

ANALISIS TEKNIS DAN KELAYAKAN EKONOMI SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PLTB TURBIN TULIP DAN PLTS MENGGUNAKAN SIMULASI HOMER PRO

I M Dwijaksana¹, I W Sukerayasa², I G N Janardana³, C G I Partha⁴, P A Mertasana⁵, A A G M Pemayun⁶

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

²³⁴⁵⁶Dosen Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

Jl. Raya Kampus Unud Jimbaran, Kecamatan Kuta Selatan, Kabupaten Badung, Bali-80361

made.dwijaksana017@student.unud.ac.id¹, sukerayasa@unud.ac.id², janardana@unud.ac.id³, cokindra@unud.ac.id⁴, mertasana@unud.ac.id⁵, maharta.pemayun@unud.ac.id⁶

ABSTRAK

Turbin angin horizontal pada sistem *smart microgrid* di Gedung DH, Fakultas Teknik Universitas Udayana tidak beroperasi optimal akibat kerusakan bilah. Penelitian ini bertujuan mengkaji penggantian turbin angin horizontal dengan turbin tulip serta menganalisis kelayakan ekonominya. Simulasi dan optimasi dilakukan menggunakan perangkat lunak HOMER Pro dengan mempertimbangkan potensi energi angin dan energi surya setempat. Hasil simulasi menunjukkan produksi energi tahunan 103.205 kWh, dengan kontribusi PLTS 61,5% dan PLTB 38,5%. Secara ekonomi, diperoleh *Net Present Cost* (NPC) Rp 1.668.925.000, *Levelized Cost of Energy* (LCoE) Rp 4.368,36/kWh, dan *Payback Period* 16 tahun 8 bulan. Analisis kelayakan menghasilkan *Net Present Value* (NPV) – Rp 308.312.810,02, dan *Profitability Index* (PI) 0,7635. Dari hasil tersebut menunjukkan proyek ini belum layak secara finansial pada tarif PLN Rp 1.699,53/kWh dan tingkat diskonto 8,5%.

Kata kunci : Energi Terbarukan, PLTS, PLTB turbin tulip, HOMER Pro, kelayakan ekonomi

ABSTRACT

The horizontal axis wind turbine in the smart microgrid system at DH Building, Faculty of Engineering, Udayana University, is not operating optimally due to blade damage. This study aims to evaluate the replacement of the horizontal wind turbine with a tulip-type wind turbine and to analyze its economic feasibility. Simulation and optimization were carried out using HOMER Pro software, considering the local wind and solar energy potential. The simulation results indicate an annual energy production of 103,205 kWh, with contributions from the PV system at 61.5% and the wind turbine at 38.5%. From an economic perspective, the project yields a Net Present Cost (NPC) of Rp 1,668,925,000, a Levelized Cost of Energy (LCoE) of Rp 4,368.36/kWh, and a Payback Period of 16 years and 8 months. The feasibility analysis results in a Net Present Value (NPV) of –Rp 308,312,810.02 and a Profitability Index (PI) of 0.7635. These findings demonstrate that the project is not financially feasible under the PLN tariff of Rp 1,699.53/kWh and a discount rate of 8.5%.

Key Words : Renewable Energy, Solar Photovoltaic, Tulip Wind Turbine, HOMER Pro, Economic Feasibility

1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan utama dalam kehidupan modern yang terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk, perkembangan teknologi, serta peningkatan aktivitas industri dan bangunan komersial. Pemerintah Indonesia menargetkan peningkatan bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) sebesar 23% pada tahun

2025 dan 29,7% pada tahun 2034 dalam skenario RE Base sebagai bagian dari strategi transisi energi nasional [1]. Namun, hingga kini pasokan listrik nasional masih bergantung pada pembangkit berbahan bakar fosil yang menjadi sumber utama emisi gas rumah kaca (GRK), berkontribusi terhadap pemanasan global, serta

berdampak pada perubahan iklim dan kerusakan lingkungan [2].

Indonesia, sebagai negara tropis yang berada di kawasan khatulistiwa, memiliki potensi energi terbarukan yang sangat melimpah. Energi surya diperkirakan memiliki potensi hingga 207,8 GWp, dan energi angin juga menunjukkan potensi tinggi terutama di wilayah pesisir dan kawasan urban. Namun demikian, pemanfaatannya masih belum optimal. Pemerintah Provinsi Bali melalui Peraturan Gubernur Nomor 45 Tahun 2019 juga telah mendorong pemanfaatan energi surya dengan mewajibkan pemasangan PLTS atap minimal 20% dari kapasitas listrik terpasang di berbagai jenis bangunan [3].

Gedung DH Teknik Elektro Universitas Udayana telah dilengkapi PLTS dan PLTB sumbu horizontal, namun PLTB eksisting mengalami kerusakan seperti baling-baling tidak lengkap dan kinerja tidak optimal, sehingga kontribusi energi angin menurun. Oleh karena itu, dirancang sistem dengan mengganti turbin horizontal menjadi turbin tulip BGROSE-1000 tipe VAWT, yang mampu menangkap angin dari berbagai arah dan beroperasi pada kecepatan rendah[4].

