



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 4 No. 4 (2025) pp: 4309-4317

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Perancangan dan Analisis Tekno-Ekonomi Solar Carport untuk Suplai Beban Auxiliary pada Main Station Building PLTS Sengkol

Nanang Andhika Putra¹, Muhammad Yusron², Wieny Amalia Pratiwi³, Dian Susila Ratu⁴, Supriyatna⁵, I Made Budi Suksmadana⁶, I made Ari Nratha⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

¹nanangandhika66@gmail.com, ²muhammadvusron350@gmail.com, ³wienyamalia@gmail.com,
⁴diansusilaratu@gmail.com, ⁵supriyatna@unram.ac.id, ⁶mdbudisuk@unram.ac.id, ⁷nratha@unram.ac.id

Abstrak

Pemanfaatan area parkir sebagai solar carport pada lingkungan pembangkit listrik menawarkan solusi ganda dalam meningkatkan efisiensi energi sekaligus mengoptimalkan aset lahan yang sebelumnya tidak produktif. Namun, implementasi sistem ini sering terkendala oleh tingginya biaya konstruksi, terutama ketika menggunakan struktur baja berat. Penelitian ini bertujuan merancang sistem solar carport berkapasitas 24,2 kWp dengan memanfaatkan struktur hibrida di PLTS Sengkol sebagai upaya menekan biaya investasi, sekaligus mensubstitusi beban pemakaian sendiri (auxiliary load) pada Main Station Building. Metode penelitian menggunakan simulasi PVSyst berbasis profil beban dinamis serta analisis ekonomi Discounted Cash Flow (DCF) untuk menilai performa teknis dan kelayakan finansial. Hasil penelitian menunjukkan bahwa strategi struktur hibrida mampu menurunkan biaya investasi menjadi Rp 9,05 juta/kWp, jauh lebih rendah dibandingkan standar industri. Sistem ini diproyeksikan menghasilkan energi sebesar 40,65 MWh/tahun dengan Performance Ratio (PR) sebesar 81,8%, sehingga mampu memenuhi 100% kebutuhan beban auxiliary gedung. Dari aspek ekonomi, proyek menjadi layak dengan nilai Net Present Value yang positif dan masa pengembalian modal kurang dari empat tahun. Temuan ini menegaskan bahwa solar carport dengan desain hibrida merupakan solusi efektif, ekonomis, dan aplikatif untuk pengembangan energi terbarukan pada infrastruktur pembangkit di Indonesia, sekaligus memberikan potensi implementasi lebih luas pada fasilitas industri lain yang membutuhkan efisiensi energi berkelanjutan.

Kata kunci: Auxiliary Power, Efisiensi Energi, Net Present Value, Solar Carport, Struktur Hibrida

1. Latar Belakang

Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar karena berada di garis khatulistiwa dengan iradiasi tahunan rata-rata 4,8 kWh/m² per hari. Potensi ini menjadikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang paling prospektif dalam mendukung pencapaian target bauran energi baru terbarukan sebesar 23% pada 2025 sesuai Kebijakan Energi Nasional (KEN). Seiring meningkatnya kebutuhan energi dan tingginya biaya listrik, pemanfaatan lahan non-produktif seperti area parkir melalui pembangunan solar carport menjadi solusi strategis yang tidak hanya menghasilkan listrik bersih, tetapi juga mengoptimalkan infrastruktur eksisting.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa solar carport terbukti efektif dalam menurunkan konsumsi listrik gedung dan mendukung kemandirian energi. [1] merancang grid-connected solar carport menggunakan perangkat lunak System Advisor Model (SAM) dengan kapasitas 102 modul dan produksi energi awal 42.150 kWh/tahun, serta terbukti memiliki nilai keekonomian yang baik berdasarkan analisis biaya investasi, LCOE, dan masa balik modal. Penelitian lanjutan oleh penulis yang sama juga menunjukkan bahwa stand-alone solar carport mampu menyediakan energi untuk beban harian 65 kWh melalui kombinasi PV, baterai, inverter, dan charge controller yang disesuaikan dengan kebutuhan sistem. Selain itu, [2] mengembangkan desain dan simulasi grid-connected solar carport untuk perusahaan telekomunikasi di Libya menggunakan PVSOL Premium 7.5, menunjukkan bahwa sistem ini mampu menurunkan konsumsi energi dari jaringan serta memberikan performa optimal melalui pemilihan sudut kemiringan, konfigurasi modul, dan analisis shading. Ketiga penelitian tersebut menegaskan bahwa solar carport merupakan solusi teknis dan ekonomis yang layak untuk aplikasi komersial maupun industri.

