

Perancangan dan Analisis Teknis Sistem Penerangan Jalan Umum Teknologi Surya (PJU TS) di Kawasan Industri: Studi Kasus PT X

Bagas Wahyu Dewangga

Universitas Gadjah Mada dan bagasbwd@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini membahas perencanaan dan analisis kinerja sistem Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya (PJU-TS) sebagai pengganti sistem PJU konvensional di kawasan PT. X. Implementasi dilakukan pada 53 titik pemasangan lampu yang tersebar di area pabrik tanpa mengubah tata letak tiang eksisting. Setiap unit PJU-TS dilengkapi satu modul panel surya, baterai, inverter, dan lampu LED, sehingga total kapasitas terpasang sistem mencapai 18,55 kWp. Perancangan sistem dilakukan melalui perhitungan teknis yang mempertimbangkan luas modul, kapasitas daya panel, kebutuhan beban lampu, durasi operasi harian, serta data radiasi matahari dan kondisi lingkungan setempat. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada tahun pertama pengoperasian, sistem PJU-TS diperkirakan mampu menghasilkan energi listrik sebesar 24,84 MWh per tahun. Produksi energi mengalami penurunan secara bertahap akibat degradasi modul surya, dengan estimasi produksi sebesar 23,74 MWh pada tahun ke-10 dan 22,02 MWh pada tahun ke-25. Meskipun terjadi penurunan, sistem tetap menunjukkan kinerja yang stabil dan mampu memenuhi kebutuhan energi penerangan jalan di kawasan pabrik. Secara kumulatif, total energi listrik yang dihasilkan selama 25 tahun masa operasi diperkirakan mencapai 585,14 MWh. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan PJU-TS di kawasan industri dapat dirancang secara teknis untuk memberikan kinerja yang andal dan berkelanjutan dalam jangka panjang.

Kata Kunci: Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya, Energi Listrik, Radiasi Matahari, Modul Surya, Kawasan Industri

ABSTRACT

This study presents the design and technical performance analysis of a Solar-Powered Street Lighting System (PJU-TS) implemented as a replacement for conventional grid-based street lighting in the industrial area of PT. X. The system was deployed at 53 lighting points distributed across the factory area without modifying the existing pole layout. Each unit consists of a photovoltaic module, battery, inverter (if applicable), and LED luminaire, resulting in a total installed capacity of 18.55 kWp. The system design was developed through technical calculations considering module area, panel power capacity, lighting load demand, daily operating duration, as well as local solar irradiation and environmental conditions. Simulation results indicate that during the first year of operation, the system is expected to generate 24.84 MWh of electrical energy annually. Energy production is projected to decrease gradually due to natural photovoltaic module degradation, reaching 23.74 MWh in the 10th year and 22.02 MWh in the 25th year of operation. Despite this gradual decline, the system demonstrates stable long-term performance and remains capable of meeting the street lighting energy demand throughout its service life. Cumulatively, the total energy generated over a 25-year operational period is estimated at 585.14 MWh. These findings confirm that the implementation of solar-powered street lighting in industrial areas can be technically designed to ensure reliable and sustainable long-term performance.

Keywords: Solar-Powered Street Lighting, Electrical Energy, Solar Irradiation, Photovoltaic Module, Industrial Zone

PENDAHULUAN

Penerapan Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya (PJU TS) merupakan salah satu inovasi strategis dalam mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih bersih dan andal di kawasan industri. Pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi terbarukan telah diakui secara luas sebagai teknologi yang matang dan terus berkembang, khususnya pada sistem berbasis fotovoltaik (PV) (IRENA, 2023; Fraunhofer ISE, 2023). Dalam konteks kawasan industri, instalasi PJU TS menjadi

bentuk implementasi konkret pemanfaatan teknologi energi surya pada infrastruktur penunjang operasional, khususnya sistem penerangan eksternal yang beroperasi secara mandiri (stand-alone system).

Secara teknis, sistem PJU TS bekerja dengan mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui modul fotovoltaik. Energi listrik yang dihasilkan kemudian disalurkan ke solar charge controller untuk pengaturan proses pengisian, disimpan dalam baterai sebagai cadangan energi, dan digunakan untuk mengoperasikan lampu penerangan pada malam hari. Konfigurasi sistem ini umumnya terdiri atas modul surya, baterai penyimpanan energi, solar charge controller, inverter (pada sistem tertentu), armatur lampu LED, tiang lampu, serta sistem proteksi dan distribusi daya.