Sistem *hybrid* PLTB dan PLTS yang dirancang bertujuan untuk mengoptimalkan potensi energi surya dan angin di lingkungan kampus. Sistem ini dirancang untuk mendukung tercapainya target Net Zero Emission (NZE) nasional sekaligus berkontribusi signifikan dalam menurunkan emisi karbon pada sektor ketenagalistrikan. [5]. Evaluasi sistem memakai perangkat lunak HOMER Pro untuk memodelkan sistem energi berbasis simulasi serta menganalisis performa teknis dan kelayakan ekonomi. Analisis ekonomi dilakukan dengan parameter *Life Cycle Cost* (LCC), *Levelized Cost of Energy* (LCoE), dan *Capital Recovery Factor* (CRF), serta parameter kelayakan investasi yaitu *Net Present Value* (NPV), *Payback Period* (PP), dan *Profitability Index* (PI).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis menyeluruh terhadap

kelayakan penerapan sistem pembangkit listrik tenaga *hybrid* PLTB turbin tulip dan PLTS di Gedung DH Fakultas Teknik Universitas Udayana melalui pemodelan dan simulasi menggunakan perangkat lunak HOMER Pro, dengan penekanan pada aspek kinerja teknis serta analisis kelayakan ekonomi. Penelitian ini juga diharapkan dapat merancang sistem pembangkit listrik *hybrid* yang efisien dan ramah lingkungan, mendukung pengembangan teknologi energi terbarukan, serta menjadi model penerapan sistem energi bersih yang dapat diadopsi di lingkungan institusi pendidikan lainnya di Indonesia.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Tulip (PLTB)

Turbin tulip merupakan turbin angin vertikal yang dirancang untuk berbagai kebutuhan, mulai dari lingkungan perkotaan, bangunan residensial, komersial, hingga daerah terpencil, berkat desainnya yang kompak, rendah kebisingan, dan efisien pada kecepatan angin rendah sekitar 6 – 8 km/jam. Turbin ini juga unggul dalam hal minim turbulensi, mudah perawatan, serta cocok untuk sistem energi *hybrid* dan edukasi energi terbarukan. Selain itu, struktur dan kinerjanya memberikan keunggulan teknis dibanding turbin angin konvensional, terutama pada kondisi angin rendah [6]

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

PLTS memanfaatkan radiasi matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik melalui sel surya berbasis semikonduktor yang menghasilkan arus listrik searah (DC).. Panel surya tersusun dari beberapa sel untuk meningkatkan daya, dengan dua jenis utama: monokristal (efisiensi 15–20%) dan polikristal (efisiensi 13–16%, lebih ekonomis). Energi yang dihasilkan diatur oleh *charge controller*, disimpan dalam baterai, kemudian dikonversi menjadi arus bolak-balik (AC) melalui *inverter* [7].

2.3 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTB dan PLTS)

Sistem pembangkit listrik *hybrid* menggabungkan dua sumber energi untuk menyuplai daya secara bersamaan, dengan tujuan meningkatkan keandalan, efisiensi, dan menekan biaya operasional serta dampak lingkungan. Dibandingkan sistem tunggal, *hybrid* lebih efisien, misalnya kombinasi tenaga angin dan surya yang saling melengkapi dalam mengatasi fluktuasi pasokan. Letak geografis Indonesia di wilayah tropis dengan radiasi matahari melimpah mendukung pemanfaatan keduanya secara bersamaan dengan biaya relatif rendah [8].

2.4 Rectifier

Rectifier merupakan bagian dari catu daya yang berfungsi mengubah arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC) menggunakan *diode*. Terdapat penyearah setengah gelombang dengan efisiensi rendah dan penyearah gelombang penuh yang lebih stabil. Transformator, filter, dan regulator digunakan untuk menstabilkan serta memperhalus tegangan keluaran.[9].

2.5 Inverter

Inverter adalah perangkat elektronik yang berfungsi mengkonversi arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC), dan umumnya digunakan untuk mengonversi energi dari sumber seperti baterai atau panel surya menjadi daya listrik yang dapat digunakan oleh perangkat elektronik berbasis AC. Secara prinsip, *inverter* bekerja dengan cara mengalihkan arus melalui sistem saklar untuk menghasilkan arus AC dari sumber arus DC [9].

2.6 Baterai

Baterai mengubah energi kimia menjadi listrik DC melalui *anoda*, *katoda*, dan elektrolit. Litium ion banyak digunakan karena berdensitas energi tinggi, ringan, stabil, bebas efek memori, dan tahan lebih dari 10 tahun. Kerjanya berdasar interkalasi deinterkalasi ion litium melalui reaksi redoks tanpa mengubah struktur kristal.[10].

2.7 Hybrid Optimization Model for Energy Renewables (HOMER)

HOMER adalah perangkat lunak NREL untuk simulasi dan optimasi sistem energi terbarukan. Perangkat lunak ini membantu merancang sistem *hybrid* PLTB dan PLTS dengan menganalisis aspek teknis, ekonomi, serta menyesuaikan potensi energi, kebutuhan daya, dan biaya agar tercapai konfigurasi yang optimal dan andal [11].

2.8 Analisis Ekonomi

Biaya merupakan sejumlah dana yang dikeluarkan untuk menghasilkan suatu produk atau layanan (*cost of production*), atau sebagai nilai yang dibayarkan untuk memperoleh sesuatu (*supply price*) [12]. Dalam kajian ekonomi teknik, biaya proyek atau proses produksi biasanya dibagi ke dalam beberapa kategori utama sebagai berikut.

1. Biaya Investasi

Biaya investasi awal mencakup seluruh pengeluaran yang diperlukan untuk mempersiapkan sistem hingga dapat beroperasi. Biaya ini biasanya bersifat besar, terjadi di tahap awal, dan memberikan dampak jangka panjang. Contohnya termasuk biaya bahan baku sistem dan upah tenaga kerja. [12]

2. Biaya Operasional (*Operational Cost*)

Biaya operasional merujuk pada pengeluaran yang dilakukan secara rutin setelah sistem mulai beroperasi. Pengeluaran ini bersifat periodik dengan jumlah yang umumnya tetap, dan diperlukan untuk mendukung kelangsungan sistem [12].

3. Biaya Perawatan (*Maintenance Cost*)

Biaya perawatan adalah biaya yang ditujukan untuk menjaga kinerja sistem agar tetap optimal. Sebagai contoh, termasuk biaya penggantian komponen yang mengalami kerusakan penurunan fungsi [12].

2.9 Life Cycle Cost (LCC)

Life Cycle Cost (LCC) adalah metode evaluasi ekonomi yang menghitung total biaya selama masa pakai suatu sistem atau proyek, mencakup biaya investasi awal, operasi, pemeliharaan, penggantian

komponen, asuransi, keamanan, hingga nilai jual kembali. LCC mencakup seluruh biaya yang bersifat berulang maupun tidak berulang, sehingga memberikan gambaran menyeluruh terhadap beban biaya sepanjang umur sistem. Nilai LCC dapat diperoleh menggunakan persamaan 1 [12].

$$LCC = Ct + AW \quad (1)$$

Keterangan :

LCC = Nilai biaya keseluruhan system.