PLTS Sengkol dengan kapasitas 7 MWp mulai mengadopsi instalasi solar carport untuk mendukung sebagian beban operasional pada Main Station Building (MSB), sehingga dapat mengurangi ketergantungan terhadap suplai

Perancangan dan Analisis Tekno-Ekonomi Solar Carport untuk Suplai Beban Auxiliary pada Main Station Building PLTS Sengkol

listrik PLN dan menurunkan *auxiliary power* pembangkit. Penerapan *solar carport* di lingkungan pembangkit menghadirkan tantangan khusus, seperti potensi *shading* dari bangunan operasional, kebutuhan struktur biaya yang lebih kuat, keterbatasan orientasi modul, serta mempertimbangkan aspek proteksi dan konfigurasi sistem yang sesuai standar. Meskipun demikian, kajian akademik mengenai desain dan simulasi PLTS atap parkir pada fasilitas pembangkit skala utilitas masih terbatas, terutama yang menggunakan data lapangan dan pemodelan sistem berbasis perangkat lunak seperti PVsyst atau HOMER.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini berfokus pada perencanaan, pemodelan, dan simulasi PLTS atap parkir (*solar carport*) untuk mendukung beban internal gedung utama PLTS Sengkol. Melalui pendekatan simulatif menggunakan PVsyst serta analisis performa energi berdasarkan kondisi aktual lokasi, penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi desain yang optimal, realistic, dan aplikatif untuk pengembangan *solar carport* pada sektor pembangkit listrik di Indonesia

1.1. Kajian Teoritis

1.1.1. Evolusi Implementasi *Solar Carport* pada Infrastruktur Industri

Dalam beberapa tahun terakhir pemanfaatan lahan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) telah mengalami perubahan pendekatan dari aplikasi residensial menuju optimalisasi area tidak produktif, khususnya struktur atap parkir (*solar carport*). Studi terdahulu tentang pemanfaatan panel surya terpasang di atap gedung atau kampus menunjukkan bahwa instalasi PLTS mampu memberikan efisiensi biaya listrik yang signifikan [3] [4]. Namun, pendekatan pada penelitian-penelitian tersebut berfokus pada penghematan tagihan listrik dengan asumsi penggunaan profil beban statis dan tidak memperhitungkan dinamika operasional yang lebih kompleks, seperti yang ditemukan dalam industri pembangkit listrik.

Seiring perkembangan teknologi dan kebutuhan untuk meningkatkan penggunaan energi secara efisien, beberapa penelitian terkini seperti mulai mengintegrasikan *solar carport* dengan infrastruktur pengisian kendaraan listrik [5] [6]. Meskipun penelitian tersebut berhasil memvalidasi kelayakan teknis namun masih memiliki kelemahan mendasar berupa penggunaan asumsi profil beban sederhana yang terpisah dari sistem utilitas industri. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan pendekatan desain yang menyesuaikan kapasitas *carport* terhadap kebutuhan beban gedung operasional pembangkit serta ketersediaan lahan.

1.1.2. Pemodelan Simulasi dan Analisis Shading (Bayangan)

Akurasi dalam peramalan energi untuk desain sistem fotovoltaik ditentukan oleh validitas metode simulasi dan parameter input lingkungan terutama shading yang dianggap penting pada pemasangan Solar Carport di area terbuka. Dalam evaluasi kinerja PLTS *carport* membuktikan bahwa pengabaian faktor bayangan (*shading*) dari objek sekitar dapat menyebabkan deviasi produksi energi yang signifikan hingga 34,1% [7]. Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan perangkat lunak simulasi seperti PVSyst menjadi instrumen penting dalam memitigasi kerugian energi akibat bayangan (*shading loss*) yang cenderung tidak terkuantifikasi secara akurat melalui metode perhitungan konvensional.

Perangkat lunak PVSyst telah diakui sebagai instrumen standar untuk simulasi sistem fotovoltaik, khususnya dalam pemodelan geometri tiga dimensi (3D) guna menganalisis dampak *shading*. Keunggulan teknis ini sejalan dengan studi komparasi [8] yang menunjukkan superioritas analisis detail PVSyst dibandingkan perangkat lunak optimasi seperti HOMER. Berdasarkan pada landasan tersebut penelitian ini menerapkan simulasi 3D untuk memetakan profil bayangan secara realistis. Metode ini bertujuan untuk menghasilkan estimasi *Performance Ratio* (PR) dan *Yield Factor* yang presisi guna meminimalkan galat prediksi pada studi kelayakan teknis. Pendekatan ini sekaligus menjadi langkah mitigasi teknis yang belum banyak diterapkan secara optimal pada studi *carport* skala kecil sebelumnya.

1.1.3. Kerangka Analisis Tekno-Ekonomi

Evaluasi terhadap kelayakan investasi dalam energi terbarukan umumnya didasarkan pada indikator ekonomi teknik seperti *Net Present Value* (NPV), *Levelized Cost of Energy* (LCOE), dan *Payback Period* (PBP). Namun, penelitian terdahulu sering kali memiliki kekurangan dalam penggunaan asumsi biaya modal (*Capital Expenditure*) yang disamakan dengan PLTS atap biasa. Sebagaimana dipaparkan melalui studi kasus di PLTU Adipala, struktur biaya *solar carport* mengalami eskalasi signifikan akibat persyaratan konstruksi baja berat (*heavy steel*), dengan beban investasi tercatat mencapai Rp 25 Juta/kWp [9]. Penggunaan asumsi biaya yang tidak realistis berpotensi menghasilkan perhitungan kelayakan yang bias.

