8 ~ 13.8	38.6 ~ 49.7	21 ~ 26.8
7	13.9 ~ 17.1	49.8 ~ 61.5	27 ~ 33.3
8	17.2 ~ 20.7	61.6 ~ 74.5	33.5 ~ 40.3
9	20.8 ~ 24.4	74.6 ~ 87.9	40.5 ~ 47.5
10	24.5 ~ 28.4	88.0 ~ 102.3	47.7 ~ 55.3
11	28.5 ~ 32.6	102.4 ~ 117.0	55.4 ~ 63.4
12	>32.6	>118	63.4

Dari Tabel 1 diatas dapat terlihat bahwa angin kelas 3 adalah batas kecepatan angin minimum dan angin kelas 8 adalah batas kecepatan angin maksimum energi angin yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik.

2.6.1 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 5.



Gambar 5. Zona operasi turbin angin (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).

2.6.2 Mode Operasi Turbin Angin

Ada tiga mode untuk mengontrol *variable speed pitch* pada *wind turbine*. Pemilihan mode operasi tergantung pada kecepatan angin yang tersedia dan jumlah daya yang dibutuhkan untuk mensuplai beban. Tiga mode tersebut adalah (Ali dkk, 2017) :

1. Maximum Power Point Tracking

Mode yang digunakan untuk mengkonversikan daya maksimum dari angin, pada saat kecepatan angin rendah akan mengikuti nilai koefisien daya. Daya mekanik yang dikonversikan adalah:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_{p_max} V^3 \quad (4)$$

Keterangan :

P_m = Daya maksimum

ρ = Kerapatan udara (kg/m^3)

A = Luas penampang turbin (m^2)

C_{p_max} = Koefisien maksimum turbin

V = Kecepatan angin (m/s).

2. *Blade Pitch control*

Mode ini dioperasikan ketika kecepatan angin diluar dari nilai rata-rata, dalam situasi ini torsi elektromagnetik tidak cukup untuk mengontrol kecepatan rotor dengan demikian generator akan *overload*. Untuk menghindari hal ini, konversi daya turbin angin harus dibatasi dan ini dapat dilakukan dengan mengurangi koefisien daya (C_p) dari turbin angin. Koefisien daya dapat dimanipulasi dengan memvariasikan *blade pitch angel* (β).

3. *Power Regulation*

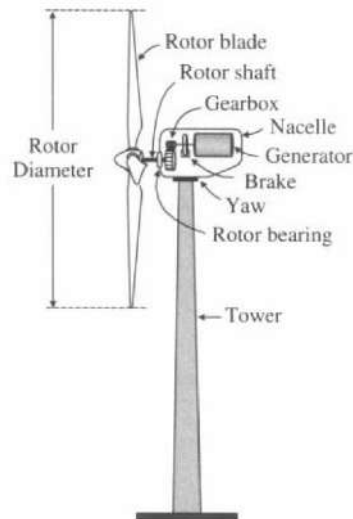
Dengan semakin banyaknya daya angin yang masuk pada sistem. Pada pengoperasian turbin angin tidak mungkin untuk menjaga agar daya yang dihasilkan konstan. Oleh karena itu, pengaturan tegangan dan frekuensi diperlukan, agar daya listrik yang dihasilkan sesuai dengan permintaan beban.

2.6.3 Klasifikasi Turbin Angin

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)

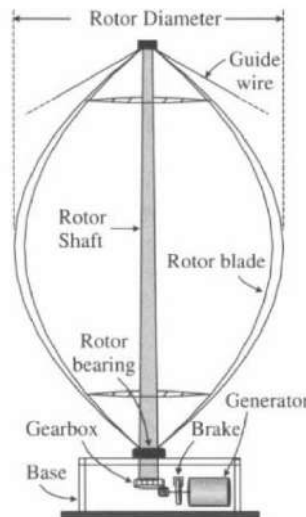
HAWT merupakan turbin yang poros utamanya berputar menyesuaikan arah angin. Agar rotor dapat berputar dengan baik, arah angin harus sejajar dengan poros turbin dan tegak lurus terhadap arah putaran rotor. Biasanya turbin jenis ini memiliki *blade* berbentuk *airfoil* seperti bentuk sayap pada pesawat. 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. Gambar 6 menunjukkan bentuk dari kincir angin HAWT.



