

ANALISIS KELAYAKAN TEKNO-EKONOMI PLTS ON-GRID PADA GEDUNG BALAI PELATIHAN PERTANIAN LAMPUNG

Putty Yunesti^{1*}, Fino Agustian Jourdan Gamas², FX Nugroho Soelami³, Wulan Kusuma Wardani⁴

^{1,2,3,4} Tenik Sistem Energi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung, 35365, (0721) 8030188

Keywords:

Energy
Terbarukan

Correspondent Email:

putty.yunesti@tse.itera.ac.id

Abstrak. Dalam mendukung target 23% energi terbarukan dalam bauran energi nasional pada tahun 2025 sebagaimana tercantum dalam Kebijakan Energi Nasional (RUEN), penelitian ini dilakukan untuk merancang dan menganalisis kelayakan teknis serta ekonomi dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap *on-grid* di Balai Pelatihan Pertanian Lampung. Penelitian mencakup perancangan teknis menggunakan perangkat lunak PVsyst dan Helioscope, serta analisis ekonomi dengan metode *Life Cycle Cost* (LCC) dan *Levelized Cost of Energy* (LCOE). Evaluasi kelayakan didasarkan pada indikator seperti *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Discounted Payback Period* (DPP). Hasil rancangan menunjukkan kapasitas optimal PLTS atap sebesar 6,05 kWp dengan asumsi radiasi matahari sebesar 1786,8 kWh/m²/tahun, menghasilkan produksi energi tahunan sebesar 8715,9 kWh dan *Performance Ratio* (PR) sebesar 80,6%. Biaya investasi awal diperkirakan sebesar Rp69.994.445,00, dengan LCC sebesar Rp96.347.850,77 dan LCOE sebesar Rp1.218,18/kWh. Analisis kelayakan ekonomi menunjukkan bahwa proyek ini menguntungkan, dengan NPV positif sebesar Rp14.686.055, DPP pada tahun ke-15, dan IRR sebesar 12,76%. Berdasarkan hasil tersebut, proyek PLTS atap ini dinyatakan layak untuk diimplementasikan pada bangunan yang dianalisis.

Abstract. In support of the target of 23% renewable energy in the national energy mix by 2025, as stated in the National Energy Policy (RUEN), this study was conducted to design and analyze the technical and economic feasibility of an on-grid rooftop solar power plant (PLTS) at the Balai Pelatihan Pertanian Lampung. The study includes technical design using PVsyst, Helioscope software, and economic analysis using the Life Cycle Cost (LCC) and Levelized Cost of Energy (LCOE) methods. Feasibility evaluation is based on indicators such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Discounted Payback Period (DPP). The design results indicate an optimal rooftop PLTS capacity of 6.05 kWp, assuming a solar irradiation of 1786.8 kWh/m²/year, resulting in an annual energy production of 8715.9 kWh and a Performance Ratio (PR) of 80.6%. The initial investment cost is estimated at IDR 69,994,445.00, with an LCC of IDR 96,347,850.77 and an LCOE of IDR 1,218.18/kWh. The economic feasibility analysis shows that the project is profitable, with a positive NPV of IDR 14,686,055, a DPP in the 15th year, and an IRR of 12.76%. Based on these results, the rooftop PLTS project is considered feasible for implementation in the analyzed building.



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

1. PENDAHULUAN

Energi merupakan elemen vital dalam mendukung pembangunan nasional. Seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan industrialisasi, konsumsi energi di Indonesia menunjukkan tren yang terus meningkat. Konsumsi energi nasional pada tahun 2019 tercatat sebesar 132,4 juta TOE (*Tonnes of Oil Equivalent*), dengan distribusi terbesar pada sektor transportasi (43,9%) dan industri (36,6%) [1]. Berdasarkan *Outlook Energi Indonesia 2021* oleh Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), sektor industri menyerap sekitar 38% dari total konsumsi energi nasional [2].

Sumber energi nasional saat ini masih didominasi oleh energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam, yang menyumbang 81% dari kapasitas pembangkitan listrik [3]. Ketergantungan pada sumber energi fosil selain menyimpan risiko terhadap ketahanan energi karena keterbatasan cadangan, juga menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan [4]. Oleh karena itu, transisi energi menuju pemanfaatan sumber energi yang lebih bersih dan terbarukan merupakan suatu keharusan strategis untuk mewujudkan ketahanan energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Pemerintah Indonesia melalui Dewan Energi Nasional (DEN) menargetkan bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025, namun hingga tahun 2022, pencapaiannya baru mencapai 12,3% [5].

Salah satu sumber energi terbarukan yang sangat potensial dikembangkan di Indonesia adalah energi surya. Dengan karakteristik wilayah tropis dan intensitas radiasi matahari rata-rata sebesar 4,8 kWh/m²/hari, potensi energi surya di Indonesia diperkirakan mencapai 207,9 GWp, namun realisasi pemanfaatan potensi tersebut masih sangat rendah [6]. Hingga tahun 2021, kapasitas terpasang Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) baru mencapai 105 MWp, atau sekitar 0,05% dari total potensi yang tersedia [5].

Pemanfaatan energi surya sangat relevan terutama untuk wilayah-wilayah yang belum sepenuhnya terjangkau jaringan listrik PLN karena keterbatasan infrastruktur distribusi. Sistem PLTS *rooftop on-grid* menjadi solusi yang layak dikembangkan karena sifatnya yang modular, tidak memerlukan lahan tambahan, dan dapat langsung dihubungkan dengan

jaringan listrik eksisting. Salah satu lokasi potensial untuk pengembangan PLTS *rooftop on-grid* adalah Gedung Balai Pelatihan Pertanian Lampung, yang memiliki karakteristik bangunan terbuka tanpa halangan bayangan serta intensitas radiasi matahari rata-rata 4,43 kWh/m²/hari [7].

Sehubungan dengan potensi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomi dari penerapan sistem PLTS *rooftop on-grid* di Gedung Balai Pelatihan Pertanian Lampung. Aspek teknis akan dianalisis menggunakan perangkat lunak PVsyst dan Helioscope, sedangkan aspek ekonomi dievaluasi menggunakan metode *Life Cycle Cost* (LCC) dan *Levelized Cost of Energy* (LCOE). Parameter kelayakan ekonomi yang digunakan mencakup *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Discounted Payback Period* (DPP).

