

SKRIPSI

**INTEGRASI SISTEM TENAGA HIBRIDA
BAYU DAN SURYA DENGAN
SISTEM PENYIMPANAN ENERGI HIDRO TERPOMPA
DI DAERAH TERPENCIL DENGAN APLIKASI HOMER**

Disusun dan diajukan oleh:

**A. ACHMAD RIFAI
D041 18 1342**



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

INTEGRASI SISTEM TENAGA HIBRIDA
BAYU DAN SURYA DENGAN
SISTEM PENYIMPANAN ENERGI HIDRO TERPOMPA
DI DAERAH TERPENCIL DENGAN APLIKASI HOMER

Disusun dan diajukan oleh:

A. ACHMAD RIFAI

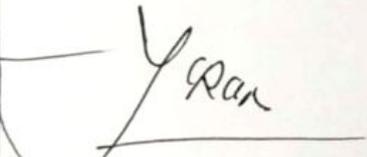
D041 18 1342

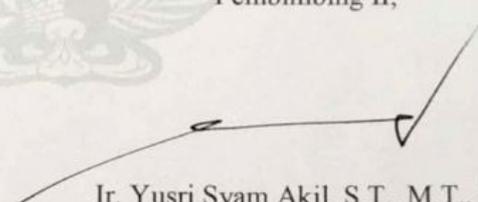
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada Tanggal 21 Agustus 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing I,

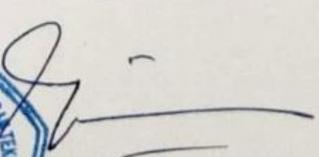
Pembimbing II,


Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T.
NIP. 19750404 20012 1 001


Ir. Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D
NIP. 19770322 200501 1 001

Ketua Program Studi,




Eng. Dewiani, M.T., IPM.
NIP. 19691026 199412 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : A. Achmad Rifai
NIM : D041181342
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

**INTEGRASI SISTEM TENAGA HIBRIDA BAYU DAN SURYA DENGAN
SISTEM PENYIMPANAN ENERGI HIDRO TERPOMPA DI DAERAH
TERPENCIL DENGAN APLIKASI HOMER**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambil 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 penerbitnya. 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 diklasifikasi 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.

Makassar, 21 Agustus 2024



Yang Menyatakan

A. Achmad Rifai
A. Achmad Rifai

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “INTEGRASI SISTEM TENAGA HIBRIDA BAYU DAN SURYA DENGAN SISMTE PENYIMPANAN HIDRO TERPOMPA DI DAERAH TERPENCIL DENGAN APLIKASI HOMER”.Penyusunan skripsi ini merupakan salah satu syarat kelulusan pada Pendidikan Strata (S1) Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna,oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk menyempurnakan skripsi ini.Penulis menyadari dalam penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Yusran, ST.MT selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Yusri Syam Akil, ST.,MT.,Ph.D selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktunya untuk menguji penulis serta memberikan kritik dan saran dalam penulisan skripsi ini.
2. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin S.T, M.Eng., IPU selaku Dosen Penguji I dan Ibu Dr.Ir. Hasniaty A, ST., M.T. selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan kritik yang membangun serta saran yang baik kepada penulis dalam mengerjakan skripsi ini.
3. Bapak/Ibu Dosen dan seluruh staf Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan banyak ilmu maupun pengalaman yang membantu dalam kelancaran penyusunan skripsi ini.
4. Kedua Orang Tua tercinta, terima kasih atas doa dan dukungan serta cinta dan kasih yang tak henti-hentinya diberikan kepada penulis selama perkuliahan. Juga sanak keluarga yang menyertai
5. Ibu Dr. Ir. Dewiani, M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Seluruh saudara, senior, dan junior yang tanpanya akan kurang mewarnai kehidupan bermahasiswa penulis.

7. CAL18RATOR atas kebersamaan, kerjasama, pengalaman serta motivasinya selama masa perkuliahan hingga saat ini.
8. Sahabat saya Ali Shariaty pendekar Elektro 2018, segenap Teknik 2018, Muhammad Umar dan Muh. Ibrahim Fauzi D24GON MAPALA 09 Teknik Unhas, yang telah kebersamai dan mengajarkan banyak nilai kehidupan selama berproses mencapai kemuliaan diri.
9. Ketua Angkatan TEKNIK 2018 SABLENG A. Eri Andhika Adil yang selalu menjadi sosok bertanggung jawab, pengayom dan motivator.

Akhir kata peneliti menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam kelancaran penelitian ini, peneliti juga berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis, kita semua dan dunia Pendidikan.

Gowa, 24 Juni 2024

A. Achmad Rifai

ABSTRAK

A. ACHMAD RIFAI *Integrasi Sistem Tenaga Hibrida Bayu dan Surya dengan Sistem Penyimpanan Hidro Terpompa di Daerah Terpencil dengan Aplikasi HOMER (dibimbing oleh Yusran dan Yusri Syam Akil).*

Pulau Selayar merupakan salah satu pulau yang terletak di Provinsi Sulawesi Selatan dan memiliki luas wilayah 10.503,69 km², dimana sistem kelistrikannya disuplai sepenuhnya oleh PLTD dengan kapasitas 11 MW ditambah dengan PLTS 1300 kW yang beroperasi selama 24 jam setiap hari. Pulau Selayar memiliki sumber Energi Baru Terbarukan (EBT) yang dapat dikembangkan yaitu energi surya dengan potensi rata-rata sebesar 5,45 kWh/m²/hari dan potensi energi angin rata-rata sebesar 8,72 m/s. Penelitian ini bertujuan untuk merancang integrasi sistem tenaga hibrida bayu dan surya dengan sistem penyimpanan energi hidro terpompa dengan studi kasus beban sistem tenaga listrik Kabupaten Kepulauan Selayar serta menganalisa seberapa layak investasi kah sistem ini ditinjau dari segi kelistrikan, ekonomi, dan lingkungan hidup. Data beban yang digunakan merupakan data beban Selayar yang kemudian diproyeksikan untuk beban 10 tahun kedepan dengan menggunakan prediksi regresi linier sederhana. Pada penelitian ini perangkat lunak komputer HOMER digunakan untuk mensimulasikan beberapa konfigurasi sistem dengan berbagai pengaturan jumlah komponen pembangkit yang beragam. Pembangkit yang digunakan berupa PLTS, PLTB, PLTD serta komponen penyimpanan berupa PEHT dan Baterai. Hasil simulasi pada perangkat lunak HOMER menunjukkan 18 skenario konfigurasi optimal sistem pembangkit yang beragam dengan jumlah masing masing komponen yang beragam pula, dengan hasil sistem paling optimal memiliki konfigurasi ; PLTS kapasitas 29 MW, 15 unit PLTB 1 MW, PLTD terpakai sebanyak 9,5 MW dengan komponen sistem penyimpanan 900 unit PEHT 22 kW. Sistem ini dihitung mempunyai NPC sebesar \$274 Juta dengan modal awal \$82,4 Juta dan COE \$0.125. Hasil analisis kelayakan ditinjau dari segi ekonomi, kelistrikan, dan lingkungan menunjukkan sistem ini layak dijadikan sebagai investasi.

Kata Kunci: Energi Terbarukan, Pulau Selayar, Potensi Energi, Pembangkit Listrik Tenaga Angin, Pembangkit Listrik Tenaga Surya, Pembangkit Listrik Tenaga Diesel, Penyimpanan Energi Hidro Terpompa, NPC, COE.

ABSTRACT

A. ACHMAD RIFAI *Integration of Wind and Solar Hybrid Power Systems with Pumped Hydro Storage Systems in Remote Areas with HOMER Application* (supervised by Yusran and Yusri Syam Akil).

