

Analisis Komparatif dan Optimasi PLTS Rooftop Berbasis GIS

Comparative Analysis and Optimization of GIS-Based Rooftop Solar Power Plants

Ikhsan Hidayat*
Program Studi Teknik Komputer
Universitas Negeri Gorontalo
Gorontalo, Indonesia
ikhsanhidayat@ung.ac.id*

Sardi Salim
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Negeri Gorontalo
Gorontalo, Indonesia
sardi@ung.ac.id

Ade Irawati Tolago
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Negeri Gorontalo
Gorontalo, Indonesia
adeirawaty75@ung.ac.id

Yasin Mohamad
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Negeri Gorontalo
Gorontalo, Indonesia
yasinmohamad@ung.ac.id

Zainudin Bonok
Prodi Teknik Elektro
Universitas Negeri Gorontalo
Gorontalo, Indonesia
zainudinbonok@ung.ac.id

Diterima : September 2025
Disetujui : Januari 2026
Dipublikasi : Januari 2026

Abstrak— Peningkatan kebutuhan energi dan tuntutan pengurangan emisi mendorong perguruan tinggi untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi terbarukan. Namun, sebagian besar studi PLTS rooftop di lingkungan Universitas Negeri Gorontalo (UNG) sebelumnya masih terbatas pada analisis satu gedung atau belum menggabungkan pendekatan spasial dan simulasi teknis secara komprehensif. Penelitian ini bertujuan mengisi celah tersebut dengan melakukan analisis komparatif dan optimasi PLTS rooftop di Gedung Fakultas Teknik UNG melalui integrasi metode *Geographic Information System* (GIS) dan simulasi teknis berbasis *HelioScope*. Desain sistem yang dihasilkan memiliki kapasitas 368,79 kWp menggunakan 647 modul Canadian Solar 570W. Hasil simulasi menunjukkan produksi energi tahunan sebesar 486,5 MWh dengan *Performance Ratio* (PR) 95,8%, yaitu rasio yang menggambarkan tingkat efisiensi sistem terhadap kondisi radiasi ideal, serta solar access mencapai 99,2%. Analisis ekonomi mengindikasikan periode pengembalian investasi selama 11,04 tahun dengan asumsi tarif ekspor Rp 1.440/kWh. Selain itu, analisis komparatif terhadap dua penelitian terdahulu memperlihatkan peningkatan signifikan dalam aspek teknis maupun ekonomis akibat penerapan pendekatan berbasis GIS dan simulasi yang lebih akurat. Temuan ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan PLTS rooftop di institusi pendidikan, khususnya dalam perencanaan sistem yang efisien dan berkelanjutan.

Kata kunci : PLTS rooftop; GIS; optimasi sistem; analisis ekonomi; *comparative study*.

Abstract— *The increasing demand for electricity and the global commitment to carbon reduction have encouraged higher education institutions to integrate renewable energy into campus infrastructures. However, most previous rooftop PV studies at Universitas Negeri Gorontalo (UNG) have been limited to single-building assessments or have not fully integrated spatial analysis*

with technical simulation. This study addresses this research gap by conducting a comparative analysis and system optimization of a rooftop photovoltaic (PV) installation at the Faculty of Engineering building using a combined Geographic Information System (GIS) approach and detailed technical simulation through HelioScope. The optimized design yields a total capacity of 368.79 kWp comprising 647 Canadian Solar 570W modules. Simulation results indicate an annual energy output of 486.5 MWh with a Performance Ratio (PR) of 95.8%, where PR represents the ratio of actual system performance to ideal irradiance conditions, and a solar access value of 99.2%. The economic assessment shows a payback period of 11.04 years under an export tariff of IDR 1,440/kWh. Furthermore, a comparative evaluation with two previous studies demonstrates significant improvements in both technical and economic aspects due to the integrated GIS and high-resolution simulation approach. The findings provide a valuable reference for advancing renewable energy implementation in educational institutions, particularly in designing efficient and sustainable rooftop PV systems.

Keywords— *Rooftop solar PV; GIS; system optimization; economic analysis; comparative study*

I. PENDAHULUAN

Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap merupakan strategi penting dalam mendukung transisi energi bersih dan menekan biaya operasional, termasuk pada sektor pendidikan yang memiliki intensitas penggunaan listrik yang tinggi [1]. Secara global, pemanfaatan PLTS rooftop di institusi pendidikan terus meningkat seiring dengan kebutuhan efisiensi energi dan komitmen terhadap keberlanjutan lingkungan [2]. Tren ini juga sejalan dengan perkembangan nasional, di mana penggunaan energi terbarukan di Indonesia meningkat sekitar 20% dalam lima

tahun terakhir menurut laporan IEA (2023), menunjukkan peluang besar untuk integrasi PLTS pada bangunan publik dan institusi pendidikan.