Penelitian ini penting dilakukan sebagai bagian dari upaya akselerasi transisi energi menuju sumber energi bersih dan mendukung target bauran energi nasional. Selain itu, hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi implementasi PLTS *rooftop on-grid* di gedung-gedung pemerintah maupun sektor lainnya sebagai alternatif pasokan energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Dalam satu dekade terakhir, perhatian terhadap pengembangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *rooftop* semakin meningkat seiring dengan dorongan transisi energi global menuju sumber energi bersih dan terbarukan. Penerapan PLTS *rooftop on-grid* pada gedung komersial, institusi pendidikan, dan fasilitas pemerintahan telah menjadi salah satu alternatif strategis dalam mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil dan beban biaya listrik operasional. Hai et al melakukan kajian terhadap sistem PV *rooftop* berkapasitas 5 kWp di tiga zona iklim berbeda dan menemukan bahwa zona beriklim dingin menunjukkan performa terbaik secara teknis dan ekonomi dengan IRR sebesar 14,3 % dan LCOE sebesar USD 0,063/kWh [8].

Mat Isa et al menganalisis kelayakan ekonomi sistem PLTS *rooftop* pada bangunan rumah sakit di Malaysia menggunakan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) sebagai indikator utama [9]. Hasilnya menunjukkan

biaya energi yang kompetitif, mendukung implementasi sistem pada bangunan institusional berbasis perhitungan siklus hidup.

Pemanfaatan PLTS *rooftop on grid* dapat ditingkatkan melalui optimasi desain sistem serta analisis kelayakan ekonomi secara teknis. Awan mengkaji berbagai konfigurasi sistem pembangkit listrik tenaga surya atap, meliputi pemasangan tanpa kemiringan, kemiringan yang disesuaikan secara bulanan, serta sistem pelacak matahari dua poros, dengan tujuan untuk memaksimalkan efisiensi dan meminimalkan biaya energi atau LCOE [10]. Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak EnergyPlus dan SAM menunjukkan bahwa konfigurasi optimal dengan pelacak dua poros menghasilkan nilai LCOE terendah sebesar 4,112 sen USD per kWh, serta memberikan keuntungan ekonomi hingga 0,258 sen USD per kWh dibandingkan dengan sistem pemasangan di atas tanah [10].

Zhu et al melakukan analisis kelayakan teknis dan ekonomi pada berbagai skenario instalasi sistem PLTS *rooftop* di lingkungan kampus universitas di Tiongkok [11]. Penelitian ini membandingkan tujuh skenario desain serta dua strategi pengelolaan energi, yaitu konsumsi mandiri (*self-consumption*) dan penyaluran penuh ke jaringan listrik (*feed-into-grid*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa mode konsumsi mandiri memberikan hasil keekonomian yang lebih baik dibandingkan skenario lainnya. Pada beberapa kasus, tingkat pengembalian investasi mencapai 208% dengan masa balik modal kurang dari satu tahun, memperlihatkan bahwa strategi operasional dan desain sistem memiliki pengaruh signifikan terhadap kelayakan ekonomi PLTS *rooftop*.

Lang et al meneliti profitabilitas sistem *rooftop* PV pada bangunan rumah dan kantor tanpa insentif pemerintah. IRR tertinggi dicapai pada kantor besar (10–13%), sedangkan rumah tangga kecil menghasilkan IRR lebih rendah (2–5%), menunjukkan bahwa skala dan konsumsi energi sangat berpengaruh terhadap kelayakan ekonomi sistem [12].

Serat et al menyajikan strategi desain sistem PLTS *rooftop* yang bertujuan meningkatkan efisiensi energi serta memastikan integrasi yang stabil ke jaringan listrik [13]. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh orientasi panel, sudut kemiringan, jarak antar baris modul, serta pengaturan daya terhadap kinerja

sistem secara keseluruhan. Hasilnya menunjukkan bahwa desain teknis yang tepat dapat meningkatkan output energi hingga 5,6% dan mengurangi potensi kelebihan pasokan daya ke jaringan.

Dehwah et al mengevaluasi sistem PLTS *rooftop* pada bangunan residensial di Al-Khobar, Arab Saudi, menggunakan pendekatan *Life Cycle Cost* (LCC) [14]. Sistem berkapasitas 5,2 kWp untuk apartemen dan 6,5 kWp untuk vila menghasilkan energi tahunan sekitar 6.000–6.200 kWh. *Utilization factor* tercatat 0,21 untuk apartemen dan 0,28 untuk vila, dengan LCOE masing-masing sebesar USD 0,09/kWh dan USD 0,086/kWh. *Discounted Payback Period* diperoleh selama 11 tahun untuk apartemen dan 10 tahun untuk vila.

Sementara itu, Satrio et al. menganalisis sistem *rooftop* PV 1.215 Wp menggunakan PVsyst dan mencatat IRR 8,8–9,6 %, BCR >1,48, serta *payback period* 10–11 tahun [15]. Febriani et al mengevaluasi instalasi 120 kW pada sektor industri dan menemukan NPV sebesar Rp 457,5 juta dengan IRR 8,17 % dan DPP tahun ke-17 [16].

Seluruh kajian tersebut menunjukkan bahwa kelayakan teknis dan ekonomi sistem PLTS *rooftop* sangat dipengaruhi oleh desain sistem, karakteristik konsumsi energi, tarif listrik, serta pendekatan finansial yang digunakan. Penelitian ini dilakukan untuk menelaah aspek-aspek tersebut secara spesifik pada Gedung Balai Pelatihan Pertanian di Provinsi Lampung menggunakan pendekatan studi kasus dan simulasi teknis berbasis perangkat lunak. Hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan dasar pertimbangan bagi pemangku kebijakan dan lembaga terkait dalam mengadopsi energi surya sebagai sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif-kuantitatif dengan pendekatan studi kasus dan pemodelan sistem. Fokus penelitian adalah pada evaluasi teknis dan ekonomi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *rooftop on-grid* menggunakan simulasi berbasis perangkat lunak PVSYST 7.4 dan Helioscope untuk menghasilkan data produksi energi dan

indikator teknis seperti *yield factor*, *capacity factor*, dan *performance ratio*.

Penelitian dilakukan di lokasi Gedung Balai Pelatihan Pertanian, Provinsi Lampung, tepatnya di Jl. Raden Gunawan, Hajimena, Kec. Natar, Kabupaten Lampung Selatan, pada koordinat -5.364889856550868, 105.2196745762648.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Pilihan lokasi atau area penelitian memiliki dampak langsung terhadap variabel penelitian, seperti radiasi harian matahari dan suhu lingkungan, yang dapat memengaruhi produksi energi dari PLTS yang akan dimodelkan.

