

Analisis Optimasi Penempatan dan Kapasitas Panel Surya pada Infrastruktur Tower Sutet Jalur Bekasi – Muara Tawar di ULTG Harapan Indah

I Gusti Ngurah Gede Ngurah Pradnyana^{1*}, Syamsir Abduh², Marwan Rosyadi³

^{1,2,3} Program Studi S2 Teknik Elektro, Sekolah Pascasarjana, Institut Teknologi PLN

¹igusti2310018@itpln.ac.id, ²syamsir@itpln.ac.id, ³marwanrosyadi@itpln.ac.id

*Penulis Korespondensi

Abstract— *The reliability of Extra High Voltage Overhead Transmission Lines (SUTET) is closely linked to the effectiveness of monitoring the physical condition of transmission towers. Along the Bekasi–Muara Tawar corridor, CCTV-based surveillance is essential to mitigate risks associated with vandalism and technical disturbances; however, limited grid access necessitates a reliable and autonomous energy solution. This study aims to assess local solar energy potential and to determine the optimal configuration of an off-grid Photovoltaic (PV) system to ensure continuous 24-hour CCTV operation. The methodology involves annual solar irradiation analysis, performance evaluation of PV systems based on panel orientation, and the application of the Weighted Product (WP) method, a multi-criteria decision-making technique that ranks alternatives through multiplicative weighting. The findings indicate a solar irradiation potential of 1764.7 kWh/m²/year. North-facing panel orientation yields the highest performance, with a specific yield of 139 kWh/kWp and a performance ratio of 67.8%. This configuration demonstrates technical and economic feasibility for sustainable surveillance of transmission infrastructure.*

Intisari— Keandalan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) bergantung pada efektivitas pemantauan kondisi tower transmisi. Pada jalur SUTET Bekasi–Muara Tawar, penggunaan CCTV diperlukan untuk mencegah gangguan vandalisme dan teknis, namun keterbatasan pasokan listrik menuntut solusi energi mandiri. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi energi surya serta menentukan konfigurasi optimal sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid guna mendukung operasional CCTV selama 24 jam. Metode yang digunakan meliputi analisis data iradiasi matahari, evaluasi kinerja sistem berdasarkan orientasi panel, serta pemilihan alternatif terbaik menggunakan metode *Weighted Product (WP)*, yaitu teknik pengambilan keputusan multikriteria berbasis pembobotan eksponensial. Hasil menunjukkan potensi iradiasi sebesar 1764,7 kWh/m²/tahun. Orientasi panel menghadap Utara menghasilkan kinerja terbaik dengan *specific yield* 139 kWh/kWp dan *performance ratio* 67,8%. Sistem PLTS off-grid dengan orientasi tersebut terbukti efisien dan layak diterapkan untuk mendukung pengawasan infrastruktur transmisi berbasis energi terbarukan.

Kata Kunci— PLTS off-grid, SUTET, CCTV, Energi surya.

I. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi listrik di Indonesia menempatkan sistem transmisi sebagai elemen kunci dalam menjaga keandalan penyaluran daya. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) berperan sebagai penghubung utama antara pusat pembangkit dan pusat beban, sehingga gangguan pada satu titik tower dapat berdampak luas terhadap stabilitas jaringan. Lokasi tower yang umumnya berada di wilayah terpencil menimbulkan tantangan dalam aspek pengawasan,

baik terkait risiko vandalisme, pencurian material, maupun gangguan teknis yang sering tidak terdeteksi secara dini. Kondisi ini menuntut sistem pemantauan yang bersifat preventif dan kontinu, salah satunya melalui penerapan CCTV sebagai instrumen pengawasan berbasis visual *real-time* [1].

Implementasi CCTV pada tower SUTET tidak dapat dipisahkan dari kebutuhan sistem pendukung energi yang andal. Keterbatasan akses listrik di lokasi tower menjadikan penggunaan sumber energi mandiri sebagai kebutuhan utama. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menjadi alternatif yang relevan karena ketersediaan radiasi matahari yang melimpah di Indonesia serta karakteristiknya yang ramah lingkungan dan minim biaya operasional jangka panjang. Kinerja sistem PLTS sendiri dipengaruhi oleh berbagai faktor teknis, seperti intensitas radiasi matahari, suhu lingkungan, orientasi dan kemiringan panel, serta potensi *partial shading* yang dapat menurunkan efisiensi sistem secara signifikan [2].

Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengkaji pemanfaatan sistem PV untuk mendukung perangkat CCTV, umumnya pada skala perkotaan atau aplikasi keamanan umum seperti jalan raya, fasilitas publik, dan kawasan perumahan. Studi-studi tersebut menunjukkan bahwa sistem PV mampu menyediakan suplai energi yang stabil untuk beban rendah hingga menengah dengan pendekatan desain berbasis kebutuhan energi harian. Namun, penelitian yang secara spesifik mengkaji penerapan PLTS untuk CCTV pada infrastruktur transmisi tegangan ekstra tinggi masih terbatas, terutama yang mempertimbangkan kondisi lingkungan ekstrem, risiko gangguan elektromagnetik, serta kebutuhan keandalan sistem yang lebih tinggi. Kesenjangan ini menunjukkan perlunya pendekatan desain yang tidak hanya mempertimbangkan efisiensi energi, tetapi juga aspek ketahanan sistem dan keberlanjutan operasional dalam konteks jaringan transmisi [3].