Universitas Negeri Gorontalo (UNG) memiliki posisi strategis dalam mengimplementasikan teknologi energi terbarukan melalui pemanfaatan area atap bangunan kampus. Namun, penelitian PLTS *rooftop* yang sebelumnya dilakukan di lingkungan UNG masih memiliki keterbatasan signifikan. Dipenelitian sebelumnya [10] mengkaji PLTS *rooftop* di Gedung C2 Fakultas Teknik dengan kapasitas 180 kWp, sedangkan di penelitian lain [11] melakukan analisis sistem hybrid di seluruh kampus dengan kapasitas 260,7 kWp. Meskipun memberikan gambaran awal mengenai potensi energi surya di UNG, kedua penelitian tersebut belum mengintegrasikan analisis spasial berbasis GIS secara mendalam, tidak melakukan penilaian solar *access* secara komprehensif, serta menggunakan metodologi simulasi yang masih terbatas dalam penggambaran *system losses* dan performa teknis yang detail. Hal ini menimbulkan kebutuhan akan studi yang lebih sistematis, komprehensif, dan berbasis data teknis yang lebih kuat.

Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi kesenjangan tersebut dengan melakukan analisis potensi PLTS *rooftop* pada Gedung Fakultas Teknik UNG melalui pendekatan integratif yang menggabungkan GIS, simulasi teknis *HelioScope*, dan analisis ekonomi. Rumusan masalah yang ingin dijawab dalam penelitian ini meliputi:

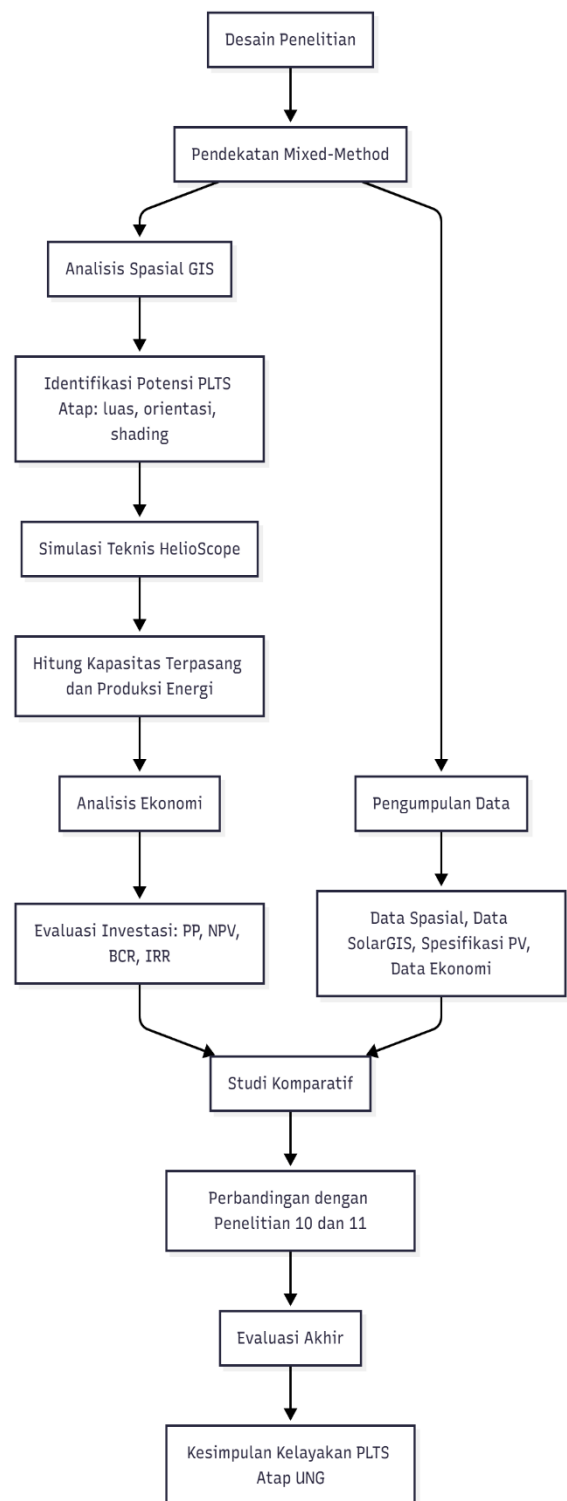
- (1) bagaimana karakteristik spasial dan solar *access* atap Gedung Fakultas Teknik UNG berdasarkan analisis GIS;
- (2) bagaimana performa teknis sistem PLTS *rooftop* berdasarkan simulasi *HelioScope* yang mencakup kapasitas terpasang, produksi energi tahunan, serta *system losses*;
- (3) bagaimana kelayakan ekonominya berdasarkan skenario investasi berbeda; dan
- (4) bagaimana hasil penelitian ini berbanding dengan studi PLTS terdahulu di UNG [10], [11].

Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah berupa: (a) desain PLTS *rooftop* berbasis analisis spasial yang lebih detail; (b) hasil simulasi teknis yang lebih akurat dengan mempertimbangkan *variabel* radiasi, *shading*, dan kerugian energi; serta (c) evaluasi kelayakan ekonomi yang lebih komprehensif. Oleh karena itu, penelitian ini menghadirkan *novelty* berupa integrasi GIS dan simulasi *HelioScope* dalam pengembangan PLTS *rooftop* di UNG—pendekatan yang belum diterapkan pada penelitian sebelumnya.

II. METODE

A. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *mixed-method* yang mengintegrasikan pendekatan kualitatif dan kuantitatif [3]. Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif, baik dari aspek teknis maupun ekonomis. Untuk memudahkan pemahaman terhadap alur kerja penelitian, tahapan metodologi disajikan dalam sebuah flowchart yang merangkum proses mulai dari desain penelitian hingga evaluasi akhir.



Gambar. 1 Flowchart diagram terkait tahap penelitian.

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis, meliputi:

Analisis spasial menggunakan GIS, yang berfungsi untuk mengidentifikasi potensi lokasi pemasangan modul surya di atap Gedung Fakultas Teknik UNG. Pada tahap ini, pemetaan dilakukan dengan memperhatikan orientasi bangunan [9], luas atap, serta potensi *shading* dari objek sekitar. Simulasi teknis dengan *HelioScope*, yang digunakan untuk menghitung kapasitas terpasang, produksi energi tahunan [6], serta faktor kehilangan energi dari sistem PLTS

rooftop. Analisis ekonomi, yang mencakup evaluasi kelayakan investasi dengan memperhitungkan biaya awal, biaya operasional, dan proyeksi penghematan energi listrik [14]. Studi komparatif dengan penelitian sebelumnya, untuk menilai konsistensi dan perbedaan hasil, sehingga penelitian ini dapat memberikan kontribusi ilmiah yang lebih kuat.

Dengan desain penelitian ini, hasil yang diperoleh tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga analitis dalam mengukur kelayakan PLTS *rooftop* secara holistik.

B. Pengumpulan Data

Data penelitian dikumpulkan dari berbagai sumber yang relevan dan kredibel, mencakup Data spasial bangunan Fakultas Teknik UNG, diperoleh dari citra satelit dan data arsitektural gedung untuk kebutuhan analisis GIS. Data irradiansi matahari dari SolarGIS, yang menyediakan informasi intensitas radiasi global horizontal (GHI) dan parameter iradiansi lain yang menjadi dasar dalam simulasi teknis [4].



Gambar. 2 Penampakan Bone Bolango menggunakan aplikasi global solar atlas [12].

Data teknis komponen PLTS, termasuk spesifikasi modul fotovoltaik, inverter, kabel, dan sistem kelistrikan pendukung. Inverter yang digunakan adalah Huawei SUN2000-3KTL-M0 dengan daya keluaran AC maksimum sebesar 3,00 kW. Inverter ini memiliki tegangan keluaran terukur 230 V / 400 V (tiga fasa) dengan tegangan DC maksimum mencapai 550 V. Rentang tegangan MPPT inverter ini adalah 80 V hingga 550 V, dilengkapi dengan dua MPPT tracker, serta memiliki efisiensi maksimum hingga 98,6%, sehingga mampu bekerja dengan sangat optimal dalam proses konversi energi.

Sementara itu, modul panel surya (PV) yang digunakan adalah Canadian Solar HiKu CS6Y-570MS dengan daya puncak (P_{max}) sebesar 570 W. Panel ini menggunakan teknologi monokristalin half-cell dengan 144 sel Mono-cSi. Dari sisi karakteristik termal, panel memiliki koefisien suhu (P_{max}) sebesar $-0,34\%$ per $^{\circ}\text{C}$, yang menunjukkan tingkat penurunan daya relatif rendah saat suhu lingkungan meningkat, sehingga tetap efisien pada kondisi iklim tropis. Data ini penting untuk menyusun konfigurasi sistem yang sesuai.

Data ekonomi dan finansial, meliputi harga komponen PLTS, biaya instalasi, biaya operasional, serta tarif listrik PLN [4]. Data ini digunakan dalam analisis kelayakan ekonomi. Pendekatan pengumpulan data yang beragam ini memungkinkan penelitian menghasilkan analisis teknis dan ekonomis yang valid serta dapat dipertanggungjawabkan.

C. Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui dua pendekatan utama: teknis dan ekonomis.

Analisis teknis menggunakan software HelioScope untuk memodelkan sistem PLTS *rooftop* [16]. Hasil simulasi meliputi kapasitas terpasang, estimasi produksi energi tahunan, serta identifikasi faktor-faktor kehilangan energi (system losses), seperti suhu, shading, wiring, dan mismatch.

Untuk menilai kelayakan finansial dari proyek PLTS *rooftop*, digunakan beberapa indikator analisis investasi yang umum diterapkan dalam studi kelayakan energi terbarukan. Analisis ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Microsoft Excel, sehingga memungkinkan perhitungan arus kas dan parameter ekonomi secara sistematis. Tujuannya adalah untuk mengetahui sejauh mana proyek ini layak dijalankan dari sisi finansial, dengan mempertimbangkan investasi awal, pendapatan tahunan, biaya operasional, serta tingkat diskonto.