Selayar Island is one of the islands located in South Sulawesi Province and has an area of 10,503.69 km², where the electricity system is fully supplied by PLTD with a capacity of 11 MW which operates for 24 hours every day, coupled with a 1300 kW solar power plant. Selayar Island has a source of New Renewable Energy (NRE) that can be developed, namely solar energy with an average potential of 5.45 kWh/m²/day and an average wind energy potential of 8.72 m/s. This study aims to design the integration of wind and solar hybrid power systems with pumped hydro energy storage systems with a case study of the load of the electric power system in Selayar Islands Regency, and analyze how feasible the investment is for this system in terms of electricity, economy, and the environment. The load data used is Selayar load data which is then projected for the next 10 years using a simple linear regression prediction. In this study, HOMER computer software is used to simulate several system configurations with various settings for the number of various plant components. The plants used are in the form of PLTS, PLTB, PLTD and storage components in the form of PEHT and Batteries. The simulation results in the HOMER software show 18 optimal configuration scenarios of various power generation systems with a different number of each component, with the most optimal system results having a configuration; Solar power plants with a capacity of 29 MW, 15 units of 1 MW Wind Turbines, 9.5 MW Diesel with 900 storage system components of 22 kW Pumped Hydro Energy Storage. The system is calculated to have an NPC of \$274 Million with an initial capital of \$82.4 Million and a COE of \$0.125. The results of the feasibility analysis reviewed in terms of economy, electricity, and the environment show that this system is worthy of being used as an investment.

Kata Kunci: Renewable Energy, Selayar Island, Energy Potential, Wind Power Plant, Solar Power Plant, Diesel Power Plant, Pumped Hydro Energy Storage, NPC, COE.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Rumusan Masalah.....	3
I.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian.....	3
I.3.1 Tujuan Penelitian	3
I.3.2 Manfaat Penelitian	3
I.4 Ruang Lingkup	4
I.5 Metode Penelitian	4
I.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
II.1 Tinjauan Pustaka.....	5
II.2 Dasar Teori	6
II.2.1 HOMER	6
II.2.2 Sistem Energi Terbarukan Hibrida	6
II.2.3 Sistem Penyimpanan Energi Hidro Terpompa	10
II.2.4 Analisis Ekonomi.....	15
II.2.5 Prediksi Kebutuhan Energi Listrik.....	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
III.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	21
III.2 Alat dan Instrument Penelitian	22
III.3 Prosedur Penelitian	22
III.3.1 Studi Literatur	22
III.3.2 Proyeksi Tingkat Kebutuhan Listrik.....	23
III.3.3 Perancangan Skema Sistem	24
III.3.4 Penginputan Data ke HOMER.....	28
III.3.5 Penentuan Konfigurasi Sistem Pembangkit.....	28
III.4 Diagram Alur Penelitian.....	29
BAB IV HASIL PENELITIAN	30
IV.1 Data Masukan dan Perancangan dalam HOMER.....	30
IV.1.1 Beban Listrik.....	31
IV.1.2 Sumber Energi Surya	34
IV.1.3 Sumber Energi Bayu	35
IV.1.4 Ekonomi.....	36
IV.1.5 Biaya Bahan Bakar Diesel	36
IV.1.6 Umur Proyek.....	36
IV.1.7 PLTS	36
IV.1.8 PLTB.....	37
IV.1.9 PLTD.....	37
IV.1.10 Penyimpanan Energi Hidro Terpompa	38

IV.1.11 Baterai.....	39
IV.1.12 Konverter	40
IV.2 Hasil Komputasi Simulasi HOMER.....	41
IV.2.1 Sistem Pembangkitan Tanpa Penyimpanan Energi	43
IV.2.2 Sistem Pembangkitan dengan Penyimpanan Baterai	49
IV.2.3 Sistem Pembangkitan dengan Penyimpanan Energi Hidro Terpompa ...	58
IV.3 Perbandingan Sistem Dengan PEHT dan Sistem Dengan Baterai	67
IV.3.1 Perbandingan Biaya Investasi	67
IV.3.2 Perbandingan Produksi Listrik Tiap Komponen Sistem.....	69
IV.3.3 Perbandingan Produksi Emisi	78
IV.4 Skema Koordinasi Antar Komponen Sistem.....	79
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	82
V.1 Kesimpulan.....	82
V.2 Saran	83
DAFTAR PUSTAKA	84
Lampiran	1

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Perhitungan untuk mendapatkan Konstanta a dan Koefisien Regresi b Energi Listrik Terjual Kabupaten Kepulauan Selayar.	33
Tabel 2 Data Potensi Energi Surya	35
Tabel 3 Potensi Angin Pulau Selayar	35
Tabel 4 Data Masukan Teknis dan Biaya PLTS	37
Tabel 5 Data Masukan Teknis dan Biaya PLTB	37
Tabel 6 Data Masukan Teknis dan Biaya PLTD	38
Tabel 7 Data Masukan Teknis dan Biaya PEHT	39
Tabel 8 Data Masukan Teknis dan Biaya Baterai	40
Tabel 9 Data Masukan Teknis dan Biaya Konverter	40
Tabel 10 Jenis-Jenis Skenario Sistem yang Digunakan	41
Tabel 11 Ringkasan Hasil Simulasi	42
Tabel 12 Biaya Investasi Sistem Pembangkitan dengan Penyimpanan PEHT	67
Tabel 13 Biaya Investasi Sistem Pembangkitan dengan Penyimpanan Baterai	68
Tabel 14 Biaya Investasi Sistem Pembangkitan PLTD	68
Tabel 15 Ringkasan Perbandingan Harga	69
Tabel 16 Kelistrikan PLTS kedua sistem	70
Tabel 17 Kelistrikan PLTB	71
Tabel 18 Kelistrikan PLTD Pada Kedua Sistem	73
Tabel 19 Kelistrikan Konverter	75
Tabel 20 Kelistrikan Penyimpan Energi	76
Tabel 21 Perbandingan Produksi Emisi	78
Tabel 22 Koordinasi Komponen Pada Kondisi Tertentu	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya Gemasolar, Seville Spanyol	8
Gambar 2 Pembangkit Listrik Tenaga Angin di Denmark	9
Gambar 3 Skema Penyimpanan Energi Hidro Terpompa.....	11
Gambar 4 Kapasitas Penyimpanan Energi Hidro di Eropa.....	12
Gambar 5 Peta Potensi Sumber Energi Kabupaten Kepulauan Selayar (a) Bayu (b) Surya	21
Gambar 6 Skema Aliran Energi Pada Operasi Sistem ; (a). Siang, (b). Malam ...	25
Gambar 7 Ilustrasi PLTS <i>High</i> , PLTB <i>High</i> , PEHT <i>Charge</i> , PLTD <i>Standby</i>	26
Gambar 8 Ilustrasi PLTS <i>Low</i> , PLTB <i>High</i> , PEHT <i>Standby</i> , PLTD <i>Standby</i>	26
Gambar 9 Ilustrasi PLTS <i>Low</i> , PLTB <i>Low</i> , PEHT <i>Discharge</i> , PLTD <i>Standby</i>	27
Gambar 10 Ilustrasi PLTS <i>Low</i> , PLTB <i>Low</i> , PEHT <i>Low</i> , PLTD <i>Run</i>	27
Gambar 11 Diagram Alir Penelitian Gambar.....	29
Gambar 12 <i>Simplified Single Line Diagram</i> PLTD-PLTS Selayar (Sumber: PT. PLN Persero UPDK Tello).....	30
Gambar 13 Skema Rancangan Sistem Pada Aplikasi HOMER.....	31
Gambar 14 Profil Beban Tahunan Kab. Kepulauan Selayar.....	32
Gambar 15 Jendela Perancangan Beban Listrik.....	34
Gambar 16 Potensi Perencanaan Penyimpanan Energi Hidro Terpompa di Kecamatan Bontomanai Kabupaten Kepulauan Selayar.....	38
Gambar 17 Grafik NPC dan Modal Awal Sistem Pembangkitan Tanpa Penyimpanan Energi	43
Gambar 18 (a).NPC, LCOE, OC PLTD, (b). Rincian Pembangkitan Energi Listrik, (c). Emisi PLTD	44
Gambar 19 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik, (d). Emisi PLTD+PLTS.....	45
Gambar 20 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik, (d). Emisi PLTD+PLTS+PLTB.....	47
Gambar 21 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik, (d). Emisi PLTD+PLTB	48
Gambar 22 Grafik NPC dan Modal Awal Sistem Pembangkitan dengan Penyimpanan Baterai	49
Gambar 23 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik, (d). Emisi PLTD+Baterai.....	50
Gambar 24 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik PLTB+Baterai.....	51
Gambar 25 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik PLTS+Baterai	52
Gambar 26 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik, (d). Emisi PLTS+PLTD+Baterai	54
Gambar 27 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik, (d). Emisi PLTD+PLTB+Baterai.....	55
Gambar 28 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik	56