Dalam upaya memitigasi ketidakpastian finansial pada proyeksi investasi jangka panjang, pendekatan optimasi konfigurasi sistem menjadi strategi yang penting. [10] [11] menggunakan simulasi untuk membandingkan berbagai skenario kapasitas guna mendapatkan nilai *Net Present Cost* (NPC) terendah. Mengadopsi kerangka optimasi tersebut, penelitian ini menambahkan analisis sensitivitas terhadap fluktuasi komponen biaya struktur *carport*. Tujuannya adalah untuk menciptakan model ekonomi yang kuat dan mencerminkan kenyataan biaya konstruksi di lapangan, sehingga hasil evaluasi kelayakan investasi menjadi lebih akurat dibandingkan model statis yang biasa digunakan.

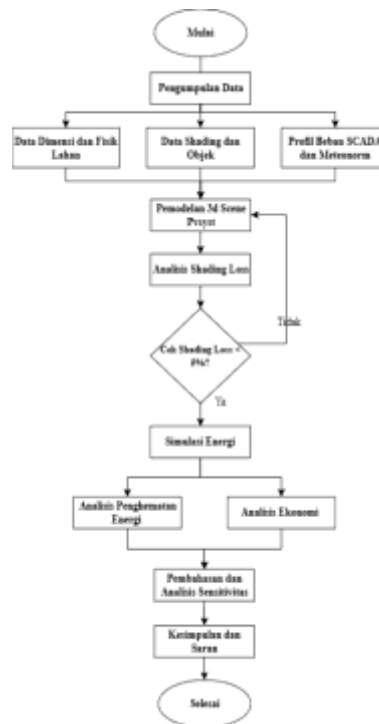
1.1.4. Konsep Auxiliary Power dan Efisiensi Pembangkit

Efisiensi operasional bersih dari suatu unit pembangkit tenaga listrik memiliki korelasi negatif yang kuat dengan besaran konsumsi pemakaian sendiri (*auxiliary power consumption*). Dalam konteks pembangkitan termal, [12] meletakkan landasan teoritis bahwa integrasi sumber energi terbarukan di area pembangkit mampu berfungsi sebagai penyuplai daya *auxiliary* yang efektif. Proses hibridasi ini terbukti berkontribusi pada penurunan *Nett Plant Heat Rate* (NPHR). Penurunan NPHR ini secara bersamaan berpengaruh positif terhadap peningkatan efisiensi termal sistem serta pengoptimalan kinerja unit pembangkit utama karena beban internal dapat disubstitusi oleh sumber energi tambahan tersebut.

Meskipun konsep ini telah teruji validitasnya pada pembangkit termal, penelitian yang mengeksplorasi adaptabilitasnya pada fasilitas Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) skala utilitas (*utility-scale*) masih relatif terbatas. Penelitian ini didasarkan pada premis bahwa substitusi pasokan *auxiliary power* dari jaringan (grid) ke sumber mandiri (*solar carport*) tidak hanya mereduksi biaya operasional (OPEX), tetapi juga meningkatkan kemandirian energi fasilitas pembangkit itu sendiri.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menerapkan rancangan penelitian kuantitatif dengan pendekatan studi kasus simulasi untuk menilai kemampuan teknis dan ekonomis dari *solar carport*. Objek penelitian difokuskan pada infrastruktur area parkir *Main Station Building* di PLTS Sengkol. Lingkup data penelitian dibatasi pada parameter geometri fisik area, profil beban pemakaian sendiri (*auxiliary load profile*), serta data meteorologi historis. Data beban pemakaian sendiri (*auxiliary*) disusun berdasarkan profil beban representatif dari rekaman SCADA yang diproyeksikan menjadi deret waktu (*time series*) satu tahun penuh. Data tersebut diolah dalam format deret waktu (*time series*) dengan resolusi temporal per jam (*hourly resolution*) selama satu tahun penuh. Kerangka kerja operasional penelitian dirancang mengikuti alur proses sistematis sebagaimana divisualisasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Prosedur Penelitian

Teknik pengumpulan data dilaksanakan melalui observasi lapangan dan pengumpulan data sekunder. Observasi langsung difokuskan pada dimensi lahan dan pemetaan geometri objek bayangan (*shading*) sebagai input parameter fisik. Di sisi lain, data historis beban diambil dari catatan sistem SCADA dan informasi mengenai iradiasi matahari diakses dari database simulasi. Instrumen komputasi utama yang digunakan meliputi perangkat lunak PVSyst 7.4 untuk simulasi kinerja sistem dan Microsoft Excel untuk analisis kelayakan finansial.