Sistem monitoring pada PLTS merupakan komponen krusial dalam menjaga keandalan dan efisiensi sistem, karena mampu mendeteksi kinerja dan potensi gangguan secara *real-time*. Pada konteks lokasi terpencil seperti tower SUTET, integrasi sistem monitoring berbasis energi surya menjadi solusi yang efektif karena mampu beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan pada jaringan listrik konvensional. Selain itu, pendekatan monitoring berbasis IoT dan sistem cerdas semakin memperkuat kemampuan pengawasan, khususnya dalam kondisi lingkungan yang dinamis dan sulit dijangkau [4], [5].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini berfokus pada analisis potensi energi surya dan perancangan konfigurasi optimal sistem PLTS *off-grid* untuk mendukung operasional CCTV pada jalur SUTET Bekasi–Muara Tawar. Pendekatan yang digunakan tidak hanya berbasis evaluasi teknis kinerja

sistem, tetapi juga mempertimbangkan aspek implementasi lapangan melalui metode pengambilan keputusan multikriteria, sehingga menghasilkan konfigurasi yang optimal secara teknis sekaligus feasible secara operasional.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Infrastruktur Tower SUTET dan Sistem Transmisi Tenaga Listrik

Sistem transmisi tenaga listrik bertegangan ekstra tinggi di Indonesia dikenal dengan istilah Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) yang umumnya beroperasi pada tegangan 500 kV. Infrastruktur ini berfungsi menyalurkan daya listrik dari pusat pembangkit ke gardu induk beban dalam skala regional maupun interkoneksi sistem. Di wilayah Jawa-Bali, jaringan SUTET menjadi tulang punggung sistem interkoneksi nasional yang dikelola oleh PT PLN (Persero) melalui unit transmisi seperti Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk (ULTG) Harapan Indah.

Tower SUTET dirancang dengan mempertimbangkan aspek mekanis, kelistrikan, keselamatan, dan ketahanan terhadap beban lingkungan seperti angin dan korosi. Struktur baja galvanis pada tower memiliki kapasitas beban tertentu yang menjadi parameter penting dalam perencanaan tambahan instalasi, termasuk sistem panel surya. Oleh karena itu, kajian optimasi penempatan dan kapasitas panel surya harus mempertimbangkan integritas struktur tower agar tidak mengganggu keandalan sistem transmisi [6].

Integrasi panel surya pada struktur tower SUTET membuka peluang pemanfaatan infrastruktur eksisting sebagai media pembangkitan energi terdistribusi tanpa memerlukan pembebasan lahan tambahan. Namun, pendekatan ini menuntut analisis teknis yang lebih kompleks, khususnya terkait interaksi antara sistem pembangkitan berbasis *photovoltaic* (PV) dengan medan elektromagnetik yang dihasilkan oleh konduktor bertegangan tinggi. Induksi elektromagnetik berpotensi memengaruhi kinerja inverter, sistem proteksi, serta efisiensi konversi energi panel surya. Selain itu, potensi terjadinya *partial discharge* dan gangguan corona di sekitar instalasi tambahan juga perlu diperhitungkan, karena dapat berdampak pada degradasi material dan keselamatan operasional. Oleh sebab itu, diperlukan desain isolasi dan penempatan komponen yang memenuhi standar ketahanan listrik tinggi agar tidak menimbulkan gangguan pada sistem transmisi utama [7].

Dari perspektif operasional dan ekonomi, pemanfaatan tower SUTET sebagai lokasi instalasi panel surya dapat meningkatkan efisiensi sistem tenaga listrik melalui konsep *hybrid transmission-generation infrastructure*. Energi listrik yang dihasilkan secara lokal dapat digunakan untuk mendukung kebutuhan internal sistem transmisi, seperti suplai daya untuk peralatan monitoring, komunikasi, dan proteksi di gardu induk terdekat. Pendekatan ini berpotensi menurunkan losses akibat transmisi jarak jauh sekaligus meningkatkan keandalan sistem melalui diversifikasi sumber energi. Meskipun demikian, implementasi skema ini memerlukan kajian kelayakan yang komprehensif, mencakup analisis biaya-manfaat, regulasi keselamatan ketenagalistrikan, serta standar operasional PLN, agar integrasi teknologi baru tidak

mengganggu stabilitas dan kontinuitas layanan jaringan listrik nasional [8].

B. Energi Surya dan Teknologi Photovoltaic (PV)

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar di Indonesia karena letaknya di wilayah tropis dengan intensitas radiasi matahari rata-rata 4–5,5 kWh/m²/hari. Teknologi *photovoltaic* (PV) mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaiik pada material semikonduktor seperti silikon monokristalin dan polikristalin [9].

Dalam sistem PV, komponen utama meliputi modul panel surya, *charge controller*, baterai (jika menggunakan sistem *off-grid* atau *hybrid*), serta inverter. Penentuan kapasitas panel surya dipengaruhi oleh kebutuhan beban, efisiensi sistem, faktor derating, dan potensi radiasi matahari setempat. Pada infrastruktur tower transmisi, sistem PV dapat dimanfaatkan untuk menyuplai kebutuhan listrik peralatan monitoring, sistem telekomunikasi, sensor kondisi konduktor, dan sistem keamanan berbasis IoT [10].

Dalam konteks implementasi pada tower transmisi, performa sistem PV sangat dipengaruhi oleh kondisi iklim mikro di sekitar struktur, seperti suhu permukaan, kecepatan angin, dan potensi bayangan parsial (*partial shading*) akibat elemen konstruksi tower itu sendiri. Kenaikan suhu modul dapat menurunkan efisiensi konversi energi, sementara bayangan parsial berpotensi menyebabkan *mismatch losses* yang signifikan antar sel dalam satu string panel. Hal ini menuntut penggunaan konfigurasi sistem yang adaptif, seperti penerapan *maximum power point tracking* (MPPT) yang optimal serta desain string yang mempertimbangkan orientasi dan kemiringan panel secara presisi. Pada level teknis, pemilihan jenis modul dengan koefisien suhu rendah dan toleransi terhadap shading menjadi faktor krusial dalam menjaga stabilitas output energi pada lingkungan yang tidak sepenuhnya ideal [11].