Gambar 29 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik, (d). Emisi PLTD+PLTS+PLTB+Baterai	57
Gambar 30 Grafik NPC dan Modal Awal Sistem Pembangkitan dengan Penyimpanan Energi Hidro Terpompa.....	58
Gambar 31 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik, (d). Emisi PLTD+PEHT	59
Gambar 32 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik PLTB+PEHT	60
Gambar 33 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik PLTS+PEHT.....	61
Gambar 34 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik, (d). Emisi PLTD+PLTS+PEHT.....	63
Gambar 35 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik, (d). Emisi PLTD+PLTB+PEHT	64
Gambar 36 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik PLTS+PLTB+PEHT.....	65
Gambar 37 (a).NPC, LCOE, OC, (b). Rincian NPC, (c). Rincian Pembangkitan Energi Listrik, (d). Emisi PLTD+PLTS+PLTB+PEHT.....	67
Gambar 38 Grafik Perbandingan Aliran Kas Kumulatif Sistem PLH+PEHT dan Sistem PLH+Baterai	68
Gambar 39 Diagram Produksi Listrik Tiap Pembangkit (a) Sistem dengan Baterai (b) Sistem dengan PEHT.....	69
Gambar 40 peta spektrum keluaran daya PLTS (a) pada sistem dengan PEHT (b) pada sistem dengan Baterai.....	71
Gambar 41 peta spektrum keluaran daya PLTB (a) pada sistem dengan PEHT (b) pada sistem dengan Baterai.....	72
Gambar 42 Perbandingan Peta Spektrum PLTD (a) Sistem dengan PEHT (b) Sistem dengan Baterai.....	74
Gambar 43 Perbandingan Keluaran Konverter (a) Sistem dengan PEHT (b) Sistem dengan Baterai.....	76
Gambar 44 Peta Spektrum D perbandingan Status Muatan Penyimpanan (a) Sistem dengan PEHT (b) Sistem dengan Baterai.....	77
Gambar 45 Grafik Plot Kotak Prabandingan Status Muatan Penyimpanan (a) Sistem dengan PEHT (b) Sistem dengan Baterai.....	77
Gambar 46 Grafik Kolom Perbandingan Status Muatan Penyimpanan (a) Sistem dengan PEHT (b) Sistem dengan Baterai.....	78
Gambar 47 Grafik Koordinasi Antar Komponen Sistem Optimal.....	79

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Pada masa perkembangan teknologi yang pesat seperti saat ini, energi listrik menjadi kebutuhan utama bagi kehidupan manusia yang tidak kalah dari sandang, pangan, dan papan. Untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dibutuhkan konversi energi dari bentuk yang tersedia di alam menjadi listrik, dimana penggunaan sumber energi konvensional seperti batubara dan minyak masih tinggi sedangkan cadangan sumber daya yang semakin sedikit.

Dalam pemenuhan kebutuhan listrik di zaman sekarang maka sudah seharusnya peningkatan penggunaan pembangkit listrik energi terbarukan sebagai komitmen kita untuk menjaga ketersediaan energi hingga masa depan. Penggunaan beberapa pembangkit listrik energi terbarukan serta energi konvensional untuk memenuhi kebutuhan energi listrik sering juga dikenal dengan nama Pembangkit Listrik Hibrida (PLH). Keuntungan dari sistem ini adalah sistem yang satu dapat menutupi kekurangan dari sistem lainnya, selain itu memudahkan untuk melakukan perawatan sistem karena pasokan energi listrik dapat tetap terjaga tanpa harus memutus aliran daya (Hariyanto, 2015).

Produksi listrik *on grid* dan *off grid* tahun 2020 di Indonesia mencapai 292,0 TWh yang berasal dari pembangkit PLN dan non-PLN. Sekitar 62,0% produksi listrik berasal dari PLT Batubara, 18,2% EBT, 17,6% gas, dan minyak hanya 2,3% (den.go.id, 2021). dari hasil evaluasi penggunaan energi oleh Dewan Energi Nasional Indonesia menyatakan bahwa penggunaan batubara masih mendominasi di angka 62%, sedangkan dari yang diketahui secara umum bahwa PLTU batubara merupakan penyumbang emisi gas yang dapat menyebabkan pemanasan global. Selain dari emisi gas yang berbahaya yang dihasilkan dari pembangkitan energi listrik, juga berkurangnya sumber daya fosil di bumi telah banyak dikeluhkan dan menjadi komoditas yang makin hari makin mahal. Beberapa institusi perguruan tinggi di seluruh dunia mulai mengembangkan studi dan membahas cara membangkitkan energi listrik tanpa bergantung lagi pada bahan bakar fosil. Hal ini

lah yang memicu perkembangan teknologi pembangkit listrik dengan menggunakan Energi Baru Terbarukan (EBT).

Sementara perkembangan penelitian dalam bidang energi terbarukan mulai berkembang, pulau Selayar yang berada di provinsi Sulawesi Selatan, Indonesia merupakan pulau berpenduduk dengan potensi perkembangan industri, maupun wisata. Namun pulau ini terpisah dari pulau utama dimana terdapat gardu yang menjadi pusat pendistribusian energi listrik, sehingga dalam pemenuhan kebutuhan energi listriknya menjadi kasus yang unik dan memiliki sistem tersendiri. Dalam rangka menjalankan sila ke-lima yaitu “Keadilan sosial bagi seluruh rakyat Indonesia” dan demi mewujudkan visi Indonesia untuk meningkatkan penggunaan energi terbarukan di tahun 2025 yakni 23 % (esdm.go.id, 2023), maka Selayar membutuhkan sistem yang dapat berdiri sendiri menggunakan pembangkit hibrida.

Energi baru terbarukan adalah sumber energi yang tersedia oleh alam dan bisa dimanfaatkan secara terus-menerus. Hal ini senada dengan keterangan International Energy Agency (IEA) yang juga menyatakan bahwa energi terbarukan adalah energi yang berasal dari proses alam yang diisi ulang terus menerus. Penggunaan energi terbarukan merupakan hal yang baik karena sumber energi tidak akan habis dan selalu tersedia di alam, tentu hal ini harus dipikirkan karena bukan hanya generasi kita yang akan menggunakan energi tetapi juga anak cucu kita.