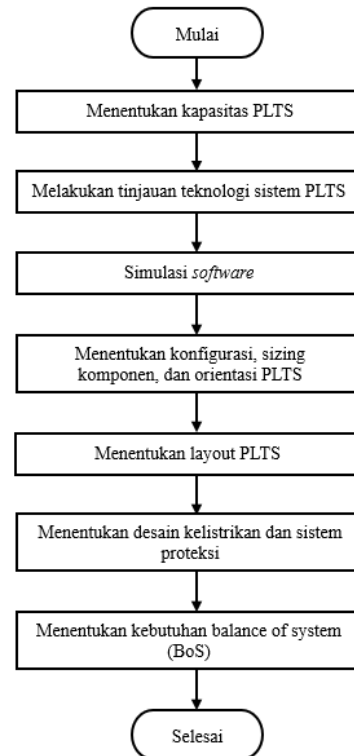
Tabel 1. Data Primer

Data yang dibutuhkan	Sumber data
Beban Listrik Gedung	Pengelolaan Balai Pelatihan Pertanian Lampung

Gambar 1 memberikan penjelasan mengenai lokasi dari tempat penelitian yang akan dilaksanakan. Setelah melakukan pemilihan lokasi, data dikumpulkan melalui observasi lapangan dan pencarian literatur. Tabel 1 dan 2 merinci data primer dan sekunder yang digunakan. Tahap selanjutnya dilakukan perancangan model PLTS yang ditunjukkan oleh Gambar 2.

Perancangan model PLTS dimulai dengan menetapkan kapasitasnya, dan kemudian dilanjutkan dengan langkah-langkah seperti

yang tercantum dalam Gambar 3. Tujuannya adalah untuk menghasilkan model PLTS yang akan dianalisis dari segi teknis dan ekonomi guna menentukan kelayakannya.



Gambar 2. Tahapan merancang model pada PLTS

Tabel 2. Data Sekunder

Data yang dibutuhkan	Sumber data
Denah bangunan	Pengelolaan Balai Pelatihan Pertanian Lampung
Titik koordinat lokasi penelitian	Google Earth
Radiasi matahari	NASA Surface Meteorological and Solar Energy (SMSE)
Spesifikasi dan harga komponen (Rp)	Survei <i>marketplace</i>
Tarif listrik bangunan	Pengelolaan Balai Pelatihan Pertanian Lampung

Dengan menggunakan parameter teknis dan ekonomi yang telah ditetapkan dalam

langkah penelitian sebelumnya, dilakukan simulasi. Hasil simulasi ini mencakup data mengenai performa teknis sistem PLTS serta data ekonomi terkait proyek PLTS. Tabel 3 menunjukkan indikator performa sistem PLTS.

Tabel 3. Indikator Performa Sistem PLTS

Besaran	Satuan
Kapasitas dari sistem	6,05 kWp
Produksi dari energi	8715,9 kWp/tahun
Yield factor (YF)	1.440 kWh/kWp
Capacity factor (CF)	16,4 %
Performance ratio (PR)	80,6 %
Besaran	Satuan

Analisis kelayakan teknis pengeluaran modal dari *cash flow* dilakukan untuk mengevaluasi proyek dengan mempertimbangkan indikator NPV, DPP, dan IRR sebagai dasar pengambilan keputusan proyek PLTS layak dilaksanakan atau tidak. Hasil dari analisis ekonomi tersebut disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Capaian Indikator Ekonomi

Indikator	Satuan	Pengambilan keputusan
LCC	Rp	25 Tahun
NPV	Layak/tidak	Rp 14.686.055,491
IRR	Layak/tidak	12,76 %
PBP	Tahun	Tahun ke-15

Hasil evaluasi kelayakan akan menjadi *output* utama dari laporan ini dan dapat dijadikan rekomendasi untuk melanjutkan proyek instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Rooftop*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perancangan Model Pembangkit Listrik Tenaga Surya Pada Gedung Balai Pelatihan Pertanian Provinsi Lampung

Balai Pelatihan Pertanian Lampung, yang berlokasi di Jl. Raden Gunawan, Hajimena, Kabupaten Lampung Selatan, merupakan institusi dengan sejumlah gedung operasional. Ruang kelas dipilih sebagai lokasi instalasi PLTS *rooftop on-grid* karena memiliki posisi geografis yang sesuai dan luas atap mencukupi, yakni sekitar 300 m². Sistem kelistrikan gedung disuplai penuh dari jaringan PLN dengan kapasitas 23 kVA (380 V, 3-phase) dan

termasuk dalam kategori tarif P-1, tanpa adanya sumber cadangan daya atau *capacitor bank*. Gedung beroperasi selama 9 jam per hari, dengan beban utama berupa AC, kipas, dan lampu, serta beberapa perangkat yang aktif selama 24 jam. Berdasarkan survei, konsumsi listrik harian gedung kelas mencapai 33,63 kWh atau 6.059 kWh per bulan.

Berdasarkan data observasi dan hasil pemodelan teknis, sistem PLTS berkapasitas 6,05 kWp diperkirakan mampu menghasilkan energi sebesar 17,783 kWh per hari, yang mencakup sekitar 71,9% dari kebutuhan listrik harian. Perancangan sistem ini mengacu pada Peraturan Menteri ESDM No. 26 Tahun 2021 tentang pemanfaatan PLTS atap yang terhubung ke jaringan listrik PLN menggunakan sistem *net metering* melalui meter kWh ekspor-impor. Dengan penerapan sistem ini, energi listrik yang tidak terpakai dapat diekspor ke jaringan PLN dan dicatat untuk dikompensasikan, sehingga mendukung efisiensi energi serta pemanfaatan sumber energi terbarukan secara optimal di lingkungan institusional.

4.2 Tinjauan Teknologi Sistem PLTS

Mengacu pada SNI 8395:2017, studi kelayakan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) mencakup analisis terhadap aspek teknis, lingkungan, serta sosial ekonomi yang berkaitan dengan rencana pengembangan sistem. Ketentuan serupa dijelaskan dalam panduan perencanaan dan pemanfaatan PLTS atap (*rooftop*) di Indonesia, yang mendefinisikan sistem PLTS sebagai pemanfaatan energi surya melalui proses konversi energi oleh sel fotovoltaik.