Kinerja keseluruhan sistem sangat dipengaruhi oleh karakteristik teknis masing-masing komponen. Efisiensi konversi modul PV, koefisien temperatur, serta laju degradasi tahunan menjadi parameter penting dalam menentukan output daya jangka panjang (Jordan & Kurtz, 2013). Selain itu, kapasitas baterai, kedalaman pelepasan (depth of discharge), efisiensi siklus pengisian-pengosongan, serta umur siklus (cycle life) merupakan faktor krusial dalam menjamin kontinuitas suplai energi pada malam hari. Pemilihan spesifikasi teknis yang tepat menjadi aspek fundamental agar sistem mampu beroperasi secara optimal dan stabil dalam jangka panjang (Demir & Sazak, 2014).

Dari sisi performa teknis, temperatur operasi modul PV memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi keluaran daya. Peningkatan temperatur sel surya umumnya menyebabkan penurunan tegangan keluaran dan berdampak pada penurunan daya maksimum yang dapat dihasilkan (Skoplaki & Palyvos, 2009). Oleh karena itu, analisis desain sistem perlu mempertimbangkan karakteristik teknis modul, konfigurasi pemasangan, serta sistem ventilasi alami untuk menjaga performa tetap optimal. Selain itu, fenomena degradasi material akibat paparan radiasi ultraviolet dan siklus termal jangka panjang juga perlu diperhitungkan dalam estimasi umur teknis sistem (Jordan & Kurtz, 2013).

Dengan pendekatan teknis yang komprehensif dan berbasis data, evaluasi sistem PJU TS di kawasan industri dapat dilakukan secara lebih terukur, sehingga menghasilkan desain sistem yang optimal, andal, dan sesuai dengan kebutuhan operasional jangka panjang.

LANDASAN TEORI

A. Energi Baru & Terbarukan (EBT)

Transisi menuju sistem energi berkelanjutan menjadi agenda global yang mendesak akibat dampak signifikan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Pembakaran fosil diidentifikasi sebagai sumber utama emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang berkontribusi langsung terhadap pemanasan global, perubahan iklim, serta degradasi lingkungan secara luas (Yoro & Daramola, 2020). Selain itu, polusi udara dari aktivitas energi konvensional berdampak negatif terhadap kesehatan manusia dan stabilitas sosial-ekonomi. Kondisi ini mendorong percepatan pengembangan Energi Baru dan Terbarukan (EBT), yang didefinisikan sebagai sumber energi dari proses alam berkelanjutan seperti surya, angin, air, panas bumi, dan biomassa, yang dapat diperbarui dalam skala waktu manusia (Lund, 2007).

Urgensi pengembangan EBT diperkuat oleh prioritas global terhadap efisiensi energi dan energi terbarukan, termasuk oleh World Energy Council. Sektor industri, sebagai konsumen energi terbesar secara global, menjadi fokus utama transformasi ini. Data dari negara-negara OECD menunjukkan peningkatan laju pertumbuhan tahunan rata-rata energi terbarukan dari 0.9% (1990–2000) menjadi 3.3% (2010–2019) (International Energy Agency, 2020, seperti dikutip dalam Park & Kim, 2021). Namun, keberhasilan adopsi EBT sangat dipengaruhi oleh efektivitas kebijakan dan regulasi yang mendukung, yang diidentifikasi sebagai faktor penentu utama percepatan difusi teknologi (Byrnes et al., 2013).

Dari perspektif akademik, terjadi pergeseran fokus penelitian EBT. Jika sebelumnya penelitian lebih banyak membahas justifikasi normatif dan kebijakan umum, studi meta-analisis terbaru menunjukkan bahwa topik “status umum dan kebijakan EBT” mengalami pertumbuhan minat negatif (Park & Kim, 2021). Hal ini mencerminkan kematangan bidang tersebut, di mana urgensi EBT telah diterima luas, sehingga perhatian ilmiah kini beralih pada aspek implementasi teknis dan optimalisasi sistem.

Fokus penelitian terkini menitikberatkan pada integrasi optimal EBT ke jaringan listrik, pengembangan microgrid dan smart grid, peramalan sumber energi intermiten, serta sistem penyimpanan energi skala besar seperti hidrogen dan superkapasitor (Park & Kim, 2021; Wang et al., 2019). Pergeseran ini menegaskan bahwa setiap proyek EBT, termasuk Penerangan Jalan Umum (PJU) Tenaga Surya, perlu dipandang sebagai bagian dari ekosistem energi yang terintegrasi, dengan mempertimbangkan aspek keandalan, manajemen energi, dan interoperabilitas sistem dalam mendukung transformasi energi yang lebih resilien dan cerdas.