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa integrasi sistem PV pada infrastruktur transmisi tidak hanya berkaitan dengan aspek teknis, tetapi juga dengan strategi pengelolaan energi yang lebih cerdas. Penggunaan sistem berbasis Internet of Things (IoT) memungkinkan monitoring real-time terhadap performa panel, kondisi baterai, serta konsumsi energi peralatan transmisi, sehingga mendukung konsep *predictive maintenance*. Data yang dihasilkan dapat diolah untuk mengoptimalkan pola penggunaan energi dan mendeteksi potensi gangguan sejak dini. Dalam jangka panjang, pendekatan ini dapat meningkatkan efisiensi operasional jaringan transmisi sekaligus menjadi bagian dari transformasi digital sektor ketenagalistrikan, khususnya dalam mendukung pengembangan smart grid di Indonesia [12].

C. Konsep Optimasi dalam Sistem Energi

Optimasi dalam sistem energi merujuk pada proses pencarian solusi terbaik berdasarkan fungsi objektif tertentu dengan mempertimbangkan berbagai kendala teknis dan ekonomi. Dalam konteks penelitian ini, fungsi objektif dapat berupa maksimalisasi produksi energi, minimasi biaya investasi, atau minimasi beban tambahan terhadap struktur tower.

Metode optimasi yang umum digunakan dalam perencanaan sistem PV antara lain metode Linear Programming, Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, dan simulasi berbasis perangkat lunak seperti HOMER atau PVSyst. Variabel yang dianalisis meliputi sudut kemiringan panel (tilt angle), orientasi panel, luas permukaan efektif tower, kapasitas modul (Wp), serta kondisi lingkungan sekitar seperti bayangan (shading). Optimasi penempatan panel pada tower SUTET juga harus mempertimbangkan zona aman kelistrikan (clearance distance) sesuai standar keselamatan kerja tegangan tinggi untuk menghindari gangguan medan listrik dan risiko keselamatan personel [13], [14].

Pendekatan optimasi dalam sistem ini pada dasarnya bersifat multi-objective, sehingga sering kali memerlukan teknik kompromi seperti Pareto optimality untuk menghasilkan solusi yang seimbang antara aspek teknis dan ekonomi. Tidak semua solusi yang memberikan produksi energi maksimum layak secara struktural atau ekonomis, sehingga diperlukan pembobotan variabel sesuai prioritas sistem. Dalam konteks tower SUTET, analisis sensitivitas menjadi penting untuk mengidentifikasi variabel mana yang paling berpengaruh terhadap perubahan output sistem, misalnya pengaruh sudut kemiringan terhadap peningkatan energi dibandingkan dengan dampaknya terhadap tambahan beban angin. Dengan demikian, proses optimasi tidak hanya menghasilkan nilai optimal tunggal, tetapi juga rentang solusi yang dapat dipilih berdasarkan skenario operasional yang berbeda [15] [16].

III. METODE PENELITIAN

A. Desain dan Lokasi Penelitian

Tempat penelitian mengambil lokasi di Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk Harapan Indah, Gardu Induk Bekasi memiliki penghantar pada SUTET Bekasi – Muara Tawar. Penelitian ini dilakukan di tower 48 dikarenakan tower tersebut berlokasi di tempat yang terpencil jauh dari penduduk setempat dimana sering terjadi pencurian sabotase peralatan kelistrikan pada peralatan SUTET tersebut. Waktu pelaksanaan penelitian dimulai dari tahap persiapan pada Januari 2023 hingga penyusunan laporan pada Juni 2025.

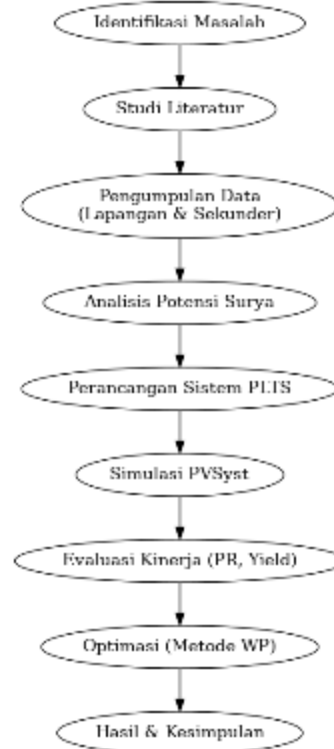
B. Prosedur Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui analisis observasi lapangan dan dokumentasi. Observasi lapangan difokuskan pada identifikasi karakteristik tower 48 SUTET Bekasi–Muara Tawar, meliputi jenis dan orientasi tower, dimensi fisik, sudut kemiringan, serta kebutuhan beban listrik perangkat CCTV dan MPPT. Tower yang diteliti merupakan suspension tower dengan sudut 180°, tinggi 60 m, luas area sekitar 400 m², dan total beban listrik tahunan sebesar 139 kWh. Data sekunder berupa radiasi matahari dianalisis menggunakan perangkat lunak PVSyst dengan basis data NREL NSRDB Typical Meteorological Year (1998–2020), yang mencakup rata-rata iradiasi bulanan dan estimasi profil radiasi per jam sebagai dasar analisis potensi energi surya di lokasi penelitian.

Penelitian ini mengkaji empat desain konfigurasi PLTS yang dianalisis berdasarkan aspek teknis untuk memperoleh hasil yang sistematis dan sesuai dengan kondisi lokasi penelitian. Analisis potensi energi surya dilakukan dengan mempertimbangkan koordinat geografis tower SUTET

Bekasi–Muara Tawar dan data iradiasi matahari setempat sebagai dasar penentuan potensi pembangkitan energi listrik. Data iradiasi digunakan sebagai input utama dalam perangkat lunak PVSyst untuk menghitung estimasi produksi energi listrik, performance ratio, dan evaluasi kinerja sistem secara keseluruhan. Selanjutnya, analisis konfigurasi teknis dilakukan dengan mengkaji karakteristik lokasi, luas area pemasangan, orientasi tower, dan sudut kemiringan panel untuk menentukan kapasitas PLTS, jumlah modul, serta susunan sistem yang optimal. Hasil simulasi menjadi dasar penilaian kinerja PLTS tower secara teknis. Kapasitas PLTS ditentukan berdasarkan kebutuhan beban CCTV [17].