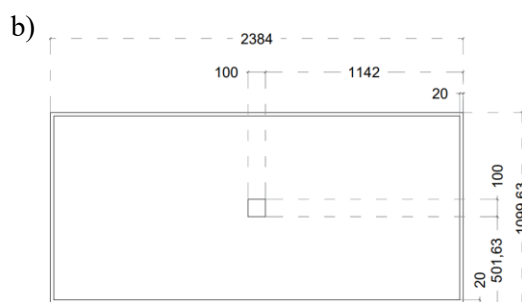
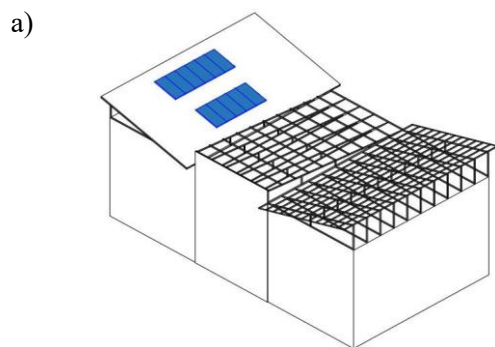
Sistem PLTS tipe *on-grid* terdiri atas komponen utama berupa modul fotovoltaik dan inverter. Komponen utama yang digunakan dalam rancangan sistem adalah Modul PV Trina Solar jenis *monocrystalline* dan Inverter Huawei SUN2000-6KTL-L1. Modul fotovoltaik dipilih berdasarkan tingkat adopsi yang tinggi di Indonesia serta reputasi kinerjanya yang telah terbukti dalam berbagai studi. Dalam kondisi iklim tropis Indonesia, modul *monocrystalline* menunjukkan performa teknis terbaik dengan nilai *performance ratio* (PR) yang lebih tinggi dibandingkan jenis lainnya, serta tingkat degradasi energi yang rendah [17], [18]. Hal ini sejalan dengan hasil

evaluasi jangka panjang yang menunjukkan bahwa sistem PV di Indonesia (Jakarta) memiliki PR rata-rata sebesar 0,65 dan tingkat degradasi tahunan sekitar 2,07% [19].

Selain performa teknis, kemudahan akses dan ketersediaan modul di pasar domestik turut menjadi pertimbangan, sebagaimana terlihat dari peningkatan signifikan instalasi PLTS atap sebesar 17% dalam periode Desember 2019 hingga April 2020 [20]. Oleh karena itu, pemilihan modul PV mempertimbangkan baik aspek teknis maupun aspek keberterimaan di pasar nasional. Inverter berfungsi mengonversi listrik arus searah (DC) dari modul PV menjadi arus bolak-balik (AC) kompatibel untuk beban dan integrasi jaringan. Inverter Huawei tipe SUN2000-6KTL-L1 dipilih karena memiliki efisiensi tinggi (hingga 98,4 %) dan reputasi global dalam hal keandalan, terbukti melalui uji ketahanan dan usia operasional hingga 25 tahun. Produk ini juga dilengkapi fitur proteksi menyeluruh—AFCI untuk deteksi busur, proteksi input DC dan output AC—yang meningkatkan keamanan serta menjaga stabilitas operasional sistem [21].

4.3 Perancangan Mounting pada Rooftop

Berdasarkan gambar 1 yang merupakan bangunan Gedung Balai Pelatihan Pertanian Lampung.

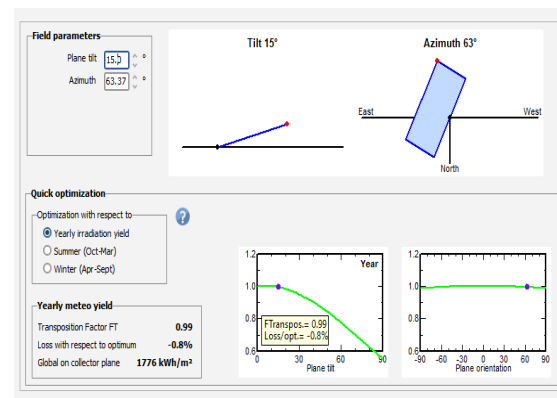


Gambar 3. a) ilustrasi konstruksi kanopi, b) PV module frame

Area atap seluas 300 m² direncanakan sebagai tempat instalasi PLTS dengan struktur *rooftop* yang menggunakan genteng. Terdapat bagian Gedung yang tidak rata yaitu di bagian tengah Gedung yang condong masuk kedalam sekitar 2 meter. Pada *rooftop*, struktur *mounting* dibutuhkan sebagai struktur instalasi modul PV. Perancangan PLTS *rooftop* kali ini, direkomendasikan untuk menggunakan *mounting* jenis *flush mounth racking* untuk modul dari PV yang diilustrasikan pada gambar 3.

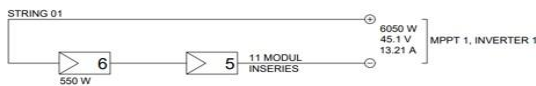
4.4 Desain Orientasi, Konfigurasi, dan Sizing PLTS

Desain PLTS *rooftop on-grid* pada penelitian ini menggunakan *software* pemodelan PVsyst dan Helioscope. Desain dibuat sesuai kapasitas pada PLTS *rooftop* yang telah ditentukan yaitu 6,05 kWp, melalui pemodelan dengan mempertimbangkan kondisi yang didapatkan dari hasil survei dan simulasi pada PVsyst pada Gambar 4.



Gambar 4. Orientasi PLTS Rooftop

Orientasi modul PV ditentukan berdasarkan arah bangunan, posisi matahari, dan kondisi geografis lokasi, dengan sudut azimuth 63,37° ke arah barat dan sudut kemiringan 15° mengikuti kemiringan atap. Pemodelan menggunakan PVsyst dan Helioscope menunjukkan luas area atap yang tersedia untuk instalasi sebesar 18,6 m². Konfigurasi sistem terdiri dari 11 modul PV berkapasitas 550 Wp yang disusun secara seri dengan jarak antar modul 0,2 m, dan area khusus 0,5 m disediakan untuk akses perawatan. Total kapasitas sistem yang dirancang adalah 6,05 kWp, sesuai hasil pemodelan pada gambar 4.