Ct = Biaya total awal proyek.

AW = Total biaya selama umur proyek.

2.10 Capital Recovery Factor (CRF)

Capital Recovery Factor (CRF) atau faktor pemulihan modal digunakan untuk mengonversi seluruh arus kas biaya siklus hidup (*Life Cycle Cost*) menjadi pembayaran atau biaya tahunan dengan nilai tetap selama masa operasi proyek. Faktor pemulihan modal diperoleh dengan persamaan 2 [13].

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2)$$

Keterangan :

CRF = Faktor pengembalian modal

i = Suku bunga diskonto tahunan

n = Umur proyek (tahun).

2.11 Levelized Cost of Energy (LCoE)

Levelized Cost of Energy (LCoE) adalah indikator ekonomi untuk menghitung biaya produksi listrik selama masa operasional pembangkit, mencakup investasi awal, operasi, pemeliharaan, penggantian komponen, sewa lahan, dan asuransi. Biaya dihitung dalam nilai sekarang dan dikonversi menjadi biaya tahunan dengan mempertimbangkan inflasi. Perhitungan LCoE untuk sistem pembangkit listrik tenaga *hybrid* PLTB turbin tulip dan PLTS dapat menggunakan persamaan 3 [13].

$$LCoE = \frac{LCC \times CRF}{A \text{ KWH}} \quad (3)$$

Keterangan :

LCoE = Biaya listrik per kWh

LCC = Total biaya proyek per tahun

A kWh = Energi listrik tahunan.

2.12 Analisis Kelayakan Investasi

Analisis kelayakan ekonomi adalah proses penilaian yang bertujuan untuk menentukan tingkat kelayakan suatu proyek dari sisi finansial serta potensi keuntungan

yang dapat diperoleh. Melalui analisis ini, pengambilan keputusan dapat dilakukan secara lebih rasional dan terukur, sehingga mampu meminimalkan potensi kerugian serta meningkatkan efisiensi investasi di masa mendatang [14].

2.13 Payback Period

Payback Period (PP) merupakan indikator waktu yang menunjukkan seberapa lama investasi awal dapat kembali melalui arus kas masuk dari suatu proyek. Semakin cepat periode pengembalian investasi, maka proyek tersebut dianggap semakin layak untuk direalisasikan. Perhitungan PP dapat dilakukan menggunakan persamaan 4 [14].

$$PP = \frac{I_0}{\text{Pendapatan per tahun}} \quad (4)$$

Keterangan :

PP = Waktu pengembalian investasi

I_0 = Biaya investasi awal

2.14 Discount Factor (DF)

Discount Factor adalah nilai pengali untuk mengonversi uang masa depan menjadi nilai sekarang berdasarkan konsep nilai waktu uang. Faktor ini dihitung dari tingkat diskonto, biasanya mengacu pada suku bunga pasar atau bank, dan digunakan dalam analisis kelayakan finansial proyek jangka panjang. Nilai *discount factor* dapat diperoleh menggunakan persamaan 5 [13].

$$DF = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (5)$$

Keterangan :

DF = Faktor Diskonto

i = Suku bunga diskonto tahunan

n = Jumlah periode (tahun ke-n).

2.15 Net Present Value (NPV)

Net Present Value (NPV) merupakan indikator keuangan yang digunakan untuk menilai kelayakan suatu proyek dengan menghitung selisih antara nilai sekarang dari pendapatan bersih masa depan dan investasi awal. NPV mempertimbangkan biaya investasi, biaya operasional, serta pendapatan bersih yang telah disesuaikan dengan tingkat diskonto. Nilai NPV yang positif menunjukkan bahwa proyek berpotensi untung. Perhitungannya dapat dilakukan dengan menggunakan rumus

sebagaimana dijelaskan dalam persamaan 6 [14].

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1+i)^t} - I_o \quad (6)$$

Keterangan :

NPV = *Net Present Value* (Nilai Bersih Sekarang).
 NCF_t = Arus kas bersih pada tahun ke- t .
 i = Suku bunga diskonto tahunan
 n = Usia proyek (tahun).
 I_o = Biaya investasi awal

2.16 Profitability Index

Profitability Index (PI) merupakan rasio yang menunjukkan perbandingan antara nilai kini dari total arus kas bersih dengan besarnya investasi awal. Metode ini juga disebut sebagai rasio manfaat-biaya (*Benefit-Cost Ratio*) dan digunakan untuk menilai tingkat efisiensi finansial suatu

proyek. Perhitungan PI dapat dilakukan dengan mengacu pada persamaan 7 [14].

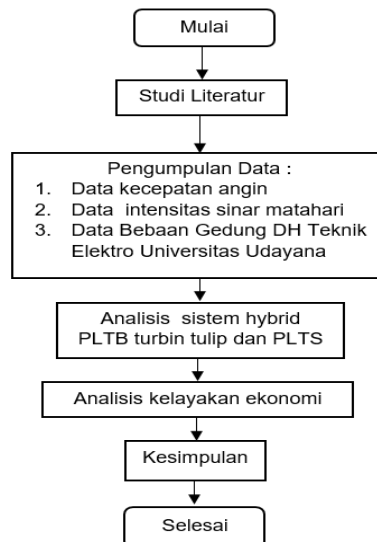
$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t(1-i)^{-t}}{I_o} \quad (7)$$

Keterangan :

PI = Indeks Profitabilitas
 NCF_t = Arus kas bersih pada tahun ke- t .
 i = Suku bunga diskonto tahunan
 n = Usia proyek (tahun)
 I_o = Biaya investasi awal (*initial outlay*)

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di gedung DH Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran. Waktu pelaksanaan dimulai dari bulan Januari 2025 – Juni 2025. Tahapan Penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Berikut penjelasan pada Gambar 1 :

1. Studi literatur

Mengumpulkan berbagai sumber referensi yang relevan dengan topik atau masalah yang diteliti. Sumber referensi yang digunakan bisa berupa buku, majalah, artikel, karya ilmiah, atau karya tulis orang lain.

