

Analisis Kelayakan Tekno-Ekonomi Penerapan Sistem *Photovoltaic On-Grid* di Gedung FISKOM, Universitas Kristen Immanuel

Anita Yuan^{1*}, Emerita Setyowati², Ramona Larosa³

^{1,2,3} Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Komputer, Universitas Kristen Immanuel, Yogyakarta.

^{1,2} Lembaga Pengembangan Energi Terbarukan, Universitas Kristen Immanuel, Yogyakarta.

*Penulis Korespondensi, email: yuan@ukrimuniversity.ac.id

Received: 04/12/2025

Revised: 17/12/2025

Accepted: 28/12/2025

Abstract. This research adopts a quantitative, simulation-based approach combined with techno-economic analysis to assess and compare multiple rooftop Photovoltaic (PV) design configurations. The case study is conducted at the Faculty of Science and Computer Science (FISKOM) building, Universitas Kristen Immanuel, which operates under a social electricity tariff category. The evaluated system is an On-Grid Photovoltaic (PV) system integrated with the national utility grid. Four configuration schemes—Full-Roof, North-Roof, Meter-Based, and Load-Based—are analyzed over a 25-year investment period with a discount rate of 4.75%. Economic performance is assessed using the Levelized Cost of Energy (LCOE), Net Present Value (NPV), and Payback Period, while technical performance is evaluated through the Performance Ratio (PR), Energy Yield, and System Losses. The results indicate that system oversizing is the primary economic constraint. The Full-Roof configuration is not economically feasible under existing load conditions, as reflected by a high LCOE of Rp12,104/kWh and a significantly negative NPV of -Rp403,754,280 due to surplus energy that cannot be effectively utilized. Meanwhile, the Meter-Based configuration demonstrates the most balanced performance, achieving a PR of 79%, an energy yield of 1,632 kWh/kWp, system losses of 15%, and a positive NPV of Rp56,033,601. These findings confirm that the feasibility of On-Grid PV systems is highly dependent on the alignment between system capacity and actual energy consumption. While larger-capacity systems may exhibit superior technical performance, they can impose financial burdens when excess energy is not absorbed by the load. Therefore, a capacity optimization approach, particularly through the Meter-Based scheme, is recommended to ensure technical efficiency while avoiding economic losses from unutilized energy production.

Keywords: Feasibility study, PV rooftop, PV On-Grid, Payback Period (PP), Net Present Value (NPV), LCOE (Levelized Cost of Electricity), Energy yield, Performance Ratio (PR).

Abstrak. Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif berbasis simulasi dengan pendekatan analisis tekno-ekonomi untuk mengevaluasi dan membandingkan beberapa skema perancangan PLTS atap. Studi kasus dilakukan di Gedung Fakultas Sains dan Komputer (FISKOM), Universitas Kristen Immanuel, dengan golongan tarif listrik sosial. Sistem yang dianalisis merupakan *Photovoltaic (PV) On-Grid* yang terintegrasi dengan jaringan PLN. Evaluasi dilakukan terhadap empat skema konfigurasi, yaitu *Full-Roof*, *North-Roof*, *Meter-Based*, dan *Load-Based*, menggunakan periode investasi 25 tahun dan tingkat diskonto sebesar 4,75%. Analisis ekonomi dilakukan menggunakan indikator *Levelized Cost of Energy* (LCOE), *Net Present Value* (NPV), dan *Payback Period*, sedangkan kinerja teknis dievaluasi melalui *Performance Ratio* (PR), *Energy Yield*, dan *System Losses*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *oversizing* sistem merupakan kendala utama dari sisi ekonomi. Skema *Full-Roof* tidak layak pada kondisi beban eksisting, yang ditunjukkan oleh nilai LCOE sebesar Rp12.104/kWh dan NPV negatif signifikan sebesar -Rp403.754.280 akibat produksi energi berlebih yang tidak termanfaatkan. Sementara, skema *Meter-Based* menunjukkan kinerja paling seimbang, dengan PR sebesar 79%, *Energy Yield* 1.632 kWh/kWp, *System Losses* 15%, serta NPV positif sebesar Rp56.033.601. Temuan ini menegaskan bahwa kelayakan sistem PV *On-Grid* sangat dipengaruhi oleh kesesuaian kapasitas sistem terhadap konsumsi energi aktual. Sistem berkapasitas besar dapat menunjukkan kinerja teknis yang lebih baik, namun berpotensi menimbulkan kerugian finansial apabila energi yang dihasilkan tidak terserap secara optimal. Oleh karena itu, pendekatan optimasi kapasitas, khususnya melalui skema *Meter-Based*, direkomendasikan untuk menjaga keseimbangan antara efisiensi teknis dan kelayakan ekonomi.

Kata Kunci: Studi kelayakan, PLTS atap, PV *On-Grid*, *Payback Period* (PP), *Net Present Value* (NPV), *LCOE* (*Levelized Cost of Electricity*), *Energy yield*, *Performance Ratio* (PR).

I. PENDAHULUAN

Pemerintah Indonesia menetapkan target transisi energi melalui komitmen *Net Zero Emission* pada tahun 2060 atau lebih cepat, sejalan dengan *Paris Agreement*. Salah satu langkah strategis yang diambil adalah meningkatkan porsi Energi Baru Terbarukan (EBT) dalam bauran energi nasional, dengan target 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050, sebagaimana tercantum dalam Kebijakan Energi Nasional (KEN) [1]. Energi surya, sebagai salah satu sumber EBT dengan potensi terbesar di Indonesia, kini berkembang pesat didukung oleh kebijakan pemerintah yang mendorong peralihan dari energi fosil ke energi bersih melalui program *energy transition* [2][3].