B. Energi Surya

Di antara berbagai sumber Energi Baru dan Terbarukan (EBT), energi surya melalui teknologi fotovoltaik (PV) telah memantapkan posisinya sebagai salah satu pilar utama dalam transisi energi global. Teknologi PV bekerja dengan mengonversi energi foton dari sinar matahari secara langsung menjadi energi listrik melalui material semikonduktor berbasis efek fotolistrik, sehingga menghasilkan sistem pembangkitan yang bersih, modular, fleksibel dalam skala instalasi, serta memiliki reliabilitas operasional yang tinggi. Karakter modularitas ini memungkinkan sistem PV diaplikasikan mulai dari skala kecil seperti atap bangunan hingga pembangkit berskala utilitas (utility-scale). Pertumbuhan sektor PV dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan pola eksponensial. Pada tahun 2023, kapasitas PV global bertambah sebesar 447 GW, meningkat 87% dibandingkan dengan 239 GW pada tahun 2022, sehingga total kapasitas terpasang dunia melampaui 1.6 TW (SolarPower Europe, 2024). Bahkan, PV surya menyumbang 78% dari total 576 GW kapasitas EBT baru yang ditambahkan pada tahun 2023, menunjukkan dominasi teknologi ini dalam ekspansi energi terbarukan global.

Perkembangan pesat tersebut tidak terlepas dari evolusi teknologi sel surya yang terus mengalami peningkatan kinerja dan efisiensi. Secara umum, teknologi PV diklasifikasikan ke dalam beberapa generasi. Generasi pertama berbasis silikon kristalin, *monocrystalline* dan *polycrystalline* yang saat ini mendominasi pasar global karena tingkat kematangan teknologi, stabilitas jangka panjang, serta efisiensi konversi yang relatif tinggi. Generasi kedua terdiri dari teknologi lapisan tipis (*thin-film*), seperti *amorphous silicon* (a-Si), *cadmium telluride* (CdTe), dan *copper indium gallium selenide* (CIGS), yang menawarkan keunggulan dalam fleksibilitas aplikasi dan potensi biaya produksi lebih rendah, meskipun umumnya memiliki efisiensi lebih rendah dibandingkan silikon kristalin (Al-Ezzi & Ansari, 2022). Sementara itu, generasi ketiga dan teknologi tandem merepresentasikan frontier inovasi, termasuk *Perovskite Solar Cell* (PSC), *Organic Solar Cell* (OSC), dan sel surya multi-simpang (*multi-junction*). Sel tandem Perovskite/Silikon bahkan telah mencapai efisiensi laboratorium di atas 34%, membuka peluang peningkatan performa signifikan dengan potensi biaya produksi yang lebih kompetitif di masa depan.

Selain kemajuan teknologi, faktor pendorong utama pertumbuhan PV adalah dinamika ekonomi global yang menciptakan lingkaran umpan balik positif antara produksi, harga, dan permintaan. Ekspansi besar-besaran kapasitas manufaktur, terutama di Tiongkok, telah menghasilkan kondisi kelebihan pasokan (*oversupply*) di pasar global (SolarPower Europe, 2024). Situasi ini memicu persaingan harga yang intens dan mendorong penurunan harga modul PV secara drastis, dengan penurunan sekitar 50% hanya dalam tahun 2023 (SolarPower Europe, 2024; International Energy Agency, 2024). Penurunan harga ini meningkatkan daya saing PV dibandingkan pembangkit konvensional dan mempercepat adopsi di berbagai sektor, mulai dari utilitas hingga komersial dan residensial.

C. Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya

Penerangan Jalan Umum (PJU) Tenaga Surya merupakan salah satu aplikasi teknologi fotovoltaik (PV) yang paling implementatif dan memberikan dampak langsung bagi masyarakat, khususnya di wilayah dengan keterbatasan infrastruktur kelistrikan. Sebagai sistem mandiri (*standalone* atau *off-grid*), PJU Tenaga Surya tidak memerlukan koneksi ke jaringan listrik utama, sehingga sangat sesuai diterapkan di daerah pedesaan, wilayah terpencil, kawasan perbatasan, maupun area perkotaan di negara berkembang dengan pasokan listrik yang tidak stabil (Kabir et al., 2024). Karakteristik ini menjadikan PJU Tenaga Surya sebagai solusi teknis yang fleksibel dan adaptif terhadap berbagai kondisi geografis.