2. Pengumpulan Data

Mengumpulkan data-data yang dibutuhkan dalam penelitian seperti data kecepatan angin dan data intensitas sinar matahari, dalam penelitian ini, data diperoleh dari database NASA *Prediction of*

Worldwide Energy Resource melalui perangkat lunak HOMER Pro pada koordinat -8,75° LS dan 115,25° BT lokasi gedung DH Program Studi Teknik elektro, Fakultas Teknik Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran.

3. Analisis Sistem

Dalam penelitian ini dilakukan analisis sistem *hybrid* PLTB turbin tulip dan PLTS dengan HOMER Pro yang akan digunakan sebagai sumber energi untuk mendukung target penggunaan EBT.

4. Analisis Kelayakan Ekonomi

Melakukan kajian ekonomi terkait tarif penjualan listrik serta analisis kelayakan ekonomi tarif penjualan listrik.

5. Menarik Kesimpulan dan Saran

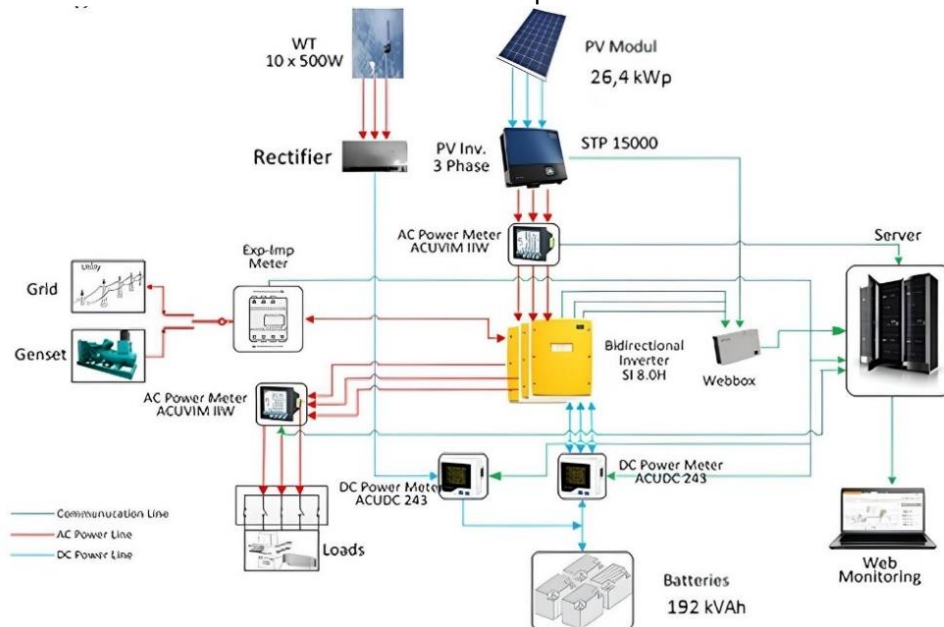
Merumuskan kesimpulan serta rekomendasi berdasarkan hasil penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum *Smart Microgrid* Gedung DH Teknik Elektro Universitas Udayana

Smart Microgrid di Gedung DH, Teknik Elektro Universitas Udayana merupakan proyek percontohan kolaborasi Kementerian ESDM (P3TKEBTKE) dan Universitas Udayana untuk mengoptimalkan

pemanfaatan Energi Baru Terbarukan (EBT) di kampus. Beroperasi sejak 2017, sistem ini terdiri atas PLTS 26,4 kWp, sepuluh PLTB masing - masing 500 W, dan baterai 192 kVAh. Energi PLTS dikonversi *inverter* menjadi AC untuk beban gedung DH Teknik Elektro Universitas Udayana, sedangkan PLTB melalui *rectifier* disimpan ke baterai. Aliran energi diatur dinamis, yaitu kelebihan daya mengisi baterai, kekurangan dipenuhi PLN saat SOC <40%. Semua parameter operasional, termasuk produksi, kapasitas baterai, dan konsumsi listrik, dipantau *real time* melalui sistem berbasis web dengan power meter “Acuvim II Series”. Skema *Smart Microgrid* pada gedung DH ditunjukkan pada Gambar 2.

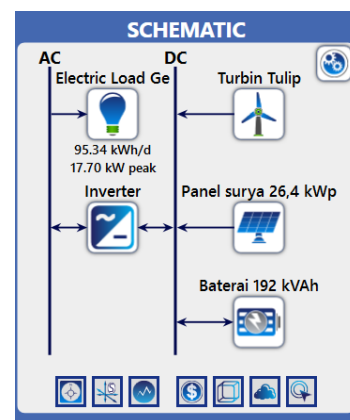


Gambar 2 Skema *Smart Microgrid* Pada Gedung DH Universitas Udayana

4.2 Simulasi Sistem *Hybrid* Menggunakan Perangkat Lunak HOMER Pro

4.2.1 Desain Sistem *Hybrid* Dengan Perangkat Lunak HOMER Pro

Desain simulasi pada HOMER Pro mengintegrasikan turbin angin, panel surya, konverter, dan baterai untuk memaksimalkan pemanfaatan energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan pada sumber eksternal, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