Salah satu teknologi utama dalam pemanfaatan energi surya adalah sistem *Photovoltaic* (PV), yang mampu menghasilkan listrik dari sinar matahari. Sistem ini tidak hanya berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) tetapi juga membantu menekan biaya operasional listrik pada bangunan. Namun, sistem PV tergolong *Variable Renewable Energy* (VRE), yang memiliki karakteristik *intermittent* karena keluaran energinya sangat bergantung pada kondisi cuaca. Oleh karena itu, perencanaan yang cermat, termasuk analisis teknis dan ekonomi, menjadi hal yang esensial untuk memastikan keberhasilan implementasi dan kelayakan investasi [4].

Penelitian tentang memeriksa peluang energi dalam menggunakan sistem PV di gedung adalah langkah penting sebelum memasang sistem. Studi ini penting untuk mengetahui apakah pembangkit listrik berbasis energi terbarukan pada bangunan layak digunakan di bangunan tersebut. Contohnya yang telah dilakukan oleh Pratama et al, telah mengkaji potensi pemanfaatan atap gedung Pusat Pemerintahan (Puspem) Kabupten Bandung menggunakan perangkat lunak System Advisor Model (SAM) [5]. Dengan metode dan perangkat lunak yang sama dilakukan oleh Rizkasari et al., pada gedung Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan

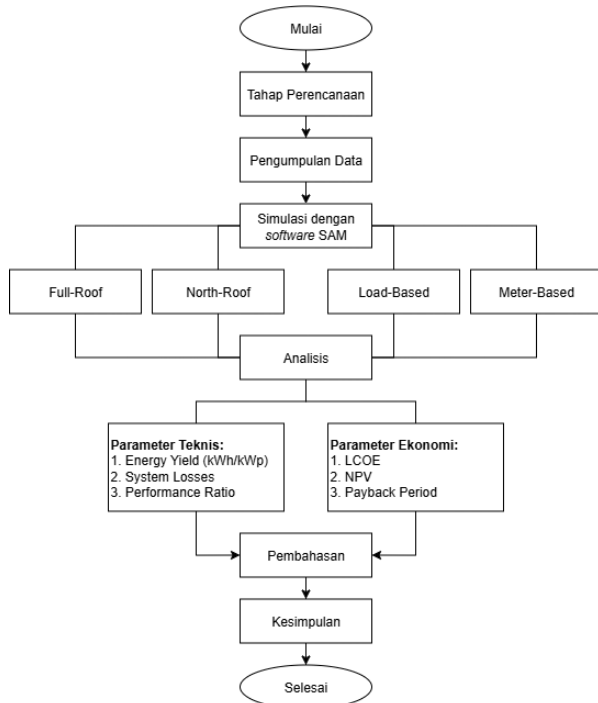
dan Energi Sumber Daya Mineral (PUP-ESDM) Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta [6], selain itu oleh Zulkifli et al., pada gedung kantor Setjen KESDM – Jakarta [7]. Selain perangkat lunak SAM, potensi energi dari sistem PV dapat dilakukan dengan perangkat lunak lainnya, contohnya kajian yang telah dilakukan oleh Yuan & Setyowati pada analisis potensi PLTS Atap pada salah satu gedung kampus [8]. Namun pada penelitian ini, belum dilakukan kajian ekonomi untuk mendukung analisis kelayakan penerapan sistem pada gedung.

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi dan kelayakan secara teknis dan finansial dari penerapan sistem PV *On-Grid* di Gedung FISKOM. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar pengambilan keputusan bagi UKRIM dalam mendukung penggunaan energi terbarukan, sekaligus menjadi referensi bagi institusi lain yang ingin beralih ke energi surya.

II. METODOLOGI

Jenis penelitian Analisis Kelayakan Tekno-Ekonomi Sistem *Photovoltaic On-Grid* di Gedung FISKOM, Universitas Kristen Immanuel dengan System Advisor Model (SAM) bersifat kuantitatif. Penelitian diawali dengan tahap perencanaan dan pengumpulan data teknis serta operasional bangunan sebagai dasar analisis. Data teknis dikumpulkan meliputi luas area atap gedung, potensi radiasi, kemiringan serta orientasi yang akan digunakan. Data biaya instalasi, biaya operasi, dan biaya perawatan sebagai acuan analisis ekonomi. Selanjutnya, dilakukan simulasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap menggunakan perangkat lunak System Advisor Model (SAM) dengan empat skema perancangan, yaitu *Full-Roof*, *North-Roof*, *Load-Based*, dan *Meter-Based*. Hasil simulasi kemudian dianalisis secara komprehensif berdasarkan parameter teknis yang meliputi *Energy Yield* (*kWh/kWp*), *System Losses*, dan *Performance Ratio* (PR), serta parameter ekonomi yang mencakup *Levelized Cost*

of Energy (LCOE), Net Present Value (NPV), dan Payback Period. Pada analisis ekonomi, setiap konfigurasi dibagi menjadi dua keadaan, yaitu: (1) Berdasarkan beban eksisting dan (2) Tidak berdasarkan beban eksisting. Adapun diagram alur penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

A. Analisis teknik

Aspek teknis dalam analisis perancangan ini menghitung kinerja PLTS yang terdiri:

1. Hasil produksi energi listrik

Hasil produksi energi listrik ini adalah jumlah yang dihasilkan dari sistem PLTS. Hasil produksi energi yang dimaksud dapat dinyatakan dalam tahunan. Energi tahunan adalah ukuran dari total jumlah listrik yang dihasilkan oleh sistem selama satu tahun dengan satuan kWh/tahun. Selain itu juga dapat dilihat dari *Energy Yield*. *Energy Yield* menampilkan rasio antara keluaran listrik AC tahunan sistem pada tahun pertama terhadap kapasitas DC terpasangnya [9].

$$\text{Energy Yield (kWh/kW)} = \frac{\text{Annual Energy (kWh)}}{\text{Nameplate Capacity (kWp)}} \quad (1)$$

2. Losses

Losses dalam sistem PLTS adalah kerugian energi atau penurunan daya keluaran yang terjadi pada berbagai tahap proses konversi energi matahari menjadi listrik yang dapat digunakan. Secara matematis, *losses* sering dinyatakan sebagai persentase dari energi potensial total yang bisa dihasilkan oleh sistem tanpa rugi-rugi.