Gambar 5. *String Configuration*

Dalam konfigurasi PLTS *rooftop* yang dirancang, modul PV disusun secara seri membentuk satu *string*, dimana arus tetap konstan dan tegangan meningkat sesuai jumlah modul. Satu string terdiri dari 11 modul PV yang dihubungkan ke inverter melalui Maximum Power Point Tracker (MPPT), sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5. Berdasarkan spesifikasi teknis modul dan perhitungan rangkaian seri, tegangan total *string* mencapai 45,1 V, sebagaimana dijelaskan dalam Persamaan 1.

$$V_{string} = V_{modul} \times n \quad (1)$$

$$V_{string} = 4,1 \times 11 \text{ modul}$$

$$V_{string} = 45,1 \text{ V}$$

Pada rangkaian seri, arus mengalir pada setiap *string* ditunjukkan persamaan 2 sebesar 13,21 A.

$$I_{string} = I_{modul 1} = I_{modul n} \quad (2)$$

$$I_{string} = 13,21 \text{ A}$$

Berdasarkan jumlah tegangan dan arus pada tiap *string*, daya yang digunakan dari setiap *string* yang ditunjukkan persamaan 3 sebesar 6,05 kW.

$$P_{string} = P_{modul 1} + P_{modul n} \quad (3)$$

$$P_{string} = 6050 \text{ W}$$

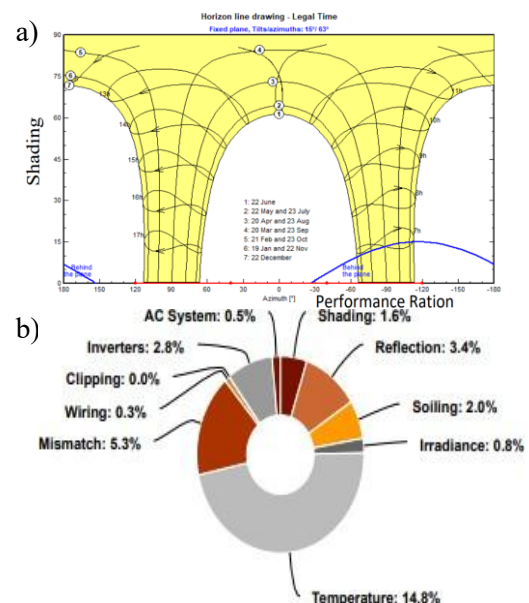
$$P_{string} = 6,05 \text{ kW}$$

4.5 Analisis aspek teknis PLTS

Analisis teknis PLTS *rooftop* dilakukan melalui pemodelan menggunakan perangkat lunak PVsyst dan Helioscope untuk membandingkan hasil dan meningkatkan akurasi penilaian kinerja sistem. Kedua pemodelan dilakukan dengan parameter operasi yang seragam, termasuk kondisi STC, layout, dan data cuaca. Hasil simulasi menunjukkan perbedaan nilai iradiasi tahunan (GHI), yakni 1786,8 kWh/m² pada PVsyst dan 1573,7 kWh/m² pada Helioscope, yang berdampak pada perbedaan produksi energi tahunan sebesar 8715,9 kWh dan 7066,6 kWh. Sistem PLTS menghasilkan *Yield Factor* (YF)

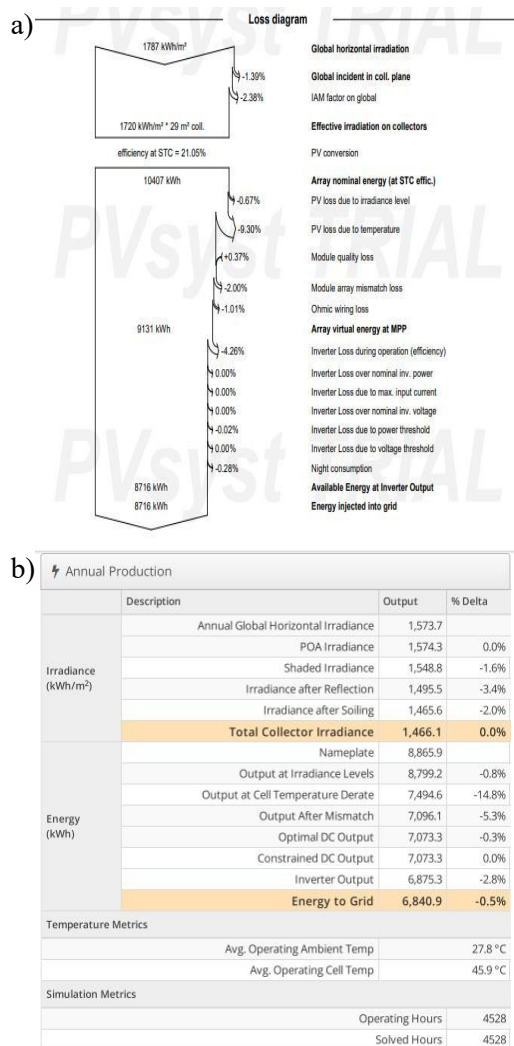
sebesar 1,440 kWh/kWp (PVsyst) dan 1,167 kWh/kWp (Helioscope), sesuai dengan potensi spesifik wilayah yang tercatat di Global Solar Atlas. *Capacity Factor* (CF) dari sistem sebesar 16,4%, mendekati standar nasional menurut Kementerian ESDM sebesar 17%. *Performance Ratio* (PR) yang diperoleh dari PVsyst sebesar 80,6% dan dari Helioscope 65,3%, menunjukkan sistem mampu mengonversi energi matahari secara efisien, dengan kinerja berada dalam ambang nilai optimal sebagaimana direkomendasikan oleh USAID.

Hasil simulasi *shading* menggunakan perangkat lunak PVsyst menunjukkan bahwa tidak terjadi bayangan signifikan selama jam efektif radiasi matahari (10.00–14.00), sehingga tidak berdampak besar terhadap produktivitas sistem. Analisis serupa menggunakan Helioscope dengan parameter yang sama menghasilkan nilai *shading loss* sebesar 1,6%, yang mencakup akumulasi bayangan dari debu, kotoran burung, awan, dan panel itu sendiri. Perbandingan hasil *shading* dari kedua *software* dapat dilihat pada gambar 5.

Gambar 5. a) ISO *shading* PVsyst, b) Hasil *shading* Helioscope

Pada gambar 6 merupakan *losses* hasil dari simulasi *software* PVsyst dan Helioscope. Berdasarkan hasil simulasi pada Gambar 4.5, rugi-rugi (*losses*) terbesar pada sistem PLTS berasal dari pengaruh temperatur, yaitu sebesar 9,30% pada PVsyst dan 14,8% pada

Helioscope. Rugi-rugi terbesar berikutnya disebabkan oleh *shading*, masing-masing sebesar 2,38% dan 5,3%. Pengaruh temperatur sangat signifikan terhadap kinerja modul PV, karena peningkatan suhu menyebabkan penurunan tegangan, yang berdampak langsung pada penurunan daya output. Secara keseluruhan, nilai *Performance Ratio* (PR) dari kedua simulasi, yaitu 80% (PVsyst) dan 78% (Helioscope), menunjukkan bahwa sistem PLTS yang dirancang memiliki kinerja yang sangat baik meskipun terdapat beberapa faktor kehilangan energi.