2.1. Analisis Kinerja Teknis

Simulasi produksi energi dilakukan menggunakan perangkat lunak PVSyst untuk memprediksi total energi yang dihasilkan sistem (*Yield*) [13]. Model matematis dasar yang digunakan untuk menghitung energi output tahunan E_{AC} diformulasikan sebagai berikut:

$$E_{AC} = P_{PV} \times H_{tilt} \times PR \quad (1)$$

E_{AC} merupakan total energi listrik yang dihasilkan oleh sistem dalam satu tahun dan dinyatakan dalam kWh per tahun. P_{PV} adalah kapasitas total daya array photovoltaic (PV), yang biasanya dinyatakan dalam kilowatt peak (kWp). H_{tilt} menggambarkan besarnya iradiasi matahari yang diterima pada bidang miring panel surya dalam satu tahun, dinyatakan dalam kWh per meter persegi per tahun. Sementara itu, PR atau Performance Ratio merupakan rasio kinerja sistem yang menunjukkan tingkat efisiensi operasional keseluruhan dari pembangkit listrik tenaga surya.

Nilai *Performance Ratio* (PR) menjadi indikator utama efisiensi sistem dalam mengonversi iradiasi menjadi listrik dengan memperhitungkan rugi-rugi (*losses*) sistem, yang dinyatakan dalam persamaan:

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (2)$$

Dimana Y_f adalah Final Yield (kWh/kWp) dan Y_r adalah Reference Yield (kWh/kWp).

2.2. Analisis Kelayakan Ekonomi

Evaluasi finansial dilakukan menggunakan metode *Discounted Cash Flow* (DCF) untuk memproyeksikan arus kas selama umur proyek (25 tahun) [14]. Indikator utama yang digunakan adalah *Net Present Value* (NPV), yang dihitung dengan mengakumulasikan selisih arus kas masuk dan keluar yang telah didiskon menggunakan persamaan:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (3)$$

C_t merupakan arus kas bersih atau Net Cash Flow yang diterima pada tahun ke- t dan dinyatakan dalam satuan rupiah. C_0 adalah biaya investasi awal atau CAPEX yang diperlukan untuk memulai proyek. Variabel r menunjukkan tingkat diskonto atau discount rate yang digunakan dalam analisis kelayakan finansial dan dinyatakan dalam persentase. Sementara itu, n merupakan umur ekonomis proyek yang menggambarkan berapa lama proyek tersebut memberikan manfaat secara finansial dan dinyatakan dalam satuan tahun.

Selain itu, untuk menentukan biaya pokok pembangkitan listrik per kWh agar dapat dibandingkan dengan tarif utilitas eksisting, digunakan parameter *Levelized Cost of Energy* (LCOE) [15] dengan persamaan:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (4)$$

I_t merupakan biaya investasi yang dikeluarkan pada tahun ke- t dan dinyatakan dalam rupiah. M_t adalah biaya operasional dan perawatan (O&M) yang muncul pada tahun ke- t , juga dinyatakan dalam rupiah. Sementara itu, E_t menggambarkan jumlah energi listrik yang dihasilkan pada tahun ke- t dan dinyatakan dalam satuan kilowatt-hour (kWh).

3. Hasil dan Diskusi

Penelitian ini memfokuskan analisis pada perancangan sistem PLTS *carport* di area parkir *Main Station Building* PLTS Sengkol. Data primer mengenai dimensi lahan dan kondisi fisik lingkungan diambil pada bulan Mei 2025. Analisis profil beban didasarkan pada data operasional pemakaian sendiri (*auxiliary*). Simulasi kinerja sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak PVSyst 7.4, sedangkan analisis ekonomi menggunakan model *Discounted Cash Flow*.

3.1. Konfigurasi Desain dan Produksi Energi

3.1.1. Lokasi Penelitian dan Potensi Iradiasi

Secara geografis, objek penelitian terletak pada koordinat 8°47'41.3"S 116°17'45.6"E dan memiliki struktur atap parkir dengan orientasi menghadap Utara. Berdasarkan data meteorologi Meteonorm 8.1 mencatat potensi Iradiasi Global Horizontal (GHI) di lokasi ini sebesar 2020,5 kWh/m²/tahun dan suhu rata-rata tahunan 27,0 °C. Lokasi dan area perancangan disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi dan Denah Area Parkir PLTS Sengkol

3.1.2. Konfigurasi Sistem dan Spesifikasi Komponen

Konfigurasi teknis sistem fotovoltaik dirancang dengan memaksimalkan penggunaan area efektif pada struktur atap tempat parkir kendaraan seluas 123,5 m². Perencanaan kapasitas terpasang ditargetkan mencapai total 24,2 kWp guna memaksimalkan densitas energi per meter persegi. Rangkaian sistem PLTS yang terpasang terbagi menjadi dua area. Pada area parkir mobil dengan luas 101,145 m² dipilih konfigurasi 2 @ 18, sedangkan pada area parkir motor dengan luas 22,4 m² dipilih konfigurasi 1 @ 8. Rincian validasi batas minimum dan maksimum string untuk kedua area disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Data dan Perhitungan Konfigurasi PLTS Konfigurasi String Multi-MPPT