3. Performance Ratio (PR)

Performance Ratio memperkirakan kualitas pada sistem PLTS untuk mengetahui seberapa banyak persentase pengaruh kinerja total. Rasio kinerja (*performance ratio*) adalah ukuran dari keluaran listrik tahunan sistem PV dalam satuan AC kWh dibandingkan dengan kapasitas terpasang (*nameplate rated capacity*) dalam satuan DC kW, dengan mempertimbangkan sumber daya surya di lokasi sistem, serta pengaruh bayangan (*shading*) dan kotoran (*soiling*) pada *array*. Sistem PLTS yang

80%. Nilai PR yang dinilai layak secara teknis untuk sistem baru biasanya berkisar antara 70% hingga 90% [9]. Menurut standar IEC 61724-1, menghitung *Performance Ratio* dapat dinyatakan:

$$PR = \frac{E_{\text{output}} / H_{\text{POA}}}{P_{\text{STC}} / G_{\text{STC}}} \quad (2)$$

Keterangan:

PR : *Performance Ratio* (%)

E_{output} : Output energi *actual* (kWh)

H_{POA} : Total radiasi surya yang jatuh pada *array* sebelum diterapkan *losses* akibat bayangan (*shading*) dan debu (*soiling*) selama satu tahun (kWh/m²)

P_{STC} : Kapasitas panel terpasang (kW)

G_{STC} : Iradiasi dalam STC (1000 W/m²)

B. Analisis ekonomi

Setelah melakukan analisis perancangan dan analisis teknis, selanjutnya aspek ekonomi dinilai perancangan tersebut. Kelayakan aspek ekonomi dalam analisis perancangan ini dinilai melalui parameter berikut ini:

1. Levelized Cost of Energy (LCOE).

Levelized Cost of Energy (LCOE) adalah parameter yang digunakan untuk menghitung biaya rata-rata per unit energi yang dihasilkan oleh suatu proyek pembangkit listrik selama masa pakainya [10]. Proyek dianggap layak jika LCOE lebih rendah atau setara dengan tarif listrik yang berlaku di pasar. Jika LCOE dari proyek lebih rendah dari biaya yang dibayar pengguna untuk listrik dari sumber lain, proyek ini layak dari sudut pandang ekonomi karena mampu bersaing dengan pembangkit listrik lainnya.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{It + Mt + Ft}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Et}{(1+r)^t}} \quad (3)$$

Keterangan:

LCOE : biaya rata-rata seumur hidup untuk pembangkit

It : biaya investasi pada tahun ke – t

Mt : biaya operasional dan pemeliharaan pada tahun ke – t

Ft : biaya bahan bakar di tahun ke – t

Et : total energi listrik yang dihasilkan pada tahun ke-t

r : tingkat diskon

n : umur pakai pembangkit

2. Net Present Value (NPV).

Net Present Value (NPV) merupakan nilai yang menunjukkan jumlah yang akan dihasilkan dari sebuah investasi sistem. Investasi layak diterima, apabila *Net Present Value* (NPV) bernilai positif (>0) [11].

$$NPV = \sum_{i=0}^n \frac{NFC_t}{(1-i)^t} - II \quad (4)$$

Keterangan:

NPV : *Net Cash Flow* periode tahun ke-1 sampai ke-n

II : Investasi awal (Initial Investment)

I : Tingkat diskon

n : Periode dalam tahun (umur investasi)

3. Payback Period (PP).

Payback Period (PP) merupakan parameter yang digunakan untuk menghitung seberapa cepat

waktu yang diperlukan untuk mengembalikan sebuah investasi sistem. Proyek dianggap layak jika periode pengembaliannya lebih pendek dari waktu yang diinginkan oleh investor atau perusahaan. Misalnya, jika target *payback period* adalah 5 tahun, maka proyek yang mengembalikan investasi dalam ≤ 5 tahun dianggap layak [11]. Nilai dari *payback period* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$PP = \frac{\text{Investasi awal}}{\text{penerimaan periodik kas bersih}} \quad (5)$$

C. Software System Advisor Model (SAM)

System Advisor Model (SAM) dikembangkan oleh *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) oleh Departemen Energi Amerika Serikat. *System Advisor Model* (SAM) membuat prediksi performa dan estimasi energi untuk proyek-proyek listrik yang bersifat terhubung ke jaringan (*On-Grid*) salah satunya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) (NREL, 2023).

Tabel 1. Kelebihan dan Kekurangan Software SAM

Kelebihan	Kekurangan
Mudah digunakan dan Gratis, mudah dimengerti, hasil dalam bentuk grafis, tersedia fitur penambahan modul dan inverter secara manual.	Pemodelan 3D <i>shading</i> tidak mendukung, keterbatasan data cuaca

Untuk menutupi keterbatasan yang terdapat pada perangkat lunak *System Advisor Model* (SAM), peneliti menggunakan Software *Helioscope* sebagai perangkat tambahan untuk memetakan (*plotting*) modul PV dalam proses perancangan sistem.

D. Software *helioscope*

HelioScope adalah program yang diperkenalkan oleh Folsom Lab USA untuk merancang sistem PLTS terutama sistem *On-Grid*. Program ini memiliki beberapa fitur *PVSyst* dan menambahkan fungsionalitas desain *AutoCAD*, memungkinkan desainer untuk melakukan desain lengkap dengan satu paket. Alamat lokasi, konfigurasi *array*, modul PV dan spesifikasi

inverter merupakan input utama yang dibutuhkan oleh HelioScope.