Sistem ini secara efektif menjawab tantangan perluasan jaringan listrik konvensional yang sering kali terkendala oleh jarak distribusi yang jauh, kondisi medan yang sulit, kepadatan populasi rendah, serta kebutuhan investasi infrastruktur yang besar (WIPO, 2024). Pembangunan jaringan transmisi dan distribusi pada wilayah semacam ini umumnya membutuhkan biaya modal yang tinggi dan waktu implementasi yang panjang.

Dengan memanfaatkan sumber energi surya yang tersedia secara lokal, PJU Tenaga Surya mampu menghadirkan layanan penerangan tanpa ketergantungan pada ekspansi jaringan listrik konvensional.

Secara fungsional, keberadaan PJU Tenaga Surya tidak hanya menyediakan penerangan dasar, tetapi juga meningkatkan keamanan publik, mengurangi risiko kecelakaan lalu lintas, memperpanjang waktu aktivitas ekonomi malam hari, serta mendorong interaksi sosial di tingkat komunitas. Dengan demikian, sistem ini berkontribusi pada penguatan pembangunan lokal tanpa menambah beban pada jaringan listrik eksisting (Kabir et al., 2024). Pendekatan desentralisasi energi melalui PJU Tenaga Surya juga mendukung model penyediaan energi yang lebih resilien dan mandiri.

Perkembangan teknologi telah mendorong transformasi PJU Tenaga Surya dari sistem konvensional berbasis pengaturan otomatis sederhana menjadi sistem yang adaptif dan cerdas (*smart street lighting*). Integrasi mikrokontroler dengan sensor seperti *Light Dependent Resistor* (LDR) untuk deteksi siang/malam dan *Passive Infrared* (PIR) untuk deteksi pergerakan memungkinkan pengaturan intensitas cahaya secara dinamis. Lampu dapat beroperasi pada tingkat kecerahan rendah ketika tidak terdapat aktivitas dan meningkat secara otomatis saat terdeteksi gerakan (Kabir et al., 2024). Mekanisme ini meningkatkan efisiensi penggunaan energi, mengurangi beban kerja baterai, serta memperpanjang umur operasional sistem.

Lebih lanjut, tren perkembangan terbaru menunjukkan integrasi teknologi Internet of Things (IoT) yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian jarak jauh terhadap parameter teknis seperti status baterai, konsumsi energi, serta deteksi gangguan sistem (Giriyantha et al., 2023). Beberapa sistem bahkan dilengkapi dengan fitur tambahan seperti kamera pengawas untuk mendukung aspek keamanan. Evolusi ini menegaskan bahwa PJU Tenaga Surya tidak lagi sekadar perangkat penerangan pasif, melainkan aset infrastruktur aktif yang berkontribusi dalam ekosistem kota atau desa pintar. Oleh karena itu, evaluasi proyek PJU Tenaga Surya modern perlu mempertimbangkan nilai tambah fungsional dan teknologinya secara komprehensif.

Daya keluaran pada modul surya serta kapasitas energi yang dapat dihasilkan oleh sistem PJU Tenaga Surya pada prinsipnya dapat dianalisis dan dihitung secara kuantitatif berdasarkan luas area array modul yang terpasang. Luas area array menjadi parameter fundamental karena secara langsung menentukan jumlah radiasi matahari yang dapat ditangkap dan dikonversi menjadi energi listrik oleh sel fotovoltaik. Semakin besar area efektif modul yang terpapar radiasi, maka semakin besar pula potensi daya puncak (*peak power*) dan energi tahunan yang dapat dihasilkan, dengan tetap mempertimbangkan faktor efisiensi modul dan kondisi operasional sistem.

Melalui formulasi matematis yang tepat, perancang sistem dapat menentukan jumlah modul yang diperlukan, kapasitas penyimpanan energi yang memadai, serta memastikan keseimbangan antara suplai dan kebutuhan daya lampu PJU pada malam hari. Oleh karena itu, daya pada modul surya dan kapasitas energi yang dihasilkan pada sistem

PJU Tenaga Surya dapat diperhitungkan berdasarkan luas area array menggunakan persamaan berikut:

$$P_{in} = PV_{area} \times PSI \quad (1)$$

$$P_{max} = PV_{in} \times n_{PV} \quad (2)$$

Dimana:

P_{in} = Daya diterima modul surya (Wp)

P_{max} = Daya dibangkitkan (Wp)

PSI = *Peak Solar Insolation*, bernilai 1000 W/m²

n_{PV} = Efisiensi modul surya (%).