Energi terbarukan hibrida atau dalam istilah Inggris disebut *Hybrid Renewable Energy System (HRES)* dapat terdiri atau tidak terdiri dari sistem tenaga listrik berbahan bakar fosil sebagai sistem yang terhubung dengan gardu atau berdiri sendiri. Sistem penyimpanan atau sistem *backup* adalah salah satu komponen kunci untuk menjalankan sistem yang andal dan berkualitas daya stabil. Sistem penyimpanan dapat dikategorikan seperti berbasis elektrik (kapasitor, ultra-kapasitor, penyimpanan energi magnet superkonduksi) berbasis mekanikal (penyimpanan hidroelektrik terpompa), baterai isi ulang konvensional (baterai *lead-acid*), penyimpanan energi *thermomechanical* (energi matahari) dan penyimpanan energi *thermal* (penyimpanan energi panas latent dan sensible) (Luo, X, 2015).

Sistem penyimpanan energi hidro terpompa (PEHT) dalam studi terbaru merupakan salah satu opsi yang dapat dijadikan pengganti sistem penyimpanan

berbasis baterai, meskipun sistem penyimpanan ini membutuhkan ruang yang lebih luas untuk membangun penampungan, namun keandalan dan pembangunan dapat dibandingkan dengan penggunaan sistem penyimpanan berbasis baterai, bahkan sebuah studi menuliskan bahwa sistem ini akan kembali modal dalam kurun waktu 2,5-5,5 tahun (Connolly D, 2012).

Dewasa ini telah banyak studi perancangan sistem pembangkit dengan menggunakan sumber energi terbarukan baik itu ditinjau dari keandalan, maupun ditinjau dari kelayakan investasi ekonomi teknologi. Dalam perkembangan studinya kemudian ada juga yang fokus pada pengintegrasian dengan sistem penyimpanan energi hidro terpompa. Bahkan beberapa dari sistem telah diterapkan pada proyek nyata.

I.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana merancang integrasi sistem tenaga hibrida bayu dan surya dengan sistem penyimpanan energi hidro terpompa dengan kasus beban sistem tenaga listrik Kabupaten Kepulauan Selayar
2. Bagaimana perhitungan tekno-ekonomi kelayakan investasi, teknis, dan lingkungan rancangan sistem pembangkit hibrida dengan sistem penyimpanan energi hidro terpompa dan baterai

I.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

I.3.1 Tujuan Penelitian

1. Merancang integrasi sistem tenaga hibrida bayu dan surya dengan sistem penyimpanan energi hidro terpompa pada kasus beban sistem tenaga listrik Kabupaten Kepulauan Selayar
2. Mengetahui kelayakan investasi, teknis, dan lingkungan rancangan sistem pembangkit hibrida dengan sistem penyimpanan energi hidro terpompa dan baterai.

I.3.2 Manfaat Penelitian

1. Memberikan pengetahuan cara merancang sistem energi terbarukan yang optimal dan ekonomis

2. Memberikan referensi rancangan sistem pembangkit hibrida dengan sistem penyimpanan energi hidro terpompa dan baterai yang layak investasi.

I.4 Ruang Lingkup

1. Perancangan dengan penggunaan beban bulanan rata-rata.
2. Perancangan hanya pada proses pembangkitan daya listrik.
3. Variabel yang dilihat berupa kelayakan, dan konfigurasi sistem.

I.5 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam pembahasan tugas akhir ini ialah;

1. Metode pengumpulan data
 - a. Metode deskriptif yaitu pengambilan data secara langsung dilapangan.
 - b. Metode diskusi yaitu diskusi dengan pihak praktisi.
2. Metode Analisa data
Yaitu komputasi data yang terkait dengan tujuan penelitian berdasarkan data yang diperoleh menggunakan aplikasi HOMER.
3. Metode studi literatur dan studi Pustaka.
Yaitu mengadakan studi dari buku, internet dan sumber bahan pustaka atau informasi lainnya yang terkait dengan materi yang dibahas dalam tulisan ini.

I.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini terbagi dalam lima bab dengan harapan maksud dan tujuan dari penulisan ini dapat terangkum seluruhnya. Pembagian bab tersebut adalah sebagai berikut:

- BAB I Berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penulisan, Batasan masalah, metode penulisan dan sistematika penulisan.
- BAB II Berisi landasan teori, mencakup teori- teori yang berkaitan dengan operasi ekonomis pembangkit tenaga listrik.
- BAB III Berisi teori pendukung dan metode analisis.
- BAB IV Berisi pemaparan data yang diperoleh serta pembahasan
- BAB V Berisi kesimpulan dan saran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian ini penulis susun setelah membaca berbagai penelitian terkini terkait perkembangan dan pengembangan sistem pembangkit hibrida baik nasional maupun internasional. Berikut penelitian-penelitiannya:

Penelitian yang dilakukan oleh Solomon Ekoh et. al, pada tahun 2016, membahas tentang optimasi pembangkit listrik hibrida (PLH) (dalam hal ini bayu dan surya), dan diintegrasikan dengan penyimpanan energi hidro terpompa dengan melakukan perhitungan berdasarkan jumlah daya yang dibangkitkan dengan sistem tersebut dalam pemenuhannya terhadap kebutuhan energi. Pada kesimpulannya kemudian ia membahas energi listrik dapat dibangkitkan dengan sistem ini dan memenuhi kebutuhan energi, serta tambahannya sistem pembangkit energi hibrida terbarukan butuh dirancang dan dioptimalisasikan dengan memperhatikan komponen-komponen sistem untuk menjamin kualitas daya, keandalan sistem, dan efektifitas harga. Pada penelitian ini membahas dan memperkenalkan algoritma pengoptimalan Penyimpanan Energi Hidro Terpompa (PEHT).

Penelitian yang berbeda oleh Heetae Kim et. al, pada tahun 2014 mensimulasikan beberapa konfigurasi sistem dengan komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), dan baterai dan mendapati sistem pembangkit hibrida *on grid* dan *off grid* yang optimal. Pada penelitiannya ia menggunakan aplikasi komputasi HOMER yang dirancang untuk menganalisa emisi dan kelayakan investasi sistem. Diasumsikan bahwa aplikasi ini dapat digunakan oleh pemerintah maupun instansi pembuat kebijakan sebelum memasuki bisnis energi terbarukan.

Penelitian juga berkembang pemodelan penyimpanan energi hidro terpompa dengan menggunakan aplikasi HOMER oleh Fausto A. Canales dan Alexandre Beluco pada tahun 2014, ia mengkombinasikan pembangkit tenaga bayu yang dihubungkan dengan baterai (ekivalen PEHT) serta converter sebagai pelengkap

sistem. Hal ini menunjukkan bahwa analisa ekonomi HOMER dengan komponen sistem PEHT adalah mungkin.

Berdasarkan tiga penelitian tersebut di atas, maka gagasan timbul untuk membahas bagaimana menghitung kelayakan investasi sistem PLH yang terhubung dengan sistem PEHT dengan menggunakan aplikasi HOMER serta bagaimana gabungan sistem tersebut dapat memenuhi kebutuhan energi di pulau selayar demi meningkatkan penggunaan energi terbarukan sekaligus mengurangi penggunaan energi fosil.

II.2 Dasar Teori

II.2.1 HOMER

Hybrid Optimization Model For Electric Renewables atau yang lebih dikenal dengan nama HOMER dikembangkan oleh *National Renewable Energy Laboratory* (NRELL) Amerika Serikat yang bertujuan untuk membantu perancangan optimasi sistem pembangkit listrik khususnya pembangkit listrik hibrida, HOMER dapat menghitung ukuran/kapasitas sistem, *lifecycle cost*, dan emisi rumah kaca.