Gambar 6. *Horizontal Axis Wind Turbine* (Wu Bin dkk, 2011)

2. *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*

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 7 menunjukkan bentuk dari kincir angin VAWT.



Gambar 7. *Vertical Axis Wind Turbine* (Wu Bin dkk, 2011)

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).

- a. *Fixed speed wind turbine* (FSWT) disebut juga dengan konsep Danish yang sangat populer pada tahun 1980-an. FSWT memiliki keuntungan yaitu merupakan 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 yang konstan maka turbin tidak dapat beroperasi pada efisiensi puncak dengan kecepatan angin yang berubah sehingga energi yang dihasilkan kecil. FSWT menghasilkan fluktuasi daya keluaran ke *grid* yang tinggi sehingga menyebabkan gangguan ke sistem daya. Turbin jenis ini juga membutuhkan desain mekanik yang kokoh dan mahal untuk dapat menyerap tekanan mekanik yang tinggi.
- b. *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. Walaupun hal tersebut dikompensasi dengan produksi energi yang lebih tinggi. Biaya untuk konverter elektronika daya dapat mencapai sekitar 7% dari keseluruhan biaya sistem turbin angin .

2.7 Konversi Energi Angin

Konversi energi angin ke energi listrik diawali dengan tahap aliran angin memutar susu-sudu rotor, angin yang bergerak memiliki energi kinetik (E) yang besar nilainya dapat ditulis dengan persamaan (Sam dkk, 2015) (Hayu dkk, 2018):

$$E = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot V^2 \quad (5)$$

Keterangan:

$\dot{m}$ = massa udara yang mengalir per detik (kg)

V= Kecepatan angin (m/s).

Massa udara yang mengalir melewati penampang turbin per detik nya dapat dihitung dengan persamaan :

$$\dot{m} = A \cdot V \cdot \rho \quad (6)$$

Keterangan:

$\dot{m}$ = massa udara yang mengalir per detik (kg)

A= luas penampang turbin angin (m^2)

V= Kecepatan angin (m/s).

ρ = Kerapatan udara (kg/ m^3)

Daya yang dihasilkan oleh angin yang bergerak dengan kecepatan tertentu yang bergerak melewati penampang sudu-sudu turbin angin dapat dituliskan dengan persamaan :

$$P = E / \text{satuan waktu} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot V^3 \cdot \rho \quad (7)$$

Keterangan:

P=Daya angin ($\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3$)

E= Energi kinetik angin ($\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$)

A= luas penampang turbin angin (m^2)

V= Kecepatan angin (m/s).

ρ = Kerapatan udara (kg/m^3)

Daya efektif dari angin yang mungkin dihasilkan oleh suatu turbin angin (E_a) dapat dihitung dengan persamaan :

$$E_a = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot D^2 \cdot V^3 \quad (8)$$

Keterangan:

C_p = koefisien daya turbin angin

D= diameter turbin angin (m)

V= Kecepatan angin (m/s).

ρ = Kerapatan udara (kg/m^3)

Sehingga daya turbin per satuan luas dapat dinyatakan oleh:

$$(P_s/A)_{wp} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_g \cdot \eta_b \cdot \rho \cdot V^3 \quad (9)$$

Keterangan :

C_p = Koefisien daya turbin angin

V = Kecepatan angin (m/s).