Persamaan di atas merupakan formulasi dasar yang digunakan untuk menghitung estimasi daya keluaran sistem PJU Tenaga Surya dengan asumsi kondisi ideal atau *Standard Test Conditions* (STC). Dalam pendekatan ini diasumsikan bahwa modul surya menerima radiasi matahari secara optimal, tanpa adanya gangguan eksternal maupun kerugian sistem yang signifikan. Oleh karena itu, perhitungan tersebut belum memasukkan faktor-faktor koreksi seperti pengaruh sudut datang radiasi matahari (*incident angle*), variasi temperatur operasi modul, mismatch antar modul, rugi-rugi kabel, efisiensi kontroler pengisian, serta potensi efek bayangan (*shading*) akibat objek di sekitar lokasi pemasangan. Padahal dalam kondisi aktual di lapangan, faktor-faktor tersebut dapat menurunkan daya keluaran efektif dibandingkan nilai teoritisnya.

Setelah besarnya daya listrik yang secara teoritis dapat dibangkitkan oleh sistem PJU Tenaga Surya diketahui, tahapan perancangan berikutnya adalah menentukan jumlah modul panel surya yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan daya dan energi beban penerangan. Penentuan jumlah modul dilakukan dengan membandingkan total daya atau energi yang dibutuhkan dengan kapasitas daya nominal masing-masing modul, serta mempertimbangkan faktor koreksi sistem (*derating factor*) untuk mengakomodasi rugi-rugi operasional. Dengan pendekatan ini, konfigurasi sistem dapat dirancang agar mampu menyediakan suplai energi yang memadai dan andal sesuai kebutuhan operasional PJU Tenaga Surya, menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Jumlah Panel Surya} = \frac{P_{\text{Watt Peak}}}{P_{\text{MPP}}} \quad (3)$$

Dimana:

$P_{\text{Watt Peak}}$ = Daya dibangkitkan (Wp)

P_{MPP} = Daya maksimum keluaran modul surya (W)

METODE PENELITIAN

Penelitian ini memanfaatkan berbagai perangkat lunak dan perangkat keras untuk mendukung proses analisis data, pemodelan, serta simulasi sistem PJU Tenaga Surya secara komprehensif. Aplikasi Microsoft Excel digunakan sebagai alat utama dalam tahap pembersihan data (*data cleaning*), verifikasi konsistensi, normalisasi variabel, serta pengolahan awal dataset.

Selain itu, perangkat lunak ini dimanfaatkan untuk membangun model perhitungan dasar, termasuk estimasi daya dan energi sistem, perhitungan kebutuhan kapasitas modul surya, kapasitas baterai, serta analisis kinerja teknis sistem. Melalui fitur pemodelan berbasis formula dan pengolahan data tabular, Excel memungkinkan proses kalkulasi dilakukan secara sistematis, terstruktur, dan mudah ditelusuri kembali.

Setelah tahap pengolahan awal selesai, analisis difokuskan pada evaluasi performa teknis sistem PJU Tenaga Surya. Tahap ini mencakup simulasi keluaran daya, analisis kesesuaian kapasitas komponen terhadap beban penerangan, serta evaluasi kestabilan suplai energi berdasarkan pola operasi harian. Proses simulasi dilakukan untuk memastikan bahwa sistem yang dirancang mampu memenuhi kebutuhan beban secara andal dengan mempertimbangkan karakteristik radiasi matahari dan profil penggunaan energi.

Perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini berupa komputer laptop dengan spesifikasi tinggi guna memastikan kelancaran proses komputasi. Sistem ini dilengkapi dengan prosesor Intel(R) Core (TM) i7-8750H, Random Access Memory (RAM) sebesar 16,0 GB, serta konfigurasi Dual Solid State Drive (SSD) dengan total kapasitas penyimpanan 2 TB. Spesifikasi tersebut dirancang untuk mendukung kebutuhan komputasi intensif, termasuk pemrosesan data dalam jumlah besar, simulasi berulang, serta proses evaluasi model teknis yang memerlukan kapasitas pemrosesan dan kecepatan akses data yang optimal.