HelioScope adalah alat berbasis web. Program ini memungkinkan peneliti untuk melakukan simulasi lengkap perencanaan berupa tampilan 3D sehingga pengguna mampu mengetahui potensi *shading*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran umum lokasi

Gedung Fakultas Sains dan Komputer (FISKOM) Universitas Kristen Immanuel merupakan salah satu bangunan utama yang berfungsi sebagai pusat kegiatan akademik, administrasi, dan laboratorium. Gedung ini berlokasi di Jl. Ukrim No. 23, Cupuwatu I, Purwomartani, Kecamatan Kalasan, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta dengan titik koordinat (-7.774788030013, 110.44923613902).

Secara geografis, wilayah ini berada pada zona iklim tropis dengan intensitas radiasi matahari yang relatif tinggi sepanjang tahun, sehingga memiliki potensi yang baik untuk pemanfaatan sistem *Photovoltaic* (PV). Atap gedung terdiri dari beberapa bidang dengan dimensi 33.9 m × 12.2 m serta orientasi dan luas yang berbeda, memungkinkan eksplorasi berbagai skema pemasangan modul PV seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Luas Atap Gedung FISKOM
(Sumber: Gambar Kerja Bangunan, 2023)

B. Desain sistem PV dan skema konfigurasi

1. Spesifikasi umum sistem

Sistem *Photovoltaic* (PV) yang dianalisis dalam penelitian ini dirancang dengan mengacu pada standar teknis umum yang digunakan pada instalasi PLTS *On-Grid* untuk bangunan komersial dengan menawarkan empat skema konfigurasi berbeda seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Kapasitas Komponen Utama Sistem

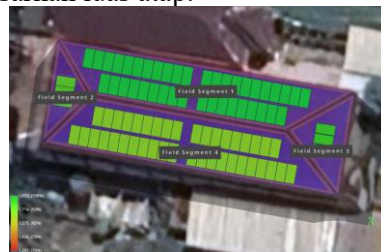
Kapasitas	Skema			
	A	B	C	D
Modul PV (kWp)	47.3	22	1.65	6
Inverter (kW)	40	15	1.2	5

Parameter teknis utama, seperti kapasitas modul, efisiensi inverter, sudut kemiringan (*tilt*), serta arah orientasi (*azimuth*), ditetapkan berdasarkan kondisi fisik atap Gedung FISKOM dan standar desain sistem PV. Pemilihan konfigurasi sistem dilakukan dengan mempertimbangkan ketersediaan luas atap, optimasi faktor produksi energi, serta kesesuaian dengan profil beban listrik gedung.

2. Skema konfigurasi

Dalam penelitian ini, perancangan sistem PV *On-Grid* pada Gedung FISKOM dilakukan melalui empat skema konfigurasi yang mewakili variasi pendekatan desain berdasarkan skema:

- Full Roof*: optimasi kapasitas maksimum berdasarkan luas atap.



Gambar 3. Plotting Modul PV pada Skema *Full Roof*

- North Roof*: penggunaan sebagian atap yang mengarah utara.



Gambar 4. Plotting Modul PV pada Skema *North Roof*

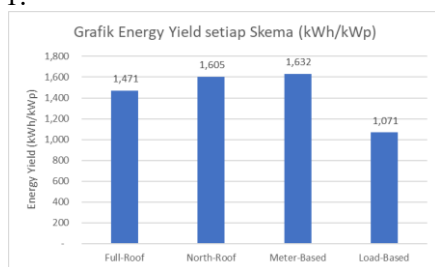
- Load-Based*: kapasitas disesuaikan dengan beban harian gedung.
- Meter-Based*: kapasitas disesuaikan dengan batasan kWh meter terpasang pada gedung.

Setiap skema disusun untuk mengevaluasi potensi produksi energi dan kelayakan ekonomi dari sudut pandang yang berbeda, sehingga dapat diperoleh rekomendasi desain yang paling optimal dan sesuai dengan kondisi operasional gedung.

C. Hasil analisis teknis

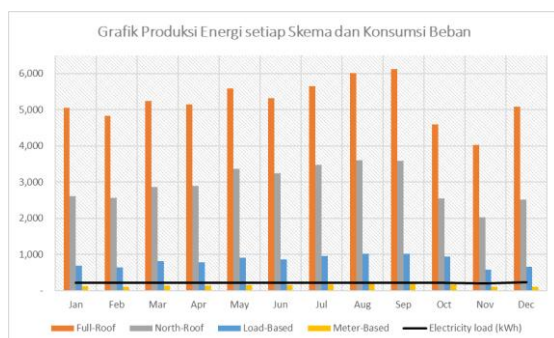
1. Energy Yield (kWh/kWp)

Analisis *energy yield* dilakukan untuk mengetahui potensi produksi listrik dari masing-masing skema konfigurasi sistem PV yang dirancang. Software SAM digunakan dalam simulasi ini dengan hasil yang dapat dilihat pada Bagan 1.



Bagan 1. Bagan *Energy Yield* (kWh/kWp) Setiap Skema.

Bagan menunjukkan bahwa skema *Meter-Based* menghasilkan *energy yield* (kWh/kWp) tertinggi sebesar 1.632 kWh/kWp, diikuti *North-Roof* dengan 1.605 kWh/kWp. Kedua skema ini memanfaatkan orientasi modul yang lebih optimal (menghadap Utara). Skema *Full-Roof* mencatat *yield* 1.471 kWh/kWp, sedangkan *Load-Based* memiliki nilai terendah, yaitu 1.071 kWh/kWp, akibat kapasitas yang dibatasi beban gedung sehingga potensi iradiasi tidak termanfaatkan penuh. Selain itu, didapatkan juga hasil produksi energi sepanjang tahun yang dibandingkan dengan profil beban gedung sepanjang tahun yang dapat dilihat pada Bagan 2.