ρ = Kerapatan udara (kg/m^3)

η_{tr} = efisiensi transmisi

η_g = efisiensi generator

η_b = efisiensi baterai

Untuk mendapatkan daya pembangkit listrik tenaga bayu yang lebih optimal, maka perlu diperhatikan ketinggian pemasangan turbin pembangkit tersebut karena kecepatan angin sangat terpengaruh pada suatu ketinggian, semakin tinggi dari permukaan maka kecepatan angin akan semakin besar/cepat. Untuk menghitung kecepatan angin pada ketinggian tertentu (hub height) dapat digunakan persamaan (Sam dkk, 2015).

$$V_{hub} = V_{anem} \frac{\ln(Z_{hub}/Z_0)}{\ln(Z_{anem}/Z_0)} \quad (10)$$

Keterangan

V_{hub} = Kecepatan angin pada hub height (m/s).

V_{anem} = Kecepatan angin ketinggian anemometer (m/s)

Z_{hub} = Hub height turbin angin (m).

Z_{anem} = Tinggi anemometer (m).

Z_0 = Panjang kekasaran permukaan tanah (m).

Adapun untuk menentukan besar dari Z_0 dapat dilihat nilai-nilai untuk area yang berbeda pada tabel berikut ini.

Tabel 2. Nilai Z_0

Deskripsi Medan	Z_0
Sangat halus, es atau lumpur	0,00001 m
Lautan terbuka yang tenang	0,0002 m
Lautan yang berangin	0,0005 m
Permukaan salju	0,003 m
Rumput halaman	0,008 m
Padang rumput kasar	0,010 m
Ladang kosong	0,03 m
Tanaman	0,05 m
Beberapa pohon	0,10 m
Banyak pohon, beberapa bangunan	0,25 m
Hutan dan lahan berhutan	0,5 m
Pinggiran kota	1,5 m
Pusat kota, gedung tinggi	3,0 m

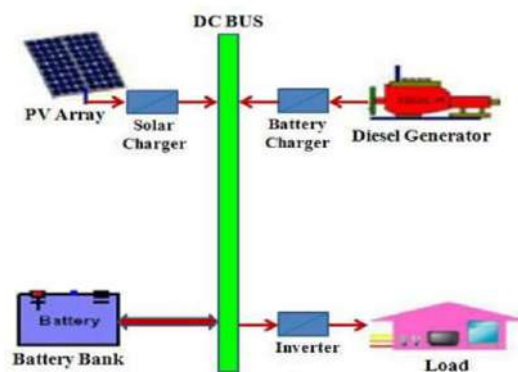
2.8 Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid

Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid yang disingkat PLTH adalah gabungan atau integrasi antara dua atau lebih pembangkit listrik dengan sumber energi yang berbeda. Pada umumnya pembangkit listrik berbasis energi terbarukan dalam pengoperasiannya di hibrid dengan pembangkit listrik berbasis energi fosil. PLTH merupakan salah satu alternatif sistem pembangkit yang tepat diaplikasikan pada daerah-daerah yang sukar dijangkau oleh sistem pembangkit besar seperti jaringan PLN. PLTH juga merupakan solusi untuk mengatasi krisis BBM dan ketiadaan listrik di daerah terpencil, pulau-pulau kecil. Tujuan PLTH adalah mengkombinasikan keunggulan dari setiap pembangkit sekaligus menutupi kelemahan masing-masing pembangkit untuk kondisi-kondisi tertentu dan dapat dicapai keandalan suplai, sehingga secara keseluruhan sistem dapat beroperasi

lebih ekonomis dan efisien (Adipradana dkk, 2018). Konfigurasi dasar sistem pembangkit listrik tenaga hibrid dikelompokkan menjadi tiga yaitu *Series Hybrid System*, *Parallel Hybrid System*, dan *Switched Hybrid System* (Dedisukma, 2015).