Bahan penelitian yang digunakan berupa data primer yang diperoleh secara langsung melalui kegiatan monitoring lapangan dan wawancara di kawasan PT. X. Data yang dikumpulkan mencakup variabel teknis sistem PJU Tenaga Surya terpasang, seperti kapasitas modul, konfigurasi baterai, pola beban penerangan, intensitas radiasi matahari, serta performa operasional sistem. Pengumpulan data dilakukan secara bertahap dalam rentang waktu operasi yang representatif, dengan memastikan bahwa data diperoleh pada kondisi operasional normal. Pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan validitas dan reliabilitas hasil analisis teknis serta meminimalkan potensi bias akibat gangguan sementara pada sistem. Adapun lokasi pemasangan dari PJU TS pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Pemasangan PJU TS

Berdasarkan Gambar 1. ditunjukkan dengan tanda berwarna kuning bahwa terdapat 53 titik Penerangan Jalan Umum yang akan diubah menjadi PJU TS dan terdapat tanda berwarna hijau

untuk 29 titik PJU TS yang sudah terpasang, pada penelitian akan memfokuskan pada 53 titik pemasangan PJU TS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penerapan sistem Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya (PJU-TS) di kawasan PT. X dilakukan melalui konversi sistem PJU konvensional berbasis listrik jaringan menjadi sistem mandiri berbasis energi surya. Penggantian dilakukan pada unit lampu eksisting tanpa mengubah tata letak maupun posisi tiang yang telah terpasang, sehingga infrastruktur utama tetap dipertahankan. Pendekatan ini dipilih untuk menjaga efisiensi pelaksanaan serta meminimalkan pekerjaan konstruksi tambahan. Secara keseluruhan, sebanyak 53 titik pemasangan yang tersebar di area pabrik direncanakan menggunakan unit PJU-TS sebagai pengganti sistem sebelumnya.

Selanjutnya dilakukan perhitungan teknis dan simulasi kinerja sistem PJU-TS dengan mempertimbangkan parameter utama seperti daya puncak panel surya (W_p), kapasitas baterai (Ah), spesifikasi inverter (jika digunakan), serta daya lampu LED pada masing-masing titik. Parameter-parameter tersebut dimasukkan ke dalam model perhitungan untuk menganalisis keseimbangan antara energi yang dihasilkan dan energi yang dibutuhkan oleh beban penerangan. Simulasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem yang dirancang mampu beroperasi secara optimal dan andal sesuai kebutuhan operasional harian.

Data radiasi matahari dan kondisi lingkungan di kawasan PT. X digunakan sebagai variabel penting dalam proses estimasi energi. Informasi mengenai intensitas radiasi harian rata-rata, lama penyinaran efektif, serta pengaruh temperatur lingkungan diperhitungkan untuk mengestimasi potensi energi listrik yang dapat dibangkitkan dan disimpan. Kapasitas panel surya dan baterai pada setiap unit kemudian disesuaikan dengan daya lampu dan durasi waktu operasi harian agar kontinuitas penerangan tetap terjaga, terutama pada malam hari atau saat kondisi radiasi rendah.

Hasil perhitungan dan simulasi memberikan gambaran menyeluruh mengenai performa dan kecukupan energi sistem PJU-TS pada 53 titik pemasangan di area pabrik PT. X. Evaluasi ini mencakup estimasi produksi energi harian, kapasitas penyimpanan efektif, serta kemampuan sistem dalam memenuhi kebutuhan beban penerangan secara berkelanjutan. Rangkuman hasil analisis teknis tersebut selanjutnya disajikan dalam Tabel 1. sebagai dasar penilaian kinerja implementasi sistem PJU-TS di lokasi penelitian.

Tabel 1. Hasil Simulasi Potensi PJU Tenaga Surya Kawasan PT. X Dengan Bantuan Perangkat Lunak PVSyst versi 8.0

Total PJU Tenaga Surya (unit)	Jumlah Modul Surya (unit)	Daya (KWp)	Energi yang Dihasilkan (MWh/Tahun)
53	53	18,55	24,84

Berdasarkan Tabel 1, sistem Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya (PJU-TS) yang diterapkan di kawasan PT. X terdiri atas 53 unit PJU-TS yang menggantikan lampu PJU konvensional pada titik-titik yang telah ditentukan dan tersebar di seluruh area pabrik. Implementasi ini dilakukan tanpa mengubah tata letak tiang eksisting, sehingga setiap unit PJU-TS dipasang pada lokasi yang sama dengan sistem sebelumnya. Masing-masing unit dilengkapi dengan

satu modul panel surya sebagai sumber pembangkit energi, sehingga total panel surya yang terpasang juga berjumlah 53 unit.