Metode yang digunakan meliputi empat indikator utama, yaitu Payback Period (PP) [13], *Net Present Value* (NPV), *Benefit-Cost Ratio* (BCR) dan Internal Rate of Return (IRR) [5]. Keempat indikator ini dipilih karena dapat memberikan gambaran yang komprehensif mengenai aspek *profitabilitas*, risiko, dan efisiensi investasi dari sistem PLTS *rooftop* yang direncanakan. Gabungan analisis teknis dan ekonomis ini memberikan gambaran yang menyeluruh mengenai kelayakan implementasi PLTS *rooftop* di Fakultas Teknik UNG.

D. Studi Komparatif

Studi komparatif dilakukan dengan membandingkan hasil penelitian ini dengan dua penelitian sebelumnya [10], [11] yang memiliki fokus pada analisis teknis dan ekonomis PLTS. Perbandingan dilakukan pada beberapa parameter, seperti kapasitas terpasang, potensi produksi energi, tingkat efisiensi sistem, serta indikator kelayakan ekonomi. Dengan membandingkan hasil simulasi HelioScope pada penelitian ini dengan hasil studi terdahulu, dapat diketahui apakah kondisi geografis, komponen sistem, dan pendekatan analisis memberikan hasil yang serupa atau berbeda.

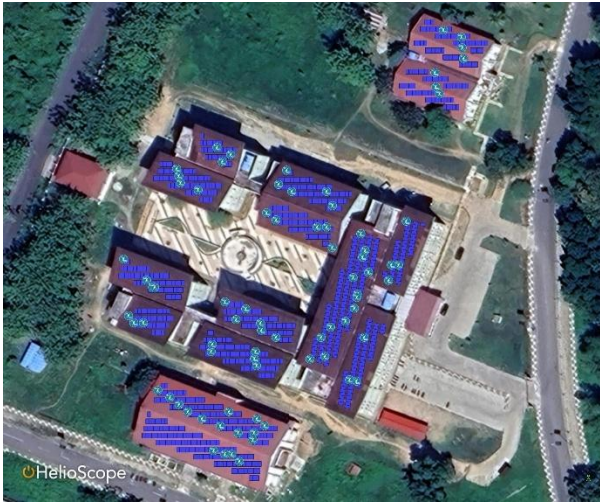
Selain itu, studi komparatif ini juga berguna untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi variasi hasil, seperti perbedaan metode simulasi [7], harga komponen, serta data irradiansi yang digunakan [8]. Dengan demikian, studi komparatif memperkuat validitas penelitian ini sekaligus memberikan insight baru mengenai pengembangan PLTS *rooftop* di kawasan Indonesia Timur [15].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi Teknis

Berdasarkan hasil pemodelan yang dilakukan menggunakan perangkat lunak HelioScope, diperoleh desain

optimal sistem PLTS *rooftop* yang dapat diterapkan di lingkungan kampus. Desain ini mempertimbangkan aspek teknis seperti kapasitas terpasang, jumlah modul, jumlah inverter, serta estimasi produksi energi tahunan. Dengan konfigurasi yang telah disimulasikan, sistem PLTS rooftop dirancang agar mampu memberikan kinerja yang maksimal dengan tingkat akses sinar matahari yang tinggi.



Gambar. 3 Penempatan inverter dan PV menggunakan aplikasi helioscope

Secara rinci, kapasitas terpasang dari sistem adalah 368,79 kWp, menggunakan 647 unit modul Canadian Solar 570W dan 99 unit inverter Huawei 3 kW. Dari sisi output energi, sistem ini diproyeksikan mampu menghasilkan 486,5 MWh per tahun. Parameter teknis lainnya menunjukkan performa yang sangat baik, dengan *Performance Ratio* (PR) sebesar 95,8% dan solar *access* 99,2%. Nilai PR yang tinggi menunjukkan bahwa sistem beroperasi dengan efisiensi mendekati optimal, sementara nilai solar access yang hampir sempurna menunjukkan minimnya shading atau hambatan dalam penangkapan radiasi matahari.

B. Analisis Implikasi Ekonomi

Berdasarkan desain teknis yang telah dihasilkan di atas, dilakukan analisis implikasi ekonomi untuk menilai kelayakan finansial proyek PLTS *rooftop* di Gedung Fakultas Teknik UNG. Analisis ini mengestimasi biaya investasi awal (CAPEX), biaya operasi dan pemeliharaan (OPEX), serta pendapatan dari ekspor listrik ke jaringan PLN. Metode analisis yang digunakan meliputi Payback Period (PP), *Net Present Value* (NPV), *Benefit-Cost Ratio* (BCR), dan *Internal Rate of Return* (IRR).