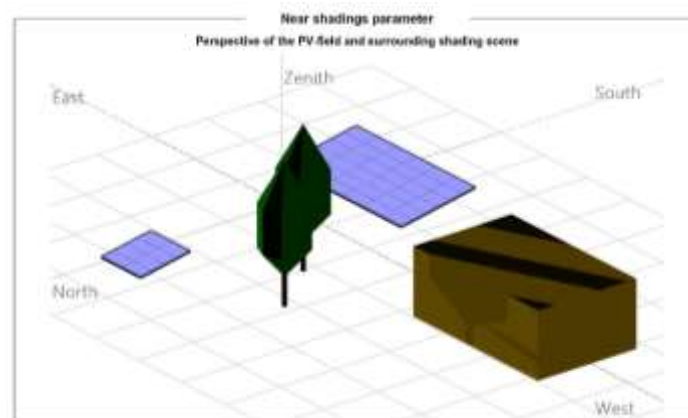
Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
A. Spesifikasi Komponen			
Tegangan Daya Maksimum Modul PV	V_{mp}	41,95	V
Tegangan Open Circuit Modul PV	V_{oc}	49,8	V
Arus Short Circuit Modul PV	I_{sc}	13,98	A
Rentang Tegangan MPPT Inverter	V_{mppt}	200 - 1.000	V
Tegangan Input Maks Inverter	$V_{max-inv}$	1100	V
Jumlah masukan MPPT		3	
Maksimal arus masukan PV		32	A
Jumlah maksimal string per MPPT		2	
B. Batas Izin String			

Jumlah Modul Minimum (Nmin)	Vmppt-min / Vmp	5	Modul
Jumlah Modul Maksimum (Nmax)	Vmax-inv / Voc	22	Modul
C. Desain String 1: Area Parkir Mobil			
Jumlah Modul Aktual	Ns1	18	Modul
Tegangan String Operasi (18 X Vmp)	Vop 1	755,1	V
D. Desain String 2: Area Parkir Motor			
Jumlah Modul Aktual	Ns2	8	Modul
Tegangan String Operasi (8 X Vmp)	Vop2	335,6	V

Berdasarkan hasil perhitungan pada tabel 1 di atas rentang modul PV dalam 1 string yang di izinkan adalah 5-22 modul PV sehingga dipilih konfigurasi *array* dengan strategi *Multi-MPPT*. Pada area parkir mobil dibagi menjadi 2 string identik (masing-masing 18 modul seri) yang terhubung secara paralel pada MPPT menghasilkan tegangan operasi 755,1 V, sedangkan area parkir motor disusun menjadi 1 string tunggal (8 modul seri) yang terhubung pada MPPT menghasilkan tegangan operasi 335,6 V. Oleh karena itu, meskipun desain string dibagi menjadi dua konfigurasi berbeda sistem tetap dapat beroperasi stabil berkat penggunaan jalur MPPT yang terpisah.

3.1.3. Analisis Bayangan (*Shading Analysis*)

Simulasi berbasis model 3D diterapkan untuk memetakan profil bayangan dari lingkungan sekitar. Analisis difokuskan pada potensi obstruksi cahaya dari struktur gedung *Main Station* di sisi Timur serta vegetasi eksisting. Pemodelan *Near Shading* melalui algoritma PVSyst menghasilkan kalkulasi kerugian iradiasi tahunan spesifik sebesar 1,05%. Nilai ini berada jauh di bawah ambang batas toleransi desain yang ditetapkan sebesar 5%. Hal ini mengindikasikan bahwa konfigurasi jarak antar baris modul dan jarak terhadap objek penghalang (gedung dan vegetasi) telah optimal, sehingga potensi kehilangan produksi energi akibat bayangan parsial dapat diminimalkan.



Gambar 3. Visualisasi 3D Shading Scene Pada PVSyst

3.1.4. Neraca Energi (*Energy Balance*)

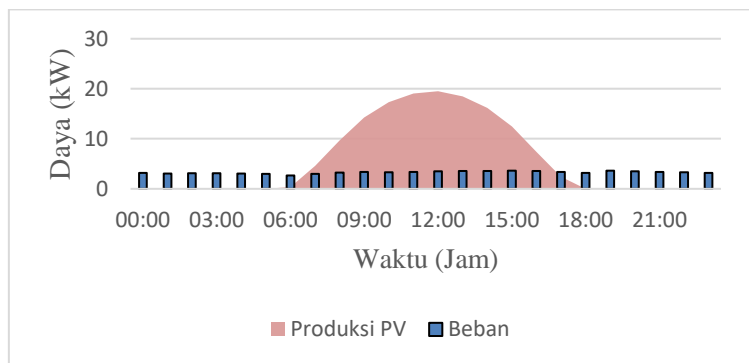
Evaluasi neraca energi dilakukan untuk mengukur efektivitas *solar carport* dalam mensubstitusi kebutuhan daya operasional gedung. Berdasarkan hasil simulasi, sistem mampu memproduksi energi listrik (*Yield*) sebesar 40,65 MWh pada tahun pertama, didukung oleh *Performance Ratio* (PR) yang tinggi (81,8%). Rincian performa sistem berdasarkan simulasi tahunan Pvsyst disajikan pada Gambar 4.