a. Sistem Hibrid Seri

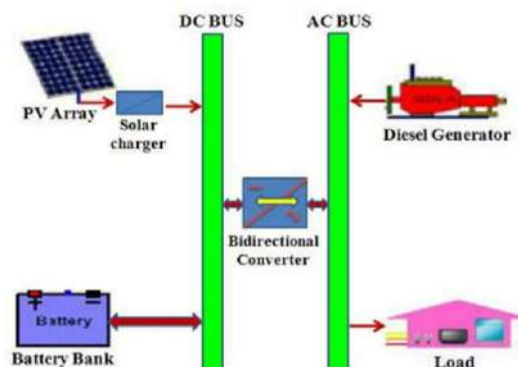
Untuk sistem seri semua pembangkit daya mensuplai daya DC kedalam baterai, setiap komponen harus dilengkapi dengan *charge controller* sendiri. Pada sistem ini, generator dan inverter harus didesain agar dapat melayani beban puncak. Pada sistem ini sejumlah besar energi yang dibangkitkan dilewatkan melalui baterai, siklus baterai bank menjadi naik dan mengurangi efisiensi sistem, daya listrik dari genset di searahkan dan diubah kembali menjadi AC sebelum disupai ke beban sehingga tidak terjadi rugi – rugi yang signifikan.



Gambar 8. Skema PLTH Seri (Dedisukma, 2015)

b. Sistem Hibrid Paralel

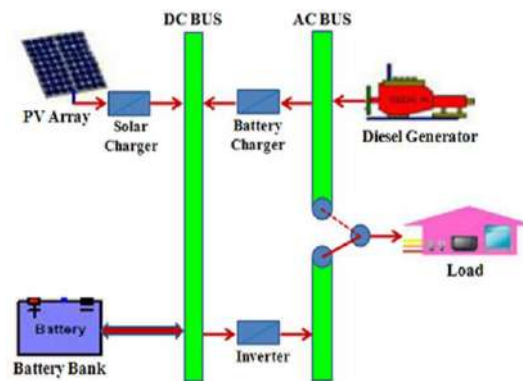
Pada PLTS dan PLN yang menggunakan sistem paralel, beban disuplai baik dari generator diesel maupun inverter secara paralel. Bi-directional converter digunakan untuk menjembatani antara baterai dan sumber AC.



Gambar 9. Skema PLTH Paralel (Dedisukma, 2015)

c. Sistem Hibrid *Switched*

Pada sistem PLTH tersaklar, genset dan inverter dapat beroperasi untuk melayani beban, genset dan sumber energi terbarukan dapat mengisi (*charging*) baterai. Pada sistem ini beban dapat langsung disuplai genset sehingga meningkatkan efisiensi total, kelebihan daya dari genset dapat digunakan untuk mengisi beban baterai.



Gambar 10. Skema PLTH *Switched* (Dedisukma, 2015)

2.9 HOMER

HOMER (*Hybrid Optimization Model for Energy Renewable*) adalah perangkat lunak yang tepat digunakan untuk membantu pemodelan dari sebuah sistem tenaga listrik dengan menggunakan berbagai pilihan sumber daya terbarukan. HOMER dapat digunakan untuk simulasi dalam mengoptimalkan sistem pembangkit tenaga listrik, baik *off-grid (stand-alone)* maupun *grid-connected* yang dapat terdiri atas kombinasi *photovoltaic*, mikrohidro, baterai dan kombinasi sumber energi baru dan terbarukan lainnya serta untuk melayani beban listrik maupun beban *thermal*. Perangkat lunak HOMER ini dikembangkan oleh *The National Renewable Energy Laboratory* (NREL), USA yang bekerjasama dengan Mistaya Engineering, di mana hak ciptanya dilindungi oleh *Midwest Research Institute* (MRI) dan digunakan oleh Departemen Energi Amerika Serikat (DOE) (Lambert dkk, 2006).

HOMER bekerja berdasarkan 3 proses yaitu simulasi, optimasi, dan analisis sensitivitas. Ketiga proses tersebut bekerja secara berurutan dan mempunyai fungsi masing-masing sehingga diperoleh hasil yang optimal (Tachrir, 2023).