Dalam pensimulasian HOMER kita mampu melihat kronologis rinci dan optimasi dalam suatu model relatif sederhana dan mudah digunakan. Hal ini disesuaikan dengan berbagai macam proyek. Dalam merancang sistem energi listrik menggunakan HOMER terdapat dua faktor yang berpengaruh yakni bagian teknis dan ekonomis dalam proyek yang akan dirancang. Dalam sistem yang lebih besar HOMER dapat memberikan gambaran penting yang membandingkan biaya dan kelayakan konfigurasi berbeda, perancang sistem dapat menggunakan perangkat lunak yang lebih khusus untuk model kinerja teknis.

II.2.2 Sistem Energi Terbarukan Hibrida

1. Tenaga Surya

Dalam buku *Hybrid Energy System* Awalnya, tenaga fotovoltaik hanya digunakan untuk operasi skala kecil hingga menengah, mulai dari perangkat bertenaga surya (seperti kalkulator) hingga rangkaian rumah tangga. Namun, sejak 1980-an, pembangkit listrik tenaga surya terkonsentrasi komersial telah menjadi jauh lebih

umum. Tidak hanya mereka sumber yang relatif murah energi di mana daya jaringan tidak nyaman, terlalu mahal, atau sekadar tidak tersedia; peningkatan efisiensi sel surya dan penurunan harga membuat tenaga surya bersaing dengan sumber tenaga konvensional (yaitu, bahan bakar fosil dan batu bara).

Saat ini, tenaga surya juga semakin banyak digunakan dalam situasi yang terhubung dengan jaringan cara untuk memasukkan energi rendah karbon ke dalam jaringan. Pada tahun 2050, Energi Internasional Agency mengantisipasi bahwa tenaga surya—termasuk operasi STE dan PV—akan menguasai lebih dari 25% pasar, menjadikannya sumber listrik terbesar di dunia (dengan sebagian besar instalasi dikerahkan di Cina dan India).

Sel surya mengubah sinar matahari langsung menjadi listrik. Sel surya sering digunakan untuk kalkulator daya dan jam tangan. Mereka terbuat dari bahan semikonduktor yang serupa dengan yang digunakan dalam chip komputer. Ketika sinar matahari diserap oleh bahan-bahan ini, energi matahari mengetuk elektron lepas dari atom mereka, memungkinkan elektron mengalir melalui bahan untuk menghasilkan listrik. Proses mengubah cahaya (photon) menjadi listrik (tegangan) ini disebut efek fotovoltaiik (PV).

Sel surya biasanya digabungkan menjadi modul yang menampung sekitar 40 sel; sejumlah modul ini dipasang di susunan PV yang dapat berukuran hingga beberapa meter di satu sisi. Larik PV pelat datar ini dapat dipasang pada sudut tetap menghadap ke selatan, atau dapat dipasang pada alat pelacak yang mengikuti matahari, memungkinkannya menangkap sinar matahari paling banyak sepanjang hari. Beberapa array PV yang terhubung bisa memberikan daya yang cukup untuk rumah tangga; untuk utilitas listrik besar atau aplikasi industri, ratusan susunan dapat saling berhubungan untuk membentuk satu sistem PV besar (Zohuri, 2018).

Sel surya film tipis menggunakan lapisan bahan semikonduktor yang tebalnya hanya beberapa mikrometer. Teknologi film tipis telah memungkinkan sel surya sekarang berfungsi ganda sebagai sirap atap, genteng, fasad bangunan, atau kaca untuk skylight atau atrium. Versi sel surya dari barang-barang seperti sirap menawarkan perlindungan dan daya tahan yang sama seperti sirap aspal biasa.



Gambar 1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya Gemasolar, Seville Spanyol
(Sumber: universetoday.com)

Beberapa sel surya dirancang untuk beroperasi dengan sinar matahari terkonsentrasi. Sel-sel ini dibangun menjadi pengumpul pemusatan yang menggunakan lensa untuk memfokuskan sinar matahari ke sel. Pendekatan ini memiliki kelebihan dan kekurangan dibandingkan dengan array PV pelat datar. Ide utamanya adalah menggunakan sangat sedikit material PV semikonduktor yang mahal sambil mengumpulkan sinar matahari sebanyak mungkin. Tetapi karena lensa harus diarahkan ke matahari, penggunaan kolektor pemusatan terbatas pada bagian negara yang paling cerah. Beberapa pengumpul konsentrasi dirancang untuk dipasang pada alat pelacak sederhana, tetapi sebagian besar membutuhkan alat pelacak canggih, yang selanjutnya membatasi penggunaannya untuk utilitas listrik, industri, dan bangunan besar.

Kinerja sel surya diukur dari segi efisiensinya dalam mengubah sinar matahari menjadi listrik. Hanya sinar matahari dengan energi tertentu yang akan bekerja secara efisien untuk menghasilkan listrik, dan sebagian besar dipantulkan atau diserap oleh bahan penyusun sel. Karena itu, sel surya komersial tipikal memiliki efisiensi 15%—sekitar seperenam dari sinar matahari yang menerpa sel menghasilkan listrik. Efisiensi rendah berarti bahwa array yang lebih besar diperlukan, dan itu berarti biaya yang lebih tinggi. Meningkatkan efisiensi sel surya

sambil menekan biaya per sel merupakan tujuan penting dari industri PV, peneliti NREL, dan laboratorium Departemen Energi AS (DOE) lainnya, dan mereka telah membuat kemajuan yang signifikan. Sel surya pertama yang dibuat pada tahun 1950-an memiliki efisiensi kurang dari 4% (universetoday.com,2023).

2. Tenaga Bayu

Zohuri pada bukunya Tenaga Bayu telah digunakan selama ribuan tahun untuk mendorong layar, menggerakkan kincir angin, atau menghasilkan tekanan untuk pompa air. Memanfaatkan angin untuk menghasilkan listrik telah menjadi subjek penelitian sejak akhir abad ke-19. Namun, hanya dengan upaya besar untuk menemukan sumber tenaga alternatif di abad ke-20, tenaga angin telah menjadi titik fokus penelitian dan pengembangan yang cukup besar.

Tenaga angin adalah konversi energi angin oleh turbin angin menjadi bentuk yang berguna, seperti listrik atau energi mekanik. Ladang angin skala besar biasanya terhubung ke jaringan transmisi listrik lokal dengan turbin kecil yang digunakan untuk menyediakan listrik ke daerah terpencil.

Dibandingkan dengan bentuk energi terbarukan lainnya, tenaga angin dianggap sangat andal dan stabil, karena angin konsisten dari tahun ke tahun dan tidak berkurang selama permintaan jam sibuk. Awalnya, pembangunan ladang angin adalah usaha yang mahal. Namun berkat perbaikan baru-baru ini, tenaga angin telah mulai menetapkan harga puncak di pasar energi grosir di seluruh dunia dan memotong pendapatan dan laba perusahaan industri bahan bakar fosil. Di Denmark, misalnya, tenaga angin menyumbang 28% dari produksi listrik negara tersebut dan sekarang lebih murah daripada tenaga batu bara (Zohuri, 2018).