Gambar 6. a) *Losses* diagram simulasi PVsyst, b) Detail hasil simulasi Helioscope

4.6 Analisis Aspek Ekonomi

Life Cycle Cost (LCC) merupakan total biaya sistem PLTS *rooftop* selama umur proyek 25 tahun, yang mencakup biaya investasi awal

($C_{capital}$), biaya operasional dan pemeliharaan tahunan ($C_{o\&m}$), biaya penggantian komponen ($C_{replacement}$), serta *salvage value*. Berdasarkan Rencana Anggaran Biaya (RAB), nilai investasi awal sistem PLTS 6,05 kWp adalah sebesar Rp 69.994.445,00, atau Rp 11.569.329,00/kWp, sesuai kisaran biaya investasi nasional menurut Kementerian ESDM. Komponen utama meliputi modul PV, inverter Huawei, *mounting system*, komponen distribusi AC/DC, kabel, dan jasa instalasi. Biaya penggantian inverter dua kali selama masa proyek diperkirakan sebesar Rp 20.000.000,00, sedangkan biaya operasional dan pemeliharaan tahunan diasumsikan 1% dari nilai investasi, yaitu Rp 699.944,45 per tahun, dengan nilai sekarang (*present worth*) Rp 6.353.395,77 menggunakan *discount rate* 10%.

Berdasarkan seluruh jumlah biaya yang telah dihitung, maka *Life Cycle Cost* (LCC) dari sistem PLTS *rooftop* Gedung Balai Pelatihan Pertanian Lampung dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.

$$LCC = C_{capital} + \sum C_{O\&M} + \sum C_{replacement} \quad (4)$$

$$LCC = \text{Rp } 69.994.455 + \text{Rp } 6.353.395,77 + \text{Rp } 20.000.000$$

$$LCC = \text{Rp } 96.347.850,77$$

Dengan demikian, total LCC sistem PLTS *rooftop* yang dirancang mencapai Rp 96.347.850,77, dan *capital recovery factor* (CRF) sistem sebesar 0,1102. *Levelized Cost of Energy* (LCOE) didapatkan menggunakan beberapa faktor biaya *life cycle cost* (LCC), *capital recovery factor* (CRF), dan *annual energy production* (kWh). Biaya energi PLTS *rooftop* Gedung Balai Pelatihan Pertanian Lampung, ditentukan dengan persamaan 5.

$$LCOE = \frac{\text{Life Cycle Cost (Rp)} \times \text{CRF}}{\text{Annual energy production (kWh)}} \quad (5)$$

$$LCOE = \frac{96.347.850,77 \times 0,1102}{8715,9}$$

$$LCOE = \text{Rp } 1.218,18/\text{kWh}$$

Nilai ini mencerminkan biaya rata-rata per satuan energi listrik yang dihasilkan selama umur proyek dan dapat digunakan sebagai dasar evaluasi keekonomian sistem PLTS *rooftop* pada Gedung Balai Pelatihan Pertanian Lampung.

4.7 Analisis Kelayakan Proyek PLTS

Berdasarkan arus kas pada proyek PLTS *rooftop* selama 25 tahun dibuat menggunakan input tabel 5. Aliran kas yang masuk atau *incoming cash flow* (ICF), setiap tahunnya didapatkan dari hasil perkalian produksi tahunan atau *annual energy production* (kWh) dengan biaya energi (LCOE) dengan perhitungan sebagai berikut:

$$ICF = AEP (kWh) \times LCOE (Rp/kWh) \quad (5)$$

$$ICF = 8715,9 \times 1.218,18$$

$$ICF = 10.617.535,37 \text{ per tahun}$$

Kas bersih atau *net cash flow* (NCF) tiap tahunnya merupakan hasil dengan pengurangan antara aliran kas yang masuk dan biaya pengeluaran tahunan, yaitu biaya operasional dan pemeliharaan ($C_{o\&m}$), dan biaya penggantian dari komponen ($C_{replacement}$). Gambar 7 menunjukkan proyek aliran kas dari PLTS *Rooftop*.

periode	incoming cash flow Rp	Capex Rp	Opex Rp	Net Cash Flow Rp	DF (%)	NPV NCF	Cumulative NPV NCF
0	Rp 69.994.445,00	Rp 69.994.445,00	Rp 69.994.445,00	Rp -69.994.445,00	1,000	Rp -69.994.445,00	Rp -69.994.445,00
1	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,909	Rp 9.015.991,741	Rp -60.978.453,251
2	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,826	Rp 8.196.356.132	Rp -52.782.097,122
3	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,751	Rp 7.451.252,847	Rp -45.330.844,275
4	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,683	Rp 6.775.848,043	Rp -38.557.016,232
5	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,621	Rp 6.158.845,876	Rp -32.398.170,356
6	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,564	Rp 5.599.231,923	Rp -26.800.938,433
7	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,513	Rp 5.089.292,284	Rp -21.711.646,150
8	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,467	Rp 4.624.829,238	Rp -17.086.816,912
9	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,424	Rp 4.200.624,689	Rp -12.876.192,223
10	Rp 10.617.535,37	Rp 10.000.000,00	Rp 69.944,45	Rp -10.000,00	0,384	Rp -3.772,248	Rp -12.810.574,472
11	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,350	Rp 3.476.055,115	Rp -9.334.519,357
12	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,319	Rp 3.169.050,105	Rp -6.165.469,252
13	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,290	Rp 2.872.772,822	Rp -3.292.696,430
14	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,263	Rp 2.611.811,657	Rp -610.884,773
15	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,239	Rp 2.374.195,412	Rp 1.344.311,661
16	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,216	Rp 2.158.356,741	Rp 3.502.668,402
17	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,194	Rp 1.962.142,482	Rp 5.464.810,884
18	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,180	Rp 1.793.765,802	Rp 7.258.576,686
19	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,164	Rp 1.621.805,345	Rp 8.880.382,031
20	Rp 10.617.535,37	Rp 10.000.000,00	Rp 69.944,45	Rp -10.000,00	0,148	Rp -1.240,593	Rp 9.879.141,438
21	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,135	Rp 1.340.169,723	Rp 11.219.311,161
22	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,123	Rp 1.210.316,112	Rp 12.429.627,273
23	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,112	Rp 1.071.775,284	Rp 13.501.402,557
24	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,102	Rp 951.333,833	Rp 14.452.736,390
25	Rp 10.617.535,37	-	Rp 69.944,45	Rp 9.917.590,92	0,092	Rp 846.655,491	Rp 15.299.391,881

Gambar 7. Proyek aliran kas dari PLTS *Rooftop* Gedung Balai Pelatihan Pertanian Lampung

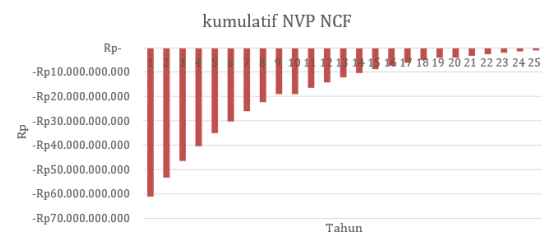
Dalam melakukan perhitungan terhadap *net present value* dari arus kas tahun ke-25 dari masa proyek, diperlukannya *discounted factor* (i) sebesar 10%, dengan nilai *discounted factor* dapat ditentukan sebagai nilai *minimum attractive rate of return*, dimana nilai dari MARR merupakan nilai minimal dari tingkat pengembalian atau suku bunga yang biasa diterima oleh investor.