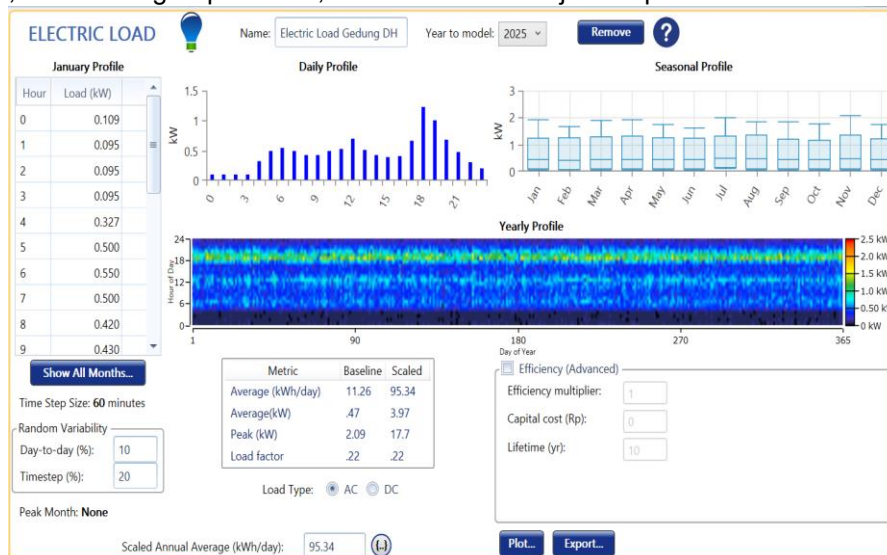


Gambar 3 Desain Sistem Pembangkit *Hybrid* Pada Software HOMER Pro

4.2.2 Masukan Data Pada Software HOMER Pro

HOMER Pro menggunakan data dari database NASA *Prediction of Worldwide Energy Resource* dengan masukan berupa koordinat Gedung DH radiasi matahari rata-rata 5,34 kWh/m²/hari, suhu maksimum 26,22 °C, serta kecepatan angin rata-rata tahunan 4,32 m/s dengan puncak 5,47 m/s

pada Juli. Data beban diperoleh dari pencatatan *smart microgrid* P3TKEBTKE Udayana menggunakan Acuvim II Series pada September–November 2017 mengacu pada penelitian Kajian dan Evaluasi Sistem Suplai Energi Listrik PLTS dan PLTB di Kampus Teknik Elektro Universitas Udayana Bukit Jimbaran Bali [15] seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Data Beban yang Dimasukkan Pada Perangkat Lunak HOMER Pro

4.2.3 Analisis Teknis Simulasi Perangkat Lunak HOMER Pro

Simulasi menggunakan HOMER Pro menghasilkan berbagai konfigurasi pasokan energi yang mengintegrasikan panel surya,

turbin tulip, baterai, dan *inverter*. Setiap konfigurasi menunjukkan variasi nilai NPC, LCOE, serta biaya operasi tahunan, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5

Architecture						Cost		
Panel surya 26,4 kWp (kW)	Turbin Tulip	Baterai 192 kVAh (#)	Inverter (kW)	Dispatch	NPC (Rp)	LCOE (Rp/kWh)	Operating cost (Rp/yr)	
31.3	29	120	18.1	CC	Rp1.67B	Rp4,368	Rp35.6M	
41.0		144	18.3	CC	Rp1.93B	Rp5,055	Rp57.7M	
	128	360	18.3	CC	Rp3.54B	Rp9,257	Rp39.0M	

Gambar 5 Hasil Simulasi Software HOMER Pro

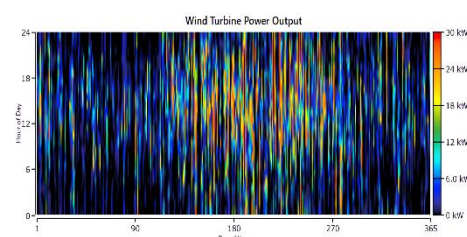
Konfigurasi optimal terdiri dari panel surya, baterai, *inverter*, dan generator, dengan NPC sebesar Rp1.668.925.000, LCOE Rp 4.368,36, dan biaya operasional Rp35.611.210.

1. Energi Listrik Yang Di Produksi PLTB

Kinerja PLTB turbin tulip pada sistem ini menghasilkan 39.771 kWh/tahun dengan levelized cost 511 Rp/kWh dan rata-rata daya keluaran 4,54 kW, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.

Quantity	Value	Units
Total Rated Capacity	29.0	kW
Mean Output	4.54	kW
Capacity Factor	15.7	%
Total Production	39.771	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	29.0	kW
Wind Penetration	106	%
Hours of Operation	6,831	hrs/yr
Levelized Cost	511	Rp/kWh

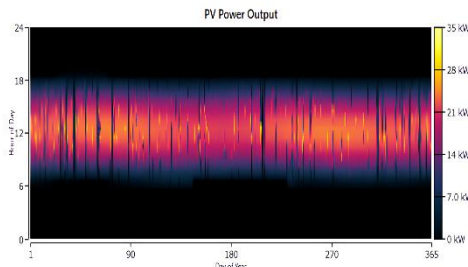


Gambar 6 Hasil Produksi Listrik PLTB

2. Energi Listrik Yang Dihasilkan PLTS

Jumlah energi yang dihasilkan oleh panel surya dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari di lokasi penelitian. Pada sistem ini, PLTS mampu memproduksi listrik sebesar 63.434 kWh per tahun dengan rata-rata 174 kWh per hari dan tingkat penetrasi PV mencapai 170%. Biaya produksi listrik dari PLTS tercatat sebesar Rp 435/kWh. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.