Gambar 2 Pembangkit Listrik Tenaga Angin di Denmark
(Sumber: Zohuri, 2018)

Menurut sebuah laporan yang dikeluarkan Maret lalu oleh Departemen Energi, pertumbuhan tenaga angin di Amerika Serikat dapat menghasilkan pekerjaan yang lebih terampil dalam banyak kategori. Berjudul “Wind Vision: A New Era for Wind Power in the United States,” dokumen tersebut menunjukkan bahwa pada tahun 2050, industri ini dapat mencapai 35% dari produksi listrik AS. Selain itu, tahun lalu, Global Wind Energy Council dan Greenpeace International bersama-sama menerbitkan sebuah laporan berjudul “Global Wind Energy Outlook 2014.” Laporan ini menyatakan bahwa di seluruh dunia, tenaga angin dapat menyediakan sebanyak 25–30% listrik global pada tahun 2050. Pada saat penulisan laporan, komersial instalasi di lebih dari 90 negara memiliki total kapasitas 318 gigawatt (GW), menyediakan sekitar 3% dari pasokan global.

II.2.3 Sistem Penyimpanan Energi Hidro Terpompa

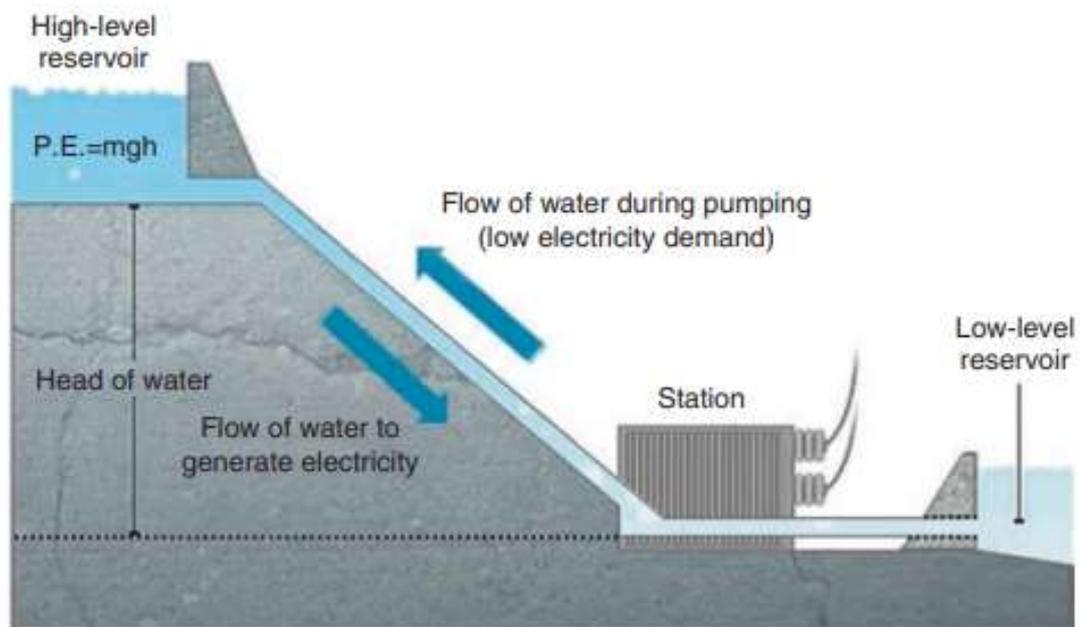
Dilansir dari pengertian yang dikeluarkan pada bukunya, Pembangkit listrik tenaga air, menggunakan energi potensial sungai, sejauh ini merupakan cara terbaik untuk menghasilkan listrik dari sumber terbarukan. Mungkin juga berskala besar—sembilan dari sepuluh pembangkit listrik terbesar di dunia adalah pembangkit listrik tenaga air, menggunakan bendungan di sungai. Three Gorges China memimpin dengan 22,5 GWe, kemudian Itaipu di Brasil dengan 14 GWe, dan Xiluodu di China, 13,9 GWe. Berbeda dengan pembangkit angin dan matahari, pembangkit listrik tenaga air memiliki inersia mekanis yang cukup besar dan sinkron, membantu stabilitas jaringan (Zohuri, 2018).

Pembangkit listrik tenaga air menggunakan waduk penyimpanan besar di sungai bukanlah pilihan utama untuk masa depan di negara-negara maju karena sebagian besar lokasi utama di negara-negara ini yang memiliki potensi untuk memanfaatkan gravitasi, dengan cara ini sudah dieksploitasi atau tidak tersedia karena alasan lain seperti pertimbangan lingkungan.

Keuntungan utama sistem hidro adalah kapasitasnya untuk menangani beban puncak musiman (serta harian). Dalam prakteknya pemanfaatan air simpanan terkadang diperumit oleh kebutuhan irigasi yang mungkin terjadi di luar fase dengan kebutuhan listrik puncak.

Sebagai bagian dari *pumped-storage hydroelectricity* (PSH), pembangkit listrik tenaga air yang dipompa, sejauh ini, dianggap sebagai satu-satunya cara yang mungkin untuk menyimpan energi dalam jumlah besar dengan tetap mempertahankan efisiensi tinggi dan juga ekonomis serta memiliki sekitar 98% pangsa pasar. total penyimpanan global dominan di jaringan saat ini. Pembangkit pertama jenis ini dibangun di Swiss dan Italia pada tahun 1890-an, membuat konsepnya lebih dari seratus tahun (Zohuri, 2018).

Secara konseptual, ketika benda diangkat dengan massa tertentu, maka gaya gravitasi dikurangi gaya angkat. Untuk melakukannya, gaya di atas ketinggian dibutuhkan. Gaya yang diperlukan untuk mengangkat ditentukan oleh hukum fisika $F=m*a$ (m untuk massa dan a untuk percepatan), tetapi dalam kasus ini a diganti dengan percepatan gravitasi g (9,81 meter per detik persegi [m/s^2]). Usaha, yang berarti energi yang disediakan dan karena itu disimpan dalam objek didefinisikan oleh $W=F*d$ (dalam contoh ini istilah d untuk jarak dapat diganti dengan tinggi). Ini menghasilkan $W=m*g*h$, artinya energi yang tersimpan sama dengan massa dikalikan dengan gravitasi dan ketinggian (Gbr. 3) (Zohuri, 2018).



Gambar 3 Skema Penyimpanan Energi Hidro Terpompa
(Sumber: Zohuri, 2018)

Pembangkit PSH (*Pumped Hydro Storage*) mempraktikkan matematika ini. Pada dasarnya, sistem tersebut berisi dua reservoir air pada ketinggian yang

berbeda. Pada saat permintaan listrik rendah dan produksi tinggi, air dipompa dari reservoir yang lebih rendah ke reservoir yang lebih tinggi, menyimpan listrik di dalam air dalam bentuk energi potensial. Saat dibutuhkan, misalnya pada saat puncak permintaan, air dapat dikeluarkan, mengalir kembali melalui pipa-pipa dan kembali melalui turbin yang kemudian menghasilkan listrik. Rumus umum untuk output daya adalah $P=Q \cdot h \cdot \eta \cdot g \cdot \rho$, termasuk faktor laju aliran volume yang melewati turbin (Q) dan efisiensi hidrolik turbin (dan densitas air ρ) (Zohuri, 2018).

Bergantung pada perbedaan ketinggian, roda Pelton dan turbin Kaplan atau Francis digunakan untuk memaksimalkan efisiensi, masing-masing mencapai sekitar 90%. Turbin ini bersifat reversibel dan, oleh karena itu, mampu menangani proses pemompaan dan pembangkitan. Kapasitas untuk PSH tergantung pada lokasi dan skala reservoir serta perbedaan ketinggian dan dapat mencapai dari beberapa MWh hingga beberapa GWh.



Gambar 4 Kapasitas Penyimpanan Energi Hidro di Eropa
(Sumber: Zohuri, 2018)

Beberapa teknologi menyediakan penyimpanan energi jangka pendek, sementara yang lain dapat bertahan lebih lama.