Berikut alur tahapan dalam proses penelitian:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian (Flowchart)



Gambar 2. Blok diagram sistem penelitian

C. Power Capacity PLTS

Konfigurasi sistem menggunakan charge controller tipe MPPT Victron Energy 75V 10A. Kapasitas baterai dihitung berdasarkan kebutuhan energi harian menggunakan Persamaan:

$$C_{bat} = \frac{E_{total}}{V \times DoD} \tag{1}$$

Perhitungan Kapasitas Panel Surya :

$$C_{PV} = \frac{E_{total}}{I_{Avg} \times \eta} \tag{2}$$

Untuk menghitung energi yang dihasilkan oleh panel surya, kita menggunakan persamaan:

$$E_{\text{Energi yang Dihasilkan Panel Surya}} = \text{Daya Panel Surya} \times \text{Jam Penyinaran} \times \text{Efisiensi Panel Surya} \quad (3)$$

Performance Ratio (PR) merupakan parameter yang digunakan untuk menilai efisiensi kinerja sistem fotovoltaik (PLTS) secara keseluruhan dengan membandingkan energi aktual yang dihasilkan terhadap energi ideal berdasarkan kapasitas panel surya pada kondisi penyinaran optimal. Secara matematis, nilai PR dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$PR = \frac{\text{Energy yang dihasilkan sistem}}{\text{Energy yang dihasilkan oleh ideal}} \quad (4)$$

Pengambilan keputusan dilakukan menggunakan metode Weighted Product (WP) untuk menentukan desain paling optimal berdasarkan aspek teknis, dengan mengombinasikan kriteria dan bobot atribut guna memperoleh nilai preferensi dan peringkat terbaik [18].

D. Energi yang Dihasilkan Panel Surya

$$E = P \times t \times \eta$$

Keterangan:

- E= energi yang dihasilkan (Wh)
- P= daya panel (Watt)
- t= lama penyinaran (jam)
- η= efisiensi panel

Persamaan ini digunakan untuk memperkirakan produksi energi aktual berdasarkan kondisi operasional.

E. Performance Ratio (PR)

$$PR = \frac{E_{\text{actual}}}{E_{\text{ideal}}}$$

Keterangan:

- PR= rasio performa sistem
- E_{actual}= energi aktual yang dihasilkan sistem
- E_{ideal}= energi teoritis pada kondisi standar

PR digunakan untuk mengevaluasi efisiensi keseluruhan sistem PLTS dengan mempertimbangkan berbagai kehilangan energi (*losses*).

F. Metode Pengambilan Keputusan

Pemilihan konfigurasi optimal dilakukan menggunakan metode *Weighted Product (WP)*, yaitu metode pengambilan keputusan multikriteria yang mengalikan nilai setiap alternatif terhadap bobot kriterianya dalam bentuk eksponensial. Metode ini menghasilkan nilai preferensi relatif yang digunakan untuk menentukan peringkat terbaik dari beberapa alternatif desain berdasarkan parameter teknis seperti *specific yield*, PR, dan efisiensi sistem.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perancangan design pada penelitian ini dibagi menjadi 2 tahapan, yaitu perhitungan untuk mendapatkan kapasitas panel terpasang dengan optimal, selanjutnya visualisasi design dari masing-masing design. Penulis membuat 4 design pemasangan panel surya dengan sistem off grid pada SUTET Bekasi – Muara Tawar ULTG Harapan Indah.

A. Spesifikasi Kapasitas Baterai

Untuk Menentukan Kapasitas Batreai yang akan digunakan dapat di hitung dengan persamaan (5), sebagai berikut:

$$C_{\text{Bat}} = \frac{E_{\text{total}}}{n \times DoD} \quad (5)$$

$$C_{\text{Bat}} = \frac{12V \times 1A \times 24 \text{ h}}{90\% \times 80\%}$$

$$C_{\text{Bat}} = 1200 \text{ Wh}$$

Kapasitas Baterai yang digunakan agar bisa menyuplai beban sebesar 1200 Wh dalam 3 hari dari penelitian ini yang digunakan dimana panel surya tidak mendapatkan sinar matahari selama 3 hari yaitu 93,75 Ah dan menggunakan baterai Lithium LiFePO4 60 Ah sebanyak 2x yaitu sebesar 120 Ah.

B. Spesifikasi Kapasitas Panel Surya

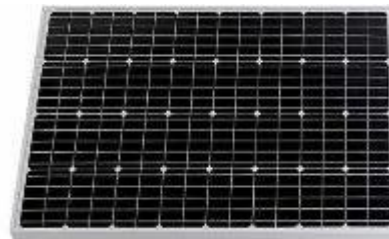
Panel surya yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Victron Energy*. Penentuan kapasitas panel surya dihitung menggunakan persamaan (6) dengan mengacu pada data iradiasi matahari terburuk.

$$CPV = \frac{E_{\text{total}} \times H_{\text{sp}}}{I_{\text{Avg}} \times \eta} \quad (6)$$

$$CPV = \frac{12 \text{ Wh} \times 6 \text{ jam}}{3,597 \text{ kWh/m}^2 \times 17,7\%}$$

$$CPV = 113,0991 \text{ W}$$

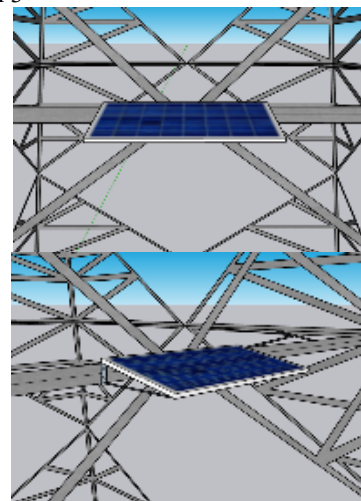
Kapasitas Panel Surya dari penelitian ini yang digunakan yaitu panel surya *Victron Energy* 115 Wp.