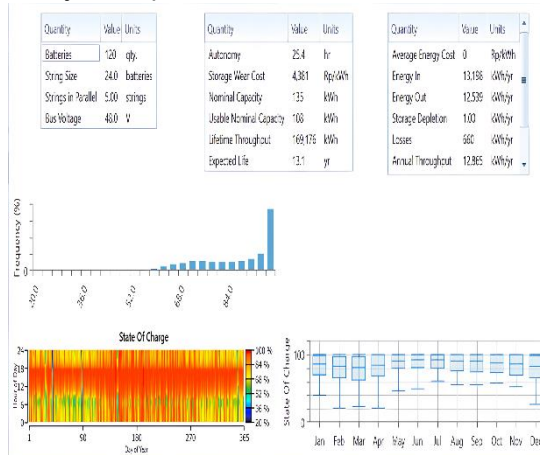
Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Rated Capacity	31.3	kW	Minimum Output	0	kW
Mean Output	7.24	kW	Maximum Output	30.1	kW
Mean Output	174	kWh/d	PV Penetration	170	%
Capacity Factor	23.1	%	Hours of Operation	4,385	hrs/yr
Total Production	63,434	kWh/yr	Levelized Cost	435	Rp/kWh
			Clipped production	0	kWh



Gambar 7 Hasil Produksi Listrik PLTS

3. Energi Listrik Yang Disimpan Pada Baterai

Baterai dengan kapasitas 135 kWh hanya dapat dimanfaatkan sebesar 108 kWh karena spesifikasi *Depth of Discharge* (DOD) ditetapkan 80%. Pada sistem PLTH ini, total energi yang tersimpan mencapai 13.198 kWh per tahun, dengan energi keluaran sebesar 12.529 kWh per tahun serta kehilangan energi (*losses*) sebesar 660 kWh per tahun.. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



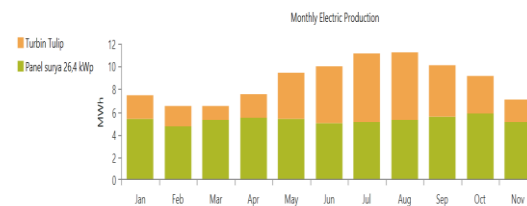
Gambar 8 Penyimpanan Energi Pada Baterai

4.2.4 Keseluruhan Energi Listrik Yang Dihasilkan Dari Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid PLTB Turbin Tulip Dan PLTS

Total energi yang dihasilkan dari sistem PLTH ditunjukkan pada Gambar 9.

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%	Quantity	kWh/yr	%
anadiSolar MaxPower CS6U-330P	63,434	61.5	AC Primary Load	37,331	100	Excess Electricity	63,578	61.6
energie 1 kW	39,771	38.5	DC Primary Load	0	0	Unmet Electric Load	23.5	0.0629
Total	103,204	100	Deferrable Load	0	0	Capacity Shortage	37.3	0.0999
			Total	37,331	100			

Quantity	Value	Units
Renewable Fraction	100	%
Max. Renew. Penetration	5,119	%



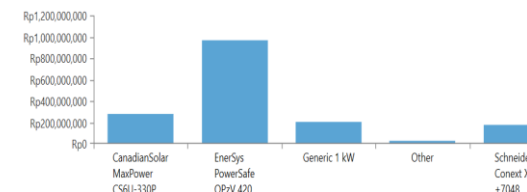
Gambar 9 Keseluruhan Energi Listrik Yang Dihasilkan

Pada Pada Gambar 9 ditunjukkan produksi listrik PLTS sebesar 63.434 kWh/tahun (61,5%) dan PLTB 39.771 kWh/tahun (38,5%), dengan *Excess Electricity* 63.578 kWh/tahun. Produksi PLTS lebih tinggi karena dirancang sebagai sumber utama, sedangkan PLTB berperan sebagai sumber cadangan dan tambahan pengisian baterai.

4.3 Analisis Ekonomi Perangkat Lunak HOMER Pro Beserta Perhitungan Teoritis

4.3.1 Capital Cost

Berdasarkan hasil simulasi dengan perangkat lunak HOMER Pro, diperoleh rincian estimasi biaya yang diperlukan untuk perancangan sistem *hybrid* yang dirancang, rincian biaya tersebut dapat dilihat pada Gambar 10.



Component	Capital (Rp)	Replacement (Rp)	O&M (Rp)	Fuel (Rp)	Salvage (Rp)
CanadianSolar MaxPower CS6U-330P	Rp256,000,245.22	Rp0.00	Rp26,199,553.47	Rp0.00	Rp0.00
EnerSys PowerSafe OP2V 420	Rp722,433,300.00	Rp247,114,637.26	Rp9,971,515.94	Rp0.00	-Rp9,290,522.59
Generic 1 kW	Rp188,500,000.00	Rp0.00	Rp19,291,449.62	Rp0.00	Rp0.00
Other	Rp32,140,000.00	Rp0.00	Rp0.00	Rp0.00	Rp0.00
Schneider Conext XN+7048	Rp105,399,550.26	Rp67,234,563.19	Rp10,786,791.03	Rp0.00	-Rp6,855,913.15
System	Rp1,304,473,095.48	Rp314,349,200.45	Rp66,249,310.06	Rp0.00	-Rp16,146,435.75

Gambar 10 Tampilan *cost summary*

Pada Gambar 10 ditunjukkan bahwa total investasi awal yang diperlukan mencapai Rp 1.304.473.095,48. Dari jumlah tersebut, alokasi biaya awal terdiri atas pembelian panel surya sebesar 19,63%, baterai 55,37%, *inverter* 8,08%, turbin angin 14,45%, serta komponen lainnya 2,46%. Rincian biaya investasi awal ini merupakan biaya satuan yang dimasukkan pada HOMER Pro dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Masukan Harga Satuan Komponen Pada HOMER Pro

Komponen	Jumlah	Satuan	Harga satuan
BGROSE-1000	20	Unit	Rp 6.500.000,00
Canadian Solar Max Power CS6U-330P	80	Unit	Rp 2.700.000,00
Inverter Sunny Tripower 15000 TL	1	Unit	Rp 67.701.875,00
Sunny Island SMA S18-OH-11	1	Unit	Rp 54.000.000,00
Energys PowerSafe OPzV-420	192	Unit	Rp 6.020.279,00

4.3.2 Biaya Operasional dan Pemeliharaan

Total biaya O&M PLTH mencakup pemeliharaan, penggantian *inverter*, dan O&M 2% dari biaya tiap komponen. Dalam umur proyek 25 tahun, baterai (umur 20 tahun) diganti sekali senilai Rp247.114.637,26, dan *inverter* (umur 10 tahun) diganti dua kali senilai Rp67.234.563,19, sehingga total biaya penggantian mencapai Rp314.349.200,45 dalam nilai kini.