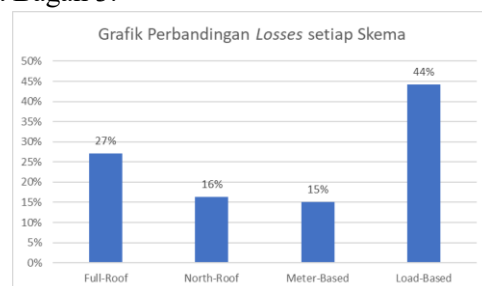
Bagan 2. Bagan Produksi Energi Sepanjang Tahun

Bagan 2 menunjukkan bahwa skema *Full-Roof* memiliki produksi energi tertinggi di seluruh bulan, yakni sekitar 4.500–6.000 kWh, sejalan dengan kapasitas sistem yang paling besar. *North-Roof* menghasilkan 2.200–3.000 kWh, sedangkan *Meter-Based* stabil pada 700–900 kWh per bulan. *Load-Based* mencatat output paling rendah 90–200 kWh karena kapasitas dibatasi sesuai beban puncak gedung.

Namun demikian, baik skema *Full-Roof* maupun *North-Roof* menghasilkan *excess generation* yang sangat tinggi, dengan rata-rata mencapai 2.000% untuk *Full-Roof* dan 1.200% untuk *North-Roof*. Pada skema *Meter-Based*, kelebihan produksi masih terjadi namun dalam tingkat yang lebih rendah, yaitu sekitar 270%. Sebaliknya, skema *Load-Based* tidak menghasilkan surplus energi sama sekali melainkan sekitar 30% kebutuhan listrik gedung tidak dapat dipenuhi oleh sistem PV pada skema ini.

2. System losses

System losses membahas rugi-rugi listrik yang muncul pada setiap skema konfigurasi PV melalui perbandingan kuantitatif terhadap seluruh komponen kehilangan energi, seperti kerugian termal, *mismatch*, *soiling*, inverter *clipping*, serta konversi AC-DC. Perbandingan *losses* disajikan pada Bagan 3.



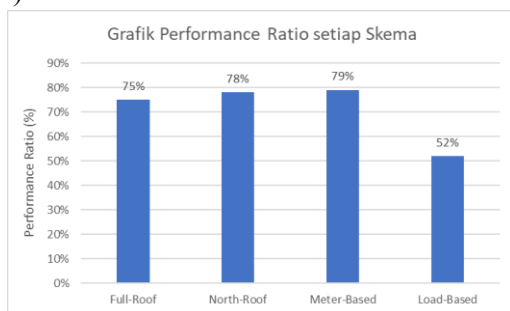
Bagan 3. Perbandingan *Losses* pada Setiap Skema

Bagan 3 menunjukkan perbedaan proporsi *system losses* pada masing-masing skema PV. *Load-Based* memiliki *losses* tertinggi, yaitu 44%, yang terutama disebabkan oleh inverter *clipping*. *Full-Roof* mencatat *losses* sebesar 27%, lebih tinggi dibandingkan skema *North-Roof* dan *Meter-Based*, sebagian dipengaruhi oleh inverter *clipping* dan batasan interkoneksi jaringan. Skema *North-Roof*

dan *Meter-Based* menunjukkan kinerja terbaik dengan *losses* relatif rendah, masing-masing 16% dan 15%, mencerminkan mencerminkan efektivitas konfigurasi sistem dan pemanfaatan inverter yang lebih optimal.

3. Performance Ratio (PR)

Bagan *Performance Ratio* (PR) berikut menyajikan perbandingan tingkat kinerja efektif sistem PV pada setiap skema desain. Nilai PR yang lebih tinggi menunjukkan sistem yang lebih efisien dan stabil dalam beroperasi, serta lebih mendekati standar performa yang direkomendasikan (60% - 90%)



Bagan 4. *Performance Ratio* pada Setiap Skema

Dari Bagan 4 terlihat bahwa *Meter-Based* memiliki PR tertinggi yaitu 79%, diikuti oleh *North-Roof* sebesar 78%, keduanya menunjukkan kinerja sistem yang sangat baik dan memenuhi standar internasional. Skema *Full-Roof* mencatat PR 75%, tepat pada batas standar, menunjukkan bahwa meskipun kapasitasnya besar, kehilangan sistem masih dapat dikendalikan secara moderat. Sebaliknya, skema *Load-Based* hanya menghasilkan PR 52%, jauh di bawah standar kelayakan. Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa konfigurasi *North-Roof* dan *Meter-Based* memberikan kinerja paling efisien, sementara *Load-Based* memerlukan optimasi desain yang lebih komprehensif.

D. Hasil analisis ekonomi

1. Parameter ekonomi

Bagian ini menjelaskan parameter ekonomi yang digunakan dalam analisis kelayakan sistem. Asumsi biaya investasi per Wp sebesar Rp 10,597/Wp mencakup komponen *Balance of System* (BoS), pekerjaan instalasi, dan biaya kirim. Nilai ini

didapatkan dari hasil perhitungan proyek PLTS Atap yang sebelumnya telah dilakukan di kampus UKRIM. Sementara untuk komponen utama sistem yaitu Modul PV dan Inverter *On-Grid*, harga didapatkan dari *e-commerce* yang tersedia ditambah dengan 11% PPN. Tarif listrik PLN yang digunakan pada penelitian ini adalah Golong Tarif Sosial (S-2/TR) dengan biaya Rp 900,-/kWh. Diterapkan pula biaya abodemen atau Rekening Minimum yang ditetapkan oleh PLN dengan Persamaan (5) [12].

$$RM1 = 40 (\text{jam nyala}) \times \text{daya tersambung} \times \text{biaya pemakaian} \quad (5)$$

Discount rate sebesar 4.75% yang ditetapkan dari Bank Indonesia [13]. Umur sistem diestimasikan selama 25 tahun sesuai dengan jangka garansi modul PV, biaya operasi dan pemeliharaan ditetapkan 1% dari investasi awal, dan kapasitas terpasang pada masing-masing skema seperti pada Tabel 2. Parameter yang digunakan dalam setiap skema dituangkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Parameter ekonomi yang digunakan