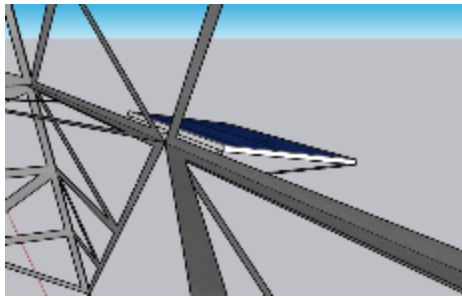
Gambar 3. Modul Panel Surya *Victron Energy* 115Wp

C. Tipe Pemasangan Panel Surya pada sisi utara tower

Berdasarkan tipe pemasangan panel surya pada sisi utara SUTET menggunakan panel surya *monofacial*, design pemasangan panel surya *monofacial* ini dapat dilihat pada gambar 2 dan 3

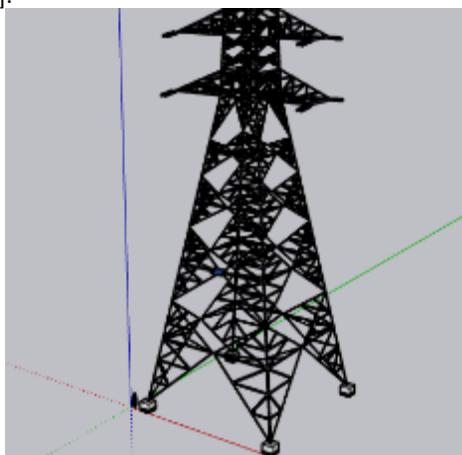


Gambar 4. Design tampak depan dan samping



Gambar 5. Design tampak belakang

Design kerangka tower SUTET dengan penempatan modul panel *monofacial*, Kerangka penyangga modul panel surya *monofacial* dapat dilihat pada gambar 4 dan material yang digunakan dapat dilihat pada tabel 1. Adapun biaya untuk material rangka Design sisi Utara sebesar Rp. 17,538,824.05- [19], [20].



Gambar 6. Structure Konfigurasi pada Tower SUTET Design Utara

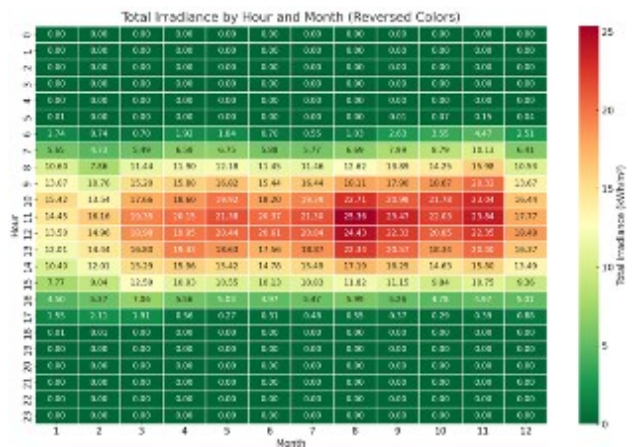
Tabel 1. Material rangka Design modul panel Monofacial sisi utara SUTET

No	Uraian	Jumlah	Satuan	Harga Satuan	Total Harga
1	Baja ringan (kanal C75x25) untuk rangka panel	3.34	Meter	25,000.00	83,500.00
2	Rel	1.00	batang	225,000.00	225,000.00
3	Clamp mid	4.00	Buah	23,500.00	94,000.00
4	Clamp end	4.00	Buah	23,500.00	94,000.00
5	Baut-17	10	Set	40,000.00	400,000.00
6	Skrup	1	Box	145,000.00	145,000.00
7	Panel Surya Victron Energy 115Wp	1	Unit	1,777,988.05	1,777,988.05
8	Victron Energy MPPT 75/10	1	Unit	918,246.00	918,246.00
9	Victron Energy Lif04 60Ah	2	Unit	6,900,545.84	13,801,090.00

No	Uraian	Jumlah	Satuan	Harga Satuan	Total Harga
Total harga					17,538,824.05

D. Analisis Potensi Energi Surya

Mengidentifikasi titik koordinat dari tower SUTET yang berada di jalur Bekasi–Muara Tawar dimana data iradiasi matahari yang digunakan sesuai dengan kondisi geografis aktual dari titik lokasi tower. Data iradiasi pada tower SUTET yang berada di jalur Bekasi–Muara Tawar digunakan untuk mengetahui seberapa besar potensi energi surya yang tersedia di lokasi tertentu. Semakin tinggi nilai iradiasi, maka semakin besar energi listrik yang bisa dihasilkan oleh panel surya. Nilai iradiasi matahari menjadi data input utama dalam perangkat lunak simulasi seperti PVsyst untuk menghitung estimasi produksi energi listrik (E_{pv}), performance ratio (PR), dan evaluasi performa sistem secara keseluruhan.



Gambar 7. radiasi matahari (Sumber: Valentine, 2022)

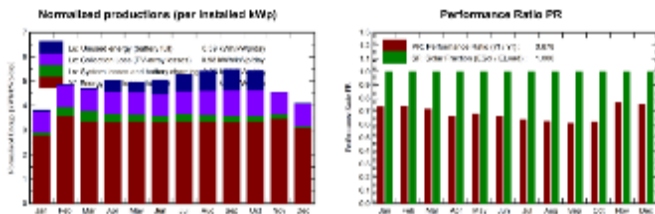
Melakukan empat simulasi pemasangan panel surya monofacial pada sisi utara, timur, selatan, dan barat tower SUTET menggunakan sistem PLTS *off-grid stand-alone*. Hasil simulasi berbasis PVsyst mencakup aspek teknis dan ekonomis, dengan perbandingan kinerja disajikan pada tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan overview hasil Simulasi dari 4 Design