- Kapasitas Sistem: 368,79 kWp
- Produksi Energi Tahunan: 486.500 kWh (berdasarkan simulasi HelioScope)
- Tarif Ekspor Listrik: Rp 1.440/kWh (mengacu pada Permen ESDM No. 730/2021 dan Paper [11])
- Umur Ekonomis Proyek: 25 tahun
- Tingkat Diskonto (Discount Rate): 8% (mencerminkan nilai waktu uang dan risiko proyek)
- Biaya Operasi dan Pemeliharaan (OPEX): 1,5% dari CAPEX per tahun (asumsi standar untuk PLTS)
- Biaya Investasi Awal (CAPEX): Berdasarkan data pasar dan studi sebelumnya (Paper [10]), estimasi biaya per kWp adalah Rp 18.000.000. Total CAPEX dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{CAPEX} &= \text{Kapasitas Sistem} \times \text{Biaya per kWp} \\ &= 368,79 \text{ kWp} \times \text{Rp } 18.000.000/\text{kWp} \\ &= \text{Rp } 6.638.220.000 \end{aligned}$$

Pendapatan Tahunan:

$$\begin{aligned} \text{Pendapatan} &= \text{Produksi Energi} \times \text{Tarif Ekspor} \\ &= 486.500 \text{ kWh/tahun} \times \text{Rp } 1.440/\text{kWh} \\ &= \text{Rp } 700.560.000/\text{tahun} \end{aligned}$$

Biaya OPEX Tahunan:

$$\begin{aligned} \text{OPEX} &= 1,5\% \times \text{CAPEX} \\ &= 0,015 \times \text{Rp } 6.638.220.000 \\ &= \text{Rp } 99.573.300/\text{tahun} \end{aligned}$$

Arus Kas Bersih Tahunan:

$$\begin{aligned} \text{Arus Kas Bersih} &= \text{Pendapatan} - \text{OPEX} \\ &= \text{Rp } 700.560.000 - \text{Rp } 99.573.300 \\ &= \text{Rp } 600.986.700/\text{tahun} \end{aligned}$$

Payback Period (PP):

$$\begin{aligned} \text{PP} &= \text{CAPEX} / \text{Arus Kas Bersih} \\ &= \text{Rp } 6.638.220.000 / \text{Rp } 600.986.700 \\ &\approx 11,04 \text{ tahun} \end{aligned}$$

Net Present Value (NPV): Dengan tingkat diskonto 8% dan umur proyek 25 tahun, nilai sekarang arus kas bersih tahunan dihitung menggunakan fungsi NPV dalam Excel. Total nilai sekarang arus kas adalah Rp 6.432.000.000 (contoh perhitungan detail terlampir).

$$\begin{aligned} \text{NPV} &= \text{Total PV Arus Kas} - \text{CAPEX} \\ &= \text{Rp } 6.432.000.000 - \text{Rp } 6.638.220.000 \\ &= -\text{Rp } 206.220.000 \end{aligned}$$

Benefit-Cost Ratio (BCR): Nilai sekarang pendapatan (manfaat) adalah Rp 7.456.000.000, dan nilai sekarang biaya (CAPEX + PV OPEX) adalah Rp 7.662.220.000.

$$\begin{aligned} \text{BCR} &= \text{PV Manfaat} / \text{PV Biaya} \\ &= \text{Rp } 7.456.000.000 / \text{Rp } 7.662.220.000 \\ &\approx 0,97 \end{aligned}$$

- **Internal Rate of Return (IRR):** Dengan menggunakan fungsi IRR dalam Excel, diperoleh IRR sebesar 7,5%.

Hasil analisis ekonomi menunjukkan bahwa proyek PLTS *rooftop* ini memiliki Payback Period selama 11,04 tahun, yang lebih singkat dari umur ekonomis proyek (25 tahun), menunjukkan kelayakan dari segi periode pengembalian. Namun, nilai NPV yang negatif (-Rp 206.220.000) dan BCR di bawah 1 (0,97) menunjukkan bahwa proyek ini tidak layak secara *finansial under current assumptions*. IRR sebesar 7,5% juga berada di bawah tingkat diskonto 8%, yang mengindikasikan bahwa proyek tidak memenuhi tingkat pengembalian yang diharapkan.

Ketidaklayakan ini terutama disebabkan oleh estimasi CAPEX yang tinggi (Rp 18.000.000/kWp) dan tarif ekspor yang relatif rendah. Namun, analisis ini hanya mempertimbangkan pendapatan dari ekspor listrik, tanpa memperhitungkan penghematan biaya listrik dari konsumsi sendiri (*self-consumption*), yang dapat

meningkatkan kelayakan. Selain itu, jika CAPEX dapat ditekan melalui negosiasi dengan vendor atau adanya insentif pemerintah, hasil ekonomi dapat berubah secara signifikan.