Balances and main results								
	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEF kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	159.7	81.19	27.40	152.0	142.3	3059	2996	0.814
February	136.8	77.54	27.35	133.7	125.3	2692	2637	0.815
March	166.6	88.06	27.53	167.2	157.2	3377	3310	0.818
April	173.0	89.18	27.26	181.1	171.1	3660	3567	0.818
May	160.8	80.86	27.33	174.3	164.7	3533	3462	0.821
June	141.5	57.22	26.04	155.1	146.0	3193	3091	0.824
July	156.3	55.04	25.94	170.7	160.8	3462	3395	0.822
August	163.4	59.56	25.97	174.1	164.6	3537	3466	0.823
September	176.2	65.65	26.43	182.7	172.8	3698	3623	0.819
October	217.2	72.13	27.81	214.1	202.8	4313	4229	0.816
November	186.2	75.84	27.70	177.3	166.5	3562	3492	0.814
December	180.8	84.89	27.60	170.3	158.4	3424	3356	0.815
Year	2020.5	847.29	27.03	2052.6	1933.4	41471	40648	0.818

Gambar 4. Hasil Simulasi Produksi Energi Bulanan dari Kinerja Sistem

Di sisi permintaan (*demand*), proyeksi profil beban tahunan *auxiliary* yang dihitung dari data rata-rata harian SCADA tercatat sebesar 29,2 MWh/tahun. Perbandingan energi ini menunjukkan bahwa *solar carport* mampu memenuhi 100% kebutuhan energi beban *auxiliary* sepanjang tahun dan menghasilkan surplus energi sebesar 11,4 MWh (sekitar 28% dari total produksi sistem).

Dinamika hubungan antara suplai dan permintaan secara jam-jaman divisualisasikan pada Gambar 5. Grafik tersebut mengonfirmasi adanya korelasi waktu yang tepat (*time-matching*) antara kurva produksi PV dengan kurva beban harian. Puncak produksi PV yang terjadi pada pukul 12.00 WITA secara efektif menanggung seluruh kebutuhan daya *auxiliary* pada jam-jam sibuk operasional.



Gambar 5. Profil Harian Rata-rata: Produksi PV vs Beban Auxiliary

3.2. Kelayakan Ekonomi

3.2.1. Estimasi Biaya Investasi (CAPEX)

Penelitian ini menerapkan strategi struktur penyangga hibrida (*Hybrid Mounting Structure*) untuk menekan biaya investasi awal. Area parkir mobil (bentang 16,5 m) menggunakan struktur Baja Berat (WF), sedangkan area parkir motor (bentang pendek) menggunakan struktur Besi Hollow Galvanis. Total investasi proyek diestimasi sebesar Rp 220.800.000. Berdasarkan survei harga pasar komponen dan jasa instalasi, rekapitulasi biaya investasi (*Capital Expenditure*) disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi Estimasi Biaya Investasi

No	Komponen Utama	Spesifikasi Ringkas	Total Harga (Rp)
1	Modul Surya & Inverter	Longi 550Wp (44 unit) & Solis 25kW	Rp 108.700.000,00
2	Struktur Penyangga Sipil	Hibrida (Baja WF & Hollow)	Rp 82.600.000,00
3	Sistem Elektrikal (BoS)	Kabel NYY 4x16mm, DC 6mm, & Panel	Rp 14.500.000,00
4	Instalasi & Lain-lain	Jasa Fabrikasi, Pasang, & Mob-Demob	Rp 15.000.000,00

TOTAL CAPEX	Rp	220.800.000,00
Biaya Satuan	(Kapasitas 24,2 kWp)	9.123.967 /kWp

Berdasarkan rekapitulasi pada Tabel 2, total biaya investasi awal (Capital Expenditure) tercatat sebesar Rp 220.800.000. Dengan total kapasitas 24,2 kWp, biaya satuan investasi berhasil ditekan menjadi Rp 9,12 Juta/kWp. Nilai ini menunjukkan efisiensi anggaran yang signifikan, yakni 63% lebih rendah dibandingkan referensi biaya solar carport industri berbasis full heavy steel sebesar Rp 25 Juta/kWp [9].