Sebuah jam *wind-up* menyimpan energi potensial (dalam hal ini mekanis, dalam tegangan pegas), baterai yang dapat diisi ulang menyimpan energi kimia yang siap dikonversi untuk mengoperasikan ponsel, dan bendungan pembangkit listrik tenaga air menyimpan energi dalam reservoir sebagai potensial gravitasi. energi. Bahan bakar fosil seperti batu bara dan bensin menyimpan energi kuno yang berasal dari sinar matahari oleh organisme yang kemudian mati, terkubur, dan lama kelamaan diubah menjadi bahan bakar ini. Makanan (yang dibuat dengan proses yang sama seperti bahan bakar fosil) adalah bentuk energi yang disimpan dalam bentuk kimia (Zohuri, 2018).

1. Pemodelan

Konsep dan persamaan Dalam penelitian Canales, F.A dan Beluco, A (2014), mengikuti saran yang dibuat oleh HOMER Energy (2010), hidro yang dipompa dimodelkan sebagai mekanisme penyimpanan listrik dengan kapasitas tertentu dan efisiensi perjalanan bolak-balik tertentu. Bagian ini akan menjelaskan metode dan pertimbangan yang digunakan dalam pembuatan baterai yang setara dengan pembangkit listrik tenaga air yang dipompa. Beberapa definisi dan persamaan dasar diberikan selanjutnya untuk memungkinkan pemahaman yang lebih baik tentang hubungan yang dibangun antara baterai dan pembangkit listrik tenaga air yang dipompa. Dalam Fisika, daya didefinisikan sebagai laju melakukan pekerjaan, atau sebagai laju transfer energi. Rizzoni (2009) menjelaskan bahwa daya listrik P yang dihasilkan oleh elemen aktif, atau yang dihamburkan atau disimpan oleh elemen pasif, sama dengan hasil kali tegangan V melintasi elemen dan arus I yang mengalir melaluinya. Mudah dibuktikan bahwa satuan tegangan (J/C, atau volt V) dikali arus (C/s, atau Ampere A) sebenarnya adalah satuan daya (J/s, atau watt W). Properti ini sangat penting untuk representasi hidro yang dipompa sebagai baterai yang setara, di mana tegangan dianggap tetap dan daya yang dikirim berbanding lurus dengan arus. Persamaannya adalah:

$$P = V \cdot I \tag{1}$$

Untuk pembangkit listrik tenaga air, Loucks dan Van Beek (2005) menjelaskan bahwa satu meter kubik air, dengan berat 103 kg, jatuh pada jarak 1

m, memperoleh energi kinetik sebesar 9810 J (N m). Energi yang dihasilkan dalam 1 detik sama dengan watt daya P yang dihasilkan. Oleh karena itu, aliran rata-rata Q (m³ / s) jatuh ketinggian H (m) dan dipengaruhi oleh efisiensi dalam konversi g, gabungkan dalam persamaan berikut untuk menghitung hasil dalam kilowatt daya:

$$P = 9,81 \cdot \eta \cdot Q \cdot H \quad (2)$$

Mengalikan P dengan jumlah jam dalam periode t menghasilkan kilowatt-jam (kWh) energi yang dihasilkan dari laju aliran rata-rata Q, oleh karena itu

$$E = P \cdot t \quad (3)$$

Kapasitas baterai CB biasanya ditentukan dalam satuan Ampere-jam (Ah). Misalnya, baterai dengan daya 100 Ah harus mampu memasok 100 A selama 1 jam, 50 A selama 2 jam, 25 A selama 4 jam, 1 A selama 100 jam, atau kombinasi lainnya yang menghasilkan produk 100 Ah. Dalam praktiknya, hal ini tidak terjadi karena, antara lain, semakin cepat daya baterai habis, semakin banyak energi yang hilang melalui resistansi internal. Fakta bahwa kapasitas pembangkit listrik tenaga air tidak terlalu terpengaruh oleh keluarannya adalah alasan utama yang membenarkan pembuatan baterai yang setara untuk memodelkan hidro terpompa, alih-alih menggunakan salah satu model baterai yang disertakan dengan perangkat lunak HOMER. Alasan bagus lainnya adalah membuat baterai memungkinkan pengguna untuk menentukan kapasitas tinggi, yang nyaman, bersama dengan voltase tertentu, sehingga hanya satu baterai yang cukup untuk memodelkan sistem hidro yang dipompa, atau mempertimbangkan lebih dari satu dalam desain. fase, untuk memeriksa pengaruh ukuran reservoir yang berbeda. Dengan memeriksa unit Persamaan. (1) dan (3), dapat diamati bahwa, untuk baterai, dengan voltase tetap V, dan kapasitas CB (dalam Ah) terlepas dari arus luahannya, total energi E_s yang tersimpan (dalam kWh) dapat didefinisikan dengan persamaan berikut :

$$E_s = V \cdot C_B / 1000 \quad (4)$$

Demikian pula, dan mengabaikan arus masuk dan kerugian karena penguapan, penarikan atau infiltrasi selama periode pembangkitan, total energi E_s yang tersimpan (dalam kWh) di pembangkit listrik tenaga air dapat dijelaskan oleh volume efektif reservoir (dalam m³) dan daya rata-rata P (kW) dihasilkan selama jam yang dibutuhkan untuk mengosongkan reservoir dengan laju aliran rata-rata Q (m³/s). Untuk melakukan ini, ekspresi berikut dapat digunakan:

$$E_s = (Vol \cdot P(Q)) / (Q \cdot 3600) \quad (5)$$

Dalam persamaan di atas $P(Q)$ berarti bahwa daya rata-rata P adalah fungsi dari laju aliran rata-rata Q , atau menggabungkan Persamaan. (2) dan (5),

$$E_s = 9,81 \cdot \eta \cdot H \cdot Vol / 3600 \quad (6)$$

II.2.4 Analisis Ekonomi

Dalam melakukan analisis ekonomi terhadap sistem PLTS terdapat beberapa indikator yang sering digunakan, yaitu *Life Cycle Cost*, *Pay Back Periode*, *Net Present Value*, *Internal Rate of Return*, *Cost of Energy*, dan *Benefit Cost Ratio*.

1. Life Cycle Cost

Life Cycle Cost (LCC) sistem PLTS dihitung dari penjumlahan antara biaya investasi awal dan biaya *present value* operasional dan *maintenance* (O&M). Perhitungan besar O&M sistem PLTS per tahun sebesar 1-2 % dari total biaya investasi awal dari sistem PLTS. Setelah mempertimbangkan kondisi iklim dan cuaca di lokasi pemasangan sistem PLTS, maka besar O&M per tahun ditentukan 1% dari total biaya investasi awal dari sistem PLTS. Berikut rumus yang digunakan untuk menghitung nilai LCC panel surya (Yonata, 2018).

$$LCC = S + O\&M_p \quad (1)$$

$$O\&M_p = O\&M \times \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (2)$$

di mana,

S : investasi awal

$O\&M_p$: biaya *present value* O&M

$O\&M$: biaya O&M per tahun

i : tingkat bunga Bank

n : lama proyek

2. Cost of Energy

Cost of Energy dari suatu sistem PLTS adalah hasil bagi antara penjumlahan O&M dengan biaya Investasi Awal yang telah dikalikan dengan faktor pemulian modalnya dan total energi yang dihasilkan per tahun. Berikut persamaan dalam menentukan nilai CoE (Yonata, 2018).

$$COE = \frac{S \times CRF + O\&M}{A \text{ kWh}} \quad (3)$$

$$\text{CRF} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4)$$

di mana,

CRF : *Cost Recovery Factor*

i : tingkat bunga Bank

n : lama proyek

3. *Payback Periode*

Payback periode adalah waktu yang dibutuhkan agar investasi yang telah dikeluarkan kembali kepada investor. Perhitungan *payback periode* dilakukan untuk mengetahui risiko keuangan terhadap proyek yang akan dilakukan. Nilai *payback periode* yang semakin kecil akan semakin baik, dengan faktor risiko terhadap pengembalian modal akan semakin cepat dalam waktu yang cepat. Dalam menghitung *payback periode* biasa disebut metode *payback* dengan membagi modal awal yang dikeluarkan dengan pendapatan yang diterima oleh pemodal selama satu tahun. Penggunaan *payback period* dalam menghitung efektivitas investasi tetap memiliki batasan. *Payback periode* tidak menghitung keuntungan yang didapatkan setelah *payback periode* serta memiliki keterbatasan dalam membandingkan dua proyek (Yonata, 2018).