Secara keseluruhan, total kapasitas daya terpasang sistem PJU-TS tersebut mencapai 18,55 kWp. Nilai ini merupakan hasil akumulasi dari daya nominal setiap modul panel surya yang digunakan pada masing-masing unit. Kapasitas terpasang tersebut mencerminkan potensi maksimum daya yang dapat dihasilkan sistem dalam kondisi standar pengujian (*Standard Test Conditions/STC*), sebelum memperhitungkan berbagai faktor koreksi operasional di lapangan.

Dengan kapasitas tersebut, sistem PJU-TS di kawasan PT. X diperkirakan mampu menghasilkan energi listrik sebesar 24,84 MWh per tahun. Energi yang dibangkitkan dimanfaatkan sepenuhnya untuk memenuhi kebutuhan operasional penerangan jalan di area pabrik, sehingga sistem berfungsi sebagai sumber energi mandiri untuk menunjang aktivitas dan keselamatan operasional pada malam hari. Estimasi produksi energi tahunan ini diperoleh berdasarkan perhitungan potensi radiasi matahari setempat dan spesifikasi teknis modul yang digunakan.

Adapun prediksi total energi aktual yang dapat dihasilkan sistem PJU-TS setelah memperhitungkan berbagai rugi-rugi teknis seperti rugi akibat shading, rugi-rugi pada kabel distribusi, rugi-rugi konversi pada inverter (jika digunakan), serta degradasi performa modul fotovoltaik seiring waktu disajikan pada Tabel 2. Perhitungan ini memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai kinerja sistem dalam kondisi operasional nyata, sehingga dapat digunakan sebagai dasar evaluasi kecukupan energi dan keandalan sistem PJU-TS di kawasan PT. X.

Tabel 2. Prediksi Produksi Energi yang Dihasilkan PJU Tenaga Surya

Tahun	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Produksi Energi (MWh/tahun)	24,84	24,72	24,59	24,47	24,35	24,23	24,10	23,98	23,86	23,74	23,63	23,51	23,39
Tahun	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Total
Produksi Energi (MWh/tahun)	23,27	23,16	23,04	22,93	22,81	22,70	22,58	22,47	22,36	22,25	22,14	22,02	585,14

Berdasarkan Tabel 2, prediksi produksi energi listrik sistem Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya (PJU-TS) di kawasan PT. X menunjukkan bahwa pada tahun pertama pengoperasian, sistem dengan kapasitas terpasang sebesar 18,55 kWp diperkirakan mampu menghasilkan energi listrik sebesar 24,84 MWh per tahun. Nilai ini merepresentasikan estimasi produksi energi pada kondisi awal operasi, ketika performa modul surya masih berada pada tingkat optimal sesuai spesifikasi pabrikan dan belum mengalami penurunan kinerja akibat faktor usia pakai.

Seiring bertambahnya umur operasi, produksi energi tahunan sistem diproyeksikan mengalami penurunan secara bertahap. Penurunan ini mencerminkan adanya degradasi alami pada modul fotovoltaik, yang umumnya terjadi akibat paparan radiasi ultraviolet, fluktuasi temperatur, kelembapan, serta faktor lingkungan lainnya dalam jangka panjang. Meskipun demikian, laju penurunan produksi energi terhitung relatif kecil dan berlangsung secara konsisten setiap tahun, sehingga tidak menyebabkan penurunan performa yang signifikan dalam waktu singkat.

Pada tahun ke-10 masa operasi, produksi energi tahunan diperkirakan mencapai 23,74 MWh, sedangkan pada akhir periode analisis, yaitu tahun ke-25, produksi energi tahunan masih berada pada kisaran 22,02 MWh. Data ini menunjukkan bahwa sistem PJU-TS tetap mampu mempertahankan kinerja yang stabil dalam jangka panjang. Meskipun terjadi degradasi, kapasitas

pembangkitan yang tersisa masih cukup untuk memenuhi kebutuhan energi penerangan jalan di area pabrik PT. X sesuai dengan perencanaan awal sistem.