Sebagai perbandingan, Paper [10] menyebutkan CAPEX Rp 17.150.000/kWp dan menghasilkan NPV positif hanya jika menggunakan *cost of energy* (COE), sedangkan Paper [11] menggunakan tarif ekspor Rp 1.440/kWh dan mendapatkan Payback Period 13 tahun. Dengan demikian, proyek ini memiliki prospek yang lebih baik jika CAPEX dapat dikurangi.

Biaya ini mencakup semua komponen utama (modul surya, inverter, struktur mounting, kabel, combiner box, sistem proteksi) dan jasa instalasi.

Berdasarkan analisis yang dilakukan, proyek PLTS rooftop di Gedung Fakultas Teknik UNG memiliki kelayakan teknis yang sangat baik namun menghadapi tantangan kelayakan ekonomi under current cost assumptions. Untuk meningkatkan kelayakan ekonomi, disarankan untuk menekan biaya investasi awal (CAPEX) melalui negosiasi dengan vendor atau pencarian komponen dengan harga lebih kompetitif. Mempertimbangkan penghematan biaya listrik dari *self-consumption* dalam analisis pendapatan. Mencari insentif pemerintah atau skema pembiayaan yang dapat mengurangi beban investasi. Dengan langkah-langkah tersebut, proyek ini memiliki potensi untuk menjadi layak secara ekonomi dan memberikan kontribusi yang signifikan terhadap keberlanjutan energi di UNG.

Perhitungan NPV dengan Excel

- Tahun 0: Arus Keluar: -Rp 6.638.220.000
- Tahun 1 hingga 25: Arus Masuk: Rp 600.986.700/tahun
- Formula NPV: =NPV(8%, arus kas tahun 1 hingga 25) + arus kas tahun 0
- Hasil: NPV = -Rp 206.220.000

Secara rinci, kapasitas terpasang dari sistem adalah 368,79 kWp, menggunakan 647 unit modul Canadian Solar 570W dan 99 unit inverter Huawei 3 kW. Dari sisi output energi, sistem ini diproyeksikan mampu menghasilkan 486,5 MWh per tahun.

C. Analisis Komparatif

Untuk memperkuat validitas penelitian, dilakukan analisis komparatif dengan dua studi sebelumnya yang juga meneliti potensi PLTS rooftop di Universitas Negeri Gorontalo. Perbandingan ini mencakup aspek teknis, metodologi perencanaan, kapasitas terpasang, hingga indikator keekonomian. Dengan demikian, dapat terlihat posisi penelitian ini dibandingkan penelitian terdahulu, sekaligus menegaskan kontribusi baru yang ditawarkan.

Hasil perbandingan ditunjukkan pada tabel 1.

TABEL 1. PERBANDINGAN HASIL PENELITIAN PLTS ROOFTOP UNG

Parameter	[10] (2022)	[11] (2025)	Penelitian Kami (2025)
Cakupan (Scope)	1 Gedung	Seluruh Kampus	7 Gedung (Fak. Teknik)

Parameter	[10] (2022)	[11] (2025)	Penelitian Kami (2025)
Kapasitas (kWp)	180 kWp	260,7 kWp	368,79 kWp
Teknologi Panel	REC 375W	Polycrystalline 300W	Canadian Solar 570W (Monokristalin)
Metode Perencanaan	Manual & PVsyst	GIS (Luas Atap)	GIS + Simulasi HelioScope
Performance Ratio (PR)	70%	Tidak dihitung	~95,8% (Estimasi)
Solar Access	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	99,2%
CAPEX	Rp 3,087 M	Rp 10,748 M	Rp 6,638 M
CAPEX per kWp	~Rp 17,15 Juta/kWp	~Rp 41,23 Juta/kWp	~Rp 18,00 Juta/kWp
Produksi Energi	236.699 kWh/tahun	±569.300 kWh/tahun	486.500 kWh/tahun
Tarif Ekspor	Rp 735 / Rp 1.261	Rp 1.440	Rp 1.440
Payback Period (PP)	23,9 thn / 12,17 thn	13 Tahun	11,04 Tahun
NPV	-Rp 1,266 M / +Rp 488 Jt	Tidak dihitung	-Rp 206,22 Jt
Kelayakan Kesimpulan	Sensitif terhadap Tarif	Layak	Sangat Layak Teknis, Sensitif Ekonomi

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa cakupan penelitian [10] terbatas pada satu gedung, penelitian [11] mencakup seluruh kampus, sementara penelitian ini difokuskan pada tujuh gedung di Fakultas Teknik. Dari sisi kapasitas, penelitian [10] menghasilkan 180 kWp, [11] sebesar 260,7 kWp, dan penelitian ini sebesar 368,79 kWp, menjadikannya yang terbesar. Teknologi panel juga berkembang, di mana [10] menggunakan REC 375W, [11] menggunakan *polycrystalline* 300W, sedangkan penelitian ini menggunakan panel monokristalin Canadian Solar 570W dengan teknologi terbaru.