Selama 25 tahun, total biaya O&M mencapai Rp 66.249.310,06, yang meskipun lebih kecil dari investasi awal, tetap berdampak signifikan pada kelayakan ekonomi proyek.

4.3.3 Nilai Sisa (Salvage)

Nilai sisa dihitung untuk komponen yang masih memiliki sisa umur pakai saat proyek berakhir dan dicatat sebagai pengurang biaya sistem. Pada Gambar 10,

inverter bernilai Rp6.855.913,15 dan baterai pengganti pada tahun ke-20 bernilai Rp9.290.522,59 karena masih memiliki sisa masa pakai 5 tahun. Total *salvage value* sistem adalah Rp16.146.435,75 selama 25 tahun.

4.3.4 Net Present Cost

Nilai NPC, yang merepresentasikan total biaya keseluruhan dalam perancangan suatu sistem proyek, dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$NPC = \text{Capital Cost} + \text{Replacement} + \text{O\&M Cost} - \text{Salvage}$$

$$NPC = \text{Rp}1.304.473.095,48 + \text{Rp}314.349.200,45 + \text{Rp}66.249.310,06 - \text{Rp}16.146.435,75$$

$$NPC = \text{Rp}1.668.925.170,24$$

Berdasarkan simulasi pada Gambar 5 dengan HOMER Pro, total NPC mencapai Rp1.668.925.000,00. Perbandingan dengan perhitungan teoritis menunjukkan selisih Rp170,24, yang disebabkan pembulatan angka desimal.

4.3.5 Life Cycle Cost (LCC)

Sistem PLTH dirancang beroperasi 25 tahun dengan suku bunga 8,50%. *Life Cycle Cost* (LCC) ditentukan berdasarkan Net Present Cost (NPC) dari simulasi HOMER Pro. Perhitungan *Life Cycle Cost* dapat menggunakan persamaan (1) sebagai berikut.

$$\begin{aligned} LCC &= Ct + AW \\ &= 1.685.071.435,75 - 16.146.435,75 \\ &= 1.668.925.000,00 \end{aligned}$$

4.3.6 Capital Recovery Factor

Capital Recovery Factor (CRF) digunakan untuk mengubah seluruh arus kas biaya siklus hidup menjadi rangkaian biaya tahunan, yang perhitungannya dilakukan dengan menggunakan persamaan (2) sebagai berikut.

$$\begin{aligned} CRF &= \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \\ &= \frac{0,085(1+0,085)^{25}}{(1+0,085)^{25} - 1} \\ &= \frac{0,65337}{6,68676} = 0,0977 \end{aligned}$$

4.3.7 Levelized Cost of Energy (LCoE)

Dengan menggunakan hasil perhitungan LCC, CRF, serta total energi tahunan untuk beban sebesar 37.331 kWh, dapat ditentukan nilai LCoE, menggunakan persamaan (3).

$$\begin{aligned} COE &= \frac{LCC \times CRF}{KWH} \\ &= \frac{Rp1,668,925,000.00 \times 0,0977}{37,331 \text{ kWh}} \\ &= Rp 4.369,91/kWh \end{aligned}$$

Nilai LCoE dari HOMER Pro (Gambar 5) adalah Rp4.368,36/kWh, sedangkan perhitungan teoritis menghasilkan Rp4.369,91/kWh, dengan selisih Rp1,55. Perbedaan ini disebabkan pembulatan angka dan metode perhitungan lebih kompleks dan presisi tinggi.

4.4 Analisis Kelayakan

4.4.1 Payback Period

Nilai pengeluaran bersih tahunan diperoleh dari perbedaan antara pendapatan penjualan listrik dengan biaya operasi dan pemeliharaan (O&M). Dengan konsumsi energi 47.331 kWh/tahun dan tarif PLN Rp1.699,53/kWh, arus kas masuk adalah:

$$\text{Arus Kas Masuk} = \text{Total Penggunaan Energi} \times \text{Tarif Listrik PLN}$$

$$\text{Arus Kas Masuk} = 47.331 \text{ kWh/tahun} \times \text{Rp.1.699,53 /kWh}$$

$$\text{Arus Kas Masuk} = \text{Rp. 80.444.133,43/tahun}$$

Arus Kas Keluar (O&M) pada hasil simulasi HOMER Pro didapatkan biaya O&M sebesar Rp 66,249,310.06 selama 25 tahun. Pada perhitungan arus kas keluar ini di biaya O&M asumsikan tersebar merata setiap tahunnya.

$$\begin{aligned} \text{Arus Kas Keluar} &= \frac{\text{Rp } 66.249.310,06}{25 \text{ tahun}} \\ &= \text{Rp } 2.649.972,40 / \end{aligned}$$

tahun

$$\begin{aligned} \text{Kas Bersih} &= \text{Alur Kas Masuk} - \text{Total Pengeluaran} \\ &= \text{Rp } 80.444.133,43 - \text{Rp.2.649.972,40} \\ &= \text{Rp } 77.794.161,03/\text{tahun} \end{aligned}$$

Setelah mengetahui laba bersih yang diperoleh per tahun, Selanjutnya melakukan perhitungan nilai PBP untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan untuk melunasi

biaya investasi yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (4) berikut:

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Modal Investasi Awal}}{\text{Pendapatan}}$$

$$\begin{aligned} \text{Payback Period} &= \frac{\text{Rp } 1.304.473.095,48}{\text{Rp } 77.794.161,03} \\ &= 16,76 \text{ tahun} = 16 \text{ tahun } 8 \text{ bulan} \end{aligned}$$

4.4.2 Net Present Value

Perhitungan NPV membutuhkan data investasi awal, arus kas bersih, serta tingkat suku bunga. Nilai NPV ditentukan dengan membandingkan total pendapatan bersih yang telah didiskontokan dengan besarnya investasi awal. Suku bunga menurut website resmi Bank Mandiri per Mei 2025 sebesar 8,5%.