Nilai MARR sebesar 10% ditentukan berdasarkan nilai yang lebih besar suku bunga bank, dengan pertimbangan risiko investasi. Perhitungan *discounted factor* untuk tiap tahunnya dianalisis menggunakan persamaan 6.

$$DF_n = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (6)$$

$$DF_{\text{tahun ke-1}} = \frac{1}{(1+i)^1} = 0,909$$

Berdasarkan hasil perhitungan *cash flow* dapat dilihat pada gambar 7. Grafik arus kas NPV kumulatif dapat dilihat pada gambar 8. Arus kas kumulatif dalam bentuk grafik memudahkan dalam mengamati fluktuasi kas pada tiap periode, tahun ke-0 proyek ini nilai arus kasnya negatif karena pengeluaran biaya investasi awal. Tahun ke-14 hingga-15 kas kumulatif mengalami balik modal dan pengeluaran kas untuk investasi awal telah tertutup oleh aliran kas masuk. Pada tahun ke-25 merupakan keuntungan yang didapat pada masa akhir proyek PLTS *rooftop*.



Gambar 8. Kumulatif NPV *cash flow*

Tabel 6 menunjukkan nilai total *net cash flow* NPV yang diperoleh dengan mengalikan dengan *discount factor* sebesar Rp 84.680.500,491, sedangkan nilai dari investasi awal adalah Rp 69.994.445,00 untuk mencari nilai dari *Discount Factor*, nilai investasi awal ditambah dengan nilai dikolom paling bawah bagian kumulatif *NVP NCF*. Nilai dari NPV dari proyek ini dapat dihitung menggunakan persamaan 7.

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+i)^n} - C_0 \quad (7)$$

$$NPV = Rp(84.680.500,491 - 69.994.445)$$

$$NPV = Rp 14.686.055,491$$

$$NPV > 0$$

Hasil perhitungan NPV didapatkan nilai keuntungan proyek PLTS *rooftop* yang didapatkan pada tahun ke-25 adalah sebesar Rp 14.686.055,491. Nilai hasil perhitungan NPV mendapatkan hasil positif. Kriteria NPV > 0 menunjukkan bahwa dari investasi dilakukan memberikan keuntungan dan proyek PLTS *rooftop* pada bangunan Gedung kantor Balai Pelatihan Pertanian Lampung layak untuk dijalankan.

Pada gambar 7, terlihat bahwa pada tahun ke-14 nilai dari nilai NPV arus kas bersih kumulatif mendekati nilai investasi awal

dengan kekurangan sebesar Rp 790.085,261 dan pada tahun berikutnya nilai arus kas bersih adalah Rp 2.374.192,415. Berdasarkan persamaan 8, dapat menghitung *discounted payback period*.

$$DPP = a + \frac{b-c}{d} \times 1 (\text{tahun}) \quad (8)$$

$$DPP = 14 + \frac{\text{Rp } 790.085,261}{\text{Rp } 2.374.192,415} \times 1 (\text{tahun})$$

$$DPP = 14,33 \text{ tahun}$$

$$DPP \approx 14 \text{ tahun } 3 \text{ bulan}$$

Hasil dari *discounted payback period* (DPP) selama 14 tahun 3 bulan artinya investasi pada proyek PLTS *rooftop* pada Gedung Balai Pelatihan Pertanian Lampung akan kembali balik modal pada tahun ke-15 Masa proyek berlangsung. Hasil perhitungan DPP periode pengembalian nilai investasi lebih singkat dari pada *lifetime* proyek, maka proyek PLTS *rooftop* Gedung Balai Pelatihan Pertanian Lampung untuk dilaksanakan. Nilai *internal Rate of Return* merupakan *discount factor* yang menyebabkan NPV bernilai sama dengan nol, seperti pada persamaan 8.

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+IRR)^n} - C_0 = 0 \quad (8)$$

Hasil dari *trial and error* didapatkan nilai *discount factor* yang menyebabkan NPV bernilai negatif sebesar -Rp 1.112.338,964 sedangkan *discount factor* yang menyebabkan NPV bernilai positif sebesar Rp 3.543.200,225 berdasarkan informasi tersebut IRR dapat dihitung melalui interpolasi menggunakan persamaan 9.

$$IRR = i_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \times (i_2 - i_1) \quad (9)$$

$$IRR = 12\% + \frac{3.543.200,225}{3.534.200,225 - (-1.112.338,964)} \times (13\% - 12\%)$$

$$IRR = 12,76\%$$

Hasil dari interpolasi tersebut didapatkan nilai IRR sebesar 12,76 % artinya ketika *discount rate* (i) sama dengan 12,76% maka NPV bernilai 0. Nilai dari *internal rate of return* melebihi *minimum attractive rate of return* (MARR) atau (IRR > MARR). Melalui kriteria kelayakan investasi dalam pemodelan PLTS *rooftop* ini menghasilkan tingkat pengembalian atau bunga yang lebih tinggi dari MARR. Ini