1. Simulasi

Simulasi adalah proses pembuatan model atau representasi sistem, proses, atau fenomena di dunia nyata dengan menggunakan perangkat lunak atau alat yang menghasilkan hasil serupa dengan yang diharapkan di dunia nyata. Simulasi biasanya digunakan untuk menguji teori, mengembangkan desain, atau mengevaluasi kinerja sistem tanpa harus melakukan uji coba langsung pada sistem fisik sebenarnya. Dalam simulasi, pengguna dapat memodifikasi parameter dan kondisi sistem untuk melihat bagaimana perubahan tersebut mempengaruhi hasil atau kinerja sistem.

2. Optimasi

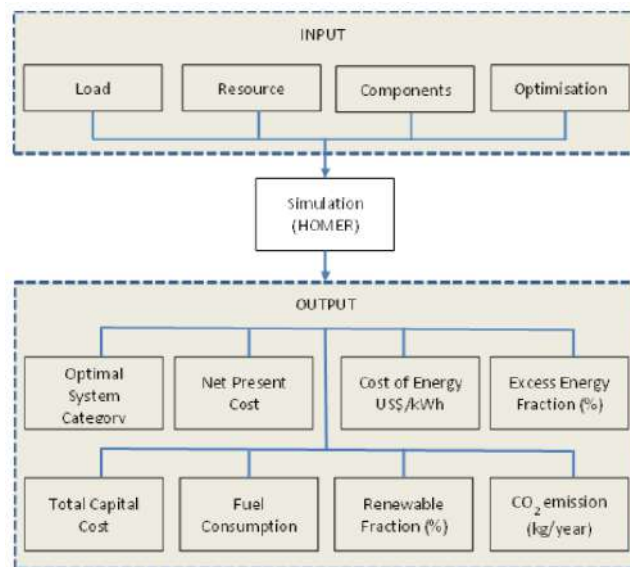
Proses optimasi adalah suatu cara untuk mencari solusi terbaik atau paling optimal dari suatu masalah atau sistem dengan cara memaksimalkan atau meminimalkan fungsi tujuan tertentu dan memenuhi sejumlah batasan atau kendala yang ada. Dalam proses optimasi, ada satu atau beberapa variabel yang dapat dimodifikasi untuk mencapai solusi optimal. Variabel seperti ini disebut variabel desain dan tujuannya adalah untuk mencapai nilai terbaik dari fungsi tujuan yang telah ditentukan. Misalnya dalam optimasi produksi, variabel desain dapat berupa jumlah bahan baku, jumlah pekerja, dan waktu produksi yang digunakan untuk menghasilkan suatu produk. Proses optimasi melibatkan dua tahapan utama, yaitu tahap perencanaan dan tahap implementasi. Tahap perencanaan meliputi identifikasi variabel desain, fungsi tujuan, dan kendala yang ada, serta menentukan strategi optimasi yang akan digunakan. Tahap implementasi meliputi pengujian strategi optimasi dan evaluasi solusi optimal yang ditemukan.

3. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas adalah proses mengevaluasi bagaimana variasi masukan atau parameter suatu model atau sistem mempengaruhi hasil atau keluaran model atau sistem tersebut. Analisis sensitivitas membantu memahami tingkat ketidakpastian dalam suatu model atau sistem dan mengidentifikasi parameter mana yang memiliki dampak terbesar terhadap hasil atau keluaran. Dalam analisis sensitivitas, beberapa nilai masukan atau

parameter suatu model atau sistem diubah dalam rentang tertentu untuk mengukur pengaruhnya terhadap hasil atau keluaran. Setelah nilai masukan atau parameter diubah, hasil atau keluaran model atau sistem diukur dan dianalisis untuk menentukan dampak perubahan masukan atau parameter terhadap hasil atau keluaran.

HOMER memodelkan konfigurasi sistem tertentu dengan melakukan simulasi per jam seri operasinya selama satu tahun. HOMER melakukan simulasi dengan *step* waktu satu jam selama setahun, menghitung energi terbarukan yang tersedia, membandingkannya dengan beban listrik, dan memutuskan apa yang harus dilakukan dengan kelebihan energi terbarukan yang dihasilkan, atau cara terbaik untuk menghasilkan listrik tambahan pada saat terjadi defisit. (Lambert dkk, 2006). Gambar 11 menunjukkan alur simulasi dan optimasi program HOMER.