Secara kumulatif, total energi listrik yang diperkirakan dapat dihasilkan oleh sistem PJU-TS selama 25 tahun masa operasi mencapai 585,14 MWh. Nilai kumulatif ini menggambarkan kontribusi energi jangka panjang yang signifikan dari sistem terhadap keberlangsungan operasional penerangan jalan di kawasan PT. X, sekaligus menunjukkan bahwa sistem dirancang dengan mempertimbangkan aspek keberlanjutan kinerja dan keandalan pasokan energi sepanjang umur layanannya.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi yang telah dilakukan, penerapan sistem Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya (PJU-TS) di kawasan PT. X dapat disimpulkan layak dan mampu beroperasi secara andal dalam memenuhi kebutuhan penerangan jalan di area pabrik. Konversi dari sistem PJU konvensional ke sistem mandiri berbasis energi surya pada 53 titik pemasangan berhasil dirancang tanpa perubahan infrastruktur tiang eksisting, sehingga implementasi dapat dilakukan secara efisien dan terintegrasi dengan kondisi lapangan yang ada.

Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVSyst menunjukkan bahwa total kapasitas terpasang sebesar 18,55 kWp mampu menghasilkan energi listrik sebesar 24,84 MWh pada tahun pertama operasi. Produksi energi ini dinilai cukup untuk memenuhi kebutuhan operasional penerangan jalan, dengan mempertimbangkan keseimbangan antara daya pembangkitan, kapasitas penyimpanan baterai, serta beban lampu LED pada masing-masing unit. Perhitungan juga telah memasukkan parameter teknis dan kondisi radiasi matahari setempat sehingga hasil estimasi mencerminkan kondisi operasional yang realistis.

Dalam jangka panjang, sistem mengalami penurunan produksi energi secara bertahap akibat degradasi alami modul surya. Namun, laju penurunan tersebut relatif kecil dan berlangsung konsisten, sehingga pada tahun ke-25 produksi energi tahunan masih berada pada kisaran 22,02 MWh. Hal ini menunjukkan bahwa sistem PJU-TS tetap mampu mempertahankan kinerja yang stabil dan memenuhi kebutuhan energi penerangan hingga akhir umur rencana operasinya.

Secara kumulatif, total energi yang dihasilkan selama 25 tahun masa operasi diperkirakan mencapai 585,14 MWh. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem PJU-TS di kawasan PT. X memiliki kontribusi energi jangka panjang yang signifikan serta dirancang dengan mempertimbangkan aspek keandalan, keberlanjutan kinerja, dan kontinuitas pasokan energi untuk mendukung operasional penerangan jalan di lingkungan pabrik.

REFERENSI

- Al-Ezzi, A. S., & Ansari, M. N. M. (2022). Photovoltaic solar cells: A review. *Applied System Innovation*, 5(4), 67. <https://doi.org/10.3390/asi5040067>
- Byrnes, L., Brown, C., Foster, J., & Wagner, L. D. (2013). Australian renewable energy policy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 434-442. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.024>

- Demir, E., & Sazak, Ş. (2014). Technical and economic analysis of photovoltaic systems: A case study. *Energy Conversion and Management*, 80, 440–448.
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2023). Photovoltaics report. Fraunhofer ISE.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). Renewable power generation costs in 2022. IRENA.
- Girianna, T., Pradumna, K., Prapulla, N. (2023). Modern smart street light monitoring systems. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 11(6), 1-6. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.55782>
- Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). Photovoltaic degradation rates—An analytical review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 12–29. <https://doi.org/10.1002/pip.1182>
- Kabir, S. M., Himon, M. A. A. O., Mansur, A. A., Ahad, S. A., & Rabby, M. H. R. (2024). An Electronic Economic Controller for automatically adjusting the intensity of Solar-Powered LED Street Lightning Systems in rural areas. *GUB Journal of Science and Engineering*, 9(1), 58–65. <https://doi.org/10.3329/gubjse.v9i1.74885>
- Lund, H. (2007). Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy*, 32(6), 912-919. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.10.017>
- Park, C., & Kim, M. (2021). A Study on the Characteristics of Academic Topics Related to Renewable Energy Using the Structural Topic Modeling and the Weak Signal Concept. *Energies*, 14(5), 1497. <https://doi.org/10.3390/en14051497>
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 83(5), 614–624. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>
- SolarPower Europe. (2024). Global market outlook for solar power 2024-2028. Retrieved from <https://www.solarpowereurope.org>
- Wang, Y., et al. (2023). Life cycle cost analysis of solar energy via environmental externality monetization. *Science of The Total Environment*, 856, 158910. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158910>
- WIPO. (2024). Green technology book: Energy solutions for climate change. World Intellectual Property Organization.
- Yoro, K. O., & Daramola, M. O. (2020). CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In *Advances in Carbon Capture* (pp. 3-28). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00001-3>