Uraian	Design sisi Utara	Design sisi Timur	Design sisi Selatan	Design sisi Barat
Kapasitas (Wp)	115	115	115	115
Spec. Annual Yield (Wh/Wp)	139,0	132,7	129,7	132,3
Performance Ratio (%)	67.80	64.71	63.24	64.53
Solar Fraction (%)	100	95,4	93,3	95,2
GHI (kWh/m²)	1764.7	1764.7	1764.7	1764.7

Berdasarkan hasil simulasi PVsyst pada Gambar 6, grafik *Normalized Production* menunjukkan produksi energi tahunan per kWp terpasang dengan komponen Lu (energi tidak terpakai) sekitar 0,139 kWh/kWp/hari, Lc (kerugian koleksi PV) sekitar 0,93 kWh/kWp/hari, serta Ls yang merepresentasikan kerugian sistem dan pengisian baterai, sementara Xf merupakan energi yang dimanfaatkan oleh sistem. Grafik *Performance Ratio* menunjukkan nilai PR

sebesar 67,8% yang mengindikasikan kinerja PLTS off-grid yang baik, serta nilai *Solar Fraction* sebesar 100% yang menandakan seluruh kebutuhan energi beban terpenuhi oleh energi surya [21], [22].



Gambar 8. Performance Ratio Design sisi Utara

E. Power Capacity

Kapasitas daya terpasang pada Design sisi Utara pada setiap *design* memiliki nilai yang berbeda-beda, dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Kapasitas daya terpasang Konfigurasi panel surya pada Tower SUTET Bekasi – Muara Tawar

Design	Jumlah Modul	Kapasitas Modul (WP)	Kapasitas Batrai(Ah)	Power Capacity (kWp)
Utara	1	115	120	139.0
Timur	1	115	120	132.7
Selatan	1	115	120	129.7
Barat	1	115	120	132.3

Berdasarkan Tabel 4.11, orientasi panel berpengaruh signifikan terhadap kapasitas daya terpasang PLTS. Sisi Utara menghasilkan daya tertinggi sebesar 139,0 kWp karena orientasi yang lebih optimal terhadap matahari dan *near shading* yang rendah, sedangkan sisi Selatan terendah sebesar 129,7 kWp akibat pengaruh bayangan dari struktur tower. Sisi Timur dan Barat masing-masing menghasilkan 132,7 kWp dan 132,3 kWp, dengan penurunan daya dipengaruhi oleh kondisi penerimaan radiasi yang kurang optimal serta *near shading* dari material tower.

Tabel 4. Perbandingan produksi energi Design sisi Utara 2, 3 dan 4

Desig n	Kapasita s (Wp)	Konfigura si	Produksi Energi (kWh/tahun n)	Pengguna n Energi Tahunan (kWh/tahun n)
Utara	115	Sisi Utara SUTET	139.0	139.00
Timur	115	Sisi Timur SUTET	132.7	139.00
Selata n	115	Sisi Selatan SUTET	129.7	139.00
Barat	115	Sisi Barat SUTET	132.3	139.00

Berdasarkan Tabel 4 desain sisi Utara menghasilkan produksi energi tertinggi sebesar 159,59 kWh/tahun karena paparan sinar matahari yang lebih optimal dan *near shading* yang rendah. Sisi Timur dan Barat masing-masing menghasilkan 140,66 kWh/tahun dan 140,18 kWh/tahun dengan kinerja yang relatif serupa, sedangkan sisi Selatan

menghasilkan produksi terendah sebesar 135,79 kWh/tahun akibat orientasi yang kurang optimal dan pengaruh bayangan dari struktur tower.

F. Performance Ratio

Tabel 5. Performance Ratio

Desi gn	P_{nom} (Wp)	G_{loeff} (kWh/m ²)	E_{Avail} (kWh/yea rs)	E_{Array} (kWh/yea rs)	Performa nce Ratio (%)
Utara	115	1697.9	139.0	139.00	67,8
Timu r	115	1492.3	132.7	139.00	64,7
Selat an	115	1440.0	129.7	139.00	63,2
Barat	115	1488.7	132.3	139.00	64,5

Berdasarkan Tabel 4.13, desain sisi Utara memiliki kapasitas 108 kWp dengan produksi energi 167.287 kWh dan PR 81,68%. Desain sisi Timur menunjukkan PR tertinggi sebesar 91,10% dengan kapasitas 74,1 kWp dan energi 142.088 kWh, sedangkan sisi Selatan dan Barat masing-masing menghasilkan 173.555 kWh (PR 81,78%) dan 145.084 kWh (PR 89,30%), yang mencerminkan variasi kinerja akibat perbedaan kapasitas dan kerugian sistem. Metode *Weighted Product* untuk menentukan desain penempatan panel surya yang paling optimal berdasarkan aspek teknis dan ekonomi. Kriteria yang digunakan meliputi kapasitas terpasang (115 kWp pada seluruh desain), produksi energi, *solar fraction*, *performance ratio* (PR), investasi, NPV, BCR, dan IRR. Desain sisi Utara menunjukkan kinerja teknis terbaik dengan produksi energi tertinggi sebesar 159,59 kWh, *solar fraction* 100%, dan PR sebesar 67,80%, serta nilai investasi Rp17.538.824,05. Desain sisi Timur, Selatan, dan Barat menghasilkan produksi energi masing-masing sebesar 140,66 kWh, 135,79 kWh, dan 140,18 kWh dengan PR yang relatif lebih rendah. Bobot aspek teknis diberikan lebih besar karena berpengaruh langsung terhadap efisiensi dan kemampuan PLTS dalam memenuhi kebutuhan energi, dengan kriteria produksi energi menjadi faktor dominan dalam penentuan desain optimal.