Gambar 11. Simulasi dan optimasi HOMER (Rauf, dkk, 2017)

Analisa Finansial Pada Program Homer (Rauf, dkk, 2017):

1. Net Present Cost (NPC)

Biaya Net Total Masa Kini (*Total Net Present Cost/NPC*) adalah keluaran ekonomi yang paling utama untuk nilai suatu sistem pada PLTMH dan PV, HOMER akan mengurutkan data hasil keluaran simulasi dan optimasi berdasar nilai NPC terendah. Total NPC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut ini:

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann.tot}}{CRF(i, R_{proj})} \quad (11)$$

Keterangan:

$C_{ann.tot}$ = Total Biaya tahunan (\$/tahun)

CRF = Faktor Penutupan Modal

I = Suku bunga

R_{proj} = Lama waktu suatu proyek

N = Jumlah Tahunan

2. Syarat Batas Biaya Energi (*Levelized Cost of Energy*)

Levelized cost of energy (COE) didefinisikan sebagai biaya rata per kWh produksi energi listrik yang terpakai oleh sistem. Untuk menghitung COE, biaya produksi energi listrik tahunan dibagi dengan total energi listrik terpakai yang diproduksi, dengan persamaan sebagai berikut:

$$COE = \frac{C_{ann.tot}}{E_{primAC} + E_{grid.sales} + E_{def}} \quad (12)$$

Keterangan:

$C_{ann.tot}$ = biaya total sistem tahunan (\$/tahun)

E_{primAC} = Beban AC utama yang terpenuhi (kWh/tahun)

E_{def} = Beban defferable yang terpenuhi (kWh/tahun)

$E_{grid.sales}$ = Total penjualan grid (kWh/tahun)

2.10 Analisis Kelayakan Ekonomi

Dalam merancang sebuah proyek sistem pembangkit listrik energi terbarukan harus dilakukan analisis kelayakan ekonomi nya untuk melihat apakah investasi proyek tersebut dapat menguntungkan atau merugikan secara financial. Analisis ekonomi yang digunakan berupa metode *Net Present Value* (NPV), metode *Internal Rate OF Return* (IRR), dan metode *Payback Period* (PP).

2.10.1 Net Present Value (NPV)

Metode *Net Present Value* (NPV) merupakan metode yang dilakukan dengan cara membandingkan nilai sekarang dari aliran kas masuk bersih (proceeds) dengan nilai sekarang dari biaya pengeluaran suatu investasi (outlays).

Oleh karena itu, untuk melakukan perhitungan kelayakan investasi dengan metode NPV diperlukan data aliran kas keluar awal (*initial cash outflow*), aliran kas masuk bersih di masa yang akan datang (*future net cash inflows*), dan rate of return minimum yang diinginkan (M. Giatman, 2017). Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai NPV sebagai berikut.

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (13)$$

* $NPV > 0$; Investasi akan menguntungkan / layak (*feasible*)

* $NPV < 0$; Investasi tidak menguntungkan / tidak layak (*unfeasible*).

Keterangan :

N = Jumlah periode

t = Waktu arus kasyang ditaksir

CF_t = Arus kas pada waktu t

i = Diskonto nilai uang atau *discount rate* (dalam%)

2.10.2 Internal Rate OF Return (IRR)

Metode *Internal Rate of Return* (IRR) adalah salah satu metode mencari suku bunga disaat NPV sama dengan nol. Metode IRR ini memberikan informasi mengenai tingkat kemampuan cashflow dalam mengembalikan modal investasi yang dijelaskan dalam bentuk persen (%) periode waktu dan seberapa besar pula kewajiban yang harus dipenuhi. Kemampuan inilah yang disebut dengan *Internal Rate of Return* (IRR), sedangkan kewajiban disebut dengan *Minimum Atractive of Return* (MARR). Dengan demikian suatu investasi dikatakan layak jika $IRR \geq MARR$. (M. Giatman, 2017). Persamaan yang digunakan untuk menghitung Internal Rate of Return (IRR) adalah sebagai berikut:

$$IRR = i_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 + NPV_2} (i_2 - i_1) \quad (14)$$