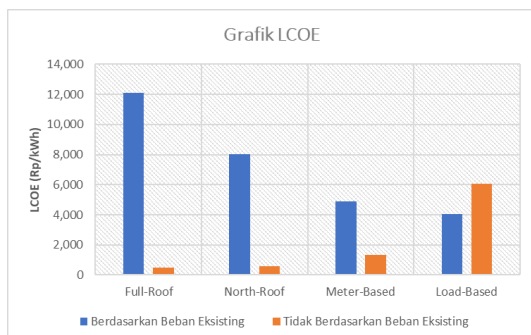
Parameter	Full-Roof	North-Roof	Meter-Based	Load-Based
Investasi awal (Rp)	437,966,836	224,233,971	59,497,021	14,822,561
Maintenance tahunan (Rp)	4,379,668	2,242,340	594,970	148,226
Harga listrik (Rp)	900	900	900	900
Daya tersambung (kVA)	23	23	23	23
Biaya abodemen tahunan (Rp)	9,936,000	9,936,000	9,936,000	9,936,000
Total Investasi (Rp)	795,858,545	528,692,464	322,771,277	266,928,201

Dalam analisis kelayakan ekonomi, setiap skema konfigurasi dievaluasi pada dua kondisi perhitungan. Pada kondisi pertama, perhitungan ekonomi didasarkan pada profil beban eksisting, sehingga penghematan biaya listrik merefleksikan

konsumsi energi aktual gedung saat ini. Pada kondisi kedua, diasumsikan bahwa sistem dirancang untuk dapat memanfaatkan sedikitnya 90% dari total produksi energi sistem PV, sehingga seluruh energi yang dihasilkan dapat digunakan secara optimal oleh gedung.

2. Levelized Cost of Energy (LCOE)

Analisis LCOE (*Levelized Cost of Electricity*) menunjukkan bahwa penyesuaian kapasitas sistem terhadap pola konsumsi beban aktual merupakan faktor kunci dalam mencapai efisiensi biaya pada proyek sistem PV. Hasil perhitungan memperlihatkan perbedaan yang sangat mencolok antara dua pendekatan evaluasi seperti pada Bagan 5.



Bagan 5. Bagan Hasil LCOE

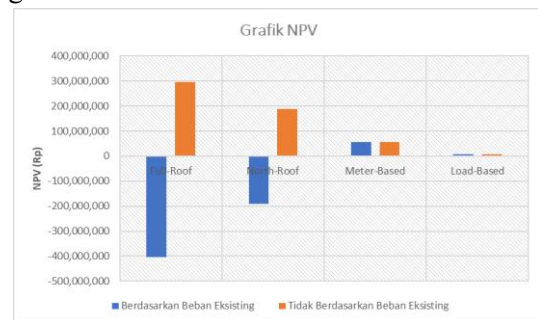
LCOE yang dihitung berdasarkan beban eksisting tercatat jauh lebih tinggi mencapai hingga sekitar Rp 12.000/kWh pada skema *Full-Roof* yang mengindikasikan adanya penalti biaya akibat *oversizing* sistem. Sebaliknya, pada perhitungan yang tidak dibatasi oleh beban eksisting, nilai LCOE dapat turun secara signifikan hingga di bawah Rp 500/kWh, mencerminkan biaya energi yang sangat rendah apabila seluruh produksi PLTS dapat dimanfaatkan sepenuhnya.

Dalam konteks beban aktual, skema *Load-Based* memberikan performa ekonomi terbaik dengan LCOE sekitar Rp 4.000/kWh. Sementara itu, skema berkapasitas lebih besar seperti *Full-Roof* dan *North-Roof* hanya menunjukkan LCOE yang sangat rendah apabila diasumsikan bahwa seluruh energi yang dihasilkan dapat terserap tanpa surplus. Temuan ini menegaskan bahwa ketidaksesuaian antara kapasitas sistem dan kebutuhan energi harian

gedung merupakan determinan utama terhadap tingginya biaya listrik rata-rata sepanjang umur proyek.

3. Net Present Value (NPV)

Analisis *Net Present Value* (NPV) menunjukkan dengan jelas bahwa hanya sistem dengan ukuran yang dioptimalkan yang mampu memberikan nilai ekonomi positif, terutama ketika evaluasi dilakukan berdasarkan pemanfaatan beban aktual. Perhatikan Bagan 6.



Bagan 6. Bagan Hasil NPV

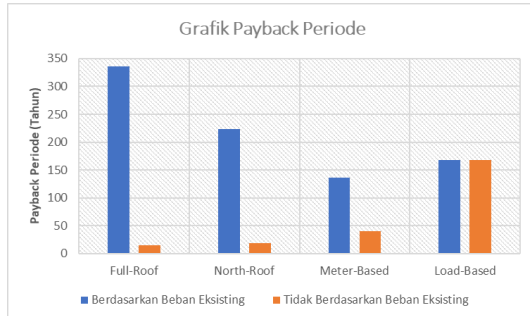
Pada kondisi beban eksisting, skema *Full-Roof* dan *North-Roof* menghasilkan NPV negatif yang sangat besar masing-masing sekitar -Rp 400.000.000 dan -Rp 200.000.000 yang menandakan ketidaklayakan finansial akibat kelebihan kapasitas produksi (*oversizing*) dibandingkan kebutuhan energi gedung.

Sebaliknya, skenario dengan kapasitas yang disesuaikan, seperti *Meter-Based* dan *Load-Based*, mampu menghasilkan NPV positif meskipun nilainya relatif kecil (kurang dari Rp 50.000.000). Hal ini menunjukkan bahwa kesesuaian ukuran sistem dengan kebutuhan energi aktual merupakan syarat mendasar agar investasi sistem PV *On-Grid* dapat mencapai kelayakan ekonomi.