3.1.2. Indikator Kelayakan Finansial

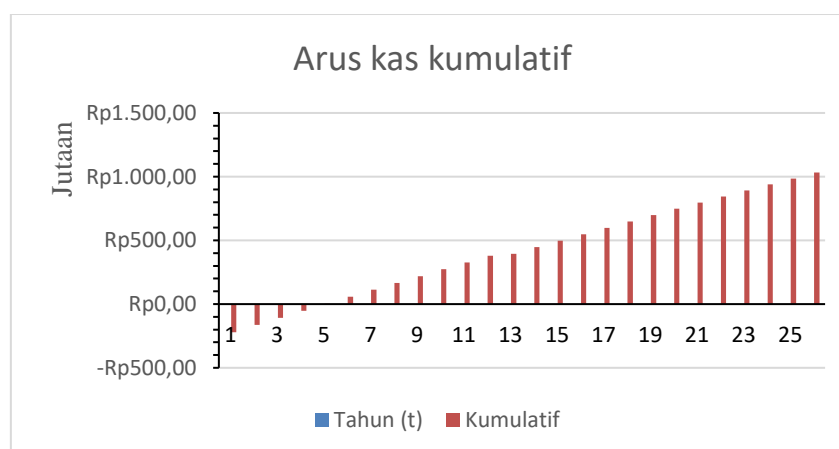
Proyeksi arus kas (*Cash Flow*) disusun dengan menggunakan parameter asumsi yang didasarkan pada standar industri dan data makroekonomi historis. Pendapatan penghematan dihitung berdasarkan substitusi energi listrik dengan tarif BPP (Golongan B-2/TR) sebesar Rp 1.444/kWh. Di sisi teknis, output energi mengalami degradasi alami sebesar 0,55% per tahun setelah tahun pertama, mengacu pada spesifikasi garansi kinerja modul (*Performance Warranty*) dari pabrikan.

Biaya operasional (OPEX) diasumsikan sebesar 1% dari CAPEX pada tahun pertama, dengan laju eskalasi diproyeksikan meningkat sebesar 3,65% per tahun, mengacu pada rata-rata historis tingkat inflasi Indonesia periode 2014–2024 berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS). Selain itu, analisis juga memperhitungkan alokasi dana penggantian inverter (*Replacement Cost*) pada tahun ke-12 operasional. Tingkat diskonto (*Discount Rate*) ditetapkan sebesar 10%, mengacu pada *baseline Weighted Average Cost of Capital* (WACC) untuk proyek energi terbarukan di Indonesia [16]. Berdasarkan parameter tersebut, hasil perhitungan indikator kelayakan finansial dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan Parameter Kelayakan Ekonomi

Parameter	Nilai Hasil Analisis	Satuan	Kriteria Kelayakan
Net Present Value (NPV)	Rp 253.103.154,73	IDR	Layak (> 0)
Internal Rate of Return (IRR)	24%	%	Layak (> 10%)
Payback Period (PPB)	3,94	Tahun	Cepat (< Umur Proyek)
Levelized Cost of Energy (LCOE)	Rp 730	Rp/kWh	Kompetitif (< Rp 1.444)

Dari sisi likuiditas, modal investasi diproyeksikan akan kembali sepenuhnya dalam waktu 3 tahun 11 bulan. Selain itu, efisiensi biaya pembangkitan tercermin dari nilai *Levelized Cost of Energy* (LCOE) sebesar Rp 730/kWh. Angka ini jauh lebih rendah dibandingkan tarif listrik eksisting (Rp 1.444/kWh), menciptakan margin penghematan operasional yang berkelanjutan bagi fasilitas PLTS Sengkol selama masa operasional sistem. Proyeksi arus kas kumulatif dan titik pengembalian modal ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. Proyeksi Arus Kas Kumulatif dan Titik Pengembalian Modal (Payback Period)

3.1.3. Analisis Sensitivitas

Mengingat komponen struktur baja memiliki volatilitas harga yang tinggi, analisis sensitivitas dilakukan untuk menguji ketahanan proyek. Skenario yang diuji adalah kenaikan harga material struktur sebesar 20%. Berdasarkan proporsi biaya pada Tabel 2, kenaikan ini menyebabkan estimasi CAPEX total membengkak menjadi Rp Rp235.133.000.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa meskipun biaya awal naik, nilai NPV proyek terkoreksi menjadi Rp 236.488.121,95 namun tetap bernilai positif dan layak (feasible). Hal ini membuktikan bahwa proyek memiliki toleransi risiko yang baik (robust) terhadap fluktuasi harga pasar konstruksi..

4. Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa perancangan *solar carport* 24,2 kWp dengan struktur hibrida di PLTS Sengkol terbukti layak secara teknis dan ekonomis, menghasilkan efisiensi biaya investasi signifikan sebesar Rp 9,05 juta/kWp serta produksi energi 40,65 MWh/tahun yang mampu mensubstitusi 100% beban *auxiliary* dengan masa pengembalian modal di bawah 4 tahun. Temuan ini mengimplikasikan bahwa integrasi strategi material hibrida dan konfigurasi *Multi-MPPT* merupakan solusi efektif untuk meningkatkan viabilitas finansial proyek infrastruktur surya tanpa mengorbankan performa teknis. Namun, mengingat analisis ini didasarkan pada proyeksi profil beban sampel satu bulan, penelitian mendatang direkomendasikan untuk melakukan validasi berbasis data beban tahunan *real-time* serta mengeksplorasi potensi integrasi sistem penyimpanan energi (*battery storage*) dan analisis kualitas daya untuk menyempurnakan keandalan operasional sistem.