Untuk menghitung nilai NCF_t, terlebih dahulu harus ditentukan nilai DF dengan persamaan (5).

$$DF = \frac{1}{(1+i)^t} = \frac{1}{(1+0,085)^1} = 0,9217$$

Kas bersih yang diperoleh diasumsikan konstan dari tahun pertama hingga tahun terakhir karena tingkat inflasi dianggap tidak mengalami peningkatan yang signifikan. Besarnya NPV dapat dihitung menggunakan persamaan (6) sebagai berikut.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1+i)^t} - I_o$$

$$\begin{aligned} &= \text{Rp } 996.160.285,46 - \text{Rp.1.304.473.095,48} \\ NPV &= - \text{Rp } 308.312.810,02. \end{aligned}$$

4.4.3 Profitability Indeks

Perhitungan Profitability Indeks dapat menggunakan persamaan (7) sebagai berikut.

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

$$PI = \frac{\text{Rp } 996.160.285,46}{\text{Rp.1.304.473.095,48}}$$

$$PI = 0,7635$$

Nilai PI 0,7635 (<1) menunjukkan PLTH belum layak secara finansial, namun tetap strategis untuk mendukung pengurangan emisi, ketahanan energi, dan pemanfaatan energi ramah lingkungan. Proyek ini juga penting bagi pengembangan

energi terbarukan di lingkungan akademik serta mendukung target bauran energi nasional sesuai Perpres No. 112 Tahun 2022, sehingga dengan dukungan kebijakan, insentif, atau pembiayaan hijau, tetap layak dipertimbangkan untuk direalisasikan.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis teknis menggunakan HOMER Pro, sistem PLTB turbin tulip dan PLTS di Gedung DH Fakultas Teknik Universitas Udayana mampu menghasilkan total energi listrik sebesar 103.205 kWh/tahun, dengan kontribusi PLTS 61,5% dan PLTB 38,5%. Dari sisi ekonomi, nilai NPC tercatat Rp 1.668.925.000, LCoE sebesar Rp 4.368,36/kWh, dan *Payback Period* 16 tahun 8 bulan. Analisis kelayakan menunjukkan NPV – Rp 308.312.810,02, dan PI 0,7635, yang mengindikasikan proyek belum layak secara finansial pada tarif PLN Rp 1.699,53/kWh dan diskonto 8,5%.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. P. PT.Perusahaan Listrik Negara, 2025, "Electricity Supply Business Plan (RUPTL) PT PLN (Persero) 2025–2034," pp. 2025–2034.
- [2] R. M. Ariefianto dan R. A. Aprilianto, 2021, "Peluang Dan Tantangan Menuju Net Zero Emission (NZE) Menggunakan Variable Renewable Energy (VRE) Pada Sistem Ketenagalistrikan Di Indonesia," *J. Paradig.*, vol. 2, no. 2, pp. 1–13.
- [3] G. Bali, 2019, "Bali energi bersih," *PERGUB BALI No. 45 Tahun 2019*.
- [4] A. Husen, B. Setiadi, dan M. Fikri, 2023, "Rancang Bangun Small Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Savonius Dengan Metode Matriks," *Sainstech J. Penelit. Dan Pengkaj. Sains Dan Teknol.*, vol. 33, no. 3, pp. 121–131.
- [5] S. N. Fitri dan F. Azis, 2021 "Rancang Bangun Turbin Vertikal Axis Pada PLTB," *J. Electr. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 76–80.
- [6] A. D. Nugraha, R. A. Garingging, A. Wiranata, A. C. Sitanggang, E. Supriyanto, F. Tanbar dan M. A. Muflikhun, 2025, "Comparison of 'Rose, Aeroleaf, and Tulip' vertical axis wind turbines (VAWTs) and their characteristics for alternative electricity generation in urban and rural areas," *Results Eng.*, vol. 25, no. October 2024, p. 103885.
- [7] D. Arswindo, 2022 "Rancang Bangun Turbin Angin Vertikal Mini," p.
- [8] F. Hadiatna, D. Fauziah, and E. Syahirah, 2023, "Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Surya Bayu di Kota Bandung," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 11, no. 3, p. 811.
- [9] M. A. Syururi, B. S. Kaloko, dan W. Cahyadi, 2022, "Rancang Bangun Inverter 600 Watt dengan Metode Sinusoidal Pulse Width Modulation," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 11, no. 3, pp. 147–154.
- [10] I. H. Fajrin, 2024, "Pengujian Kapasitas Baterai Lithium-ion 18650 Menggunakan Metode Charge dan Discharge,".
- [11] S. Lewi, M. Yunus dan A. Rijal, 2023, "Studi Perencanaan Pembangkit Hybrid (PLTS-PLTD) di Pulau Kodingare Kabupaten Sinjai,".
- [12] D. L. Putra, 2020, "Analisis teknis dan ekonomis pembangkit listrik hibrid tenaga bayu dan tenaga surya," *J. UIN SUSKA*, vol. 12, no. 4, pp. 16–23.
- [13] M. F. Hiswandi, F. Iswahyudi, dan W. M. Soeroto, 2023, "Analisis Kelayakan Investasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap Dengan Sistem on-Grid Di Pabrik Minuman Siap Saji," *Sebatik*, vol. 27, no. 1, pp. 22–29.
- [14] M. P. Hendra, R. A. Pradana, A. N. Masulili, dan W. M. Soeroto, 2024, "Mengukur Kinerja Dan Rianalisis Kelayakan Investasi Pengadaan 1(Satu) Unit Truck Mounted Crane Kapasitas 10 Ton Di Pabrik Pemurnian Minyak Bumi Siko

- Keuangan,” *Sebatik*, vol. 28, no. 1, pp. 121–128.
- [15] I. A. Medina, I. A. . Giriantari, and I. . Sukerayasa, 2018, “Kajian dan Evaluasi Sistem Suplai Energi Listrik PLTS dan PLTB di Kampus Teknik Elektro Universitas Udayana Bukit Jimbaran Bali,” *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 17, no. 3, p. 311.