menunjukkan bahwa investasi tersebut menguntungkan secara finansial, dan proyek PLTS *rooftop* di Gedung Balai Pelatihan Pertanian Lampung layak untuk dijalankan.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan Hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Perancangan PLTS dengan sistem *on-grid* berkapasitas 6,05 kWp *rooftop* Gedung Balai Pelatihan Pertanian Lampung. Hasil dari simulasi, sistem menerima iradiasi matahari sebesar 1786,8 kWh/m²/per/tahun, produksi energi mencapai 8715,9 kWh/per/tahun, dan *Performance Ration* (PR) sistem sebesar 80,6%. Analisis dari aspek teknis rancangan PLTS *rooftop* sistem *on-grid system* layak (*feasible*) untuk dilaksanakan.
2. Biaya investasi awal proyek PLTS *rooftop* 6,05 kWp sebesar Rp 69.994.445,00. Analisis dari aspek ekonomi didapatkan *life cost cycle* (LCC) sistem PLTS *rooftop on-grid* selama masa proyek 25 tahun sebesar Rp 96.347.850,77 dengan *Levelized cost of energy* (LCOE) sebesar Rp 1.218,18/kWh.
3. Analisis kelayakan proyek, investasi dalam PLTS *rooftop* menghasilkan *Net present Value* (NPV) yang positif, menunjukkan bahwa proyek ini dapat memberikan keuntungan sebesar Rp 14.686.055,491. Melalui penggunaan metode *Discounted payback period*, ditemukan bahwa investasi dalam proyek ini akan mengembalikan modal di tahun ke-15 pada masa proyek. Selain itu, proyek ini memiliki tingkat *internal rate of return* sebesar 12,76% yang lebih tinggi dari pada tingkat *minimum attractive rate of return*. Berdasarkan hasil analisis ini dapat disimpulkan bahwa proyek PLTS 6,05 kWp sistem *on-grid* pada Gedung Balai Pelatihan Pertanian Lampung layak secara finansial untuk dilaksanakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Balai Pelatihan Pertanian Lampung atas dukungan fasilitas, sumber daya sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Penulis juga menyampaikan terima kasih atas izin yang diberikan sehingga lokasi Balai

Pelatihan Pertanian Lampung dapat dijadikan sebagai objek penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abyan Hilmy Yafi, Akbar Bagaskara, Alvin Putra Sisdwinugraha, dan Anindita Hapsari, "Indonesia Energy Transition Outlook 2024," Institute for Essential Services Reform (IESR), 2024. Diakses: 1 Juli 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://iesr.or.id/en/pustaka/indonesia-energy-transition-outlook-2024>
- [2] ASHRAE, "Guideline 14 – Measurement of Energy and Demand Savings," American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 2011. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-14>
- [3] A. B. Awan, "Optimization and techno-economic assessment of rooftop photovoltaic system," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 11, no. 3, hlm. 033501, Mei 2019, doi: [10.1063/1.5080551](https://doi.org/10.1063/1.5080551).
- [4] Blank, Leland T. dan Tarquin, Anthony J., *Engineering Economy*, 7 ed. New York: McGraw-Hill Education, 2012.
- [5] K. Branker, M. J. M. Pathak, dan J. M. Pearce, "A review of solar photovoltaic leveled cost of electricity," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, hlm. 4470–4482, Des 2011, doi: [10.1016/j.rser.2011.07.104](https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.104).
- [6] Gilbert M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, 2 ed. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley, 2023.
- [7] H. Gusmedi, R. P. Putra, dan A. S. Samosir, "Desain Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) On-Grid 60 KWP," *JITET*, vol. 13, no. 1, Jan 2025, doi: [10.23960/jitet.v13i1.5537](https://doi.org/10.23960/jitet.v13i1.5537).
- [8] S. P. Hadi, B. Prabawani, dan H. Purnaweni, "Environmental and social issues on energy policy in indonesia," *E3S Web Conf.*, vol. 73, hlm. 02002, 2018, doi: [10.1051/e3sconf/20187302002](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187302002).
- [9] T. Hai dkk., "Techno-economic and environmental analysis of a grid-connected rooftop solar photovoltaic system in three climate zones," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 19, hlm. 1725–1739, Jan 2024, doi: [10.1093/ijlct/ctae123](https://doi.org/10.1093/ijlct/ctae123).
- [10] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 26 Tahun 2021 tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik untuk Kepentingan Umum," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta, 2021.
- [11] kiloWattsol Solar Expert, "Huawei Inverter Lifetime Report: Inverters models SUN2000-12–150KTL," kiloWattsol, Technical Report, 2024.
- [12] N. Mat Isa, C. Wei Tan, dan A. Yatim, "A techno-economic assessment of grid connected photovoltaic system for hospital building in Malaysia," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 217, hlm. 012016, Jul 2017, doi: [10.1088/1757-899X/217/1/012016](https://doi.org/10.1088/1757-899X/217/1/012016).
- [13] Novagia Adita dan E. A. Setiawan, "Analysis of performance and economic value of thin film and monocrystalline photovoltaic systems in the tropical area of Jakarta," *IJECBE*, vol. 1, no. 1, hlm. 33–43, Sep 2023, doi: [10.62146/ijecbe.v1i1.19](https://doi.org/10.62146/ijecbe.v1i1.19).
- [14] Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi, "Outlook Energi Indonesia 2021," Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), Jakarta, 2021. Diakses: 1 Juli 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.bppt.go.id/pupliptek/outlook-energi-indonesia-2021>
- [15] O. A. Rosyid, "Comparative performance testing of photovoltaic modules in tropical climates of Indonesia," dalam *AIP Conference Proceedings*, Jatinangor, Indonesia: AIP Publishing LLC, 2016, hlm. 020004. doi: [10.1063/1.4941865](https://doi.org/10.1063/1.4941865).
- [16] Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, "Laporan Kajian Penelaahan Neraca Energi Nasional 2020," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM), Jakarta, 2020.
- [17] D. F. Silalahi, A. Blakers, M. Stocks, B. Lu, C. Cheng, dan L. Hayes, "Indonesia's Vast Solar Energy Potential," *Energies*, vol. 14, no. 17, hlm. 5424, Agu 2021, doi: [10.3390/en14175424](https://doi.org/10.3390/en14175424).
- [18] A. P. Sitompul dan D. Johar, "Microgrid Design in Electricity Supply in Paper Factories," *IJSSR*, vol. 3, no. 8, hlm. 1897–1902, Agu 2023, doi: [10.46799/ijssr.v3i8.475](https://doi.org/10.46799/ijssr.v3i8.475).
- [19] A. Tihane, M. Boulaid, A. Elfanaoui, M. Nya, dan A. Ihlal, "Performance analysis of mono and poly-crystalline silicon photovoltaic modules under Agadir climatic conditions in Morocco," *Materials Today: Proceedings*, vol. 24, hlm. 85–90, 2020, doi: [10.1016/j.matpr.2019.07.620](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.620).

- [20] A. H. Yafi *dkk.*, “Peaking Indonesia’s Energy Sector Emission by 2030: The Beginning or The End of Energy Transition Promise,” 2024.
- [21] X. Zhu, Y. Lv, J. Bi, M. Jiang, Y. Su, dan T. Du, “Techno-Economic Analysis of Rooftop Photovoltaic System under Different Scenarios in China University Campuses,” *Energies*, vol. 16, no. 7, hlm. 3123, Mar 2023, doi: [10.3390/en16073123](https://doi.org/10.3390/en16073123).