Referensi

1. F. E. Riakhi and A. Khaldoun, "PV Sizing of a Stand Alone Solar Carport System Linked to Charging Stations and its Economic Analysis (A Case Study)," *Proceedings of 2021 9th International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2021*. <https://doi.org/10.1109/IRSEC53969.2021.9741148>
2. A. S. Shamekh, A. Jebri, and O. G. Mrehel, "Grid Connected PV Solar Carport System : Design, Simulation, and Feasibility for Libyan Telecommunication Company," *2020 11th International Renewable Energy Congress (IREC)*, pp. 1–6, 2020. <https://doi.org/10.1109/IREC48820.2020.9310386>
3. R. Rafli, J. Ilham, and S. Salim, "Perencanaan dan Studi Kelayakan PLTS Rooftop pada Gedung Fakultas Teknik UNG," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 8–15, 2022. <https://doi.org/10.37905/jjee.v4i1.10790>
4. Argo Tri Winnarni and Risse Entikaria Rachmanita, "Perancangan dan Analisis Tekno Ekonomi PLTS On-Grid System sebagai Supply Energi Listrik Masjid Al-Istiqamah Politeknik Negeri Jember," *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 11, no. 3, pp. 145–150, 2024. <https://doi.org/10.33795/elposys.v11i3.4609>
5. H. Fakour, M. Imani, S. L. Lo, M. H. Yuan, C. K. Chen, S. Mobasser, and I. Muangthai, "Evaluation of solar photovoltaic carport canopy with electric vehicle charging potential," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29223-6>
6. E. Awada, E. Radwan, S. Abed, and A. Al-Mahrouk, "Economic Analysis and Design of Sustainable Solar Electric Vehicle Carport at Applied Science Private University in Jordan," *Energies*, vol. 17, no. 17, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17174321>
7. Raffhel Panjaitan, K., I. A. Dwi Giriantari, and I. N. Setiawan, "Analisis Unjuk Kerja Plts Carport 37,8 Kwp Di Area Perkantoran Kementerian Esdm Republik Indonesia Jakarta Pusat," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 10, no. 1, p. 25, 2023. <https://doi.org/10.24843/SPEKTRUM.2023.v10.i01.p4>
8. F. Hidayat, B. Winardi, and A. Nugroho, "Analisis Ekonomi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts) Di Departemen Teknik Elektro Universitas Diponegoro," *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 7, no. 4, pp. 875–882, 2019. <https://doi.org/10.14710/TRANSIENT.V7I4.875-882>
9. S. Ardiansyah, Mafendro Dedet Eka Saputra, Y., and I. Silanegara, "Analisis Performance Solar Carport On Grid untuk Menurunkan Power Consumption Gedung Administrasi PLTU Adipala Cilacap," *Prosiding PNJ*, 2023. [Online]. Available: <http://prosiding.pnj.ac.id>
10. V. P. Hadiano, I. A. S. Adnyani, A. Natsir, and I. K. P. Putra, "Analisis Ekonomis Pembangkit Listrik Tenaga Surya On-Grid 10 Kwp Di Universitas Al-Azhar Mataram," *DIELEKTRIKA*, vol. 10, no. 1, pp. 24–33, 2023. <https://doi.org/10.29303/dielektrika.v10i1.331>
11. G. Alvianingsih and J. C. H. Simanjuntak, "Analisis Tekno-Ekonomi Hibrid Sistem PLTD PLTS Di Pulau Gersik, Belitung Menggunakan Perangkat Lunak Homer," *SUTET*, vol. 11, no. 1, pp. 1–12, 2021. <https://doi.org/10.33322/sutet.v11i1.1372>
12. A. Burhandono, J. Windarta, and N. Sinaga, "Perencanaan PLTS Roof Top On-Grid Untuk Gedung Kantor PLTU Amurang Sebagai Upaya Mengurangi Auxiliary Power dan Memperbaiki Nilai Nett Plant Heat Rate Pembangkit," *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, vol. 3, no. 2, pp. 61–79, 2022. <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.13051>
13. M. Hadi, I. Syaekani, H. Nuryadi, and P. I. Kencana, "Literature Review: Metode Evaluasi Performa Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia," *RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, vol. 8, no. 1, pp. 280–289, 2025. <https://doi.org/10.30596/rele.v8i1.22193>
14. N. F. Isnarno, I. R. Nurfajar, and M. O. Saputra, "Analisis Discounted Cash Flow (DCF) Dalam Investasi tambang dan Kelayakan Ekonomi Pada Ekstraksi Timah dengan Menggunakan Teknologi Klorinasi Basah," *Ethos: jurnal Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat*, vol. 9, no. 1, pp. 112–117, Jan. 2021. <https://doi.org/10.29313/ethos.v9i1.6626>
15. S. W. Prabawa, "Kajian Kelayakan Teknik Dan Finansial Proyek Plts Di Pulau Limbung Kalimantan Barat," *IPSSJ*, vol. 2, no. 03 Juni, pp. 3743–3749, Jun. 2025. Accessed: Dec. 03, 2025. [Online]. Available: <https://ipssj.com/index.php/ojs/article/view/487>
16. Institute for Essential Services Reform (IESR), *Indonesia Energy Transition Outlook 2023*. Jakarta, Indonesia: IESR, 2023.