4. *Net Present Value*

Net Present Value atau NPV digunakan untuk menganalisis keuntungan dari investasi atau proyek, formula yang digunakan sensitif terhadap perubahan nilai mata uang atau barang. NPV membandingkan nilai uang yang diterima hari ini dan nilai uang pada masa mendatang dengan memasukkan variabel inflasi dan laju pengembalian. NPV didasarkan pada teknik *discounted cash flow* (DCF) dengan 3 langkah dasar, yaitu menemukan *present value* dari setiap arus uang, termasuk didalamnya adalah pemasukan, pengeluaran, dan diskon harga proyek (Yonata, 2018).

NPV adalah perbandingan antara nilai investasi pasar dan biaya itu sendiri. Jika nilai NPV adalah negatif, maka proyek tidak direkomendasikan untuk dilaksanakan, jika nilainya positif, maka proyek layak untuk dilaksanakan. Nilai

NPV bernilai nol berarti tidak ada perbedaan apabila proyek tetap dilaksanakan atau ditolak. Rumus untuk menentukan NPV adalah sebagai berikut. (Yonata, 2018);

$$\text{NPV} = -S + \sum_{t=1}^n \frac{\text{NCF}_t}{(1+i)^t} \quad (5)$$

di mana,

i : tingkat bunga Bank

n : masa kerja modul PV (tahun)

t : tahun yang akan dihitung (tahun)

S : investasi awal

NCF : pendapatan bersih hingga tahun ke-n

5. *Benefit Cost Ratio*

Benefit Cost Ratio (BCR) adalah nilai persen uang yang diperoleh dari suatu pembangkit setelah dibandingkan dengan biaya investasi pembangunan pembangkit dan biaya *operation and maintenance*. Berikut pengertian nilai yang diperoleh dari perhitungan BCR (Yonata, 2018):

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

Jika nilai BCR yang diperoleh 0,5 maka dapat disimpulkan nilai payback periode yang diperoleh hanya sebesar 50% dari total investasi. Namun jika nilai BCR yang diperoleh 1,5 maka penghematan melebihi biaya investasi sebesar 50%. Berikut rumus BCR (Yonata, 2018).

$$\text{BCR} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{\text{NCF}_t}{(1+i)^t}}{S} \quad (6)$$

dimana :

BCR : *Benefit Cost Ratio*

- NCF_t : *Net Cash Flow* pada tahun ke- t
 t : tahun
 S : biaya investasi awal
 n : total tahun
 i : tingkat bunga bank

6. *Internal Rate of Return*

IRR adalah nilai tingkat bunga yang menjadi titik keseimbangan antara keseluruhan pengeluaran dan pemasukan. Dengan kata lain, tingkat suku bunga di mana perolehan nilai NPV sama dengan 0 disebut IRR. Metode perhitungan IRR menggunakan investasi dengan menghitung tingkat bunga yang menyamakan nilai sekarang dari penerimaan yang diterima dengan nilai sekarang dari pengeluaran untuk investasi. Rumus untuk menghitung IRR adalah sebagai berikut (Yonata, 2018).

$$IRR = i_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2}(i_2 - i_1) \quad (7)$$

di mana,

NPV1 : NPV ketika i_1

NPV2 : NPV ketika i_2

i_1 : *discount rate* rendah

i_2 : *discount rate* tinggi

II.2.5 *Prediksi Kebutuhan Energi Listrik*

Prediksi pada dasarnya merupakan dugaan mengenai kejadian yang akan terjadi di masa yang akan datang. Prediksi dapat berupa hal kualitatif (tidak berkaitan dengan angka) maupun kuantitatif (terkait angka). Prediksi yang bersifat kualitatif sulit dilakukan karena berkaitan dengan banyak parameter yang saling berkaitan satu sama lain, hal ini sangat dipengaruhi oleh wawasan suatu subjek. Sementara itu prediksi yang bersifat kuantitatif dapat dilakukan dengan beberapa parameter yang jelas. Prediksi bersifat penting karena berfungsi untuk melaksanakan suatu perencanaan dalam pemenuhan kebutuhan (demand) yang berkaitan dengan persoalan, “apa yang dibutuhkan”, “kapan dibutuhkan”, “berapa banyak dibutuhkan”, sehingga prediksi ini bersifat kuantitatif.

1. Metode Prediksi Regresi

Metode prediksi regresi terbagi menjadi dua yaitu metode prediksi regresi linear dan non-linear (Makridakis, 1989). Regresi linier merupakan bentuk hubungan di mana variabel bebas X maupun variabel tergantung Y sebagai faktor yang berpangkat satu. Regresi linier ini dibedakan menjadi :

- a. Regresi Linier sederhana dengan bentuk fungsi :

$$Y = a + bX \quad (13)$$

- b. Regresi Linier Berganda dengan bentuk fungsi :

$$Y = b_0 + b_1X_1 + \dots + b_nX_n \quad (14)$$

Dari kedua fungsi diatas masing masing berbentuk garis lurus (linier).

2. Metode Prediksi Regresi Non Linier

Metode prediksi regresi non linier ialah bentuk dan hubungan fungsi dimana variable bebas X dan atau variable tetap Y dapat berfungsi sebagai faktor atau variable dengan pangkat tertentu. Variabel X dan Y dapat berfungsi sebagai penyebut (fungsi Pecahan), maupun dapat berfungsi sebagai pangkat fungsi eksponen. Regresi non linier dibedakan menjadi :

- a. Regresi Polinomial,
- b. Regresi Hiperbola (fungsi resiprokal),
- c. Regresi Eksponensial,
- d. Regresi Logaritmik,
- e. Regresi Fungsi Geometri.

3. Jangka Waktu Prediksi

Prediksi kebutuhan energi listrik dapat dikelompokkan menurut jangka waktunya menjadi tiga kelompok (Gonen, 1986), yaitu:

- a. Prediksi jangka panjang

Prediksi jangka panjang merupakan prediksi untuk jangka waktu diatas satu tahun. Dalam prediksi jangka panjang masalah-maslah makro ekonomi (Pendapatan Domestik Regional Bruto atau PDRB) merupakan masalah ekstern perusahaan listrik merupakan faktor utama yang menentukan arah prediksi kebutuhan energi.

b. Prediksi jangka menengah

Prediksi jangka menengah merupakan prediksi untuk jangka waktu dari satu bulan sampai dengan satu tahun. Dalam prediksi beban jangka menengah faktor-faktor manajerial perusahaan merupakan faktor utama yang menentukan. Masalah-masalah manajerial misalnya kemampuan teknis memperluas jaringan distribusi, kemampuan teknis menyelesaikan proyek pembangkit listrik baru serta juga kemampuan teknis menyelesaikan proyek saluran transmisi.

c. Prediksi jangka pendek

Prediksi jangka pendek adalah prediksi untuk jangka waktu beberapa jam sampai satu minggu ($7 \times 24 \text{ jam} = 168 \text{ jam}$).