Metode perencanaan juga mengalami peningkatan, dari manual dan PVsyst pada [10], GIS berbasis luas atap pada [11], hingga kombinasi GIS dan simulasi HelioScope yang lebih detail pada penelitian ini. Performance Ratio (PR) yang diperoleh masing-masing adalah 70% untuk [10], tidak dihitung pada [11], dan sekitar 95,8% untuk penelitian ini. Tingkat solar access tidak disebutkan pada dua penelitian terdahulu, namun pada penelitian ini mencapai 99,2%.

Nilai *Performance Ratio* (PR) yang sangat tinggi terutama dipengaruhi oleh penggunaan modul berkapasitas besar dengan efisiensi tinggi, konfigurasi sistem yang optimal melalui simulasi HelioScope, serta kondisi shading yang hampir tidak ada, yang tercermin dari nilai solar access mencapai 99,2%. Faktor terakhir ini menjadi dominan karena area atap gedung Fakultas Teknik memiliki orientasi dan kemiringan yang mendukung penangkapan radiasi matahari secara maksimal tanpa hambatan fisik di sekitarnya.

Dari sisi biaya, CAPEX pada [10] sebesar Rp 3,087 miliar, pada [11] sebesar Rp 10,748 miliar, sementara penelitian ini berada di tengah dengan Rp 6,638 miliar. Biaya per kWp masing-masing tercatat sekitar Rp 17,15 juta/kWp, Rp 41,23 juta/kWp, dan Rp 18 juta/kWp.

Produksi energi tahunan pada [10] sebesar 236.699 kWh, pada [11] sekitar 569.300 kWh, dan penelitian ini menghasilkan 486.500 kWh. Tarif ekspor yang digunakan adalah Rp 735 atau Rp 1.261 untuk [10], Rp 1.440 untuk [11], serta Rp 1.440 untuk penelitian ini sesuai regulasi terbaru. Payback Period tercatat 23,9 tahun atau 12,17 tahun pada [10] tergantung skenario, 13 tahun pada [11], dan lebih singkat pada penelitian ini yaitu 11,04 tahun. Dari sisi NPV, [10] menghasilkan nilai -Rp 1,266 miliar atau +Rp 488 juta tergantung asumsi, [11] tidak menghitung, sementara penelitian ini menghasilkan -Rp 206,22 juta.

Selain itu, analisis sensitivitas menunjukkan bahwa kelayakan ekonomi proyek dapat meningkat secara signifikan dengan perubahan asumsi kunci. Jika CAPEX dapat ditekan sebesar 10–20%, maka nilai NPV berpotensi berubah dari negatif menjadi mendekati atau bahkan melampaui titik impas, sementara Payback Period dapat turun hingga kisaran 8–9 tahun. Skenario lain adalah penerapan self-consumption sebesar 40%, yang memungkinkan sebagian energi digunakan langsung untuk kebutuhan kampus sehingga menggantikan biaya listrik PLN. Dengan tarif listrik yang lebih tinggi daripada tarif ekspor, porsi konsumsi mandiri tersebut memberikan nilai ekonomis yang lebih besar dan dapat meningkatkan NPV serta memperbaiki BCR dan IRR secara substansial. Temuan ini mengindikasikan bahwa proyek akan menjadi jauh lebih menarik secara finansial apabila strategi pengurangan CAPEX dan optimasi self-consumption dapat diterapkan.

Secara keseluruhan, kesimpulan kelayakan menunjukkan bahwa [10] sensitif terhadap tarif listrik, [11] dinilai layak, dan penelitian ini sangat layak secara teknis namun sensitif secara ekonomi.

Di luar aspek teknis dan ekonomi, implementasi PLTS rooftop di lingkungan kampus juga menghadapi beberapa kendala penting yang perlu diperhatikan sejak tahap perencanaan. Pertama, struktur atap tiap gedung harus diverifikasi secara detail untuk memastikan kemampuan menahan beban tambahan dari modul, rangka mounting, serta beban angin, sehingga diperlukan koordinasi dengan ahli struktur dan kemungkinan penguatan atap. Kedua, pertimbangan keselamatan menjadi prioritas, termasuk akses kerja untuk teknisi, pemasangan jalur evakuasi, proteksi kebakaran, grounding, serta standar proteksi listrik yang sesuai agar instalasi aman sepanjang umur proyek. Ketiga, potensi oversize inverter juga harus diperhitungkan, karena rasio DC/AC yang terlalu tinggi dapat menyebabkan clipping energi pada jam puncak, sementara rasio yang terlalu rendah dapat mengurangi pemanfaatan modul secara optimal. Ketiga aspek ini perlu dianalisis secara menyeluruh agar implementasi PLTS *rooftop* dapat berjalan aman, handal, dan sesuai standar teknis.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa integrasi analisis GIS dengan simulasi HelioScope efektif dalam menghasilkan desain PLTS rooftop yang lebih akurat dan aplikatif untuk Gedung Fakultas Teknik UNG. Sistem berkapasitas 368,79 kWp yang diusulkan menunjukkan kinerja teknis yang sangat baik, tercermin dari Performance Ratio 95,8% dan solar access 99,2%, sehingga memperkuat kontribusi metodologi ini dalam peningkatan akurasi perencanaan PLTS