G. Weighted Product

Tabel 6. Weighted Product

No	Kriteria	Utara	Timur	Selatan	Barat
1	Kapasitas (Wp)	2,583	2,583	2,583	2,583
2	Produksi (kWh)	2,683	2,658	2,646	2,657
3	Solar Fraction (%)	2,512	2,489	2,477	2,487
4	PR (%)	2,324	2,302	2,292	2,301
5	Biaya (Rp)	0,036	0,036	0,036	0,036
	Preferensi (S)	1,439	1,399	1,379	1,397
	Vektor (V)	0,256	0,249	0,246	0,249
	Ranking	1	2	4	3

Berdasarkan Tabel 6, menggunakan metode *Weighted Product* menunjukkan bahwa nilai vektor Design sisi Arah terbaik untuk pemasangan panel surya adalah arah sisi Utara dari tower SUTET berdasarkan hasil *Weighted Product*. Ini mencerminkan kombinasi efisiensi teknis dengan kinerja sistem tinggi dimana PR yang paling tinggi yaitu sebesar 67,80% dan SF mencapai 100% menandakan PLTS tidak pernah mengalami beban padam dan aspek finansial dengan nilai investasi lebih rendah dibandingkan design yang lain. Sedangkan arah sisi Timur dan Barat bisa menjadi opsi cadangan, dengan kinerja mendekati satu sama lain, cocok bila lokasi tidak memungkinkan pemasangan ke utara.

Pemilihan kapasitas baterai sebesar $2 \times 12 \text{ V}/60 \text{ Ah}$ (120 Ah) menunjukkan ketidaksesuaian dengan kapasitas produksi energi PLTS yang hanya mencapai 159,59 kWh/tahun atau setara dengan 0,443 kWh/hari. Dengan produksi energi yang relatif rendah tersebut, kapasitas penyimpanan yang terlalu besar berpotensi menyebabkan baterai tidak terisi penuh secara optimal dalam siklus harian. Kondisi ini tidak hanya menurunkan efisiensi sistem, tetapi juga dapat mempercepat degradasi baterai akibat *partial state of charge* yang berkepanjangan.

Selain itu, desain kapasitas baterai dalam penelitian ini didasarkan pada asumsi kebutuhan energi selama tiga hari tanpa penyinaran, namun tidak sepenuhnya mempertimbangkan keseimbangan antara energi yang dihasilkan dan energi yang disimpan. Dalam sistem PLTS off-grid, kapasitas baterai seharusnya ditentukan berdasarkan kebutuhan beban harian, produksi energi aktual, serta parameter teknis seperti *Depth of Discharge* (DoD) dan efisiensi sistem. Oleh karena itu, diperlukan penyesuaian kapasitas baterai agar lebih proporsional dengan produksi energi PLTS, sehingga sistem dapat beroperasi secara optimal, efisien, dan berkelanjutan.

V. KESIMPULAN

Lokasi tower SUTET jalur Bekasi–Muara Tawar menunjukkan potensi energi surya yang tinggi dengan nilai iradiasi tahunan sebesar 1764,7 kWh/m²/tahun, sehingga layak untuk penerapan sistem PLTS *off-grid*. Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVSyst menunjukkan bahwa konfigurasi panel menghadap Utara menghasilkan kinerja terbaik dengan specific yield sebesar 1816 kWh/kWp dan *performance ratio* sebesar 67,8%. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil produksi energi tahunan sistem (159,59 kWh/tahun) terhadap kebutuhan energi beban CCTV sebesar 139 kWh/tahun, yang menunjukkan bahwa sistem mampu memenuhi kebutuhan energi secara penuh dengan *solar fraction* mencapai 100%. Hal ini menegaskan bahwa konfigurasi yang dipilih tidak hanya optimal secara simulatif, tetapi juga layak secara operasional. Evaluasi menggunakan metode *Weighted Product* (WP) menempatkan konfigurasi sisi Utara sebagai alternatif terbaik berdasarkan kombinasi parameter teknis dan ekonomi. Secara ilmiah, temuan ini mengindikasikan bahwa pada wilayah lintang rendah seperti Indonesia, orientasi panel tidak selalu mengikuti pendekatan umum (menghadap ekuator), tetapi sangat dipengaruhi oleh kondisi spesifik lokasi, termasuk geometri tower, potensi shading, dan distribusi radiasi harian. Insight ini menunjukkan bahwa optimasi sistem PLTS pada infrastruktur transmisi

memerlukan pendekatan kontekstual berbasis lokasi, bukan sekadar asumsi teoritis, sehingga dapat meningkatkan keandalan sistem pengawasan berbasis energi terbarukan secara berkelanjutan.