Menariknya, ketika diasumsikan seluruh energi yang diproduksi dapat terserap oleh sistem (Tidak Berdasarkan Beban Eksisting), seluruh skenario menunjukkan NPV positif yang signifikan. Pada kondisi ini, skema *Full-Roof* memberikan nilai ekonomi tertinggi sekitar Rp 300.000.000 yang menegaskan bahwa potensi ekonomi instalasi berkapasitas besar sebenarnya sangat tinggi, hanya saja saat ini dibatasi oleh daya serap beban yang terbatas pada gedung.

4. Payback Period (PP)

Analisis *Payback Period* menguatkan temuan LCOE dan NPV, menunjukkan bahwa efisiensi investasi PLTS Atap sangat bergantung pada optimalisasi ukuran sistem sesuai kebutuhan beban aktual. Perhatikan Bagan 7.



Bagan 7. Bagan Hasil Payback Period

Skema *oversized* seperti *Full-Roof* dan *North-Roof* menunjukkan periode pengembalian modal yang tidak realistis dan tidak layak, masing-masing mencapai sekitar 336 tahun dan 223 tahun, ketika dihitung Berdasarkan Beban Eksisting. Angka ini secara efektif menegaskan bahwa proyek tersebut tidak akan pernah mencapai titik impas dalam masa pakai standarnya. Sebaliknya, skema *Meter-Based* dan *Load-Based* menampilkan periode pengembalian yang jauh lebih masuk akal di bawah kondisi beban eksisting, dengan *Meter-Based* menjadi yang tercepat sekitar 136 tahun, meskipun masih cukup panjang. Menariknya, jika diasumsikan serapan energi 100% (Tidak Berdasarkan Beban Eksisting), semua skenario menunjukkan *Payback Period* yang lebih singkat, di mana *Full-Roof* hanya membutuhkan 15 tahun, menegaskan bahwa potensi pengembalian investasi yang cepat hanya dapat terealisasi melalui pemanfaatan penuh daya yang dihasilkan.

E. Perbandingan kinerja antar empat skema

1. Perbandingan teknis

Analisis metrik kinerja teknis sistem secara kolektif menyoroti adanya konflik antara efisiensi instalasi per kWp dengan optimalisasi pemanfaatan daya. Meskipun skema *Meter-Based* dan *North-Roof* menunjukkan keunggulan teknis dengan *Performance Ratio* (PR) tertinggi (78%-79%) dan *losses* terendah (15%-16%), serta *Energy Yield* yang paling tinggi, mencapai 1.632 kWh/kWp.

Skema berkapasitas besar seperti *Full-Roof* menciptakan surplus produksi energi yang masif, jauh melampaui kurva Konsumsi Beban yang sangat rendah. Sebaliknya, skema *Load-Based*, meskipun dirancang untuk beban, menunjukkan kinerja teknis terlemah dengan PR hanya 52% dan *losses* tertinggi (44%), mengindikasikan bahwa penyesuaian ukuran yang ketat terhadap beban seringkali mengorbankan konfigurasi sistem yang optimal. Oleh karena itu, tantangan mendasar terletak pada perancangan sistem yang mampu mempertahankan PR dan *Energy Yield* tinggi (efisiensi teknis) tanpa menimbulkan *oversizing* berlebih yang tidak terserap oleh beban eksisting.

2. Perbandingan ekonomi

Analisis kelayakan ekonomi yang melibatkan LCOE, *Net Present Value* (NPV), dan *Payback Period* secara konsisten menunjukkan bahwa optimalisasi ukuran sistem PLTS Atap terhadap kurva beban eksisting adalah prasyarat mutlak untuk mencapai kelayakan investasi. Skenario instalasi besar (*oversized*), yaitu *Full-Roof* dan *North-Roof*, terbukti tidak layak secara finansial di bawah asumsi beban aktual. Hal ini dikonfirmasi oleh nilai LCOE yang sangat tinggi (mencapai Rp 12.000/kWh), NPV negatif yang besar (hingga -Rp 400.000.000), dan *Payback Period* yang tidak realistis (lebih dari 200 tahun), yang semuanya timbul dari pemanfaatan energi yang sangat rendah. Sebaliknya, skema yang ukurannya disesuaikan, seperti *Meter-Based* dan *Load-Based*, adalah satu-satunya yang menghasilkan NPV positif dan LCOE termurah (sekitar Rp 4.000/kWh) dalam kondisi beban eksisting, meskipun periode pengembaliannya masih cukup panjang. Hasil ini secara kolektif menyimpulkan bahwa meskipun potensi ekonomi terbesar terletak pada skala instalasi maksimum (seperti ditunjukkan oleh NPV positif tertinggi dan *Payback Period* tersingkat ketika serapan 100% diasumsikan), batasan konsumsi beban aktual secara efektif menganulir manfaat ekonomis dari kapasitas yang berlebihan.

3. Integrasi tekno-ekonomi

Analisis komprehensif menunjukkan adanya diskoneksi kritis antara efisiensi teknis dan

kelayakan ekonomi proyek sistem *PV On-Grid* ini. Secara teknis, skema *Meter-Based* dan *North-Roof* adalah yang paling unggul, dibuktikan dengan *Performance Ratio* (PR) tertinggi (78%-79%), *losses* terendah (15%-16%), dan *Energy Yield* tertinggi (hingga 1.632 kWh/kWp). Namun, skema berkapasitas besar seperti *Full-Roof* dan *North-Roof* terbukti tidak layak secara ekonomi, menunjukkan LCOE yang sangat tinggi (maksimum Rp 12.000/kWh), NPV negatif substansial, dan *Payback Period* yang tidak realistis. Kegagalan ekonomi ini disebabkan oleh satu faktor dominan yang ditunjukkan oleh grafik produksi: kelebihan kapasitas (*oversizing*) yang masif dibandingkan dengan kurva Konsumsi Beban yang sangat rendah, sehingga sebagian besar energi yang dihasilkan oleh sistem teknis yang efisien tersebut tidak terserap, yang kemudian membuat biaya per unit energi yang termanfaatkan menjadi sangat mahal.