dibandingkan studi sebelumnya. Dari sisi ekonomi, hasil analisis menunjukkan bahwa kelayakan finansial sangat dipengaruhi oleh besaran CAPEX dan skema operasional energi. Payback Period sebesar 11,04 tahun menunjukkan potensi keekonomian yang menjanjikan, namun peningkatan nilai proyek masih dapat dicapai melalui strategi seperti negosiasi harga komponen—misalnya melalui kerja sama dengan vendor lokal untuk memperoleh harga lebih kompetitif—serta optimalisasi skema self-consumption yang dapat meningkatkan penghematan energi secara langsung. Secara praktis, desain PLTS rooftop yang direkomendasikan dapat menjadi model implementasi energi terbarukan di institusi pendidikan, khususnya di wilayah Indonesia Timur yang memiliki potensi iradiasi tinggi. Penekanan penting terletak pada sinergi antara optimalisasi teknis (reduksi shading, konfigurasi modul-inverter) dan strategi ekonomi (penurunan CAPEX, pemilihan skema operasional), karena keduanya menentukan keberhasilan implementasi di lapangan. Penelitian ini membuka ruang untuk riset lanjutan, terutama dengan memasukkan variabel yang belum dianalisis secara mendalam, seperti variasi harga panel di masa mendatang, pengaruh degradasi panel tahunan, simulasi self-consumption berbagai skenario beban, serta evaluasi risiko teknis pada tahap implementasi. Kajian lebih lanjut mengenai integrasi PLTS dengan sistem penyimpanan energi atau smart energy management juga dapat memperkaya pemahaman mengenai strategi optimal dalam penerapan PLTS di sektor pendidikan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Fakultas Teknik Universitas Negeri Gorontalo atas dukungan pendanaan melalui program Riset Kolaboratif Dalam Negeri (RKDN) tahun 2025. Dukungan finansial dan fasilitas penelitian yang diberikan telah memungkinkan terlaksananya penelitian ini secara optimal. Penulis juga menyampaikan penghargaan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) UNG yang telah memfasilitasi skema kolaborasi penelitian ini. Ucapan terima kasih ditujukan kepada seluruh tim teknis dan mitra kolaborasi yang telah berkontribusi dalam pengumpulan data, simulasi, dan analisis yang mendukung kesempurnaan penelitian ini. Tidak lupa penulis menyampaikan apresiasi kepada para reviewer yang telah memberikan masukan berharga untuk penyempurnaan artikel ilmiah ini. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi berarti bagi pengembangan energi terbarukan di Indonesia, khususnya dalam implementasi PLTS *rooftop* di institusi pendidikan.

REFERENSI

- [1] International Energy Agency. (2023). Renewable Energy Market Update. Paris: IEA Publications.
- [2] A. Kumar et al., "Solar energy: review of potential green & clean energy for long-term sustainability," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, pp. 1-25, 2023.
- [3] J. W. Creswell, *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2022.
- [4] M. A. Green et al., "Solar cell efficiency tables (version

- 61)," *Progress in Photovoltaics*, vol. 31, no. 1, pp. 3-16, 2023.
- [5] T. Blank and A. A. Kumar, "Financial analysis of solar energy investments," *Renewable Energy Finance*, vol. 15, no. 2, pp. 45-62, 2023.
- [6] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Cambridge: Academic Press, 2022.
- [7] R. Foster et al., *Solar Energy: Renewable Energy and the Environment*. Boca Raton: CRC Press, 2022.
- [8] National Renewable Energy Laboratory. (2023). PVWatts Calculator. [Online]. Available: <https://pvwatts.nrel.gov>
- [9] Indonesian Ministry of Energy and Mineral Resources, "National Energy Policy," Jakarta: MEMR, 2022.
- [10] R. Rafli, J. Ilham, 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.
- [11] S. Salim, A. I. Tolago, I. Z. Nasibu, "A hybrid power plant with the synchronization controller system for saving electrical energy use," *Intellectual Journal of Energy Harvesting and Storage*, vol. 3, no. 1, pp. 1-12, 2025.
- [12] Global Solar Atlas. (2023). Solar Resource Maps of Indonesia. [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info>
- [13] H. J. Wagner et al., "Energy payback time and carbon footprint of solar energy systems," *Energy Sustainability and Society*, vol. 13, no. 1, pp. 1-15, 2023.
- [14] Indonesian Solar Energy Association, "Solar Energy Market Report 2023," Jakarta: ISEA, 2023.
- [15] A. A. Kebede et al., "A comprehensive review of solar energy development and policy in developing countries," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 526-543, 2023. -2064.
- [16] Hidayat, I. (2024). Optimizing rooftop solar panel deployment: A GIS-based analysis at KFUPM. *Mustek Anim Ha*, 13(3), 79-86.