REFERENSI

- [1] A. Pérez-González, N. Benítez-Montoya, Á. Jaramillo-Duque, and J. B. Cano-Quintero, "Coverage Path Planning with Semantic Segmentation for UAV in PV Plants," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 24, p. 12093, Dec. 2021, doi: 10.3390/app112412093.
- [2] J. Laninga, A. Nasr Esfahani, G. Ediriweera, N. Jacob, and B. Kordi, "Monitoring Technologies for HVDC Transmission Lines," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 13, p. 5085, Jun. 2023, doi: 10.3390/en16135085.
- [3] N. Rouibah *et al.*, "Smart Monitoring of Photovoltaic Energy Systems: An IoT-based Prototype Approach," *Sci. Afr.*, vol. 30, p. e02973, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.sciaf.2025.e02973.
- [4] M. Aghaei *et al.*, "Autonomous Intelligent Monitoring of Photovoltaic Systems: An In-Depth Multidisciplinary Review," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 33, no. 3, pp. 381–409, Mar. 2025, doi: 10.1002/ppp.3859.
- [5] S. R. Madeti and S. N. Singh, "Monitoring System for Photovoltaic Plants: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 1180–1207, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.088.
- [6] M. W. Sani, "Optimasi Keandalan Tower Sutet 500kv dengan Multi Direct Grounding terhadap Gangguan Petir," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 3, pp. 1–12, Jul. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3.7300.
- [7] G. Huriarto, D. Despa, and R. Widayati, "Rencana Tata Ruang Kawasan Berorientasi Transit/Transit Oriented Development (TOD) Terminal Pondok Cabe," in *Seminar Nasional Insinyur Profesional (SNIP)*, Oct. 2023, p. 35145. Accessed: Mar. 31, 2026. [Online]. Available: <https://snip.eng.unila.ac.id/ojs/index.php/snip/article/view/461>
- [8] R. S. Widagdo, P. Slamet, and A. F. Alimuddin, "Analisis Derating Transformatori Distribusi Akibat Pembebanan Non-Linear di Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya," *SinarFe7*, vol. 7, no. 1, pp. 384–394, Aug. 2025, Accessed: Mar. 31, 2026. [Online]. Available: <https://journal.fortei7.org/index.php/sinarFe7/article/view/746>
- [9] M. A. Rahmanta, A. Syamsuddin, F. Tanbar, and N. Damanik, "Analisis Perkembangan Teknologi Modul Photovoltaic (PV) untuk Meningkatkan Penetrasi Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia," *Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 22–33, Jun. 2023, doi: 10.30588/jo.v7i1.1509.
- [10] F. Afif and A. Martin, "Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia," *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, vol. 6, no. 1, p. 43, May 2022, doi: 10.30588/jeemm.v6i1.997.
- [11] S. W. Putri, G. Marausna, and E. E. Prasetyo, "Analisis Pengaruh Intensitas Cahaya Matahari Terhadap Daya Keluaran pada Panel Surya," *Teknika STKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, vol. 8, no. 1, pp. 29–37, Nov. 2022, doi: 10.56521/teknika.v8i1.442.
- [12] I. Alhamzani and L. I. Burhan, "Pengembangan Energi Terbarukan melalui Panel Surya di Desa Tertinggal," *Jurnal Pengabdian Masyarakat dan Inovasi Teknologi Tepat Guna*, vol. 1, no. 02, pp. 63–75, May 2025, doi: 10.63982/ryx0kd84.
- [13] P. Elza, "Penerapan Model Matematika dalam Optimasi Distribusi Sumber Daya Energi Terbarukan," *Jurnal Matematika dan Aplikasi*, vol. 1, no. 1, pp. 22–28, Oct. 2025, Accessed: Feb. 25, 2026. [Online]. Available: <http://jurnal.pustakabangsaindonesia.com/index.php/jma/article/view/40>
- [14] A. I. R. Widjaya, I. Haryanto, and M. Muchammad, "Pemodelan dan Simulasi Sistem Energi Menggunakan Open Energy Modelling Framework (Oemof)," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 13, no. 2, pp. 33–40, 2025, Accessed: Feb. 25, 2026. [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/view/50960>
- [15] D. A. Prawitasari, "Potensi Limbah Hasil Pertanian Padi menjadi Sumber Bioenergi melalui Konsep Biorefineri dengan Pendekatan P-Graph dan Analisis Ekonomi Teknik di Kabupaten Sleman, Yogyakarta," *AJIE (Asian Journal of Innovation and*

- Enterpreunership*, pp. 16–32, Jan. 2025, doi: 10.20885/ajie.vol9.iss1.art2.
- [16] D. Handayani, “Optimasi Efisiensi Energi pada Mobil Listrik Empat Penumpang Melalui Sistem Regenerative Brake,” *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, vol. 12, no. 1, pp. 12–22, May 2024, doi: 10.24912/jitiuntar.v12i1.26612.
- [17] S. Defi, A. Fatana, L. O. M. F. Rachim, and F. E. Larobu, “Hybrid Energy Storage System (Hess) dalam Sistem Mini-Grid Terpencil: Tinjauan Literatur Terbaru,” *Jurnal Multidisipliner Kapalamada*, vol. 4, no. 2, pp. 256–267, Jun. 2025, doi: 10.62668/kapalamada.v4i02.1548.
- [18] I. R. Imaduddin, F. Hadi, Moh. Bachrudin, and W. Pribadi, “Perancangan Solar Charging Controller Mode Maximum Power Point Tracking Controle Menggunakan PD Controle untuk Sistem Batteray Charging pada Prototipe Traffic Light System,” *JEECAE (Journal of Electrical, Electronics, Control, and Automotive Engineering)*, vol. 5, no. 1, pp. 39–44, Jul. 2020, doi: 10.32486/jeecae.v5i1.510.
- [19] A. Simamora, J. M. Siburian, P. Mutiara, R. Sitohang, J. Sinaga, and F. K. Sinurat, “Perancangan Aplikasi Light Dependent Resistor (LDR) pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya untuk Meningkatkan Energi Listrik yang Dihasilkan Secara Otomatis,” *Jurnal Al Ulum LPPM Universitas Al Washliyah Medan*, vol. 13, no. 1, pp. 57–64, Jan. 2025, doi: 10.47662/alulum.v13i1.849.
- [20] R. A. Nugraha, M. Facta, and A. Syakur, “Analisis Perancangan dan Pemasangan PLTS Kapasitas 1,1 MWp pada Pabrik Farmasi di Kota Semarang,” *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 12, no. 2, p. 378, Apr. 2024, doi: 10.26760/elkomika.v12i2.378.
- [21] S. R. Efendi, A. C. B. Lubis, H. Satria, and I. Hermawan, “Optimalisasi Sistem Teknologi Hybrid pada Rancangan PV-Grid-Baterai untuk Kebutuhan Skala Rumah Tangga,” *JREC (Journal of Electrical and Electronics)*, vol. 10, no. 1, pp. 1–6, Aug. 2022, doi: 10.33558/jrec.v10i1.3160.
- [22] A. Setyawan, A. Gulton, and G. Simamora, “Analisa Pembangkit Listrik Tenaga Surya On Grid pada Gedung Mal QBIG BSD City,” *Jurnal Cahaya Mandalika ISSN 2721-4796 (online)*, vol. 3, no. 3, pp. 2393–2405, 2022, Accessed: Feb. 02, 2026. [Online]. Available: <https://ojs.cahayamandalika.com/index.php/jcm/article/view/3244>