Keterangan:

i_1 = *Discount rate* yang menghasilkan NPV positif

i_2 = *Discount rate* yang menghasilkan NPV negatif

NPV_1 = *Net Present Value* bernilai positif

NPV_2 = *Net Present Value* bernilai negatif

2.10.3 Payback Period (PP)

Metode Payback Period (PP) merupakan metode yang digunakan untuk menghitung lama periode yang diperlukan untuk mengembalikan uang yang telah diinvestasikan dari aliran kas masuk (*proceeds*) tahunan yang dihasilkan oleh proyek investasi tersebut (M. Giatman, 2017). Apabila *proceeds* setiap tahun jumlahnya sama maka *Payback Period* (PP) dari suatu investasi dapat dihitung dengan cara membagi jumlah investasi (*outlays*) dengan *proceeds* tahunan. Persamaan yang digunakan untuk menghitung Payback Period (PP) adalah sebagai berikut:

$$\text{Payback Period}(PP) = n + \frac{(a - b)}{(c - b)} \times 1 \text{ tahun} \quad (15)$$

Keterangan :

n = tahun terakhir di mana jumlah arus kas masih belum bisa menutup investasi mula-mula

a = jumlah investasi mula-mula

b = jumlah kumulatif arus kas pada tahun ke-n

c = jumlah kumulatif arus kas pada tahun ke-n+1

2.11 State Of The Art

Pada bagian *State of The Art* ini ditampilkan beberapa penelitian terdahulu yang dijadikan sebagai bahan acuan penulis dalam melaksanakan penelitian. Tabel 2 memperlihatkan tabel *State of The Art* yang berisikan penelitian-penelitian yang telah membahas tentang Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PLTH) dengan menggunakan metode-metode tertentu beserta hasil penelitiannya

Tabel 3. *State of the art*

Nama Peneliti	Judul	Identifikasi Masalah	Tujuan	Metode	Hasil yang Dicapai
Marliani	Optimasi Pembangkit Hybrid Energi Terbarukan Pada Kampus Vokasi ATS Menggunakan Metode <i>Wild Horse Optimization</i> (WHO).	Kampus Akademi Teknik Soroako (ATS) belum dapat menyediakan sendiri sumber energi listriknya untuk keperluan praktikum. Kampus ATS memperoleh dukungan penuh dari PT. Vale dalam penyediaan energinya dan bantuan dalam pengembangan sumber energi di kampus.	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 model PLTH dengan menggunakan metode <i>Wild Horse Optimization</i> (WHO).	Berdasarkan optimasi dengan metode WHO didapatkan hasil terbaik pada kombinasi sistem yang terdiri dari PV-WT-baterai. Hasil dengan metode WHO tidak jauh berbeda dengan hasil PSO, namun hasil metode WHO memperoleh hasil keluaran yang lebih stabil. Berdasarkan hasil simulasi dan perhitungan diperoleh nilai COE (<i>Cost Of Energy</i>) terbaik pada kombinasi PV-Grid sebesar \$0,0150.
Andi Dwiki Yulianto	Perencanaan Pembangkit Listrik Berbasis Energi Terbarukan Untuk Lahan Perkebunan: Studi Kasus di Kecamatan Bupon di Kabupaten Luwu.	Tanaman Kakao merupakan salah satu komoditi unggulan pada sektor perkebunan di Kabupaten Luwu yang produktivitasnya sangat dipengaruhi oleh pemenuhan kebutuhan air terutama pada musim kemarau agar tanaman tidak mengalami defisit air. Solusi yang dilakukan petani setempat menggunakan pompa diesel untuk mengatasi defisit air 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.	Melakukan simulasi optimasi untuk mendapatkan konfigurasi optimal 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 kapasitas masing-masing komponen sistem optimal yaitu Genset 0,75 kW, PV 0,960 kW, baterai 1 kW sebanyak 7 unit, serta <i>converter</i> 2 kW. Konfigurasi sistem ini dapat dikatakan layak direalisasikan karena memenuhi parameter-parameter kelayakan ekonomi.
Muh. Akbar Sardar	Analisis Nilai Ekonomis Perencanaan Pembangkit Listrik	Desa Leppang memiliki potensi alam yang sangat bagus untuk peternakan di mana populasi ternak pada lokasi tersebut sangat banyak	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis seberapa besar potensi daya dan kelayakan	Mensimulasi PLT Biogas, PLTS, dan hibrid PLT Biogas dengan PLTS	Besarnya potensi daya yang dapat dihasilkan oleh PLTH energi biogas dan surya adalah sebesar 784,984 MWh/tahun dengan daya rata-rata per