Sebaliknya, meskipun skema *Load-Based* dan *Meter-Based* berhasil menghasilkan NPV positif dan LCOE termurah (sekitar Rp 4.000/kWh) di bawah kondisi beban eksisting sehingga dikategorikan layak secara finansial keduanya menghadapi tantangan teknis. Secara khusus, skema *Load-Based* mencatatkan PR terendah secara drastis (52%) dan *losses* tertinggi (44%). Hal ini menyimpulkan bahwa upaya untuk menyesuaikan ukuran sistem secara ketat dengan beban, demi mencapai kelayakan ekonomi, seringkali memerlukan kompromi konfigurasi yang signifikan, yang pada gilirannya menurunkan efisiensi teknis keseluruhan (PR). Oleh karena itu, tantangan utama dalam desain sistem PV adalah menemukan titik optimal di mana kapasitas instalasi hanya sedikit melebihi kurva beban, untuk menjaga PR tinggi, sehingga meminimalkan kerugian finansial akibat *oversizing* tanpa mengorbankan kualitas teknis instalasi.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Integrasi analisis teknis dan ekonomi menunjukkan bahwa kelayakan investasi sistem *PV On-Grid* sangat bergantung pada kesesuaian kapasitas sistem dengan pola konsumsi energi eksisting. Skema berkapasitas besar seperti *Full-*

Roof dan *North-Roof* memang menunjukkan kinerja teknis yang baik dengan PR tinggi, namun tetap tidak layak secara finansial karena menghasilkan LCOE yang sangat tinggi dan NPV negatif akibat rendahnya pemanfaatan energi. Sebaliknya, skema dengan ukuran yang lebih terkendali *Load-Based* dan *Meter-Based* menawarkan kinerja ekonomi yang jauh lebih baik dengan NPV positif dan LCOE lebih rendah, walaupun skema *Load-Based* harus menerima kompromi berupa PR yang lebih rendah dengan nilai 52% karena penyesuaian ukuran yang ketat terhadap beban.

Untuk memastikan proyek sistem PV yang lebih berkelanjutan, pendekatan desain sebaiknya berfokus pada optimalisasi kapasitas sistem dengan batas kelebihan produksi yang minimal terhadap kurva beban aktual. Desain seperti skema *Meter-Based* dapat menjadi acuan karena mampu mempertahankan kinerja teknis yang baik sekaligus memberikan kelayakan investasi yang lebih realistis. Pendekatan ini memungkinkan tercapainya titik keseimbangan antara efisiensi teknis dan manfaat ekonomi jangka panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Kristen Immanuel atas dana yang diberikan untuk penelitian ini dengan Nomor Kontrak 005/LPPM/SK-LIT/XII/2024.

REFERENSI

- [1] Peraturan Presiden RI, "Perpres No. 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional." p. 6, 2017.
- [2] Kementerian ESDM, "Laporan Kinerja Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral," Indonesia, 2023. [Online]. Available: http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- [3] Kementerian ESDM, "Capaian Kinerja

- Semester I Tahun 2024 Kementerian ESDM,” 2024. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/kementerian-esdm-terbitkan-heesi-2022>
- [4] J. Katz and J. Cochran, “Integrating Variable Renewable Energy Into The Grid: Key Issues,” *Article*, p. 2, 2015, [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63033.pdf>
- [5] I. D. G. Y. P. Pratama, I. N. S. Kumara, and I. N. Setiawan, “POTENSI PEMANFAATAN ATAP GEDUNG PUSAT PEMERINTAHAN KABUPATEN BADUNG UNTUK PLTS ROOFTOP,” *J. Spektrum*, vol. 5, no. 2, pp. 119–128, Dec. 2018, doi: 10.24843/SPEKTRUM.2018.v05.i02.p15.
- [6] D. Rizkasari, W. Wilopo, and M. K. Ridwan, “Optimasi Penempatan PLTS *On-Grid* di Gedung Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan dan Energi Sumber Daya Mineral (PUP-ESDM) Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta,” Universitas Gadjah Mada, 2020.
- [7] Zulkifli, W. Wilopo, and M. K. Ridwan, “Analisis Kinerja PLTS Rooftop On Grid pada Gedung Pemerintah dalam Skema Ekspor Impor Energi. Studi Kasus: Gedung Kantor Setjen KESDM-Jakarta,” Universitas Gadjah Mada, 2020.
- [8] A. Yuan and E. Setyowati, “Analysis of Potential for *Photovoltaic* Rooftop Using Helioscope Software (Case Study: Universitas Kristen Immanuel),” *J. Ris. Fis. Edukasi dan Sains*, vol. 11, no. 1, pp. 40–51, 2024, doi: 10.22202/jrfes.2024.v11i1.8167.
- [9] A. B. Awan, “Optimization and techno-economic assessment of rooftop *Photovoltaic* system,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 11, no. 3, 2019, doi: 10.1063/1.5080551.
- [10] M. T. Patel, R. Asadpour, M. Woodhouse, C. Deline, and M. A. Alam, “LCOE*: Re-thinking LCOE for *Photovoltaic* Systems,” *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 1711–1713, 2019, doi: 10.1109/PVSC40753.2019.8980486.
- [11] E. Cotter, “Net Present Value and Payback Period: An Analysis,” pp. 1–20, 2023, [Online]. Available: https://scholarworks.wmich.edu/honors_theses/3796/
- [12] Kementerian ESDM, “Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Nomor 28 tahun 2016,” *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia*, no. 879. pp. 2004–2006, 2016.
- [13] Bank Indonesia, “BI-Rate.” Accessed: Nov. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.bi.go.id/id/statistik/indikator/bi-rate.aspx>