	Tenaga Hibrid Energi Biogas dan Energi Surya di Desa Leppang Kecamatan Patampanua Kabupaten Pinrang.	sehingga memiliki potensi energi biogas yang melimpah. Berdasarkan kondisi penyinaran matahari, desa tersebut juga memiliki potensi PLTS yang besar. Hal ini membuat penulis tertarik untuk menganalisa PLTH dari energi biogas dan energi surya.	ekonomis dari PLT Biogas, PLTS, dan hibrid PLT Biogas dengan PLTS.	menggunakan <i>software</i> HOMER untuk melihat besar dayanya serta menghitung nilai ekonomis pembangkit menggunakan Ms. Excel.	hari 2,15 MWh/hari. Investasi PLTH untuk jangka waktu 20 tahun berdasarkan segi ekonomis layak dilaksanakan untuk suku bunga 8% sampai 20%.
Sul Sandy A.K. dan Syamsul Bahri T	Perancangan Modul Hibrid Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).	Pulau Lae-Lae merupakan sebuah pulau kecil yang belum mendapatkan pasokan listrik dari PLN, sehingga hanya mengandalkan genset diesel yang pasokan listriknya belum kontinu 24 jam serta biayanya yang mahal. Maka dari itu, diperlukan sistem pembangkitan yang lebih baik dan ekonomis serta menggunakan energi terbarukan.	Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan jenis dan konfigurasi PLTH terbaik untuk memenuhi beban dengan memerhatikan aspek biayanya.	Mensimulasi sistem hibrid dengan menggunakan HOMER baik pada konfigurasi seri, paralel, ataupun konfigurasi <i>switched</i> .	Persentase energi terbarukan sebesar 50% - 60% dengan beban 1,889 Mw/hari, biaya operasi maupun pembangkitan relatif tidak 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.
Sahid Pangampe	Studi Kelayakan Penambahan PLTB Pada Sistem Hybrid Pulau Karanrang Kabupaten Pangkep	Sistem kelistrikan di Pulau Karanrang menggunakan PLTD dan PLTS dimana PLTD digunakan pada malam hari dan PLTS di siang hari. Kondisi intensitas cahaya yang tidak menentu mempengaruhi PLTS sehingga terdapat kondisi tanpa penyaluran listrik di siang hari. Penambahan PLTB dapat menjadi solusi karena potensi angin yang baik pada lokasi.	Mengetahui seberapa optimal dan analisis ekonomi penambahan PLTB pada sistem pembangkit listrik hibrid di Pulau Karanrang	Melakukan simulasi HOMER pada konfigurasi hibrid PLTB dengan PLTD dan PLTS untuk melihat apakah sistem optimal.	Berdasarkan hasil simulasi HOMER, penambahan PLTB pada skenario hibrid (PLTD, PLTS dan PLTB) dan skenario hibrid (PLTS dan PLTB) secara teknis dapat memenuhi beban sebesar 4.113,9 kWh/hari. Ditinjau dari aspek kelayakan ekonomis skenario (PLTD, PLTS dan PLTB) memiliki nilai NPC yang lebih rendah dan periode pengembalian yang lebih cepat.